ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE AGRESIVIDAD CLIMÁTICA BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y SU IMPLICACIÓN EN LA PERDIDA DE SUELO EN LA CUENCA UBATÉ – SUÁREZ, DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA Y BOYACÁ

MAGNOLIA CEPEDA GARCÍA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
SEDE CENTRAL – BOGOTÁ D.C.
2015

ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE AGRESIVIDAD CLIMÁTICA BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO Y SU IMPLICACIÓN EN LA PERDIDA DE SUELO EN LA CUENCA UBATÉ – SUÁREZ, DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA Y BOYACÁ

MAGNOLIA CEPEDA GÁRCIA

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniera Ambiental

Director
DARWIN MENA RENTERIA
Ingeniero Ambiental y Sanitario

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
SEDE CENTRAL – BOGOTÁ D.C.
2015

Nota de aceptación

_____
_____
_____
_____

_____
Presidente del Jurado

_____
Jurado

_____
Jurado

Bogotá D.C. 07 de Diciembre del 2015

Dedico esta tesis en primer lugar a mis padres quienes me apoyaron incondicionalmente en todo momento y quienes lucharon por hacer este sueño realidad.

A mis profesores por cada una de sus enseñanzas, consejos y apoyo, los cuales hicieron parte de este logro, especialmente al profesor Darwin Mena Rentería, a quien respeto y admiro, espero que su esfuerzo y empeño se vea reflejado en esta tesis.

A mis compañeros de universidad con quienes compartí una etapa importante de mi vida y me dieron su apoyo cuando lo necesite sin pedir nada a cambio.

Finalmente quiero agradecer a todas las personas que de una u otra manera estuvieron pendientes a lo largo de este proceso.

CONTENIDO

RESUMEN 10

1. INTRODUCCIÓN 11

2. OBJETIVOS 12

2.1. OBJETIVO GENERAL 12
2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS 12

3. MARCO CONTEXTUAL 13

3.1. DELIMITACION DE LA CUENCA 13
3.2. DESCRIPCÓN MORFOMETRICA 15
3.3. CLIMATOLOGÍA E HIDROLOGIA 15
3.4. GEOLOGÍA 16
3.5. CONDICIONES SOCIOECONOMICAS 17
3.5.1. SISTEMA ADMINISTRATIVO 17
3.5.2. SISTEMA SOCIAL 17
3.6. ASPECTO ECONOMICO 18

4. MARCO TEORICO Y CONCEPTUAL 19

4.1. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMATICO 19
4.1.1. ESCENARIOS 19
4.1.2. RCP 19
4.1.3. QUINTO INFORME DE EVALUACIÓN – AR5 20
4.1.4. CAMBIO CLIMÁTICO 20
4.1.5. VARIABILIDAD CLIMÁTICA 21
4.2. INDICES DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA 21
4.2.1. ÍNDICE DE FOURNIER - IF 21
4.2.2. ÍNDICE MODIFICADO DE FOURNIER - IMF 22
4.2.3. ÍNDICE DE CONCENTRACIÓN DE PRECIPITACIONES - ICP 22
4.3. ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELOS – USLE 23
4.3.1. FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA - R 24
4.3.2. FACTOR DE EROSIONABILIDAD DEL SUELO - K 24
4.3.3. FACTOR DE LONGITUD Y GRADO DE PENDIENTE - LS 25
4.3.4. FACTOR DE COBERTURA DE SUELO – C 25
4.3.5. FACTOR DE PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN – P 25

4.4. MÉTODO DE INTERPOLACIÓN 25
4.4.1. IDW (DISTANCIA INVERSA PONDERADA) 25

5. DISEÑO METODOLOGICO 26

5.1. INFORMACIÓN GENERAL 26
5.1.1. INFORMACIÓN SOBRE LOS ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO 26
5.1.2. SELECCIÓN DE LAS ESTACIONES 26
5.1.3. COMPORTAMIENTO DE LAS PRECIPITACIONES 26
5.2. ÍNDICE DE EROSIVIDAD DE LAS LLUVIAS 27
5.2.1. VARIABILIDAD CLIMÁTICA 28
5.3. ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELOS – USLE 29
5.3.1. FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA - R 30
5.3.2. FACTOR DE EROSIONABILIDAD DEL SUELO - K 31
5.3.3. FACTOR DE LONGITUD Y GRADO DE PENDIENTE - LS 33
5.3.4. FACTOR DE COBERTURA Y MANEJO DE SUELOS - C 33
5.3.5. FACTOR DE PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN – P 34

6. RESULTADOS 35

6.1. COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN 35
6.1.1. SELECCIÓN DE ESTACIONES 35
6.1.2. PRECIPITACION ACTUAL 36
6.1.3. PRECIPITACIÓN FUTURA 38
6.2. ESTIMACIÓN DE LOS INDICES DE AGRESIVIDAD CLIMATICA 43
6.2.1. ÍNDICES ACTUALES 43
6.2.3. INDICES FUTUROS 48
6.2.4. ÍNDICE DE CONCENTRACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN 61
6.3. VARIABILIDAD CLIMATICA EN LA CUENCA UBATÉ – SUÁREZ 62
6.3.1. VARIABILIDAD CLIMATICA ACTUAL 62
6.3.2. VARIABILIDAD CLIMATICA FUTURA 66
6.4. ECUACIÓN UNIVERSAL DE PERDIDA DE SUELO – USLE 77
6.4.1. FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA – R 77
6.4.2. FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA APLICADO A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA ACTUAL 82
6.4.3. FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA APLICADO A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA FUTURA 84
6.4.2. FACTOR DE EROSIONABILIDAD DEL SUELO - K 86
6.4.3. FACTOR DE LONGITUD Y PENDIENTE DEL TERRENO - LS 88
6.4.4. FACTOR DE COBERTURA Y MANEJO DE LA VEGETACIÓN – C 89

6.4.5. FACTOR DE PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN - P 91
6.5. APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PERDIDA DE SUELO 91
6.5.2. NIVELES DE PERDIDA DE SUELO EN LA CUENCA APLICADA A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA ACTUAL 92
6.5.3. NIVELES DE PERDIDA DEL SUELO EN LA CUENCA APLICADA A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA FUTURA 94

7. ANALISIS DE RESULTADOS 96

7.4. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS PRECIPITACIONES 96
7.5. ANÁLISIS DE LOS ÍNDICES DE AGRESIVIDAD CLIMATICA 99
7.6. ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA ACTUAL 100
7.7. ANÁLISIS VARIACIÓN CLIMÁTICA FUTURA 100
7.8. ANÁLISIS APLICACIÓN DE ÍNDICE DE AGRESIVIDAD APLICADO A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA 101
7.9. ANALISIS APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PERDIDA DE SUELO 102

8. CONCLUSIONES 104

9. RECOMENDACIONES 107

10. BIBLIOGRAFIA 108

ANEXO I 111

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Cuencas de Tercer Orden pertenecientes a la Cuenca Ubaté - Suárez 14
Tabla 2. Parámetros Morfométricos de la Cuenca Ubaté - Suárez 15
Tabla 3. Actividades Económicas de la Cuenca Ubaté - Suárez 18
Tabla 4. RCP vs Forzamiento Radioactivo 19
Tabla 5: Clasificación Índice de Fournier 21
Tabla 6: Clasificación Índice Modificado de Fournier 22
Tabla 7: Clasificación índice de concentración de las precipitaciones 23
Tabla 8. Clasificación de Perdida del Suelo 24
Tabla 9. Clasificación EI30 en función del IMF 31
Tabla 10. Relación Textura del Suelo - Permeabilidad 32
Tabla 11. Código USLE para los tipos de Estructura del Suelo 32
Tabla 12. Código USLE para las categorías de Permeabilidad 32
Tabla 13. Relación Cobertura Vegetal y Factor C 34
Tabla 14. Estaciones Seleccionadas aplicación del índice de Agresividad Climática 35
Tabla 15. Valores del Índice de Concentración de la precipitación para los diferentes escenarios 62
Tabla 16. Promedio Mensual de la Precipitación (mm) para cada Evento 64
Tabla 17. Precipitación Superior; Periodo 2011 - 2040 67
Tabla 18. Precipitación Inferior; Periodo 2011 - 2040 68
Tabla 19. Precipitación Superior; Periodo 2040 - 2070 71
Tabla 20. Precipitación Inferior; 2040 - 2070 71
Tabla 21. Precipitación Superior; Periodo 2070 - 2100 74
Tabla 22. Precipitación Inferior; Periodo 2070 - 2100 74
Tabla 23. Años en los que se presentaron fenómenos del Niño y la Niña Clasificados como muy fuertes 77
Tabla 24. Años Seleccionados para el Análisis del Factor R 80
Tabla 25. Precipitación Superior a la Promedio para cada uno de los periodos bajo los diferentes Escenarios de Cambio Climático 80
Tabla 26. Precipitación Inferior a la Promedio para cada uno de los periodos bajo los diferentes Escenarios de Cambio Climático 80
Tabla 27. Relación Factor C Porcentaje de Área 89
Tabla 28. Variación de la Precipitación para cada uno de los periodos bajo los diferentes Escenarios de Cambio Climático 97
Tabla 29. Factores USLE 102

LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1. Precipitación Media Mensual de la Cuenca Ubaté - Suárez 16
Grafica 2. Duración e Intensidad del Evento El Niño y La Niña 63
Grafica 3. Precipitación Promedio para cada uno de los Eventos 65

Grafica 4. Variación Porcentual de los eventos frente a la normal 65
Grafica 5. Precipitaciones Proyectadas para el Periodo 2011 – 2040; RCP 26 66
Grafica 6. Cantidad de meses en el año con Precipitaciones Superiores e Inferiores a la Promedio Periodo 2011 – 2040; RCP 26 67
Grafica 7. Comportamiento Promedio de la Precipitación para cada uno de los Escenarios de Cambio Climático, Periodo 2011 - 2040 69
Grafica 8. Variación Porcentual de la Precipitación para cada uno de los Escenarios de Cambio Climático, Periodo 2011 - 2040 70
Grafica 9. Comportamiento Promedio de la Precipitación para cada uno de los Escenarios de Cambio Climático, Periodo 2040 - 2070 72
Grafica 10. Variación Porcentual de la Precipitación para cada uno de los Escenarios de Cambio Climático, Periodo 2040 - 2070 73
Grafica 11. Comportamiento Promedio de la Precipitación para cada uno de los Escenarios de Cambio Climático, Periodo 2070 - 2100 75
Grafica 12. Variación Porcentual de la Precipitación para cada uno de los Escenarios de Cambio Climático, Periodo 2070 - 2100 76
Grafica 13. Precipitación mensual de los años clasificados como Muy Fuerte para el Fenómeno del Niño 78
Grafica 14. Precipitación mensual de los años clasificados como muy fuertes para el Fenómeno de la Niña 79
Grafica 15. Variación Temporal de la Precipitación para cada uno de los escenarios de Cambio Climático 96
Grafica 16. Precipitación Bajo Escenarios de Cambio Climático para cada uno de los periodos 96
Grafica 17. Cambio de porcentaje de la precipitación 2011 – 2100 Ensamble REA 98
Grafica 18. Precipitación Anual: 1971 - 2010 y 2011 - 2100 100
Grafica 19. Relación del Porcentaje de Área para el Grado de Perdida de Suelo 103
Grafica 1-I. Precipitaciones Proyectadas para el Periodo 2011 – 2040; RCP 26 111
Grafica 2-I. Cantidad de meses en el año con Precipitaciones Superiores e Inferiores a la Promedio Periodo 2011 – 2040; RCP 26 112
Grafica 3-I. Precipitaciones Proyectadas para el Periodo 2011 – 2040; RCP 45 113
Grafica 4-I. Cantidad de meses en el año con Precipitaciones Superiores e Inferiores a la Promedio Periodo 2011 – 2040; RCP 45 113
Grafica 5-I. Precipitaciones Proyectadas para el Periodo 2011 – 2040; RCP 60 114
Grafica 6-I. Cantidad de meses en el año con Precipitaciones Superiores e Inferiores a la Promedio Periodo 2011 – 2040; RCP 60 115
Grafica 7-I. Precipitaciones Proyectadas para el Periodo 2011 – 2040; RCP 85 116
Grafica 8-I. Cantidad de meses en el año con Precipitaciones Superiores e Inferiores a la Promedio Periodo 2011 – 2040; RCP 85 116
Grafica 9-I. Precipitaciones Proyectadas para el Periodo 2040 – 2070; RCP 26 117
Grafica 10-I. Cantidad de meses en el año con Precipitaciones Superiores e Inferiores a la Promedio Periodo 2040 – 2070; RCP 26 118

Grafica 11-I. Precipitaciones Proyectadas para el Periodo 2040 – 2070; RCP 45 119
Grafica 12-I. Cantidad de meses en el año con Precipitaciones Superiores e Inferiores a la Promedio Periodo 2040 – 2070; RCP 45 119
Grafica 13-I. Precipitaciones Proyectadas p l Periodo 2040 – 2070; RCP 60 120
Grafica 14-I. Cantidad de meses en el año recipitaciones Superiores e Inferiores a la Promedio Periodo 2040 – 2070; RCP 60 121
Grafica 15-I. Precipitaciones Proyectadas para el Periodo 2040 – 2070; RCP 85 122
Grafica 16-I. Cantidad de meses en el año con Precipitaciones Superiores e Inferiores a la Promedio Periodo 2040 – 2070; RCP 85 122
Grafica 17-I. Precipitaciones Proyectadas para el Periodo 2070 – 2100; RCP 26 123
Grafica 18-I. Cantidad de meses en el año con Precipitaciones Superiores e Inferiores a la Promedio Periodo 2070 – 2100; RCP 26 124
Grafica 19-I. Precipitaciones Proyectadas para el Periodo 2070 – 2100; RCP 45 125
Grafica 20-1. Cantidad de meses en el año con Precipitaciones Superiores e Inferiores a la Promedio Periodo 2070 – 2100; RCP 45 126
Grafica 21-I. Precipitaciones Proyectadas para el Periodo 2070 – 2100; RCP 60 127
Grafica 22-I. Cantidad de meses en el año con Precipitaciones Superiores e Inferiores a la Promedio Periodo 2070 – 2100; RCP 60 127
Grafica 23-I. Precipitaciones Proyectadas para el Periodo 2070 – 2100; RCP 85 128
Grafica 24-I. Cantidad de meses en el año con Precipitaciones Superiores e Inferiores a la Promedio Periodo 2070 – 2100; RCP 85 129

LISTA DE MAPAS

Mapa 1. Ubicación de la Cuenca Ubaté - Suárez 13
Mapa 2. Distribución Espacial de las Estaciones Seleccionadas 36
Mapa 3. Comportamiento de la Precipitación Actual 37
Mapa 4. Comportamiento de la Precipitación Futura - RCP 26 38
Mapa 5. Comportamiento de la Precipitación Futura - RCP 45 40
Mapa 6. Comportamiento de la Precipitación Futura - RCP 60 41
Mapa 7. Comportamiento de la Precipitación Futura - RCP 85 42
Mapa 8. Índice de Fournier Periodo Actual (1971 - 2010) 43
Mapa 9. Índice de Fournier Modificado Periodo Actual (1971 - 2010) 44
Mapa 10. IMF para el Año 1997 45
Mapa 11. IMF para el año 2008 46
Mapa 12. Índice de Concentración de la Precipitación Periodo Actual (1971 - 2010) 47
Mapa 13. Variación Espacial del Índice de Fournier bajo el Escenario de Cambio Climático RCP - 26 49
Mapa 14. Variación Espacial del Índice de Fournier bajo el Escenario de Cambio Climático RCP - 45 50
Mapa 15. Variación Espacial del Índice de Fournier bajo el Escenario de Cambio Climático RCP - 60 51

Mapa 16. Variación Espacial del Índice de Fournier bajo el Escenario de Cambio Climático RCP - 85 52
Mapa 17. Variación Espacial del Índice de Fournier Promedio 53
Mapa 18. Variación Espacial del Índice Modificado de Fournier bajo el Escenario de Cambio Climático RCP - 26 54
Mapa 19. Variación Espacial del Índice Modificado de Fournier bajo el Escenario de Cambio Climático RCP - 45 55
Mapa 20. Variación Espacial del Índice Modificado de Fournier bajo el Escenario de Cambio Climático RCP - 60 56
Mapa 21. Variación Espacial del Índice Modificado de Fournier bajo el Escenario de Cambio Climático RCP - 85 57
Mapa 22. Variación Espacial del Índice Modificado de Fournier Promedio 58
Mapa 23. IMF para el año 2015 59
Mapa 24. IMF para el año 2018 60
Mapa 25. Variación espacial del Índice de Concentración de la Precipitación Futura 61
Mapa 26. Factor de Erosividad de la Lluvia para el año 1997 82
Mapa 27. Factor de Erosividad de la Lluvia para el año 2008 83
Mapa 28. Factor de Erosividad de la Lluvia para el año 2015 84
Mapa 29. Factor de Erosividad de la Lluvia para el año 2018 85
Mapa 30. Factor de Erodabilidad del Suelo - K 87
Mapa 31. Factor de Longitud y Grado de Pendiente - LS 88
Mapa 32. Factor de Cobertura y Manejo de Vegetación - C 90
Mapa 33. Distribución Espacial de los Niveles de Perdida de Suelo año 1997 92
Mapa 34. Distribución Espacial de los Niveles de Perdida de Suelo año 2008 93
Mapa 35. Distribución Espacial de los Niveles de Perdida de Suelo año 2015 94
Mapa 36. Distribución Espacial de los Niveles de Perdida de Suelo año 2018 95
Mapa 37. Cambio de la precipitación media (1986 - 2005 a 2081 - 2100) 98

RESUMEN

El presente estudio tiene como propósito evaluar la agresividad y la concentración de la precipitación en la Cuenca Ubaté – Suárez y su comportamiento futuro teniendo en cuenta los escenarios de cambio climático, establecidos por el Panel Intergubernamental Sobre el Cambio Climático – IPCC y adoptados en Colombia por el Instituto Nacional de Hidrología, meteorología y estudios ambientales – IDEAM para los periodos 2011 – 2040; 2040 – 2070; 2070 – 2100, sumado a esto se realizara un análisis de los mismos datos en términos de variabilidad climática, a partir de datos de precipitación de estaciones pluviométricas ubicadas en el área de influencia de la Cuenca Hidrográfica Ubaté – Suárez del Departamento de Cundinamarca y Boyacá, finalmente se realizó un análisis de la influencia del índice de agresividad sobre la pérdida del suelo en la cuenca.

Los índices seleccionados para la determinación de la agresividad climática, son los el índice de Concentración de las Precipitaciones – ICP, índice de Fournier – IF, índice de Fournier Modificado – IMF, los cuales determinaran los diferentes comportamientos de las precipitaciones y posteriormente se seleccionaran valores específicos para la interpretación del índice de erosividad de la lluvia – R, aplicable a la ecuación universal de perdida de suelo – USLE, los demás factores involucrados en la pérdida del suelo son el Factor de erodabilidad del suelo – K; el factor longitud y pendiente del terreno – LS; el factor de cobertura y manejo de la vegetación; y el factor de prácticas de conservación los cuales se calcularon a partir de información secundaria.

De acuerdo con el análisis de resultados, se concluyó que tanto la precipitación como los índices de agresividad climática son mayores para el periodo actual (1971-2010), con respecto a los datos proyectados en los escenarios de cambio climático, por otra parte se observó que tanto para el escenario actual, como para los escenarios futuros se presenta un IMF superior a los 400 mm, limite a partir del cual se clasifica como una agresividad muy alta, a pesar de los altos niveles de erosividad de la lluvia, reflejados por el IMF y por consiguiente el EI_{30}, para los años estudiados más del 40% de la cuenca presenta una pérdida de suelo ligera, lo que indica que tanto la cobertura vegetal, como la erodabilidad del suelo y la pendiente impiden que la erosividad de la lluvia genere una mayor pérdida de suelo en toda la cuenca, aunque es importante resaltar que en algunas zonas de la cuenca se presenta una pérdida de suelo muy elevada, en donde las variables anteriormente mencionadas favorecen el proceso erosivo.

1. INTRODUCCIÓN

“En la región Cundinamarca, la variabilidad climática interanual ha venido ocasionando disminución en la temperatura de hasta 0,5°C y aumento en la precipitación de hasta 60% durante el fenómeno de la niña, la ocurrencia de estos fenómenos parece estar relacionada con la mayor ocurrencia de eventos de emergencia y desastres expresados en deslizamientos, inundaciones, incendios forestales, vendavales y granizadas” [1].

En la actualidad se han venido intensificando fenómenos ambientales, específicamente en la cuenca Ubaté – Suarez, uno de los impactos y riesgos ambientales más importantes identificados es la erosión, esto debido a que las unidades morfológicas se encuentran sometidas a procesos degradacionales y agradacionales tales como, Erosión hídrica (EH) que varía desde laminar hasta surcos y cárcavas; Procesos de remoción en masa, considerados como deslizamientos; procesos aluviales agrupados en erosión lateral y de zonas de desborde e inundación [2], trayendo como consecuencia, perdida de suelo aptos para la agricultura, perdida en la calidad del relieve, perdida en la capacidad de reserva de agua, además de esto el proceso se ve favorecido en sitios frágiles por presión de pastoreo y malas prácticas de manejo [3]

Con el fin de tener un marco de referencia que permita, Comparar el comportamiento futuro de la precipitación y los demás índices con una línea base se realizara el procesamiento y análisis a las bases de datos del periodo actual denominado entre 1971 – 2010 para las estaciones seleccionadas, teniendo en cuenta la posible modificación en las condiciones medias del clima en la región y su implicación dentro de la perdida de suelo.

Finalmente se llevara cabo un análisis de la pérdida del suelo en la cuenca, a partir de la Ecuación Universal de Pérdida del Suelo – USLE, basado en mapas de cobertura, uso de suelo y topografía, entre otras. Pues es sabido que la erosión del suelo es particularmente aguda en los trópicos debido a la convergencia circunstancial de mayor agresividad climática, entre otros factores [4].

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Estimar el índice de agresividad climático bajo escenarios de cambio climático en la cuenca Ubaté – Suárez en el departamento de Cundinamarca.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Analizar las tendencias futuras de las precipitaciones a partir los escenarios de cambio climático adoptados para Colombia en la Cuenca Ubaté – Suárez en el departamento de Cundinamarca.

Determinar el comportamiento futuro de las precipitaciones mediante la aplicación de los índices de Fournier, Modificado de Fournier y concentración de la precipitación.

Aplicar el índice de agresividad para la estimación de la pérdida del suelo a partir del modelo de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos – USLE.

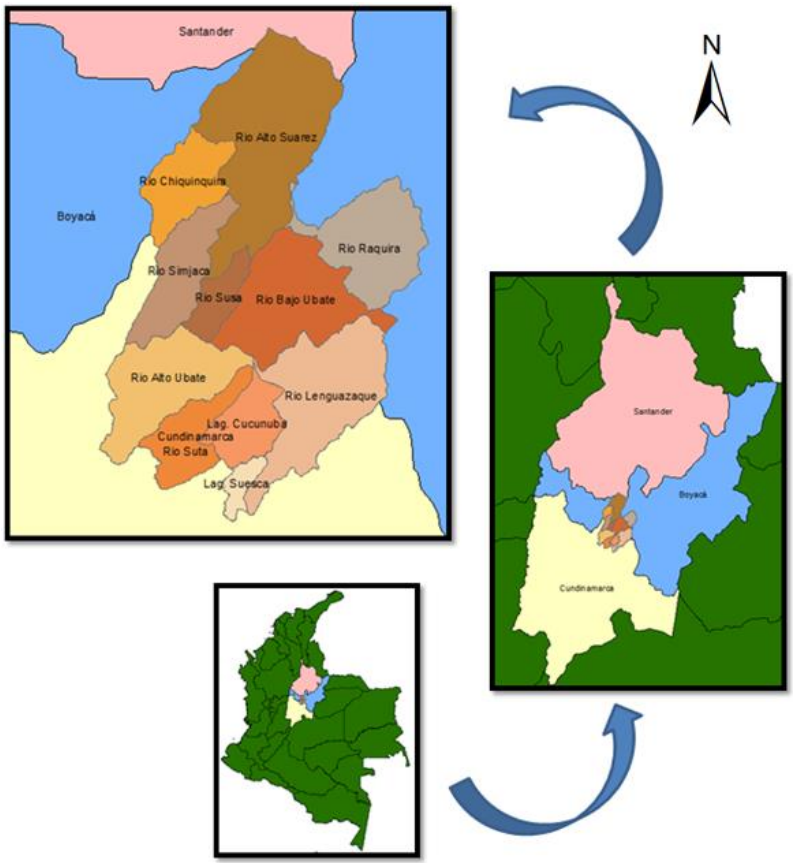
3. MARCO CONTEXTUAL

3.1. DELIMITACION DE LA CUENCA

Localización

“La cuenca se ubica al norte del departamento de Cundinamarca y al Suroccidente de Boyacá, como se muestra en mapa 1, el río Ubaté nace en el municipio de Carmen de Carupa, por la confluencia de los ríos Hato y la Playa y sus principales afluentes son Suta y Lenguazaque y alcanza un área de drenaje de 624,91 Km^2, es el principal afluente de la laguna de Fúquene, eje de recolección de agua en el valle, la laguna de Fúquene, tiene un área superficial aproximada de 30 Km^2, la laguna drena solamente al río Suárez, que fluye hacia el norte” [1].

Mapa 1. Ubicación de la Cuenca Ubaté - Suárez



Fuente: Elaboración propia con información de la CAR

La cuenca de Ubaté–Suárez corresponde a la cuenca de segunda orden, localizada en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá, en el altiplano Cundiboyacense, cuenta con 11 cuencas de tercer orden y abarca 15 municipios [1].

Tabla 1. Cuencas de Tercer Orden pertenecientes a la Cuenca Ubaté - Suárez

Nombre de la Cuenca	Número de la Cuenca	Municipios
LAGUNA DE SUESCA	2401-01	Suesca, Cucunubá
RÍO ALTO UBATÉ	2401-02	Carmen de Carupa, Ubaté
RÍO SUTA	2401-03	Tausa, Sutatausa, Ubaté
LAGUNA DE CUCUNUBA	2401-04	Cucunubá, Sutatausa, Ubaté, Lenguazaque
RÍO LENGUAZAQUE	2401-05	Lenguazaque, Guachetá, Sueca, Cucunubá
RÍO BAJO UBATÉ	2401-06	Guachetá, Fuquene, Ráquira, Sam Miguel de Sema
RÍO SUSA	2401-07	Susa
RÍO SIMIJACA	2401-08	Simijaca, Carmen de Carupa, Susa
RÍO CHIQUINQUIRÁ	2401-09	Caldas, Chiquinquirá
RÍO ALTO SUÁREZ	2401-10	Saboya, Chiquinquirá, San Miguel de Sema, Simijaca, Susa
RÍO RÁQUIRA	2401-11	Sam Miguel de Sema, Ráquira

Fuente: CAR [1].

La cuenca Ubaté – Suárez, según la clasificación del IDEAM pertenece a la Zona Hidrográfica del Magdalena – Cauca, Cuenca Hidrográfica del Magdalena y a la Subcuenca del Río Sogamoso, según esta clasificación le corresponde la codificación 2401, las cuencas de tercer orden que pertenecen a la cuenca Ubaté Suárez, se observan en la tabla 1, junto con sus correspondientes municipios.

3.2. DESCRIPCÓN MORFOMETRICA

Para la estimación de estos parámetros se tomaron en cuenta datos obtenidos a partir del software ArcGis y comparados con los datos encontrados en el POMCA de la cuenca.

Tabla 2. Parámetros Morfométricos de la Cuenca Ubaté - Suárez

Parámetro	Valor
Área	1969 Km2
Perímetro	244,55 Km
Longitud de la Cuenca	51,62 Km
Longitud del Cauce Principal	95,95 Km
Altitud Máxima	3750 msnm
Altitud Mínima	2400 msnm
Factor Forma	0,34
Coeficiente Compacidad	1,66
Índice Asimétrico	1.28
Pendiente	11,05%

Fuente: Elaboración propia con información de la CAR [1]

A partir de los parámetros Morfométricos como el factor forma y el índice de compacidad se puede concluir que la cuenca es achatada con baja susceptibilidad a la formación de crecientes, por otra parte el índice asimétrico nos indica que la cuenca tiende a ser homogénea, es decir que la red de drenajes no se encuentra recargada hacia una de las vertientes, finalmente la pendiente nos indica que la cuenca presenta un relieve accidentado.

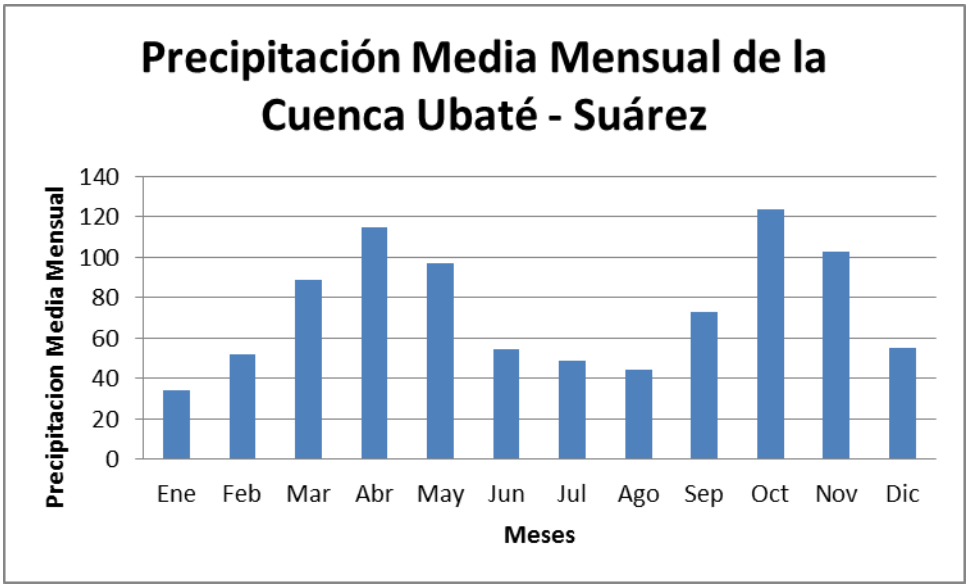
3.3. CLIMATOLOGÍA E HIDROLOGIA

Para la caracterización de la climatología en la cuenca se recurrió a información secundaria para algunos parámetros por ejemplo para la determinación de la temperatura la cual es constante durante casi todo el año, con una media mensual de 12 – 13,2 °C, así mismo la humedad relativa tiene poca variación durante el año, presentando una variación media mensual de 70,2 – 76,4 %, en donde los valores más elevados se presentan en los meses más lluviosos. Por su parte la evaporación media mensual está en el rango de 66,7 – 96,6 mm, la cual tampoco presenta una variación considerable durante el año, por otra parte la cuenca

presenta un clima semi – húmedo en la parte norte y en la zona a la laguna de Fuquene y un clima frio semi-árido en la zona de las lagunas de Cucunubá y Palacio y parte baja de los Ríos Ubaté y Suárez [5]. Finalmente la precipitación media de la cuenca se calculó como 914 mm.

A partir los datos obtenidos en el presente trabajo y comparados con los resultados adquiridos en el POMCA, se establece que el comportamiento de la precipitación es de tipo bimodal, en donde los meses en los que se presentan sus máximas son abril y octubre, siendo el mes de octubre el de mayor intensidad, mientras que el mes con la precipitación mínima corresponde a enero.

Grafica 1. Precipitación Media Mensual de la Cuenca Ubaté - Suárez



Fuente: Elaboración propia con Información de la CAR

A partir de la información suministrada por el POMCA, la cuenca presenta valores bajos de escorrentía que oscilan entre los 200 mm y los 70 mm/año, los mínimos están en las zonas planas aledañas a las lagunas de Cucunubá y Palacios, estos valores se explican debido a las bajas precipitaciones y a la gran demanda de agua para las labores agropecuarias. Por otra parte el coeficiente de escorrentía supera el 70% en algunas zonas [1].

3.4. GEOLOGÍA

La cuenca se encuentra localizada hacia la parte central de la cordillera oriental, y produce un paisaje llano a ligeramente ondulado, en medio de una condición montañosa, hacia el oriente y el occidente de la cuenca, se presentan elevaciones

superiores a los 2800 msnm, lo que significa que presentan una condición de clima de paramo. Por otra parte se han identificado básicamente cuatro tipos de geo formas de acuerdo a su posición altitudinal composición litológica y estructuras geológicas [1]:

- Montaña
- Altiplanicie
- Piedemonte
- Valle o Planicie Centra.

“De acuerdo con las condiciones y características de los materiales naturales, estos se encuentran sometidos a procesos degradacionales y agradacionales”:

- Erosión Hídrica (EH) que varía desde difusa a concentrada, y de laminar hasta surcos y de cárcavas.
- Procesos de remoción en masa, considerados como deslizamientos y flujos.
- Procesos aluviales agrupados en erosión lateral y de zonas de desborde e inundación.

“El principal proceso que afecta en diferentes intensidades es la erosión hídrica (EH), de tipo laminar difuso y con escurrimiento, este fenómeno se produce por el impacto del agua sobre la superficie del terreno y se relaciona con la precipitación, tanto por la intensidad, como por la distribución temporal [1].

3.5. CONDICIONES SOCIOECONOMICAS

3.5.1. Sistema Administrativo

“Los municipios que conforman la cuenca Ubaté – Suárez, son quince (15), de los cuales diez (10) pertenecen al departamento de Cundinamarca y los cinco (5) restantes al departamento de Boyacá. En cuanto a la autoridad ambiental, es responsabilidad de la Corporación Ambiental de Cundinamarca CAR, de acuerdo a la Ley 99 de 1993 del ministerio del Medio ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial” [1].

3.5.2. Sistema Social

La población total del área de estudio es de 167.476 habitantes, según DANE 1993, de los cuales 63.262 habitantes corresponde al área urbana con un porcentaje del 37% y el área rural con 104.214 habitantes, alcanzando el 63% [1].

“Por otra parte se evidenció que en las zonas rurales de la cuenca Ubaté – Suárez, se presenta un alto índice de migración de la población hacia los centros urbanos de Ubaté y Chiquinquirá, por las pocas oportunidades para mejorar la calidad de vida de los núcleos familiares. Con relación a las viviendas especialmente del sector rural, se evidencia la carencia de los servicios básico, como el tratamiento de agua para consumo y manejo de excretas, la disposición inadecuada de los residuos sólidos, entre otras” [1].

3.6. ASPECTO ECONOMICO

Dentro de las actividades económicas que se presentan en la cuenca se encuentran las siguientes:

Tabla 3. Actividades Económicas de la Cuenca Ubaté - Suárez

AGRICOLAS	- Cultivos transitorios - Cultivos semipermanentes - Cultivos permanentes
PECUARIO	- Pastoreo extensivo tradicional - Pastoreo extensivo mejorado - Pastoreo intensivo - Sistema de cofinanciamiento
EXTRCTIVOS	- Minería (materias pétreas, metales industriales, preciosos, hidrocarburos) - Aprovechamiento de recursos hidrológicos naturales - Aprovechamiento vegetación nativa
INDUSTRIA Y AGROINDUSTRIA	- Pequeña industria - Mediana y gran industria - Pequeña, mediana y gran agroindustria
COMERCIO	- Pequeños establecimientos - Medianos y grandes establecimientos

Fuente: CAR [1].

“La actividad más dominante e importante de la cuenca es la agropecuaria. Destacándose su actividad pecuaria con dominio de la ganadería bovina, tanto por su extensión como por su grado de intensidad de desarrollo de la cuenca. Existen otras explotaciones pecuarias entre ellas la porcina, avícola u ovicola, como las más visibles entre las otras actividades pecuarias” [1].

4. MARCO TEORICO Y CONCEPTUAL

4.1. ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMATICO

4.1.1. Escenarios

Según el Panel intergubernamental de Cambio Climático – IPCC, los escenarios son descripciones coherentes y consistentes de cómo el sistema climático de la tierra puede cambiar en el futuro.

4.1.2. RCP

Caminos representativos de concentración (RCPs, por sus siglas en ingles), "en donde la palabra representativo significa que cada RCP proporciona sólo uno de los muchos posibles escenarios que pueden conducir a las características del forzamiento radiactivo. El termino camino hace hincapié en que no solo los niveles de concentración en el largo plazo son de interés, sino también la trayectoria que ha tomado en el tiempo para llegar a ese resultado. En resumen, el nuevo proceso en paralelo comienza con la selección de cuatro RCPs, cada uno de los cuales corresponde a un camino de forzamiento radioactivo específico" [6]. "Los RCP's no pueden ser tratados como un conjunto coherente de lógica interna. Por ejemplo, el RCP 85 no puede ser usado como un escenario referente de no – política climática con respecto a los otros RCP's pues cada RCP contiene una serie de suposiciones socioeconómicas, tecnológicas y biofísicas diferentes" [6].

Tabla 4. RCP vs Forzamiento Radioactivo

Nombre	Forzamiento radiactivo	Concentración	Forma de itinerario
VCR 8,5	> 8,5 W/m2 en 2010	> - 1370 CO2 - eq en 2100	En Aumento
VCR 6	Estabilización en ~ 6 W/m2 a partir de 2100	~ 850 CO2 - eq (estabilización a partir de 2100)	Estabilización sin translimitaciones
VCR 4,5	Estabilización en ~ 4,5 W/m2 a partir de 2100	~ 650 Co2 - eq (estabilización a partir de 2100)	Estabilización sin translimitaciones
VCR 3 - CD	Máximo a ~3 W/m2 antes de 2100; disminución posterior	Máximo a ~ 490 CO2 - eq antes de 2100; disminución posterior	Culminación seguida de disminución

Fuente: [6].

4.1.3. Quinto informe de Evaluación – AR5

Se considera que los informes de evaluación constituyen los principales informes que prepara el IPCC, por su carácter global y profundo sobre el estado del conocimiento científico, técnico y socioeconómico del cambio climático, sus causas, sus potenciales impactos y las estrategias de respuesta [6].

Este informe tiene como principales aportaciones respecto a los anteriores:

- Mejor tratamiento de la información regional mediante la evaluación especifica de fenómenos climáticos claves (monzones, el Niño, ciclones, etc.)
- Evaluaciones de los procesos relacionados con las nubes y los aerosoles.
- Evaluación total del cambio en el nivel del mar.
- Evaluación total del ciclo del carbono.
- Proyecciones de cambio climático para el corto y largo plazo.
- Atlas de proyecciones climáticas regionales.

“En términos generales, se puede decir que, en lo referente a las bases físicas, el AR5 conforma y refuerza, los resultados del anterior informe. Se basa en nuevas evidencias extraídas de un mayor número de observaciones, modelos climáticos mejorados, una mejor comprensión de los procesos y retroalimentación del sistema climático, y un mayor número de proyecciones de cambio climático” [6].

4.1.4. Cambio Climático

Se define como una importante variación estadística en el estado medio del clima, que persiste durante un periodo prolongado (normalmente decenios o incluso más). El cambio climático se puede deber a procesos naturales internos o a cambios del forzamiento externo, o bien a cambios persistentes antropogénicos en la composición de la atmosfera o en el uso del suelo [6].

Por otra parte la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático – CMCC, es su artículo 1, define ‘cambio climático’ como: “ un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmosfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo compatibles”

4.1.5. Variabilidad Climática

Para la CMCC la distinción entre 'variabilidad climática' y el 'cambio climático' es que este último es atribuido a actividades humanas que alteran la composición atmosférica, mientras que la variabilidad climática se atribuye a causas naturales. Para otros autores se refiere a las fluctuaciones observadas en el clima durante periodos de tiempo relativamente corto en donde se presentan fenómenos de variabilidad climática tales como el fenómeno del Niño y la Niña [7].

4.2. INDICES DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA

La agresividad climática es un fenómeno que se define como el efecto erosivo de las precipitaciones sobre los suelos. Adicionalmente, podría señalarse que el concepto de agresividad, está relacionado con la intensidad mensual de lluvia, que muestra un año cualquiera. Para conocer que tan severos pueden llegar a ser estos efectos, se hace necesaria la utilización de indicadores de agresividad climática, los que permiten determinar los impactos de las precipitaciones sobre un área geográfica específica [8].

4.2.1. Índice de Fournier - IF

Fournier propuso un Índice de Agresividad Climática (IF), como alternativa a los índices planteados por otros autores, donde la obtención y cálculos son muy complejos. Este índice muestra una alta correlación con la cantidad de sedimentos arrastrados por la escorrentía [9]. El cálculo se hace en estaciones que tengan datos representativos de la zona a estudiar y la expresión es la siguiente:

$$IF_j = \frac{P_{\max j}{}^2}{P_m} \qquad (1)$$

Dónde:

IFj = Índice de Fournier, para el año j.

$P_{max\ j}$ = Precipitación correspondiente al mes más lluvioso del año j.

P_m = Precipitación media anual.

Tabla 5: Clasificación Índice de Fournier

Clase	IF	Agresividad
1	50 <	Muy Bajo
2	50 – 100	Bajo
3	100 – 150	Moderado
4	150 – 200	Alto
5	200 >	Muy Alto

Fuente: Mendoza M. [9]

4.2.2. Índice modificado de Fournier - IMF

Arnoldus propuso una modificación del IF, en la que además de considerar la precipitación mensual del mes más húmedo, agrega la precipitación de cada mes, por lo que el índice queda definido de la siguiente manera [9]:

$$IMF_j = \frac{\sum_{i=1}^{12} (P_{ij})^2}{P_m} \qquad (2)$$

Dónde:
IMFj = Índice modificado de Fournier, para el año j.
P_{ij} = Precipitación mensual del mes i (mm), del año j.
P_m = Precipitación media anual (mm).

La clasificación del índice modificado de Fournier que se presentan en la tabla 6, fue construida con base en la Guía Metodológica para la Elaboración del Mapa de Zonas Áridas, Semiáridas y Subhúmedas secas de América Latina y El Caribe [9], esto teniendo en cuenta los altos niveles de precipitación que se presentan en la zona.

Tabla 6: Clasificación Índice Modificado de Fournier

Clase	IMF	Agresividad
1	100 <	Muy Bajo
2	100 – 200	Bajo
3	200 – 300	Moderado
4	300 – 400	Alto
5	400 >	Muy Alto

Fuente: Mendoza M. [9]

4.2.3. Índice de Concentración de precipitaciones - ICP

Este índice, desarrollado por Oliver en 1980, se refiere a cómo se comportan las precipitaciones, en su cantidad anual, variación estacional y su duración de la estación lluviosa en un año cualquiera. Es decir, está referido a si las precipitaciones de la época lluviosa, se encuentran concentradas sobre un periodo corto o más largo del año [8]. El cálculo del ICP se realiza determinando la sumatoria del cuadrado de la precipitación de cada mes, dividida por la precipitación anual elevada al cuadrado. A continuación se muestra una forma de cálculo:

$$ICP_j = 100\% \frac{\sum_{i=1}^{12} (P_{ij})^2}{P_m{}^2} \quad (3)$$

Dónde:

ICPj = Índice de concentración de las precipitaciones, para el año j, expresado como %.

