



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Estimación de los cambios en los índices asociados a la oferta y la demanda del recurso hídrico en la cuenca del río Coello bajo escenarios de cambio climático

Nathaly Güiza Villa

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia
2019

Estimación de los cambios en los índices asociados a la oferta y la demanda del recurso hídrico en la cuenca del río Coello bajo escenarios de cambio climático

Nathaly Güiza Villa

Trabajo final presentado como requisito para optar al título de:
Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos

Director:

Ph.D., Nelson Obregón Neira

Codirector:

Ph.D., Jesús Efrén Ospina Noreña

Línea de Investigación:

Hidrología y meteorología

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2019

A mis padres, por sus enseñanzas y su soporte,

A mi hermana por su ayuda cuando la necesité,

A Harold por su apoyo incondicional,

Y lo más importante... al Agua

Agradecimientos

Agradecimientos al Instituto Geofísico de la Pontificia Universidad Javeriana por facilitarme los datos del estudio que sería la base para este trabajo, a su director Nelson Obregón Neira, director también de este trabajo por hacer posible esta idea y ayudar a llevarla a cabo. A mi codirector Jesús Efrén Ospina Noreña por poner a mi disposición todo su conocimiento y apoyarme en la realización de este trabajo. A Laura Rojas Garzón, estudiante del mismo programa, que tuvo parte importante en la base conceptual para la realización de la metodología de reducción de escala propuesta. Y a Juan Pablo Macías, ingeniero a cargo de la modelación hidrológica del estudio base quien siempre me facilitó toda la información necesaria y resolvió mis dudas para llevar a cabo mi propia modelación.

Resumen

En este trabajo se realizó una proyección de los índices de oferta y demanda de la cuenca del Río Coello, bajo escenarios de cambio climático. Para ello se definieron tres ejes temáticos, cuyo eje transversal fue el cambio climático: oferta hídrica futura, demanda futura e indicadores que relacionan estos dos, para el periodo 2020-2050.

Inicialmente para estimar la oferta futura, fue necesario definir los escenarios de cambio climático dentro de las cuatro opciones posibles (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5) definidas por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), a su vez se requirió establecer los Modelos de Circulación Global (GCM) que hacen parte del proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5) de donde se extrajeron los datos proyectados de precipitación y temperatura para los escenarios mencionados. Dada la amplitud de la escala de los modelos globales (de 100 a 500 km) fue necesario proponer una metodología de downscaling que permitió establecer las variables climáticas a una escala de estación climática y a una resolución temporal diaria. Esas variables pasaron a ser los datos de entrada del modelo hidrológico realizado en el software SWAT (Soil and Water Assessment Tool) que hizo posible obtener como salida los caudales a nivel diario, que caracterizaron la oferta de la cuenca.

Para proyectar la demanda se realizó un análisis sectorial. En el caso del sector agrícola, fue necesario calcular la evapotranspiración asociada a los cambios en la temperatura proyectada para establecer el requerimiento hídrico de riego de los cultivos en la cuenca. Para el sector doméstico, se estableció un crecimiento poblacional que definió la demanda proyectada. Por otro lado, para el sector industrial se estimó una tasa de crecimiento posible de ese sector, que afectaría en igual magnitud su demanda. Finalmente, se estimaron los índices de aridez, de retención y regulación hídrica, de uso de agua superficial y de vulnerabilidad al desabastecimiento, generando mapas de distribución espacial y temporal de los mismos.

Se establece una disminución marcada tanto de la precipitación como de los caudales en la cuenca, un aumento progresivo de la temperatura, así como de la demanda hídrica, siendo esta última función principalmente de los requerimientos de riego de los cultivos sembrados en la zona de estudio. Los índices de estado del recurso responden a dos escenarios indicando la posibilidad de una alta vulnerabilidad en un caso y en el otro una vulnerabilidad media al desabastecimiento hídrico.

Palabras clave: Cambio climático, oferta hídrica, demanda hídrica, índices de estado del recurso.

Abstract

In this work, a projection of the supply and demand indexes of the Coello River basin was carried out, under climate change scenarios. For this, three thematic axes were defined, whose transverse axis was climate change: future water supply, future demand and indicators that relate these two, for the period 2020-2050.

Initially to estimate the future supply, it was necessary to define the climate change scenarios within four possible options (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 and RCP 8.5) defined by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), additionally it was required establish the Global Circulation Models (GCM) that are part of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) from which the projected data of precipitation and temperature for the mentioned scenarios were extracted. Given the scale of the global models (from 100 to 500 km) it was necessary to propose a downscaling methodology that enabled to establish the climatic variables at a climatic station scale and at a daily temporal resolution. These variables became the input data of the hydrological model carried out in the SWAT software (Soil and Water Assessment Tool) that allowed obtaining the output at the daily level, which characterized the supply of the basin.

To project the demand, a sectoral analysis was carried out. In the case of the agricultural sector, it was necessary to calculate the evapotranspiration associated with the changes in the projected temperature to establish the water requirement of the crops in the basin. For the domestic sector, a population growth was established to define the projected demand. On the other hand, for the industrial sector a possible growth rate of that sector was estimated, which would affect its demand in equal magnitude. Finally, the aridity, retention and water regulation indexes, the use of surface water and vulnerability to scarcity were estimated, generating maps of their spatial and temporal distribution.

A marked decrease was established both in precipitation and in the floods of the basin, a progressive increase in temperature, as well as in water demand, the last one being mainly the irrigation requirements of the crops in the study area. The status indicators of the resource respond to two scenarios, one indicating the possibility of a high vulnerability to water shortages contrasted with a medium vulnerability in the other case

Keywords: Climate change, water supply, water demand, resource status indicators

Contenido

	Pág.
Introducción	1
1 Estado del conocimiento.....	4
1.1 El cambio climático, su significado y posibles consecuencias.....	4
1.1.1 Escenarios de cambio climático.....	5
1.1.2 Modelos de Circulación General (GCM).....	6
1.1.3 Metodologías de reducción de escala - Downscaling.....	7
1.2 Estado actual de la cuenca del río Coello	10
1.2.1 Indicadores de estado del recurso.....	11
1.3 Influencia del cambio climático en la cuenca del río Coello.....	14
2 Revisión del comportamiento histórico de la precipitación	16
2.1 Comportamiento medio mensual multianual de la precipitación.....	17
2.2 Comportamiento mensual de la precipitación	18
2.3 Comportamiento anual de la precipitación	19
2.4 Comportamiento mensual discriminado por tipo de año de la precipitación.	21
2.5 Comportamiento trimestral discriminado por tipo de año de la precipitación.	22
2.6 Comportamiento resumido de la precipitación en la cuenca del río Coello.....	23
3 Reducción de escala de las variables (Downscaling)	24
3.1 Recolección de datos climáticos de los Modelos de Circulación Global.	24
3.2 Selección de los modelos climáticos globales.	25
3.3 Revisión de las variables climáticas futuras extraídas de los GCM seleccionados.	28
3.4 Metodología propuesta para reducción de escala de datos de cambio climático	31
3.4.1 Método Delta	31
3.4.2 Principio de la máxima entropía.....	33
3.4.3 Metodología propuesta para la reducción de escala de la precipitación.	36
3.5 Series futuras de precipitación y temperatura.....	43
3.5.1 Precipitación proyectada	43
3.5.2 Temperatura proyectada.....	46
3.6 Resumen propuesta metodológica y cambios futuros asociados a las variables climáticas.....	48
4 Modelación hidrológica en SWAT	49
4.1 Modelo de elevación digital.....	50
4.2 Microcuencas y drenaje	50

4.3	Coberturas de suelos	51
4.4	Tipos de suelos	53
4.5	Variables climáticas	53
4.5.1	Precipitación	54
4.5.2	Temperatura	75
4.5.3	Radiación solar	96
4.5.4	Punto de rocío	100
4.5.5	Velocidad del viento	102
4.6	Unidades hidrológicas de respuesta (URH)	104
4.7	Calibración y validación del modelo	104
4.8	Caudales resultantes modelo SWAT	108
4.9	Curva de duración de caudales	111
4.10	Caudal ambiental	112
4.11	Resumen modelación hidrológica.....	119
5	Proyección de la demanda.....	120
5.1	Sector agrícola	120
5.2	Sector domestico.....	126
5.3	Sector industrial.....	128
5.3.1	Sector pecuario.....	129
5.3.2	Sector acuícola	131
5.4	Demanda hídrica total	131
6	Estimación de los índices de estado del recurso hídrico	140
6.1	Índice de retención y regulación hídrica (IRH)	140
6.2	Índice de aridez (IA)	145
6.3	Índice de uso del agua superficial (IUA)	153
6.4	Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico (IVH)	161
6.5	Posible estado futuro del recurso hídrico	169
7	Conclusiones y recomendaciones	170
7.1	Conclusiones.....	170
7.2	Recomendaciones	173

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Aumento progresivo observado en el promedio mundial de temperaturas en superficie, terrestres y oceánicas, 1850-2012 (IPCC, 2013).....	5
Figura 1-2: Evolución de la resolución espacial en los modelos climáticos globales a través del tiempo, FAR(1990) – AR4(2007) (IPCC, 2007) .	7
Figura 1-3: Esquema del concepto de downscaling espacial.(Vine, 2012 en USAID, 2014)	8
Figura 1-4: Ubicación espacial de la cuenca del Río Coello, Tolima, Colombia. (CORTOLIMA, 2006)	10
Figura 1-5: Valores de IRH para la cuenca del río Coello, mes de enero y marzo. (Pontificia Universidad Javeriana, 2017)	12
Figura 1-6: Valores de IA para la cuenca del río Coello, mes de enero y marzo (Pontificia Universidad Javeriana, 2017)	13
Figura 1-7: Valores de IUA para la cuenca del río Coello, mes de enero y marzo (Pontificia Universidad Javeriana, 2017)	13
Figura 1-8: Valores de IVH para la cuenca del río Coello, mes de enero y marzo (Pontificia Universidad Javeriana, 2017)	14
Figura 2-1: Estaciones de precipitación usadas en la caracterización.	16
Figura 2-2: Precipitaciones medias mensuales multianuales para cada estación...	17
Figura 2-3: Precipitación mensual periodo 1989-2000, estación 21215080-Chicoral..	18
Figura 2-4: Valor total de precipitación anual, estación 21215080-Chicoral	19
Figura 2-5: Total de precipitación anual y tipología, estación 21215080-Chicoral...	20
Figura 2-6: Gráficas mensuales según tipología de año, estación 21215080-Chicoral	21
Figura 2-7: Gráficas trimestrales según tipología de año, estación 21215080-Chicoral	22
Figura 3-1: Gráficas trimestrales para cada modelo de circulación global.....	26
Figura 3-2: Continuación gráficas trimestrales para cada modelo de circulación global	27
Figura 3-3: Ubicación cuenca río Coello dentro de la grilla del modelo IPSL-CM5A-LR	28
Figura 3-4: Ubicación cuenca río Coello dentro de la grilla del modelo IPSL-CM5A-MR.	29
Figura 3-5: Ubicación cuenca río Coello dentro de la grilla del modelo MIROC5.	29

Figura 3-6:	Comparación datos diarios y mensuales para el modelo IPSL-CM5A-LR.	30
Figura 3-7:	Comparación datos diarios y mensuales para el modelo IPSL-CM5A-MR.	30
Figura 3-8:	Comparación datos diarios y mensuales para el modelo MIROC5.	30
Figura 3-9:	Reproducción mensual y trimestral usando el método de máxima entropía	37
Figura 3-10:	Esquema metodológico para reducción de escala a nivel diario	39
Figura 3-11:	Serie de precipitación diaria, para el mes de septiembre en los tres GCM definidos, para año seco, húmedo y normal, en el escenario RCP 4.5	40
Figura 3-12:	Serie de precipitación diaria, para el mes de septiembre en los tres GCM definidos, para año seco, húmedo y normal, en el escenario RCP 8.5	40
Figura 3-13:	Serie de precipitación anual, según tipología para la estación ejemplificada, en cada uno de los modelos escogidos, para el escenario RCP 4.5.....	41
Figura 3-14:	Serie de precipitación anual, según tipología para la estación ejemplificada, en cada uno de los modelos escogidos, para el escenario RCP 8.5.....	42
Figura 3-15:	Serie de precipitación diaria, para la estación ejemplificada, en cada uno de los modelos escogidos, para el escenario RCP 4.5.	43
Figura 3-16:	Serie de precipitación diaria, para la estación ejemplificada, en cada uno de los modelos escogidos, para el escenario RCP 8.5.	44
Figura 3-17:	Serie de precipitación mensual multianual, para la estación ejemplificada, en cada uno de los modelos escogidos, para el escenario RCP 4.5.	45
Figura 3-18:	Serie de precipitación mensual multianual, para la estación ejemplificada, en cada uno de los modelos escogidos, para el escenario RCP 8.5.	46
Figura 3-19:	Serie promedios anuales de temperatura máxima y mínima, para la estación ejemplificada, en cada uno de los modelos para el escenario RCP 4.5.....	47
Figura 3-20:	Serie promedios anuales de temperatura máxima y mínima, para la estación ejemplificada, en cada uno de los modelos para el escenario RCP 8.5.....	47
Figura 4-1:	Esquemización ciclo hidrológico SWAT (Pontificia Universidad Javeriana, 2017).	49
Figura 4-2:	Modelo de elevación digital cuenca río Coello	50
Figura 4-3:	Microcuencas utilizadas en el modelo SWAT	51
Figura 4-4:	Mapa de coberturas de suelos año 2007	52
Figura 4-5:	Tipos de suelos clasificados por textura cuenca del río Coello.	53
Figura 4-6:	Estaciones virtuales y físicas de precipitación usadas en la modelación..	55
Figura 4-7:	Precipitación total anual promedio en cada una de las microcuencas para el periodo observado (1986-2015).	55
Figura 4-8:	Precipitación total anual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_LR en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	56
Figura 4-9:	Cambio en la precipitación total anual promedio para el modelo IPSL_LR en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	56

Figura 4-10: Precipitación total anual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_MR en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050). .	57
Figura 4-11: Cambio en la precipitación total anual promedio para el modelo IPSL_CM5A_MR en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050). ..	57
Figura 4-12: Precipitación total anual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo MIROC5 en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	58
Figura 4-13: Cambio en la precipitación total anual promedio para el modelo MIROC5 en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	58
Figura 4-14: Precipitación total mensual promedio en cada una de las microcuencas para el periodo observado (1986-2015).	59
Figura 4-15: Precipitación total mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_LR en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	60
Figura 4-16: Cambio en la precipitación total mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_LR en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	61
Figura 4-17: Precipitación total mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_MR en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	62
Figura 4-18: Cambio en la precipitación total mensual en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_MR en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	63
Figura 4-19: Precipitación total mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo MIROC5 en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	64
Figura 4-20: Cambio en la precipitación total mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo MIROC5 en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	65
Figura 4-21: Precipitación total anual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_LR en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050). ..	66
Figura 4-22: Cambio en la precipitación total anual promedio para el modelo IPSL_LR en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	66
Figura 4-23: Precipitación total anual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_MR en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050). .	67
Figura 4-24: Cambio en la precipitación total anual promedio para el modelo IPSL_MR en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	67
Figura 4-25: Precipitación total anual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo MIROC5 en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	68
Figura 4-26: Cambio en la precipitación total anual promedio para el modelo MIROC5 en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	68

Figura 4-27: Precipitación total mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_LR en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	69
Figura 4-28: Cambio en la precipitación total mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_LR en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	70
Figura 4-29: Precipitación total mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_MR en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	71
Figura 4-30: Cambio en la precipitación total mensual en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_MR en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	72
Figura 4-31: Precipitación total mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo MIROC5 en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	73
Figura 4-32: Cambio en la precipitación total mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo MIROC5 en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	74
Figura 4-33: Estaciones virtuales y físicas de temperatura usadas en la modelación.	76
Figura 4-34: Relación temperatura máxima vs elevación en el mes de enero para el modelo IPSL_LR en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.	76
Figura 4-35: Temperatura máxima anual promedio en cada una de las microcuencas para el periodo observado (1986-2015).	77
Figura 4-36: Temperatura máxima anual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_LR en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.	77
Figura 4-37: Temperatura máxima anual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_MR en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.	78
Figura 4-38: Temperatura máxima anual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo MIROC5 en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.	78
Figura 4-39: Temperatura máxima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el periodo observado (1986-2015).	79
Figura 4-40: Temperatura máxima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_LR en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	80
Figura 4-41: Temperatura máxima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_MR en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	81
Figura 4-42: Temperatura máxima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo MIROC5 en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	82
Figura 4-43: Temperatura máxima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_LR en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	83

Figura 4-44: Temperatura máxima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_MR en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	84
Figura 4-45: Temperatura máxima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo MIROC5 en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	85
Figura 4-46: Relación temperatura mínima vs elevación en el mes de enero para el modelo IPSL_LR en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.....	86
Figura 4-47: Temperatura mínima anual promedio en cada una de las microcuencas para el periodo observado (1986-2015).	86
Figura 4-48: Temperatura mínima anual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_LR en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.	87
Figura 4-49: Temperatura mínima anual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_MR en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.	87
Figura 4-50: Temperatura mínima anual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo MIROC5 en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.....	88
Figura 4-51: Temperatura mínima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el periodo observado (1986-2015).	89
Figura 4-52: Temperatura mínima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_LR en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	90
Figura 4-53: Temperatura mínima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_MR en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	91
Figura 4-54: Temperatura mínima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo MIROC5 en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	92
Figura 4-55: Temperatura mínima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_LR en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	93
Figura 4-56: Temperatura mínima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_MR en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	94
Figura 4-57: Temperatura mínima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo MIROC5 en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).	95
Figura 4-58: Estaciones virtuales y físicas de brillo solar usadas en la modelación.....	98
Figura 4-59: Radiación solar promedio en la cuenca del río Coello.	99
Figura 4-60: Estaciones virtuales y físicas de humedad relativa usadas en la modelación.	101
Figura 4-61: Punto de rocío promedio en la cuenca del río Coello.	102
Figura 4-62: Estaciones virtuales y físicas de velocidad del viento usadas en la modelación.	103

Figura 4-63:	Velocidad del viento promedio en la cuenca del río Coello.	103
Figura 4-64:	Unidades hidrológicas de respuesta cuenca del río Coello.	104
Figura 4-65:	Caudal simulado en la estación Payandé, periodo de calibración.	107
Figura 4-66:	Caudal simulado en la estación Payande, periodo de validación.....	107
Figura 4-67:	Dispersión datos simulados y observados	108
Figura 4-68:	Comparación caudales para cada uno de los modelos en el escenario RCP 4.5, estación Payandé.	109
Figura 4-69:	Comparación caudales para cada uno de los modelos en el escenario RCP 8.5, estación Payandé.	110
Figura 4-70:	Comparación de curvas de duración de caudales, estación Payandé	111
Figura 4-71:	Diagrama de flujo para el cálculo del caudal ambiental.....	112
Figura 4-72:	Caudal ambiental en el modelo IPSL_CM5A_LR RCP 4.5.	113
Figura 4-73:	Caudal ambiental en el modelo IPSL_CM5A_MR RCP 4.5.	114
Figura 4-74:	Caudal ambiental en el modelo MIROC5 RCP 4.5.	115
Figura 4-75:	Caudal ambiental en el modelo IPSL_CM5A_LR RCP 8.5.	116
Figura 4-76:	Caudal ambiental en el modelo IPSL_CM5A_MR RCP 8.5.	117
Figura 4-77:	Caudal ambiental en el modelo MIROC5 RCP 8.5.	118
Figura 5-1:	Distribución de usuarios según censo realizado (Pontificia Universidad Javeriana, 2017)	129
Figura 5-2:	Demandas hídricas totales actuales.....	132
Figura 5-3:	Demandas hídricas totales modelo IPSL_CM5A_LR RCP 4.5.....	133
Figura 5-4:	Demandas hídricas totales modelo IPSL_CM5A_MR RCP 4.5.....	134
Figura 5-5:	Demandas hídricas totales modelo MIROC5 RCP 4.5.	135
Figura 5-6:	Demandas hídricas totales modelo IPSL_CM5A_LR RCP 8.5.....	136
Figura 5-7:	Demandas hídricas totales modelo IPSL_CM5A_MR RCP 8.5.....	137
Figura 5-8:	Demandas hídricas totales modelo MIROC5 RCP 8.5.	138
Figura 6-1:	Índice de retención hídrica modelo IPSL_CM5A_LR RCP 4.5.	142
Figura 6-2:	Índice de retención hídrica modelo IPSL_CM5A_MR RCP 4.5.	142
Figura 6-3:	Índice de retención hídrica modelo MIROC5 RCP 4.5.....	143
Figura 6-4:	Índice de retención hídrica modelo IPSL_CM5A_LR RCP 8.5.	144
Figura 6-5:	Índice de retención hídrica modelo IPSL_CM5A_MR RCP 8.5.	144
Figura 6-6:	Índice de retención hídrica modelo MIROC5 RCP 8.5.....	145
Figura 6-7:	Índice de aridez mensual modelo IPSL_CM5A_LR RCP 4.5.	147
Figura 6-8:	Índice de aridez mensual modelo IPSL_CM5A_MR RCP 4.5.	148
Figura 6-9:	Índice de aridez mensual modelo MIROC5 RCP 4.5.	149
Figura 6-10:	Índice de aridez mensual modelo IPSL_CM5A_LR RCP 8.5.	150
Figura 6-11:	Índice de aridez mensual modelo IPSL_CM5A_MR RCP 8.5.	151
Figura 6-12:	Índice de aridez mensual modelo MIROC5 RCP 8.5.	152
Figura 6-13:	Índice de uso de agua mensual modelo IPSL_CM5A_LR RCP 4.5. ...	155
Figura 6-14:	Índice de uso de agua mensual modelo IPSL_CM5A_MR RCP 4.5. ..	156
Figura 6-15:	Índice de uso de agua mensual modelo MIROC5 RCP 4.5.....	157
Figura 6-16:	Índice de uso de agua mensual modelo IPSL_CM5A_LR RCP 8.5. ...	158
Figura 6-17:	Índice de uso de agua mensual modelo IPSL_CM5A_MR RCP 8.5. ...	159
Figura 6-18:	Índice de uso de agua mensual modelo MIROC5 RCP 8.5.....	160

Figura 6-19: Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico mensual modelo IPSL_CM5A_LR RCP 4.5.....	163
Figura 6-20: Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico mensual IPSL_CM5A_MR RCP 4.5.....	164
Figura 6-21: Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico mensual modelo MIROC5 RCP 4.5.	165
Figura 6-22: Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico mensual modelo IPSL_CM5A_LR RCP 8.5.....	166
Figura 6-23: Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico mensual modelo IPSL_CM5A_MR RCP 8.5.....	167
Figura 6-24: Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico mensual modelo MIROC5 RCP 8.5.	168

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Escenarios de cambio climático de la última comunicación del IPCC (AR5). (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, 2015b)	6
Tabla 1-2: Comparación entre el downscaling estadístico y el downscaling dinámico Adaptado de (USAID, 2014).	9
Tabla 2-1: Coeficiente de variación según tipología para cada una de las 22 estaciones de estudio.	20
Tabla 3-1: Modelos de circulación globales evaluados y sus variables.....	25
Tabla 3-2: Error cuadrático medio para cada mes y cada trimestre asociado.	38
Tabla 4-1: Equivalencias coberturas modelo SWAT (Pontificia Universidad Javeriana, 2017).	52
Tabla 4-2: Variables climáticas modelo SWAT.	54
Tabla 4-3: Coeficientes de regresión para índices de radiación y brillo solar para todas las estaciones en la zona cafetera. Fuente: (Pontificia Universidad Javeriana, 2017).....	96
Tabla 4-4: Horas brillo solar (n) promedio en la cuenca del río Coello.....	99
Tabla 4-5: Parámetros calibración modelo SWAT. Fuente: (Pontificia Universidad Javeriana, 2017)	105
Tabla 4-6: Valores de los parámetros calibración usados en el modelo SWAT.....	105
Tabla 4-7: Valores de referencia del coeficiente de Nash-Sutcliffe (Pontificia Universidad Javeriana, 2017).	106
Tabla 4-8: Valores del coeficiente de Nash-Sutcliffe calculados para las series de calibración y validación.	108
Tabla 5-1: Área y producción estimada de los cultivos dentro de la cuenca para los años 2011 y 2015 (Pontificia Universidad Javeriana, 2017).....	123
Tabla 5-2: Inicio de siembra, etapas de crecimiento y coeficientes de cultivo.	124
Tabla 5-3: Requerimientos hídricos de cada cultivo para cada modelo y escenario.	125
Tabla 5-4: Demanda hídrica agrícola total para cada modelo y escenario.	126
Tabla 5-5: Dotación neta máxima (Pontificia Universidad Javeriana, 2017).	126
Tabla 5-6: Proyecciones de población para el año 2050	127
Tabla 5-7: Demanda hídrica sector doméstico año 2050.....	128
Tabla 5-8: Comparación demanda hídrica sector doméstico años 2015 y 2050.	128
Tabla 5-9: Valor agregado para la agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca, departamento del Tolima, 2006-2016 (DANE, 2016).....	130
Tabla 5-10: Valor demanda hídrica sector pecuario.....	130

Tabla 5-11:	Valor demanda hídrica sector pecuario por municipio.	131
Tabla 5-12:	Valor demanda hídrica sector acuícola.	131
Tabla 6-1:	Categorías del índice de retención y regulación hídrica (IRH) (IDEAM, 2013)	141
Tabla 6-2:	Categorías del índice de aridez (IA) (IDEAM, 2013)	146
Tabla 6-3:	Rangos y categorías del índice de uso del agua (IUA) (IDEAM, 2013) . .	154
Tabla 6-4:	Categorías Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento (IDEAM, 2010b)	161

Introducción

El agua es uno de los elementos más importantes para la supervivencia del ser humano, tanto física como económica, por lo tanto, es necesario un adecuado manejo y gestión. Para conseguir ese objetivo es necesario efectuar investigación enfocada a los efectos producidos por agentes externos como el cambio climático en miras de evitar un posible agotamiento del recurso hídrico.

El planeta está siendo sometido a un fenómeno de cambio climático, el cual se define como un aumento progresivo de la temperatura producido por el efecto invernadero; efecto causado por gases que absorben la onda larga emitida por la tierra y la reflejan de nuevo hacia la superficie, generando un proceso de calentamiento de la tierra. Según diversos autores citados por la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) (2017), el problema del cambio climático es una realidad comprobada científicamente. Se han logrado evidenciar diferentes fenómenos entre estos: el aumento del nivel del mar de al menos 17 cm en el último siglo (Fasullo et al., 2018); aumento progresivo de la temperatura desde finales del siglo XIX (NASA, 2016), el calentamiento de la masa de agua de los océanos; el derretimiento de los casquetes polares (NCIDC, 2017), el retroceso de las nieves glaciares, el aumento de los eventos extremos (Wuebbles et al., 2017), entre otros graves efectos. Las anteriores cifras demuestran la gravedad del problema que afecta al grueso de la población mundial.