P_{ij} = Precipitación mensual del mes i (mm), del año j.

P_m = Precipitación media anual (mm).

El ICP oscila en un rango que va de 8,3% a 100%, donde el primer valor indica una distribución homogénea de las precipitaciones durante los 12 meses del año, por el contrario, el segundo valor indica que el monto total de precipitaciones se concentró en tan solo 1 mes del año. Para efectos de su análisis [8].

Tabla 7: Clasificación índice de concentración de las precipitaciones

ICP	Clasificación
8,3 – 10	Uniforme
10 – 15	Moderadamente Estacional
15 – 20	Estacional
20 – 50	Altamente Estacional
50 – 100	Irregular

Fuente: Olivares S. [8]

4.3. ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELOS – USLE

La USLE es un modelo diseñado para predecir la cantidad de pérdida de suelo por escurrimiento en áreas específicas bajo determinados sistemas de manejo y cultivos, esta se expresa, en el sistema métrico internacional, como:

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (4)$$

Dónde:

A = Perdida de suelo en t/ha. Año

R = Factor erosividad de la lluvia en Mjmm/ha. Año

K = Factor erosionalidad del suelo en (t/ha)/(Mj.mm/ha.h)

L = Factor longitudinal del terreno (adimensional)

S = Factor pendiente del terreno (adimensional)

C = Factor cobertura y manejo de la vegetación (adimensional)

P = Factor prácticas de conservación (adimensional)

Para el análisis de la erosión del suelo se tendrá en cuenta la siguiente la clasificación de pérdidas de suelo propuesta para Colombia:

Tabla 8. Clasificación de Perdida del Suelo

CLASE	PERDIDA DE SUELO (t/ha año)	CALIFICACIÓN DE PÉRDIDAS
1	Menores a 10	Ligera
2	10 a 25	Baja
3	25 a 50	Moderada
4	50 a 100	Alta
5	Mayores de 100	Muy Alta

Fuente: [13]

4.3.1. Factor de Erosividad de la lluvia - R

El factor erosividad de la lluvia es un índice numérico que expresa la capacidad de la lluvia para erosionar el suelo, se define como la suma del producto de la energía total de la precipitación por su máxima intensidad en treinta minutos para todos los eventos importantes de precipitación en un área durante un año promedio. Este es el mejor parámetro de la precipitación que refleja la interacción entre el potencial combinado del impacto de lluvias y la turbulencia del escurrimiento para transportar las partículas desprendidas. La estimación de R se puede hacer a través de métodos directos y métodos indirectos [10] .

4.3.2. Factor de Erosionabilidad del Suelo - K

representa la erosionabilidad del suelo, es decir, muestra su vulnerabilidad a la acción del agua; es una característica inherente a los suelos, que es función de la acción individual y/o combinada de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, así como también del manejo que de ellos se haga. El método más completo para estimar K es el Nomograma de Wischmeier y Smith, el cual requiere datos sobre porcentaje de limo, porcentaje de arena muy fina, porcentaje de arena, porcentaje de contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad. En el caso de no contar con información tan detallada se pueden usar valores tabulados por Kirkby y Morgan [10].

4.3.3. Factor de Longitud y Grado de Pendiente - LS

Este es el Factor Topográfico, el cual es la relación entre el suelo perdido en un terreno cualquiera con pendiente p y longitud λ, y la correspondiente a la parcela piloto utilizada en el desarrollo de la USLE. Se refiere entonces al efecto combinado de la pendiente y la longitud de los terrenos expuestos a la erosión laminar y en surcos. Su valor se obtiene por multiplicación de dos subfactores: Longitud (L) y pendiente (S).

4.3.4. Factor de Cobertura de suelo – C

Este factor indica el efecto de la cubierta vegetal en la pérdida de suelo, se expresa como la relación entre la pérdida de suelo de un área o parcela con una vegetación dada y sistemas de manejo específicos, y la pérdida de suelo en una parcela en barbecho continuo, limpia y arada, en el sentido de las pendiente, a intervalos regulares. Los valores de C son pequeños cuando el suelo está protegido del impacto del agua de lluvia y de la acción de la escorrentía superficial, y viceversa; es decir, a mayor valor de C, menor es la cobertura del suelo, es decir, hay menor protección [10].

4.3.5. Factor de Prácticas de Conservación – P

Es la relación de pérdida de suelo entre una parcela donde se han aplicado practicas mecánicas de conservación de suelos (contornos, terrazas, cultivos en fajas, etc.) para el control de la erosión, y las pérdidas que se producen en una parcela si tales prácticas no se utilizan y el laboreo se efectúa en el sentido de la pendiente. Cuando las prácticas de conservación no se aplican o son muy pocas el valor de P es igual a 1 [10].

4.4. MÉTODO DE INTERPOLACIÓN

4.4.1. IDW (Distancia Inversa Ponderada)

La interpolación mediante distancia inversa ponderada determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestras [11]. Para el caso en el que las estaciones este distribuido de manera irregular el método de IDW se considera como una representación con una variabilidad puntual optima, lo cual es bueno para variables como la precipitación [12].

5. DISEÑO METODOLOGICO

De acuerdo con los diferentes tipos de diseños de investigaciones, el presente proyecto se ubica dentro de los Diseños Documentales, el cual consiste en un proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica e interpretación de datos secundarios, en este caso específico, estos datos serán de la cuenca Ubaté – Suárez, dentro de los materiales y la metodología requerida para la aplicación del proyecto se tiene:

5.1. INFORMACIÓN GENERAL

5.1.1. Información sobre los escenarios de cambio climático

Las bases de datos sobre los escenarios de cambio climático y las variaciones de las precipitaciones para la zona de estudio se solicitarán al IDEAM. A partir de estos escenarios de cambio climático, se proyecta el comportamiento futuro de la precipitación y se llevara a cabo la estimación de los diferentes índices de Agresividad Climática.

5.1.2. Selección de las estaciones

Se seleccionaran todas las estaciones que cuenten con la información de los escenarios de cambio climático, que estén dentro y en el límite de la cuenca con el fin de tener la información suficiente para la interpolación de los índices.

5.1.3. Comportamiento de las precipitaciones

Este se determinara a partir de información pluviométrica proporcionado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM en las bases de datos de los escenarios de cambio climático para las estaciones seleccionadas.

Para determinar el comportamiento de la precipitación, primero se determinara el comportamiento de la precipitación actual con el fin de tener una línea base a partir de la cual se determinara el cambio o no de las precipitaciones futuras, por lo cual se seleccionaran las mismas estaciones para el análisis del comportamiento de la precipitación futura.

- Precipitación actual, para esta se determinara la variación espacial de la precipitación, para lo cual se usara el promedio anual multianual de cada una de las estaciones y se interpretaran por medio del método de interpolación espacial como lo es el método de distancias Distancia Inversa Ponderada – IDW, a través del software ArcGis, además de esto se

obtendrá la variación temporal, por medio de los promedios anuales multianuales representados por medio de histogramas; la distribución porcentual de la precipitación para las estaciones que se encuentren dentro de la cuenca, a partir de los promedios mensuales multianuales e interpretados por medio de histogramas; determinación de la precipitación media, máxima y mínima, además de esto se determinaran los años en los cuales se presentaron precipitaciones máximas, y se relacionaran con fenómenos de variabilidad climática.

- Precipitación futura, se determinara la variación espacial y temporal de la precipitación de la misma manera como se realizó para la precipitación actual, teniendo en cuenta que estos se realizaran para cada uno de los periodos 2011 – 2040; 2040 – 2070; 2070 – 2100, bajo los diferentes escenarios de cambio climático.

5.2. ÍNDICE DE EROSIVIDAD DE LAS LLUVIAS

Para determinar la erosividad y la variación temporal de las lluvias, se utilizara el Índice de Fournier – IF, el índice Modificado de Fournier – IMF y el índice de Concentración de las precipitaciones – ICP, estos índices serán representados espacialmente a través del software ArcGis. El cálculo de estos índices y su representación se realizara para cada uno de los escenarios y periodos planeados por el IDEAM.

Para conocer que tan severos pueden llegar a ser los efectos de la agresividad climática, se hace necesaria la utilización de indicadores, los cuales permiten determinar los impactos de las precipitaciones sobre un área geográfica específica [8].

- Índice de Fournier - IF
- Índice modificado de Fournier - IMF
- Índice de Concentración de precipitaciones – ICP

Estos índices se calcularan de acuerdo a lo establecido en el marco teórico conceptual del presente proyecto, ecuaciones (1), (2) y (3) respectivamente.

Luego de aplicar los índices a los datos de precipitación establecidos por los escenarios de cambio climático se llevara a cabo el análisis de resultados el cual se realizara por medio de:

- Variación espacial de los índices: Para este se aplicaran los índices a cada uno de los años de los diferentes periodos (2011-2040; 2040-2070; 2070-2100), en la totalidad de las estaciones seleccionadas, debido a la gran cantidad de información los índices se agruparan en tres mapas en donde se realizara un promedio por para cada uno de los periodos establecidos y estos se agruparan en los diferentes escenarios de cambio climático. Las interpolaciones se llevaran a cabo por medio del Software ArcGis, a partir del método Distancia Inversa Ponderada – IDW.
- Variación temporal de los índices: Para este se realizara un promedio entre los valores de las diferentes estaciones que se encuentren dentro de la cuenca y se graficaran los valores máximos, mínimos y medios de los diferentes índices para cada uno de los años.

5.2.1. Variabilidad Climática

Se decidió realizar un análisis de los mismos escenarios de cambio climático pero a una escala inferior, con el fin de lograr un acercamiento a lo que podría ser la variabilidad climática proyectada.

Esto debido a que luego de realizar el análisis de la agresividad climática con respecto al cambio climático desde una escala decenal, se observó que la precipitación para la cuenca no presentaría un cambio considerables al estar alrededor de +\- 3%. Por lo cual se determinó que los resultados obtenidos a partir del análisis de cambio climático no arrojarían datos representativos que permitan por medio del presente proyecto de investigación, determinar el nivel de perdida de suelo al que se podría ver enfrentada la cuenca en los próximos años.

Para la variabilidad climática actual se tomaran como referencia los años en donde se presentaron el fenómeno de la niña y el niño establecidos por el IDEAM y se realizara el análisis respectivo con las estaciones que se encuentran dentro y en cercanías de la cuenca para el periodo de tiempo 1971 – 2010.

Por otra parte y teniendo en cuenta esta información, se realizara un análisis de la variabilidad climática futura a partir de las precipitaciones proyectadas en los escenarios de cambio climático, en donde se establecerá la normal climatológica como el promedio de la precipitación para cada uno de los periodos establecidos, dato a partir del cual se identificaran las diferentes anomalías para cada uno de los periodos, además de lo anterior se tomara en cuenta que dentro de las fluctuaciones temporales del clima, las que se consideran de mayor

transcendencia en la determinación y modulación de procesos atmosféricos son: la escala estacional, intraestacional e interanual [7],

A partir del análisis a escala interanual, el cual corresponde a las variaciones que se presentan en las variables climatológicas en este caso la precipitación de año a año, para cada uno de los periodos futuros establecidos, (2011-2040; 2040-2070; 2070–2100), se seleccionaran dos años en donde uno de ellos representara un posible año con presencia del fenómeno del niño a futuro, y un año que represente un comportamiento similar al fenómeno de la niña en el futuro.

Los criterios de selección para estos dos años son:

- Los años en donde la precipitación acumulada sea la más elevada y la más baja de la serie histórica, esto debido a que según algunos análisis generales sobre la serie histórica de 1971 – 2010, existe una relación entre elevados registros de precipitación anual y la incidencia del fenómeno de la niña y en caso contrario con el fenómeno del niño.
- Se determinara la variación porcentual de la precipitación para cada mes de cada año y se graficara la cantidad de meses que presenten una variación porcentual de la precipitación, tanto superior como inferior a la promedio del periodo de tiempo a estudiar, en donde se seleccionaran los años que durante un periodo de tiempo más largo presenten una variación porcentual tanto positiva como negativa.

Luego de seleccionar los años de cada periodo se graficaran los valores mensuales de precipitación para: el año en el que se presentó una mayor variación porcentual de la precipitación; el promedio mensual multianual de precipitación para el periodo específico; y los valores mensuales para el año seleccionado como de menor precipitación. Además de esto se graficara la variación porcentual de la precipitación para estos dos años con respecto a la precipitación mensual promedio, de cada uno de los periodos.

5.3. ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELOS – USLE

Para el análisis de la pérdida del suelo se tomara en cuenta la tabla 8 en donde se establecen las clasificaciones de pérdida de suelo para Colombia, a partir de la cual se propone como perdida del suelo ligera o nula correspondiente valores inferiores o iguales 10 toneladas por hectárea en el año, mientras que para la clasificación de perdida de suelo muy alta los valores deben superar o igualar las 100 toneladas por hectárea en el año.

5.3.1. Factor de Erosividad de la lluvia - R

En ausencia de información para la estimación del factor R, se seleccionó una medición indirecta del mismo mediante el cálculo del índice de Modificado de Fournier - IMF, debido a que se cuenta con la información suficiente para la determinación del mismo, el cual se calculó mediante la aplicación de la formula (2), para las estaciones seleccionadas para los años 1997, 2008 y promedio del periodo actual (1971 – 2010) y los años 2015, 2018 y promedio del periodo futuro (2011 – 2040) bajo el escenario RCP 26.

Cabe resaltar que la utilización del índice Modificado de Fournier, presenta limitaciones para la estimación de la suma del producto de la energía cinética total y la intensidad máxima en treinta minutos por evento pluvial, como lo requiere la estimación real del valor R. De tal manera que la aplicación de este índice para el desarrollo de este trabajo, debe ser entendido como una valoración fundamentalmente relativa y no absoluta de la intensidad de la lluvia, el poder entender el significado del R estimado resulta de gran importancia para entender los resultados, puesto que los valores presentados pretenden simplemente mostrar la variación regional de la agresividad de la lluvia dentro de la cuenca, medida a través del IMF [14].

Luego de realizar una revisión bibliográfica se encontró una correlación entre la Erosividad - EI_{30} y el índice modificado de Fournier – IMF en la zona cafetera central del departamento de caldas, la cual se expresa por medio de la ecuación (5) hallada por Ramírez [13], aunque sabemos que las condiciones climáticas pueden variar, este es un acercamiento para la determinación del índice de erosividad por medio del IMF en el territorio colombiano, debido a la poca información para el cálculo de la energía cinética total y la intensidad máxima en treinta minutos, requeridos para el cálculo de la erosividad, por lo cual se seleccionó la formula expresada por Ramírez [13], como un método recomendable para el cálculo de la erosividad de la lluvia en la cuenca.

$$EI_{30} = 38{,}4 * IMF + 28{,}3 \qquad (5)$$

Dónde:
EI_{30}: Erosividad
IMF: Índice Modificado de Fournier

Tabla 9. Clasificación EI30 en función del IMF

Clase	EI 30	Clasificación
1	< 1000	Natural
2	1000 - 2500	Muy baja
3	2500 - 5000	Baja
4	5000 - 7500	Moderada
5	7500 - 10000	Alta
6	10000 - 15000	Muy alta
7	15000 - 20000	Severa
8	> 20000	Extremadamente severa

Fuente: [13]

5.3.2. Factor de Erosionabilidad del suelo - K

El factor de erodabilidad del suelo se estimó de manera directa a partir de la siguiente ecuación:

$$K = 1{,}313 * [2{,}1 * 10^{-4} * (12-MO) * M^{1,14} + 3{,}25 * (s-2) + 2{,}5 * (p-3)] / (100) \quad (6)$$

En donde:

MO: Porcentaje de Materia Orgánica del suelo.
s: Código de la estructura del suelo
p: Código de la permeabilidad
M: Factor dado por el porcentaje de limo, arcilla y arena, (% limo + arena muy fina)*(100-%arcilla).

Para la estimación de la erodabilidad del suelo es necesario conocer previamente ciertas propiedades del mismo así como se observan en las variables de la ecuación (6), las cuales se obtuvieron a partir de fuentes secundarias, específicamente del estudio de suelo del departamento de Boyacá y de Cundinamarca, a diferencia de las demás variables, la permeabilidad del suelo no se encontraba disponible de forma directa en los diferentes estudios de suelo, por lo cual esta se estimó a partir de la textura del suelo, tomando como referencia la siguiente tabla:

Tabla 10. Relación Textura del Suelo - Permeabilidad

Textura del Suelo	Permeabilidad
Arenoso	Rápida
Franco Arenoso	Moderada a rápida
Franco	Moderada
Franco arcilloso	Lenta a moderada
Arcilloso limoso	Lenta
Arcilloso	Muy lenta

Fuente: FAO [15]

Con el fin de adaptar las variables de estructura y permeabilidad del suelo para que pudieran ser aplicadas en la ecuación (6), se tuvieron en cuenta las categorías y códigos de acuerdo a USLE, representadas en las siguientes tablas:

Tabla 11. Código USLE para los tipos de Estructura del Suelo

Código USLE	Tipo de estructura
1	Granular muy fina
2	Granular fina
3	Granular media a gruesa
4	Bloques Laminar Masiva

Fuente: Gabriel A. Mancilla [16]

Tabla 12. Código USLE para las categorías de Permeabilidad

Código USLE	Categoría de Permeabilidad
1	Rápida
2	Moderada a rápida
3	Moderada a rápida
4	Lenta a moderada
5	Lenta a moderada
6	Muy lenta

Fuente: Gabriel A. Mancilla [16]

5.3.3. Factor de Longitud y Grado de Pendiente - LS

Con el fin de incorporar el impacto de la convergencia de flujo y el factor de longitud de ladera se estableció una ecuación para el cálculo del factor LS en GIS en forma de diferencias finitas para la erosión en una celda de la cuadricula [17]; [18], para lo cual se estableció la siguiente ecuación:

$$LS = (1.4 * [(A * R) / 22,1)]^{0,4} * [Sin ((P * 0,01745)/0,09)]^{1,4}) / 100 \quad (7)$$

Dónde:

A: Acumulación del Flujo
R: Resolución del pixel del DEM
P: Pendiente en grados

Para la determinación de este índice se contó con la ayuda del Software ArcGis, en donde por medio de la herramienta *slope*, se calcula la pendiente en grados, y por medio del módulo *Arc Hydro,* se calcula la acumulación del flujo a partir del Modelo digital de Elevación DEM, estos dos parámetros nos permitirán calcular el factor LS por medio de una ecuación (7).

5.3.4. Factor de Cobertura y Manejo de suelos - C

Para la determinación de este índice se tomó información secundaria como el mapa de cobertura vegetal y uso de suelo, el cual fue digitalizado, y posteriormente se determinó el factor C para cada uno de los polígonos, los valores del factor C se tomaron de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 13. Relación Cobertura Vegetal y Factor C

Cobertura Vegetal	Factor C
Vegetación de paramo (Vp)	0,003
Bosque Secundario (Bs)	0,007
Bosque plantado (Bp)	0,003
Misceláneo de bosque y pastos (Bs - Pn)	0,008
Misceláneo de bosque plantado - eriales (Bp - Em)	0,9
Matorral alto (Bm4) matorral bajo (Bm3)	0,012
Misceláneo de matorrales y bosque plantado (Ma - Bp)	0,01
Misceláneo de matorrales y cultivos (Ma - Ct)	0,03
Misceláneo de matorrales y pastos (Ma - Pn)	0,03
Cultivos transitorios	0,3
Misceláneo de cultivo y pastos (Ct - Pn)	0,04
Pastos manejados (Pm)	0,04
Misceláneo de Cultivos y pastos manejados (Ct - Pm)	0,04
Pastos naturales (Pn)	0,01
Cuerpos de agua (Ca)	0
Eriales y canteras (Em)	1
Zona urbana (ZU)	0,01

Fuente: [19]

5.3.5. Factor de Prácticas de Conservación – P

Debido a que no se cuenta con la información específica sobre conservación en la cuenca se tomara un valor para toda la cuenca del factor P como 1, lo que indica que las prácticas de conservación no se aplican o es muy poca [10].

6. RESULTADOS

6.1. COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN

6.1.1. SELECCIÓN DE ESTACIONES

Las estaciones seleccionadas corresponden a las que se les aplicaron los escenarios de cambio climático por parte del IDEAM y fueron proporcionadas por la entidad, se tomaron toda las estaciones que se encuentran dentro de la cuenca y con el fin de contar con información mucho más completa se tomaron estaciones fuera de la cuenca, para lo cual las estaciones seleccionadas son las siguientes:

Tabla 14. Estaciones Seleccionadas aplicación del índice de Agresividad Climática

	Código	Nombre	Departamento	Entidad	M.S.N.M.
Fuera de la Cuenca	2120043	Villapinzón	Cundinamarca	CAR	2700
	2120540	Checua	Cundinamarca	CAR	2580
	2120541	R. Neusa	Cundinamarca	CAR	3100
	2120574	Silos	Cundinamarca	IDEAM	2709
	2306512	La Cabrera	Cundinamarca	IDEAM	2000
	2312001	La Vereda	Santander	IDEAM	305
	2312005	Muzo	Boyacá	IDEAM	850
	2312012	Sta. Rita	Boyacá	CAR	2800
	2312024	Paime	Cundinamarca	IDEAM	1038
	2401066	Simacota	Santander	IDEAM	1050
	2401522	Villa Carmen	Boyacá	IDEAM	2600
	3507002	Venta quemada	Boyacá	IDEAM	2630
Dentro de la Cuenca	2401007	Leticia	Cundinamarca	IDEAM	2650
	2401014	Cucunubá	Cundinamarca	IDEAM	2590
	2401015	Simijaca	Cundinamarca	IDEAM	2290
	2401018	Raquira	Boyacá	IDEAM	2800
	2401039	El Triangulo	Cundinamarca	CAR	3130
	2401044	Tres Esquinas	Cundinamarca	CAR	2900
	2401051	El Zarzal	Boyacá	CAR	2970
	2401061	Carmen de Carupa	Cundinamarca	IDEAM	2610
	2401511	Boyera la Automati	Cundinamarca	IDEAM	2580
	2401512	Isla del Santuario	Cundinamarca	IDEAM	2700
	2401521	Sutatausa	Cundinamarca	CAR	2600

Fuente: Elaboración propia con información de la CAR

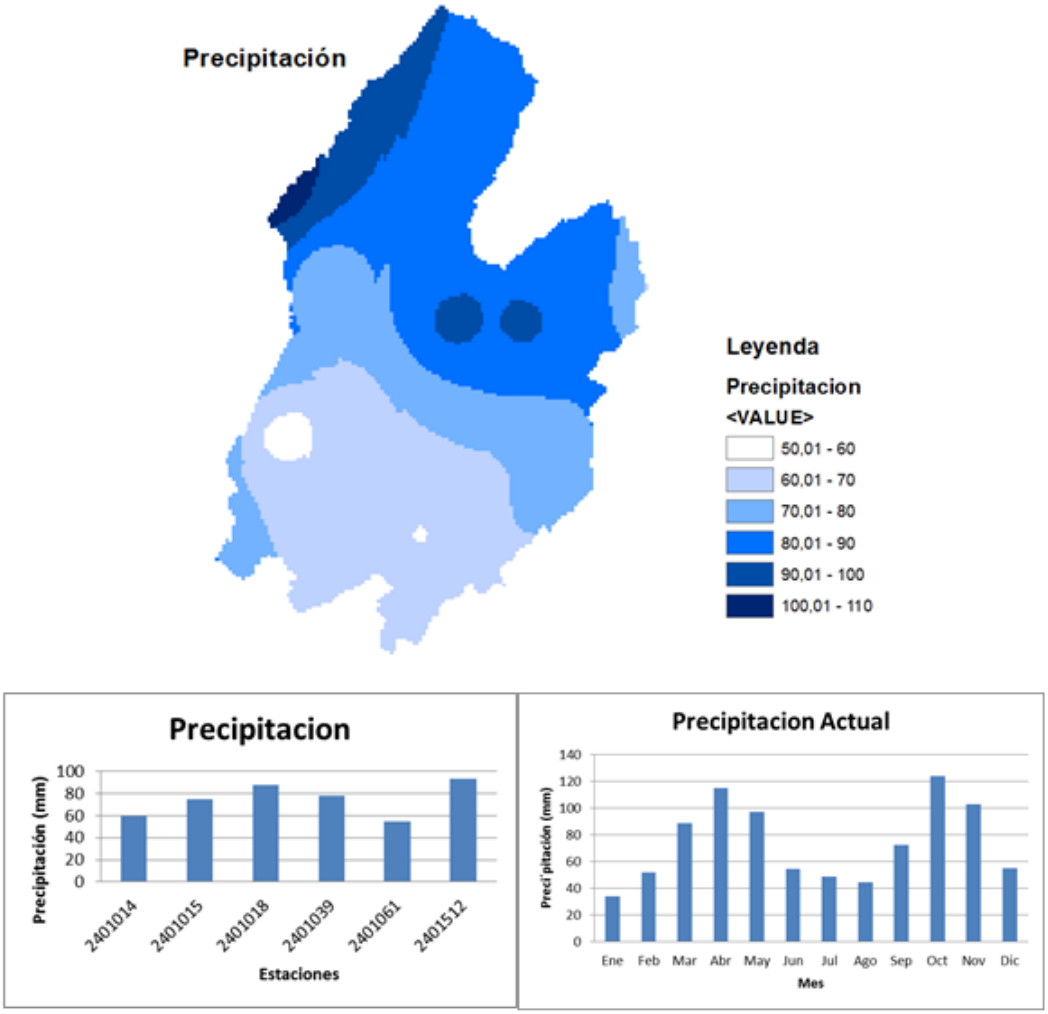
Mapa 2. Distribución Espacial de las Estaciones Seleccionadas

Fuente: Elaboración propia con información de la CAR

6.1.2. PRECIPITACION ACTUAL

La variación espacial de la precipitación se determinó a partir del promedio anual multianual y se comportó de acuerdo al siguiente mapa, para la interpretación del mismo se cuenta con la respectiva leyenda:

Mapa 3. Comportamiento de la Precipitación Actual



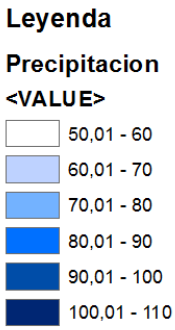
Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

A partir del mapa 3. Se puede observar que la mayor precipitación se presenta en la zona noroccidental, mientras que la precipitación mínima se concentra en la zona sur de la cuenca, la precipitación promedio para el periodo entre 1971 – 2010 varía en un rango entre los 50 y 100 mm de precipitación.

Por otra parte se puede apreciar que así como se presenta en el mapa de variación espacial, las precipitaciones más bajas se presentan en la estación ubicada en la zona sur de la cuenca, mientras que en promedio las precipitaciones más altas se concentran en una estación ubicada al norte de la cuenca, además de esto se aprecia que el comportamiento de la precipitación es de tipo bimodal en donde los periodos de lluvia se presentan en los meses de abril (114 mm) y octubre (124 mm), y los meses de menor precipitación corresponden a enero (34 mm) y agosto (44 mm).

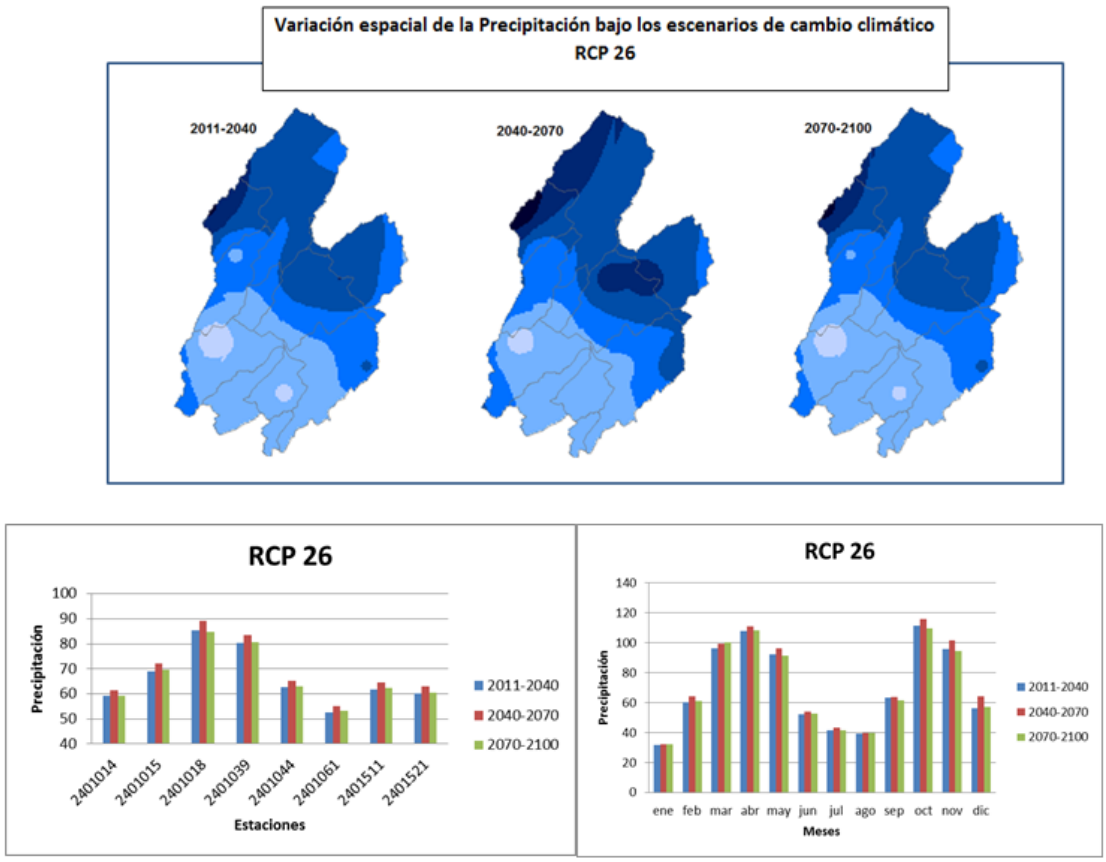
6.1.3. PRECIPITACIÓN FUTURA

Con el fin de realizar un análisis más preciso para cada uno de los mapas en sus diferentes periodos y escenarios se determinaron 6 rangos de precipitación a los cuales se les asignaron diferentes tonalidades de azul, en donde los tonos claros representan un valor menor de precipitación, mientras que los tonos más oscuros corresponden a los valores más altos de precipitación, así como se muestra en la siguiente gráfica:



- **Escenario de Cambio Climático RCP 26**

Mapa 4. Comportamiento de la Precipitación Futura - RCP 26



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

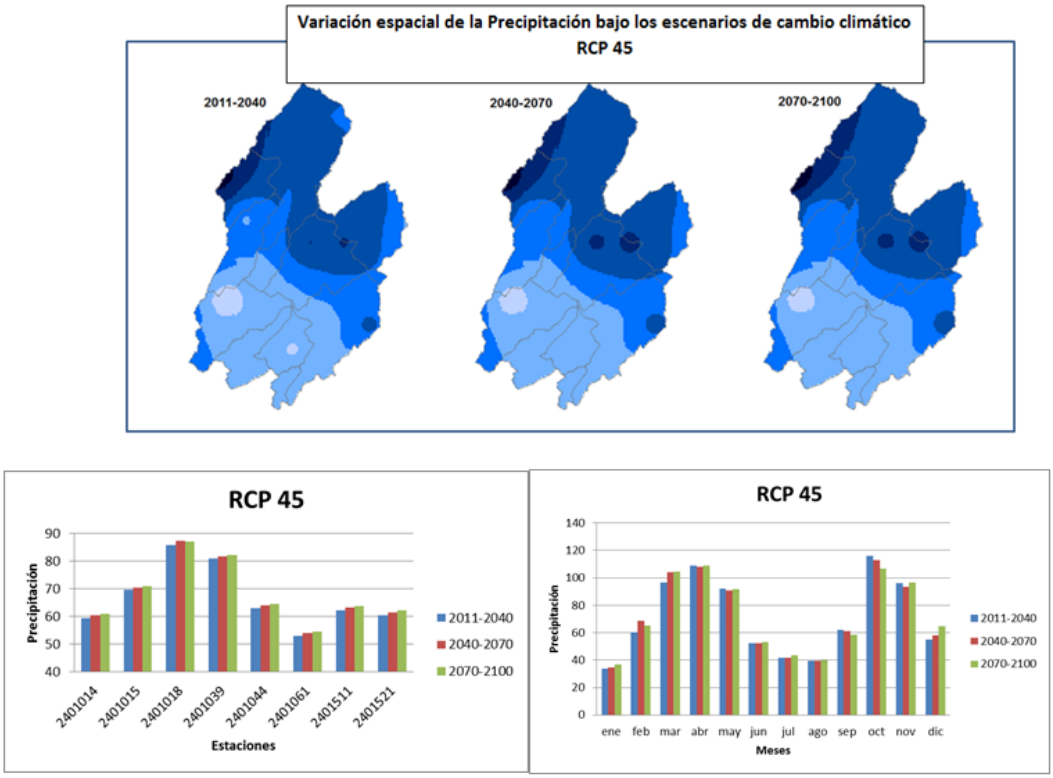
A partir de las diferentes variaciones espaciales y temporales de cada uno de los periodos se aprecia que el periodo en el que se presenta valores más elevados en mayor cantidad del territorio corresponde al periodo 2040-2070; mientras que el periodo en el que se presenta una mayor cantidad del territorio con valores menores de precipitación es el periodo 2011-2040, aunque este cambio no es tan

significativo frente al periodo 2070-2100. Además de esto se evidencia un comportamiento espacial de la precipitación determinado, en donde los valores de precipitación más elevados corresponden a la zona norte del mismo, mientras que los valores más bajos se presentan en la zona sur.

A partir de estos resultados se puede determinar que las estaciones que se encuentran en la zona sur de la cuenca evidentemente muestran los valores más bajos de precipitación, como lo son las estaciones 2401061, 2401014 y 2401044,en donde la precipitación promedio más baja es de 52 mm, mientras que la estación que presenta una mayor precipitación promedio es la 2401015 con 89 mm y se ubica en la zona norte de la cuenca, la diferencia de precipitación entre estas estacones es de aproximadamente 40mm de precipitación. Por otra parte a partir del histograma de precipitación media mensual para los diferentes periodos se evidencia un comportamiento bimodal en las precipitación para los tres periodos en donde la temporada de lluvias se presentan en los meses de abril (110mm) y octubre (115mm), mientras que en los meses de enero (31mm) y agosto (39mm) se evidencia una menor cantidad de precipitación, así mismo se evidencia que para los meses de menor precipitación el valor de la misma tiende a ser igual en los tres periodos, mientras que para los meses de mayor lluvia la diferencia de precipitación para cada uno de los periodos es más evidente.

- **Escenario de Cambio Climático – RCP 45**

Mapa 5. Comportamiento de la Precipitación Futura - RCP 45



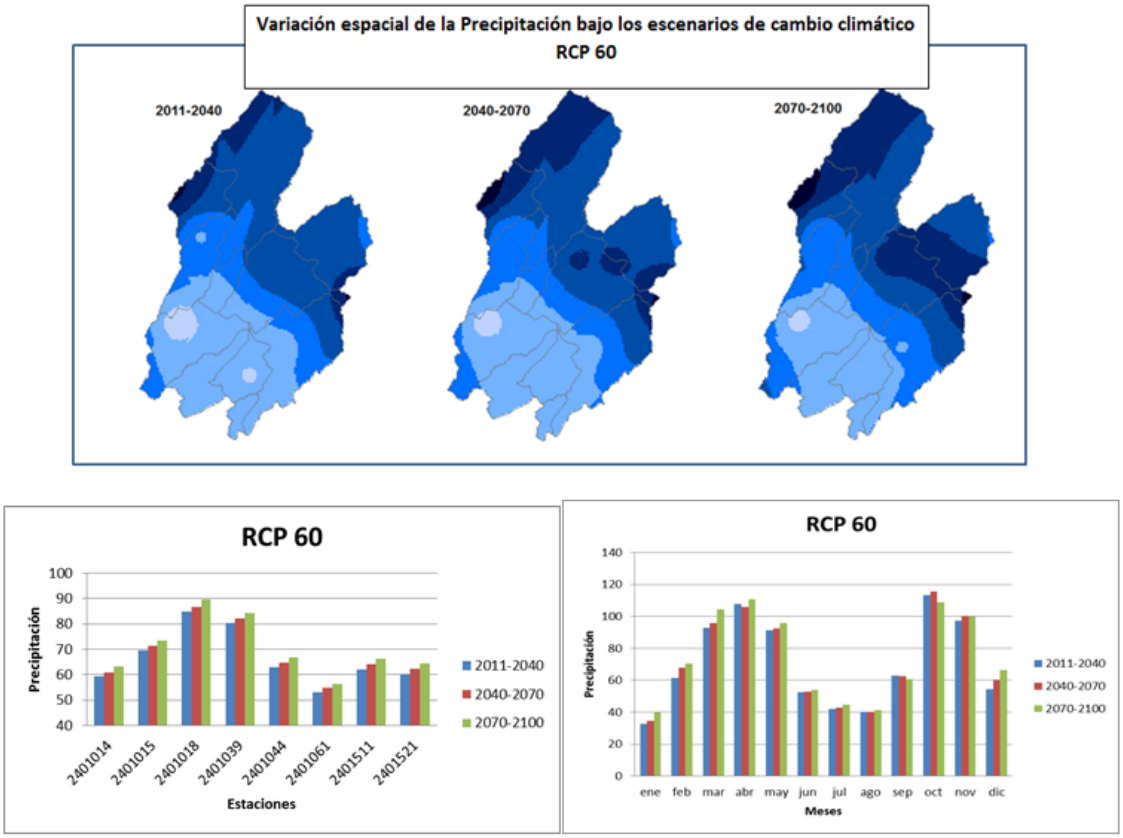
Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

La variación espacio temporal de la precipitación bajo el escenario de cambio climático RCP 45, no presenta una variación significativa de la precipitación por lo que presentan un comportamiento similar, sin embargo se aprecia un gradiente de precipitación en donde los valores mayores se concentran en la zona norte de la cuenca, mientras que los valores menores se concentran en la zona sur.

A partir de la precipitación que se proyecta para cada una de las estaciones bajo el escenario de cambio climático RCP 45 se evidencia que el comportamiento de la precipitación concuerda con la variación espacial ya que en las estaciones que se encuentran ubicadas en la zona sur de la cuenca se presentan valores menores de misma alrededor de los 33 mm, mientras que en la zona norte de se proyecta una mayor precipitación promedio de 87 mm. Por otra parte la distribución de la precipitación en la cuenca es de carácter bimodal en donde los periodos de lluvia se presentan en los meses de abril (108mm) y octubre 116mm), mientras que los meses de sequía se dan en enero (33mm) y agosto (39mm).

- **Escenario de Cambio Climático RCP 60**

Mapa 6. Comportamiento de la Precipitación Futura - RCP 60



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

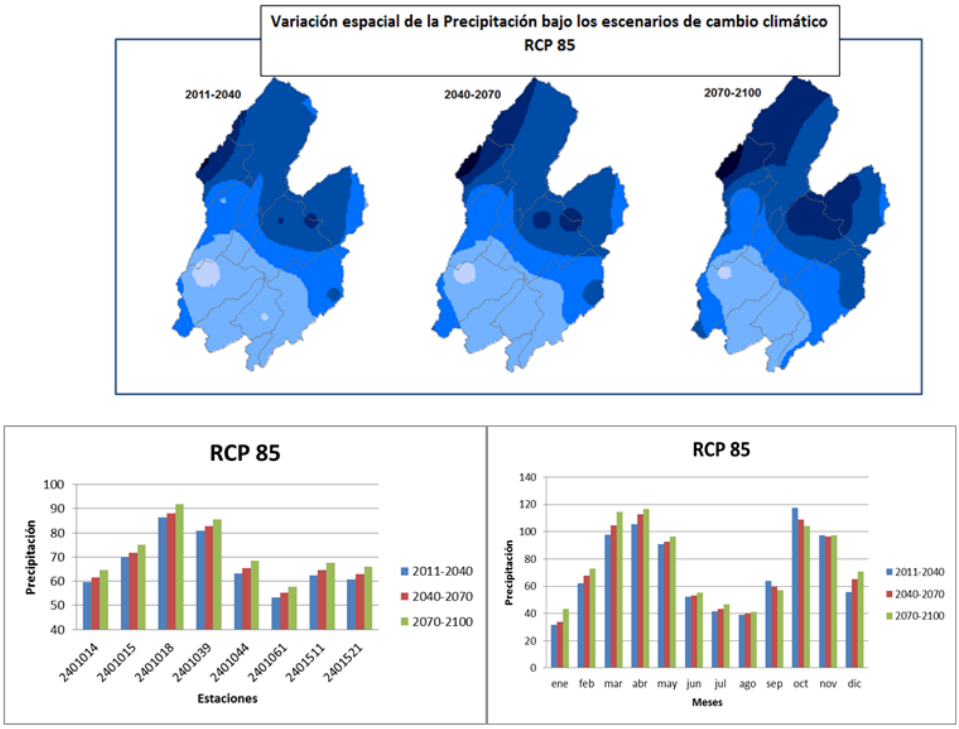
Para el escenario de Cambio Climático RCP 60 la variación espacio temporal de la precipitación es mucho más evidente en donde la precipitación aumenta a través de los años debido a que los valores menores de precipitación se presentan en mayor medida en el periodo 2011-2040, mientras que los valores más altos de precipitación se concentran en el periodo 2070-2100, así como se puede observar en el mapa 6. Y en la gráfica de precipitación versus estaciones, por otra parte el comportamiento espacial de la precipitación en los tres periodos es similar, ya que en la zona norte se presentan valores más altos con valores entre los 89 mm, mientras que en la zona sur se presentan menores valores cercanos a los 52 mm

Además de esto al analizar el comportamiento de las precipitaciones en cada uno de los meses se aprecia que en la mayoría de los meses el periodo con mayor precipitación es el correspondiente al 2070 – 2100 excepto para los meses de septiembre y octubre, por otra parte la precipitación presenta un comportamiento de tipo bimodal, en donde las temporadas de lluvia se dan alrededor de los meses

de abril (110mm) y octubre (115mm), mientras que los meses de menor precipitación son enero (32mm) y agosto (40mm).

- **Escenario de Cambio Climático RCP 85**

Mapa 7. Comportamiento de la Precipitación Futura - RCP 85



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Por medio de los mapas anteriores en donde se representa la variación espacio temporal de la precipitación se hace evidente el aumento de los valores de la precipitación y la concentración en el territorio a medida que pasa el tiempo, ya que en los promedios correspondientes para el periodo de 2011-2040 las concentraciones de la precipitación son inferiores a las concentraciones del periodo 2070-2100 en donde se puede observar que una mayor cantidad de territorio se vería enfrentado a un aumento en las precipitaciones, al igual que en los escenarios anteriores la precipitación en los diferentes periodos se comporta similar en términos de variación espacial, ya que en la zona norte se concentran valores de precipitación mayores entre 90 y 110 mm, mientras que en la zona sur se concentran valores menores, entre 50-70 mm.

Con respecto al comportamiento de la precipitación de la cuenca, esta es de carácter bimodal en donde los meses de mayor lluvia corresponden a los meses de abril (116mm) y octubre (117mm), mientras que los de menor lluvia son enero (31mm) y agosto (34mm).

6.2. ESTIMACIÓN DE LOS INDICES DE AGRESIVIDAD CLIMATICA

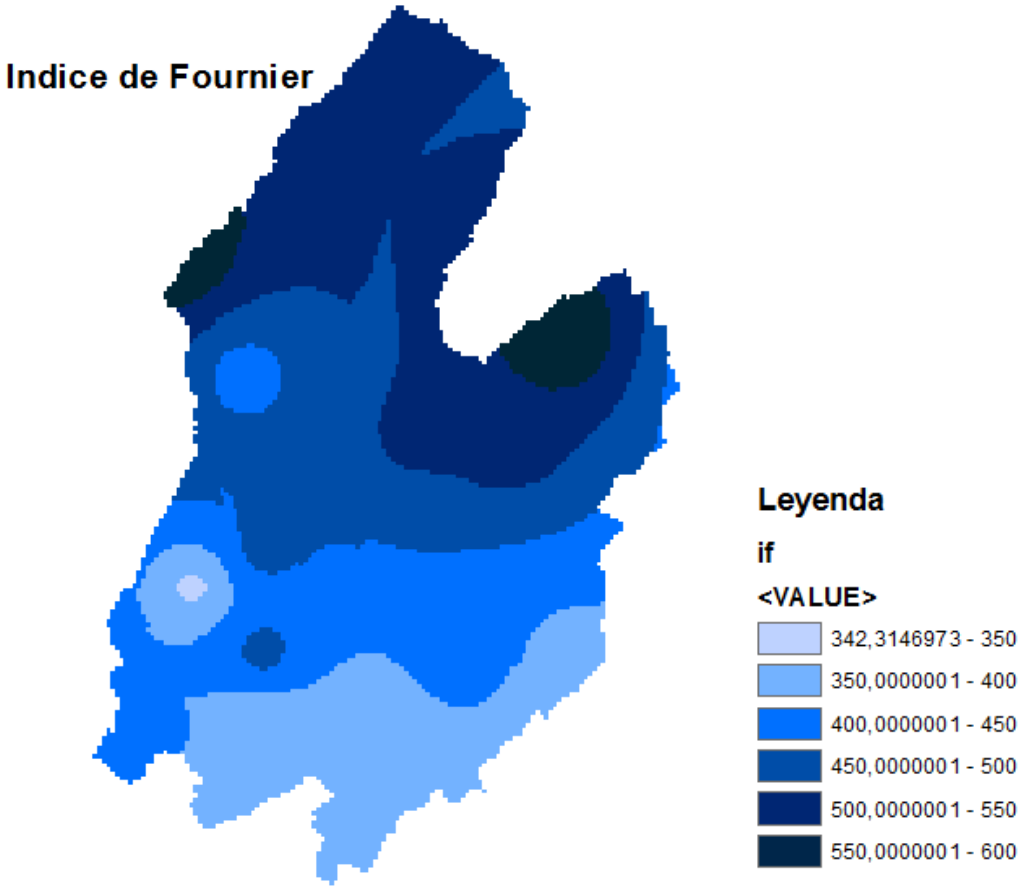
6.2.1. ÍNDICES ACTUALES

Para realizar un análisis más completo con respecto a los índices se hace necesario contar con una línea base a partir de la cual se realice un análisis comparativo entre los escenarios futuros, para lo cual se realiza la aplicación de los índices a registros de precipitación actual los cuales contarán con un periodo de datos desde 1971 – 2010, a partir de los cuales obtuvieron los siguientes resultados:

- **Índice de Fournier – IF**

Por medio de la aplicación del índice de Fournier a los registros de las precipitaciones actuales se obtuvieron los siguientes resultados:

Mapa 8. Índice de Fournier Periodo Actual (1971 - 2010)



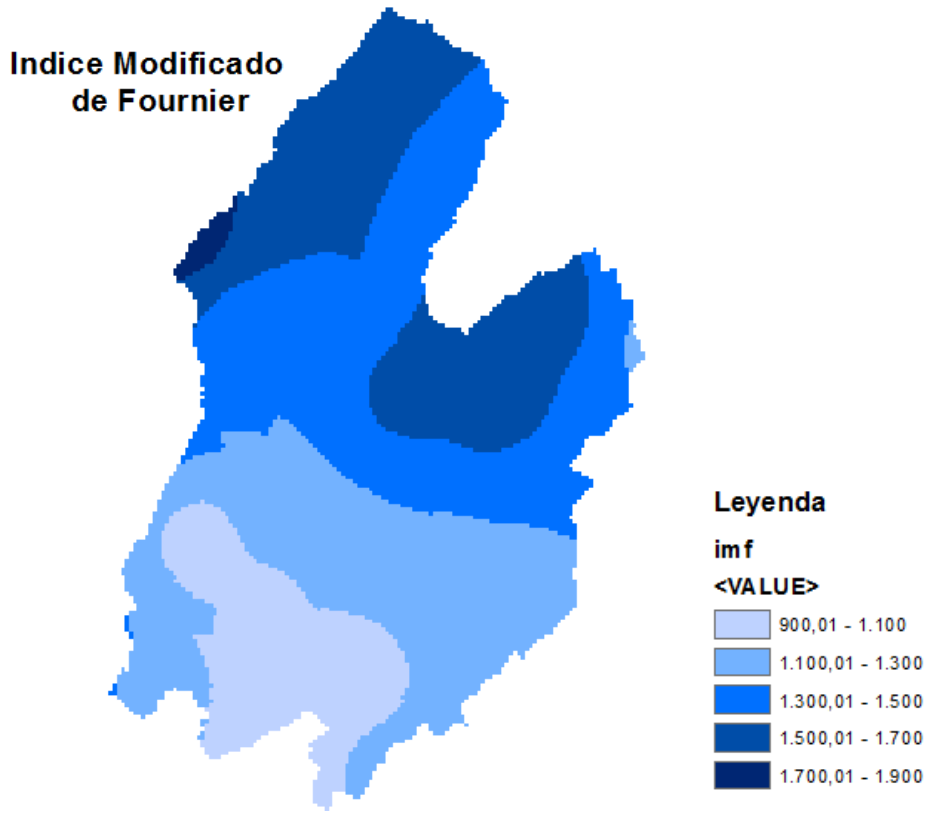
Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

En el mapa anterior se observa la distribución espacial del índice de Fournier en donde se hace evidente una disminución del índice en dirección norte – sur, ya que en la zona norte se presentan los valores más elevados del índice, mientras que los valores más bajos se presentan en la zona sur, así como se muestra en la leyenda el índice se encuentra en un rango entre los 342mm – 600mm, lo que nos indica que todo el territorio se clasifica con una agresividad muy alta al estar por encima de los 200mm.

- **Índice de Fournier Modificado - IMF**

El índice modificado de Fournier bajo las precipitaciones actuales se aprecia a partir de los siguientes resultados:

Mapa 9. Índice de Fournier Modificado Periodo Actual (1971 - 2010)



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Por medio del mapa 9 se puede observar que los valores promedio más altos se presenta en la zona noroccidental de la cuenca, mientras que los valores menores se concentran en la zona sur, en un rango entre los 900mm – 110mm, mientras que los valores más elevados se encuentran en un rango entre los 1700mm –

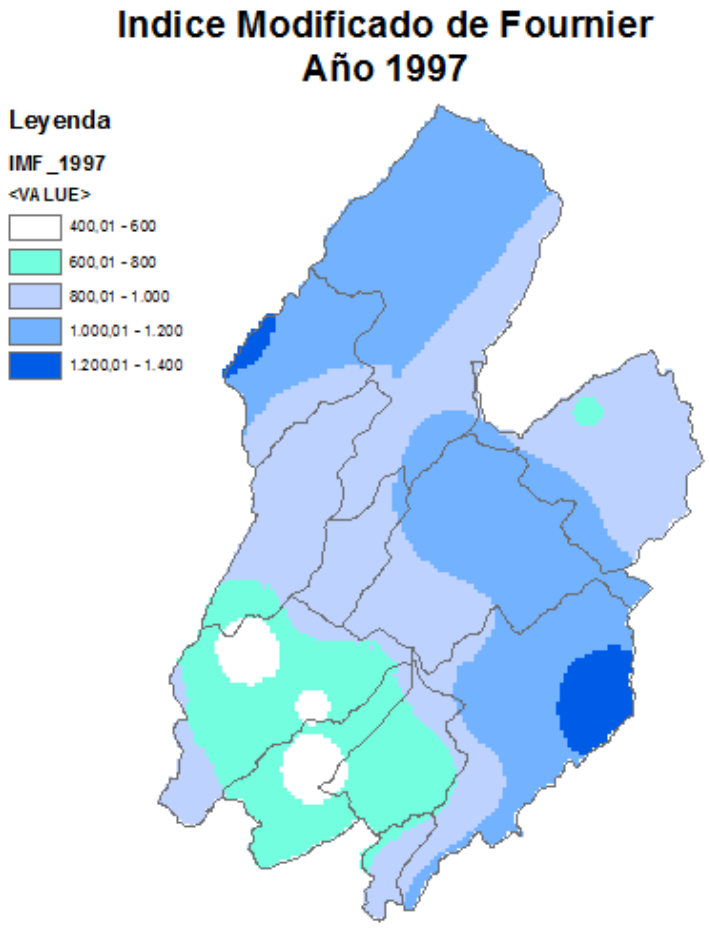
1900mm, lo que nos indica que la cuenca presenta una agresividad climática muy alta al estar por encima de los 400 mm en todo el territorio.

Los años seleccionados para la aplicación del índice para el periodo 1971 – 2010, con respecto al análisis de variabilidad climática, corresponden al año 1997 para el fenómeno del niño y 2008 para el fenómeno de la niña, debido a la intensidad y duración de estos fenómenos.

- **1997 (Fenómeno del Niño)**

Luego de realizar los procedimientos necesarios para la aplicación del IMF correspondiente al año 1997 para la cuenca Ubaté – Suarez, se obtuvo el siguiente mapa:

Mapa 10. IMF para el Año 1997

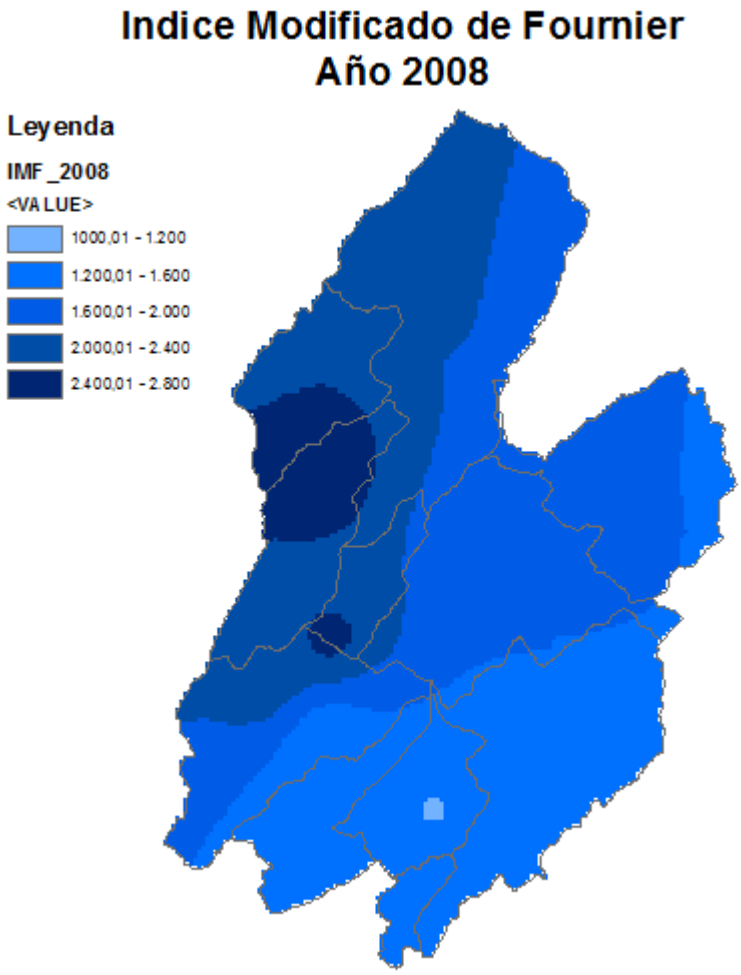


Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

A partir del mapa 10 se puede observar que a pesar de que todo el territorio presente un IMF clasificado como una agresividad muy alta, en este año se logra observar una disminución del IMF con respecto a la promedio. Además de esto se logra apreciar que los valores más bajos del IMF se concentran en la zona Suroccidental, mientas que los valores más altos se presentan en la zona Oriental y noroccidental de la cuenca.

- **2008 (Fenómeno de la niña):**

Mapa 11. IMF para el año 2008



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

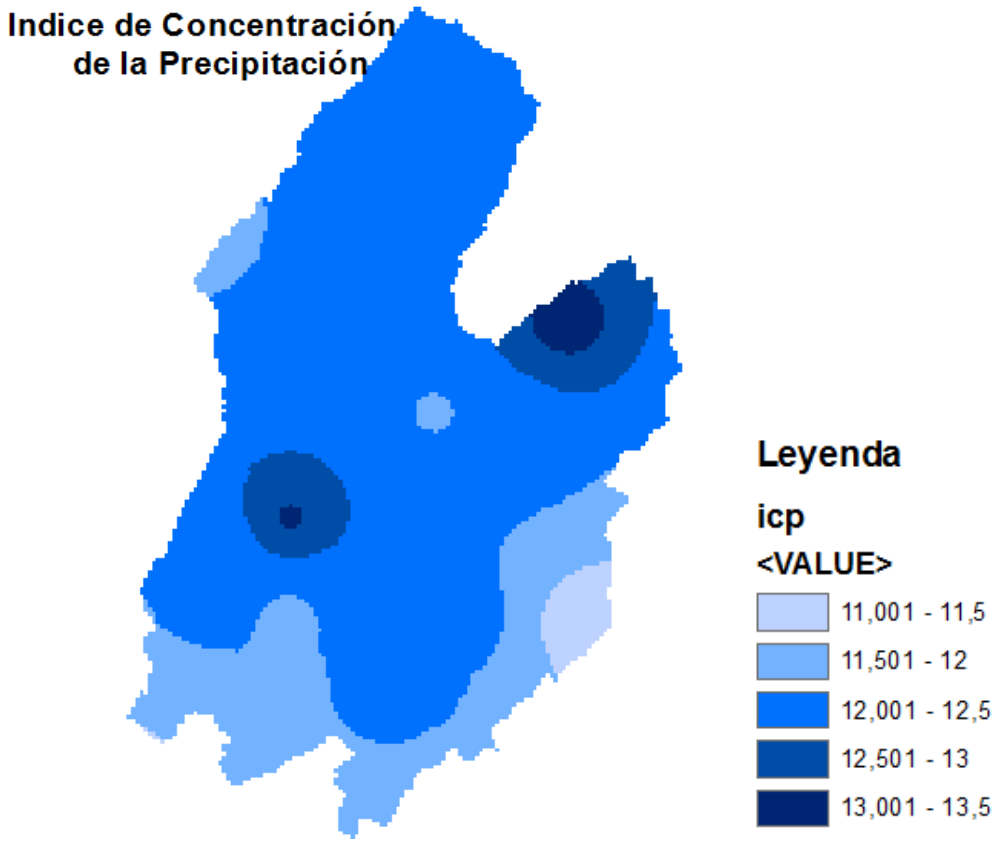
Para este año se observa un evidente aumento del IMF para toda la cuenca en donde una pequeña porción de la cueca presenta un índice por debajo de los

1200 mm, comparada con la zona que presenta el mayor IMF el cual corresponde a 2800 mm, lo que supera 7 veces el límite establecido para el IMF clasificado como agresividad muy alta el cual corresponde a los 400 mm, por otra parte se puede observar que el gradiente de IMF es de occidente a oriente, en donde en el occidente se presentan los mayores índices, mientras que en la zona oriental se presentan incides menores.

- **Índice de Concentración de las precipitaciones - ICP**

El índice de concentración de la precipitación a partir de las precipitaciones registradas por las diferentes estaciones que se encuentran dentro de la cuenca se representa a partir de los siguientes resultados:

Mapa 12. Índice de Concentración de la Precipitación Periodo Actual (1971 - 2010)



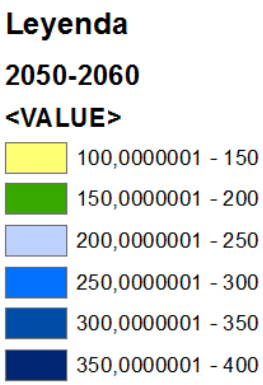
Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

A partir del mapa 12, se puede evidenciar que toda la cuenca presenta una concentración moderadamente estacional al encontrarse en un rango entre los 10 – 15.

6.2.3. INDICES FUTUROS

- **Índice de Fournier – IF**

Para realizar la variación espacial y temporal de los índices se utilizó un promedio por décadas desde el 2011, hasta el 2100, los cuales a su vez se agruparon en cada uno de los tres periodos correspondientes, para lo cual se obtuvieron los siguientes resultados:

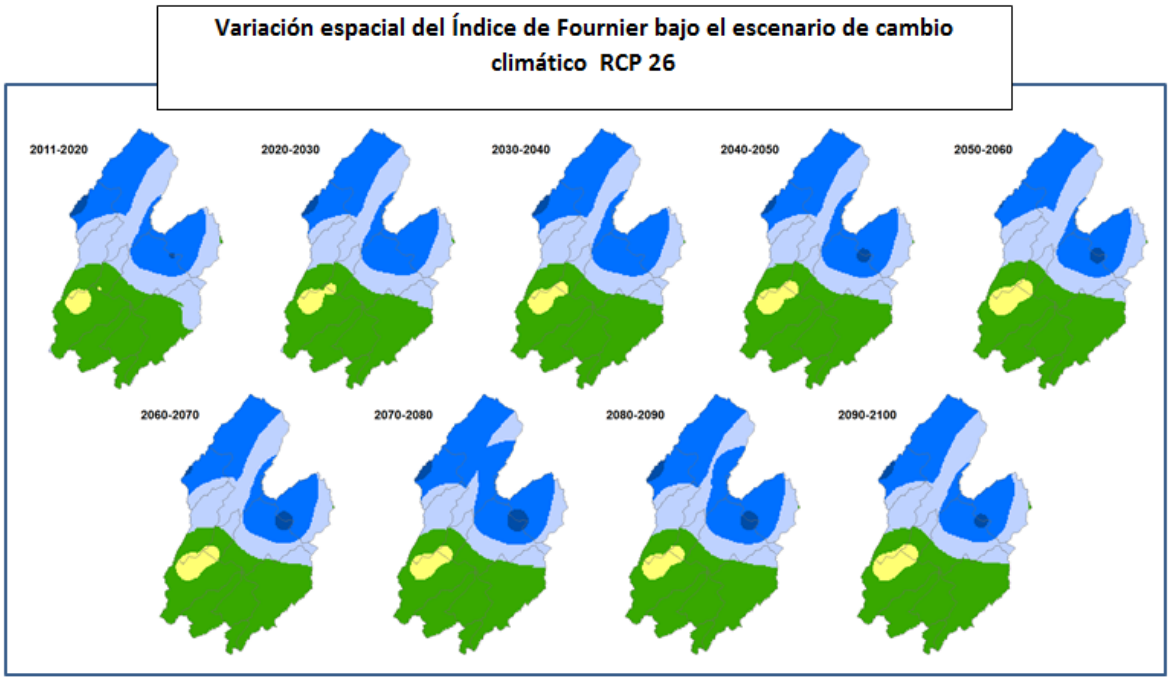


Para la interpretación de estos mapas se debe tener en cuenta las siguientes clasificaciones y cada uno de los colores, entendiendo que el índice de Fournier se interpreta como un valor mm (milímetros)

Teniendo en cuenta la tabla 5 presenta la clasificación del Índice de Fournier, en donde se propone un valor del IF menor a 50mm como muy bajo; entre 50 mm – 100mm bajo; 100mm – 150mm como moderado; 150mm – 200mm como alto y valores por encima de los 200mm como muy altos, para lo cual se estableció un color amarillo en el caso de IF moderado, Verde para IF Alto y diferentes tonalidades de azules como IF muy alto, cada tonalidad de azul tiene un intervalo de 50 siendo los colores más oscuros los de mayor valor, es importante resaltar que para ninguno de los escenarios se presentaron valores entre los 50mm – 100mm (IF bajo) o menores a 50mm (IF muy bajo).

- **Escenario de Cambio Climático RCP 26:**

Mapa 13. Variación Espacial del Índice de Fournier bajo el Escenario de Cambio Climático RCP - 26

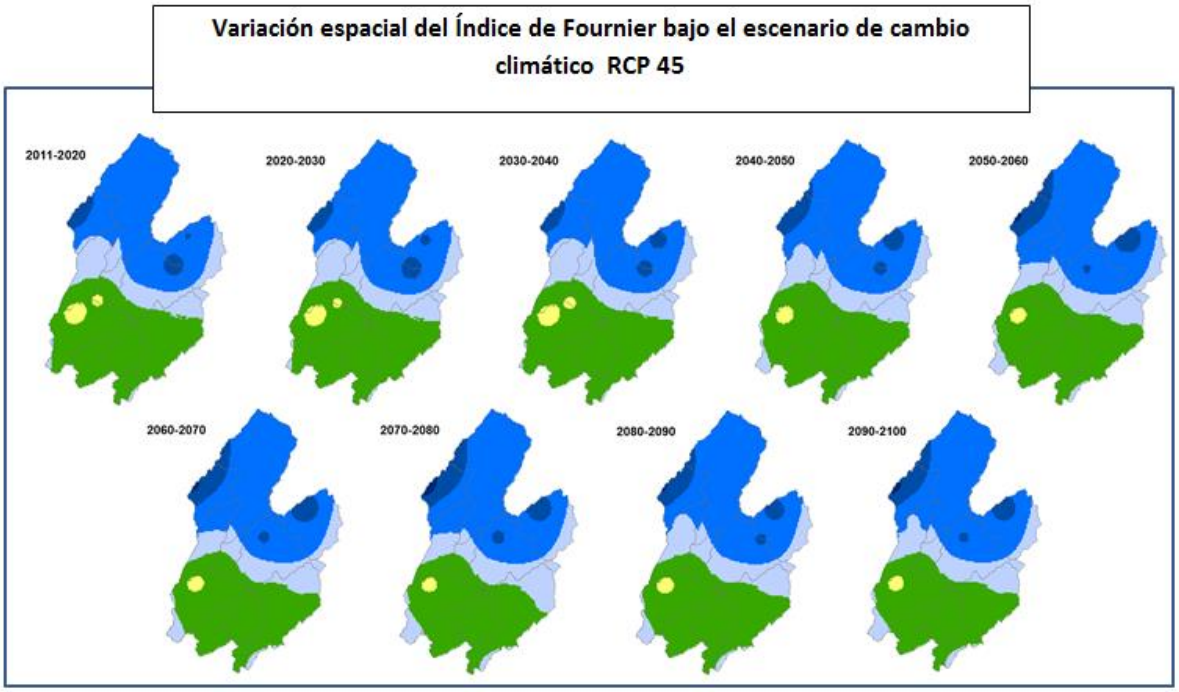


Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Como se puede observar se cuenta con 10 mapas correspondientes a un periodo de tiempo del 2011 al 2100, en donde se observa la aplicación del índice de Fournier bajo el escenario RCP 26, el cual así como se menciona anteriormente es el escenario positivo en donde las concentraciones de carbono a lo largo de los años y hasta el 2100 se comportarian de forma decreciente. A partir de los mapas anteriores se puede identificar que el periodo de tiempo en el que se presenta un mayor aumento en el índice de Fournier el cual corresponde al 2070-2080 con un rango de IF de entre 123mm – 327mm, mientras que en el 2030-2040 se presenta un menor índice en un rango de 125mm – 311mm. Por otra parte y aunque no se observa una variación considerable a través del tiempo se aprecia una tendencia a nivel espacial, en donde aproximadamente el 50% de cuenca se clasifica como IF muy alto, en la zona norte, esto se puede comprobar por medio de color azul ya que este representa los valores de IF por encima de los 200mm.

- **Escenario de Cambio Climático RCP 45**

Mapa 14. Variación Espacial del Índice de Fournier bajo el Escenario de Cambio Climático RCP - 45

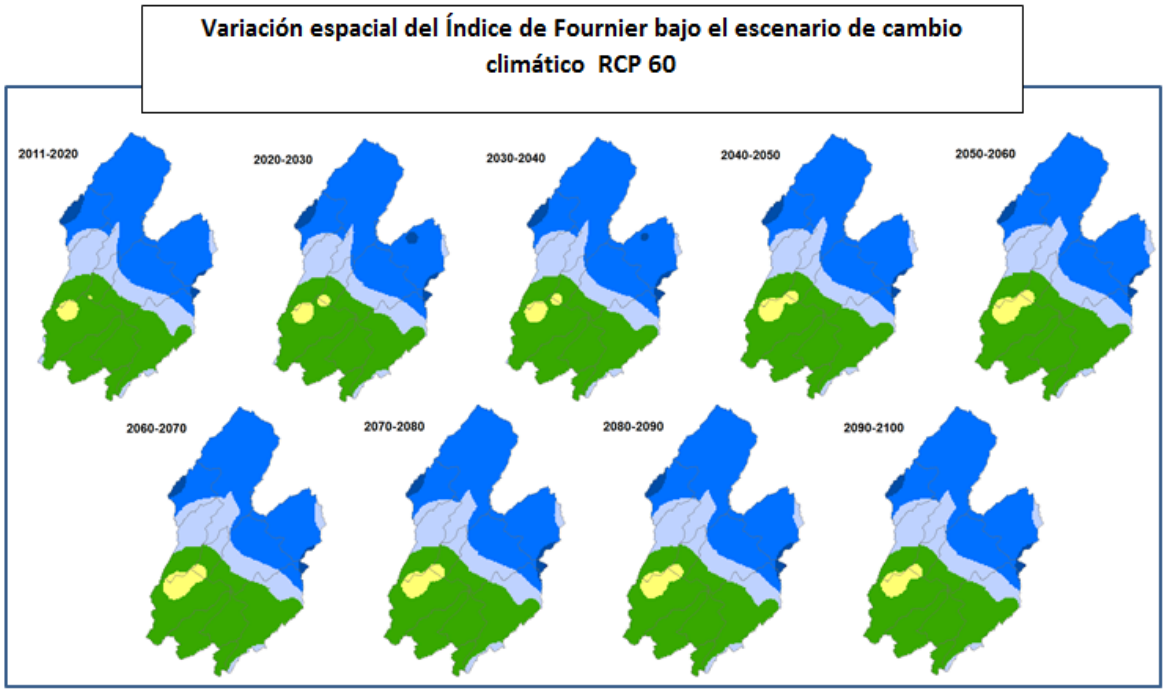


Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

El escenario de cambio climático RCP 45 plantea dentro de sus premisas que la concentración de CO2 será constante hasta el 2100, con respecto a esto se espera que la precipitación se comporte de manera tal que el IF se pueda representar por medio de los mapas anteriores, a partir de los cuales se puede evidenciar que para el periodo 2070-2080 el IF será el más alto con un rango entre 137mm – 361mm, mientras que para el 2030-2040 se presentara un índice menor en un rango entre 130mm – 325mm, aunque estas variaciones no se evidencien a simple vista, por otra parte se puede observar que la mitad del territorio ubicada al sur del mismo en la mayoría de los años presentara un IF menor a los 200mm, mientras que la otra mitad superara este umbral llegando hasta los 361mm en su año más crítico (2070-2080).

- **Escenario de Cambio Climático RCP 60**

Mapa 15. Variación Espacial del Índice de Fournier bajo el Escenario de Cambio Climático RCP - 60

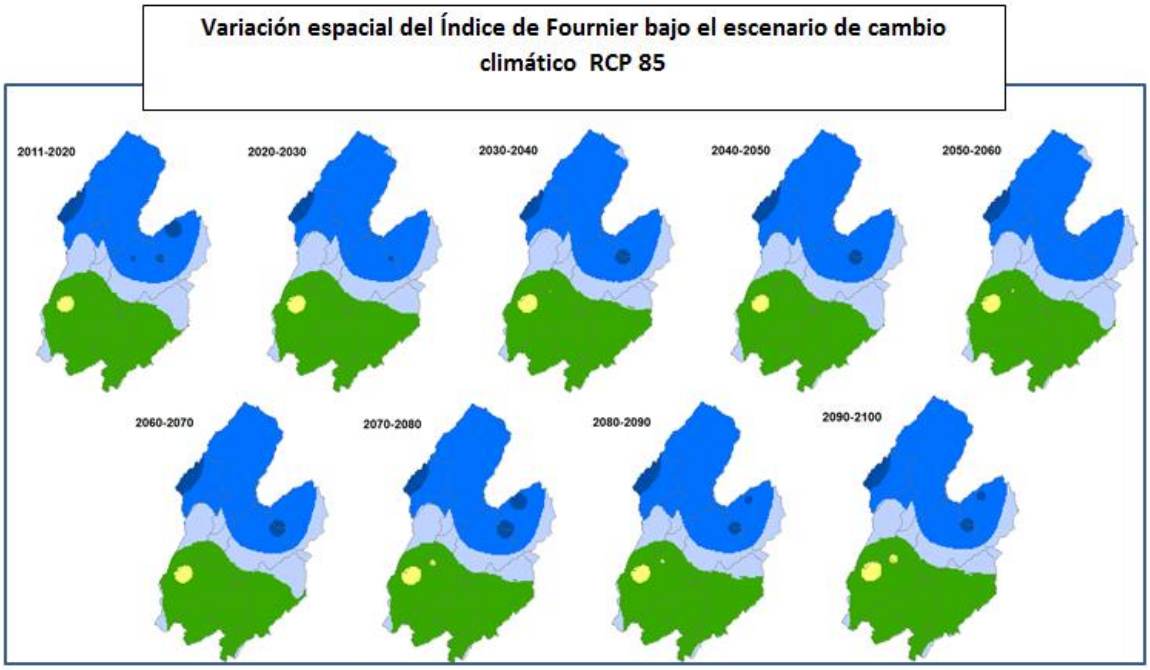


Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Como se observa a partir de los mapas el año en donde se presenta un mayor IF es en el periodo 2020-2030, mientras no se puede establecer por medio de los mapas cual periodo presenta los menores valores de IF ya que no hay un cambio significativo en los años del 2050 al 2100, para esto se debe tener en cuenta que el escenario RCP 60 corresponde a un escenario negativo en donde las concentraciones de CO2 aumentaran, por lo que se parte de la idea de que en este podría llegar presentarse un incremento en la concentración de CO2 que a su vez genere un cambio en variables climáticas como la precipitación, lo que finalmente debería influir en el IF, aunque esto no se aprecia a partir de los mapas.

- **Escenario de Cambio Climático RCP 85**

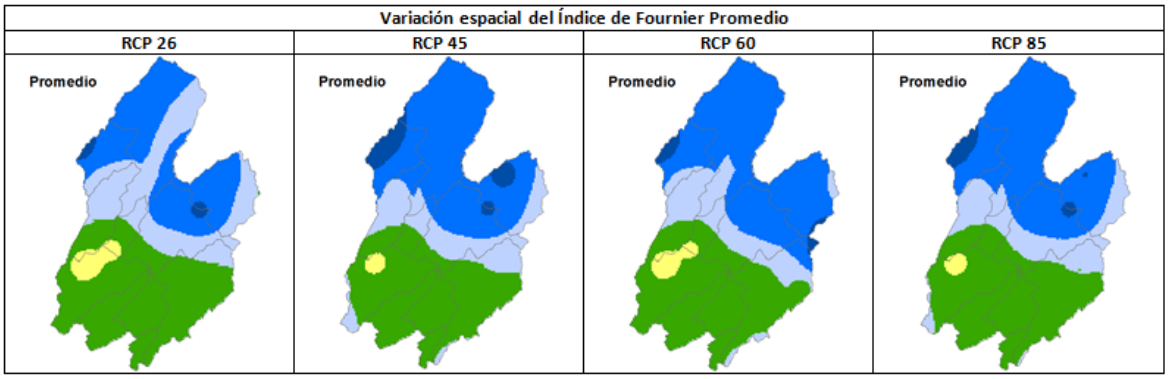
Mapa 16. Variación Espacial del Índice de Fournier bajo el Escenario de Cambio Climático RCP - 85



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Como se observa en los mapas anteriores se evidencia una variabilidad a través del tiempo del IF, en donde se presentan años con variaciones en los índices en algunas partes del territorio, el periodo en el que se aprecia un aumento del índice corresponden a 2070-2080 en un rango entre 132mm – 329mm, mientras que para el periodo 2030-2040 se presenta una disminución del mismo con un rango entre 133mm – 320mm. Estos valores del IF son resultado de la aplicación de las precipitaciones esperadas bajo el escenario de cambio climático RCP 85, el cual es el más pesimista de todos y en donde se esperaría que las concentraciones de CO2 sean casi el doble de las que se puede esperar bajo el escenario optimista.

Mapa 17. Variación Espacial del Índice de Fournier Promedio

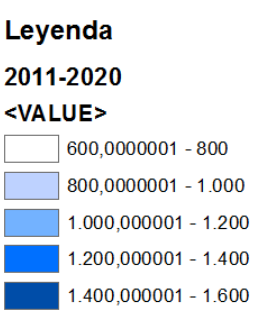


Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

A través de estos últimos mapas podemos observar que aunque las variaciones en el IF no son fuertes, si se observa una transición, en donde el escenario en donde los valores de IF son mayores corresponde al escenario RCP 45 y se aprecia que más del 50% de la cuenca se clasificaría con una agresividad muy alta, y la zona en la que se presentan valores de IF clasificados como agresividad moderada disminuye con respecto a los demás escenarios, mientras que el escenario en donde se presentan valores inferiores de IF en la mayoría del territorio corresponde al escenario RCP 26, en donde a pesar de que aproximadamente un 50% del territorio se clasificaría como agresividad muy alta una menor cantidad del territorio se encuentra con valores por encima de los 250mm.

- **Índice Modificado de Fournier – IMF**

Para realizar la variación espacial y temporal de los índices se utilizó un promedio por décadas desde 2011 hasta el año 2100, para la interpretación de estos mapas se debe tener en cuenta las siguientes clasificaciones de cada uno de los colores, entendiendo que el Índice Modificado de Fournier se interpreta como un valor mm (milímetros)

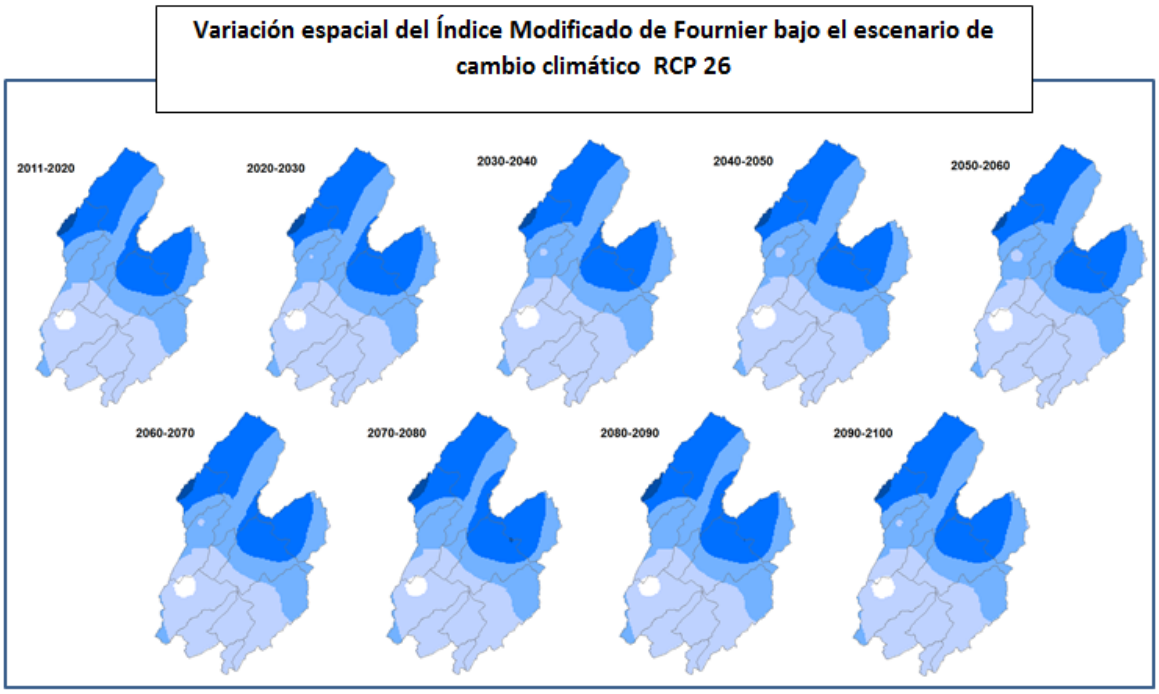


Teniendo en cuenta la tabla 5 clasificación el Índice Modificado de Fournier, en donde se propone un valor del IMF de 400mm como una agresividad muy alta, y la gráfica anterior en donde los valores mínimos del IMF para todos los escenarios en los diferentes años se encontraron en un rango entre los 600mm – 800mm, se evidencia a partir de esto

que los valores de IMF en la cuenca están muy por encima de los limites clasificados para el IMF.

- **Escenario de Cambio Climático RCP 26**

Mapa 18. Variación Espacial del Índice Modificado de Fournier bajo el Escenario de Cambio Climático RCP - 26

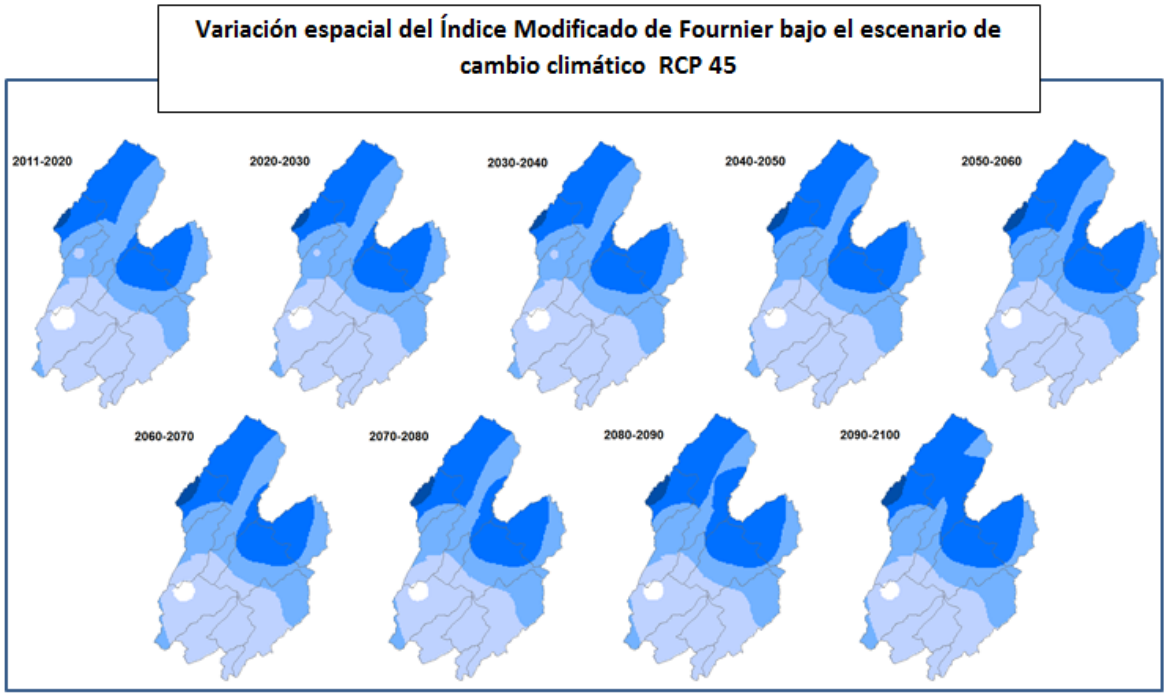


Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

A partir de los mapas anteriores se puede observar que los valores más altos del IMF se presentan en la parte norte de la cuenca, mientras que los valores menores a estos se muestran en la parte sur de la cuenca, además de esto se observa que para los años estudiados, el periodo en el que se presenta un valor mayor de IMF es 2080-2090 con un rango entre los 718mm – 1459mm, mientras que en el periodo de 2050-2060 es en el que se presentan valores menores de IMF en un rango entre los 715mm – 1434mm, a partir de estos rangos y de los mapas no se observa una tendencia clara al aumento o disminución del índice a través de los años.