Para el caso de Colombia, con el fin de medir las posibles consecuencias del cambio climático, se ha generado una serie de comunicaciones, a nivel nacional, tanto regional como departamental indicando cambios en la temperatura, la precipitación, el nivel del mar, entre otros. La última de estas es la tercera comunicación de cambio climático, la cual establece que, a pesar de tener un comportamiento diferente según la región, se prevé un incremento de la temperatura media del país de 2,14°C, para el año 2100. En cuanto a la precipitación, esta podrá disminuir o aumentar según la región del país de un 10 a un 30%.

Lo cual sumado a los cambios del suelo puede causar diferentes estragos, tales como desertificación o inundaciones, afectando la disponibilidad de agua y la producción agrícola (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, 2015c). El panorama no es favorable si se ve afectada la posibilidad de acceder a agua y comida, necesidades fundamentales para la supervivencia del ser humano.

Es por los motivos expuestos que se propone establecer las posibles implicaciones del cambio climático en la oferta y la demanda hídrica de la cuenca del río Coello, con el fin de visualizar los escenarios a los que podemos vernos sometidos. Lo anterior visto tanto de manera espacial como temporal para el periodo definido en la forma de indicadores de oferta, demanda y su relación. La pontificia Universidad Javeriana desarrolló en el año 2016 un estudio hidrológico e hidráulico de la cuenca del río Coello, siendo este la línea base para establecer el comportamiento actual de la cuenca y realizar comparaciones con los escenarios futuros estimados en esta investigación. Además, realizo una modelación hidrológica en el software SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para el periodo 1986-2015 el cual sirvió como base para la modelación mostrada en este documento para el periodo 2020-2050, periodo escogido debido a que se considera un horizonte adecuado para la proyección de las demandas, estableciendo la posibilidad de un comportamiento de estas similar al de la actualidad.

Este trabajo busca entonces cumplir con los siguientes objetivos:

OBJETIVO GENERAL: Estimar los cambios asociados a los índices de la oferta y la demanda del recurso hídrico en la cuenca del Río Coello debido al cambio climático.

OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Estimar la oferta hídrica futura disponible para la cuenca del Río Coello bajo escenarios de cambio climático, a una resolución diaria a partir de una metodología de downscaling estadístico usando el modelo hidrológico SWAT.
- Proyectar las demandas futuras generadas por los sectores socioeconómicos establecidos en la cuenca del Río Coello bajo escenarios de cambio climático.
- Estimar el índice de retención y regulación hídrica, el índice de aridez, el índice de uso de agua superficial y el índice de vulnerabilidad al desabastecimiento para el periodo definido.

Los objetivos están sujetos a las limitaciones de la incertidumbre asociada a los datos, la modelación y a los parámetros que no pudieron ser proyectados, siendo estos el cambio en las coberturas del suelo y la velocidad del viento.

Los resultados de este trabajo podrán ser usados por la corporación autónoma regional de la cuenca de estudio, como base para la toma de decisiones en lo que a gestión del recurso hídrico se refiere y a su relación con la zonificación de la cuenca. A su vez, podrá ser utilizado como referencia para futuros investigadores que quieran abarcar las limitaciones de este trabajo o aplicar su metodología en otra cuenca hidrográfica del país.

1 Estado del conocimiento

1.1 El cambio climático, su significado y posibles consecuencias.

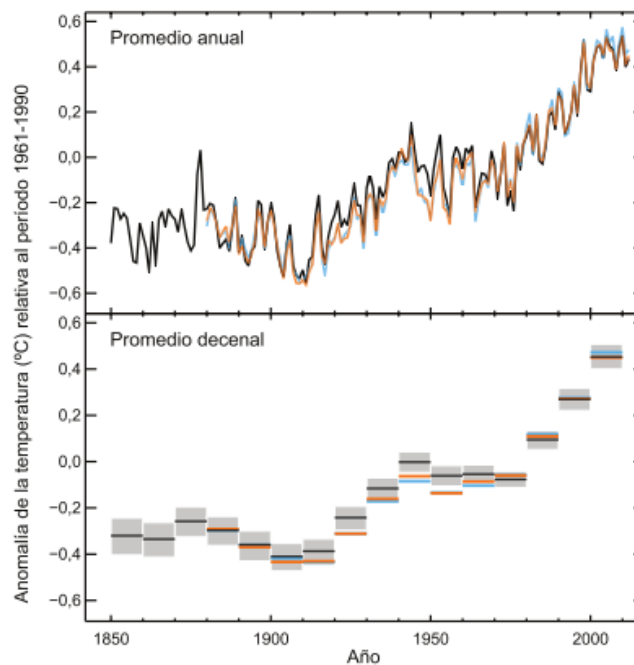
El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), es un organismo creado en el año 1988 en conjunto con la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) que proporciona obras de referencia para los responsables de políticas. Obras como informes de evaluación y documentos técnicos proveen una herramienta científica que puede ser usada para producir información y servicios climáticos que ayuden a afrontar las consecuencias del cambio climático (IPCC, 2013). El IPCC se constituye entonces como el referente científico y técnico en lo que a cambio climático se refiere.

Según esa organización se ha demostrado con un 95% de seguridad que el ser humano y sus actividades son la principal causa del calentamiento evidenciado desde hace más de cinco décadas. Fenómeno que ha provocado efectos visibles como el calentamiento de la atmosfera y el océano, la disminución de los volúmenes de nieve y hielo, la elevación del nivel del mar y el aumento en las concentraciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (IPCC, 2013).

Lo anterior, producirá cambios futuros proyectados en los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, siendo muy probable para finales del siglo XXI que los días y noches fríos sean más cálidos, de igual forma aumentará la temperatura en los días y noches calurosos en relación con la actualidad. Además se presentarán más episodios de olas de calor, aumento de la intensidad y duración de la sequía, mayor intensidad de actividad de los ciclones tropicales y aumento en la magnitud de los niveles del mar (IPCC, 2013).

En lo que se refiere al recurso hídrico, pueden ocurrir disminuciones en la precipitación mundial y un aumento en sus intensidades, debido al cambio progresivo en la temperatura visible en la **Figura 1-1** el promedio anual y decenal ha ido incrementando su valor año a año. Estos fenómenos representan un gran impacto en el ciclo hidrológico y por lo tanto en los flujos de agua disponibles para satisfacer las necesidades socio-económicas de los seres humanos (IPCC, 2014b).

Figura 1-1: Aumento progresivo observado en el promedio mundial de temperaturas en superficie, terrestres y oceánicas, 1850-2012 (IPCC, 2013).



1.1.1 Escenarios de cambio climático

En las bases físicas del quinto informe de evaluación del IPCC realizadas en el año 2013, se proponen cuatro escenarios que tienen en cuenta las políticas encaminadas a reducir las emisiones de GEI según los objetivos del protocolo de Kyoto, que no habían sido consideradas en los escenarios del cuarto informe (AR4). Estos escenarios son función de las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP por sus siglas en inglés), 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5, respondiendo al forzamiento radiativo en W/m^2 , de cada uno de dichos valores. Siendo entonces el RCP 2,6 el escenario más optimista con un incremento de

temperatura menor a 1,5°C para el año 2100 y el RCP 8,5 el caso pesimista, debido a un incremento en la temperatura mayor a los 4°C para ese mismo año, como se observa en la **Tabla 1-1**, con las implicaciones ambientales que eso conlleva (IPCC, 2013).

Tabla 1-1: Escenarios de cambio climático de la última comunicación del IPCC (AR5). (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, 2015b)

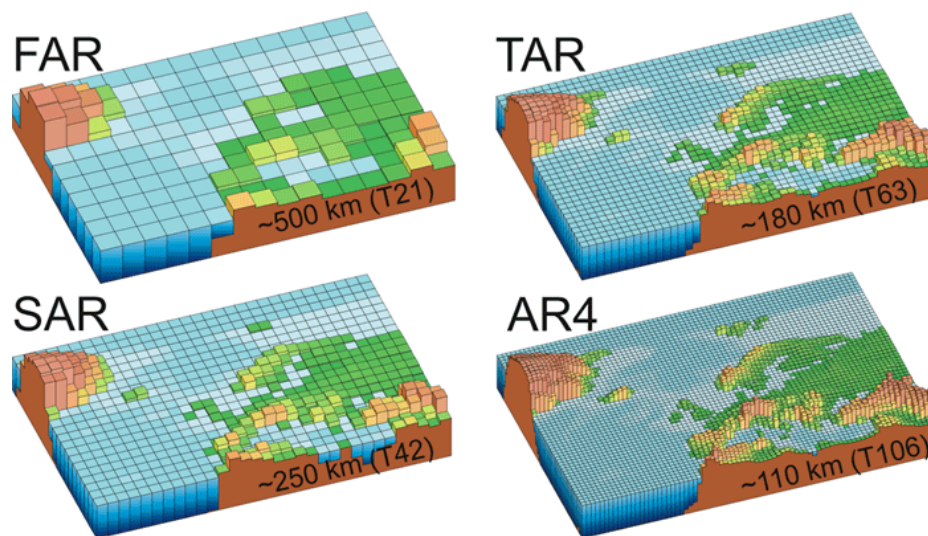
Escenario	Forzamiento Radiativo (W/m ²)	CO ₂ eq atmosférico (ppm)	Anomalía de temperatura	Trayectoria	Equivalente para escenarios SRES (AR4)
RCP 8.5	8.5	>1370	4.9	2100, en aumento	SRES A1F1
RCP 6.0	6.0	850	3	Estabilización después de 2100	SRES B2
RCP 4.5	4.5	650	2.4	Estabilización después de 2100	SRES B1
RCP 2.6	2.6	490	1.5	Picos antes de 2100 y después declina	Ninguno

1.1.2 Modelos de Circulación General (GCM)

Un Modelo de Circulación General (GCM por sus siglas en inglés) simula la respuesta del clima a diferentes forzamientos para proyectar su comportamiento futuro. En su aparición en la década de los 70s solo tenían en cuenta las variables asociadas a la atmósfera, la superficie de la tierra y el océano. En la actualidad tienen en cuenta esas variables y las asociadas con los aerosoles, el ciclo del carbón, la vegetación, y el hielo terrestre. En cada uno de los reportes de evaluación del IPCC, los modelos son sometidos a una revisión de acuerdo con una serie de simulaciones realizada por el Proyecto de Comparación de Modelos Acoplados (CMIP por sus siglas inglés) que establece su confiabilidad en función de que tan bien reproducen el clima observado. En la actualidad se encuentra vigente el CMIP5 que incluye más de 30 modelos producidos por investigadores de diferentes nacionalidades, destacando Estados Unidos, Japón, China y el Reino Unido (IPCC, 2014a)

Estos modelos están compuestos de celdas que representan áreas de la superficie de la tierra, con una resolución espacial entre 100 y 500 km. Aunque ha mejorado a través del tiempo como se puede ver en la **Figura 1-2**, su resolución sigue siendo bastante gruesa, por lo tanto su estimación tiene validez a nivel global o continental y en periodos de tiempo estacionales o mensuales (USAID, 2014).

Figura 1-2: Evolución de la resolución espacial en los modelos climáticos globales a través del tiempo, FAR(1990) – AR4(2007) (IPCC, 2007) .



1.1.3 Metodologías de reducción de escala - Downscaling

Considerando las dimensiones de las celdas de los GCM, es necesario aplicar la metodología de downscaling, con el fin de utilizar los datos generados por estos modelos, en zonas donde los detalles como la topografía, las coberturas de suelo, los cuerpos de agua, entre otros, deben ser tenidos en cuenta para la toma de decisiones. Esta metodología es efectiva para utilizar los datos de los modelos climáticos globales de una escala de 100 a 500 km, en una escala de 10 a 50 km, especialmente hablando, como se esquematiza en la **Figura 1-3**, y de una escala anual o mensual, en una escala diaria o subdiaria, en lo que a escala temporal se refiere.

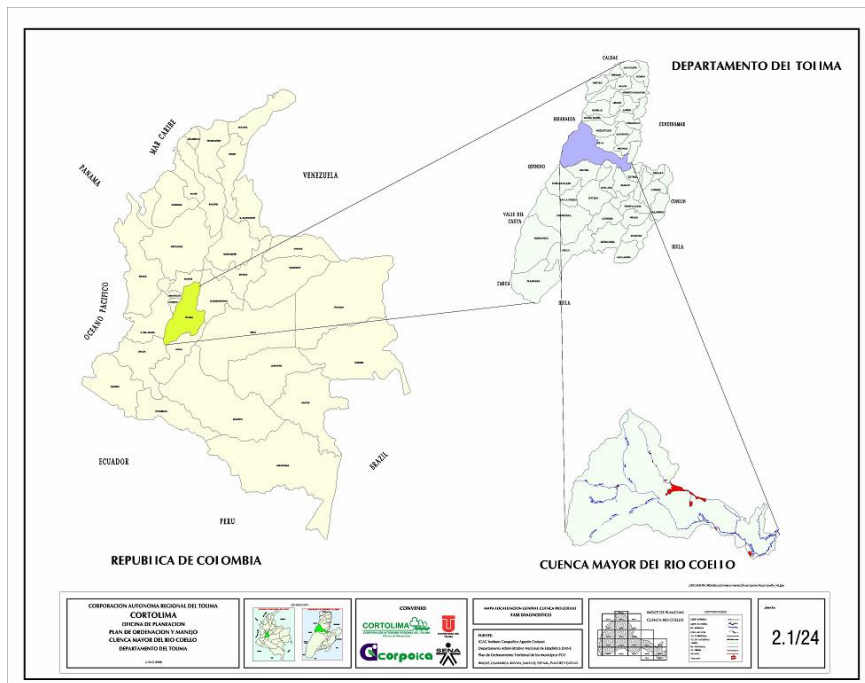
Tabla 1-2: Comparación entre el downscaling estadístico y el downscaling dinámico
Adaptado de (USAID, 2014).

	Downscaling Dinámico	Downscaling Estadístico
Requiere	<ul style="list-style-type: none"> • Grandes requerimientos computacionales • Gran volumen de datos de entrada • Simulaciones confiables de GCM 	<ul style="list-style-type: none"> • Medianos a bajos requerimientos computacionales • Mediano a bajo volumen de datos de entrada • Suficiente cantidad de datos observados de buena calidad. • Simulaciones confiables de GCM
Provee	<ul style="list-style-type: none"> • Información en celdas de 20 a 50 km • Información en sitios sin datos observados • Series de tiempo diarias • Series de tiempo mensuales • Escenarios para eventos extremos 	<ul style="list-style-type: none"> • Información a cualquier escala hasta el nivel de la estación climática • Series de tiempo diarias • Series de tiempo mensuales • Escenarios para eventos extremos • Escenarios para cualquier variable observada
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Basado en un mecanismo físico consistente • Resuelve procesos atmosféricos y de superficie que ocurren en una escala menor a la de GCM • No restringido por mediciones históricas, nuevos escenarios pueden ser simulados • A los experimentos que involucran ensambles de GCM se les puede realizar análisis de incertidumbre. 	<ul style="list-style-type: none"> • Computacionalmente es barato y eficiente, lo que permite simular diferentes escenarios de emisiones y diferentes parejas de modelos. • Los métodos van de simples a elaborados y son flexibles a ser adaptados para propósitos específicos. • El mismo método puede ser aplicado en diferentes regiones en todo el mundo, lo que permite comparar diferentes casos de estudio • Se soporta en el clima observado como base para futuras proyecciones. • Provee variables climáticas a escala puntual. • Las herramientas están disponibles de manera gratuita, son fáciles de implementar e interpretar. • Algunos métodos pueden capturar eventos extremos.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Intensivo computacionalmente • Debido a los requerimientos computacionales, los RCM solo pueden ser simulados en uno o dos escenarios de emisiones • Existe un número limitado de RCM y no hay resultados de estos modelos para muchas partes del mundo. • Puede requerir downscaling adicional y corrección de sesgo para sus salidas. • Los resultados dependen de las suposiciones del RCM. Si se usan diferentes RCM se obtienen diferentes resultados. • Se ve afectado por el sesgo del GCM 	<ul style="list-style-type: none"> • Datos observados de calidad pueden no estar disponibles para muchas áreas y/o variables. • Asume que las relaciones entre los procesos a gran escala y regionales permanecerán igual en el futuro. (Suposición de proceso estacionario) • Los modelos más simples solo pueden proveer una resolución mensual.
Aplicaciones	<ul style="list-style-type: none"> • Valoración regional o nacional con soporte y recursos gubernamentales. • Planeación futura para agencias gubernamentales en múltiples sectores. • Estudios de impacto que involucren varias áreas geográficas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso para modelación y gestión de cultivos, agua y otros recursos naturales. • El método delta puede ser aplicado para la mayoría de las actividades de adaptación.

1.2 Estado actual de la cuenca del río Coello

La cuenca del Río Coello ubicada en el departamento del Tolima en Colombia como se muestra en la **Figura 1-4**, en una latitud entre 4.16 y 4.83 y una longitud entre 75.5 y 75.66, tiene un área de 184257 Ha, que corresponden a un 7,8% del área total del departamento. Esta cuenca de gran importancia para la región, sule de agua a su capital, Ibagué, además de los municipios de Cajamarca, El Espinal, Flandes y otros de menor densidad de población,

Figura 1-4: Ubicación espacial de la cuenca del Río Coello, Tolima, Colombia. (CORTOLIMA, 2006)



Además, en ella se encuentra parte del Parque Nacional Natural de los Nevados, en donde nacen sus aguas, considerándose un área protegida para la conservación del agua, la fauna y la flora dentro de este sistema. A su vez, allí se ubica el distrito de riego del Río Coello, usado para irrigar al menos 48000 Ha de cultivos, siendo una de las zonas más importantes para la producción de arroz en el país (CORTOLIMA, 2006). Por lo tanto, esta cuenca hidrográfica, representará el acceso al agua y a productos agrícolas a gran parte

de la población del departamento. Sin embargo, dada su ocupación y su intervención, la relación entre la oferta y la demanda hídrica, conocida como índice de escasez tiene un valor de 0,77 (CORTOLIMA, 2006); por lo tanto, al ser el valor máximo 1, se encuentra muy cercana a la escasez del recurso, con graves efectos para la población asentada en esta cuenca.

1.2.1 Indicadores de estado del recurso.

En la actualidad el índice de escasez ha sido reemplazado por el índice de Uso de agua superficial como un indicador de la intervención antrópica consignado en el Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2015). La Pontificia Universidad Javeriana (PUJ) (2017) estimó los índices asociados a la oferta y la demanda en la cuenca. Estos índices como ellos lo indican, miden el estado del recurso hídrico ya sea cualitativa o cuantitativamente, para el proceso de toma de decisiones. Fruto de este trabajo, a través de un modelo hidrológico calibrado realizado con la herramienta SWAT (Soil and Water Assessment Tool), la PUJ obtiene los siguientes indicadores con su distribución espacial y temporal a un nivel mensual: Índice de retención y regulación hídrica, Índice de aridez, Índice de uso de agua superficial y el índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico, obteniendo valores de medio a alto en este último, según el mes del año.

- **Índice de regulación hídrica (IRH)**

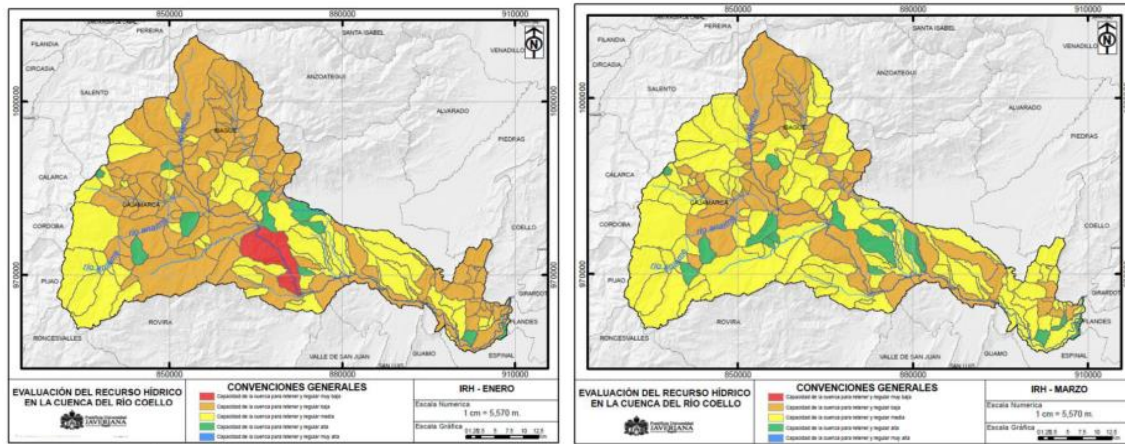
El IDEAM define que “Este índice mide la capacidad de retención de humedad de las cuencas con base en la distribución de las series de frecuencias acumuladas de los caudales diarios. Este índice se mueve en el rango entre 0 y 1, siendo los valores más bajos los que se interpretan de menor regulación”(IDEAM, 2010 en IDEAM, 2013), para establecer este indicador será necesario estimar la curva de duración de caudales asociada a la cuenca, para definir los valores requeridos en función de dos áreas bajo dicha curva (IDEAM, 2013).

De acuerdo al estudio mencionado el IRH en la cuenca del río Coello es predominantemente bajo y medio en todos los meses del año (Pontificia Universidad Javeriana, 2017). Por lo anterior, realizan un análisis detallado mes a mes, indicando los

valores espacialmente distribuidos en mapas, de acuerdo con los requerimientos del IDEAM consignados en el libro “Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua” del año 2013.

Dichos mapas pueden ser visualizados en la **Figura 1-5**, para los meses de agosto y noviembre, considerándose enero como un mes seco y marzo como un mes húmedo.

Figura 1-5: Valores de IRH para la cuenca del río Coello, mes de enero y marzo. (Pontificia Universidad Javeriana, 2017)

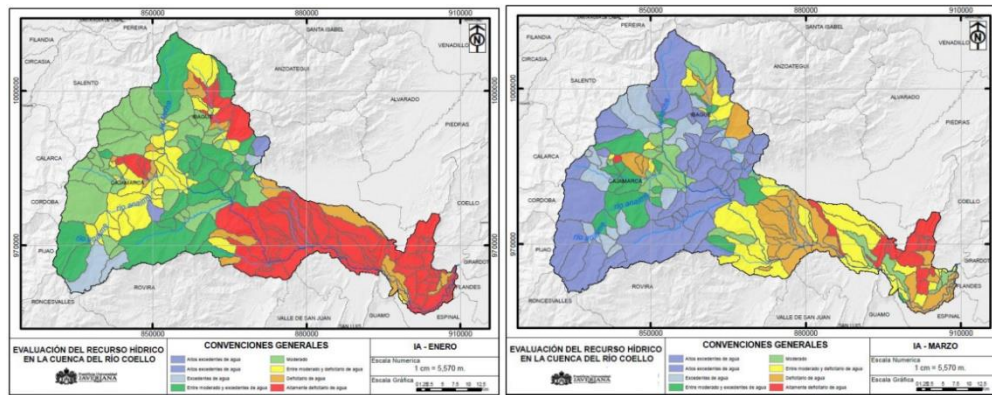


- **Índice de Aridez (IA)**

Este indicador, caracteriza cualitativamente el clima indicando que tan suficiente es la precipitación para el sostenimiento de los ecosistemas, indica cuales áreas tienen déficit de agua y cuales exceso, según un balance hídrico asociado. (IDEAM, 2013)

Para la cuenca del río Coello, según la PUJ, se tiene una variación tanto espacial como temporal de este índice, calculado para todos los meses del año. De igual manera que en el caso anterior se muestran los meses de enero y marzo, para el mes de enero la cuenca tendrá índices predominantes de una baja a moderada excedencia, en el caso del mes de marzo, se muestra un incremento de la suficiencia del recurso hídrico teniendo excedentes y altos excedentes de agua para un 90% de la cuenca, como se puede ver en la **Figura 1-6** (Pontificia Universidad Javeriana, 2017).

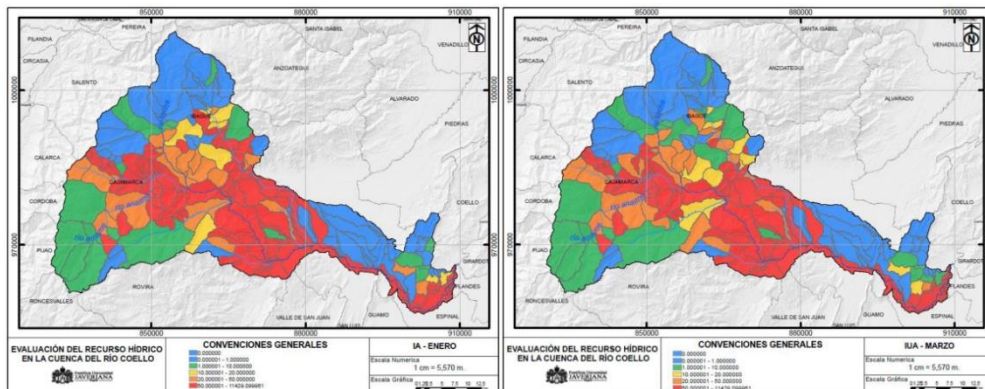
Figura 1-6: Valores de IA para la cuenca del río Coello, mes de enero y marzo (Pontificia Universidad Javeriana, 2017) .



• **Índice de Uso de Agua (IUA)**

Se define como la relación entre la cantidad de agua utilizada por los diferentes usuarios discretizados por sectores, y la oferta hídrica regional disponible neta en las mismas unidades de tiempo y espacio (IDEAM, 2013). Su valor indicará entonces la presión ejercida por la demanda con respecto a la oferta, en un rango desde muy bajo hasta muy alto. De acuerdo a la PUJ, este índice no tiene variaciones considerables a lo largo del año y conserva una distribución espacial constante, donde la parte norte de la cuenca tienen un valor bajo del índice, debido a la poca demanda requerida y en su parte central una gama extensa de categorías en el rango de alto a moderado, indicando una alta demanda del recurso hídrico con respecto a la oferta disponible (Pontificia Universidad Javeriana, 2017).

Figura 1-7: Valores de IUA para la cuenca del río Coello, mes de enero y marzo (Pontificia Universidad Javeriana, 2017)

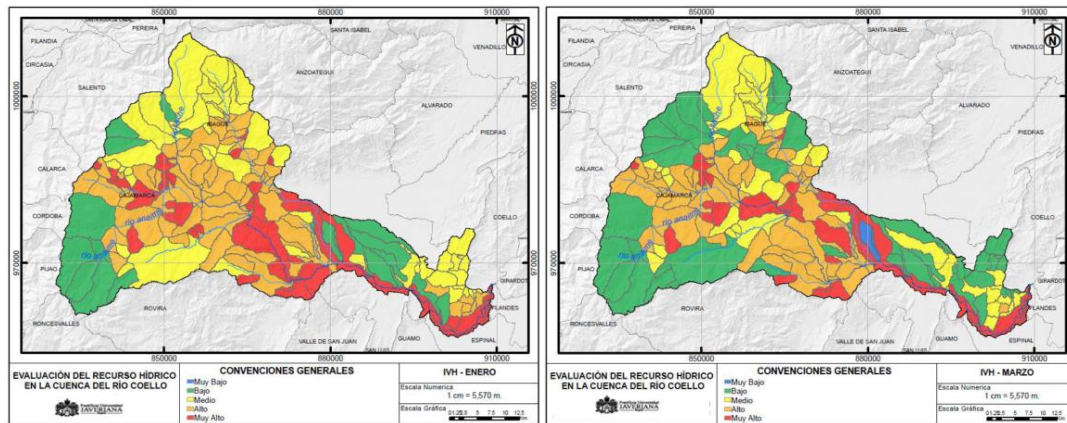


- **Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico (IVH)**

Se refiere a que tan frágil es el sistema hídrico frente al mantenimiento de la oferta del recurso que, ante amenazas como la sequía o el Fenómeno del niño, podría generar riesgos de desabastecimiento. (IDEAM, 2013). Su cálculo se realiza en función de la relación existente entre el índice de uso de agua y el índice de retención hídrica.