- **Escenario de Cambio Climático RCP 45**

Mapa 19. Variación Espacial del Índice Modificado de Fournier bajo el Escenario de Cambio Climático RCP - 45

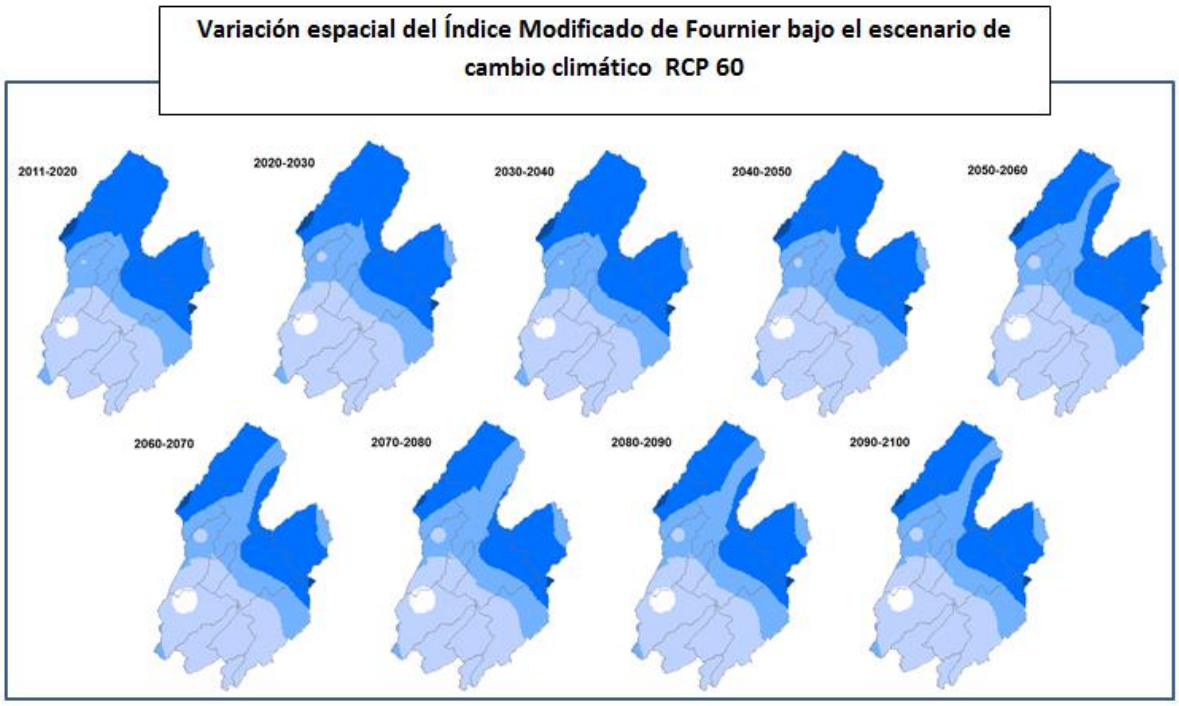


Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Para el escenario RCP 45 se presenta un IMF superior en el periodo de 2090-2100 con un rango entre los 733mm – 1511mm, mientras que para el periodo de 2011 – 2020 se presentan valores menores con un rango entre 704mm – 1438mm, cabe resaltar que aunque en estos años se presenten menores valores estos siguen estando por encima de los 400mm lo que implica que se clasifican como una agresividad muy alta, además de esto se presentan los valores más altos en la zona norte de la cuenca, mientras que los valores menores se concentran en la parte sur de la cuenca, por otra parte cabe resaltar que el IMF para este escenario aunque en la mayoría de los años no se observa una variación a través de los años, para la década de 2090-2100 si se aprecia un incremento del índice en la zona norte de la cuenca.

- **Escenario de Cambio Climático RCP 60**

Mapa 20. Variación Espacial del Índice Modificado de Fournier bajo el Escenario de Cambio Climático RCP - 60

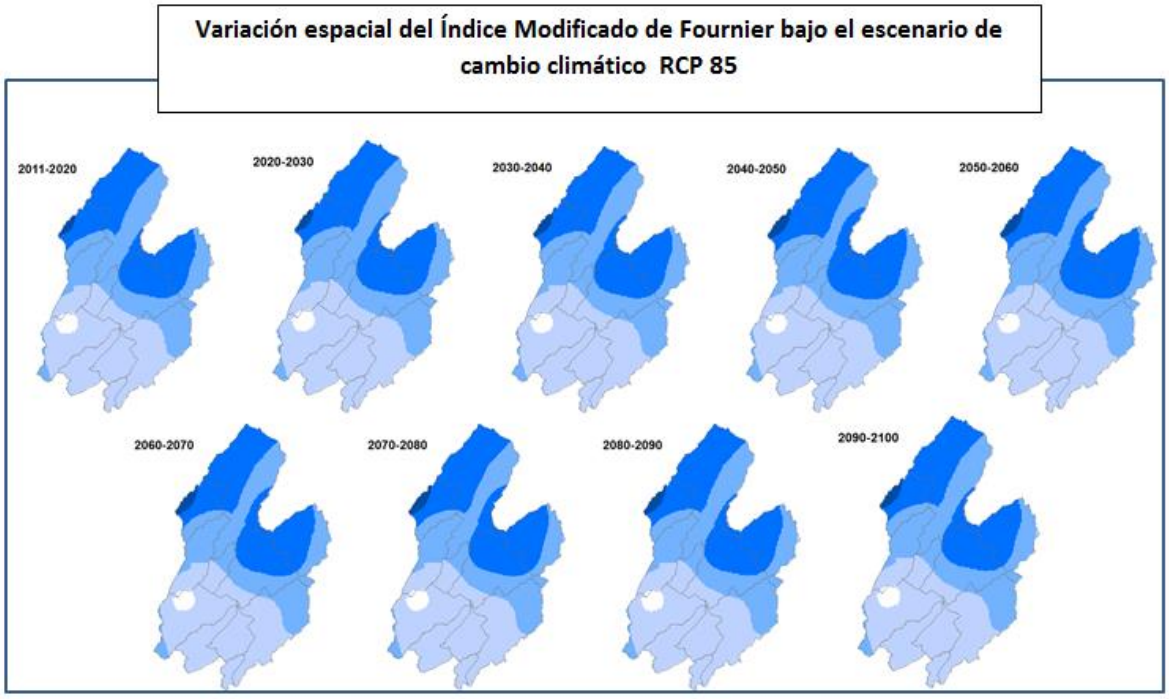


Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Los mapas anteriores nos permiten observar la variación espacial del IMF para el escenario de cambio climático RCP 60, en donde se observa que las concentraciones más altas del índice se presentan en la zona noroccidental, mientras que los valores menores se aprecian en la zona sur de la cuenca, teniendo en cuenta que tanto en la zona norte como en la zona sur los valores de IMF superan los 400mm, es decir se clasifican como agresividad muy alta, el periodo en el que se presentó un valor más elevado del IMF corresponden al año 2030-2040, con un rango entre 711mm – 1557mm, mientras que la menor se presenta en el periodo 2070-2080, con un rango 693mm – 1535mm, para este escenario es un poco más evidente que en las primeras décadas en la zona norte de la cuenca el IMF es mucho mayor que en las décadas finales.

- **Escenario de Cambio Climático RCP 85**

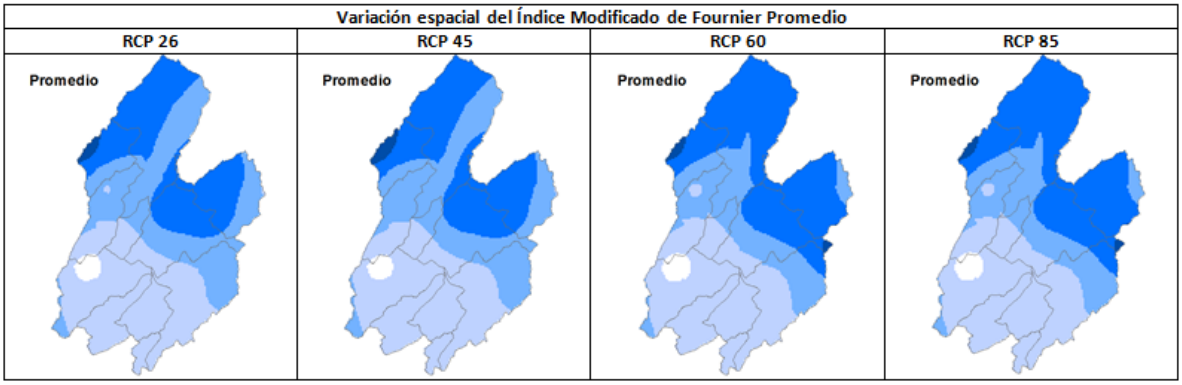
Mapa 21. Variación Espacial del Índice Modificado de Fournier bajo el Escenario de Cambio Climático RCP - 85



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Los valores correspondientes al IMF para el escenario de cambio climático RCP 85, al igual que los correspondientes a los escenarios anteriores se clasifican con una agresividad muy alta en todo el territorio, aunque en la zona norte esta agresividad sea superior con respecto a la agresividad que se evidencia a partir de los análisis en la zona sur de la cuenca, además de esto se encuentra que en el periodo de 2040-2050 estos valores son superiores con respecto a los demás años analizados, con un rango entre los 721mm – 1463mm, mientras que para el periodo entre 2011-2020 con un rango entre los 714mm – 1433mm, aunque a nivel espacial no se observa un cambio significativo a través de los años.

Mapa 22. Variación Espacial del Índice Modificado de Fournier Promedio



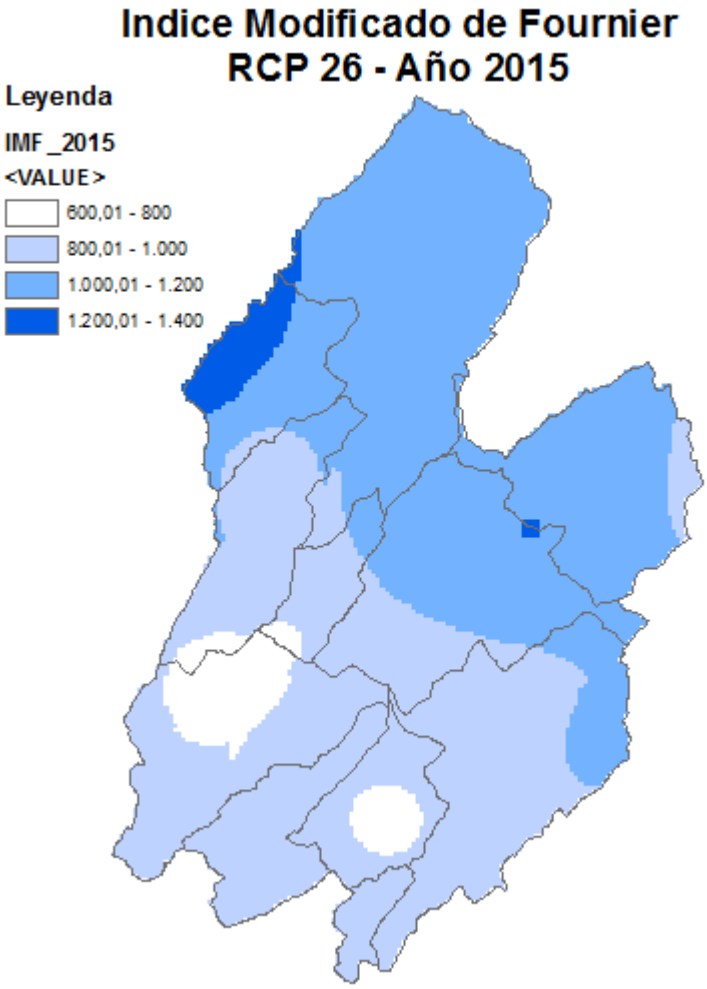
Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

A partir de los promedio del IMF para cada uno de los escenarios establecidos no se logra apreciar una variación significativa a través de los mismos, aunque se observa que los escenarios RCP 26 y RCP 45 presentan valores menores de IMF en algunas zonas de la cuenca, mientras los escenarios RCP 60 y RCP 85 presentan una mayor cantidad de territorio con IMF más altos, cabe resaltar que para todos los años en los diferentes escenarios de cambio climático la variación espacial del IMF es similar teniendo los valores más elevados en la zona norte, mientras que en la zona sur se presentan los valores más bajos, aunque a pesar de que estos valores menores se den en la zona sur de la cuenca, estos valores superan por mucho lo establecido como agresividad muy alta en donde se clasifica de esta manera a los valores por encima de 400mm y el valor más bajo de todos se presentó en el escenario RCP 60 en el periodo de 2070-2080 de 693mm.

Los años seleccionados para la aplicación del este índice para el periodo 2011 – 2040 bajo el escenario de cambio climático RCP 26, con respecto al análisis de la variabilidad climática, corresponden a:

- **2015 (Precipitaciones inferiores a la promedio del periodo)**

Mapa 23. IMF para el año 2015

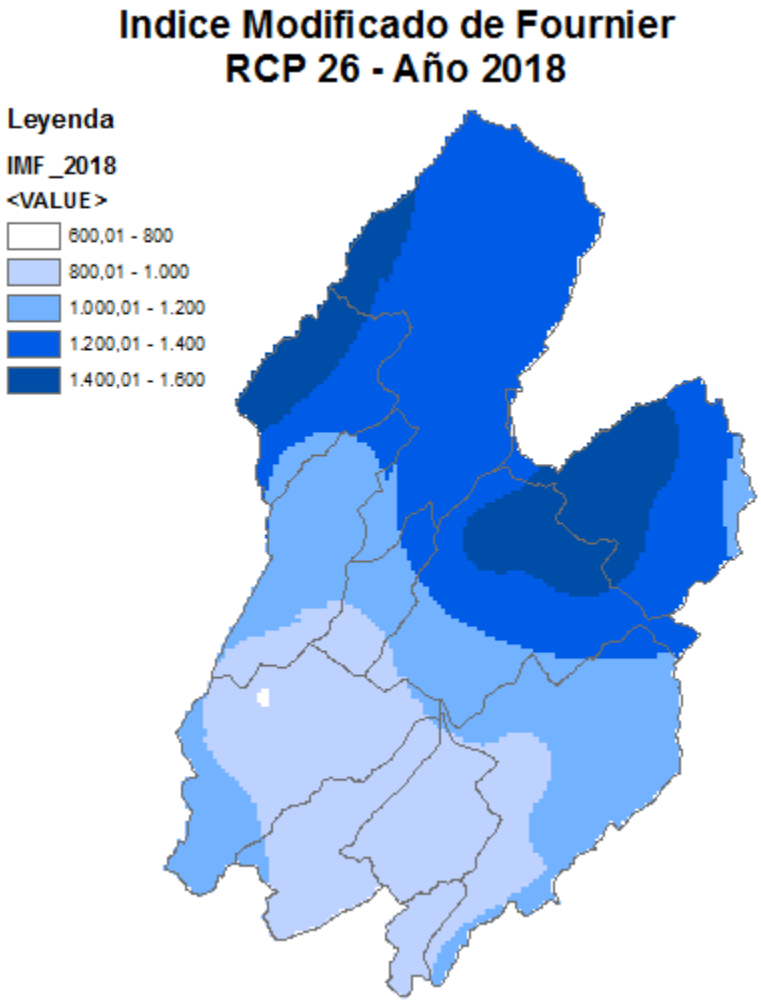


Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

El IMF en este año se presenta en un rango de 600 mm – 1400 mm, en donde aproximadamente el 50% del territorio presenta IMF por debajo de los 1200 mm, cabe resaltar que aunque en la zona sur se presente esta disminución del IMF toda la cuenca presenta un IMF clasificado como agresividad muy alta.

- **2018 (Precipitaciones Superiores a la promedio del periodo)**

Mapa 24. IMF para el año 2018



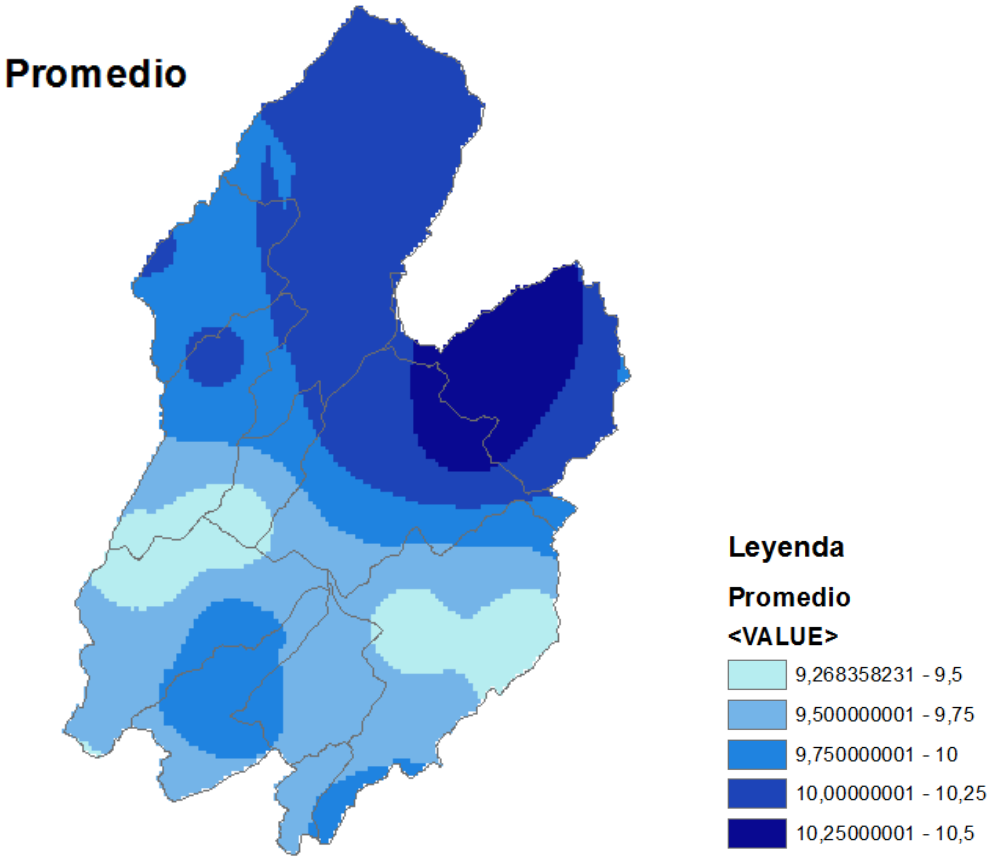
Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Para el año 2018 se proyecta un IMF en un rango entre los 600 mm y los 1600mm en donde más del 70% de la cuenca presenta un índice superior a los 1200mm y una mínima parte presenta un IMF entre los 600 mm y los 800 mm, además de esto cabe resaltar que los mayores índices se presentan en la zona norte de la cuenca, mientras que para la zona sur se observa una disminución del mismo.

6.2.4. Índice de Concentración de la Precipitación

Para realizar la variación espacial de los índices se utilizó un promedio anual multianual en un periodo de años de 2011-2100, se realizó de este modo ya que luego de determinar el ICP se estableció que este no varía considerablemente a través de los años ni en los escenarios ya que este índice se mantuvo en un rango entre los 8 - 12, para lo cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Mapa 25. Variación espacial del Índice de Concentración de la Precipitación Futura



Fuente: Elaboración Propia con información del IDEAM

El índice de concentración de precipitación presenta una variación espacial en donde los valores más altos se presentan en la zona nororiental, mientras que los valores menores se presentan en la zona central de la cuenca, en donde aproximadamente el 90% del territorio presenta un ICP uniforme, mientras que el 10% restante se clasifica como moderadamente estacional.

Tabla 15. Valores del Índice de Concentración de la precipitación para los diferentes escenarios

	RCP 26	RCP 45	RCP 60	RCP 85
Máximo	11,35	11,48	11,74	11,35
Media	10.01	10,12	10,18	9,98
Mínimo	8,67	8,76	8,63	8,62

Fuente: Elaboración Propia con información del IDEAM

Así como se puede observar en la tabla anterior la variación del ICP en cada uno de los escenarios no es significativa ya que si se toma el promedio de cada escenario estos en su mayoría se clasificarían como Moderadamente estacional, incluso en sus valores máximos, esta clasificación no varía, por lo que se toma a la cuenca como uniforme y moderadamente estacional.

6.3. VARIABILIDAD CLIMATICA EN LA CUENCA UBATÉ – SUÁREZ

6.3.1. VARIABILIDAD CLIMATICA ACTUAL

Los fenómenos de la niña y del niño, son fases dentro del Ciclo de Oscilación del Sur (ENOS), característico de la variabilidad interanual, que tienen su origen en los cambios de la temperatura superficial del océano pacifico tropical. Así, un calentamiento en las aguas del Pacifico sumado a las condiciones atmosféricas propicias, frente a las costas de Ecuador, sur de Colombia y norte de Perú, originara un fenómeno de El niño, mientras que el enfriamiento generara a La Niña [20]. A partir de lo anterior el IDEAM ha establecido las épocas de comienzo y finalización del fenómeno El Niño y La Niña ocurridos en los últimos 60 años, así como se puede observar a continuación:

Grafica 2. Duración e Intensidad del Evento El Niño y La Niña

Fuente: IDEAM [21]

En la gráfica 2, se puede observar la intensidad y duración de cada uno de estos fenómenos, los cuales se identificaron a partir de anomalías de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) en el océano pacifico central [20], así mismo por medio de esta se muestra que la variabilidad climática interanual presenta eventos cada vez más frecuentes y en el caso de las ultimas Niñas, van de moderados a muy fuertes [20].

Debido a que a partir de las gráficas anteriores se pueden determinar los meses en los que se presentaron fenómenos del Niño y la Niña, y por medio de los cuales se deducen los meses de los diferentes años en los que no se presentaron este tipo de fenómenos los que para el presente proyecto de denominaron como Normales; y gracias a que se cuenta con los registros de precipitación mes a mes de cada una de las estaciones para el periodo de tiempo entre 1971 – 2010, se

realizara un análisis estacional, ya que a esta escala corresponde la fluctuación del clima en este caso la precipitación a nivel mensual, por medio de la información con la que se cuenta se realizó un análisis posterior a la selección de los meses de cada año que corresponden a un fenómeno del niño, niña y se establecieron como normales a los meses que no presentan ninguno de los dos fenómenos, luego de seleccionarlos, se realizó un promedio mensual de la precipitación (mm), para cada uno de los casos (niño, niña y normal), obteniendo como resultado la siguiente tabla:

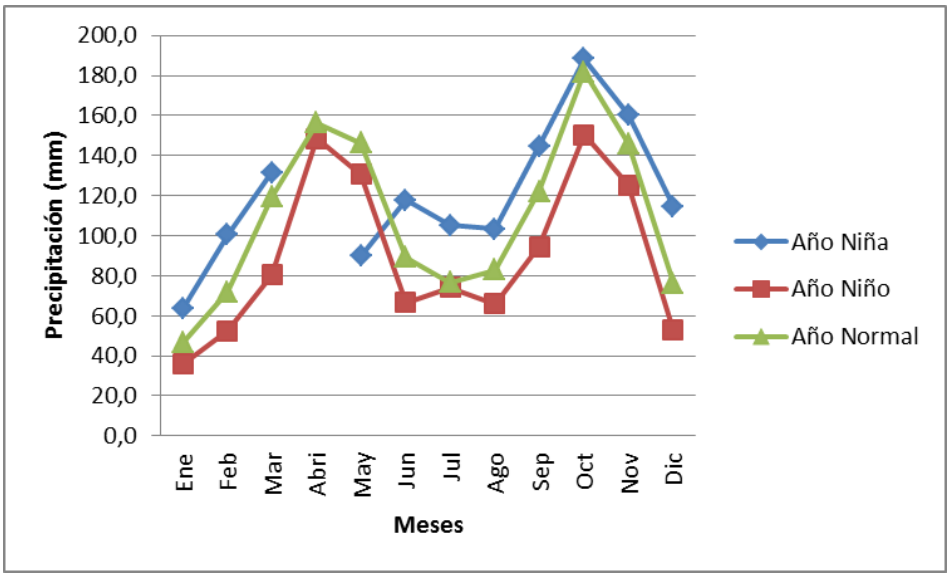
Tabla 16. Promedio Mensual de la Precipitación (mm) para cada Evento

Mes	Año Niña	Año Niño	Año Normal
Ene	63,4	35,8	46,5
Feb	100,3	52,5	71,8
Mar	131,4	80,3	119,3
Abr		148,3	156,4
May	89,9	130,6	146,4
Jun	117,9	66,6	89,1
Jul	105,2	74,1	76,5
Ago	103,4	65,8	83
Sep	144,6	94,5	122,1
Oct	188,3	150,2	181,6
Nov	160,3	125,3	145,8
Dic	114,7	52,7	76,4

Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

En donde se puede observar que para el periodo de 1971 – 2010 a partir del cual se obtienen los registros de precipitación en las diferentes estaciones fuera y dentro de la cuenca, no se ha registrado un evento niña para el mes de abril, esto se comprueba a partir de la gráfica 2, en donde se establece el periodo de inicio y finalización de cada uno de los fenómenos, gráficamente estos resultados se pueden apreciar de la siguiente forma:

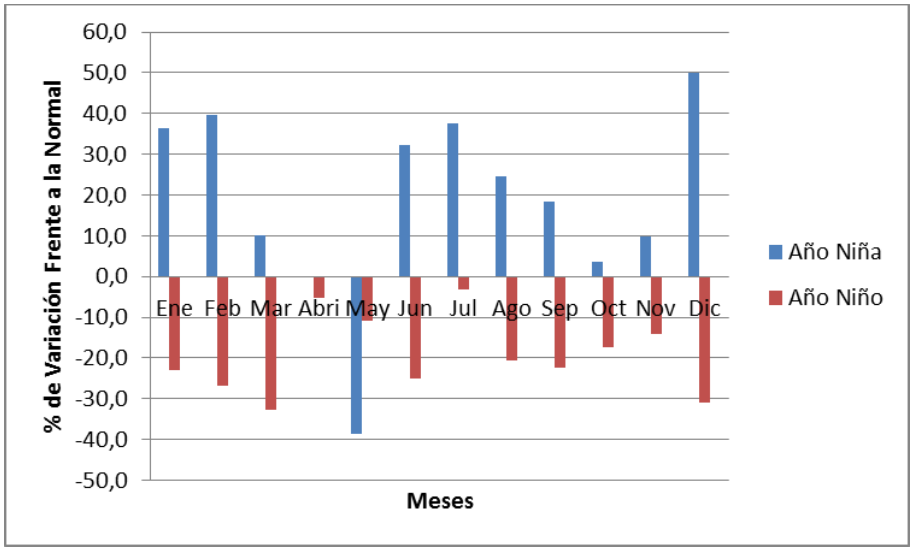
Grafica 3. Precipitación Promedio para cada uno de los Eventos



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

En donde se hace evidente un aumento de la precipitación para la cuenca en los meses en que se presenta un fenómeno de la Niña y una disminución de las mismas para los meses en que se presenta el fenómeno del Niño con respecto a la normal, con el fin de hacer un poco más evidente los resultados obtenidos se realizó la siguiente gráfica:

Grafica 4. Variación Porcentual de los eventos frente a la normal



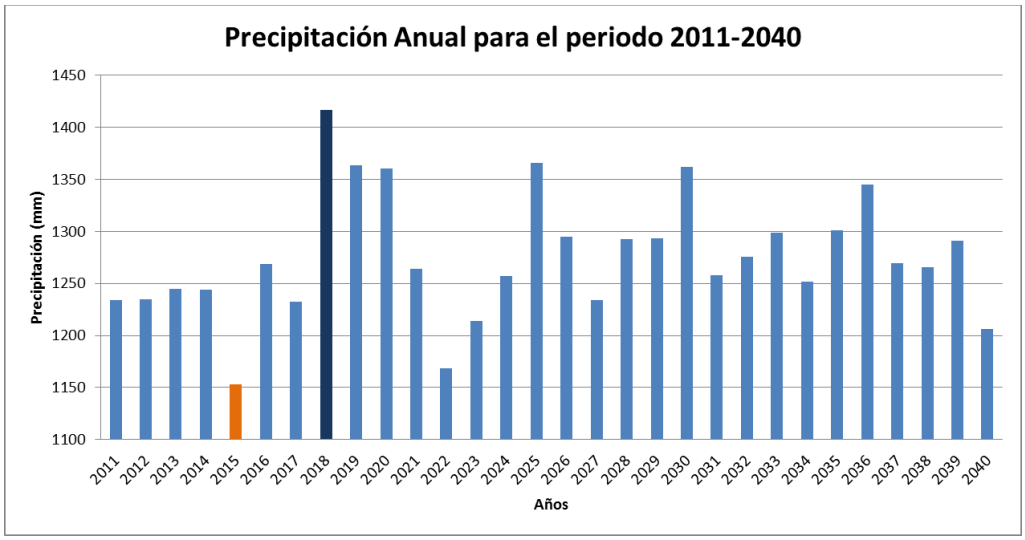
Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Se observa que la variación porcentual de la precipitación para el fenómeno de la Niña con respecto a los valores normales de precipitación en el mes de diciembre alcanzo el 50%, mientras que para el fenómeno del Niño el mes más crítico corresponde a marzo con una variación superior al 30%.

6.3.2. VARIABILIDAD CLIMATICA FUTURA

Con el fin de sintetizar los resultados obtenidos para la variabilidad climática futura estos se presentaran completos en el ANEXO I, debido a la cantidad de información procesada, a continuación se muestra como se realizó el procedimiento:

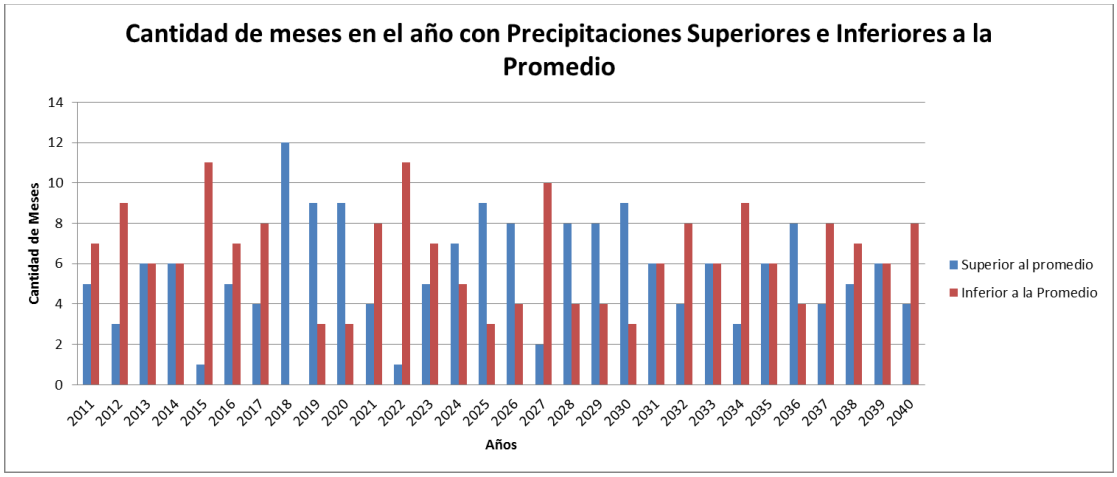
Grafica 5. Precipitaciones Proyectadas para el Periodo 2011 – 2040; RCP 26



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

El año en el que se presenta una mayor precipitación es en el 2018, con cerca de 1400mm, mientras que en el que se presenta una menor precipitación corresponde al año 2015 por debajo de los 1150mm.

Grafica 6. Cantidad de meses en el año con Precipitaciones Superiores e Inferiores a la Promedio Periodo 2011 – 2040; RCP 26



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

A partir de esta gráfica, no solo se observa que para el año 2015, 11 de los 12 meses presentarían precipitaciones por debajo del promedio, y que para el año 2018 los 12 meses del años presentaran precipitaciones por encima del promedio, además de esto también se aprecia que bajo el escenario RCP 26 en este periodo el 46% de los años presentan mayor cantidad de meses con precipitaciones inferiores a la promedio; el 20% presentan las misma cantidad de meses con precipitaciones por encima y por debajo de la promedio; y el 33% presentan precipitaciones superiores al promedio.

Luego de realizar estos procedimientos para los diferentes escenarios de cambio climático para el periodo 2011 – 2040, se obtuvieron los siguientes resultados:

- **Periodo 2011 – 2040:**

Tabla 17. Precipitación Superior; Periodo 2011 - 2040

Precipitación superior periodo 2011 - 2040				
	RCP 26	**RCP 45**	**RCP 60**	**RCP 85**
Año	2018	2028	2015	2015
Valor (mm/año)	1416	1359	1373	1400
Meses/año	12	10	11	11

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Precipitación Inferior; Periodo 2011 - 2040

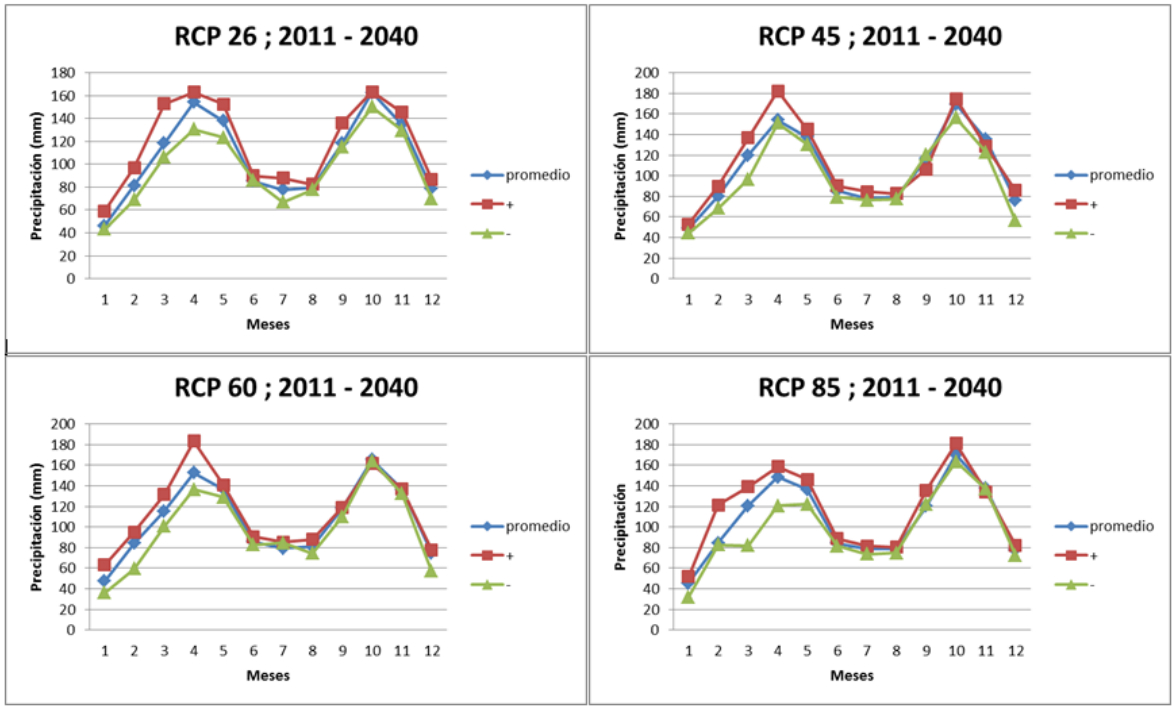
Precipitación inferior periodo 2011 - 2040				
	RCP 26	**RCP 45**	**RCP 60**	**RCP 85**
Año	2015	2020	2012	2020
Valor (mm/año)	1153	1180	1156	1163
Meses/año	11	11	10	11

Fuente: Elaboración propia

A partir de las tablas 17 y 18, se pueden observar los años seleccionados para el periodo 2011 – 2040 para cada uno de los escenarios de cambio climático, en donde se aprecia que algunos tienden a ser contradictorios ya que por ejemplo para el escenario RCP 26 en el 2015 se presentarían precipitaciones inferiores a la promedio anual, mientras que para los escenarios RCP 60 y RCP 85 este mismo año corresponde al que se presentaron las precipitaciones superiores a la promedio, además de esto se observa que la variación de precipitación es de unos cuantos milímetros (mm) en los diferentes años tanto para los años seleccionados con precipitaciones superiores a la promedio, los cuales se encuentran alrededor de los 1400 mm, como a los años con posibles precipitaciones inferiores a la promedio, los cuales oscilan entre los 1150 y 1175 mm.

Para un análisis mucho más profundo se realizaron las siguientes gráficas para cada uno de los años seleccionados en los diferentes escenarios de cambio climático.

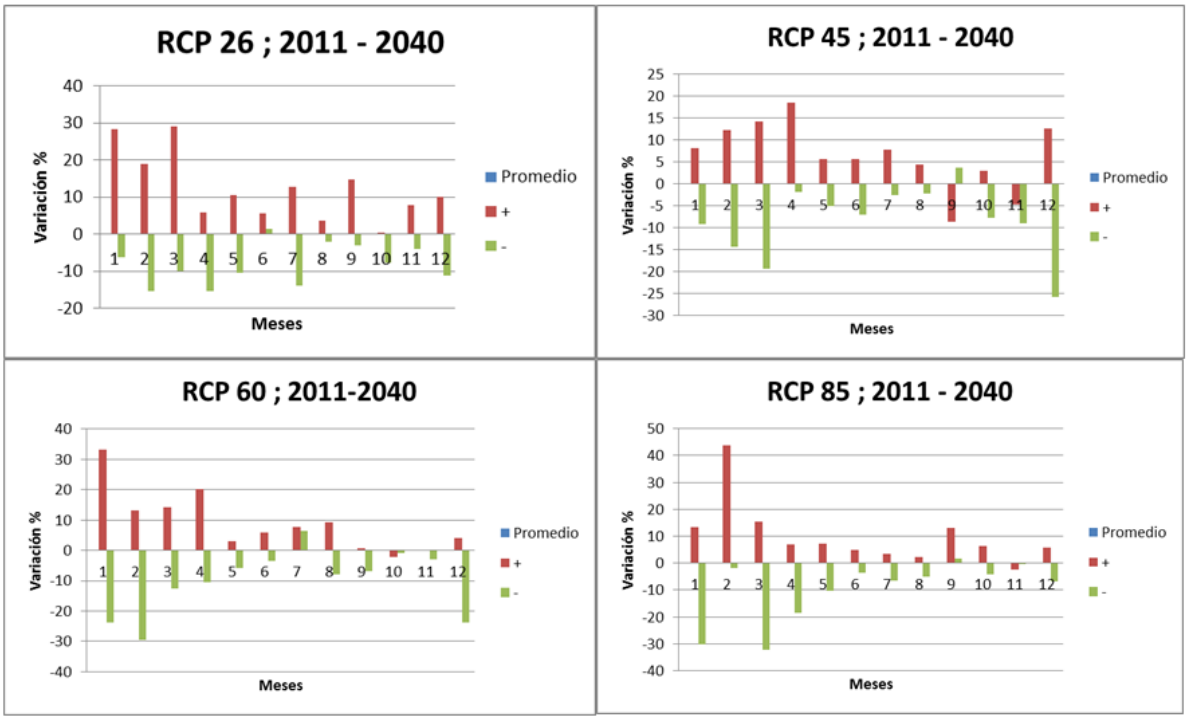
Grafica 7. Comportamiento Promedio de la Precipitación para cada uno de los Escenarios de Cambio Climático, Periodo 2011 - 2040



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Para todos los escenarios se presenta un comportamiento bimodal de la precipitación, además de esto las gráficas nos permiten observar que se presentaran mayores precipitaciones bajo los escenarios RCP 60 y RCP 45 en los meses de abril y octubre, alcanzando los 180mm, por otra parte se evidencia una mayor diferencia de precipitación para el mes de abril que para el mes de octubre, en donde tanto la precipitación mayor, menor y promedio presentan un mismo valor o muy cercano.

Grafica 8. Variación Porcentual de la Precipitación para cada uno de los Escenarios de Cambio Climático, Periodo 2011 - 2040



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

En estas gráficas, se puede observar la variación porcentual de la precipitación para cada uno de los años seleccionados con mayor y menor precipitación, para cada uno de los escenarios, en donde se aprecia que el RCP 85 presenta una mayor variación porcentual tanto para el año de mayor precipitación siendo superior al 40% positivo, en el mes de febrero, como para el año con menor precipitación el cual resulta ser superior al -30% en el mes de marzo, además de esto se observa que los meses con mayor susceptibilidad a presentar una variación porcentual de la precipitación tanto negativa como positiva corresponden a enero, febrero, marzo, abril y diciembre.

- **Periodo 2040 – 2070:**

Tabla 19. Precipitación Superior; Periodo 2040 - 2070

Precipitación superior periodo 2040 - 2070				
	RCP 26	**RCP 45**	**RCP 60**	**RCP 85**
Año	2043	2045	2062	2064
Valor (mm/año)	1387	1427	1400	1366
Meses/año	12	11	11	11

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Precipitación Inferior; 2040 - 2070

Precipitación inferior periodo 2040 - 2070				
	RCP 26	**RCP 45**	**RCP 60**	**RCP 85**
Año	2052	2043	2060	2053
Valor (mm/año)	1248	1180	1221	1225
Meses/año	10	10	11	10

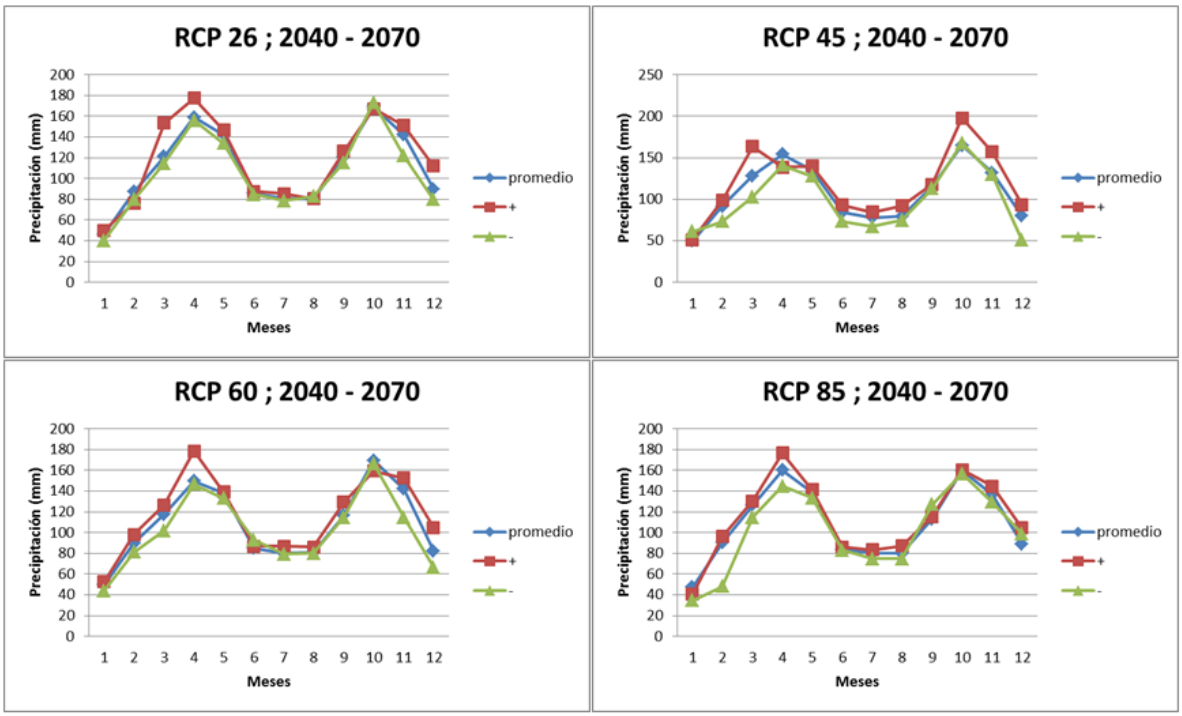
Fuente: Elaboración propia

Por medio de las tablas anteriores se puede identificar nuevamente una controversia ya que para el escenario RCP 26 el año 2043 presentaría precipitaciones superiores a la promedio, mientras que para el escenario RCP 45 este mismo año representaría menores precipitaciones, con una diferencia de precipitación de 207 mm/año.

Adicionalmente se puede observar que la diferencia entre los diferentes años seleccionados con precipitaciones superiores es de 61 mm, mientras que para los años seleccionados con precipitaciones inferiores a la promedio esta diferencia es de 68 mm.

Posterior a la selección de los años se realizó en siguiente análisis para cada uno de ellos.

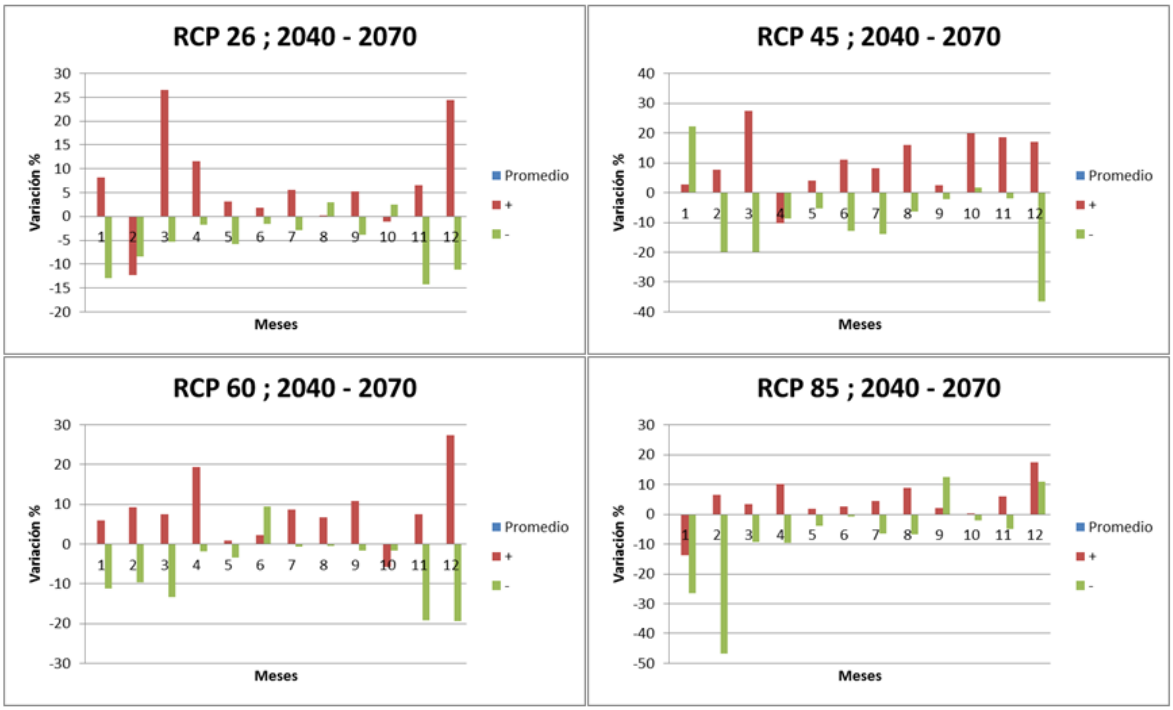
Grafica 9. Comportamiento Promedio de la Precipitación para cada uno de los Escenarios de Cambio Climático, Periodo 2040 - 2070



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Para el periodo 2040 – 2070 bajos los diferentes escenarios de cambio climático el comportamiento de la precipitación es de tipo bimodal en donde los dos periodos lluviosos se presentan en los meses de marzo – abril y octubre – noviembre, mientras que los periodos de sequía se presentan en los meses de diciembre – enero y junio – julio, es importante resaltar que en el periodo RCP 45 se presenta un valor de precipitación en el mes de octubre superior a los demás proyectados en los diferentes escenarios, la cual corresponde al 200mm, mientras que el periodo en el que se presenta una menor precipitación mensual corresponde al escenario RCP 85 en el mes de enero con una precipitación cerca a los 30mm.

Grafica 10. Variación Porcentual de la Precipitación para cada uno de los Escenarios de Cambio Climático, Periodo 2040 - 2070



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

A partir del anterior conjunto de graficas es posible identificar que la variación porcentual positiva de la precipitación con respecto a la normal se presenta bajo los escenarios de cambio climático RCP 26 y RCP 60; mientras que la variación negativa porcentual de la precipitación más relevante con respecto a la normal se presenta bajo el escarnio RCP 85 con cerca del -45%.

- **Periodo 2070 – 2100**

Tabla 21. Precipitación Superior; Periodo 2070 - 2100

Precipitación superior periodo 2070 - 2100				
	RCP 26	**RCP 45**	**RCP 60**	**RCP 85**
Año	2073	2099	2087	2079
Valor (mm/año)	1362	1375	1463	1445
Meses/año	11	8	11	10

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22. Precipitación Inferior; Periodo 2070 - 2100

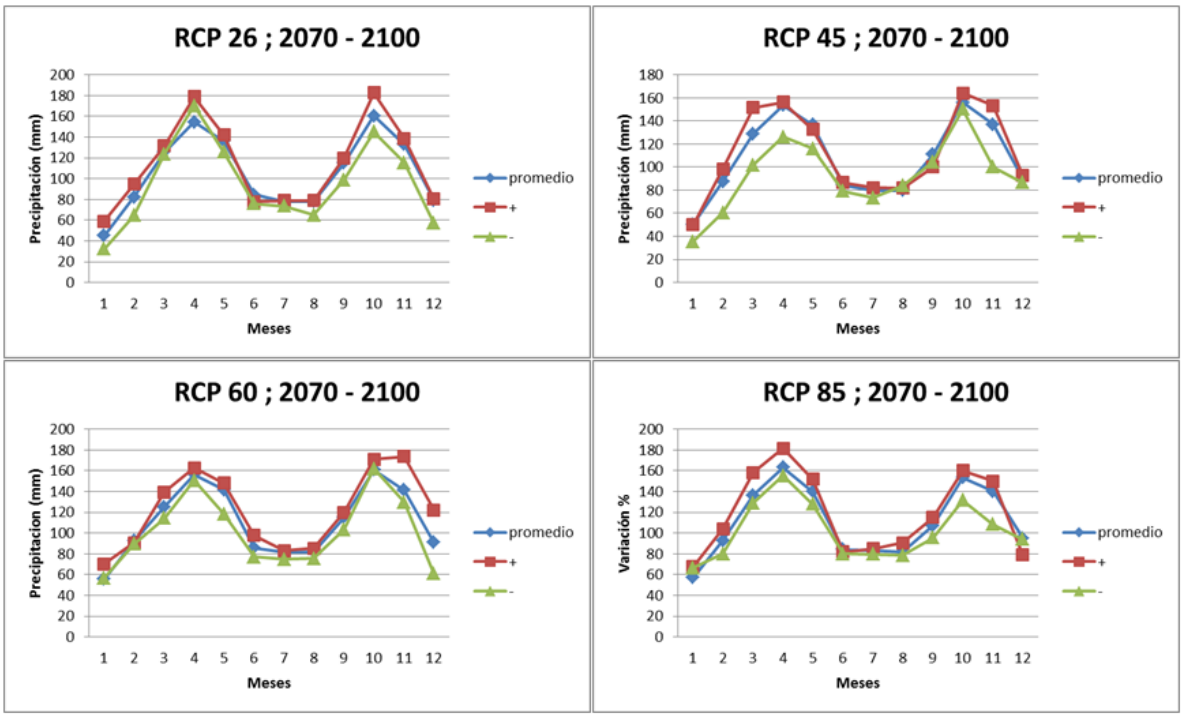
Precipitación inferior periodo 2070 - 2100				
	RCP 26	**RCP 45**	**RCP 60**	**RCP 85**
Año	2074	2100	2100	2100
Valor (mm/año)	1121	1117	1212	1225
Meses/año	11	11	10	11

Fuente: Elaboración propia

Para este periodo es importante observar, como para 3 de los 4 escenarios de cambio climático el año 2100 seria en el que se presentarían las precipitaciones más bajas con rango entre los 1117 y 1225 mm es decir con una diferencia de 108 mm, por su parte el único escenario que propone un año diferente es el escenario RCP 26 el cual plante el año 2074 como el de menores precipitaciones.

Por su parte los años seleccionados con posibles precipitaciones superiores a la promedio cuentan con una diferencia de 101 mm.

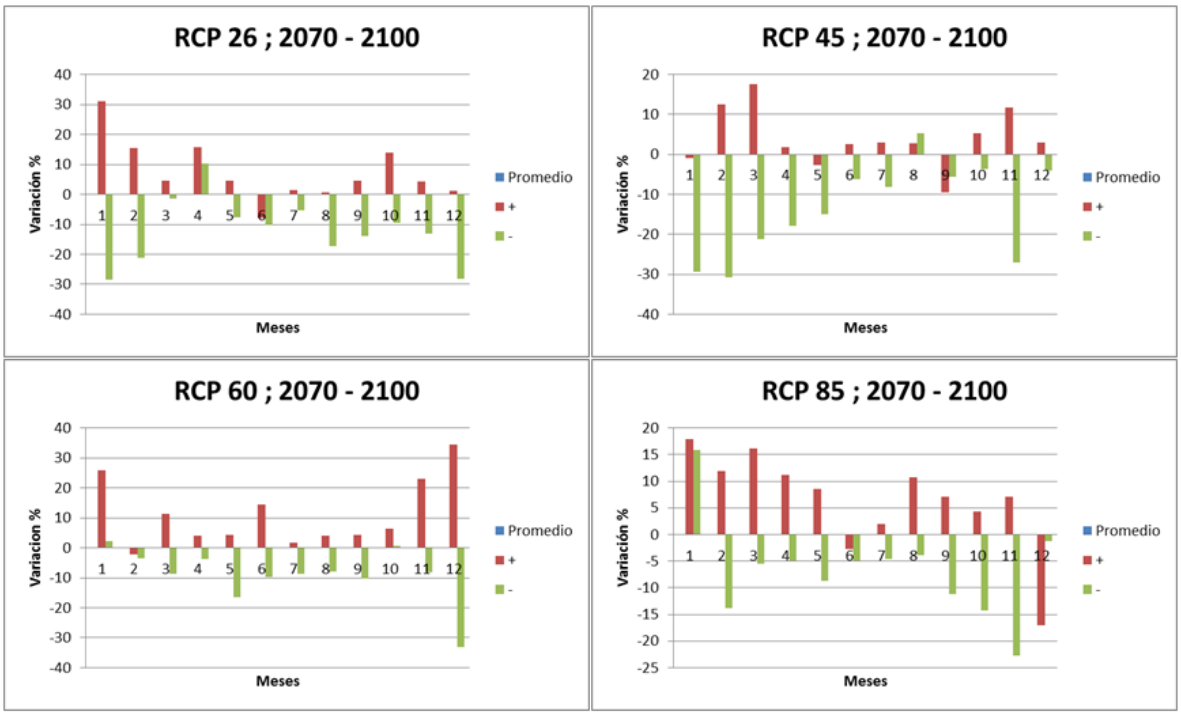
Grafica 11. Comportamiento Promedio de la Precipitación para cada uno de los Escenarios de Cambio Climático, Periodo 2070 - 2100



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

El comportamiento de la precipitación para el periodo 2070 – 2100 bajo los diferentes escenarios de cambio climático presenta un comportamiento de tipo bimodal, con dos periodos lluviosos y dos periodos de sequía, por otra parte las gráficas nos permiten observar que para el escenario RCP 45 el comportamiento y los valores de precipitación en los diferentes meses no son tan cercanos, como se puede observar en el escenario RCP 26 en el que estos valores son mucho más cercanos.

Grafica 12. Variación Porcentual de la Precipitación para cada uno de los Escenarios de Cambio Climático, Periodo 2070 - 2100



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Para este periodo el escenario en donde se presentan las mayores variaciones positivas de la precipitación con respecto a la normal corresponden nuevamente a los escenarios RCP 26 y 60 superiores al 30%, mientras que para todos los escenarios las variaciones negativas de la precipitación se presentan en todos los escenarios alrededor del – 30%, siendo el escenario RCP 45 el más crítico, por otra parte se observa que en el escenario RCP 85 se presenta una variación tanto positiva, como negativa por encima de 5% en la mayoría de los meses.

6.4. ECUACIÓN UNIVERSAL DE PERDIDA DE SUELO – USLE

6.4.1. FACTOR DE EROSIVIDAD DE LA LLUVIA – R

Para la determinación del factor de erosividad de la lluvia – R, se seleccionaron 4 años, dos de los cuales pertenecen al periodo actual (1971 – 2010) y se clasificaron por el IDEAM como años en donde se presentaron los fenómenos del Niño y la Niña, los últimos dos años corresponden a proyecciones de los escenarios de cambio climático:

- **Selección de los años para el periodo actual:**

Para la selección de estos se tuvo en cuenta la gráfica 2, en donde se aprecia la duración e intensidad de los eventos relacionados con el fenómeno de la Niña y el Niño para lo cual se seleccionaron los años que presentaron una intensidad clasificada por el IDEAM como muy fuerte para cada uno de los fenómenos, los cuales se representan en la siguiente tabla:

Tabla 23. Años en los que se presentaron fenómenos del Niño y la Niña Clasificados como muy fuertes

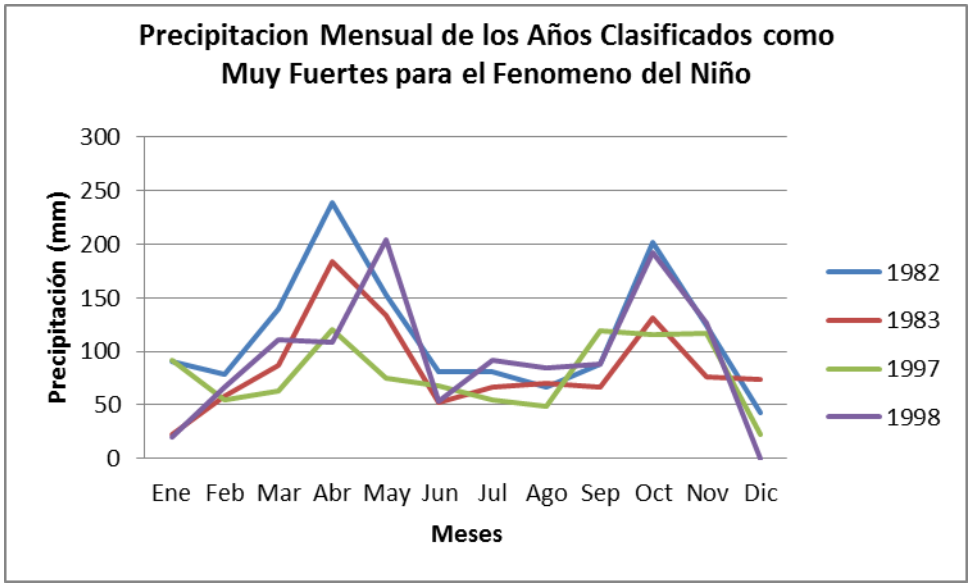
Años Niño	Años Niña
1982	1988
1983	1989
1997	2007
1998	2008

Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

A partir de la tabla 23. Se realizó un análisis para cada uno de estos años con el fin de seleccionar uno para cada tipo de evento:

- **Fenómeno del Niño:**

Grafica 13. Precipitación mensual de los años clasificados como Muy Fuerte para el Fenómeno del Niño

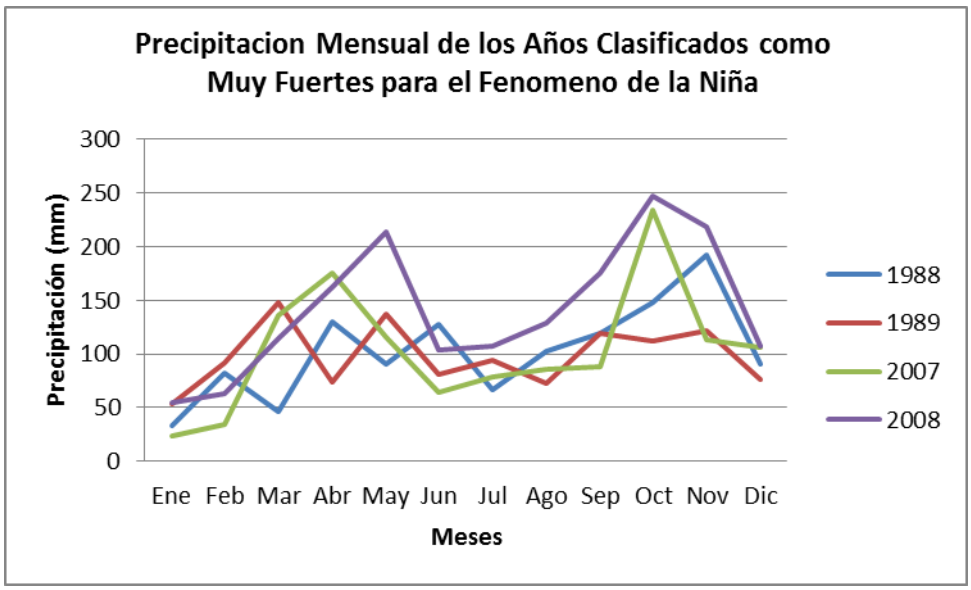


Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

A partir de la gráfica anterior, se puede observar que el año en el que se presentó una menor precipitación en la mayoría de los meses, corresponde al año 1997, además de esto a partir de la gráfica 2, se observa que el 1997 corresponde al año en el que se presentó una mayor duración del fenómeno del Niño con 11 meses.

- **Fenómeno de la Niña:**

Grafica 14. Precipitación mensual de los años clasificados como muy fuertes para el Fenómeno de la Niña



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Por medio de la gráfica 14 se aprecia que de los años seleccionados por el IDEAM como intensidad muy fuerte para el fenómeno de la Niña, el año 2008 registra los valores de precipitación más altos en la mayoría de los meses, razón por la cual se selecciona como año de referencia para el periodo actual como año Niña.

Finalmente es importante resaltar que a pesar el 2011 según el IDEAM fue el año en el que se registró el máximo evento del fenómeno de la Niña en las últimas décadas, este no se pudo seleccionar para el análisis ya que las bases de datos del periodo actual cuentan con registro de los años entre 1971 hasta el 2010.

- **Selección de los años para el periodo actual:**

Con el fin de contar con el factor de erosividad de la lluvia, para aplicarlo a la ecuación universal de perdida de suelo – USLE, se seleccionaron los años en los que se presentó una precipitación superior e inferior a la promedio del periodo para un escenario específico.

Los años seleccionados para cada uno de los periodos de tiempo y los escenarios de cambio climático son los siguientes:

Tabla 24. Años Seleccionados para el Análisis del Factor R

	2011-2040		2040-2070		2070-2100	
	+	-	+	-	+	-
RCP 26	2018	2015	2043	2052	2073	2074
RCP 45	2028	2020	2045	2043	2099	2100
RCP 60	2015	2012	2062	2060	2087	2100
RCP 85	2015	2020	2064	2053	2079	2100

Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

En donde "+" representa los años con una precipitación mayor a la promedio y "–" los años correspondientes a una menor precipitación con respecto a la precipitación promedio, por otra parte cabe resaltar que aunque en un principio se esperaba analizar los mismos años para cada uno de los escenarios a partir de los resultados se logró observar que el comportamiento de la precipitación varia con respecto a los escenarios, por ejemplo para el escenario RCP 26 el año en el que se podría presentar una menor precipitación corresponde al 2015, mientras que para el escenario RCP 60 y 85 este mismo año corresponde al de mayor precipitación. Aunque para el caso del año 2100 en la mayoría de los escenarios este representa el año en el que se proyecta una menor precipitación, es por esto que se optó por seleccionar de todos los años solo dos.

Tabla 25. Precipitación Superior a la Promedio para cada uno de los periodos bajo los diferentes Escenarios de Cambio Climático

Precipitacion Superior a la Promedio		Escenarios de Cambio Climatico				
		RCP 26	RCP 45	RCP 60	RCP 85	Promedio
Periodos	2011 - 2040	1416	1359	1373	1400	1387
	2040 - 2070	1387	1427	1400	1366	1395
	2070 - 2100	1362	1375	1463	1445	1411

Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Tabla 26. Precipitación Inferior a la Promedio para cada uno de los periodos bajo los diferentes Escenarios de Cambio Climático

Precipitacion Inferior a la Promedio		Escenarios de Cambio Climatico				
		RCP 26	RCP 45	RCP 60	RCP 85	Promedio
Periodos	2011 - 2040	1153	1180	1156	1163	1163
	2040 - 2070	1248	1180	1221	1219	1217
	2070 - 2100	1121	1117	1212	1225	1169

Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

A partir de la tabla 25 se puede observar que las precipitaciones más altas se presentaron para el periodo 2070 – 2100 bajo el escenario RCP 60, mientras que las precipitaciones más bajas se presentaron en el periodo 2070 – 2100 bajo el escenario RCP 45, lo que nos indica que para este periodo se presentaría un rango más amplio de precipitación promedio de los escenarios, que en los demás periodos, por otra parte para el periodo 2011 – 2040 bajo el mismo escenario RCP 26 se presentaron las precipitaciones más altas y más bajas del mismo periodo para los diferentes escenarios, Además de esto, en este periodo bajo el escenario RCP 26 se presenta el mayor rango de precipitación de todos los observados para los diferentes periodos y escenarios, es por esto que se tomara este periodo bajo este escenario con el fin de realizar el análisis de erosividad de la lluvia, Además de esto teniendo en cuenta que el año en el que se proyectó para el escenario RCP 26 que se presentaría una precipitación inferior a la promedio del periodo corresponde al año 2015, y esto coincide con la ocurrencia del fenómeno del niño en la actualidad.

Finalmente para el análisis de las precipitaciones bajo escenarios de cambio climático se seleccionaron:

- 2015 como año con precipitaciones inferiores a la promedio (RCP26)
- 2018 como año con precipitaciones superiores a la promedio (RCP26)

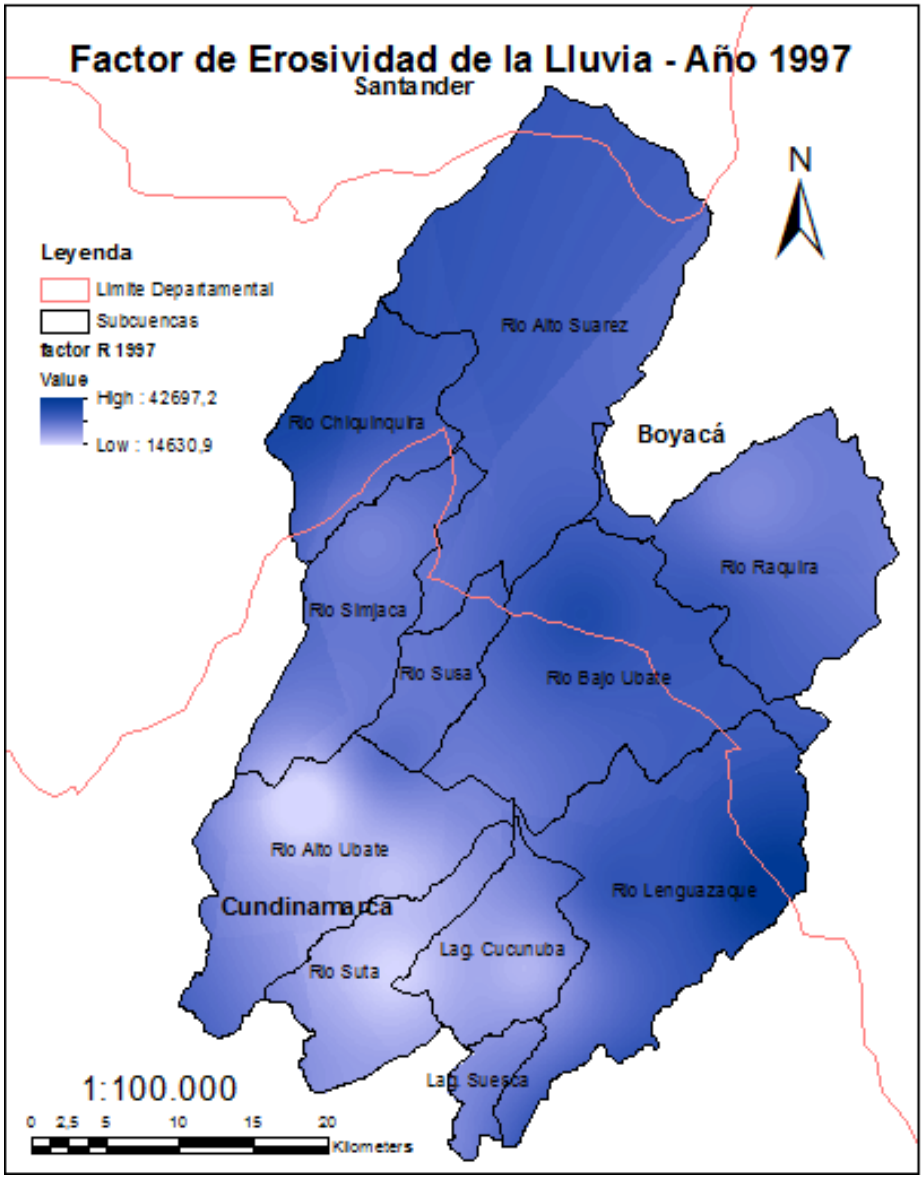
Adicional a esto se seleccionaran para el periodo actual 1971 - 2010 los años que presentaron tanto el fenómeno de la Niña, como del Niño los cuales se seleccionaron anteriormente y corresponden a:

- 1997 Fenómeno de la Niña
- 2008 Fenómeno del Niño

Esto finalmente nos permitirá realizar un análisis comparativo de la precipitación actual y la que se podría presentar en el futuro y como estas se relacionan con la perdida de suelo en la cuenca.

6.4.2. Factor de Erosividad de la Lluvia aplicado a la variabilidad climática actual

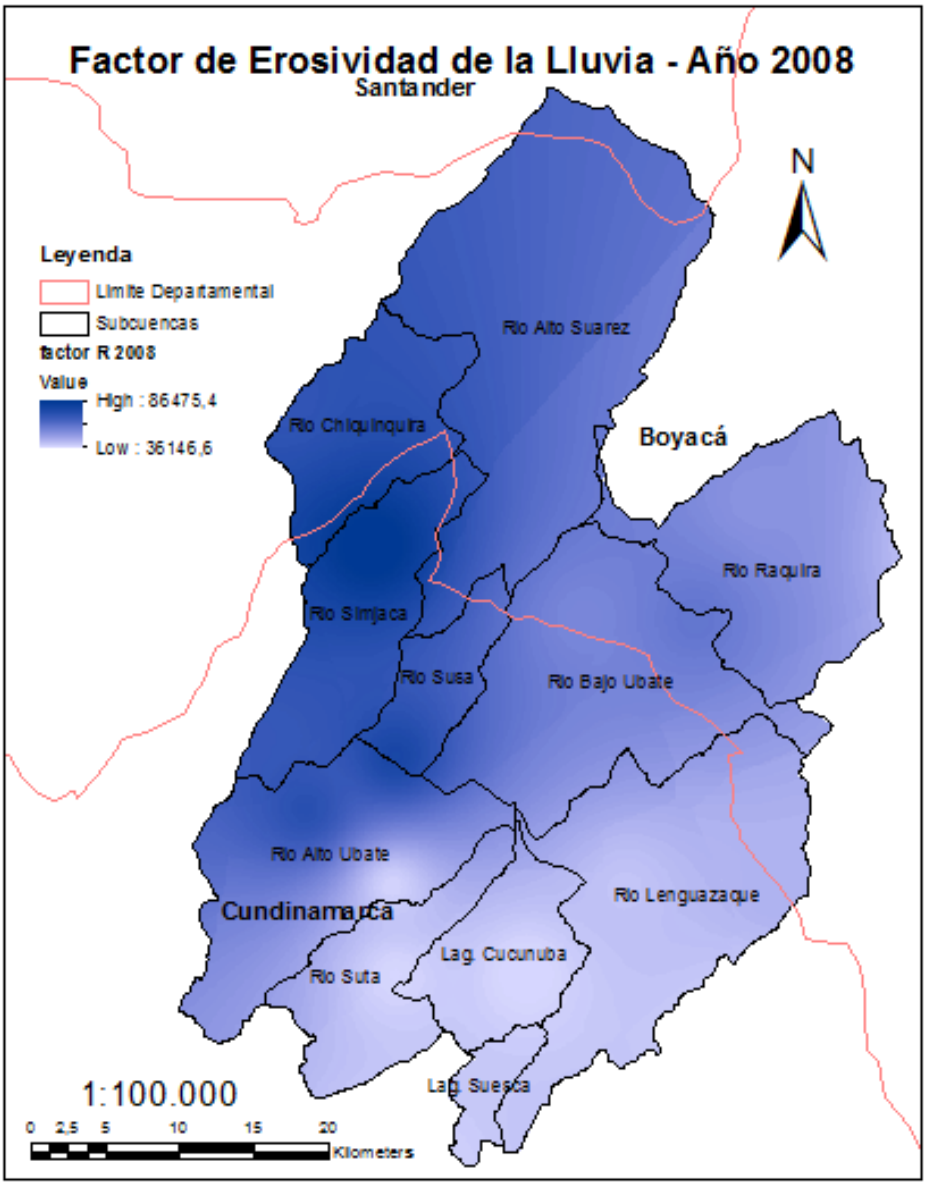
Mapa 26. Factor de Erosividad de la Lluvia para el año 1997



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Para el índice de erosividad de la lluvia – R se observan valores entre los 1463,9 y los 42697,2 MJ mm ha^{-1}, lo que nos indica que en términos de erosividad de la lluvia esta se clasifica entre, muy alta, severa y extremadamente severa y estas se presentan principalmente en las Subcuencas de Lenguazaque, Chiquinquirá, alto Suárez y bajo Ubaté

Mapa 27. Factor de Erosividad de la Lluvia para el año 2008

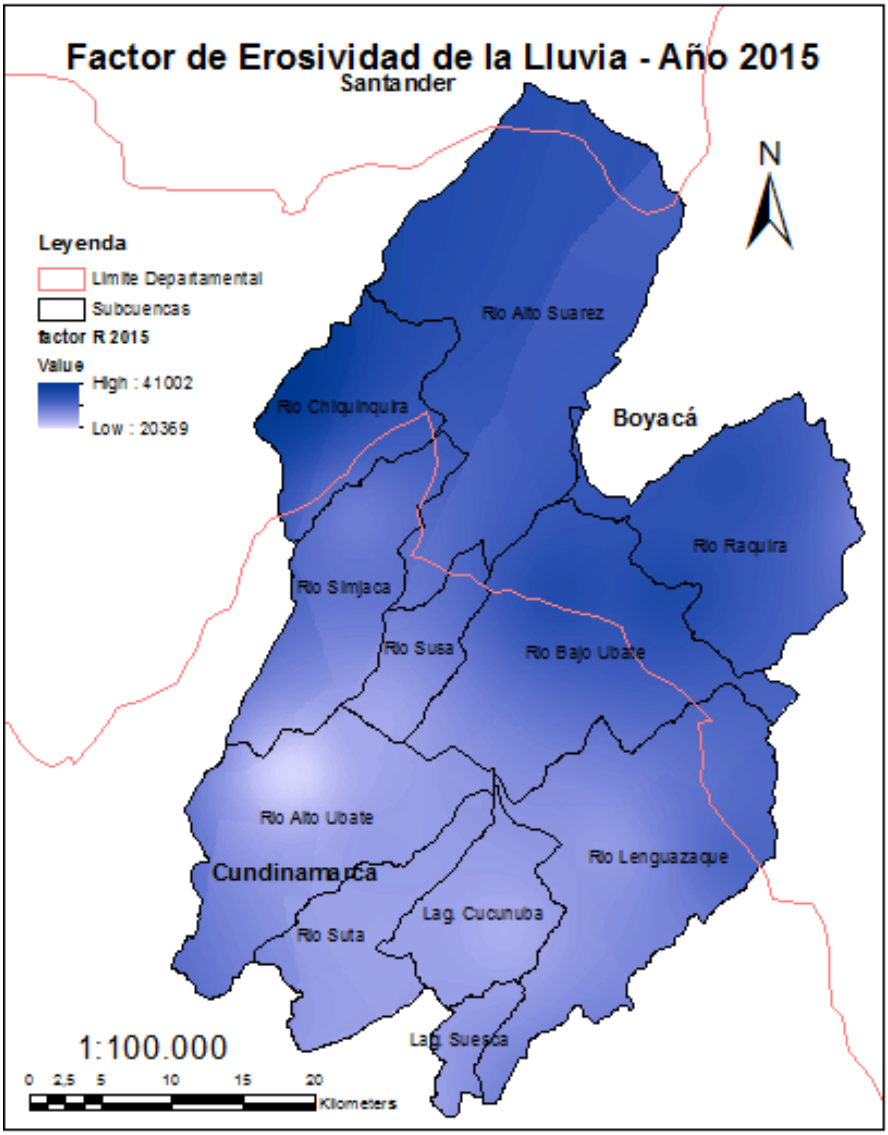


Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Para el año 2008 en el que se presentó un fenómeno de la niña, se presentan valores del índice de erosividad de la lluvia en un rango entre los 36146,6 y los 86475,4 MJ mm ha^{-1}, lo que nos indica que la cuenca presenta en su totalidad una erosividad extremadamente severa, aunque las Subcuenca más afectadas fueron Chiquinquirá y Simijaca.

6.4.3. Factor de Erosividad de la Lluvia aplicado a la variabilidad climática futura

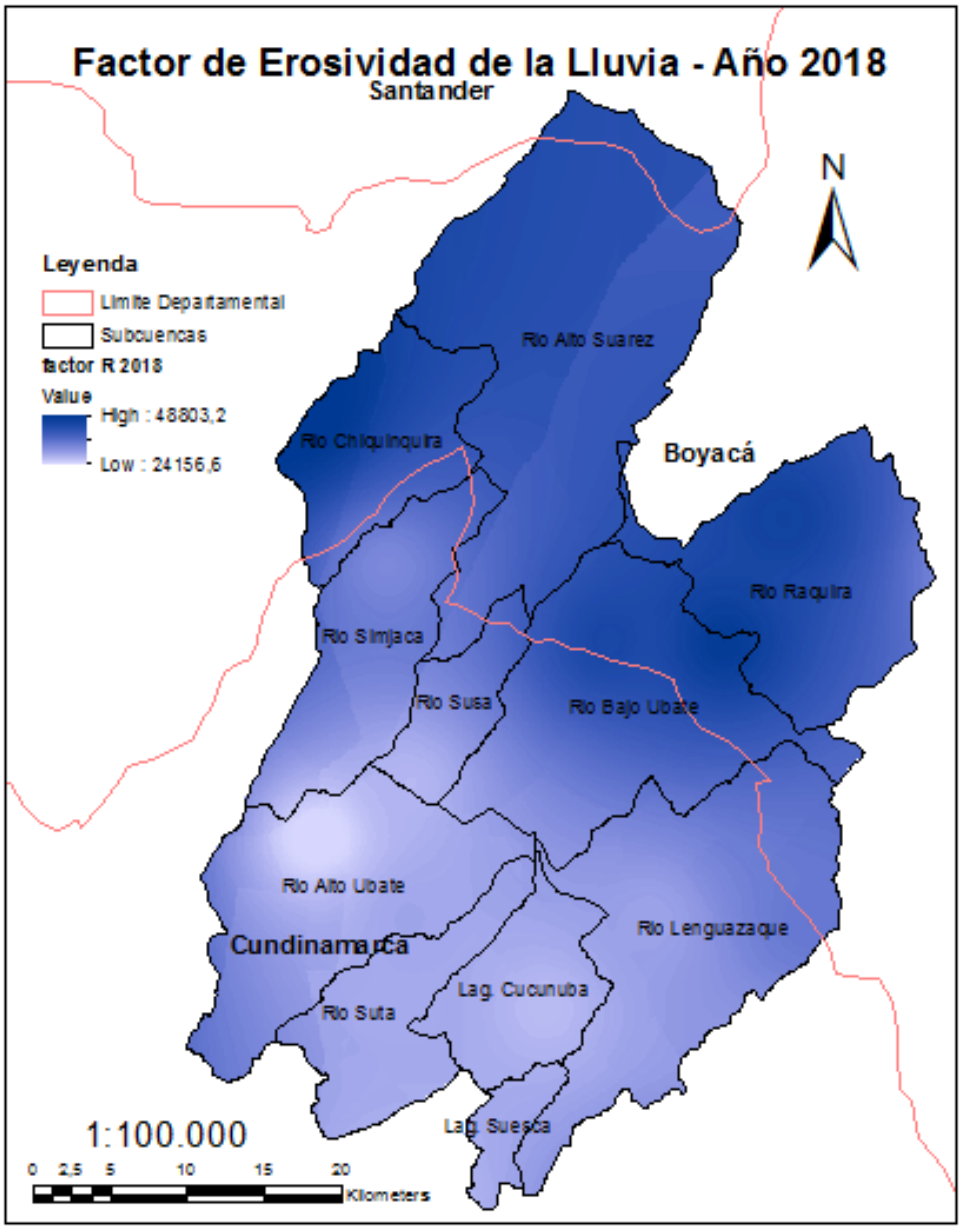
Mapa 28. Factor de Erosividad de la Lluvia para el año 2015



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Para el año 2015 en donde se proyectan las menores precipitaciones para el periodo 2011 – 2040, bajo el escenario de cambio climático se observa un índice se erosividad clasificado como extremadamente severo en toda la cuenca al estar por encima de los 20000 MJ mm ha^{-1}, especialmente los valores más elevados se concentran en la Subcuenca Chiquinquirá y Alto Suárez.

Mapa 29. Factor de Erosividad de la Lluvia para el año 2018



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

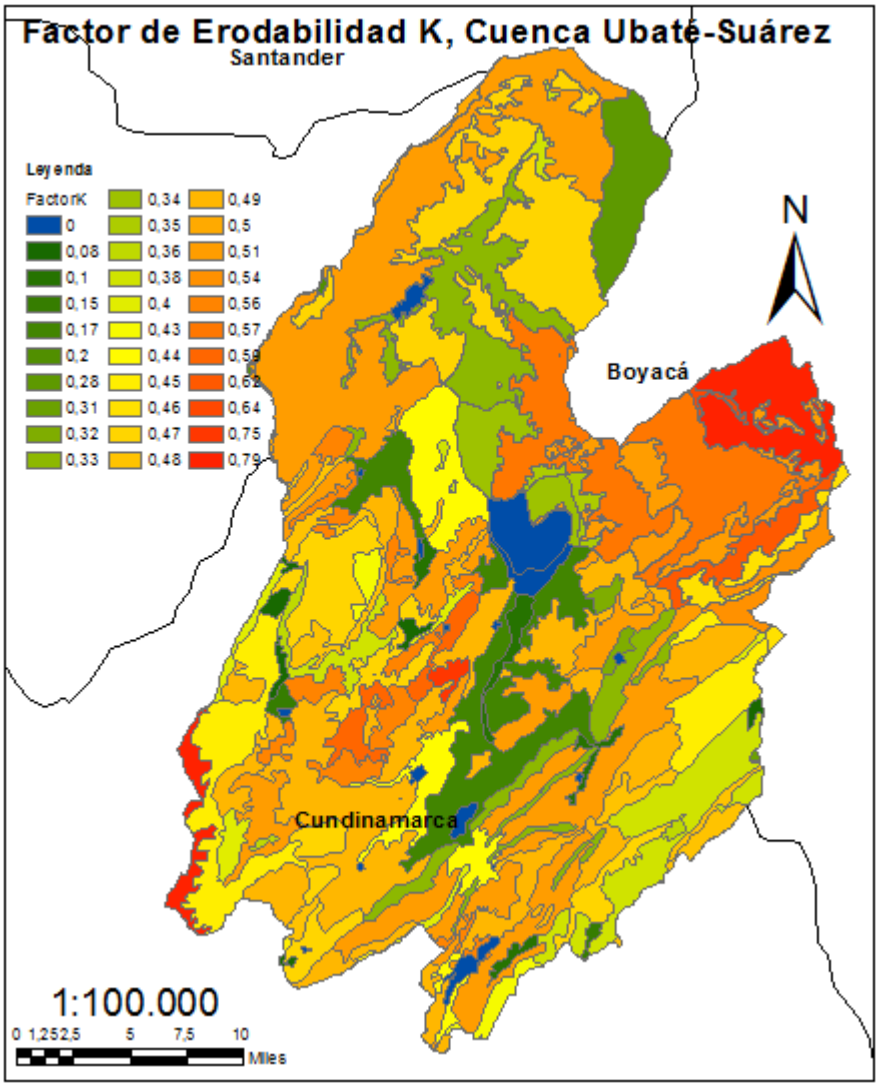
Para el año 2018 se evidencia un aumento en el rango del índice de erosividad de la lluvia con respecto al año 2015, aunque para los dos años la totalidad de la cuenca presentaría una erosividad extremadamente severa, concentrándose especialmente en la Subcuenca de Chiquinquirá y Alto Suárez.

6.4.2. FACTOR DE EROSIONABILIDAD DEL SUELO - K

A partir de los diferentes estudios de suelo existentes para la zona, elaborados por el IGAC, se obtuvo la información analítica del horizonte superficial de cada uno de los perfiles de las diferentes unidades taxonómicas en que se divide la cuenca, las variables necesarias para la estimación del factor de erodabilidad del suelo, son el porcentaje de materia orgánica, Textura superficial, estructura del suelo y permeabilidad.

Además de la información obtenida a partir de los estudios de suelo para la zona de estudio, también se tomó como referencia el mapa de unidades taxonómicas del suelo obtenido del Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca Ubaté y Suárez, realizado por la corporación autónoma regional de Cundinamarca - CAR y la subdirección de administración de recursos naturales y áreas protegidas, como resultado del estudio y análisis de las diferentes variables se obtuvo el siguiente mapa en donde se muestra el factor de Erodabilidad del suelo para cada una de las unidades taxonómicas.