Para la cuenca de estudio, se tiene un índice predominantemente alto en el centro de la cuenca para todos los meses del año, pudiéndose observar este comportamiento en la **Figura 1-8** para los meses de enero y marzo (Pontificia Universidad Javeriana, 2017).

Figura 1-8: Valores de IVH para la cuenca del río Coello, mes de enero y marzo (Pontificia Universidad Javeriana, 2017)



1.3 Influencia del cambio climático en la cuenca del río Coello

Habiendo hecho un recorrido por los indicadores de estado del recurso hídrico en la cuenca, surge la preocupación de su comportamiento bajo escenarios de cambio climático. Considerando que en la actualidad los índices no son muy alentadores, al tener áreas con un valor muy alto de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico.

Según la tercera comunicación de cambio climático, el IDEAM indica en su análisis regional que el departamento del Tolima se verá seriamente afectado. Presenta altas probabilidades de un aumento de temperatura de aproximadamente 2,3°C y un aumento en la precipitación de hasta 17% (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, 2015a)

Con el fin de establecer los efectos del cambio climático en la oferta del recurso hídrico CORTOLIMA en el año 2011 en cooperación con la Universidad Nacional de Colombia, estableció las posibles afectaciones de la precipitación y la temperatura en la cuenca del río Coello para el periodo 2040- 2100, bajo los escenarios de cambio climático de la cuarta comunicación del IPCC, AR4(Fourth Assessment Report), A1B, A2 y B2 (CORTOLIMA, 2011).

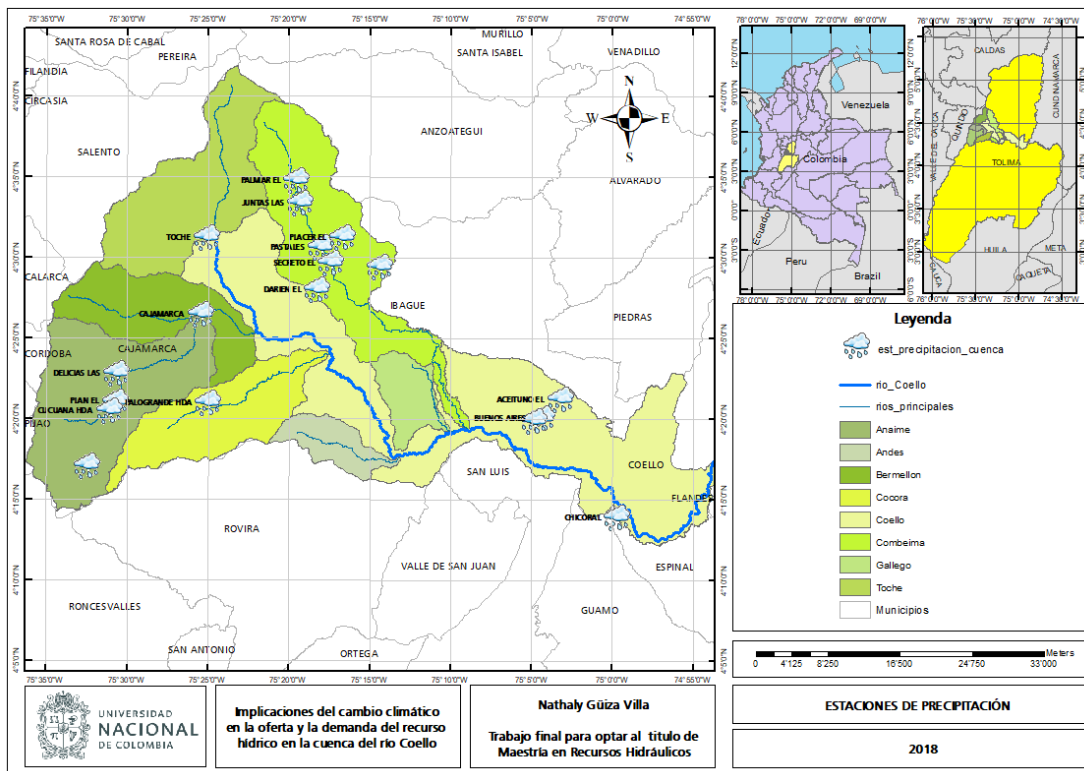
Según ese estudio, la precipitación presentará reducciones del 5 al 10% para el escenario favorable y hasta de 20% en el escenario desfavorable para el periodo 2011-2040, en el caso del periodo 2070-2100 las reducciones se proyectan del 30 al 40% para el primer caso y del 60% al 75% para el segundo. Por otro lado, para la temperatura en el periodo 2011-2040 se prevén aumentos de 2 a 3°C para el caso más optimista y de 3 a 4°C para el escenario pesimista, en el periodo 2040-2070, se proyectan aumentos de 1 a 6°C en el primer caso y de 7 a 8°C en el segundo. Todo esto pudiendo generar disminuciones en la oferta hídrica de la cuenca en un orden del 30 al 50% (CORTOLIMA, 2011).

Sin embargo, aunque la escala de evaluación es diferente, existe una contradicción entre lo proyectado por CORTOLIMA en 2011 y por el IDEAM en 2015, ya que para el primero la precipitación sufrirá una reducción y para el segundo un aumento. La diferencia podría radicar en el hecho que CORTOLIMA estableció dichas proyecciones para los escenarios contemplados en la cuarta comunicación del IPCC, AR4, requiriendo de una actualización a los nuevos escenarios AR5(Fifth Assessment Report), utilizados por el IDEAM. Aunque hay cierta equivalencia entre los escenarios del AR4 y del AR5 como se observó en la **Tabla 1-1**, la forma de establecerlos es distinta. Además, se considera que la variación entre el estudio de CORTOLIMA y el del IDEAM puede deberse a un problema de escala, siendo el primero a escala de la cuenca del río Coello y el segundo a escala departamental.

2 Revisión del comportamiento histórico de la precipitación

En este apartado se hace una caracterización histórica a diferentes escalas temporales de la precipitación para establecer el comportamiento meteorológico al que está sometido la cuenca, haciendo uso de las estaciones pluviométricas indicadas en la **Figura 2-1**. La caracterización se realizó con el fin de establecer posibles patrones asociados al comportamiento de la lluvia que puedan ser incluidos como restricción en la metodología propuesta para la reducción de escala de las variables climáticas.

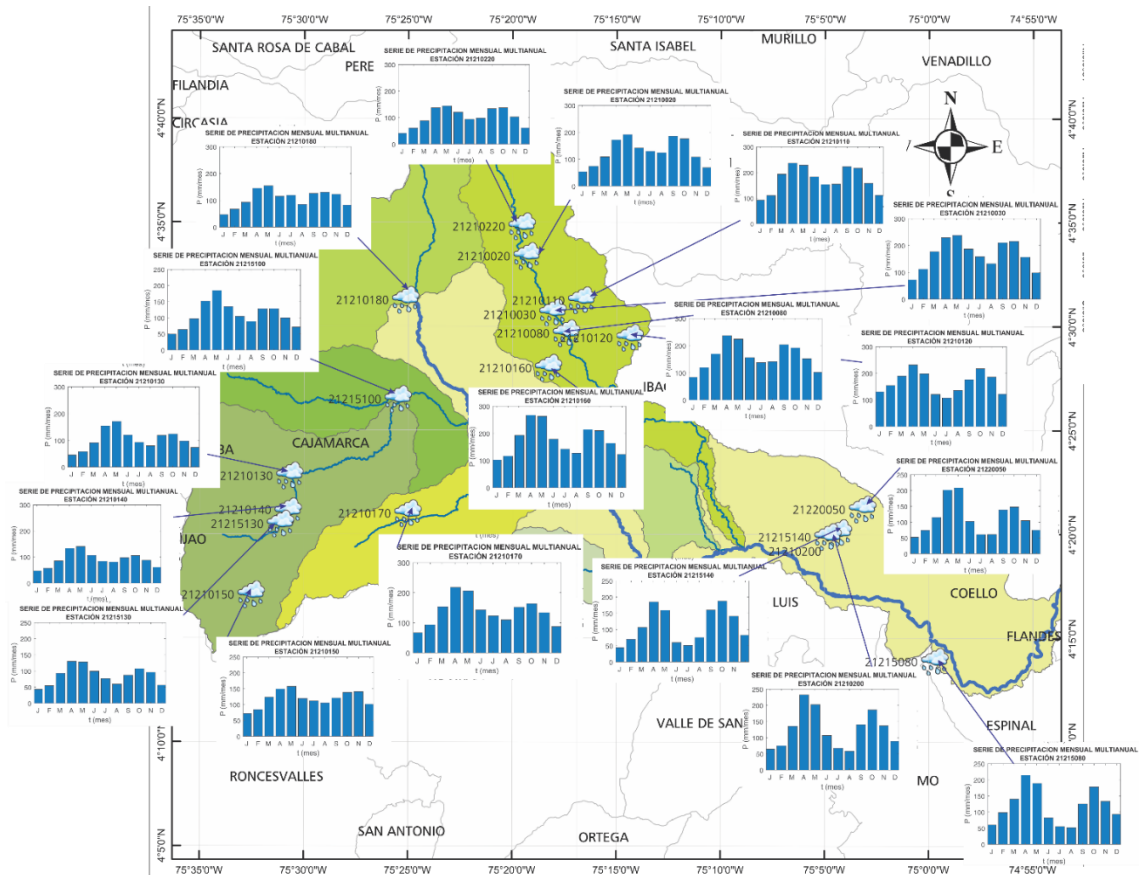
Figura 2-1: Estaciones de precipitación usadas en la caracterización.



2.1 Comportamiento medio mensual multianual de la precipitación

Se realiza una caracterización de la precipitación mensual haciendo uso de los datos de todos los años disponibles para cada una de las estaciones, evidenciando un comportamiento bimodal en todas ellas. Sin embargo, es importante destacar que al hacer una revisión del comportamiento espacial de la precipitación como se muestra en la **Figura 2-2**, es evidente una disminución más marcada para el periodo seco del año en la parte baja de la cuenca, correspondiente a las zonas del valle cercano a la desembocadura del río Magdalena. El periodo seco en la zona alta de la cuenca no desciende de igual manera, debido a la influencia de los nevados cercanos o a su condición de páramo.

Figura 2-2: Precipitaciones medias mensuales multianuales para cada estación.

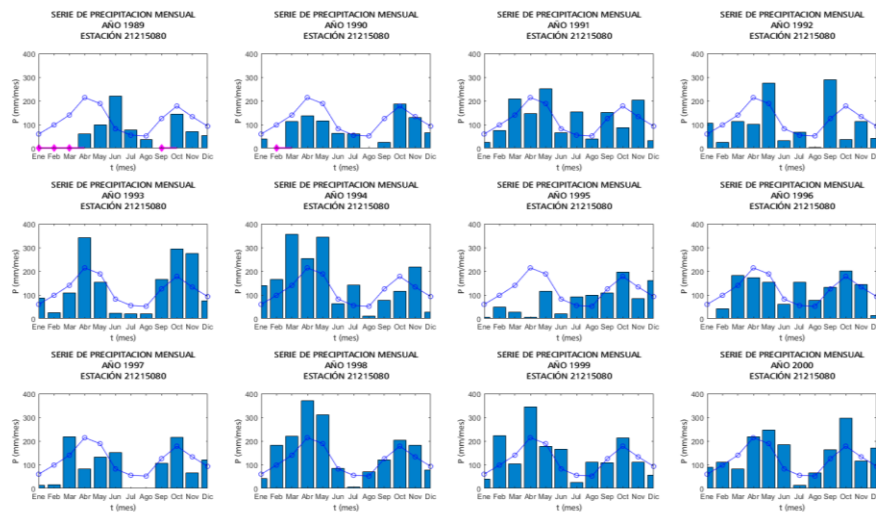


2.2 Comportamiento mensual de la precipitación

A partir de este punto, se explicará el procedimiento realizado en la búsqueda de patrones asociados a la precipitación usando las gráficas de la estación: **21215080-CHICORAL**, procedimiento que fue aplicado en cada una de las 22 estaciones y sus gráficas quedan disponibles en el anexo 2.2 de este capítulo.

Una vez estudiado el comportamiento bimodal de la precipitación, fueron realizados análisis mensuales en el periodo común a todas las estaciones (1989-2000) para establecer un posible patrón de comportamiento mensual, sin embargo, este no fue evidente a simple vista con las gráficas realizadas, las cuales se muestran en la **Figura 2-3**.

Figura 2-3: Precipitación mensual periodo 1989-2000, estación 21215080-Chicoral

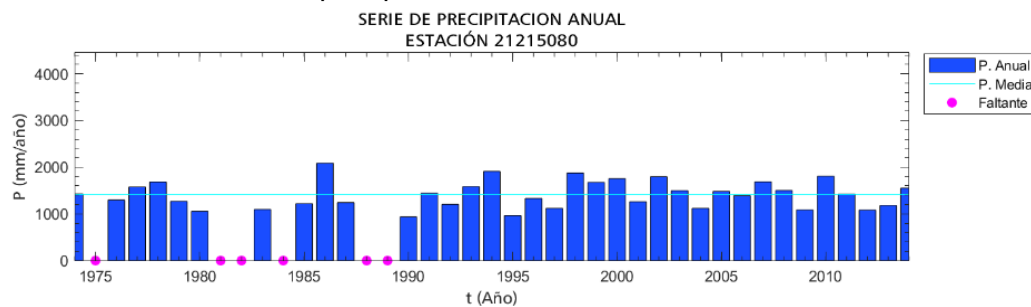


De acuerdo con la figura anterior no puede establecerse visualmente con facilidad un patrón mensual que se reproduzca en todos los años, además se evidencian diferencias con respecto al patrón mensual multianual, que en algunos años puede ser menor o mayor a este, propias de la variabilidad climática interanual. Por lo anterior se considera la posibilidad que los patrones puedan verse afectados por la tipología del año, por lo tanto, se revisan los totales anuales para establecer los años secos, húmedos o normales.

2.3 Comportamiento anual de la precipitación

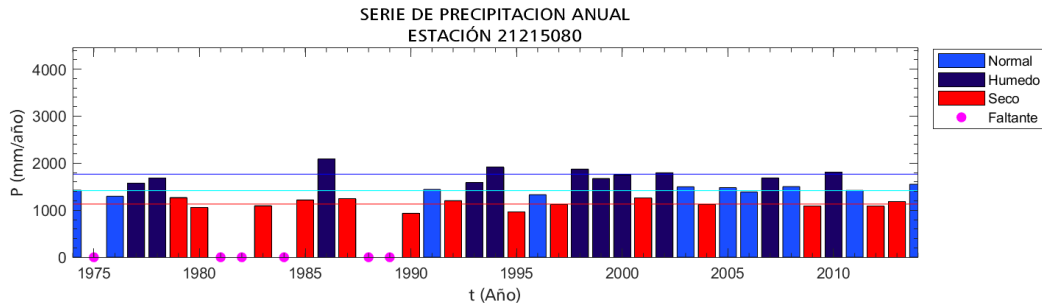
Como se indicó previamente, considerar una diferencia entre años secos, húmedos o normales puede representar valores diferenciadores en los patrones buscados, por lo tanto, se realiza una revisión de los valores de precipitación anual con referencia al promedio anual multianual en cada una de las estaciones como la indicada en la **Figura 2-4**, las demás estaciones están disponibles en el anexo 2.3.1.

Figura 2-4: Valor total de precipitación anual, estación 21215080-Chicoral



Es evidente que para cada año existen valores anuales mayores o menores al promedio histórico, por lo tanto, se realiza una revisión de las diferencias entre el valor anual y el valor promedio de la serie con el fin de establecer el tipo de año según su valor anual, ya sea húmedo, seco o normal. Se considera que cada uno de ellos estará por debajo o por encima de la serie promedio, cuando la diferencia mencionada es de un 10% del valor de la media, ya sea que la exceda en el caso húmedo, o esté por debajo, en el caso seco. Se establece el anterior porcentaje considerando que su valor es excedido en los años con mayor influencia del fenómeno de la Oscilación del Sur-El Niño (ENSO) tanto en su fase cálida, como en su fase fría, para todas las estaciones de estudio, a su vez, el IDEAM (2015a) establece que los cambios en la precipitación para la línea base del orden de $\pm 10\%$ no son significativos, pudiendo asemejarse en este caso a los años normales. De acuerdo con lo anterior se modifican la visualización de los valores anuales para cada una de las estaciones estableciendo el tipo de año definido como se muestra en la **Figura 2-5** para la estación Chicoral. Para el análisis de las demás estaciones ir al anexo 2.3.2.

Figura 2-5: Total de precipitación anual y tipología, estación 21215080-Chicoral



Una vez analizadas las gráficas como la anterior para cada una de las estaciones, pudo establecerse visualmente que la variación es menor cuando se separa por tipo de años, ya que pueden observarse niveles parecidos de precipitación en cada una de las tipologías de año, hipótesis que busca ser probada con la comparación de los valores del coeficiente de variación, los cuales se relacionan en la **Tabla 2-1**.

Tabla 2-1: Coeficiente de variación según tipología para cada una de las 22 estaciones de estudio.

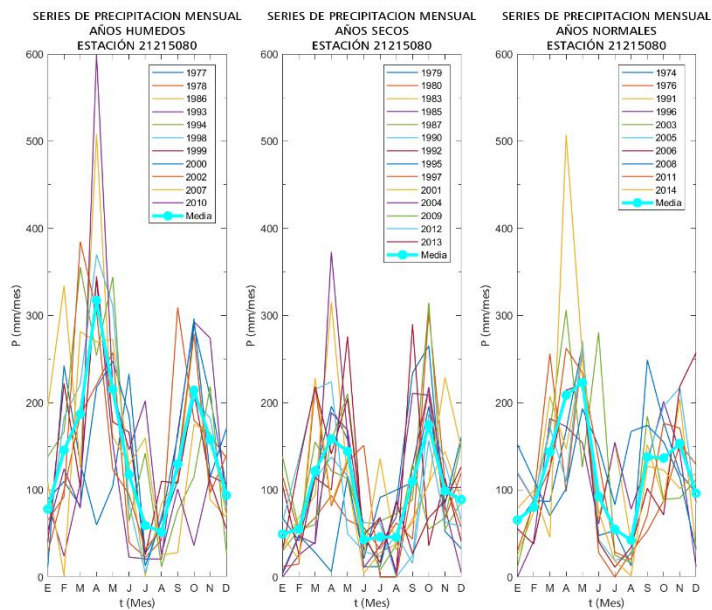
Estación	Coeficiente de variación (adim.)			
	Serie completa	Años húmedos	Años secos	Años normales
21220050	0.17	0.06	0.06	0.06
21210200	0.20	0.12	0.11	0.06
21215100	0.18	0.08	0.06	0.06
21210150	0.25	0.11	0.10	0.04
21215140	0.21	0.12	0.07	0.06
21215080	0.21	0.09	0.09	0.06
21215130	0.23	0.15	0.07	0.06
21210160	0.20	0.08	0.10	0.05
21210130	0.36	0.32	0.23	0.05
21210120	0.41	0.22	0.24	0.06
21210020	0.19	0.14	0.07	0.07
21210220	0.37	0.15	0.77	0.07
21210170	0.20	0.11	0.06	0.07
21210030	0.20	0.09	0.12	0.06
21210110	0.22	0.05	0.16	0.07
21210140	0.19	0.07	0.09	0.05
21210080	0.17	0.08	0.06	0.05
21210180	0.39	0.33	0.23	0.04
21180040	0.25	0.10	0.24	0.07
21185020	0.21	0.15	0.06	0.06
21210190	0.27	0.08	0.43	0.06
21245040	0.15	0.07	0.08	0.05

Como se puede observar en la **Tabla 2-1**, en la mayoría de los casos el valor del coeficiente de variación se ve reducido al discriminar por la tipología anual con referencia al valor que tiene la serie completa, es el caso de la estación ejemplificada 21215080, la cual tiene un valor de 0.21 para la serie completa, valores de 0.09 para los años húmedo y seco y 0.06 para los años normales. Lo anterior es un buen indicativo de que es posible encontrar patrones en las series si se discrimina por tipología anual, por lo tanto, se adopta dicha separación.

2.4 Comportamiento mensual discriminado por tipo de año de la precipitación.

De acuerdo con lo anterior se realizaron gráficas mensuales discriminando los años según su tipología, buscando establecer patrones que caractericen las series mensuales, sin embargo, estos no pueden establecerse visualmente de manera concreta como puede observarse en la **Figura 2-6** para la estación ejemplificada, y para la demás estaciones en el anexo 2.4.

Figura 2-6: Gráficas mensuales según tipología de año, estación 21215080-Chicoral



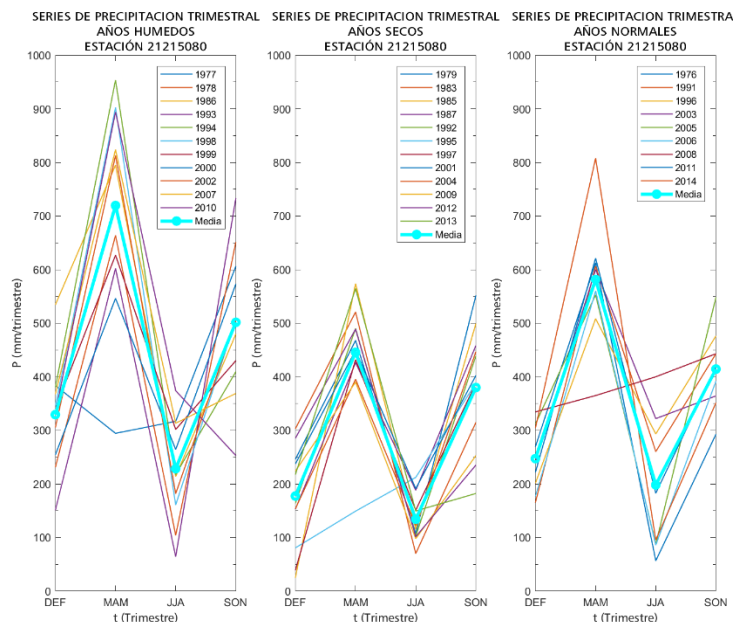
De acuerdo con la gráfica anterior es posible establecer un patrón definido donde en el primer semestre del año se observa una mayor cantidad de precipitación que en el

segundo semestre del año, sin embargo, existe bastante ruido al superponer las series mensuales para cada uno de los años, por lo tanto, se considera un análisis estacional basándose en el realizado por el IDEAM (2015a) para cambio climático, que considera los trimestres que describen el ciclo anual de la temperatura del aire en Colombia, a saber, diciembre-enero-febrero (DEF), marzo-abril-mayo (MAM), junio-julio-agosto (JJA) y septiembre-octubre-noviembre (SON). Lo anterior con el fin de establecer posibles patrones al agrupar los meses como fue indicado.

2.5 Comportamiento trimestral discriminado por tipo de año de la precipitación.

Como se indicó previamente se procedió a realizar una observación trimestral que al igual que en la mensual separe los años según su tipología, como puede observarse en la **Figura 2-7**, para la estación ilustrada, el análisis trimestral de las demás estaciones se puede observar en el anexo 2.5. Los patrones trimestrales son muy claros estableciendo un condicionante para la metodología de downscaling a establecer.

Figura 2-7: Gráficas trimestrales según tipología de año, estación 21215080-Chicoral



Como puede observarse en la gráfica anterior los patrones trimestrales son bastante claros con muy poco ruido asociado, por lo que se considera que deben estar incluidos de una u otra forma en la metodología para la reducción de escala de los datos de cambio climático que se propone en el siguiente capítulo.

2.6 Comportamiento resumido de la precipitación en la cuenca del río Coello.

Como conclusión de este capítulo, la precipitación en la cuenca del río Coello, tiene un comportamiento bimodal, que, aunque se ve afectado por la tipología de año, al discriminarse en función de ella es posible encontrar la repetición de patrones como se observó en el caso trimestral, teniendo dos periodos húmedos y dos secos, con un aumento considerable de la precipitación en el primer periodo húmedo (marzo, abril y mayo) con respecto el segundo (septiembre, octubre y noviembre).

Lo anterior debe ser tenido en cuenta tanto para la escogencia de los Modelos Climáticos Globales a usar, así como en la metodología de reducción de escala a utilizar para disminuir al máximo la incertidumbre asociada a los datos de cambio climático.

3 Reducción de escala de las variables (Downscaling)

De acuerdo con lo indicado en el capítulo anterior, se establecen una serie de patrones que dan cuenta del comportamiento de la precipitación en la zona de estudio, por lo tanto, se busca establecer una metodología para la reducción de escala geográfica que incluya los patrones establecidos en las estaciones climatológicas de interés con el fin de obtener los datos de cambio climático en cada una de ellas.

En este apartado se indica la metodología asociada a la reducción de escala de las variables, en primera medida se explicará el proceso de recopilación de información referente a los modelos climáticos globales (GCM) y a los forzamientos radiativos seleccionados, para el estado actual y para los escenarios definidos. Una vez obtenidas y procesadas las variables asociadas a los modelos climáticos y los forzamientos radiativos definidos, fue necesario realizar un downscaling geográfico de la precipitación a nivel diario, cuya metodología será explicada en este capítulo.

3.1 Recolección de datos climáticos de los Modelos de Circulación Global.

Para obtener los datos de interés se acude a la información oficial del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5), que luego de un previo registro en su página de acceso: <https://esgf-node.llnl.gov/projects/esgf-llnl/> permite obtener la serie de datos en formato “.nc”, para las diferentes variables y espectros de tiempo. Posteriormente fue necesario extraer los datos de este formato, para ello se usa el software ArcGIS, que

permite seleccionar la información de cada una de las variables para las estaciones definidas con coordenadas de latitud y longitud en el periodo requerido.

3.2 Selección de los modelos climáticos globales.

De acuerdo con la metodología indicada anteriormente se obtienen los valores de la precipitación a nivel mensual en el periodo histórico (1976-2005) para cada uno de los modelos indicados en la **Tabla 3-1**. Dichos modelos hacen parte de los 16 modelos usados por el IDEAM(2015a) en la tercera comunicación de cambio climático.

Tabla 3-1: Modelos de circulación globales evaluados y sus variables.