Mapa 30. Factor de Erodabilidad del Suelo - K



Fuente: Elaboración propia con información del IGAC, CAR

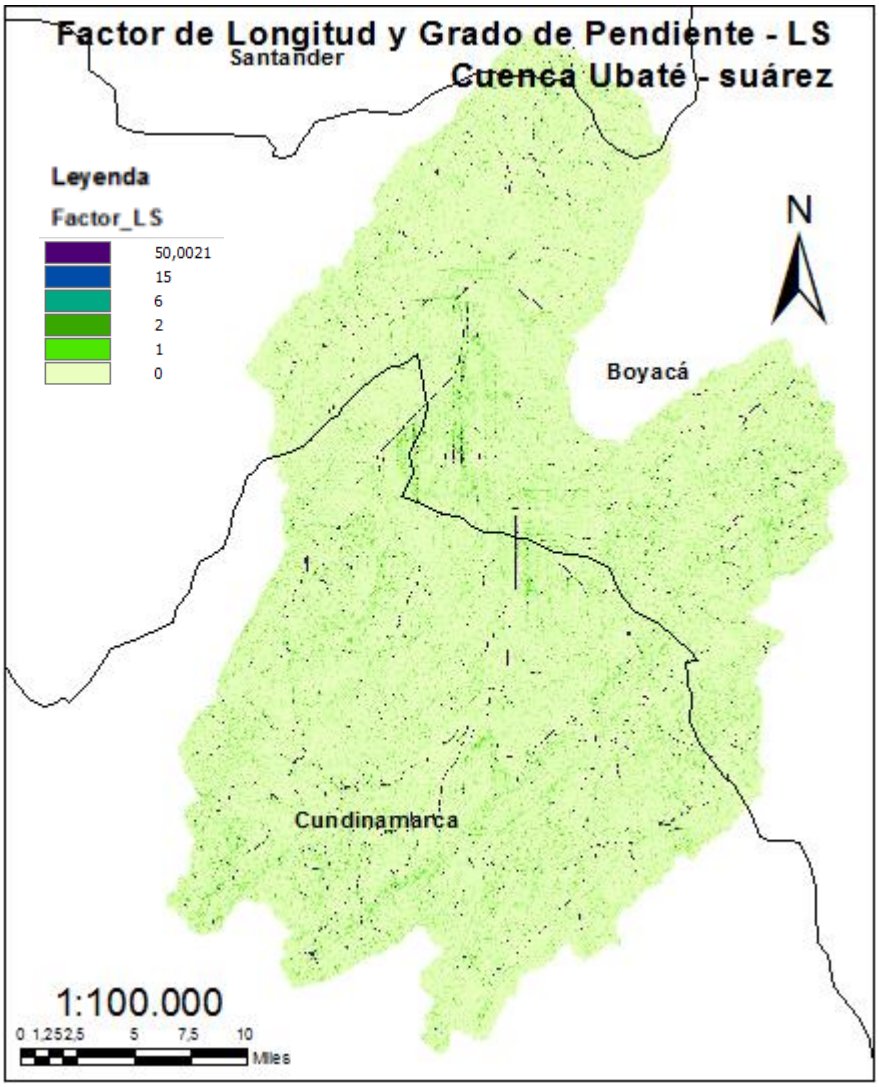
En el mapa 30 se observa que el rango de valores del factor K se mueve entre 0 – 0.79, donde los valores de 0 se asignaron a los cuerpos de agua existentes en la zona, es importante tener en cuenta que el factor K es adimensional, en donde a mayor numero, mayor susceptibilidad a perderse el suelo, por lo que se identifica que en algunas zonas de la cuenca el suelo puede perder hasta un 79%.

La variabilidad espacial del factor K, presenta los menores valores en la zona central de la cuenca, aunque en general la zona se caracteriza por presentar valores entre los 0.3 y 0.5, lo que nos indica que en la mayor parte de la cuenca los suelos pueden perderse entre un 30% y 50%.

6.4.3. FACTOR DE LONGITUD Y PENDIENTE DEL TERRENO - LS

Los efectos de la pendiente y la longitud de la ladera sobre el suelo y la susceptibilidad de este a la erosión se representan por medio del factor de Longitud (L) y grado de pendiente (S), el cual se obtuvo a partir del Modelo Digital de Elevación y el módulo Arc Hydro del software ArcGis.

Mapa 31. Factor de Longitud y Grado de Pendiente - LS



Fuente: Elaboración propia con información del DEM

A partir del cálculo del factor LS para la cuenca Ubaté – Suárez se obtuvo el mapa 31 en donde se observa que el rango para este factor va desde 0 hasta aproximadamente 50, lo que implica que en las zonas con un mayor factor LS el

suelo puede perderse hasta 50 veces más según la longitud y grado de pendiente, además de esto es importante resaltar que la mayor cantidad del área de la cuenca presenta valores por debajo de 1 ya que se trata de zonas planas a ligeramente inclinadas.

6.4.4. FACTOR DE COBERTURA Y MANEJO DE LA VEGETACIÓN – C

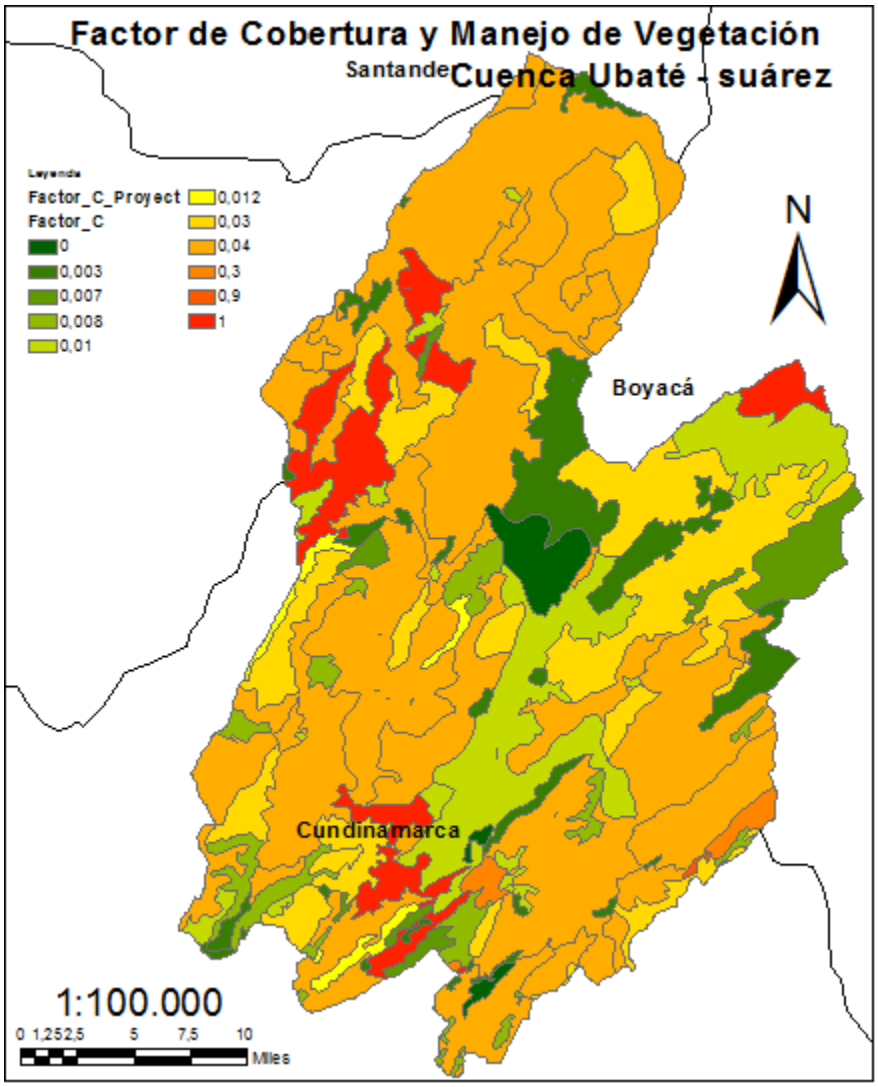
Para el cálculo de la variación espacial del factor C de cobertura y manejo de la vegetación se tomó como base el mapa de cobertura vegetal obtenida a partir del POMCA de la cuenca, posteriormente y luego de una revisión bibliográfica, se determinó un valor del factor C para cada una de las coberturas vegetales, las cuales se representan en la tabla 27 y el mapa 32:

Tabla 27. Relación Factor C Porcentaje de Área

Cobertura Vegetal	Factor C	% Área
Bosque plantado (Bp)	0,003	25,65
Cultivos transitorios	0,3	15,33
Eriales y canteras (Em)	1	12,49
Cuerpos de agua (Ca)	0	10,84
Misceláneo de cultivo y pastos (Ct - Pn)	0,04	9,27
Vegetación de paramo (Vp)	0,003	6,09
Bosque Secundario (Bs)	0,007	5,51
Misceláneo de matorrales y bosque plantado (Ma - Bp)	0,01	3,28
Pastos manejados (Pm)	0,04	3,14
Misceláneo de bosque plantado - eriales (Bp - Em)	0,9	2,67
Misceláneo de bosque y pastos (Bs - Pn)	0,008	1,77
Misceláneo de Cultivos y pastos manejados (Ct - Pm)	0,04	1,03
Misceláneo de matorrales y cultivos (Ma - Ct)	0,03	1
Misceláneo de matorrales y pastos (Ma - Pn)	0,03	0,83
Matorral alto (Bm4) matorral bajo (Bm3)	0,012	0,61
Zona urbana (ZU)	0,01	0,33
Pastos naturales (Pn)	0,01	0,05

Fuente: Elaboración propia con información de [22]

Mapa 32. Factor de Cobertura y Manejo de Vegetación - C



Fuente: Elaboración propia con información de la CAR

A partir de los factores de cobertura y manejo de la vegetación establecida para cada una de las coberturas vegetales, se realizó el mapa 32 en donde se puede observar que el factor C se mueve en un rango entre los 0 y 1, estos coeficientes presentan una relación inversa con el porcentaje de reducción de perdida de suelo, en donde los suelos con un factor C cercanos a 0 presentan un mayor porcentaje de reducción de pérdida del suelo y corresponden a coberturas vegetales como bosques, matorrales y paramos, debido a que la cuenca presenta en su gran mayoría este tipo de vegetaciones los factores de cobertura y manejo de la vegetación se encuentran por debajo de los 0,04, es decir que la mayoría del territorio presenta una reducción del 96% de perdida de suelo gracias a la cobertura vegetal.

Por otra parte se puede observar que algunas zonas del territorio presentan un Factor C de 1, debido a que son eriales y canteras, lo que nos indica que son suelos descubiertos por lo que el porcentaje de reducción de perdida de suelo por cobertura vegetal es de 0.

6.4.5. FACTOR DE PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN - P

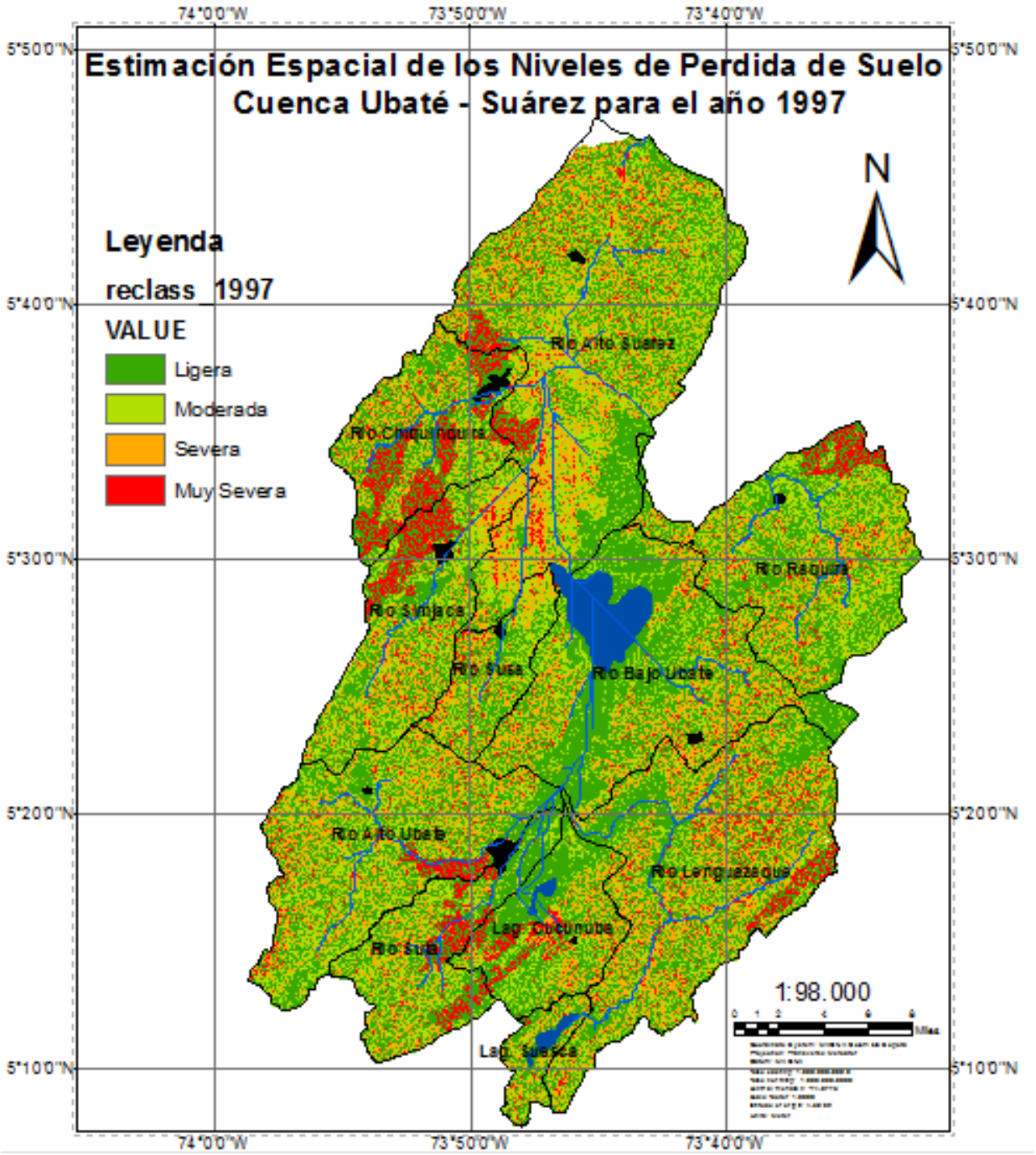
Debido a la poca información sobre las prácticas de conservación que se llevan a cabo en la cuenca, especialmente a nivel espacial, luego de una consulta bibliográfica se estableció el un valor constante para el factor P para toda la cuenca el cual corresponde a 1, el cual supone que no existen o no se llevan a cabo prácticas de conservación.

6.5. APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PERDIDA DE SUELO

Luego de calcular cada uno de las variables de entrada para la ecuación, estos se convirtieron a formato Raster, con un mismo valor del pixel el cual correspondió a 30,8 aproximadamente, esto con el fin de contar con una homogeneidad en los datos y reducir la incertidumbre del resultado en la aplicación de la ecuación, posteriormente se realizó un análisis espacial el cual consistió en la aplicación de algebra de mapas, como resultado se obtuvieron los siguientes mapas:

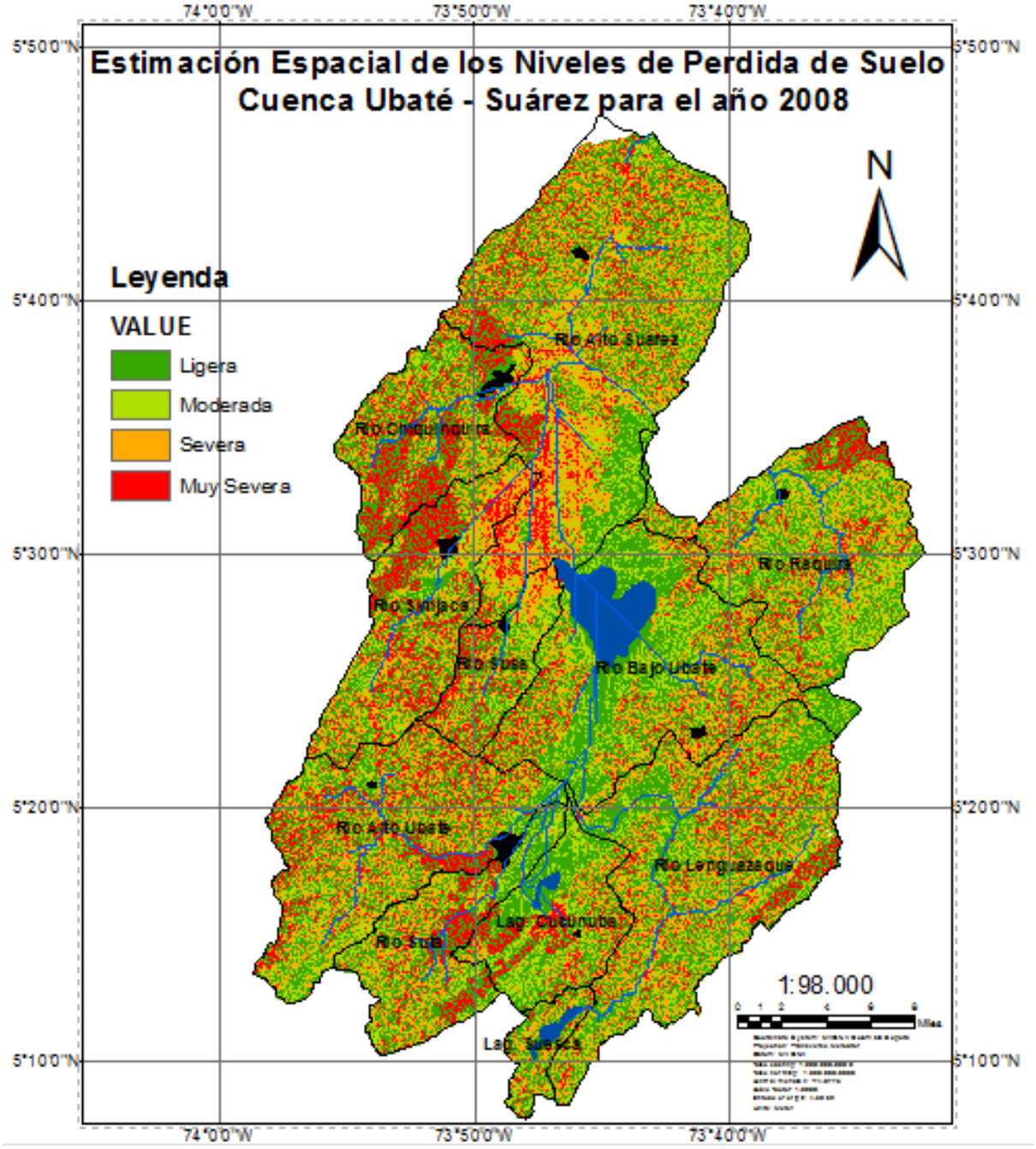
6.5.2. Niveles de Perdida de Suelo en la cuenca aplicada a la variabilidad climática actual

Mapa 33. Distribución Espacial de los Niveles de Perdida de Suelo año 1997



Fuente: Elaboración propia

Mapa 34. Distribución Espacial de los Niveles de Perdida de Suelo año 2008

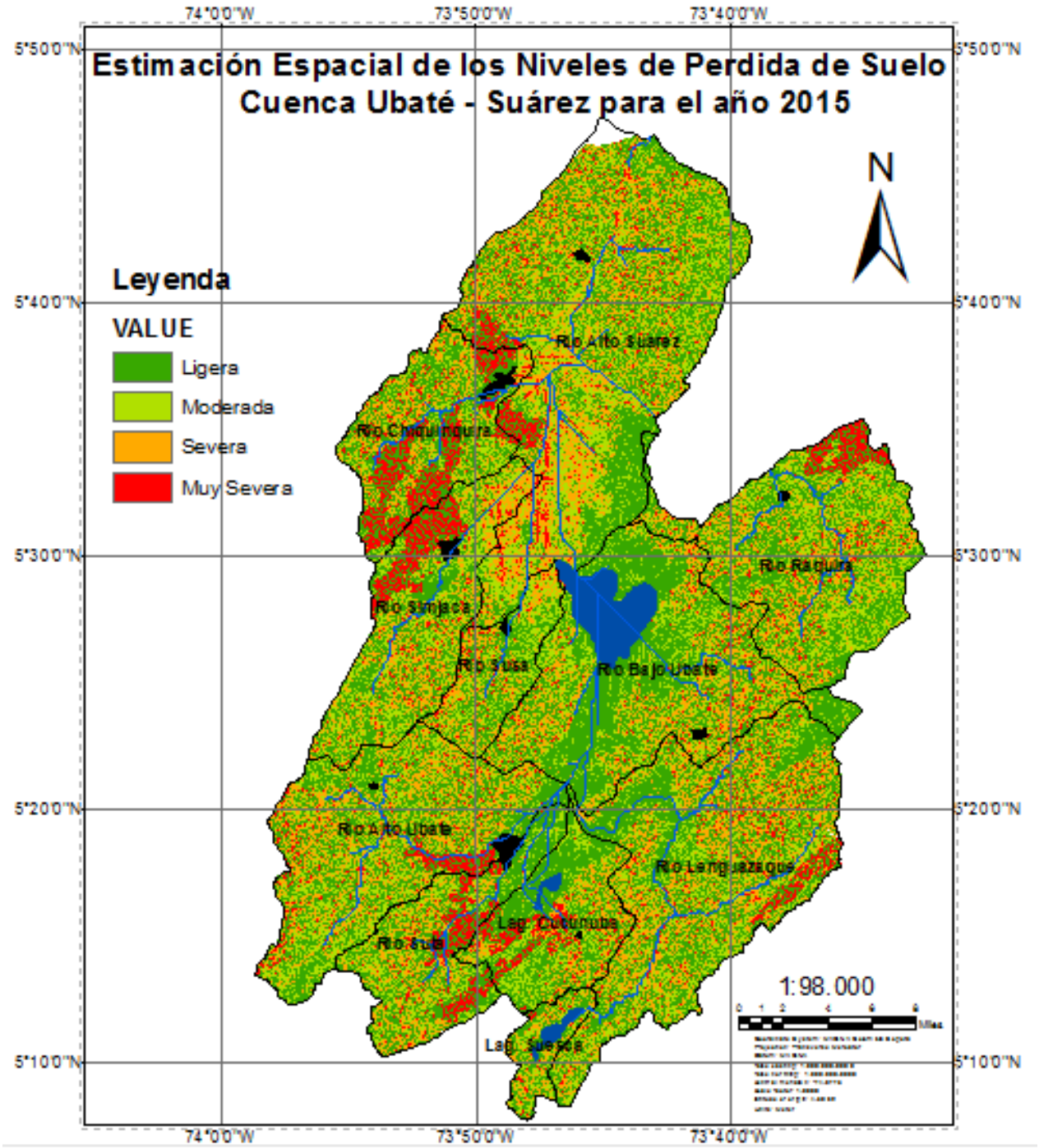


Fuente: Elaboración propia

Para los valores de erosividad de la lluvia presentados para los años 1997 (Fenómeno del Niño) y 2008 (Fenómeno de la Niña), se puede observar gráficamente que se evidencia un aumento de la pérdida del suelo en gran parte del territorio.

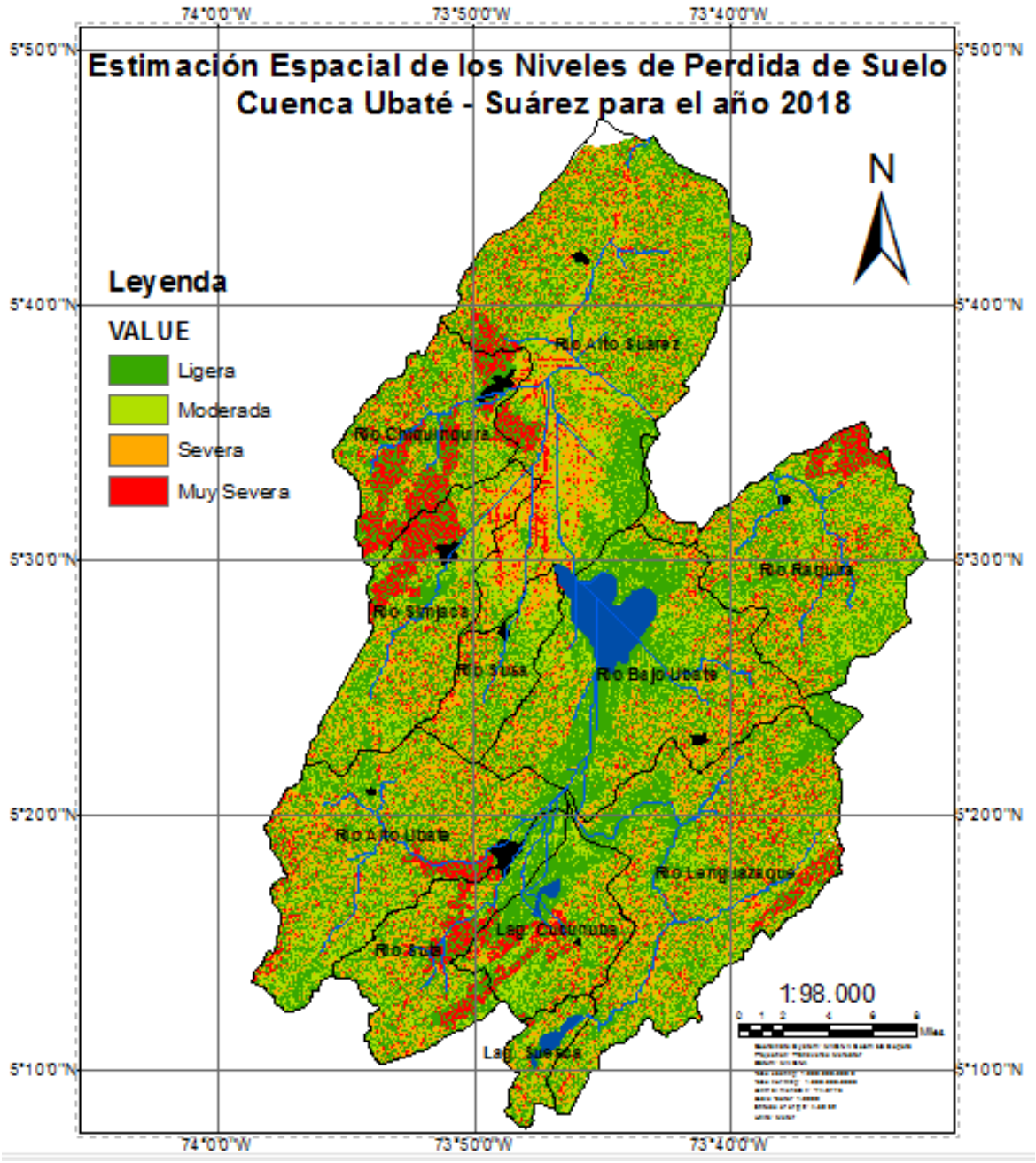
6.5.3. Niveles de Perdida del Suelo en la cuenca aplicada a la variabilidad climática futura

Mapa 35. Distribución Espacial de los Niveles de Perdida de Suelo año 2015



Fuente: Elaboración Propia

Mapa 36. Distribución Espacial de los Niveles de Perdida de Suelo año 2018



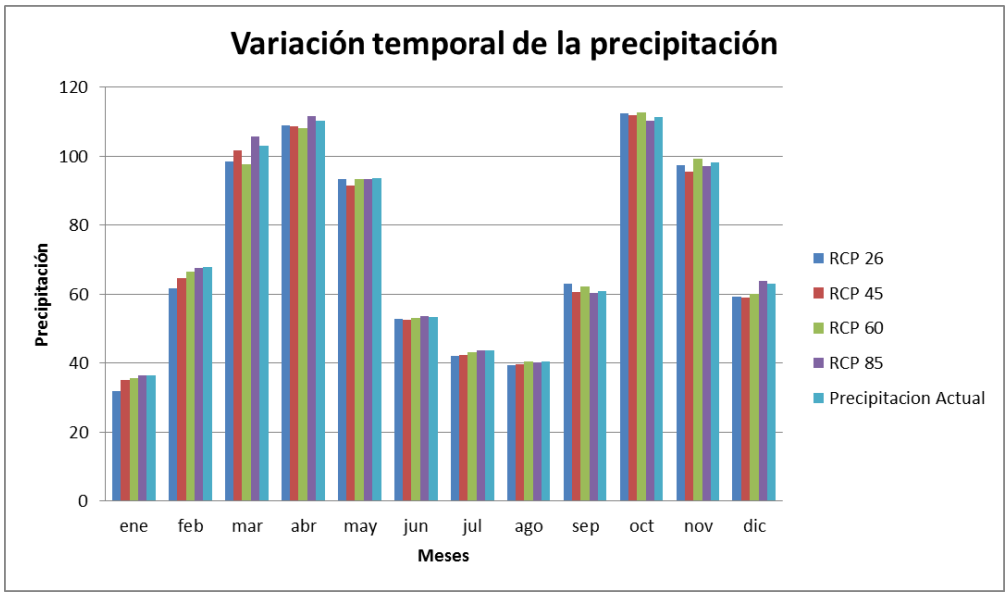
Fuente: Elaboración propia

Al igual que para la variabilidad actual, para el caso del índice de pérdida del suelo para la precipitación proyectada bajo el escenario de cambio climático RCP 26 para los años 2015 (Precipitación inferior a la promedio) y el año 2018 (precipitación superior a la promedio), para este último año se presentaron valores más altos de pérdida del suelo, con respecto al año 2015.

7. ANALISIS DE RESULTADOS

7.4. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LAS PRECIPITACIONES

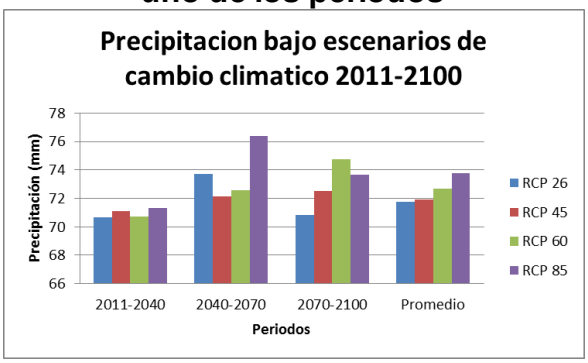
Grafica 15. Variación Temporal de la Precipitación para cada uno de los escenarios de Cambio Climático



Fuente: Elaboración Propia con información del IDEAM

Con respecto a la variación temporal de la precipitación promedio para cada uno de los escenarios se puede apreciar que para todos los escenarios el comportamiento de las precipitaciones es de carácter bimodal, en donde la temporada de lluvias se presenta en los meses de abril y octubre y la temporada de sequía en los meses de enero y agosto, por otra parte no se observa una variación significativa de la precipitación en los diferentes escenarios.

Grafica 16. Precipitación Bajo Escenarios de Cambio Climático para cada uno de los periodos



Fuente: Elaboración Propia con información del IDEAM

Para el análisis de cada uno de los periodos se observa que para el escenario RCP 26 el periodo de tiempo en el que se presentarían mayores precipitaciones es 2040-2070 con un aumento de la precipitación promedio de cerca de 4mm con respecto al periodo 2011-2040 y una disminución de los aproximadamente 4mm frente al periodo de tiempo de 2070-2100; para el escenario RCP 45, no se identifica un comportamiento especifico de la precipitación para los diferentes periodos, aunque si se observa detenidamente la gráfica 16 se podría decir que la precipitación aumenta a través de los años, al igual que para el escenario RCP 60 , en donde este incremento es mucho más evidente, mientras que para los escenarios RCP 85 la mayor precipitación promedio se presentó en el periodo 2040-2070, Finalmente si se realiza un promedio de los diferentes periodos se podría decir que en el escenario positivo (RCP 26) las precipitaciones serán las más bajas, mientras que para el escenario negativo las precipitaciones serán mayores.

Cabe resaltar que la variación porcentual de la precipitación en los diferentes escenarios con respecto a la precipitación actual promedio oscila entre los – 3,9% y 3,9%, así como se muestra a continuación:

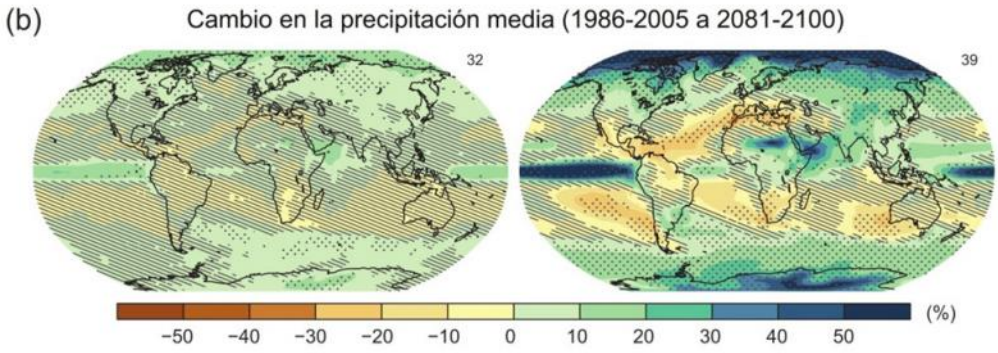
Tabla 28. Variación de la Precipitación para cada uno de los periodos bajo los diferentes Escenarios de Cambio Climático

	RCP 26	RCP 45	RCP 60	RCP 85
2011 - 2040	-3,9	-3,3	-3,8	-3
2040 - 2070	0,3	-1,8	-1,3	3,9
2070 - 2100	-3,7	-1,4	1,7	0,2
Promedio	-2,4	-2,2	-1,1	0,4

Fuente: Elaboración Propia con información del IDEAM

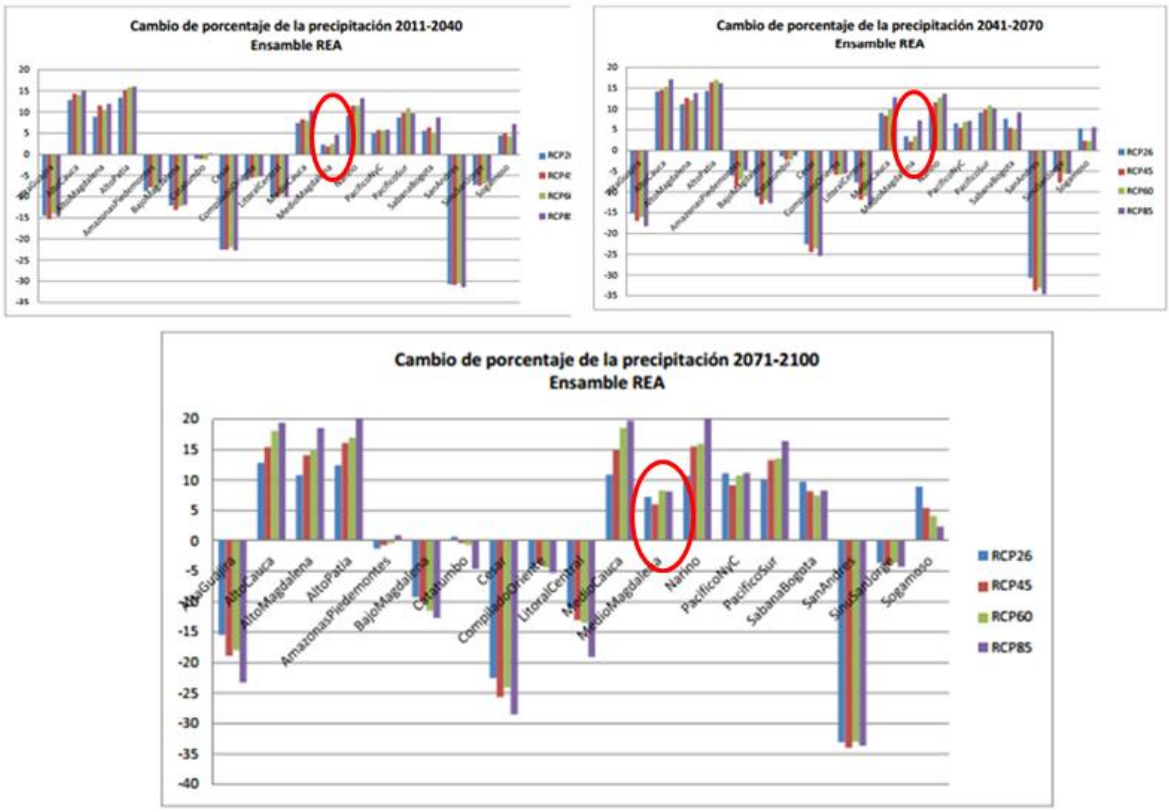
A partir del cambio de la media porcentual de la precipitación media anual global realizada por el IPCC en los modelos globales de baja resolución, se observa que para Colombia se estiman cambios entre el -10% y el 10% tanto para el escenario RCP 26 como para el RCP 85, esto se aprecia en el mapa 37, debido a que este es un análisis muy general el IDEAM realizo un documento denominado *"Escenarios de cambio climático para precipitación y temperatura en Colombia"*, en donde se confirma esta información, y en el que además se llevan a cabo análisis para las diferentes regiones hidroclimaticas de Colombia, específicamente para en la región medio magdalena se observa que es una de las que se presentan menores cambios porcentuales en la precipitación.

Mapa 37. Cambio de la precipitación media (1986 - 2005 a 2081 - 2100)



Fuente: [6]

Grafica 17. Cambio de porcentaje de la precipitación 2011 – 2100 Ensamble REA



Fuente: [6]

Al comparar los resultados obtenidos en el presente proyecto con los modelos globales de baja resolución del IPCC y el documento realizado por el IDEAM

especialmente en la región hidroclimatica Medio Magdalena a la cual pertenece la cuenca Ubaté – Suárez se aprecia que estos son coherentes, ya que los porcentajes de variación de la precipitación se encuentran dentro del rango.

7.5. ANÁLISIS DE LOS ÍNDICES DE AGRESIVIDAD CLIMATICA

A partir de la aplicación de los diferentes índices y de la determinación del comportamiento de los mismos frente a la línea base, es importante tener en cuenta que para los tres índices el escenario en donde los valores promedio fueron más altos, es el escenario actual el cual se determinó a partir de la aplicación de los índices sobre los registros de precipitación del periodo de tiempo entre 1971 – 2010, en donde el IF se encontró en el 100% de la cuenca por encima de 200mm, es decir la cuenca en su totalidad se clasificó como agresividad muy alta, mientras que para los diferentes escenarios de cambio climático se presentaron zonas del territorio en las que incluso se podía clasificar como agresividad moderada, esto mismo sucede con el IMF en donde en promedio para los escenarios de cambio climático el índice oscilo entre los 700mm y los 1600mm, mientras que para el escenario actual estos valores se encontraron en un rango entre los 900mm y 1900mm, aunque tanto para el escenario actual como para los escenarios de cambio climático la totalidad de la cuenca se clasifique como agresividad muy alta al estar por encima de los 400mm, en el escenario actual los valores son aún mayores. Finalmente para el índice de la concentración de la precipitación tenemos que en el escenario actual la totalidad del territorio se clasifica como moderadamente estacional, mientras que en los escenarios de cambio climático una porción del territorio se clasifica como uniforme. Esto finalmente nos permite inferir que en cuanto a agresividad climática dentro de la cuenca Ubaté – Suárez el escenario de mayor riesgo corresponde al denominado escenario actual el cual es en realidad el escenario que se presentó en el periodo entre 1971 y 2010, esto se puede presentar debido a que las proyecciones de los escenarios de cambio climático sesgan información importante al usar un promedio ya sea mensual o anual, ya que no se tienen en cuenta los valores atípicos que influyen en la agresividad climática y la posterior perdida de suelo.

Por otra parte es importante resaltar que no se aprecia un comportamiento especifico de los escenarios con respecto al tiempo ya que aunque se podría pensar que los índices aumentarían con el pasar del tiempo, a partir de los resultados se determinó que el valor tanto del IF como del IMF y el ICP son fluctuantes en el tiempo y no presentan una tendencia específica, además de esto también se logró determinar que a pesar de que desde el IDEAM y basados en

los documentos del panel intergubernamental sobre cambio climático – IPCC, se establecen escenarios positivos (RCP 26), en donde las concentraciones de carbono disminuirían a través del tiempo y escenarios negativos (RCP 85) en donde las concentraciones de carbono en la atmosfera se duplicarían, esto a su vez implicaría un cambio en la precipitación y por consiguiente en los índices, no existe una relación consistente entre los índices y los resultados negativos o positivos esperados para cada escenario, ya que como se apreció en los resultados expuestos anteriormente el índice de Fournier fue mayor en los escenarios RCP 45 y RCP 60, mientras que disminuyo en los escenarios RCP 26 y RCP 85, por otra parte para el índice Modificado de Fournier los escenarios en donde en promedio de concentraron los mayores valores corresponden a los escenarios RCP 60 y RCP 85, mientras que los escenarios RCP 26 y RCP 45 presentaron valores un poco más bajos, lo que a su vez nos indica que el comportamiento del IF y el IMF no es el mismo.

Finalmente cabe resaltar que tanto para el comportamiento de la precipitación, como de cada uno de los índices en los diferentes escenarios a nivel espacial fue similar, ya que los valores más elevados se presentaron en la zona norte de la cuenca, mientras que los valores más bajos se concentraron en la zona sur, lo que nos indica que la zona norte presenta un mayor riesgo frente a la zona sur, con respecto a la agresividad climática, y la cantidad de precipitación que se proyecta para los siguientes años.

7.6. ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA ACTUAL

Por medio de los resultados obtenidos en la variabilidad climática para la cuenca en términos de precipitación se hace evidente un aumento de la misma para los meses en los que se presenta un fenómeno de la niña, llegando a representar un aumento del 50% en el mes más crítico, mientras que para el fenómeno del niño, se presenta una disminución de cerca de un 30% para el mes de marzo, unido a esto también se aprecia en las diferentes graficas el aumento de la intensidad y frecuencia de dichos fenómenos, lo que hace aún más preocupante la situación.