GCM	Precipitación	T. media	T. máxima	T. mínima	Escala diaria
GFDL-CM3	✓	✓	✓	✓	✓
GISS-E2-H	✓	✓	✓	✓	X
GISS-E2-R	✓	✓	✓	✓	X
HadGEM2-AO	✓	✓	✓	✓	✓
IPSL-CM5A-LR	✓	✓	✓	✓	✓
IPSL-CM5A-MR	✓	✓	✓	✓	✓
MIROC5	✓	✓	✓	✓	✓
MIROC-ESM	✓	✓	✓	✓	✓
MIROC-ESM-CHEM	✓	✓	✓	✓	✓
MRI-CGCM3	✓	✓	✓	✓	✓
NorESM1-ME	✓	✓	✓	✓	X

Considerando los patrones trimestrales mostrados en el capítulo 3, se cree necesario usar los modelos que mejor representen dicho patrón, por este motivo se realizó un análisis en el que utilizando los valores de precipitación para la celda dentro de la que se encuentra la cuenca del río Coello, se superpone el valor promedio trimestral indicado anteriormente, con el fin de visualizar el mejor ajuste, como se observa en la

Figura 3-1 y en la **Figura 3-2**. En este caso no se establecen relaciones métricas tales como el error cuadrático medio (RMSE) o el sesgo entre los datos de los modelos y los observados, ya que se buscaba una mejor representación de la estacionalidad, tanto de los periodos secos como de los periodos húmedos, lo cual puede no verse bien representado o suponer falsos positivos o negativos en lo que a métricas se refiere.

Figura 3-1: Gráficas trimestrales para cada modelo de circulación global

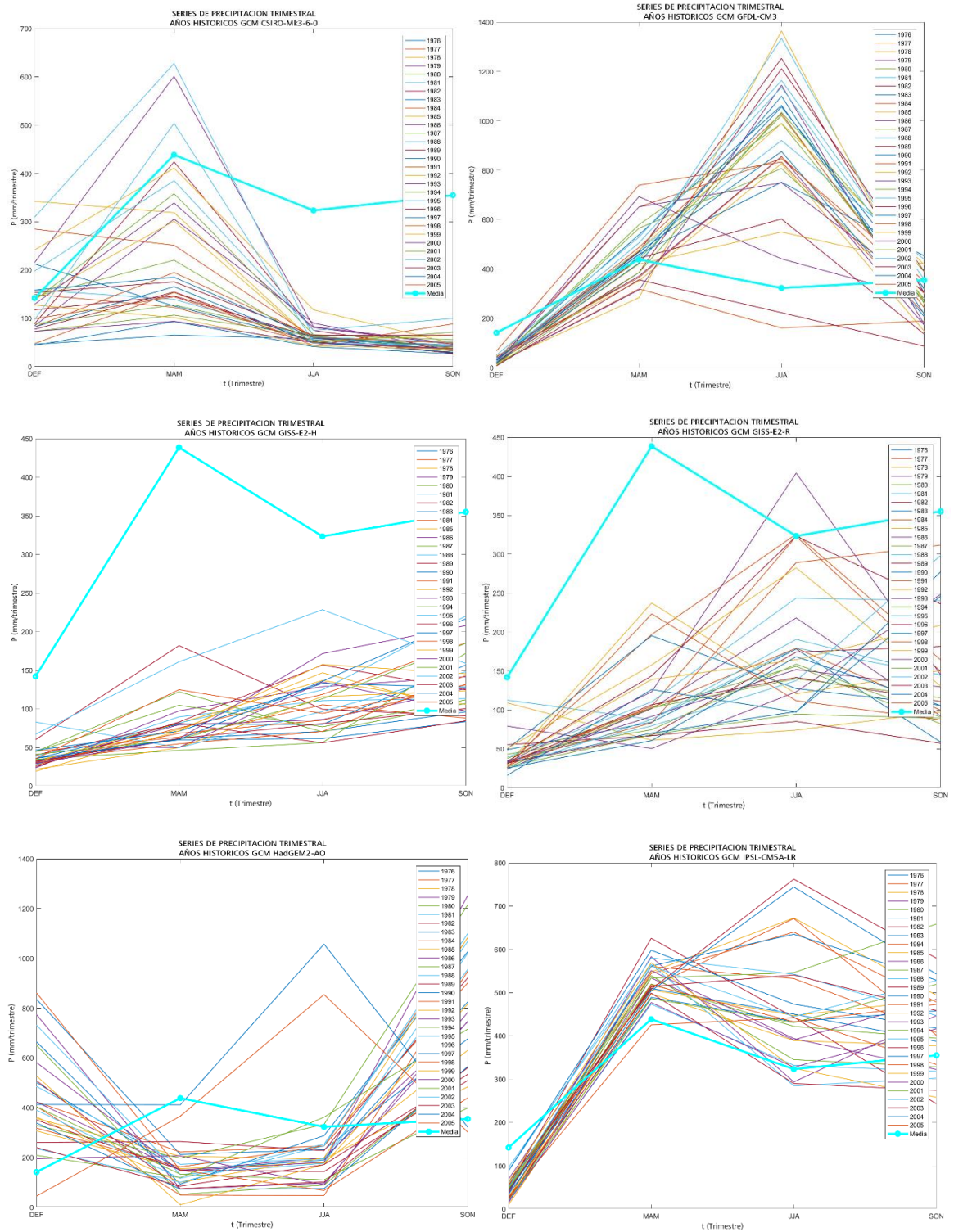
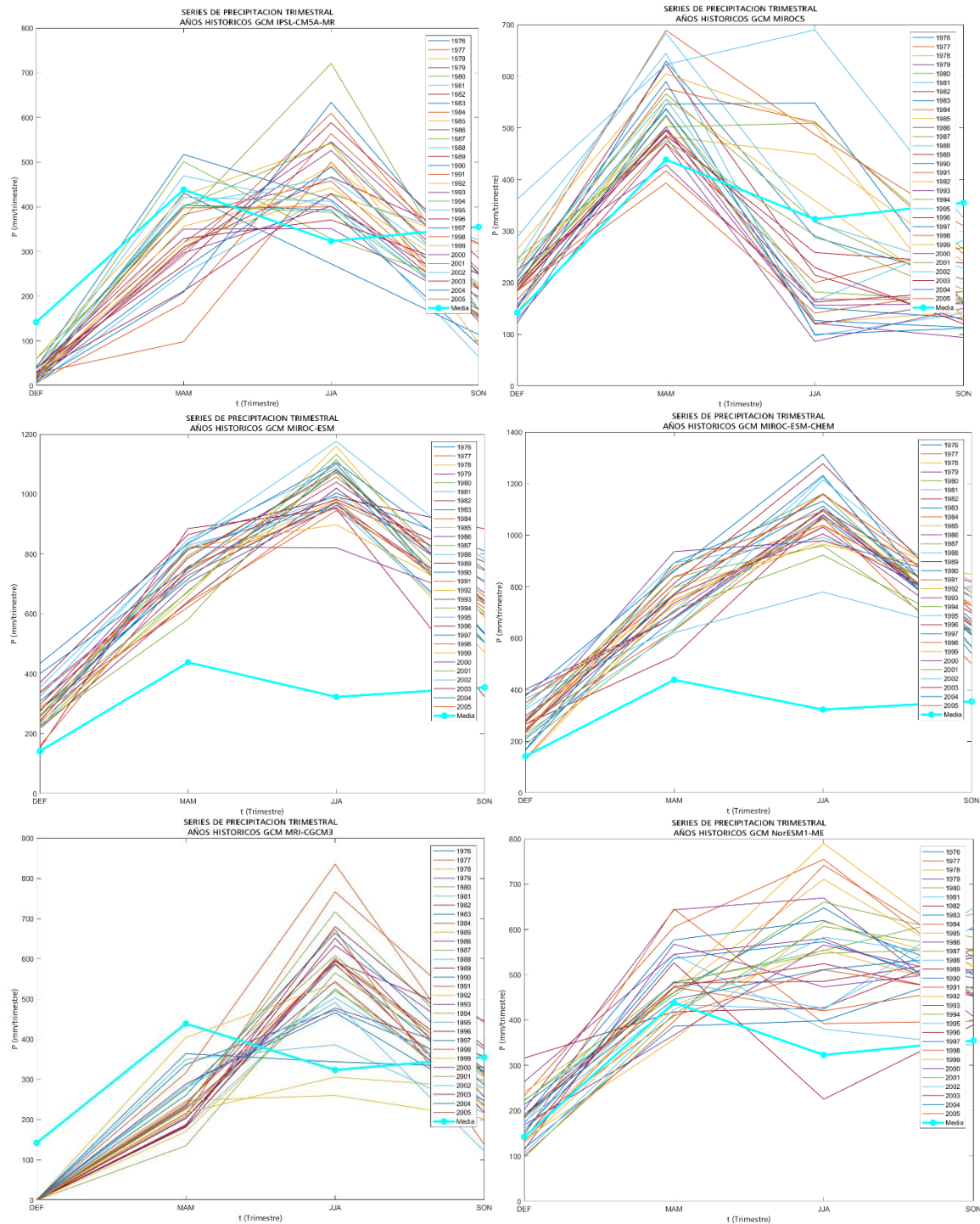


Figura 3-2: Continuación gráficas trimestrales para cada modelo de circulación global



Según el análisis mencionado los modelos que mejor representan el patrón trimestral establecido previamente, donde DEF y JJA tienen menores precipitaciones que MAM y

SON, son los modelos GISS-E2-H, GISS-E2-R, IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR, MIROC 5 y NorESM1-ME, sin embargo, dado que la metodología requiere de los datos de cambio climático a escala diaria, las posibilidades se reducen a IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR y MIROC 5, por lo tanto estos son los tres modelos escogidos.

3.3 Revisión de las variables climáticas futuras extraídas de los GCM seleccionados.

De la forma indicada anteriormente se obtuvieron los valores de las variables a nivel mensual y diario para cada uno de los modelos y escenarios definidos, siendo estos IPSL-CM5A-LR, IPSL-CM5A-MR y MIROC 5, para los escenarios 4.5 y 8.5. Se eligieron dos escenarios RCP con el fin de establecer dos condiciones diferentes que puedan ser comparadas, considerando que el escenario 4.5 se refiere a una posible estabilización de la temperatura luego de 2100 y el 8.5 a un aumento creciente de la misma, representando entonces un escenario optimista y uno pesimista. Los datos de las variables para cada modelo y escenario definido están disponibles en el anexo 3.2, seleccionados en función del periodo escogido y de la ubicación de la cuenca dentro de la grilla de cada uno de los modelos, como se muestra en la **Figura 3-3**, la **Figura 3-4** y la **Figura 3-5**.

Figura 3-3: Ubicación cuenca río Coello dentro de la grilla del modelo IPSL-CM5A-LR

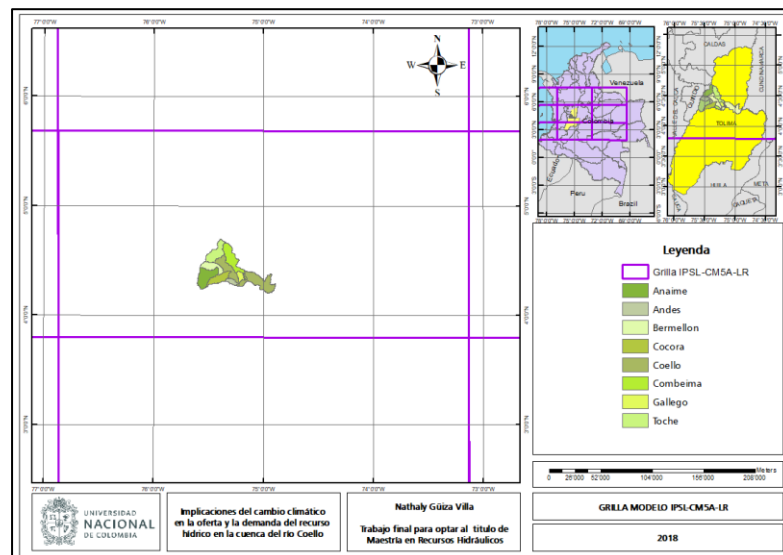


Figura 3-4: Ubicación cuenca río Coello dentro de la grilla del modelo IPSL-CM5A-MR.

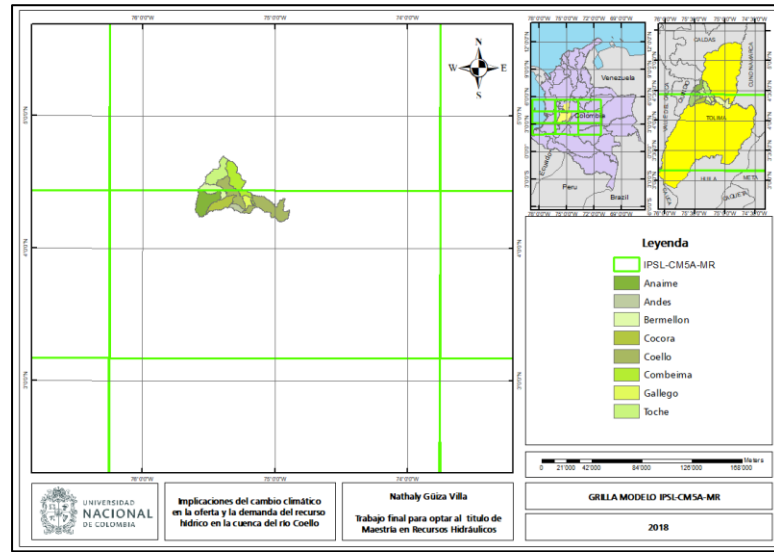
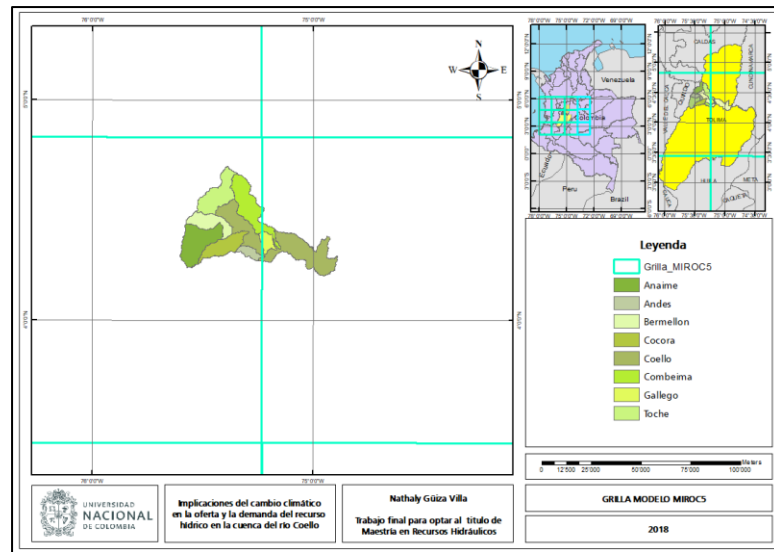


Figura 3-5: Ubicación cuenca río Coello dentro de la grilla del modelo MIROC5.



Los datos de los modelos son extraídos en dos puntos diferentes para el caso de los modelos IPSL-CM5A-MR y MIROC5, dado que las grillas de cada uno de ellos dividen la cuenca en dos partes.

Obtenidos los datos de los modelos se procedió a revisar si los datos diarios suman el valor de los datos mensuales con el fin de comprobar si era posible utilizar únicamente la

serie diaria. Sin embargo, como se muestra en la **Figura 3-6**, la **Figura 3-7** y la **Figura 3-8** para cada uno de los modelos, no se cumple este requerimiento ya que la sumatoria de los valores diarios no coincide con el total mensual de los modelos a esta escala.

Figura 3-6: Comparación datos diarios y mensuales para el modelo IPSL-CM5A-LR.

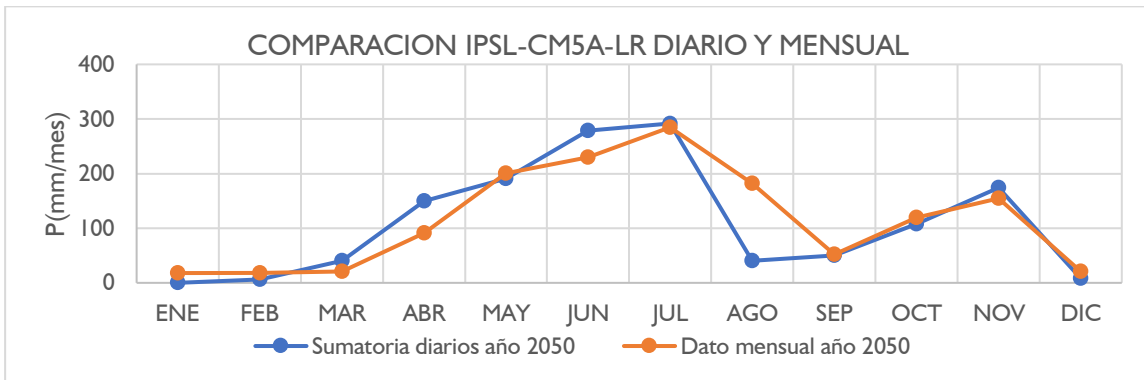


Figura 3-7: Comparación datos diarios y mensuales para el modelo IPSL-CM5A-MR.

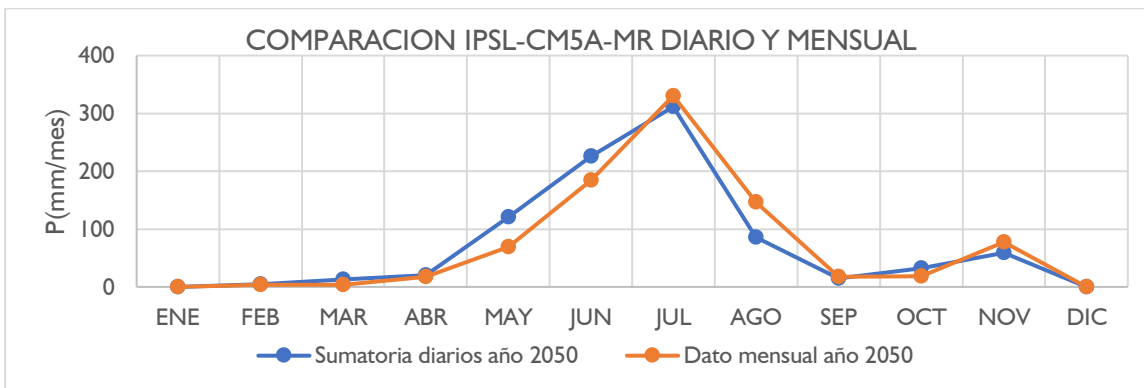


Figura 3-8: Comparación datos diarios y mensuales para el modelo MIROC5.



Se decidió usar las series diarias y agregarlas a nivel mensual, ya que las series mensuales incluyen fechas al inicio, mitad y final del mes, dejando dudas de si su valor pertenece a la totalidad del mes enunciado o al mes anterior, considerando algunos casos donde se tenía un dato al final de un mes, seguido del inicio del siguiente. Además, de acuerdo con las gráficas mostradas previamente, los valores mensuales correspondientes a la sumatoria de los valores diarios para cada mes difieren al valor mensual proporcionado por el modelo.

3.4 Metodología propuesta para reducción de escala de datos de cambio climático

De acuerdo con lo observado previamente, se propone una metodología para la reducción de escala que use los datos de precipitación a nivel diario de los modelos pero que represente el comportamiento de dicha variable en la zona de estudio, considerando el amplio grosor de las grillas de los modelos notorias en las imágenes mostradas anteriormente.

Por lo tanto, se propone un método de cálculo en el que se combinan el método delta y la teoría de la máxima entropía para establecer una rutina con la cual obtener los datos de precipitación a nivel diario para cada una de las estaciones meteorológicas de interés.

3.4.1 Método Delta

Para la reducción de escala espacial los datos obtenidos de los modelos climáticos fue utilizada la metodología del factor de cambio (CF) o método delta, su cálculo se realizó siguiendo el procedimiento propuesto por Anandhi (2011)

Este método fue usado en sus dos tipologías aditiva y multiplicativa, la primera para la temperatura y la segunda para la precipitación, las dos variables a una escala temporal mensual. En el caso aditivo se calcula la diferencia aritmética entre una variable GCM simulada actual y para un escenario climático futuro para una misma celda de ubicación. Por otro lado, el caso multiplicativo calcula la relación entre esos dos valores. En primera

medida fue necesario estimar los valores medios de los datos del modelo climático global para la línea base o periodo actual (1976-2005) (Ver ecuación (3.1)) y para el escenario futuro seleccionado (2020-2050) (Ver ecuación (3.2))

$$\overline{GCM_b} = \sum_{i=1}^{N_b} \frac{GCM_{bi}}{N_b} \quad (3.1)$$

$$\overline{GCM_f} = \sum_{i=1}^{N_f} \frac{GCM_{fi}}{N_f} \quad (3.2)$$

Donde:

GCM_b : Modelo climático global de la línea base

GCM_f : Modelo climático global para el periodo futuro

N_b : Numero de valores en el dominio temporal del GCM para la línea base

N_f : Numero de valores en el dominio temporal del GCM para el periodo futuro

Posterior a ello se calcularon los factores de cambio (CF) aditivos (Ver ecuación (2.3)) y multiplicativos (Ver ecuación (2.4)).

$$CF_{add} = \overline{GCM_f} - \overline{GCM_b} \quad (3.3)$$

$$CF_{mul} = \frac{\overline{GCM_f}}{\overline{GCM_b}} \quad (3.4)$$

Finalmente se obtuvieron los valores futuros escalados (LS) para la tipología aditiva (Ver ecuación (2.5)) y la multiplicativa (Ver ecuación (2.6))

$$LS_{fadd,i} = LObs_i + CF_{add} \quad (3.5)$$

$$LS_{fmul,i} = LObs_i * CF_{mul} \quad (3.6)$$

Donde,

$LObs_i$: Valores observados en el espacio de tiempo i

3.4.2 Principio de la máxima entropía

En el caso de la precipitación se requiere una resolución temporal diaria, para la reducción de la escala geográfica se propone utilizar el principio de la máxima entropía, la cual se refiere a una medida cuantitativa de la incertidumbre, que se halla con una ecuación igual a la expresión matemática de la entropía en termodinámica. Con este principio se busca reducir la incertidumbre tratando de maximizarla. Sin embargo, este procedimiento es lo más honesto a realizar ya que se maximiza la incertidumbre de lo que no se conoce. Por lo tanto, la única forma de reducir la incertidumbre será obteniendo más información y por consiguiente, los resultados dependerán solo de la información que se tiene (Kapur & Kesavan, 1992).

Por el motivo anterior y el criterio de honestidad se decide usar esta metodología. Haciendo una revisión de las metodologías existentes en diferentes artículos de revista indexada y en literatura concerniente al tema fue evidente que muchas veces estas ignoran la importancia de preservar la relación entre ellas, considerando que los valores de precipitación diarios deben sumar el valor mensual. Haciendo un barrido por las metodologías vistas, se encuentra además que requieren demasiados datos de los modelos climáticos, dejando a un lado un poco los datos históricos de las estaciones. A nivel nacional, para el caso de la metodología del IDEAM(2015a) de la tercera comunicación, es evidente que requiere gran cantidad de datos de GCMs haciendo uso de 16 modelos para realizar un ensamble multimodelo, utilizando únicamente los datos históricos para definir el comportamiento de los modelos

En el caso internacional los referentes de cambio climático, Khalili & Van Nguyen (2016), proponen una metodología de downscaling multisitio que requiere de una serie de descriptores climáticos que deben ser extraídos del modelo climático, lo cual en el caso de Colombia puede no ser aplicable dada la variabilidad climática del país, en este caso cada una de las grillas del modelo con una resolución de 100 a 500 km no representa las condiciones de las estaciones dentro de dicha grilla.

Además, la mayoría de los modelos establece la necesidad de al menos 30 años de datos históricos para establecer el comportamiento de la climatología, sin embargo, esta cantidad

de datos es de difícil acceso en gran parte del país. La región andina del país posee una alta densidad de estaciones con respecto al resto del país, pero muchas veces los datos no son de buena calidad, en algunos casos dadas las últimas campañas de instrumentación se cuenta con 5 a 10 años de datos, lo que dificulta el uso de las metodologías revisadas.

El principio de la máxima entropía establece el uso de solamente los datos que se conocen, por lo tanto, establece un principio de honestidad al usar solamente la información asequible. Es por lo anterior que se considera que este principio puede tener una aplicación en la metodología de reducción de escala, al establecer patrones que representen el comportamiento climatológico en cada una de las estaciones, pudiendo reproducir dichos patrones en las series de cambio climático establecidas por el CMIP5, garantizando la inclusión de la variabilidad climática de la zona de estudio, inherente a su ubicación geográfica y a la influencia de agentes cercanos como los nevados o paramos de la zona. Lo anterior permitirá entonces utilizar los datos de los modelos de circulación global con un comportamiento lo más parecido posible al observado en la zona de estudio.

Se utiliza entonces el principio de la máxima entropía para la reducción de escala temporal de acuerdo con el siguiente procedimiento. En primer lugar, la entropía (S) está definida por la expresión

$$S = - \sum_{i=1}^N [p_i * \log(p_i)] \quad (3.7)$$

Donde el valor de pi corresponderá a una proporción del valor total, en este caso la precipitación mensual para obtener el valor del microestado, la precipitación a nivel diaria futura. Esta expresión buscará ser maximizada de acuerdo con una cantidad de restricciones ya sea con respecto a patrones asociados a la serie de tiempo o a la preservación de la estadística de segundo orden, dado que se conoce el macroestado, en este caso las series de tiempo mensuales de los modelos de cambio climático. Las restricciones se refieren a los valores definidos con la letra μ , la restricción natural corresponde a:

$$\mu_0 = \sum_{i=1}^N p_i = 1 \quad (3.8)$$

El funcionamiento del modelo se basa en aumentar las restricciones n veces hasta que el error sea mínimo, siendo estas cada uno de los momentos estadísticos en función del tiempo. El primer momento corresponderá a la media y el segundo a la varianza:

$$\mu_1 = \sum_{i=1}^N (p_i * t_i) = \bar{t}$$

$$\mu_2 = \sum_{i=1}^N (p_i * (t_i - \bar{t})^2) = S_t^2$$

Y las demás restricciones corresponden a los siguientes momentos estadísticos hasta que se tenga una reproducción fiel del sistema:

$$\mu_n = \sum_{i=1}^N (p_i * (t_i - \bar{t})^n) = M_n$$

Una vez definidas las restricciones se plantea una función objetivo de la forma:

$$FO = S + \lambda_0 \left[1 - \sum_{i=1}^N p_i \right] + \lambda_1 \left[\bar{t} - \sum_{i=1}^N (p_i t_i) \right] + \lambda_2 \left[S_t^2 - \sum_{i=1}^N (p_i (t_i - \bar{t})^2) \right] + \dots + \lambda_n \left[M_n - \sum_{i=1}^N (p_i (t_i - \bar{t})^n) \right] \quad (3.9)$$

Donde los valores de λ_0 corresponden a multiplicadores de Lagrange, reemplazando la expresión que multiplica a p_i por c_i se tiene:

$$FO = - \sum_{i=1}^N [p_i * \log(p_i)] + \lambda_0 \left[1 - \sum_{i=1}^N p_i \right] + \lambda_1 \left[\bar{t} - \sum_{i=1}^N (p_i c_1) \right] + \lambda_2 \left[S_t^2 - \sum_{i=1}^N (p_i c_2) \right] + \dots + \lambda_n \left[M_n - \sum_{i=1}^N (p_i c_n) \right] \quad (3.10)$$

Esta expresión se deriva parcialmente en función de cada una de las variables igualando a cero para maximizar la expresión, en función de λ_i se obtienen las restricciones previamente definidas y en función de p_i se obtiene

$$\frac{\partial FO}{\partial p_i} = 0 = (1 + \log(p_i)) - \lambda_0 - c_1\lambda_1 - c_2\lambda_2 - \dots - c_n\lambda_n$$

Despejando de la expresión anterior el valor de p_i , se obtienen una solución de la forma:

$$p_i = \exp\left(-\sum_{n=0}^n c_i\lambda_i\right) \quad (3.11)$$

Estableciendo que:

$$c_0 = 1$$

De acuerdo con lo anterior el problema se resuelve al encontrar los valores de los multiplicadores de Lagrange λ_i , teniendo con la ecuación (3.11) un sistema de n ecuaciones n incógnitas que puede ser resuelto con algún método numérico dado que los valores de λ_i están implícitos. Obtenidos los valores de p_i estos son multiplicados con el macroestado (dato mensual) para obtener el microestado (serie diaria).

3.4.3 Metodología propuesta para la reducción de escala de la precipitación.

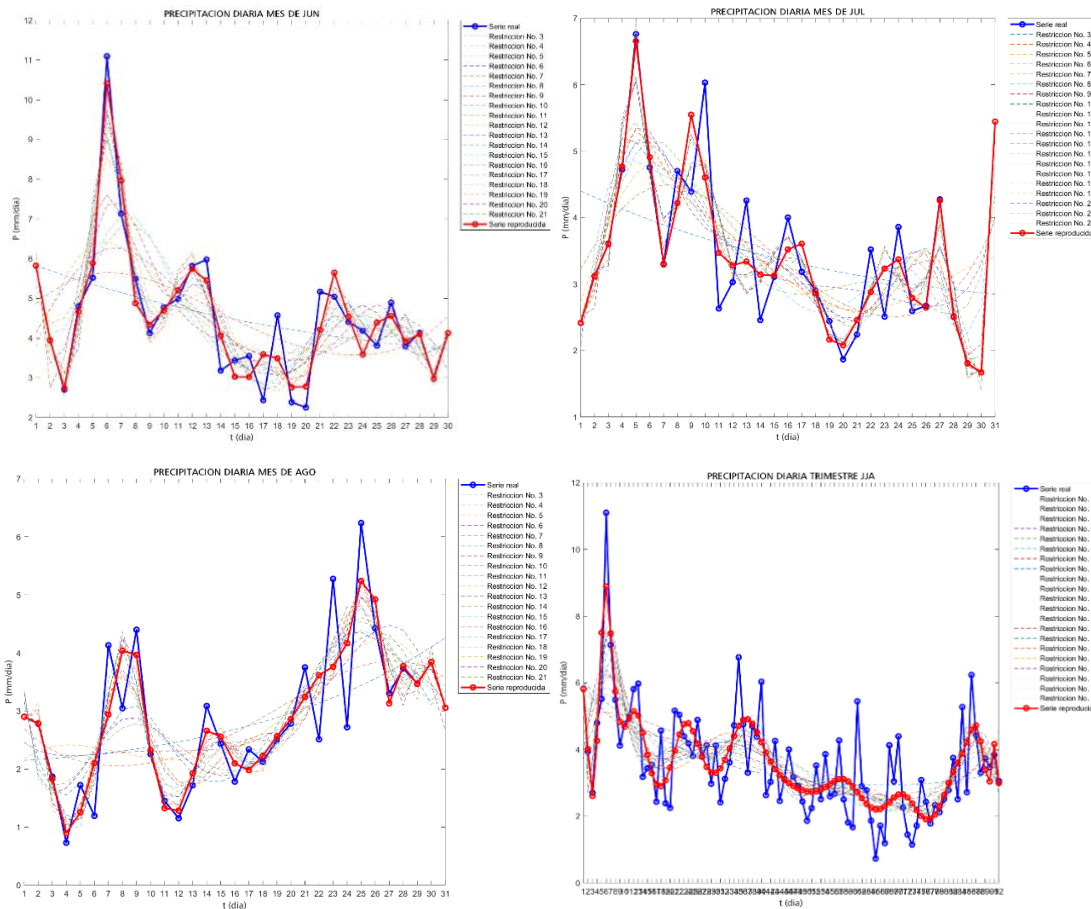
Acorde con lo anterior se busca representar de la mejor manera el comportamiento de la precipitación para reducir su escala a nivel diario usando el método de máxima entropía, por este motivo se considera la posibilidad de realizar dicha reducción desde la escala mensual y desde la escala trimestral. Para establecer cuál de las dos posibilidades reproducía la serie más cercana a la realidad, se hace una prueba para la estación 21215100-Cajamarca, ya que tiene la serie más larga de datos (1974-2011) estableciendo cuál de las dos posibilidades reproduce de mejor manera los doce meses del año a nivel diario con base al mínimo error cuadrático medio (RMSE) calculado como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \tag{3.12}$$

Donde P_i : corresponde valor simulado, O_i es el valor observado y n es el número de datos

Resultando en una mejor reproducción de la serie a nivel mensual como se puede observar en las gráficas de los meses de junio, julio y agosto, en comparación con la del trimestre JJA, mostradas en la **Figura 3-9**.

Figura 3-9: Reproducción mensual y trimestral usando el método de máxima entropía



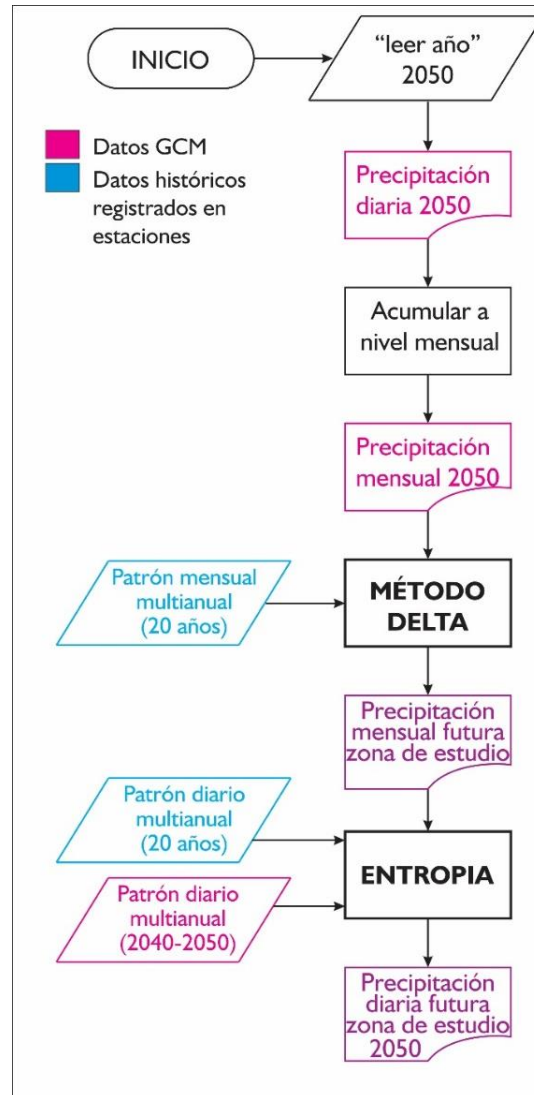
Sumado a lo anterior la mejor reproducción es evidente revisando el valor mínimo del error cuadrático medio el cual se presenta siempre en la serie mensual como se indica en la **Tabla 3-2**.

Tabla 3-2: Error cuadrático medio para cada mes y cada trimestre asociado.

Mes	RMSE mes	RMSE trimestre
Diciembre	0.59	0.63
Enero	0.18	
Febrero	0.34	
Marzo	0.51	1.24
Abril	0.42	
Mayo	1.02	
Junio	0.53	0.93
Julio	0.49	
Agosto	0.60	
Septiembre	0.39	0.87
Octubre	0.71	
Noviembre	0.50	

Por lo anterior se propone una metodología donde usando el principio de máxima entropía se usen todos los datos disponibles como este lo indica para una mayor honestidad. En ese sentido la metodología consiste en obtener los datos agregados a nivel mensual y usar el método delta para realizar una reducción de escala geográfica. Seguido a ello según el año de interés se establece un patrón promedio diario de 30 años, que incluye los datos diarios históricos de la estación y los datos diarios del modelo de cambio climático de tal manera que completen los 30 años definidos usando los años anteriores al año en cuestión.

De la manera anterior, se tienen en cuenta los patrones diarios inherentes al modelo de cambio climático y se establece el posible valor de la precipitación a escala diaria. Esta metodología se resume con el diagrama de flujo para el año 2050 indicado en la **Figura 3-10**

Figura 3-10: Esquema metodológico para reducción de escala a nivel diario

De acuerdo con la metodología anterior fue posible obtener la precipitación para el año 2050 en cada uno de los meses, modelos y escenarios definidos, en todas las estaciones de interés, como en el ejemplo mostrado en la **Figura 3-11** y en la **Figura 3-12**. En las gráficas mencionadas se puede observar la reproducción del patrón histórico, según la tipología combinado con el de los modelos de circulación general, produciendo la precipitación a nivel diario. Lo anterior considera entonces tanto el patrón histórico observado en la estación, como los posibles cambios en la estacionalidad producidos por el escenario de cambio climático, tal como el aumento en la intensidad de la precipitación o su concentración en periodos específicos.

Figura 3-11: Serie de precipitación diaria, para el mes de septiembre en los tres GCM definidos, para año seco, húmedo y normal, en el escenario RCP 4.5

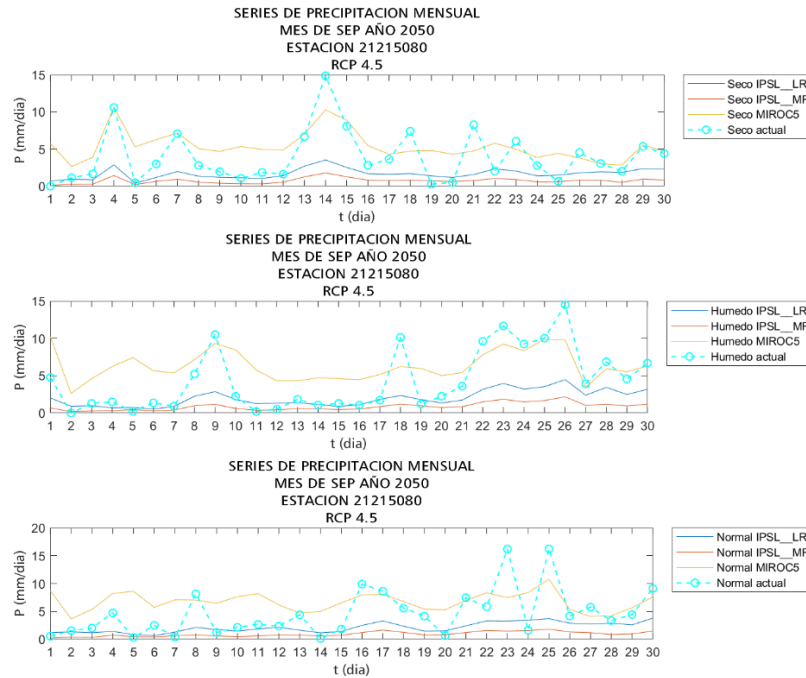
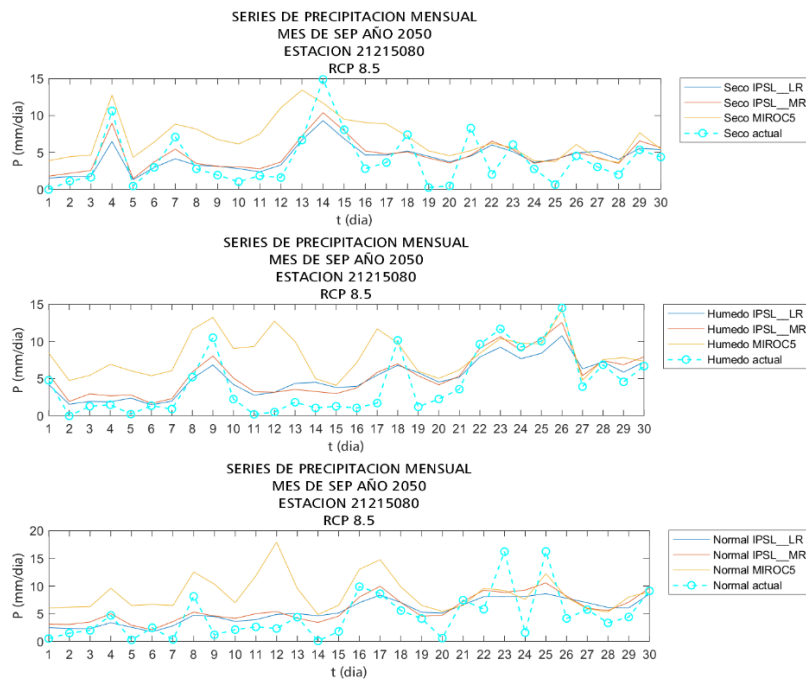


Figura 3-12: Serie de precipitación diaria, para el mes de septiembre en los tres GCM definidos, para año seco, húmedo y normal, en el escenario RCP 8.5



Sin embargo, dado que se requieren promedios mensuales multianuales para los índices a calcular y que de hacerlo de la manera anterior se uniformizan los patrones al definir todos los años del periodo de interés (2020-2050) como secos, húmedos o normales, utilizando como criterio un valor de 10% mayor o menor al total anual promedio de la serie observada para establecer su tipología, año húmedo o seco respectivamente, como en el ejemplo mostrado en la **Figura 3-13** y en la **Figura 3-14**. Es importante mencionar que, en dichas figuras, así como en varias a lo largo del documento se incluye la media observada de los datos en las estaciones dentro de las gráficas de las proyecciones de cambio climático como referencia para la definición de su tipología, estableciéndose como línea base. La anterior es dibujada en color azul claro.

Figura 3-13: Serie de precipitación anual, según tipología para la estación ejemplificada, en cada uno de los modelos escogidos, para el escenario RCP 4.5.

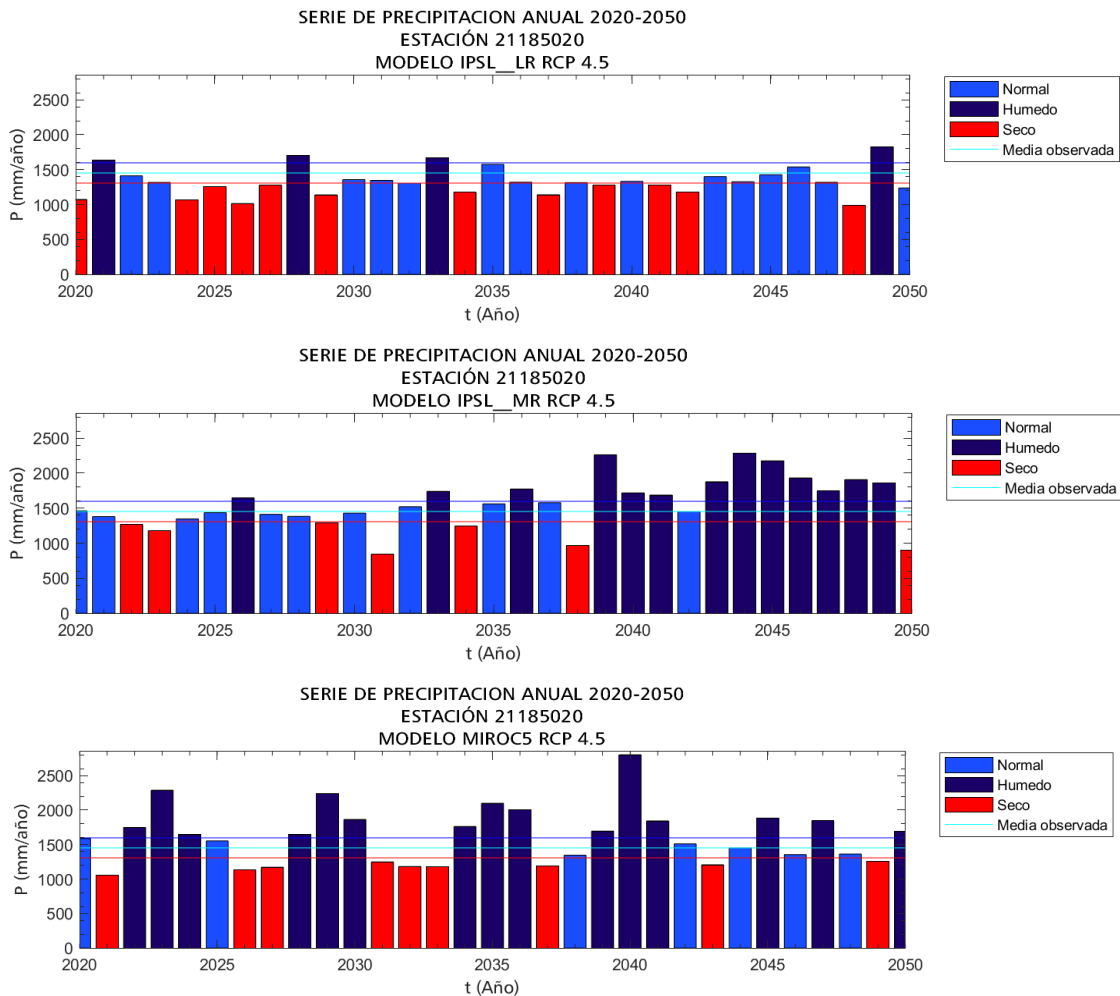
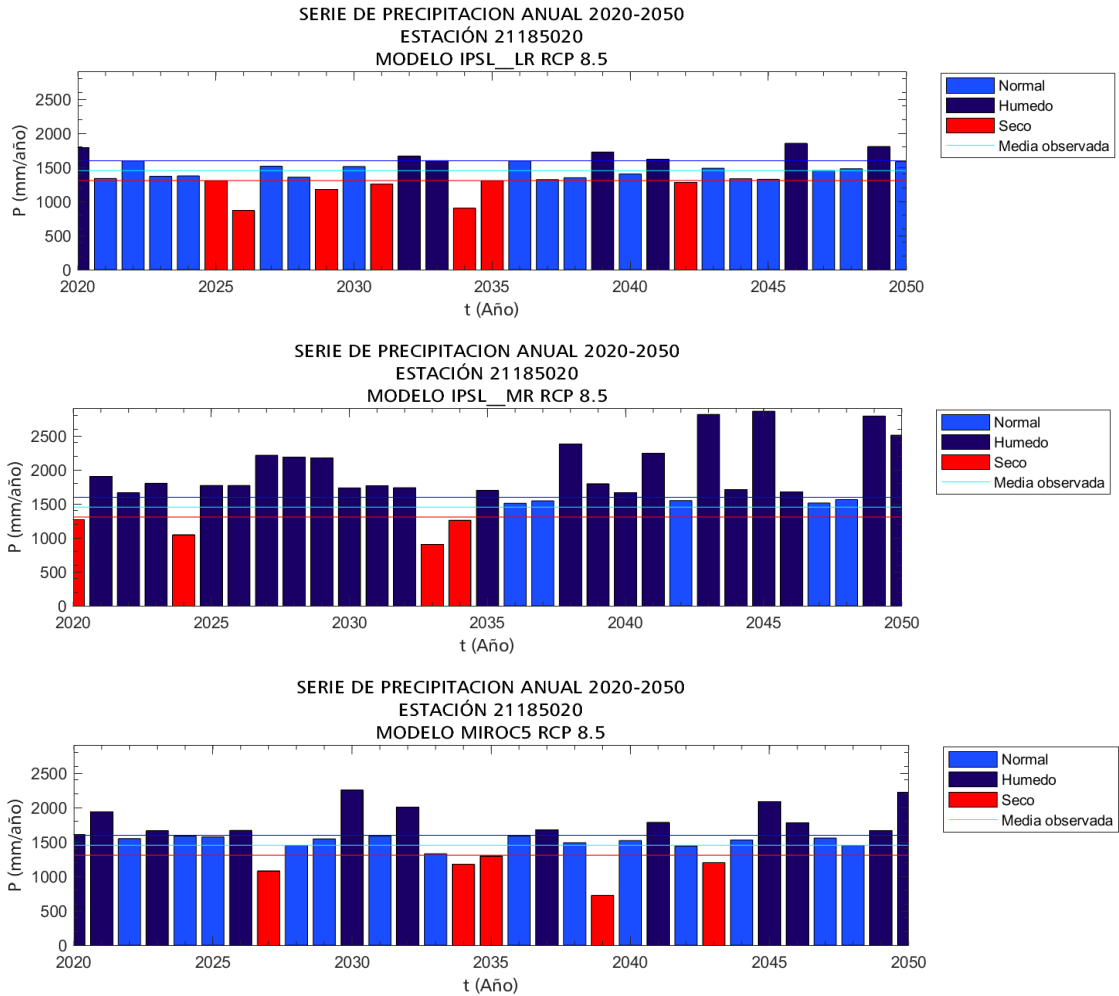


Figura 3-14: Serie de precipitación anual, según tipología para la estación ejemplificada, en cada uno de los modelos escogidos, para el escenario RCP 8.5.



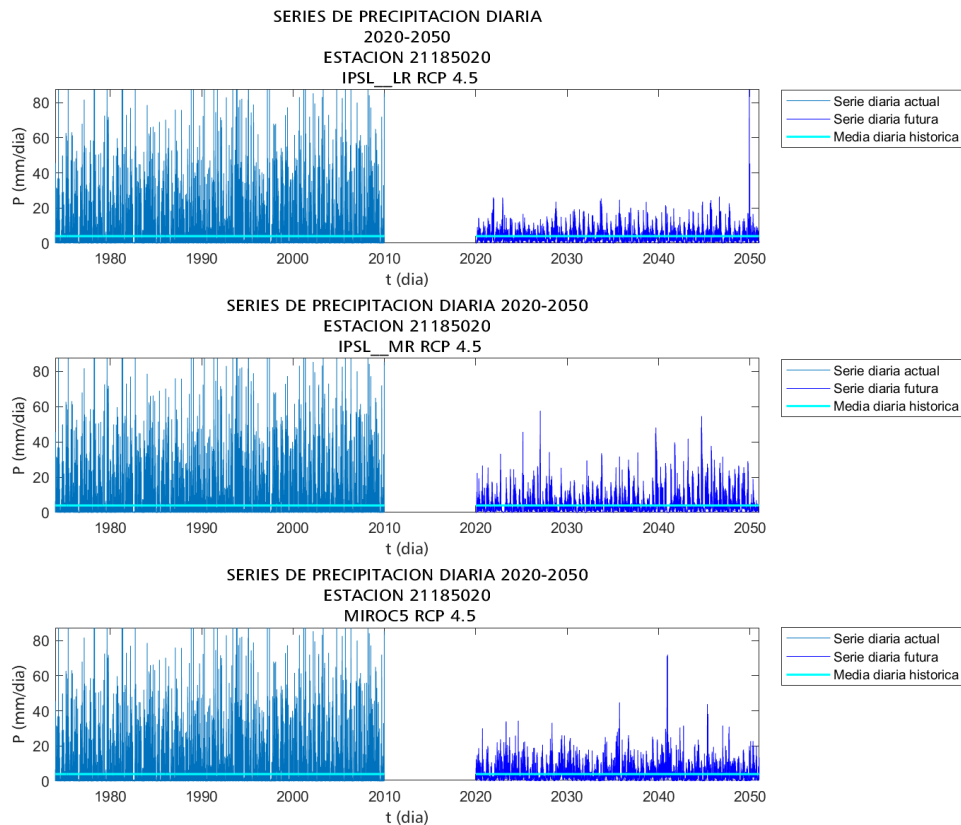
Como se indicó previamente en la metodología se realiza entonces una reducción de escala geográfica a nivel mensual usando el método delta de acuerdo con los promedios mensuales multianuales para cada tipología, seguido a ello se procede a reducir la escala a nivel diario, utilizando los patrones diarios de acuerdo con el tipo de año definido anteriormente. Los análisis de tipología para el resto de las estaciones estudiadas se encuentran disponibles en el anexo 3.4.

3.5 Series futuras de precipitación y temperatura

3.5.1 Precipitación proyectada

De la manera mostrada en el numeral anterior se obtienen las series de precipitación a nivel diario para todas las estaciones de interés, generando gráficas para cada una de ellas, como la de la estación ejemplificada mostrada en la **Figura 3-15**, para las demás estaciones revisar el anexo 3.4.1.

Figura 3-15: Serie de precipitación diaria, para la estación ejemplificada, en cada uno de los modelos escogidos, para el escenario RCP 4.5.

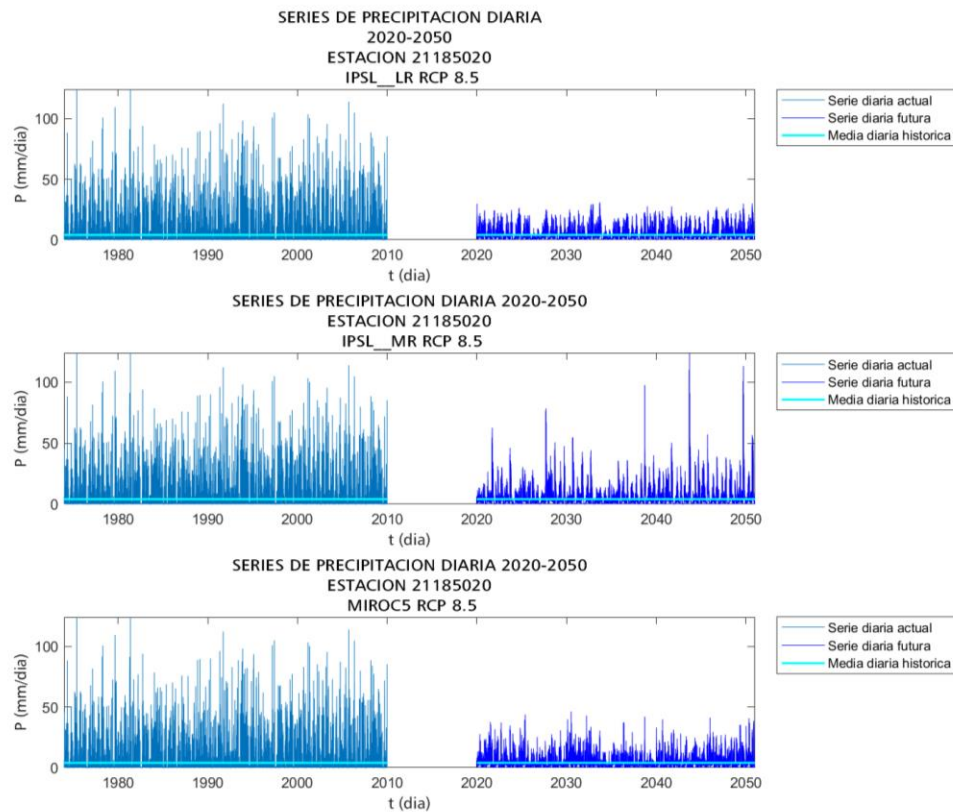


Se puede observar una disminución marcada de la precipitación en los tres modelos, con mayor intensidad en el modelo MIROC5, además se puede observar un incremento en los eventos extremos como es el caso del modelo IPSL_CM5A_MR en el cual se concentra la lluvia en meses o días específicos. Parece no conservarse la distribución de la

precipitación histórica pero ya que se han considerado diferentes patrones según la tipología, así como una combinación del patrón observado con los datos de cambio climático se puede establecer una posible disminución de la cantidad de lluvia diaria, así como un posible aumento de su intensidad.