7.7. ANÁLISIS VARIACIÓN CLIMÁTICA FUTURA

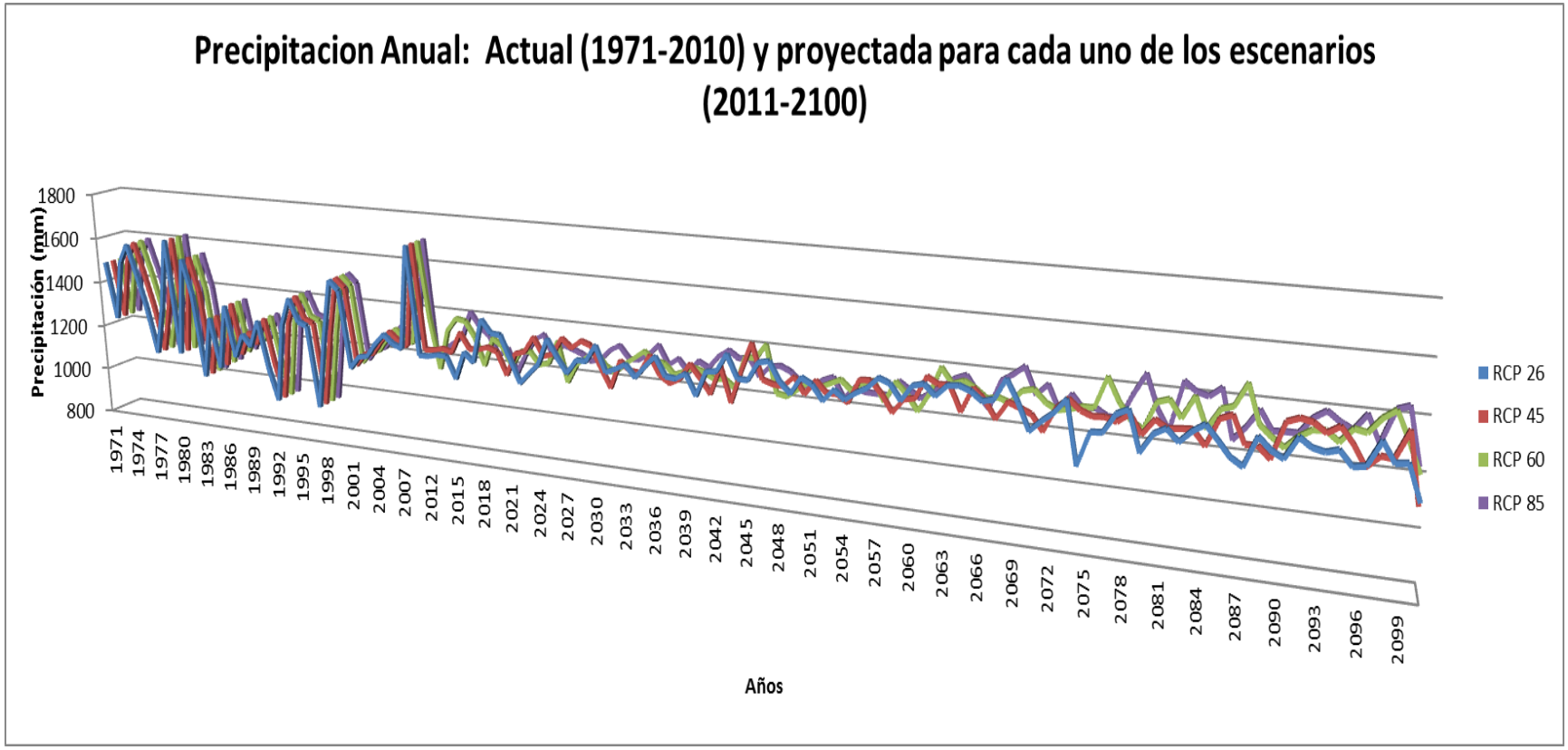
A partir de los resultados de la variabilidad Climática Futura se puede apreciar que el comportamiento de la precipitación varia drásticamente de un escenario a otro, lo que resulta ser apropiado teniendo en cuenta que cada uno de los escenarios presentan unas condiciones en términos de concentración de dióxido de carbono diferentes, pero aunque si se presente una variación de la precipitación en cada uno de los escenarios este no presenta un comportamiento

especifico, ya que se esperaría que la precipitación para la cuenca disminuya a mayores concentraciones de dióxido de carbono, es decir se presente una disminución considerable de la precipitación en el escenario de cambio climático RCP 85 con respecto a los demás escenarios o que en el escenario RCP 26 se presenten unas mayores precipitaciones a los demás escenarios, pero esto no ocurre.

A pesar de lo anterior y de que en los resultados no se observe una relación especifica entre la concentración de dióxido de carbono en la atmosfera y la disminución de la precipitación, si se apreció que en los diferentes años predomina la variación porcentual positiva de la precipitación, con respecto a la normal.

Cabe resaltar que los resultados obtenidos son generales debido a la información limitada y la escala de tiempo que se trabajó, muestra de ellos es la siguiente gráfica, en donde se observa el comportamiento de la precipitación desde 1971 – 2010 (datos registrados por las diferentes estaciones) y 2011-2100 (proyectados para cada uno de los escenarios):

Grafica 18. Precipitación Anual: 1971 - 2010 y 2011 - 2100



Fuente: Elaboración Propia con información del IDEAM

Atreves de esta grafica se observa un cambio en el comportamiento de la precipitación desde el año 2011, a partir del cual se inicia la proyección de las precipitaciones, esto podría llegar a indicarnos que los picos de precipitación proyectados para cada uno de los escenarios pueden llegar a ser mucho más pronunciados como se observa en los datos actuales. Además de esto es importante observar cómo se mencionó anteriormente que no se aprecia fácilmente una relación entre los escenarios (las concentraciones de dióxido de carbono) y la precipitación.

Finalmente se observó que con respecto a la situación actual del clima año 2015 en el que se está presentando un fenómeno del niño el escenario que coincide con esto es el escenario RCP 26 para el cual el año 2015 sería el de menor precipitación anual del periodo 2011-2040 y el de mayor cantidad de meses con variaciones porcentuales de la precipitación inferiores al promedio del periodo.

7.8. ANÁLISIS APLICACIÓN DE ÍNDICE DE AGRESIVIDAD APLICADO A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA

Índices aplicados a variabilidad climática actual: se observa una clara diferencia de los índices para cada uno de los años seleccionados, en donde para el año 2008 (fenómeno de la niña) el valor más elevado duplica el valor más alto para el año 1997 (fenómeno del niño), además de esto es importante resaltar que para este ultimo año 1997 se presentó el valor más bajo de todos.

Índices aplicados a variabilidad climática futura: Cabe resaltar que la diferencia entre los resultados obtenidos entre los años de mayor y menor precipitación para este periodo bajo el escenario establecido no son tan significativos como si lo fueron para el análisis del índice aplicado a la variabilidad climática actual, aunque cabe resaltar que el comportamiento espacial del IMF vario de un año a otro, en donde para el año de mayor precipitación se presentó una mayor porción del territorio con índices elevados, así mismo se observa que el comportamiento de los índices aplicado a los valores promedio de los diferentes periodos, es similar al que se obtuvo luego de aplicar los índices a cada una de las décadas bajo los diferentes escenarios, en donde el rango de los índices es el mismo en su gran mayoría, además de esto la variación espacial es similar.

7.9. ANALISIS APLICACIÓN DE LA ECUACIÓN UNIVERSAL DE PERDIDA DE SUELO

Luego de aplicar los factores y de analizar los resultados de los mismos, se observa la siguiente tabla

Tabla 29. Factores USLE

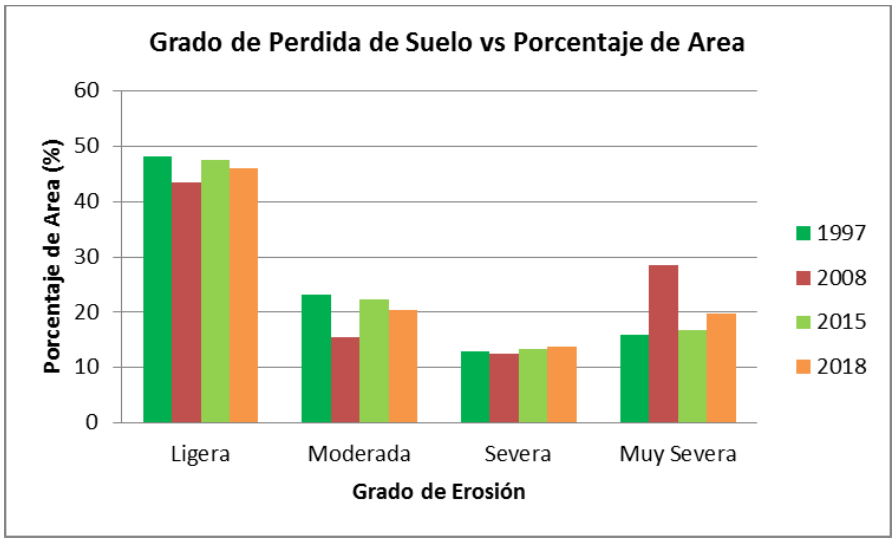
	Factor R				Factor K	Factor LS	Factor C
	1997	2008	2015	2018			
MAX	42697,2	86475,4	41001,9	48803,2	0,79	50	1
MED	28315,2	55719,36	30145,7	35983,7	0,45	0,14	0,09
MIN	14630,8	36146,6	20368,9	24156,5	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

A partir de esta tabla se puede identificar que los valores para el factor R más elevados corresponden al año 2008, el cual hace referencia a la ocurrencia del fenómeno de la niña, lo que indica que este evento tiene un efecto en el factor de erosividad de la lluvia, por otra parte, si se observa la media de los factores K, LS y C, se observa que el que tiene una mayor influencia en la perdida de suelo en la cuenca corresponde al factor K, lo que indica que las condiciones y características del suelo permiten en un 45% la pérdida del suelo, mientras que el factor C cuenta con una media muy baja de 0,9%, es decir que la cobertura y manejo de la vegetación en promedio reduce un 91% la pérdida del suelo, así mismo los valores de longitud y grado de pendiente son bajos indicando que el suelo de la cuenca en promedio se puede perder 0,14 veces más según la longitud y grado de pendiente.

A partir de los cálculos realizados durante el presente proyecto se obtuvieron los mapas 33, 34, 35 y 36 para cada uno de los años seleccionados, en donde se observa que el año en los que se presentó un fenómeno de la niña (1997) y el año en el que se proyectó una precipitación inferior a la promedio (2015), se evidenciaron menores valores de pérdida del suelo, con respecto a los año 2008 y 2018, aunque es importante resaltar que los rangos para los años 1997 y 2008 son mucho más elevados y con un mayor rango que los proyectados para los años 2015 y 2018.

Grafica 19. Relación del Porcentaje de Área para el Grado de Perdida de Suelo



% Perdida de suelo	1997	2008	2015	2018
Ligera	48,1	43,4	47,4	46,0
Moderada	23,1	15,5	22,4	20,3
Severa	20,8	25,5	21,8	23,8
Muy Severa	8,0	15,6	8,4	9,9

Fuente: Elaboración propia

La cuenca cuenta con una pérdida de suelo ligera en más del 40% del territorio, en donde sí se relaciona con la variación espacial, estas zonas corresponden a la trayectoria del cauce principal, es decir se relaciona con las bajas pendientes, por otra parte se aprecia que para los años 1997 y 2015 se presentan los mayores porcentajes de área con pérdida de suelo ligera y moderada, mientras que para los años 2008 y 2018 se presenta un mayor porcentaje de área con pérdida de suelo severa y muy severa, con respecto a los años anteriores. En el año en el que se presenta un mayor porcentaje de área con pérdida de suelo muy severa corresponde al año 2008 con cerca del 30% del territorio.

8. CONCLUSIONES

A partir de los resultados y análisis de los mismos se puede concluir que la precipitación no presenta una variación significativa frente a los diferentes escenarios de cambio climático, lo cual nos indica que los resultados son coherentes con los modelos globales de baja resolución elaborados por el IPCC, en donde se proyectan variaciones de la precipitación futura para los escenarios RCP 26 y 85 entre un -10% y un 10%, específicamente la variación porcentual de la precipitación en la cuenca oscilo entre el -4% y el 4%, lo que se puede considerar como una variación normal, a partir de lo cual se puede inferir que en términos de precipitación la cuenca no se ve afectada a través del periodo analizado por los posibles efectos del cambio climático establecidos (análisis decenales) en los diferentes escenarios.

Por otra parte y a pesar de lo anterior cabe resaltar que el IF por lo menos en un 70% de territorio superó el valor de 200mm el cual nos indica que se presenta una agresividad muy alta, mientras que para el IMF en el 100% de las ocasiones, independientemente de los diferentes escenarios de cambio climático aplicados y periodos de tiempo, presentó una agresividad climática muy alta superando por mucho el límite de 400mm, así mismo al aplicar los índices (IF – IMF) para el periodo actual 1971 – 2010, estos arrojaron resultados elevados, en términos de la erosividad de la lluvia, ya que presentaron valores superiores a los observados en los diferentes escenarios y periodos proyectados para los año 2010 – 2100,lo que hace que la probabilidad de que se presente pérdida del suelo en la cuenca a causa de la erosividad de la lluvia sea.

En los análisis realizados se observa que la fluctuación de la precipitación en términos de cambio climático, es decir considerada bajo una escala de análisis decenal, no es significativa, al encontrarse en un rango entre los +/- 4%, aun a pesar de esto los índices de agresividad climática excedieron los valores clasificados como agresividad muy alta. Entendiendo que al realizar un análisis a escala decenal se está prescindiendo de información importante como las anomalías que se pueden presentar en este periodo, al efectuar una medida aritmética, se realizó un análisis a una escala interanual a partir de la cual se observó un aumento en la fluctuación de la precipitación la cual alcanza en sus puntos más críticos un aumento positivo del 42% y uno negativo del 37%, en los diferentes escenarios, lo que a su vez se ve reflejado en el aumento de los índices de agresividad climática, IF e IMF. Todo esto nos permite inferir que si se realiza un análisis a escalas inferiores de tiempo, estas nos permitirán evidenciar de

manera más específica el comportamiento de la precipitación, por consiguiente el índice de agresividad climática y la correspondiente pérdida del suelo.

Además de esto se debe mencionar que la variación espacial de la precipitación y sus índices de agresividad climática tanto en el periodo actual, como en los valores proyectados, presenta sus valores más elevados en la zona norte de la cuenca, específicamente los valores más altos se evidenciaron en las Subcuenca de los ríos Chiquinquirá, Lenguazaque, Simijaca y rio alto Suárez, mientras que los valores mínimos se presentaron en la Subcuenca de los ríos alto Ubaté, Suta y Cucunubá.

Respecto al procesamiento de los índices de agresividad climática bajo una escala interanual, para los diferentes escenarios y periodos de tiempo, se observó que la precipitación presentó un comportamiento independiente de las concentraciones de CO_2 en la atmosfera. Así mismo por medio de la gráfica 18, se aprecia que la precipitación anual para el periodo actual (1971 – 2010) fluctúa en un rango entre los 900 y 1680 mm, mientas que la precipitación para los diferentes escenarios fluctúa entre los 1100 y 1410 mm, por lo que se puede deducir que los valores proyectados de precipitación no representarían el comportamiento real de las precipitaciones, motivo por el cual les resultados hallados en este proyecto de los índices de agresividad climática y la erosividad de la lluvia, basados en estos escenarios pueden aumentar o disminuir drásticamente en condiciones reales. Así mismo este es el motivo por el cual en el periodo actual se identificaron los índices de agresividad climática y erosividad de la lluvia más elevados que en ningún otro escenario futuro.

Refiriéndonos a la perdida de suelo en la cuenca, se puede concluir por medio de la tabla 29, que a pesar que todos los índices tuvieron el mismo grado de prevalencia, la cobertura y manejo del suelo de la cuenca, así como su longitud y grado de pendiente minimizan la perdida de suelo, esto se ve contrarrestado con la erodabilidad del suelo ya que las características y condiciones de este permiten la pérdida del mismo, esto sumado a los elevados índices de erosividad de la lluvia pueden llegar a generar problemas severos de perdida de suelo en algunas zonas de la cuenca.

Con respecto a la perdida de suelo que se presenta en la cuenca se concluye que un poco más del 40% del área de la cuenca presenta perdida de suelo ligera para todos los años analizados, para lo cual es importante resaltar que a pesar de que el índice de erosividad de la lluvia presenta en la mayoría de los años estudiados una clasificación de extremadamente severo, esto se ve contrarrestado con la

distribución de bajos índices de erodabilidad del suelo, la baja longitud y grado de pendiente que presenta la cuenca, sumado a esto la cobertura y el manejo del suelo, aunque es importante resaltar que para las zonas en donde se presentan eriales o canteras, la pérdida del suelo llega en su escenario más crítico a los 425.000 t/ha año, lo que es alarmante, para quienes disponen de estas tierras, teniendo en cuenta que a partir de los 100 t/ha año se clasifica como una pérdida del suelo muy alta, ya que estos niveles de perdida de suelo pueden generar baja productividad y fertilidad del suelo, la erosión del mismo desencadenando eventos como la remoción en masa que puede poner el riesgo la vida de las personas, entre muchas otras, estas zonas se sitúan principalmente en los municipios: Saboya, Caldas, Chiquinquirá, Simijaca, Villa de Leyva, Villapinzón, Villa de San Diego de Ubaté y Cucunubá.

9. RECOMENDACIONES

Luego de la aplicación de presente proyecto de investigación se recomienda revisar la teoría y proponer una clasificación idónea del IF y el IMF ya que al ser una zona en donde se presenta una elevada precipitación estos índices resultan ser muy elevado.

Por otra parte se considera importante el realizar un estudio más específico de la permeabilidad y estructura del suelo para cada una de las unidades taxonómicas, ya que esta variable es importante al momento de determinar la erodabilidad del suelo.

Estimar la Energía Cinética de la lluvia para el departamento de Cundinamarca con el fin de encontrar una ecuación que se correlacione con el IMF y las condiciones de la región, ya que la ecuación que se tomó corresponde al departamento de caldas, lo que podría generar incertidumbre en la estimación del factor de erosividad de la lluvia.

Incentivar las buenas prácticas de conservación con el fin de disminuir la pérdida del suelo en la cuenca, especialmente en las zonas en las que se presentan eriales ya que la pérdida de suelo por erosión en esta zona es muy elevada.

10. BIBLIOGRAFIA

[1] CAR, «Diagnóstico prospectivo y formulación de la Cuenca Hidrográfica de los Ríos Ubaté y Suárez,» Corporación Autonoma Reginal de Cundinamarca, Bogotá, 2012.

[2] Secretaria de Salud de Boyacá, «Mapa de Riesgo de la calidad del agua para consumo humano del centro urbano del municipio de Chiquinquira - Boyacá,» secretaria de salud de Boyacá, 2014.

[3] Universidad de la Republica Uruguay, «Edafología,» Universidad de la Republica , Uruguay, 2014.

[4] D. Lobo Lujan, D. Gabriels, F. Delgado y Z. Lozano , «Indices de Clima, Erosión y Productividad de Suelos en Venezuela,» X Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo, Ecuador .

[5] DNP, «Estrategia para el Manejo Ambiental de la Cuenca Ubaté - Suárez,» Departamento Nacional de Planeación Consejo Nacional de Política Economica y Social CONPES, Bogotá D.C., Colombia, 2006.

[6] G. E. Armenta Porras, J. Dorado Delgado, A. O. Rodriguez Roa y J. F. Ruiz Murcia, «Escenarios de Cambio Climátco para Precipitaciones y Temperaturas en Colombia,» Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia - IDEAM, Bogotá D.C., 2014.

[7] J. E. Montealegre Bocanegra y J. D. Pabon Caicedo, «La variabilidad climatica interanual asociada al ciclo el niño - la niña - Oscilación del sur y su efecto en el patron pluviometrico de Colombia,» *Meteorologia Colombiana,* vol. 2, nº ISSN - 0124-6984, pp. 7 - 21, 2000.

[8] Olivares Santelices, «Determinación del Comportamiento de las precipitaciones y de su agresividad cimatica, en las regiones del Bio - Bio y de la Araucania,» Universidad de Talca, Talca - Chile, 2009.

[9] R. P. Mendoza M., «Análisis comparativo del comportamiento de las precipitaciones y su agresividad climática en zonas áridas secas y semiáridas frías,» Universidad de Talca, Talca - Chile, 2011.

[10] SENA, CorTolima, «Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrogeografica del Río Totare,» Totare, 2009.

[11] ESRI, «ArcGIS Resource Center,» ESRI, [En línea]. Available: help.arcgis.com. [Último acceso: 10 2015].

[12] J. M. Rodríguez Santos, «Aplicación de Metodos de Interpolación para el Cálculo de Precipitación por modelamiento Geoestadistico y Análisis Espacial para el Departamento de Cundinamarca,» Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, 2014.

[13] F. A. Ramírez Ortiz, «Evaluación del riesgo por erosion potencial de la zona cafetera central del Departamento de Caldas,» Universidad del Tolima, Ibagué, 2006.

[14] Planeación Ecológica Ltda; Ecoforest Ltda, «Elaboración del Diagnostico, Prospectivo y Formulación de la Cuenca Hidrografica del río Bogotá Subcuenca del río Medio Bogotá Sector Salto Tequendama Apulo,» Bogotá, 2012.

[15] FAO, «Organizacion de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - Permeabilidad del Suelo,» Coleccion FAO Capacitacion.

[16] G. A. Mancilla Escobar, «Uso de la Ecuación Universal de pérdidas de suelo (USLE) en el campo forestal,» Universidad de Chile Facultad de Ciencias Forestales Departamento de Silvicultura, Chile, 2008.

[17] H. Mitasova y L. Mitas, «Modeling soil detachmanet with RUSLE 3d using GIS,» Geographic Modeling Systems Laboratory University of Illinois ar Urbana - Champaing, 1999. [En línea]. Available: http://www4.ncsu.edu/~hmitaso/gmslab/denix/usle.html. [Último acceso: 2015].

[18] Hudson, «Soil erosion modeling using the revides universal soil loss equation (RUSLE) In a Drainage basin in eastern Mexico,» The University of Texas at Austin, 2002. [En línea]. Available: http://www.utexas.edu/depts/grg/hudson/grg360g/EGIS/labs_04/Lab9/lab9_soil_erosion_05.htm. [Último acceso: 2015].

[19] E. L. Revilla, M. Marchamalo, M. Roldán y C. Martínez, «Estudio de factor vegetación "C" de la Ecuacion Universal de Pérdida de Suelo revisada "RUSLE" en la Cuenca del Río Birrís (Costa Rica),» Universidad Politécnica de Madrid,

Costa Rica, 2008.

[20] IDEAM;PNUD, «Evolucion de preicipitacion y temperatura durante los fenomenos El Niño y La Niña,» IDEAM, Bogotá, 2012.

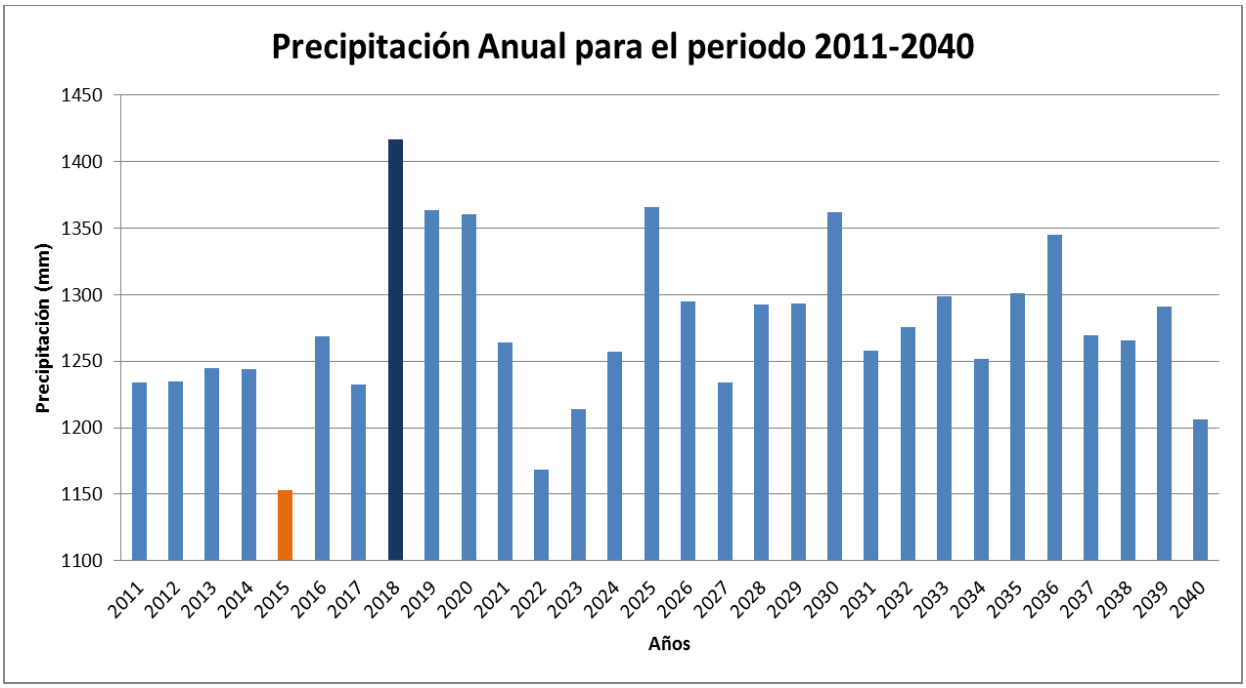
[21] IDEAM, PNUD, Alcaldía Bogotá, Gobernación de Cundinamarca, CAR, Corpoguavio, Instituto Alexander Von Humbolt, Parques Nacionales Naturales de Colombia, MADS, DNP., «Vulnerabilidad de la Región Capital a los efectos del cambio climático - opciones para la adaptación,» Plan Regional Integral de Cambio Climatico para Bogotá - Cundinamarca (PRICC), Bogotá, 2014.

[22] E. Linares Revilla, M. Marchamalo, M. Róldan Soriano y C. Martínez Santamaría, «Estudio del factor Vegetación "C" de la ecuación universal de pérdidas de suelo revisada "RUSLE" en la cuenca del Río Birrís,» Universidad Politécnica de Madrid, Costa Rica, 2008.

ANEXO I
VARIABILIDAD CLIMATICA FUTURA

- **Periodo 2011- 2040**
  - **RCP 26:**

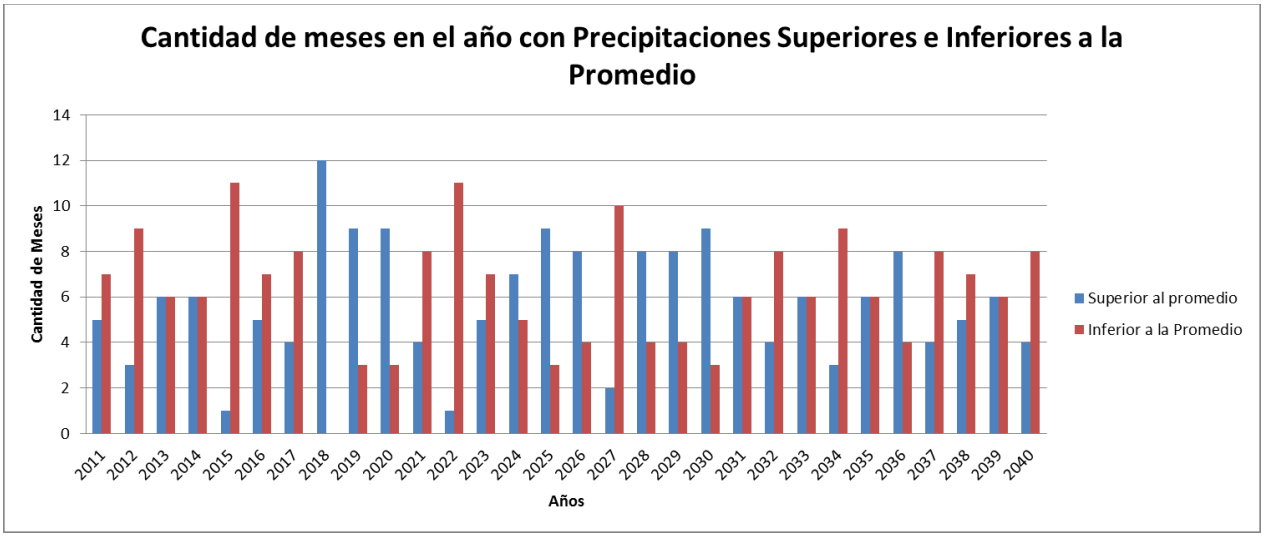
Grafica 20-I. Precipitaciones Proyectadas para el Periodo 2011 – 2040; RCP 26



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Como se puede observar para el periodo de tiempo entre 2011 y 2040 el año en el que se presenta una mayor precipitación es en el 2018, con cerca de 1400mm, mientras que en el que se presenta una menor precipitación corresponde al año 2015 por debajo de los 1150mm.

Grafica 21-I. Cantidad de meses en el año con Precipitaciones Superiores e Inferiores a la Promedio Periodo 2011 – 2040; RCP 26

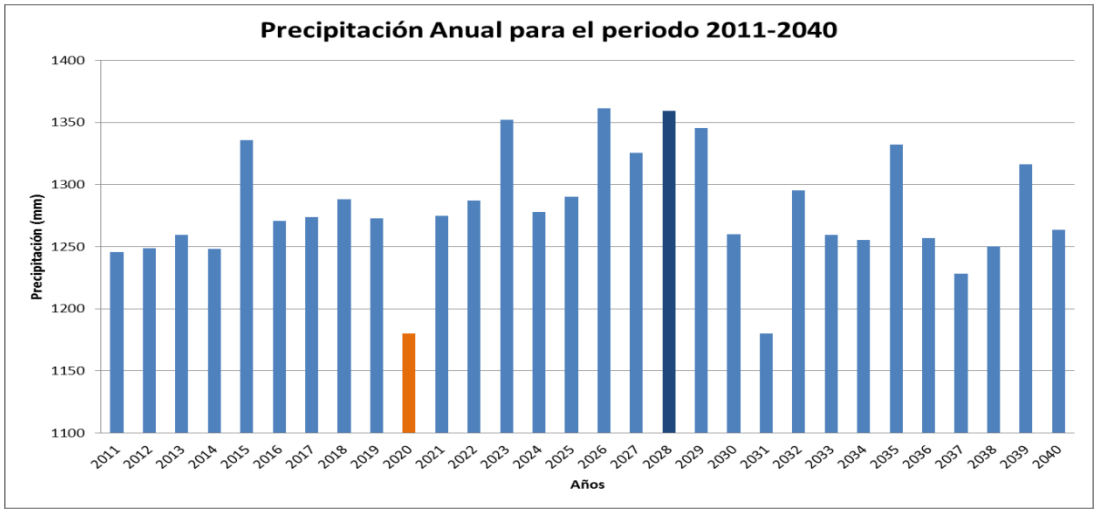


Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

A partir de esta gráfica, no solo se observa que para el año 2015 11 de los 12 meses presentarían precipitaciones por debajo del promedio, y que para el año 2018 los 12 meses del años presentaran precipitaciones por encima del promedio, además de esto también se aprecia que bajo el escenario RCP 26 en este periodo el 46% de los años Presentan mayor cantidad de meses con precipitaciones inferiores a la promedio; el 20% presentan las misma cantidad de meses con precipitaciones por encima y por debajo de la promedio; y el 33% presentan precipitaciones superiores al promedio.

- **RCP 45:**

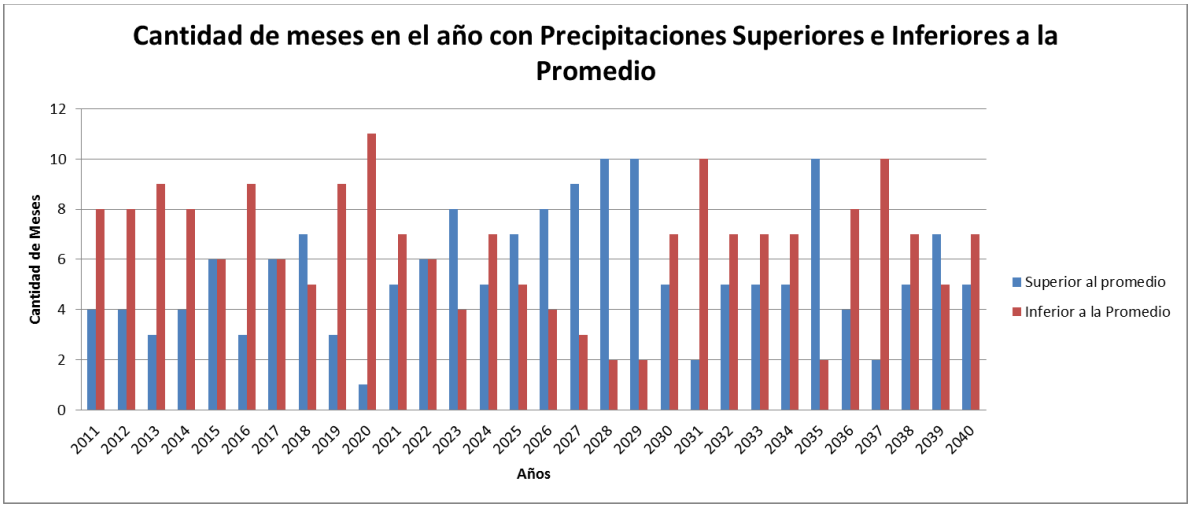
Grafica 22-I. Precipitaciones Proyectadas para el Periodo 2011 – 2040; RCP 45



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Para el escenario de cambio climático RCP 45, el año en el que se presenta una menor precipitación anual corresponde al año 2020, mientras que en año en el que se presenta una mayor precipitación es en año 2028, es importante resaltar que para el escenario RCP 26 2015 es uno de los años con menor precipitación, mientras que para este escenario RCP 45 es de los años que presentan una elevada precipitación.

Grafica 23-I. Cantidad de meses en el año con Precipitaciones Superiores e Inferiores a la Promedio Periodo 2011 – 2040; RCP 45

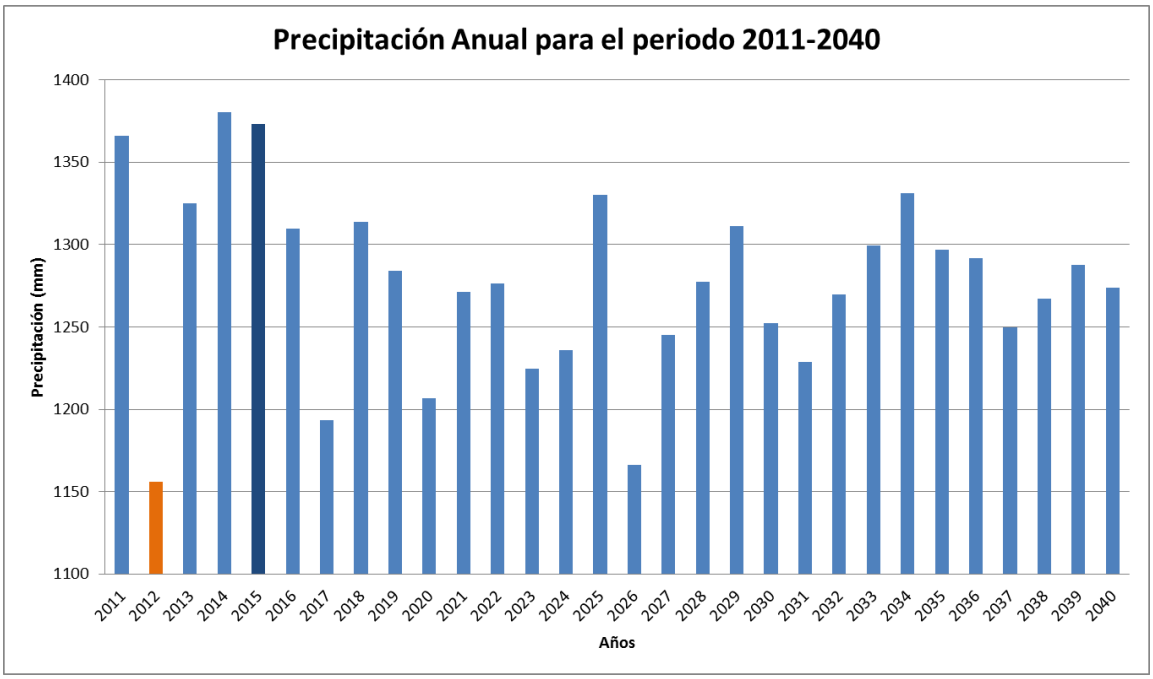


Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Para el caso del escenario de cambio climático RCP 45 en el año 2020, 11 de los 12 meses presentaran una precipitación inferior a la del promedio, mientras que para el año 2028 10 de los 12 meses presentaran una precipitación superior a la promedio, por otra parte para este escenario el 60% de los años presentan una mayor cantidad de meses con precipitaciones inferiores a la promedio, mientras que solo un 10% presentan tanto 6 meses con precipitaciones por encima del promedio, como 6 meses con precipitaciones por debajo del promedio y un 30% de los años presentan precipitaciones superiores a la promedio.

- **RCP 60:**

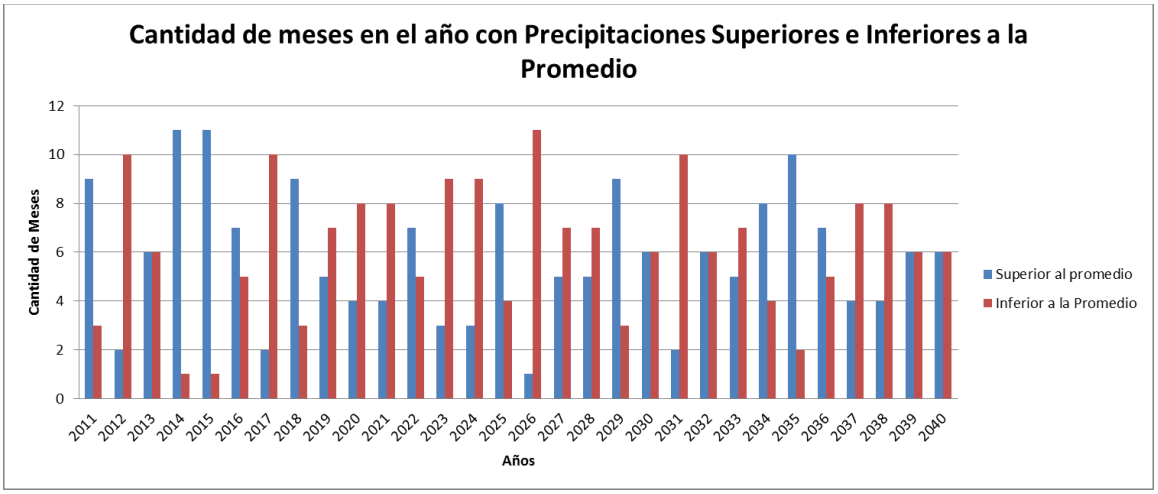
Grafica 24-I. Precipitaciones Proyectadas para el Periodo 2011 – 2040; RCP 60



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

El año 2012 para el escenario RCP 60 corresponde a uno de los años en los que se presenta una menor precipitación anual con cerca de 1150 mm, mientras que el año 2011, 2014 y 2015 presentan las precipitaciones más elevadas, para este caso se tomó el año 2015, ya que según el análisis este año presenta una mayor de variabilidad porcentual de la precipitación.

Grafica 25-I. Cantidad de meses en el año con Precipitaciones Superiores e Inferiores a la Promedio Periodo 2011 – 2040; RCP 60

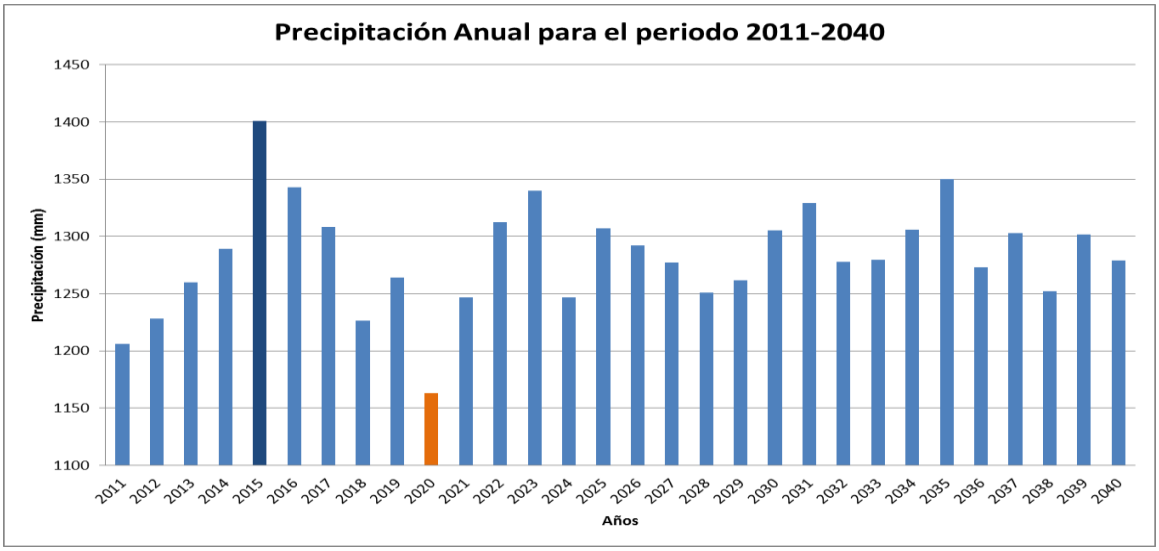


Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Para el año 2012,10 de los 12 meses presentan una precipitación inferior a la promedio, mientras que para el año 2015 11 de los 12 meses presentan una precipitación superior a la promedio, por otra parte el 46% de los años presentan una precipitación inferior a la promedio, mientras que el 37% presentan una precipitación superior a la promedio, finalmente el 5% de los años presentan la misma cantidad de meses con precipitaciones tanto superiores como inferiores a la promedio.

- **RCP 85:**

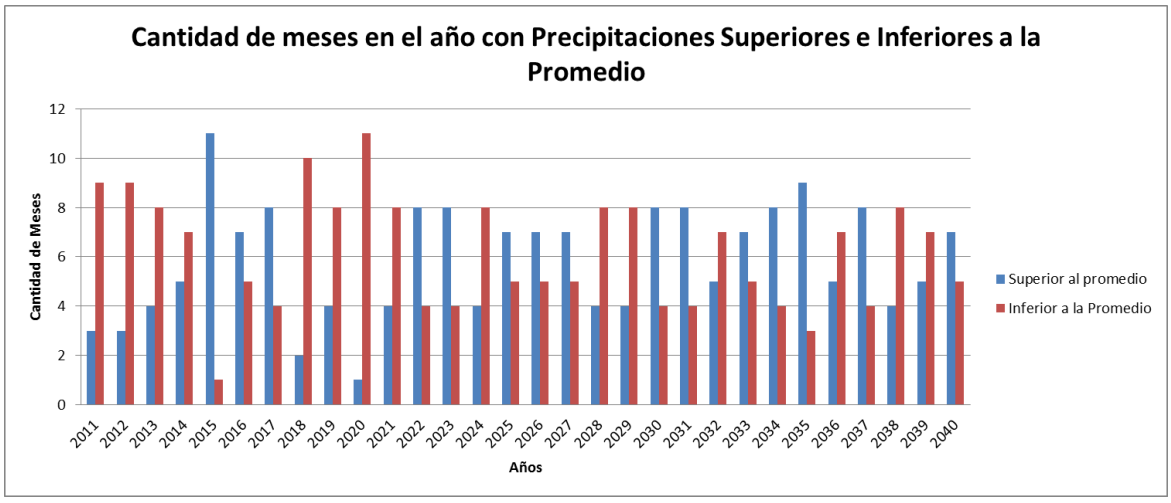
Grafica 26-I. Precipitaciones Proyectadas para el Periodo 2011 – 2040; RCP 85



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Para el periodo de tiempo de 2011- 2040 bajo el escenario de cambio climático RCP 85, el año en el que se presenta una mayor cantidad de precipitación corresponde al año 2015, mientras que en el 2020 se presenta la precipitación más baja.