En el caso del escenario 8.5, para todos los modelos se evidencia una disminución de la precipitación y de manera más marcada en el modelo IPSL_CM5A_LR como en el escenario anterior, en el caso del modelo IPSL_CM5A_MR se observan posibles eventos extremos ya que la precipitación se concentra en días específicos, como se observa en la **Figura 3-16**.

Figura 3-16: Serie de precipitación diaria, para la estación ejemplificada, en cada uno de los modelos escogidos, para el escenario RCP 8.5.

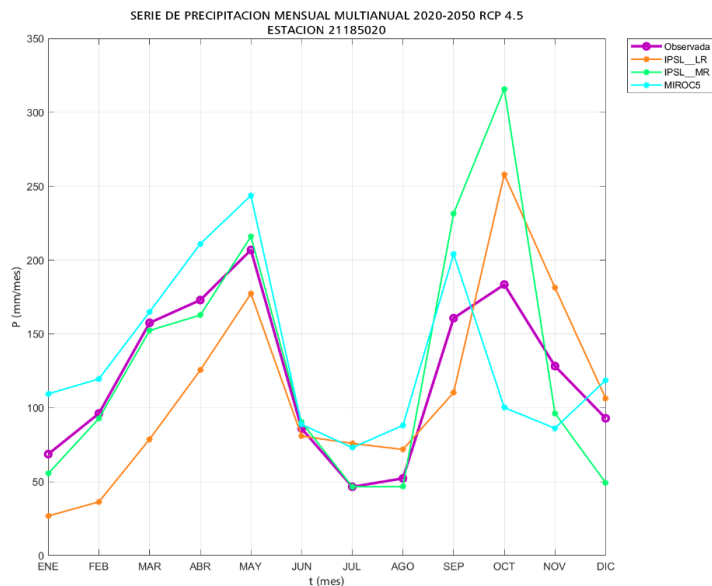


A pesar de que a nivel anual se establecen en su mayoría años húmedos, al visualizarlo a nivel diario es evidente una reducción diaria de la precipitación con un aumento de posibles

eventos extremos en los que llueve una cantidad importante en un periodo reducido, lo cual aumenta los totales anuales.

Los datos anteriores fueron agregados a nivel mensual para calcular la media mensual multianual en el periodo 2020-2050 y realizar su comparación con la media mensual multianual observada, para cada una de las estaciones de interés, lo mencionado se muestra en la **Figura 3-17** para la estación 21185020-Chicoral en el escenario RCP 4.5, para las demás estaciones ver el anexo 3.4.2.

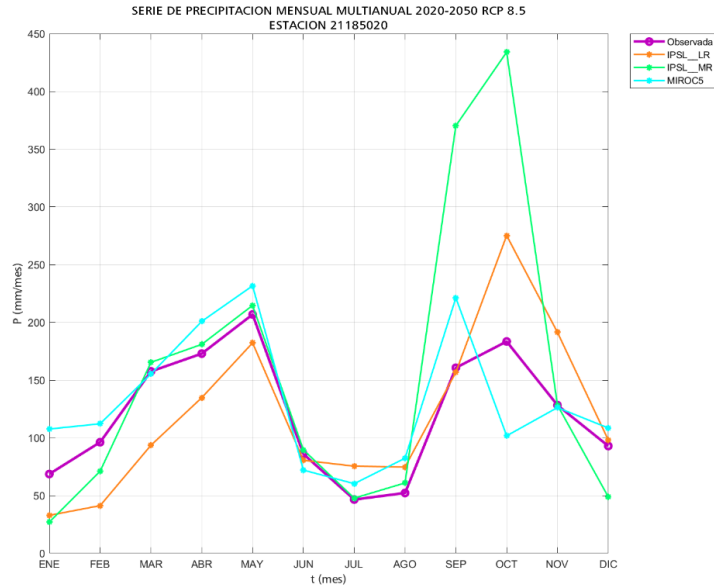
Figura 3-17: Serie de precipitación mensual multianual, para la estación ejemplificada, en cada uno de los modelos escogidos, para el escenario RCP 4.5.



Para este apartado se indicará lo observado para cada uno de los modelos, en el caso del modelo IPSL_CM5A_LR se evidencia una disminución en la primera parte del año, de enero a abril con respecto al promedio, y un incremento en los meses de julio, agosto, octubre, noviembre y diciembre, además se observa una reducción de la precipitación para los meses de junio y septiembre. En el caso del modelo IPSL_CM5A_MR presenta una reducción del promedio observado de enero a abril y un aumento desde mayo a octubre, para finalizar con una reducción en noviembre y diciembre. Finalmente, el modelo MIROC5, aumenta los valores de precipitación para casi todos los meses, con excepción

de los meses de octubre y noviembre. En el caso del escenario RCP 8.5 se tiene lo observado en la **Figura 3-18**.

Figura 3-18: Serie de precipitación mensual multianual, para la estación ejemplificada, en cada uno de los modelos escogidos, para el escenario RCP 8.5.

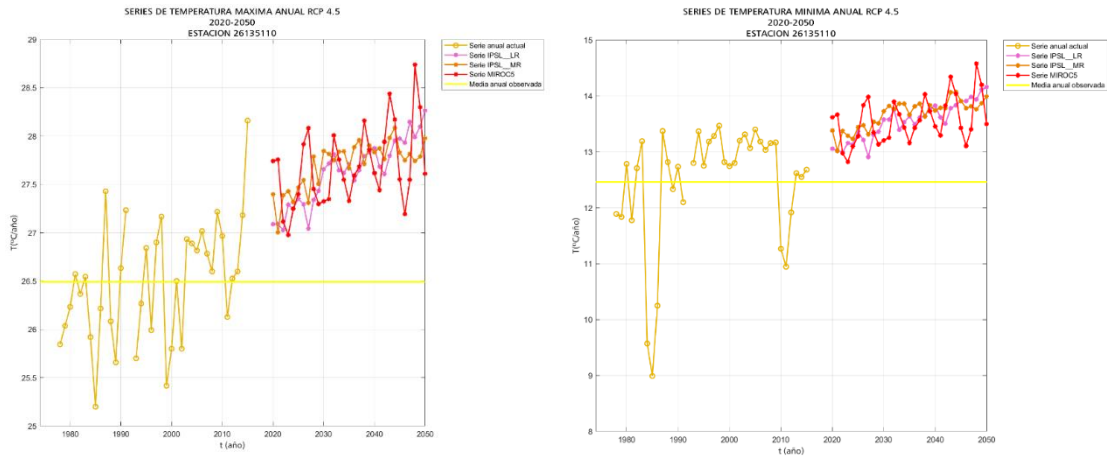


Para este escenario en el caso del modelo IPSL_LR, presenta una disminución en la precipitación desde enero hasta junio, y en el resto del año tiene un aumento de esta. Para el modelo IPSL_MR se presenta un aumento de la precipitación en casi todos los meses del año con excepción de junio y diciembre, con un notorio aumento en los meses de enero, febrero y diciembre. Finalmente, el modelo MIROC5 muestra un aumento en todos los meses del año con excepción de junio y octubre.

3.5.2 Temperatura proyectada

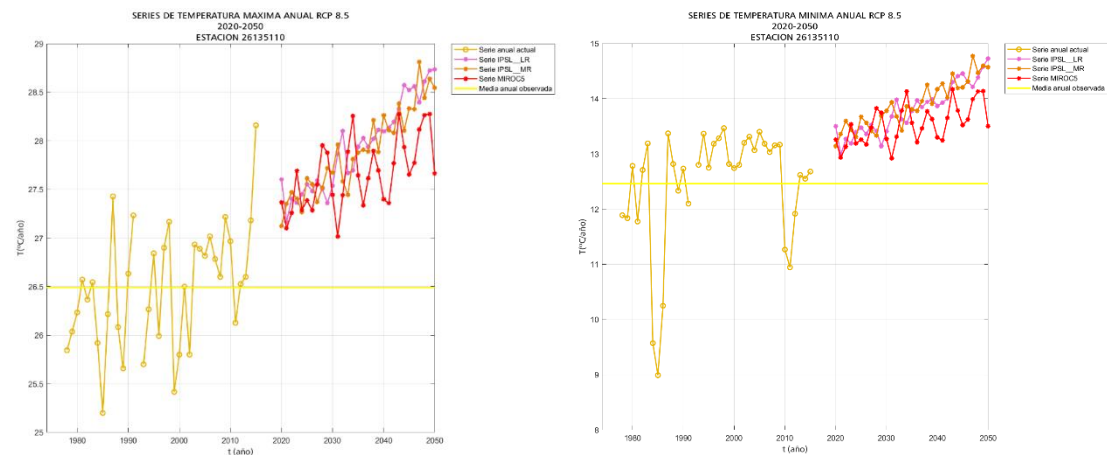
Esta variable se proyectó a nivel mensual teniendo un incremento notorio con respecto a los valores observados para todas las estaciones de medición de temperatura en la cuenca. Se muestra en la **Figura 3-19** y en la **Figura 3-20** los promedios anuales para la estación climatológica ordinaria, 26135110 – Veracruz, para visualizar las gráficas de las demás estaciones ir al anexo 3.4.3.

Figura 3-19: Serie promedios anuales de temperatura máxima y mínima, para la estación ejemplificada, en cada uno de los modelos para el escenario RCP 4.5.



En la anterior es evidente un aumento considerable de la temperatura el cual ya era notorio en la serie observada, para el año 2050 se alcanzan temperaturas entre los 27.5°C y los 28.5°C, cuando su promedio anual observado tiene un valor cercano a los 26.5°C se tiene un aumento de 1°C a 2°C en la temperatura máxima. Para la temperatura mínima se observa el mismo comportamiento de incremento en la temperatura, para el año 2050 se alcanzan temperaturas entre los 13.5°C y los 14.5°C, cuando su promedio anual observado tiene un valor cercano a los 12.5°C se tiene nuevamente un aumento de 1°C a 2°C en la temperatura mínima. En el caso del escenario RCP 8.5 se tienen las gráficas mostradas a continuación.

Figura 3-20: Serie promedios anuales de temperatura máxima y mínima, para la estación ejemplificada, en cada uno de los modelos para el escenario RCP 8.5.



Para el año 2050 se alcanzan temperaturas entre los 27.5°C y los 29°C, con un promedio anual observado cercano a los 26.5°C se tiene un aumento de 1°C a 2.5°C en la temperatura máxima. Para la temperatura mínima se observa el mismo comportamiento de incremento en la temperatura el cual ya era notorio en la serie observada, para el año 2050 se alcanzan temperaturas entre los 13.5°C y los 15.5°C, cuando su promedio anual observado tiene un valor cercano a los 12.5°C se tiene nuevamente un aumento de 1°C a 2.5°C en la temperatura mínima.

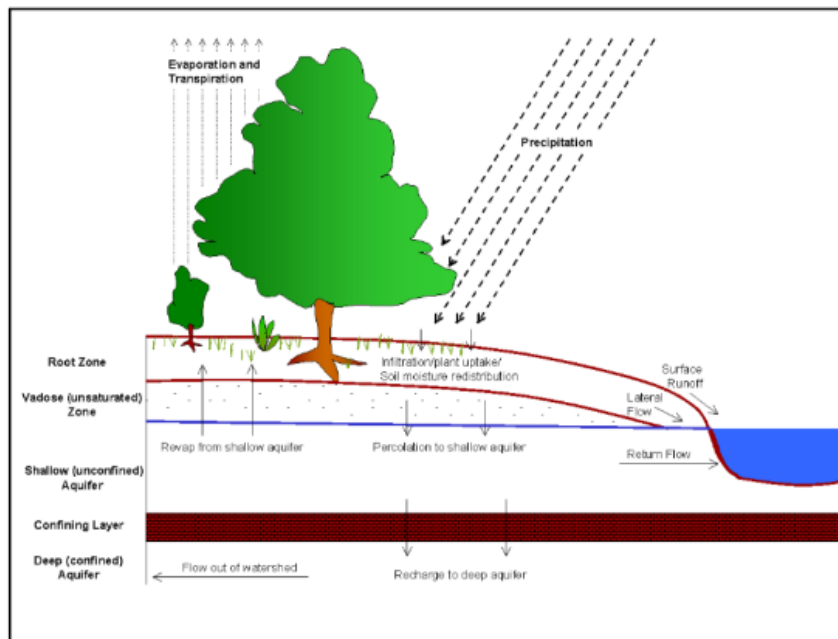
3.6 Resumen propuesta metodológica y cambios futuros asociados a las variables climáticas.

Como se observó en este capítulo, se propone una reducción de la escala de la precipitación que usa el método delta para reducir la escala geográfica de la precipitación y la temperatura a nivel mensual y el método de máxima entropía para reducir la escala geográfica de la precipitación a nivel diario, teniendo en cuenta la tipología de cada año dentro de la serie de interés con el fin de usar los patrones asociados a dicho tipo de año. Realizando lo mencionado, se obtiene un cambio notorio en la precipitación donde se observa una marcada disminución de la precipitación diaria, aun cuando los totales anuales parecen aumentar en algunos años, evidenciando la posibilidad de eventos extremos donde la lluvia se concentra en periodos reducidos de tiempo. En cuanto a la temperatura se observa un incremento notorio, que para el año 2050 tendrá un valor de aumento de hasta 2°C para el escenario más optimista y de hasta 2.5°C para el pesimista.

4 Modelación hidrológica en SWAT

La modelación en SWAT se utilizó como una herramienta para el cálculo de los caudales a nivel mensual, haciendo uso de la precipitación a nivel diario. Este modelo fue obtenido al inicio de esta investigación, calibrado y validado, para el periodo base (1976-2015) provisto por la Pontificia Universidad Javeriana (2017), escogido por dicha fuente dado su buen comportamiento en relación con otros modelos hidrológicos calculados. El modelo SWAT simula el proceso lluvia-escorrentía, dividiendo la cuenca en áreas de características similares en su pendiente, tipo y uso de suelo, siendo estas las unidades de respuesta hidrológica (HRUs) en las cuales se realiza un balance hídrico, de acuerdo con el ciclo hidrológico esquematizado en la **Figura 4-1**, para establecer finalmente el flujo de agua en el canal principal.

Figura 4-1: Esquematación ciclo hidrológico SWAT (Pontificia Universidad Javeriana, 2017).

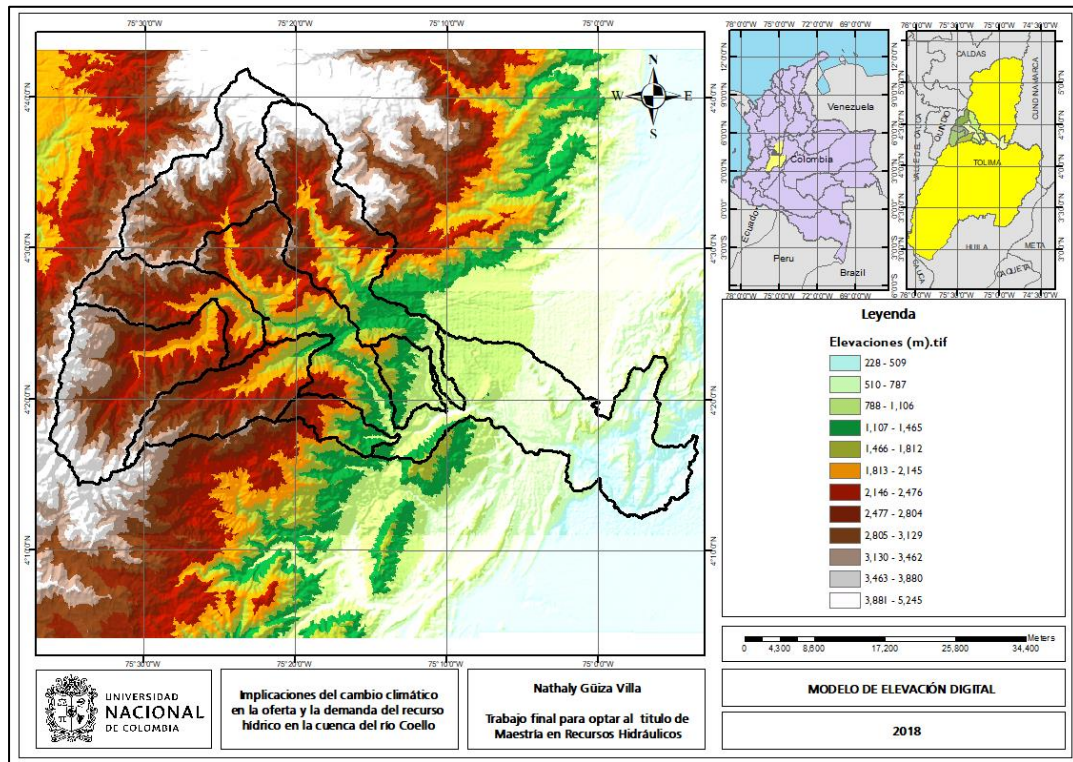


Para establecer la modelación futura se establecen las variables de entrada indicadas a continuación.

4.1 Modelo de elevación digital

Para la realización de este trabajo se utilizó un modelo de elevación digital con una resolución de pixel de 12.5x12.5m, obtenido del portal de Alaska Satellite Facility (NASA, 2018). En la **Figura 4-2** se pueden observar elevaciones desde los 228 m.s.n.m. hasta los 5245 m

Figura 4-2: Modelo de elevación digital cuenca río Coello

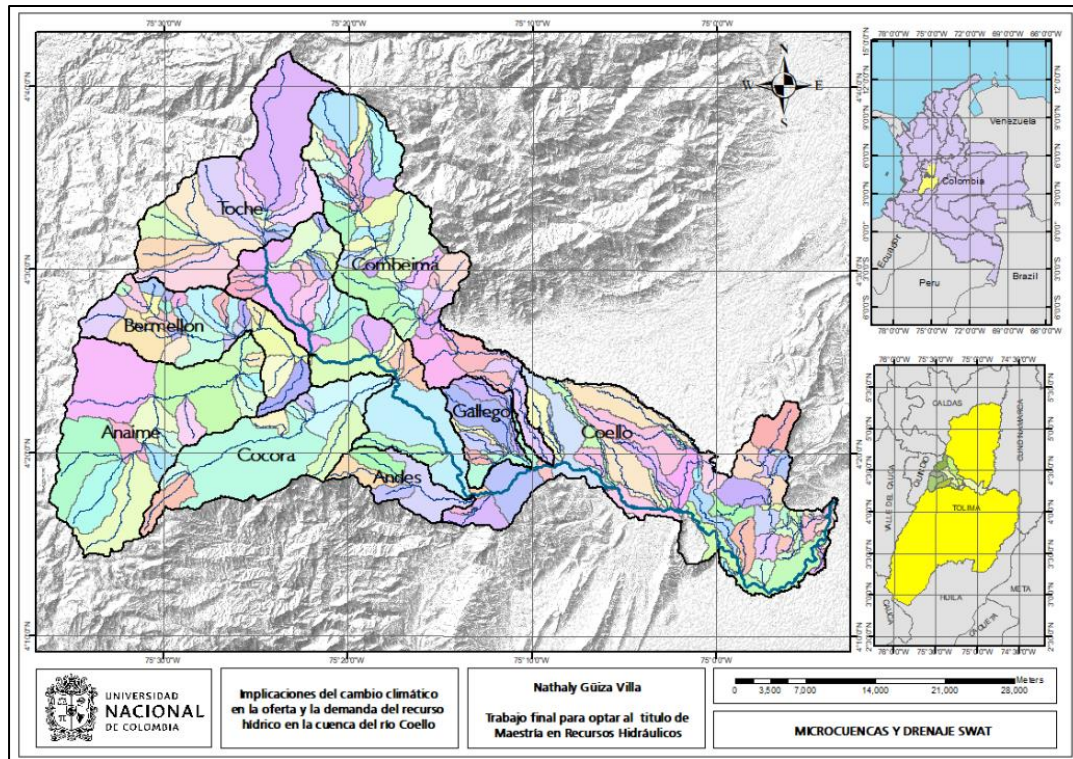


4.2 Microcuencas y drenaje

Estos dos objetos fueron facilitados por el estudio previo realizado en la cuenca del río Coello, siendo ajustados para su uso en el modelo. Son un total de 174 microcuencas y su

correspondiente drenaje, dentro de las 8 subcuencas definidas por el estudio base (Pontificia Universidad Javeriana, 2017), como se observa en la **Figura 4-3**.

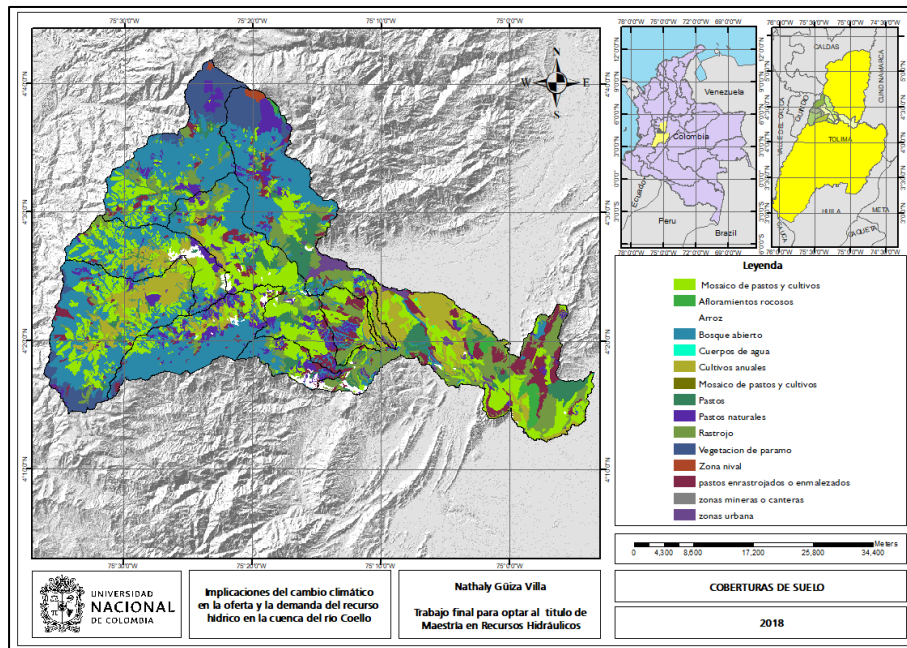
Figura 4-3: Microcuencas utilizadas en el modelo SWAT



4.3 Coberturas de suelos

En el estudio base se realizaron tres diferentes mapas de coberturas para los años 2000, 2002 y 2007, para este trabajo se utilizó el mapa de coberturas de suelo del año 2007, el cual se asume constante en el tiempo. Sin embargo, es de destacar que para futuras investigaciones este parámetro puede ser modificado con el fin de investigar las implicaciones de dicho cambio. El mapa de coberturas de suelos obtenido de la investigación base realizado por la Pontificia Universidad Javeriana (2017), se muestra en la **Figura 4-4**.

Figura 4-4: Mapa de coberturas de suelos año 2007



Para su uso en el modelo se especifican los códigos de equivalencia provistos por el estudio base, como se indican en la **Tabla 4-1**

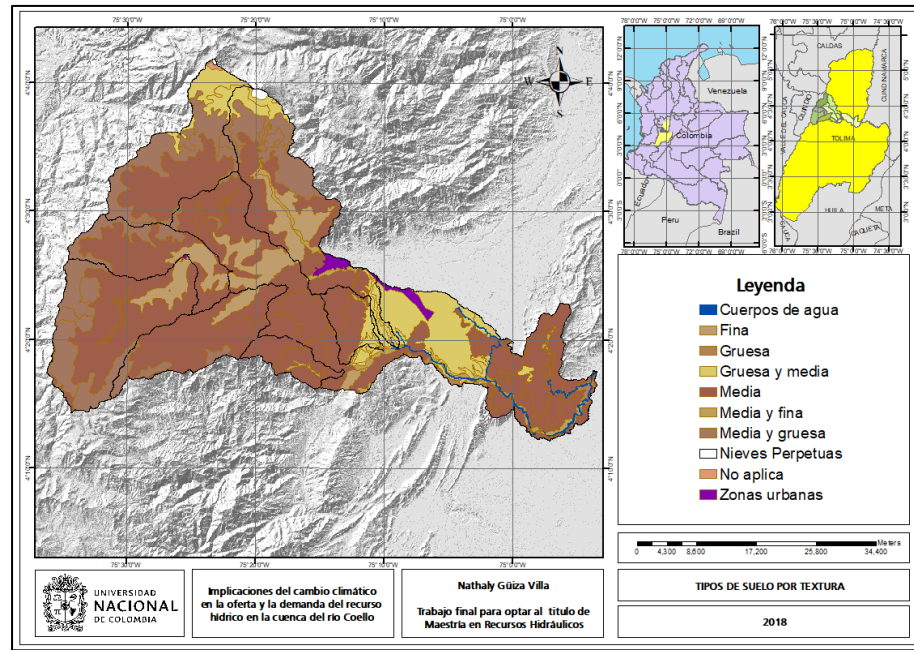
Tabla 4-1: Equivalencias coberturas modelo SWAT (Pontificia Universidad Javeriana, 2017).

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN SWAT	DESCRIPCIÓN COBERTURA 2007
AGRL	Tierra agrícola genérica	Mosaico de pastos y cultivos
BROM	Cebadilla de pradera	Vegetación de paramo
COTS	algodón de tierras altas	Cultivos anuales
FRST	Bosque-Mixto	Bosque abierto
MESQ	Mezquite Dulce	Rastrojo
PAST	Pastos	Pastos naturales
RICE	Arroz	Arroz
RNGB	Maleza-Variado	Pastos enrastrados o enmalezados
RNGE	Césped-variado	Pastos
URMD	Residencial-Densidad media	Zonas urbanas
URML	Residencial-Densidad Media/Baja	Afloramientos rocosos
WATR	Agua	Cuerpos de agua
SWRN	Variedad de suelos áridos del Suroeste de USA	Zonas mineras o canteras

4.4 Tipos de suelos

La investigación base (2017), hizo uso del estudio de suelos del departamento del Tolima en escala 1:100.000 para su estudio, este mismo fue utilizado en el caso de este trabajo, como se muestra en la **Figura 4-5**.

Figura 4-5: Tipos de suelos clasificados por textura cuenca del río Coello.