Grafica 27-I. Cantidad de meses en el año con Precipitaciones Superiores e Inferiores a la Promedio Periodo 2011 – 2040; RCP 85

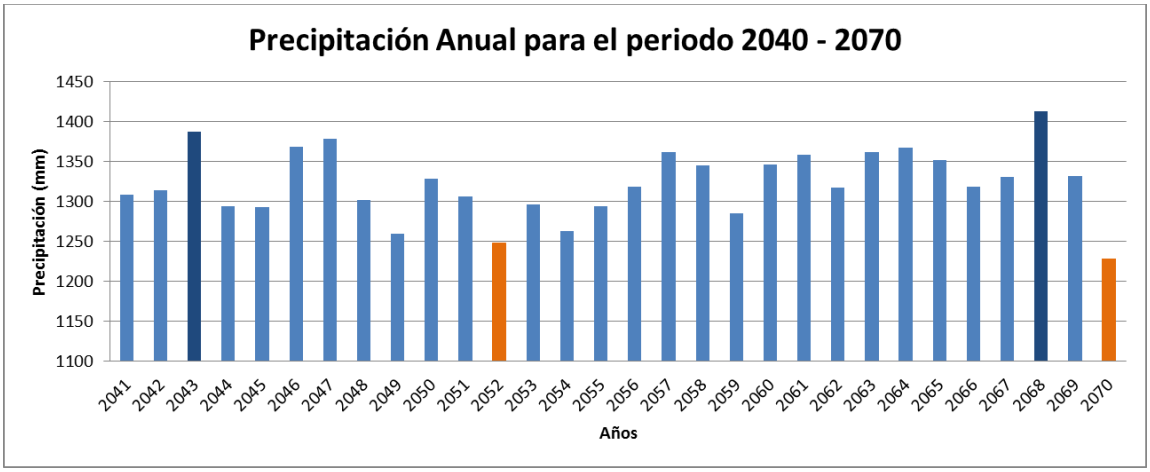


Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

A partir de la gráfica se puede apreciar que en el año 2015 11 de los 12 meses presentaran una precipitación superior a la del promedio, mientras que para el año 2020 11 de los 12 meses presentaran una precipitación inferior a la promedio, además de esto la gráfica nos permite analizar que para este escenario el 50% de los años presentaran una mayor cantidad de meses con precipitación por encima del promedio, y el otro 50% presentaran una mayor cantidad de meses con precipitaciones por debajo de la promedio.

- **Periodo 2040 – 2070**
  - **RCP 26**

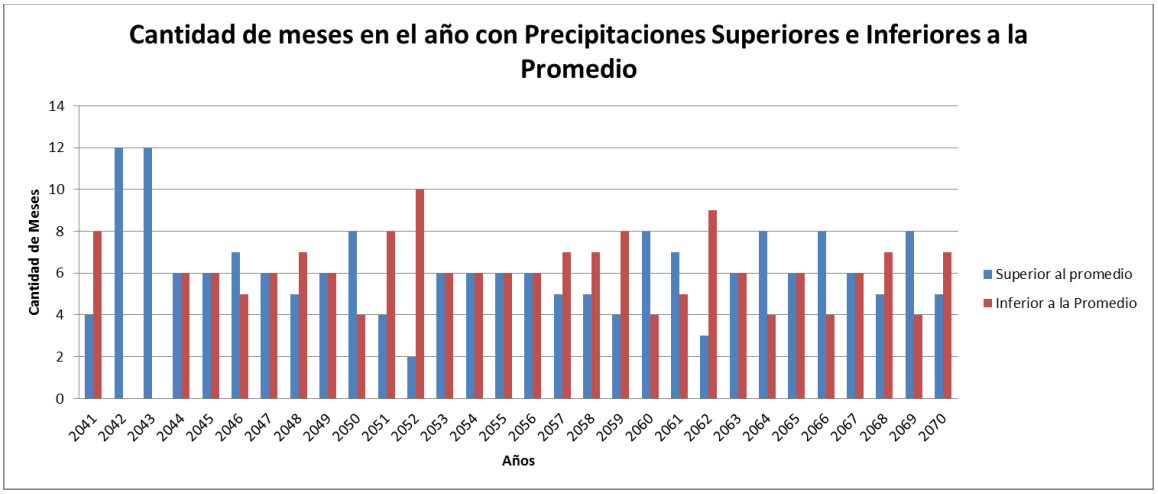
Grafica 28-I. Precipitaciones Proyectadas para el Periodo 2040 – 2070; RCP 26



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

A partir de esta grafica se puede observar que los años en los que se presenta una mayor precipitación corresponden al 2068 y el 2043 respectivamente, por otra parte para este periodo se presentan dos años en donde las precipitaciones estuvieron por debajo de los 1250 mm, los cuales corresponden a 2052 y 2070, cabe resaltar que aunque en el grafico se evidencia que el año 2070 presenta una precipitación más baja con respecto al año 2052, se tendrá en cuenta la gráfica 10-I para la selección del año.

Grafica 29-I. Cantidad de meses en el año con Precipitaciones Superiores e Inferiores a la Promedio Periodo 2040 – 2070; RCP 26

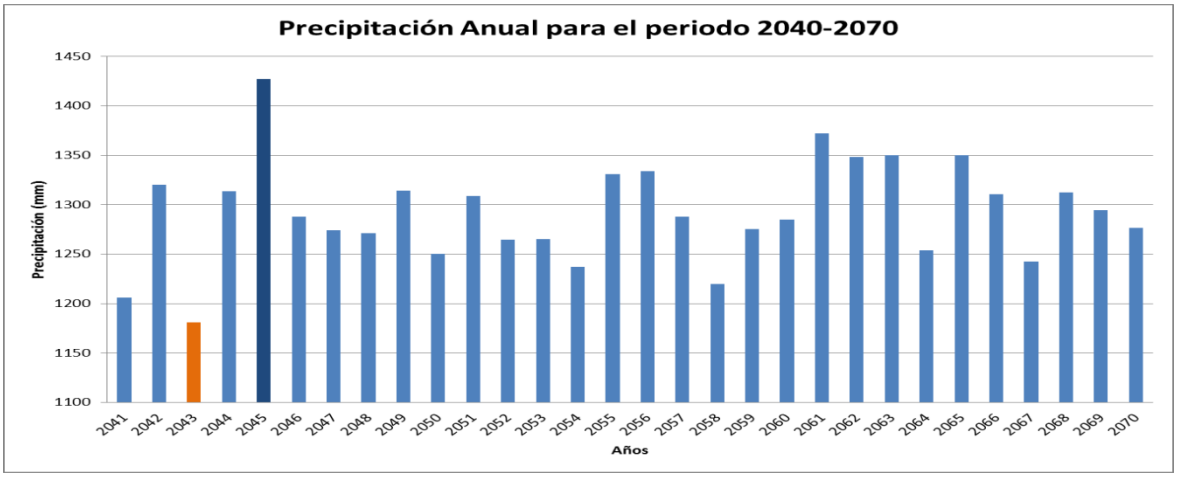


Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

A partir de la Grafica 10-I se pueden observar los meses que presentan una variación porcentual de la precipitación superior e inferíos a la normal para cada uno de los años del periodo 2040 – 2070, en donde se observa que para los años 2042 y 2043 12 de los 12 meses del año presentaran una variación porcentual de la precipitación superior a la normal, si nos retomamos a la gráfica 9-I podemos observar que uno de los años con mayores precipitaciones será el año 2068, si esto se compara con la gráfica 10-I vemos que esa precipitación se concentrara principalmente en solo 5 de los 12 meses del año ya que los otros 7 presentan una variación porcentual de la precipitación inferior a la normal, lo que nos lleva a suponer que para el año 2068 según el escenario RCP 26 es posible que la precipitación se concentre en un menor tiempo que en el año 2043, esto mismo sucede para los años con 2052 y 2070, en donde en el año 2070 se presenta a menor precipitación pero esta se concentra en una menor cantidad de tiempo, contrario al año 2052 en el cual también se presenta una precipitación anual baja pero esta se concentra en más meses del año.

- **RCP 45**

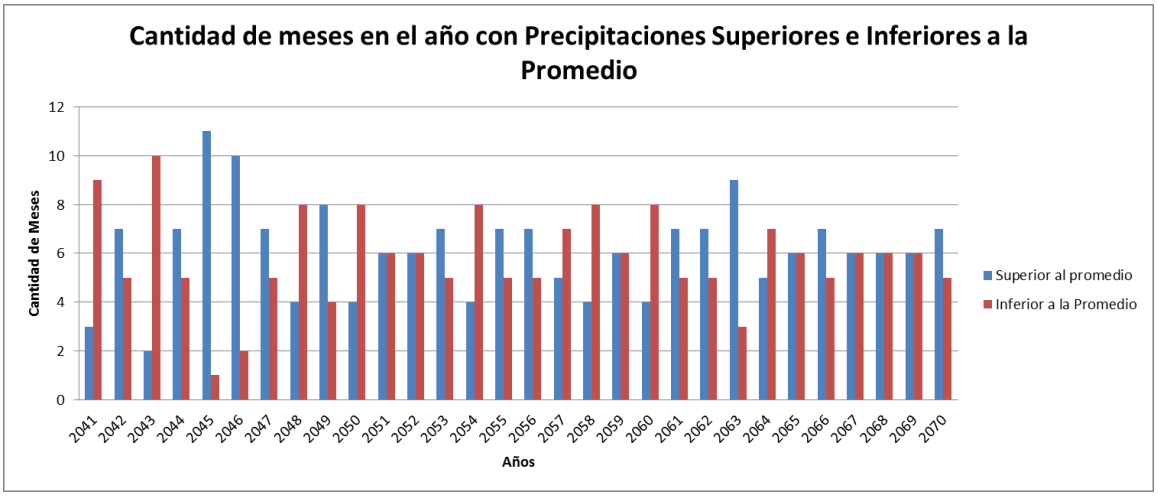
Grafica 30-I. Precipitaciones Proyectadas para el Periodo 2040 – 2070; RCP 45



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

En esta grafica se observa que para el periodo 2040 – 2070 la precipitación, bajo el escenario de cambio climático RCP 45, se aprecia que para el año 2045 se presentaría la precipitación máxima del periodo por encima de los 1400mm, mientras que el año en el que se presentó una menor precipitación anual corresponde al 2043.

Grafica 31-I. Cantidad de meses en el año con Precipitaciones Superiores e Inferiores a la Promedio Periodo 2040 – 2070; RCP 45

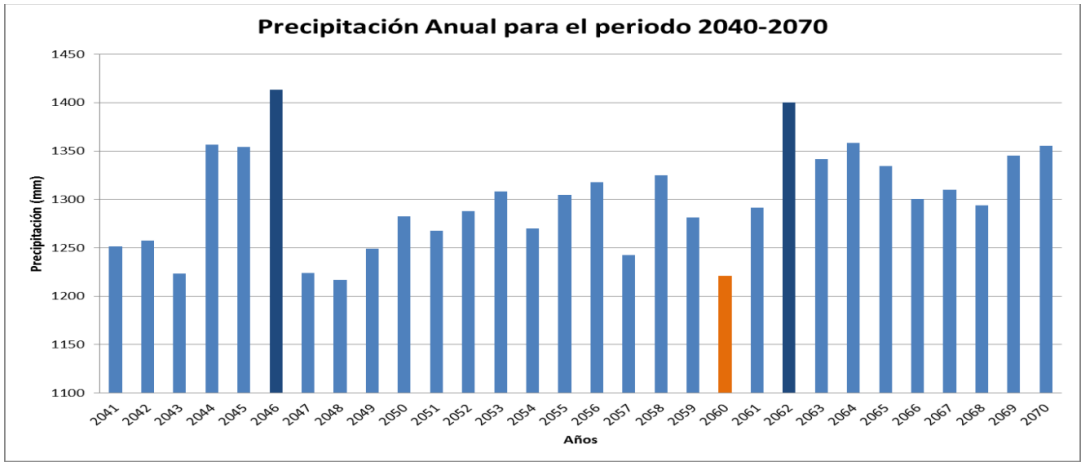


Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Así como se puede observar en la gráfica 12-I el año en el que se presenta una mayor cantidad de meses con precipitaciones superiores al promedio es el año 2045 con 11 de los 12 meses, mientras que para el año 2043, 10 de los 12 meses presentan precipitaciones inferiores a la promedio, por otra parte a partir de la gráfica se puede apreciar que para el periodo 2040 – 2070; el 47% de los años presentan precipitaciones por encima de la normal en la mayoría de sus meses, mientras que el 30% presentan precipitaciones por debajo de la normal y el 23% faltante presenta 6 meses de precipitación superior a la promedio y 6 meses de precipitación por debajo de la promedio.

- **RCP 60**

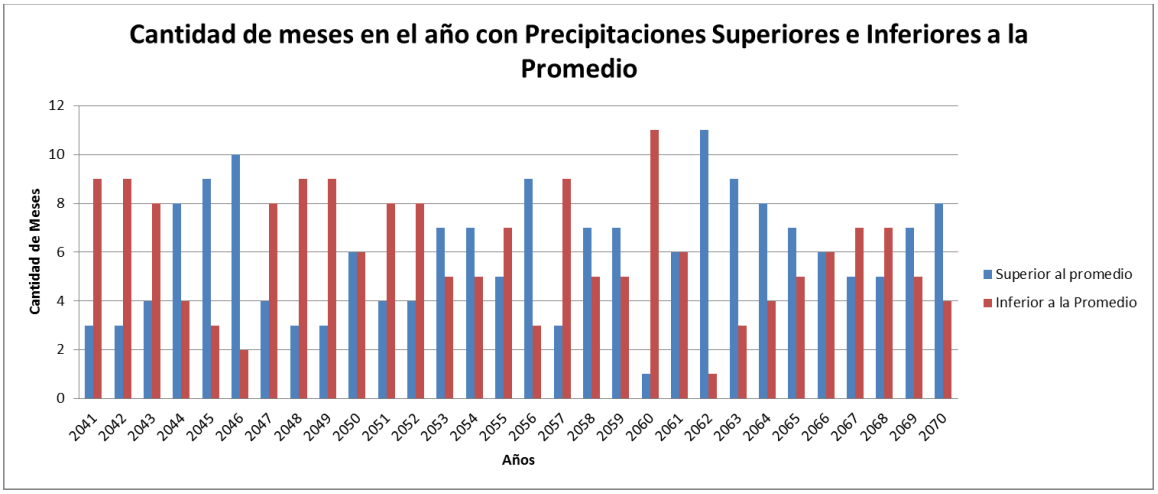
Grafica 32-I. Precipitaciones Proyectadas para el Periodo 2040 – 2070; RCP 60



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

La precipitación anual para el periodo 2040 – 2070 bajo el escenario de cambio climático RCP 60 proyecta las mayores precipitaciones en los años 2046 y 2062 cercana a los 1400 mm, sumado a esto también se observa que para el año 2060 se presentaría uno de los años del periodo en donde se presenten menores precipitaciones.

Grafica 33-I. Cantidad de meses en el año con Precipitaciones Superiores e Inferiores a la Promedio Periodo 2040 – 2070; RCP 60

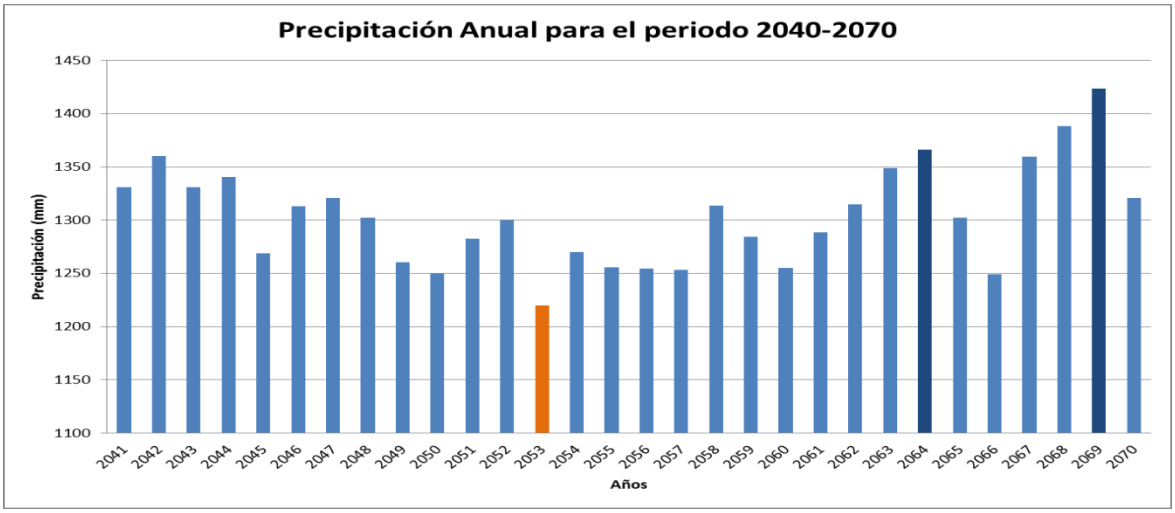


Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Complementando la gráfica 13-I en la gráfica anterior se observa que para el año 2062, 11 de los 12 meses excederán la precipitación normal para el periodo, mientras que para el año 2046 en 10 de los 12 meses ocurrirá esto, teniendo en cuenta que este último es el año en que se presentaría la mayor precipitación anual es importante considerar que una mayor cantidad de precipitación se concentraría en una menor cantidad de tiempo; por otra parte se aprecia que para el año 2060 11 de los 12 meses presentarían precipitaciones por debajo del promedio del periodo. Además de lo anterior es importante resaltar que para este periodo, el 47% de los años presentaría precipitaciones superiores a la normal, mientras que el 43% presentaría precipitaciones inferiores a la normal, y solo un 10% de los años presentaría la misma cantidad de meses con precipitaciones tanto inferiores como superiores a la normal.

- **RCP 85**

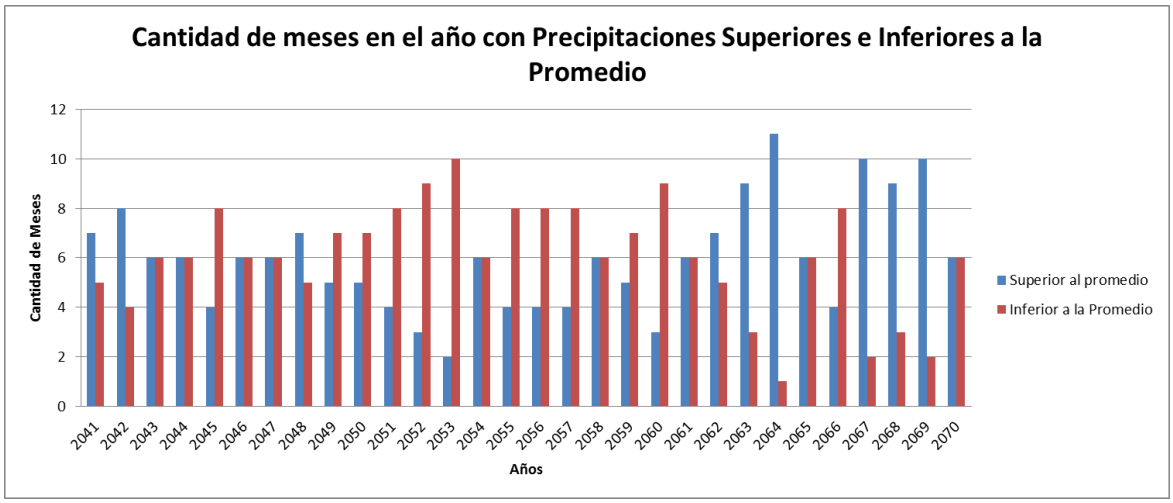
Grafica 34-I. Precipitaciones Proyectadas para el Periodo 2040 – 2070; RCP 85



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Por medio de la gráfica 15-I en donde se representa el comportamiento de la precipitación bajo el escenario de cambio climático RCP 85 el cual resulta ser un escenario negativo, se observa que para el año 2069 se presentara la mayor precipitación del periodo, junto con el 2068 y el 2064, mientras que para el año 2053 se presentaría las precipitación más baja del periodo.

Grafica 35-I. Cantidad de meses en el año con Precipitaciones Superiores e Inferiores a la Promedio Periodo 2040 – 2070; RCP 85

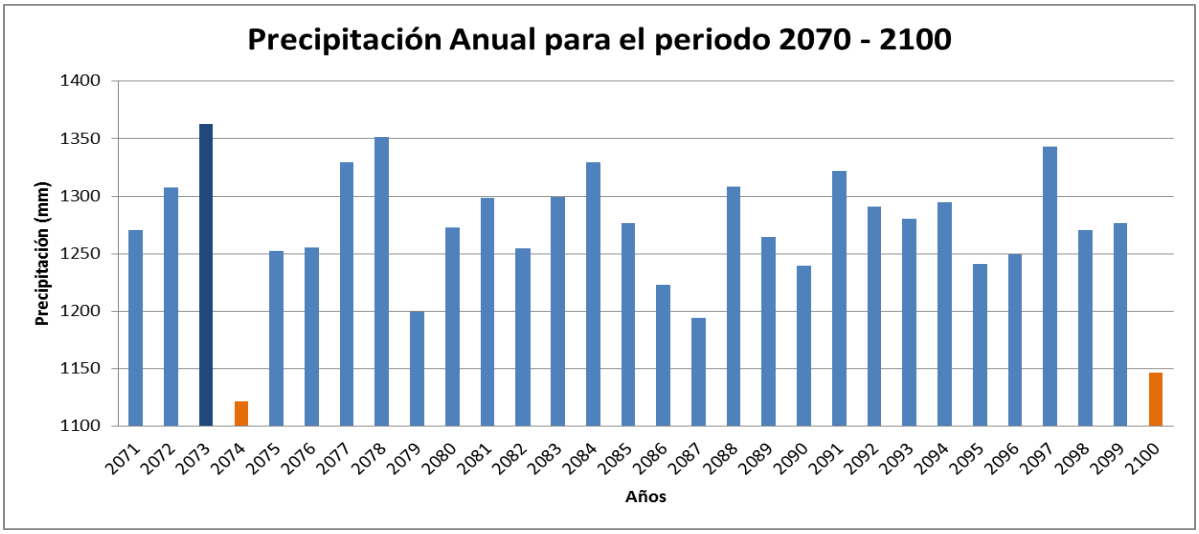


Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Por otra parte, según la gráfica 16-I es importante resaltar que en los años del 2049 hasta el 2053 se observa un aumento en la cantidad de meses que presentarían una precipitación inferior a la promedio, finalizando en el año 2053, el cual a partir de la gráfica 20 se observó sería el de menor precipitación para el periodo, mientras que para el año 2069 en 10 de los 12 meses se superaría la precipitación promedio, para el año 2064 se esto ocurriría en 11 de los 12 meses. Seguido de lo anterior también se evidencia que el 40% de los años presentara precipitaciones inferiores a las promedio, mientras que el 30% presentara precipitaciones superiores a la precipitación promedio, y el 30% restante presentara la misma cantidad de meses con precipitaciones superiores e inferiores a la normal.

- **Periodo 2070 – 2100**
  - **RCP 26**

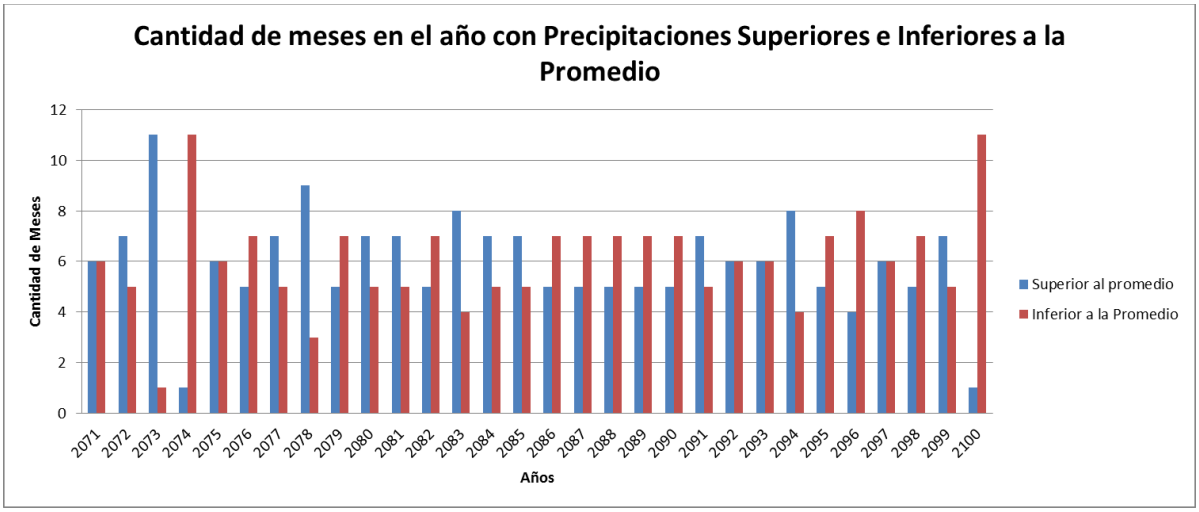
Grafica 36-I. Precipitaciones Proyectadas para el Periodo 2070 – 2100; RCP 26



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

El año 2074 y 2100 presentarían las menores precipitaciones para el periodo de tiempo entre 2070 y 2100 bajo el escenario de cambio climático RCP 26, con precipitaciones por debajo de los 1150 mm, mientras que en el año 2073 se presentaría la mayor precipitación del periodo.

Grafica 37-I. Cantidad de meses en el año con Precipitaciones Superiores e Inferiores a la Promedio Periodo 2070 – 2100; RCP 26

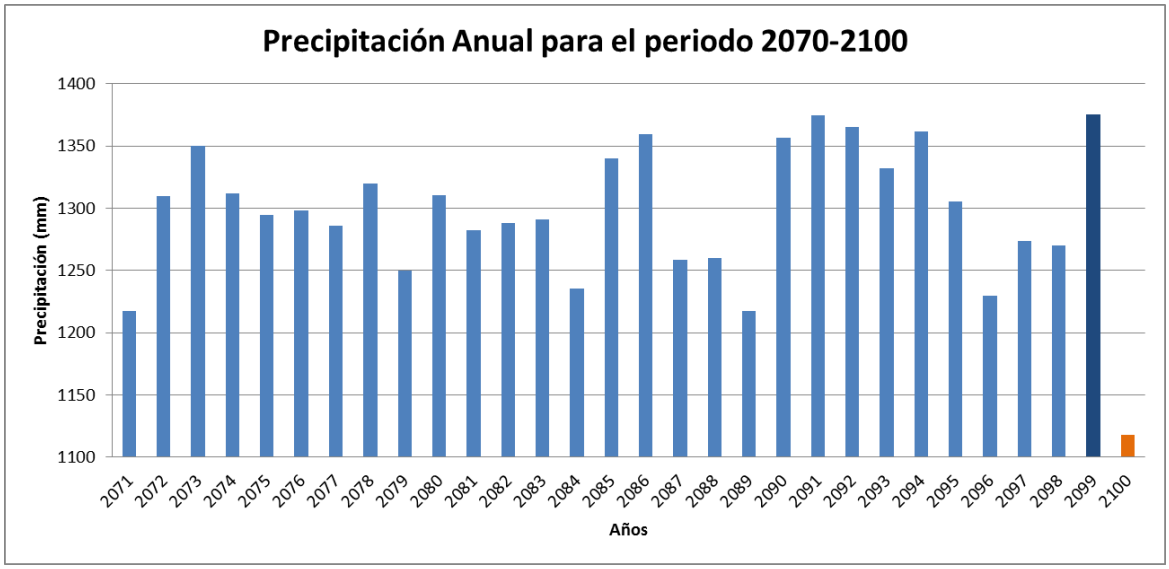


Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Ratificando lo apreciado en la gráfica 17-I es la gráfica anterior se observa que para los años 2074 y 2100 no solo se presentarían las menores precipitaciones del periodo, sino que se presentaría la mayor cantidad de meses con una precipitación inferior a la promedio, con 11 de los 12 meses correspondientes al año, por su parte en el año 2073 se presentaría la mayor cantidad de meses con precipitaciones superiores a la normal, finalmente aproximadamente un 43% de los años presentarían la mayor cantidad de meses con precipitaciones inferiores a la precipitación promedio, mientras que el 40% presentaría la mayor cantidad de meses con precipitaciones superiores a la promedio y solo un 17% contaría con la mayor cantidad de meses con precipitaciones tanto superiores como inferiores a la norma.

- **RCP 45**

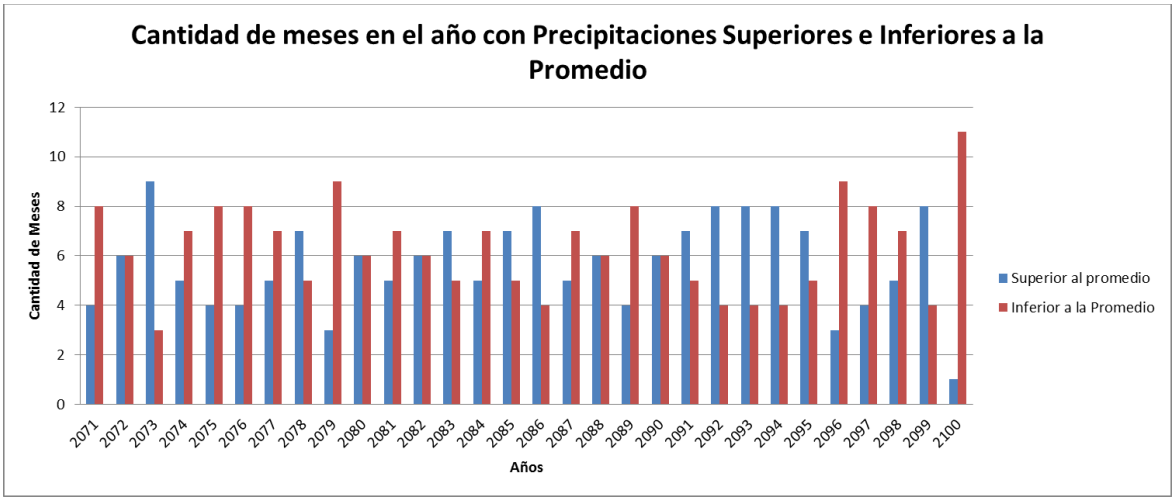
Grafica 38-I. Precipitaciones Proyectadas para el Periodo 2070 – 2100; RCP 45



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Para el escenario de cambio climático RCP 45 en el periodo 2070 – 2100, el año en que se evidencia una menor precipitación para el año 2100 con una precipitación cercana a los 1100mm, mientras que el año en el que se presenta una mayor precipitación es el 2099, aunque se puede observar que entre los años 2090 – 2094, se presentan altas precipitaciones.

Grafica 39-1. Cantidad de meses en el año con Precipitaciones Superiores e Inferiores a la Promedio Periodo 2070 – 2100; RCP 45

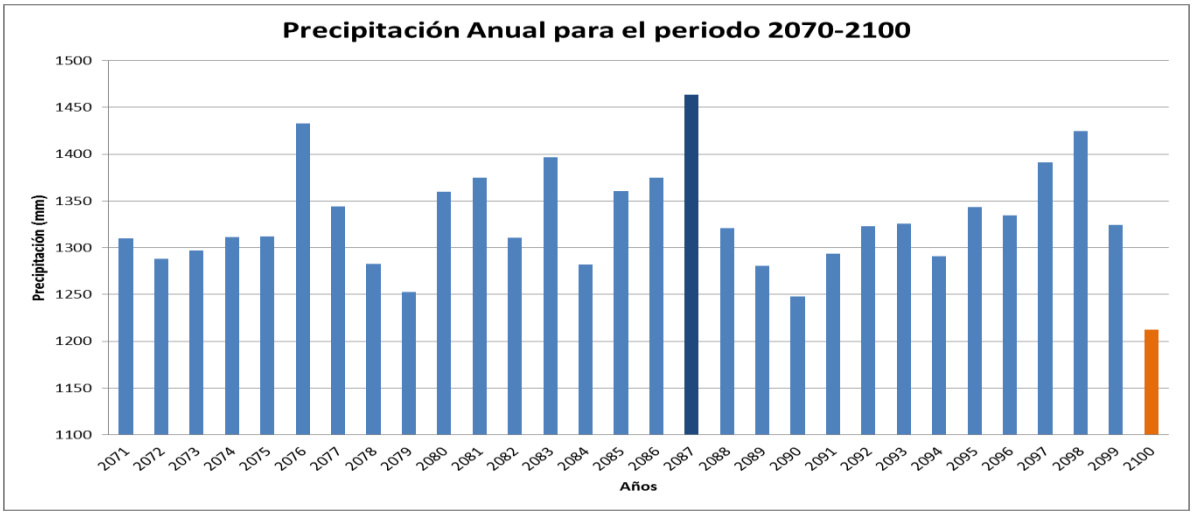


Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Para el año 2100, 11 de los 12 meses se presentan precipitaciones inferiores a la promedio, mientras que para el año 2099 en 8 de los 12 meses se presentan mayores precipitaciones a la promedio, es importante resaltar que entre los años 2091 – 2094, se presenta un periodo con mayor cantidad de meses que presentan precipitaciones superiores a la promedio, para este periodo el 47% de los años presentan una mayor cantidad de meses con precipitaciones inferiores a la precipitación promedio, mientras que un 37% de los años presentan una mayor cantidad de precipitación superior a la promedio, finalmente un 16% de los años presentan la misma cantidad de meses con precipitaciones tanto inferiores como superiores a la normal.

- **RCP 60**

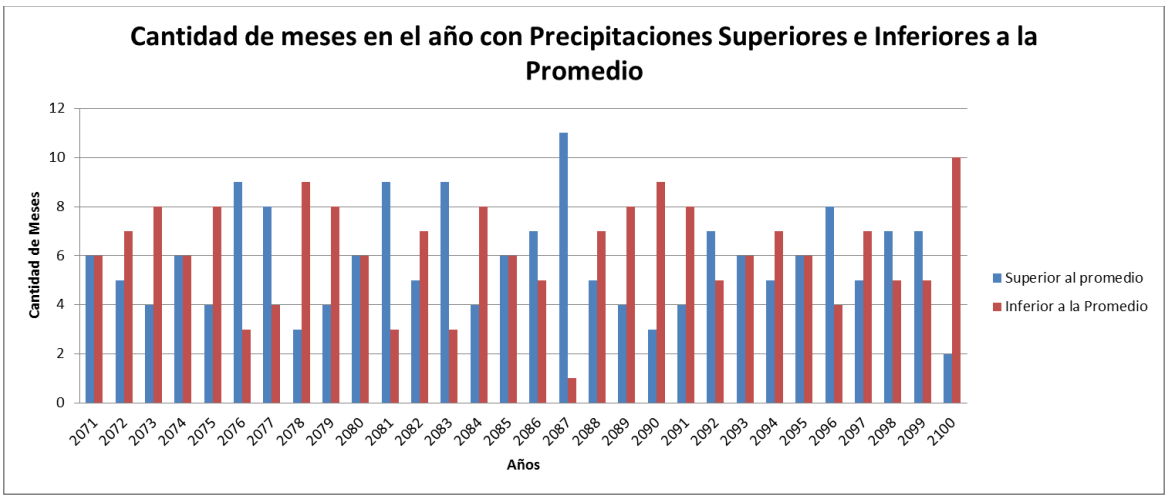
Grafica 40-I. Precipitaciones Proyectadas para el Periodo 2070 – 2100; RCP 60



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

En el año 2100, se presentaron los menores valores de precipitación anual para el periodo 2070 – 2100 bajo el escenario de cambio climático RCP 60 con precipitaciones alrededor de los 1200mm, mientras que para el año 2087 se presentan las mayores precipitaciones alrededor de los 1450mm.

Grafica 41-I. Cantidad de meses en el año con Precipitaciones Superiores e Inferiores a la Promedio Periodo 2070 – 2100; RCP 60

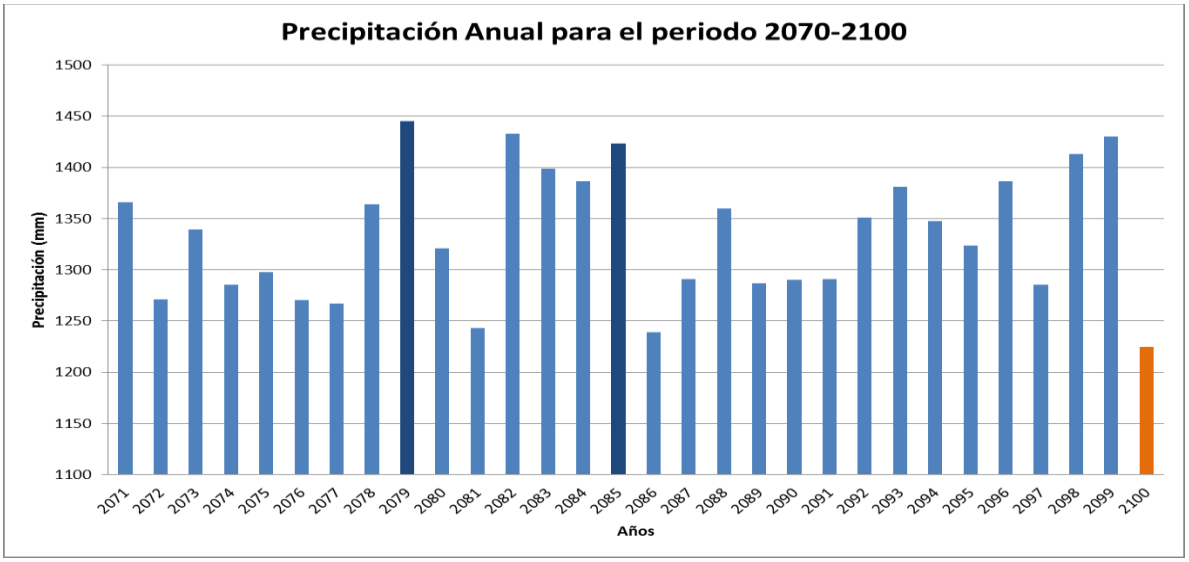


Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

Por medio de la gráfica 22-I se ratifica que para el año 2100 se presentarían la mayor cantidad de meses con precipitaciones inferiores a la precipitación promedio alcanzando 10 de los 12 meses, por otra parte para el año 2087 en 11 de los 12 meses se presentan precipitaciones superiores a la precipitación promedio, por otra parte en un 47% de los años se presentan precipitaciones inferiores a la precipitación promedio, mientras que en un 33% de los años se presentan precipitaciones superiores a la promedio, finalmente el 20% restante presentan la misma cantidad de meses con precipitaciones tanto superiores como inferiores a la promedio.

- **RCP 85**

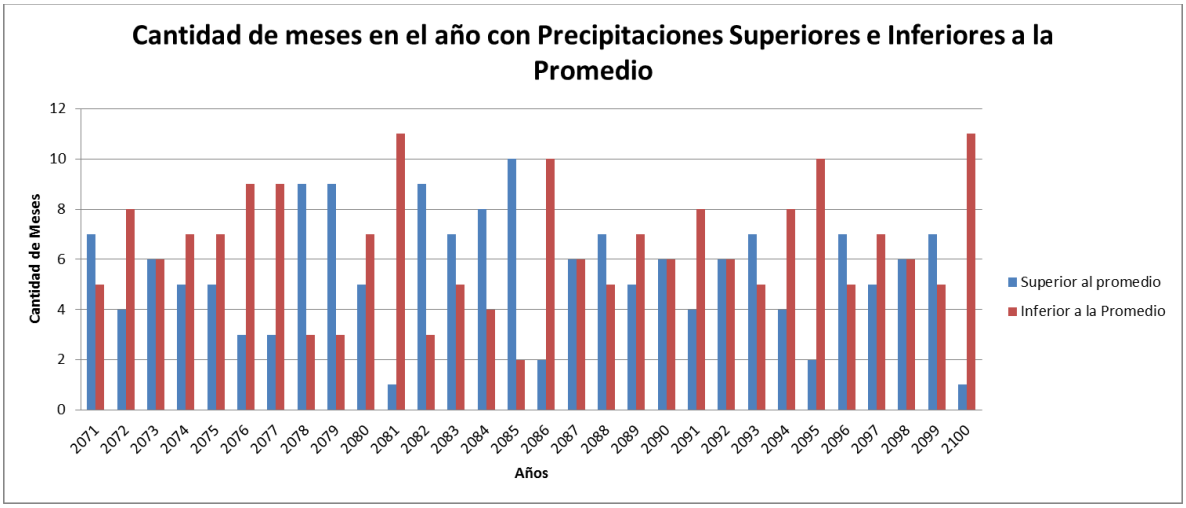
Grafica 42-I. Precipitaciones Proyectadas para el Periodo 2070 – 2100; RCP 85



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

El comportamiento anual de la precipitación para el periodo 2070 – 2100 bajo el escenario de cambio climático, indica que el año en el que se presentaría una precipitación anual menor seria el año 2100, mientras que los años 2079 y 2085 presentarías las precipitaciones más altas del periodo.

Grafica 43-I. Cantidad de meses en el año con Precipitaciones Superiores e Inferiores a la Promedio Periodo 2070 – 2100; RCP 85



Fuente: Elaboración propia con información del IDEAM

A partir de la gráfica 24-I en el año 2100 junto con el año 2081 se observa la mayor cantidad de meses con precipitaciones inferiores al promedio, 11 de los 12 meses, por su parte el año 2085 presentaría la mayor cantidad de meses con precipitaciones superiores a la normal.

Para el periodo 2070 – 2100 bajo el escenario de cambio climático RCP 85, el 47% de los años presentaría la mayor cantidad de meses con precipitaciones inferiores a la normal, mientras que un 37% presentaría precipitaciones superiores a la normal, mientras que solo un 17 % presentaría la misma cantidad de meses con precipitaciones tanto superiores como inferiores a la normal.