Para la modelación fue necesario usar una tabla de suelos denominada “usersoil” para establecer el modelo, la cual fue suministrada por el estudio base, y no tiene ningún cambio para esta investigación ya que se considera que los tipos de suelo son invariantes en el tiempo, dada la magnitud de tiempo en la que sufren algún cambio.

4.5 Variables climáticas

El modelo necesita como variables de entrada las indicadas a continuación, las cuales en su mayoría serán calculadas nuevamente y otras permanecerán constantes como se indica en la **Tabla 4-2**.

Tabla 4-2: Variables climáticas modelo SWAT.

CODIGO SWAT	DESCRIPCIÓN	ORIGEN
PCPMM	Precipitación total mensual	Método delta para obtener precipitación mensual en el sitio
PCPD	Número de días de precipitación al mes	Método propuesto de máxima entropía para obtener precipitación diaria en el sitio
PCPSTD	Desviación estándar precipitación diaria	
PCPSKW	Coeficiente de asimetría media mensual de la precipitación diaria	
PR_W1	Probabilidad de ocurrencia de lluvia después de un día seco	
PR_W2	Probabilidad de ocurrencia de lluvia después de un día húmedo	
TMPMX	Temperatura máxima media mensual	Método delta para obtener temperatura mensual en el sitio
TMPMN	Temperatura mínima media mensual	
TMPSTDMX	Desviación estándar temperatura máxima	
TMPSTDMN	Desviación estándar temperatura mínima	
SOLARAV	Radiación solar	Se asume constante
WNDVAV	Velocidad del viento	
DEWPT	Punto de rocío	

En el anexo 4.1, se detallan los valores de cada una de las variables definidas anteriormente para cada modelo y escenario indicado previamente.

4.5.1 Precipitación

Dado que el modelo requiere una estación en cada una de las subcuencas se utilizan las estaciones virtuales realizadas en el estudio base, los datos de precipitación para cada una de ellas serán los datos calculados para la estación climatológica más cercana (menor distancia), siguiendo la metodología utilizada por el estudio base, con el fin de evitar una interpolación que no represente la precipitación en cada una de las zonas. Dichas estaciones virtuales junto con las estaciones físicas presentes en la cuenca se muestran en la **Figura 4-6**. A su vez se muestra la precipitación promedio anual observada en cada una de las microcuencas en la **Figura 4-7**.

Figura 4-6: Estaciones virtuales y físicas de precipitación usadas en la modelación.

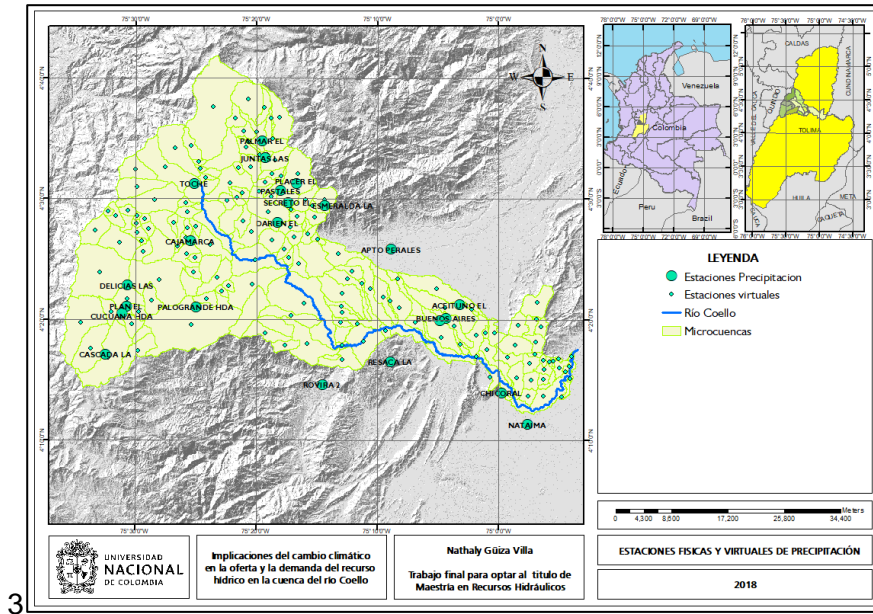
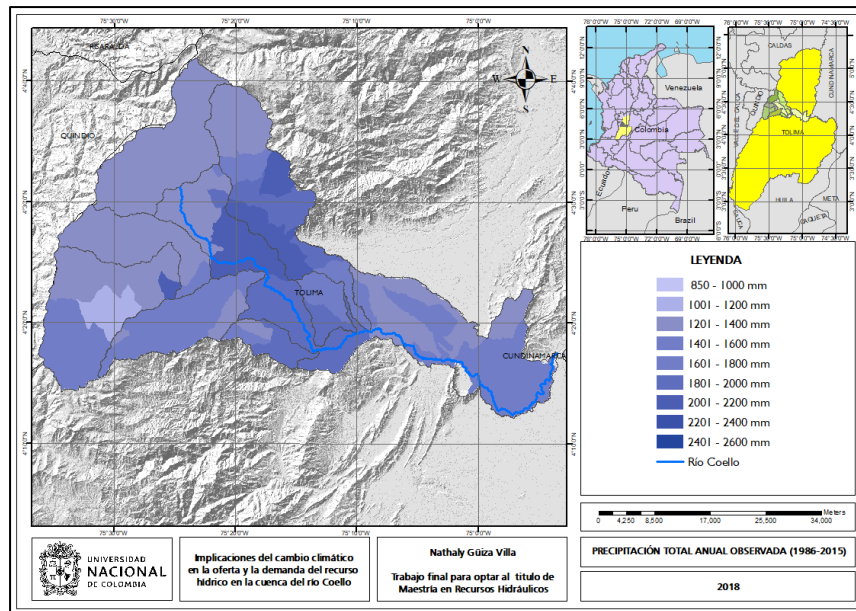


Figura 4-7: Precipitación total anual promedio en cada una de las microcuenas para el periodo observado (1986-2015).



A continuación, en la **Figura 4-8**, en la **Figura 4-10** y en la **Figura 4-12** se mostrarán los valores de precipitación proyectada en cada una de las microcuenas del modelo SWAT, así como la diferencia entre los anteriores y los valores observados para establecer un

cambio en su valor, en cada modelo del escenario RCP 4.5 en la **Figura 4-9**, en la **Figura 4-11** y en la **Figura 4-13**.

Figura 4-8: Precipitación total anual promedio en cada una de las microcuenclas para el modelo IPSL_LR en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

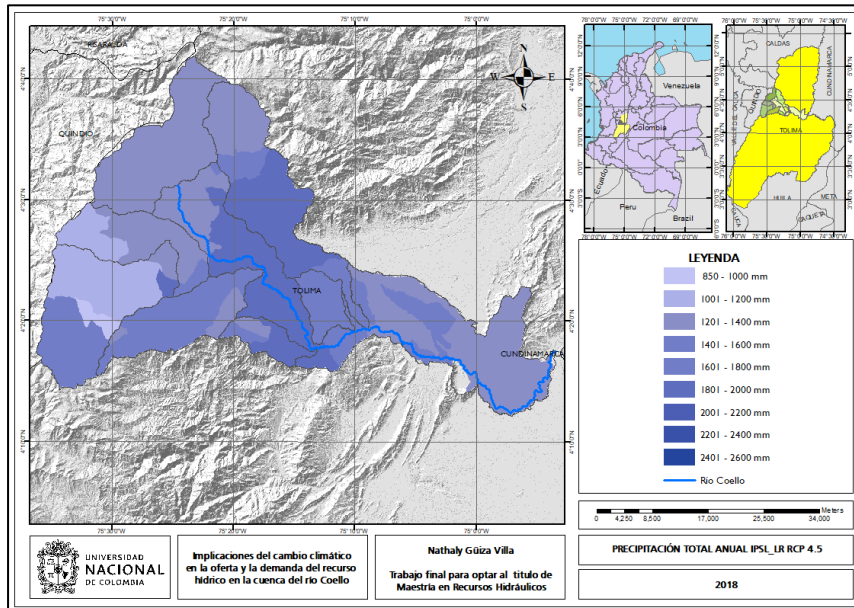


Figura 4-9: Cambio en la precipitación total anual promedio para el modelo IPSL_LR en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

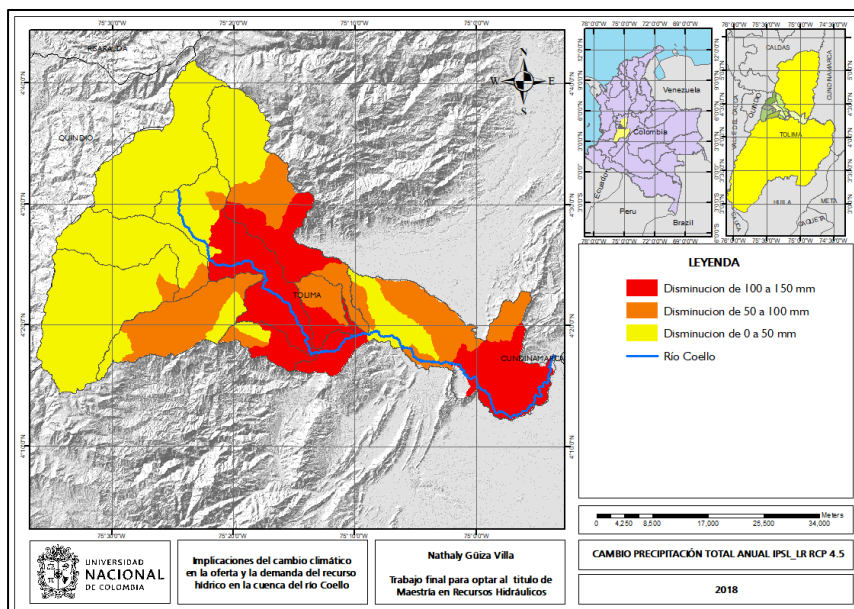


Figura 4-10: Precipitación total anual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_MR en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

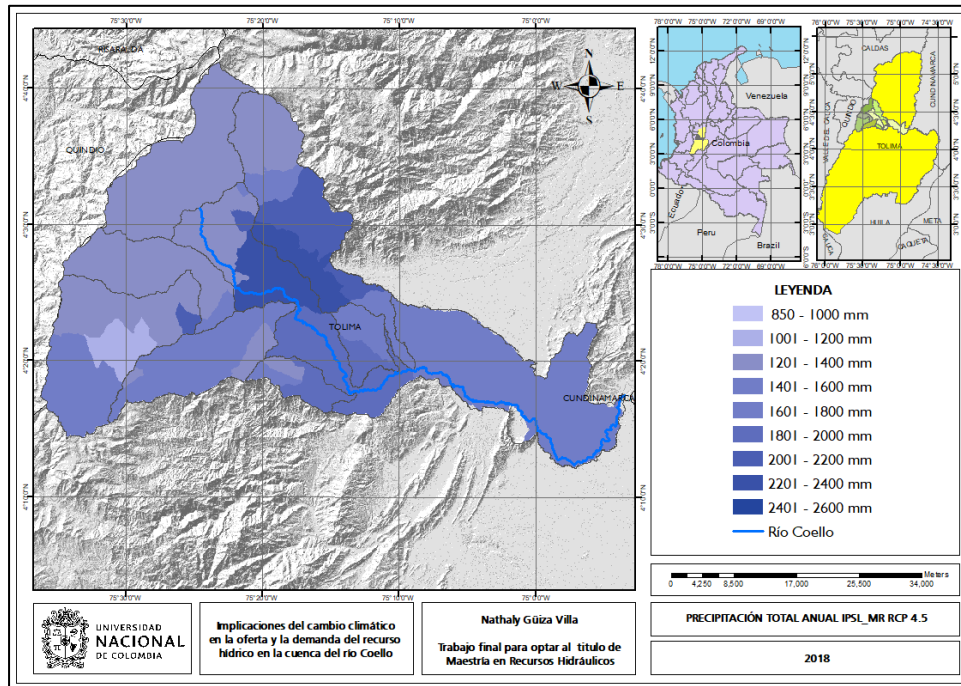


Figura 4-11: Cambio en la precipitación total anual promedio para el modelo IPSL_CM5A_MR en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

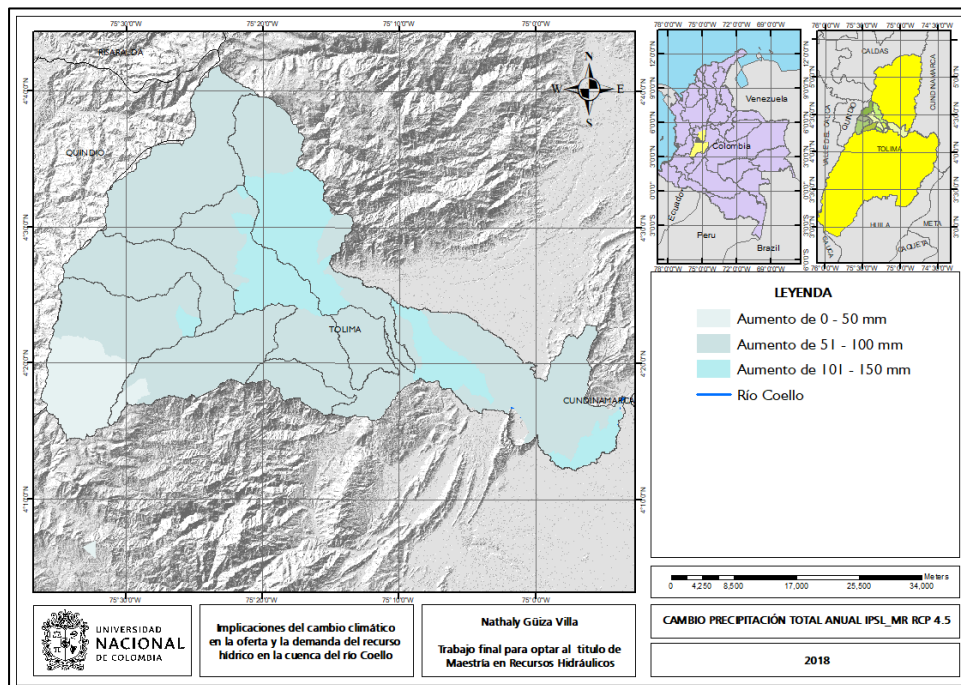


Figura 4-12: Precipitación total anual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo MIROC5 en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

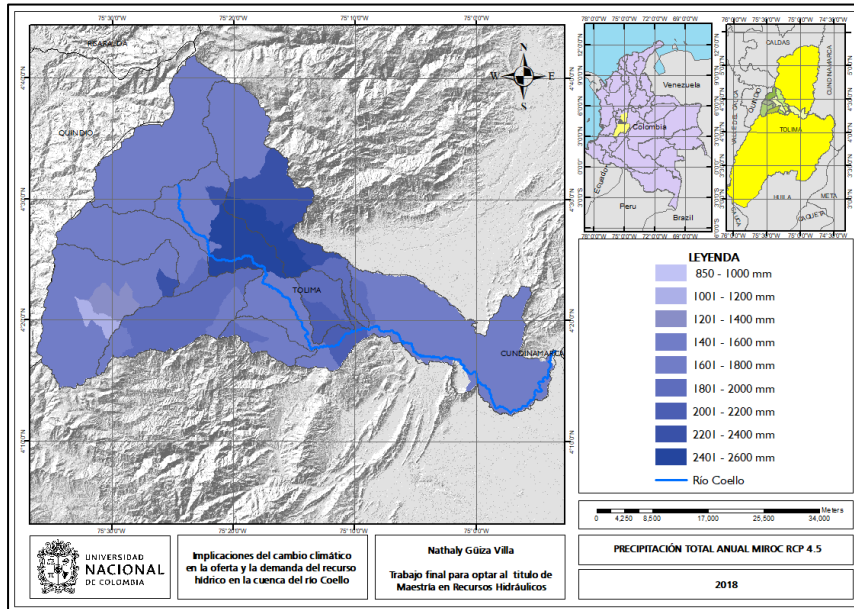
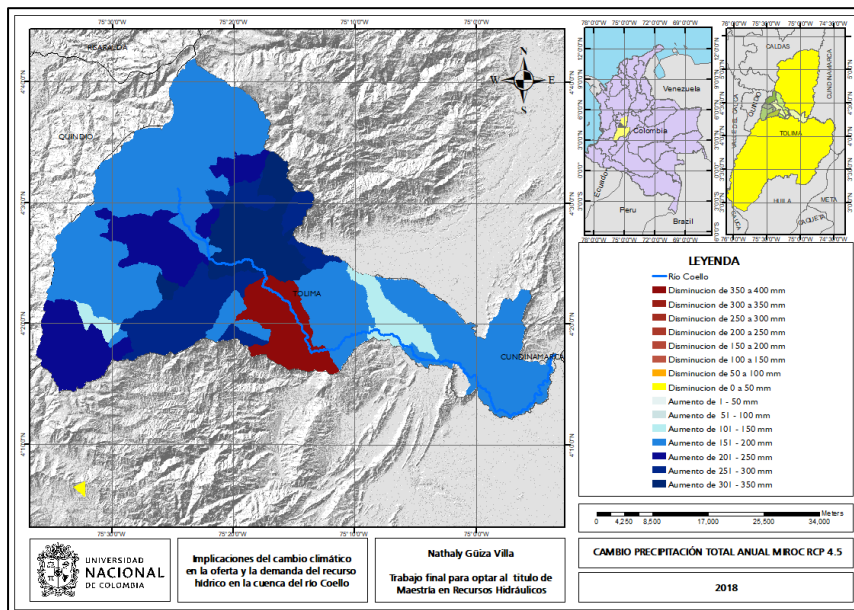


Figura 4-13: Cambio en la precipitación total anual promedio para el modelo MIROC5 en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).



El proceso anterior se repite para cada uno de los meses del año en todos los modelos.

Figura 4-14: Precipitación total mensual promedio en cada una de las microcuencas para el periodo observado (1986-2015).

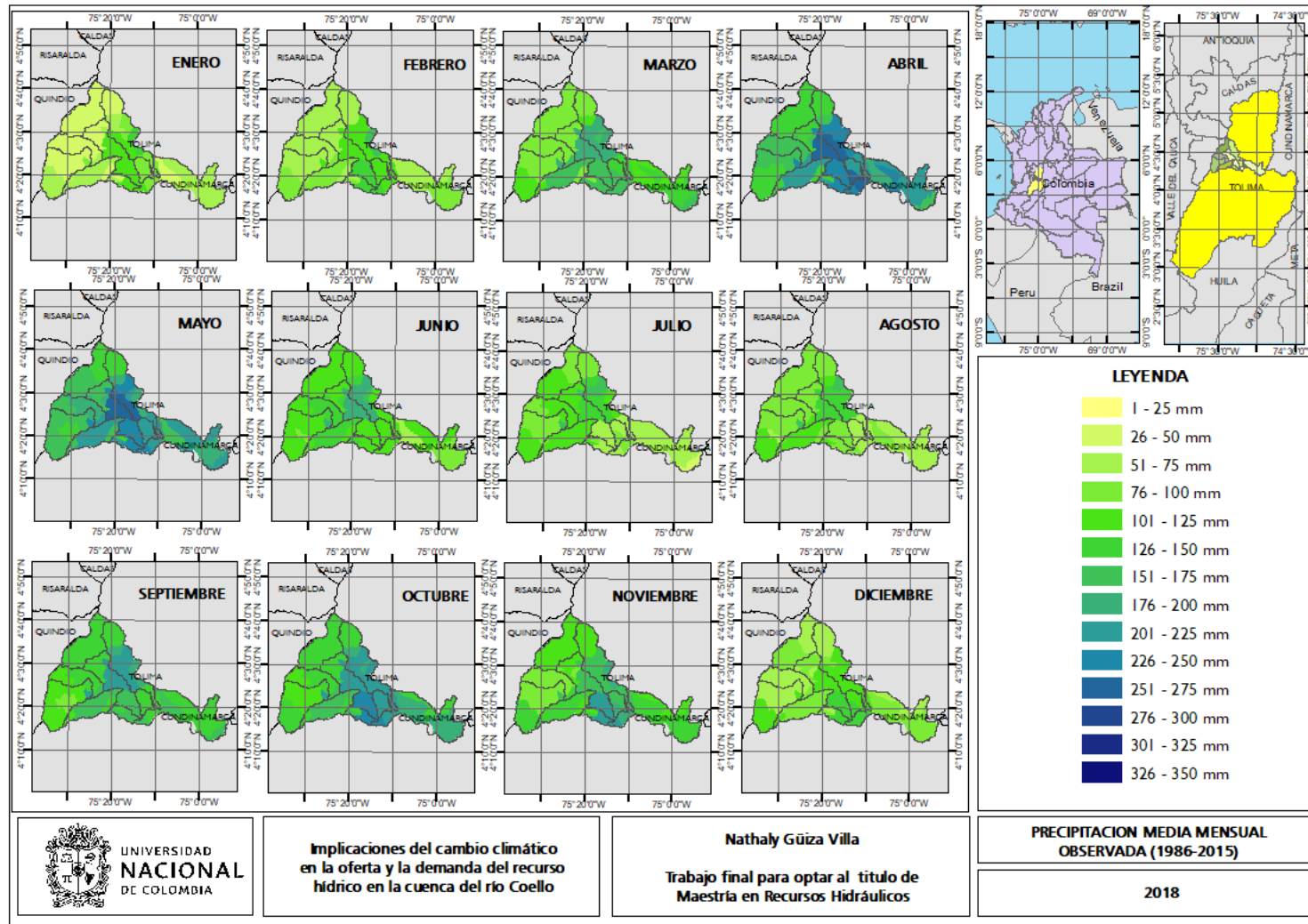


Figura 4-15: Precipitación total mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_LR en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

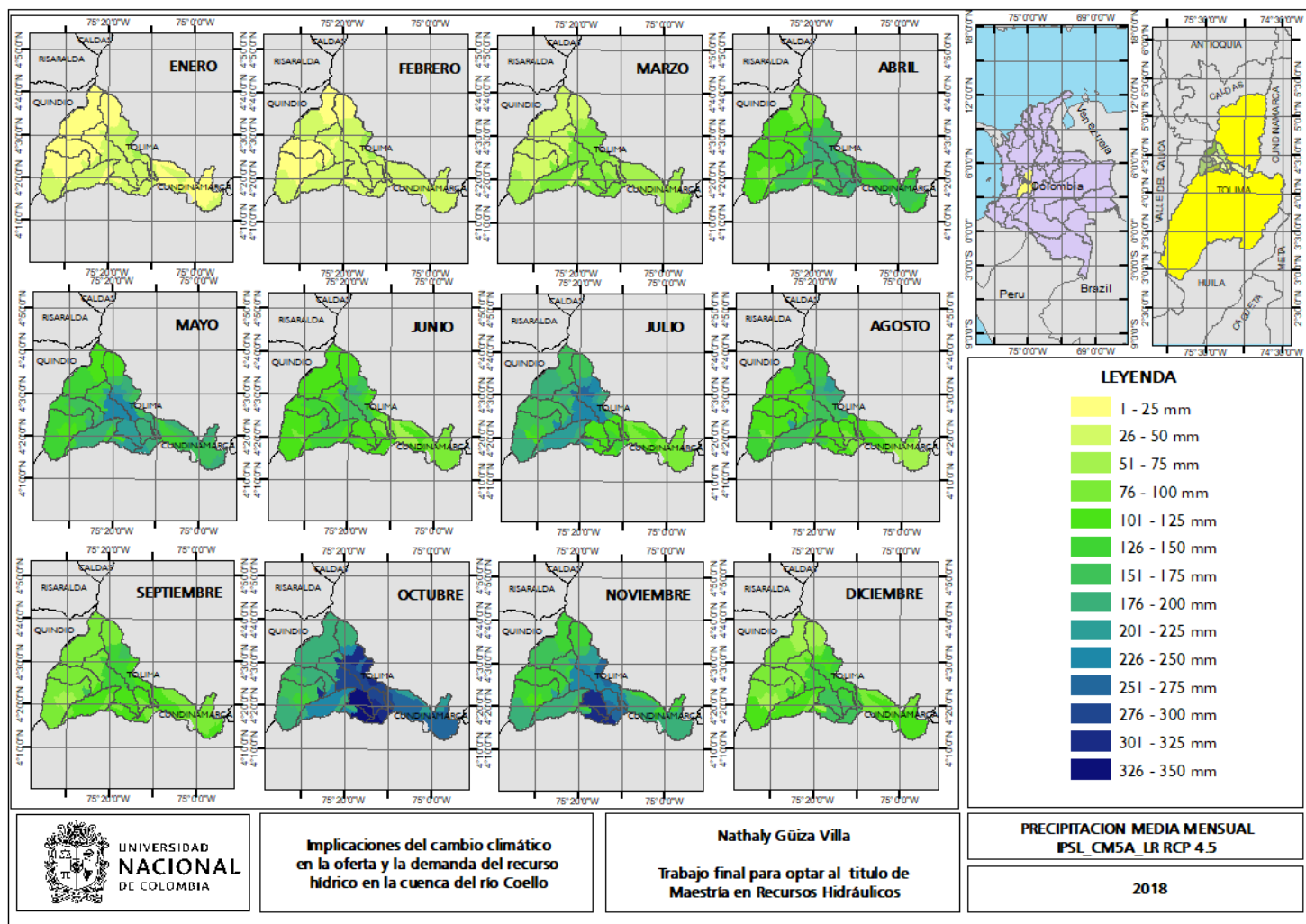


Figura 4-16: Cambio en la precipitación total mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_LR en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

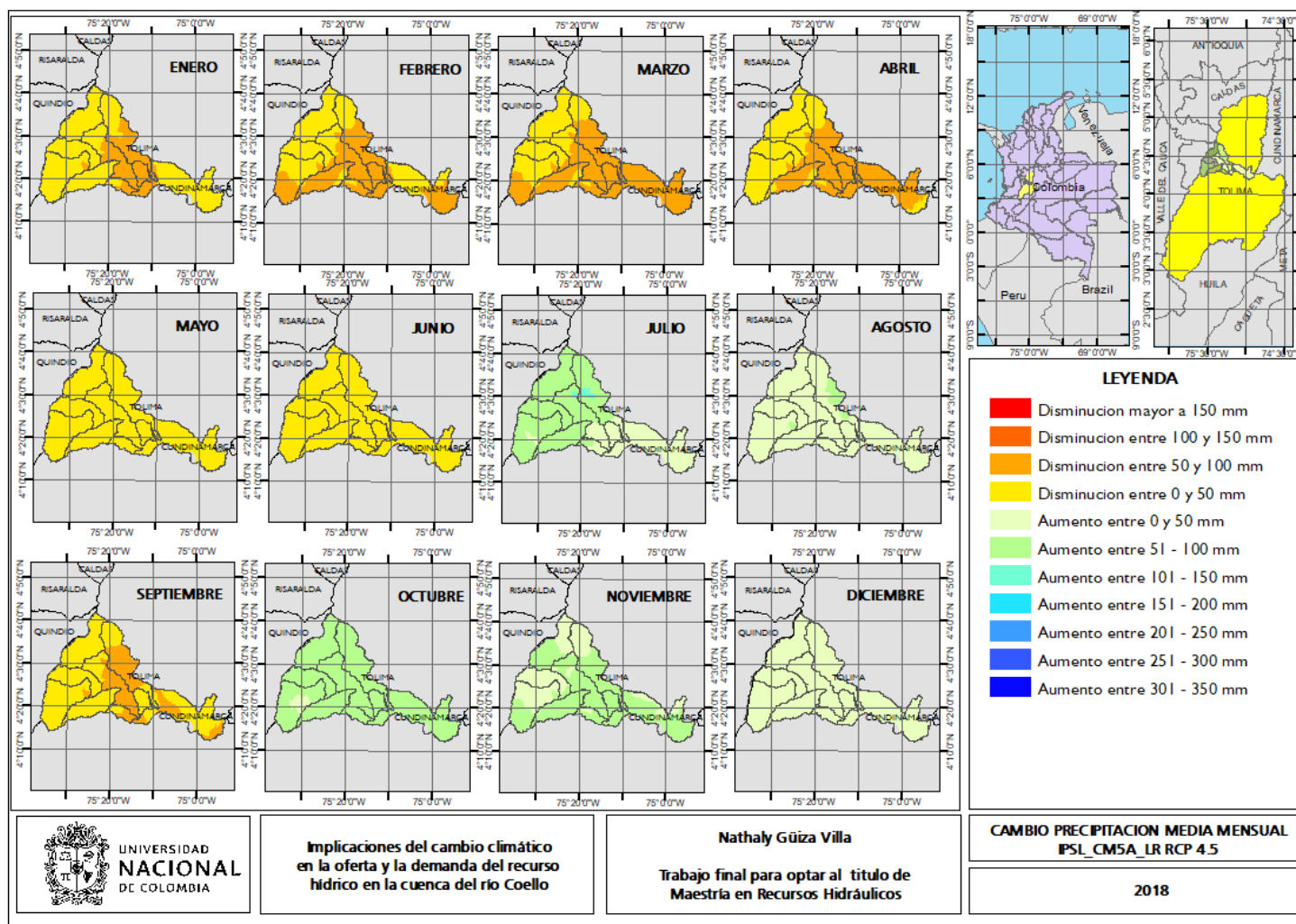


Figura 4-17: Precipitación total mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_MR en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

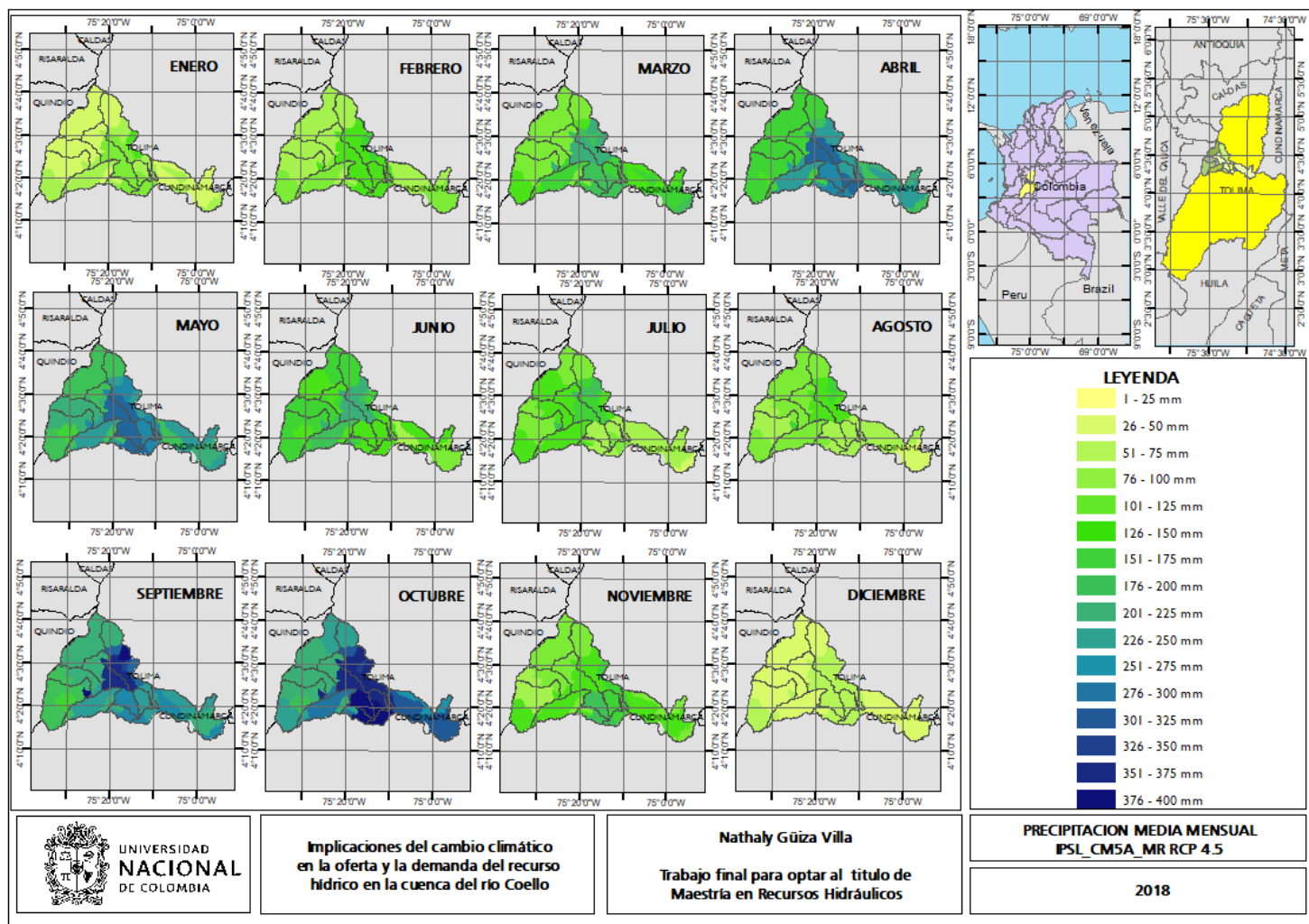


Figura 4-18: Cambio en la precipitación total mensual en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_MR en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

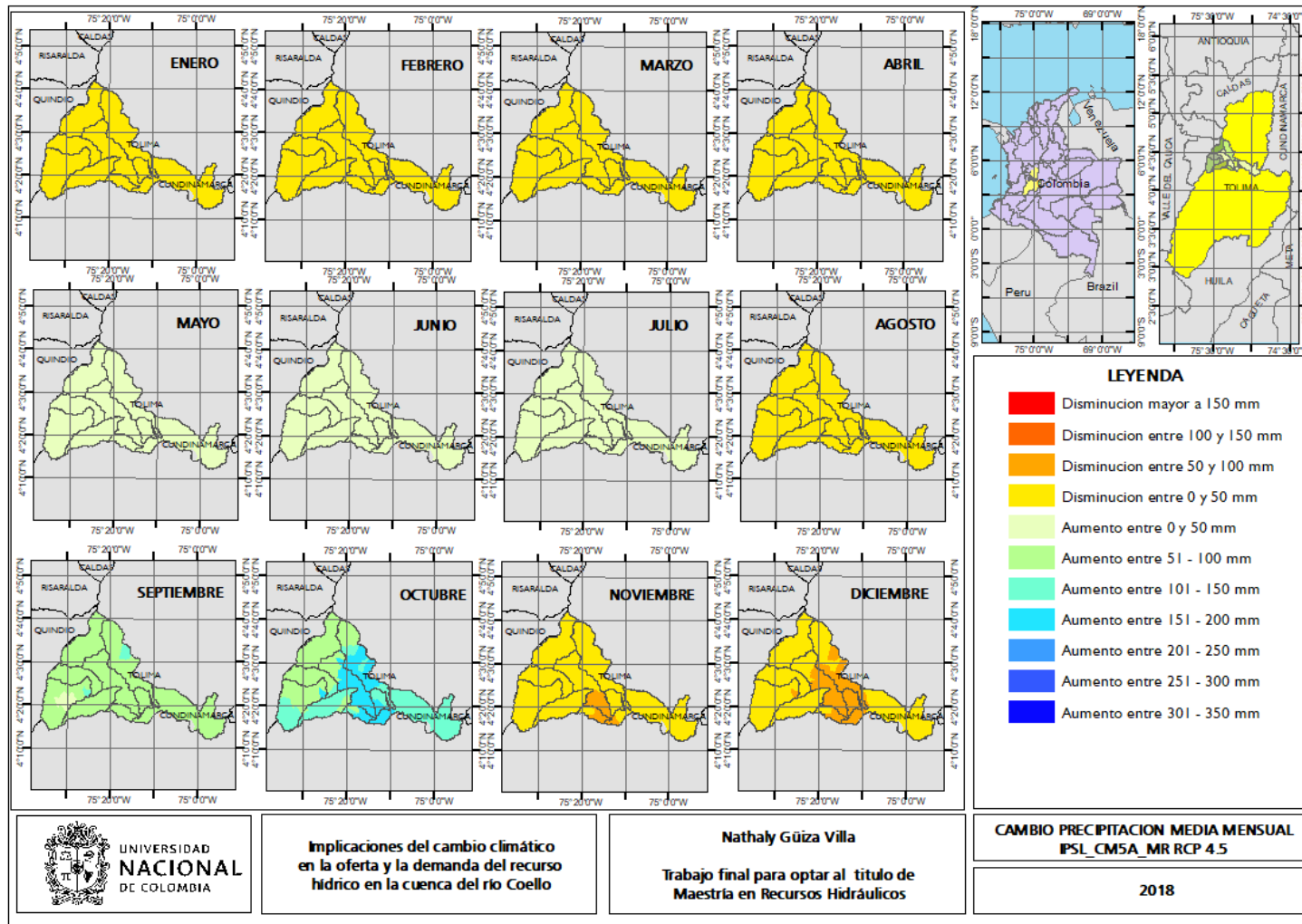


Figura 4-19: Precipitación total mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo MIROC5 en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

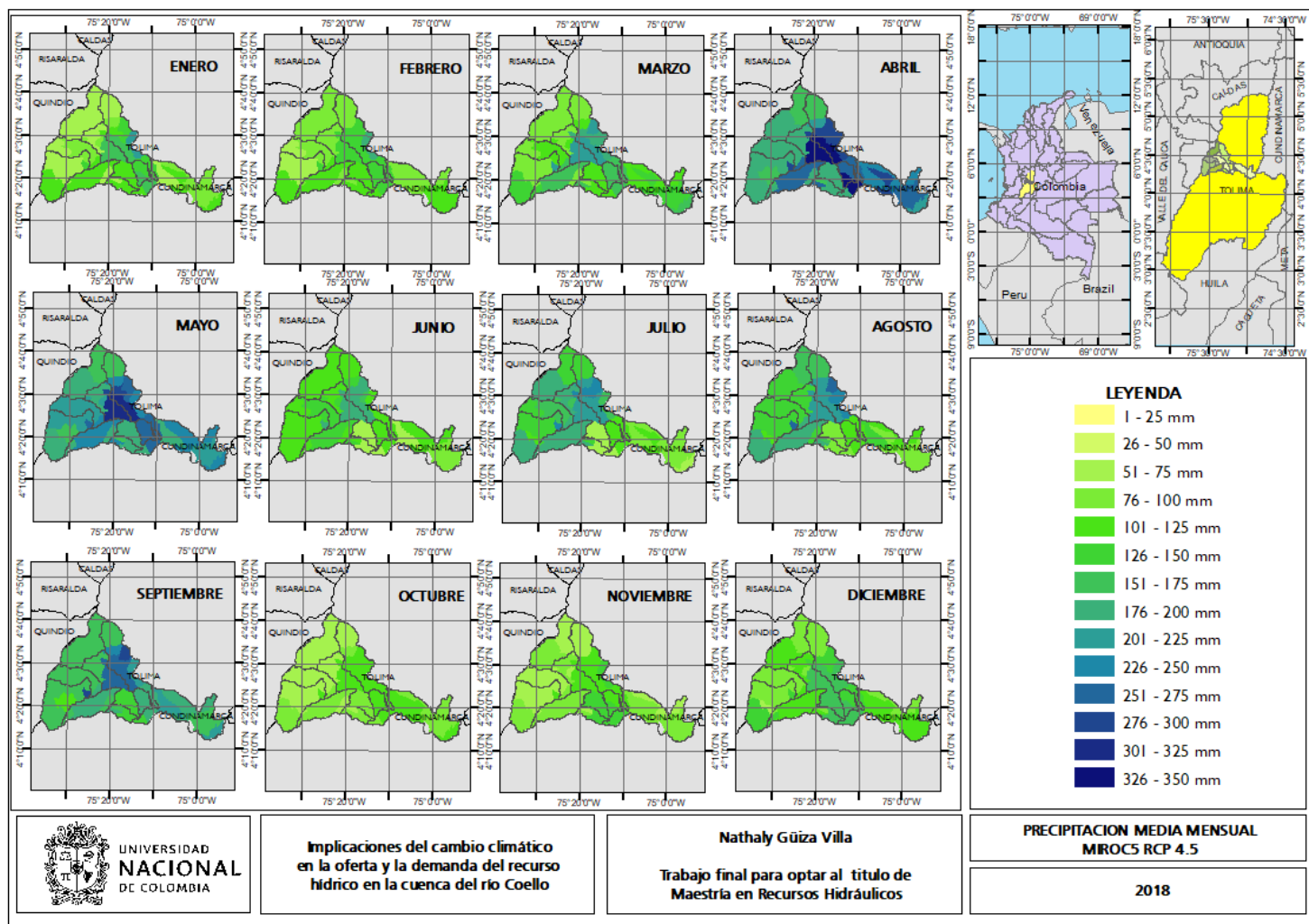
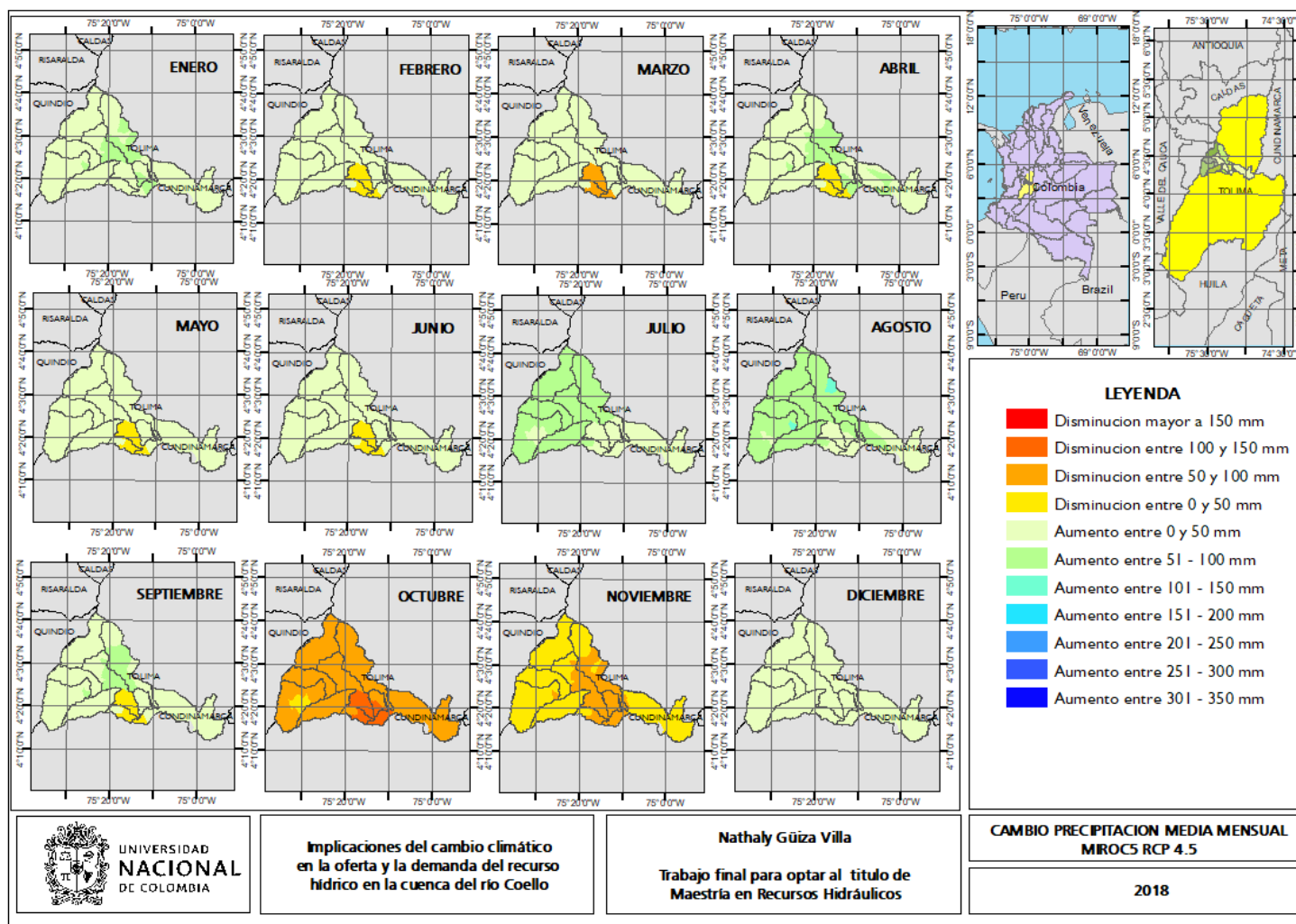


Figura 4-20: Cambio en la precipitación total mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo MIROC5 en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).



A su vez se muestran los valores proyectados en cada uno de los modelos en la **Figura 4-21**, la **Figura 4-23** y en la **Figura 4-25** para el escenario RCP 8.5, así como su posible cambio, en la **Figura 4-22**, en la **Figura 4-24** y en la **Figura 4-26**.

Figura 4-21: Precipitación total anual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_LR en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

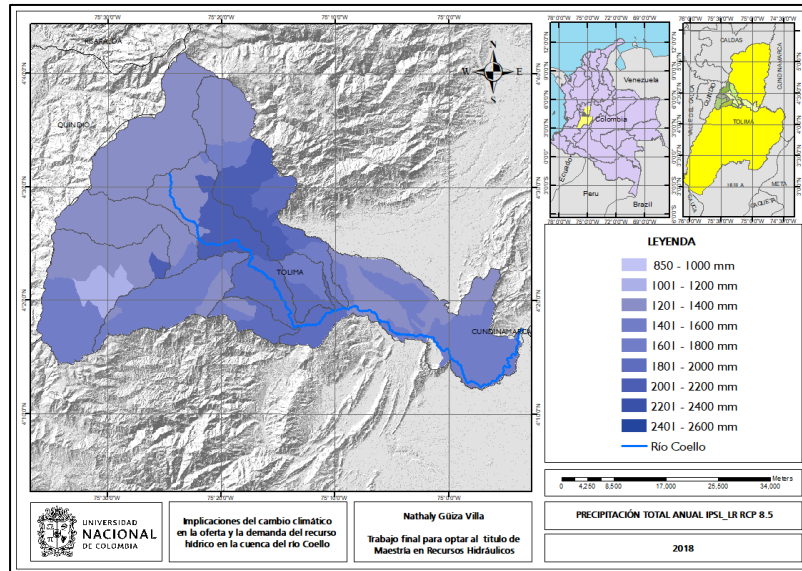


Figura 4-22: Cambio en la precipitación total anual promedio para el modelo IPSL_LR en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

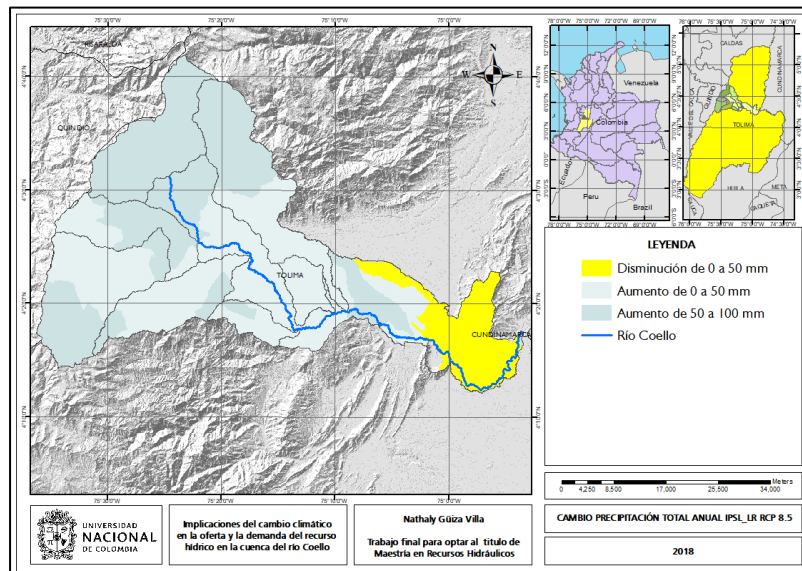


Figura 4-23: Precipitación total anual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_MR en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

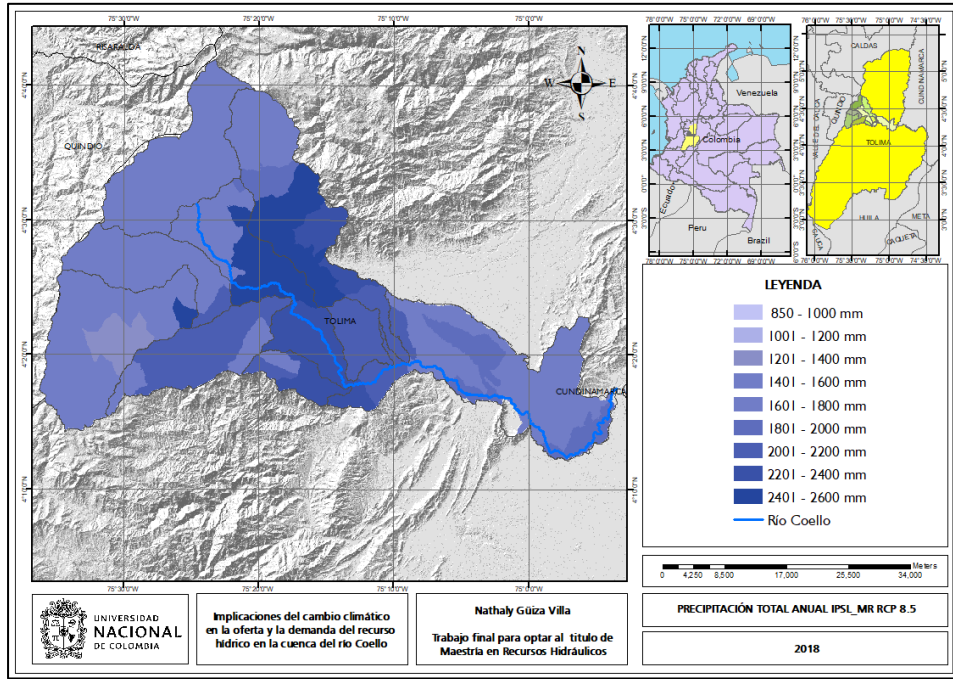


Figura 4-24: Cambio en la precipitación total anual promedio para el modelo IPSL_MR en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

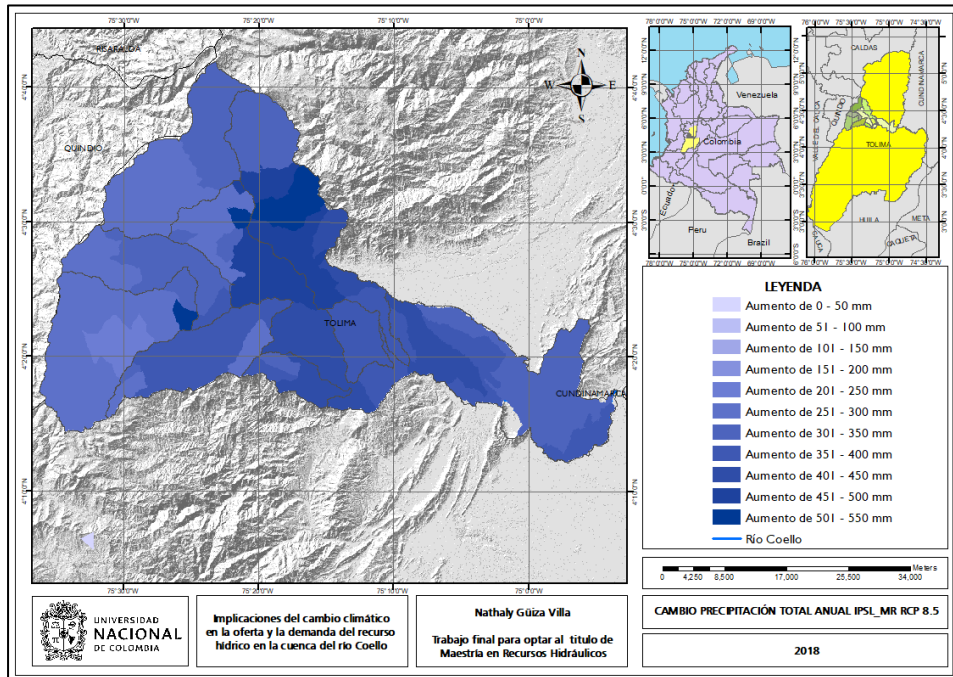


Figura 4-25: Precipitación total anual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo MIROC5 en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

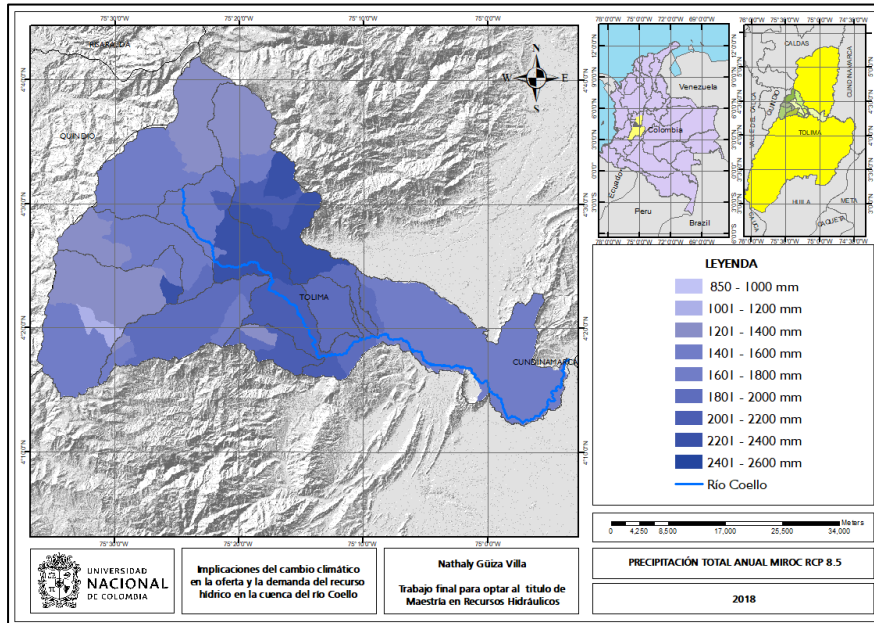
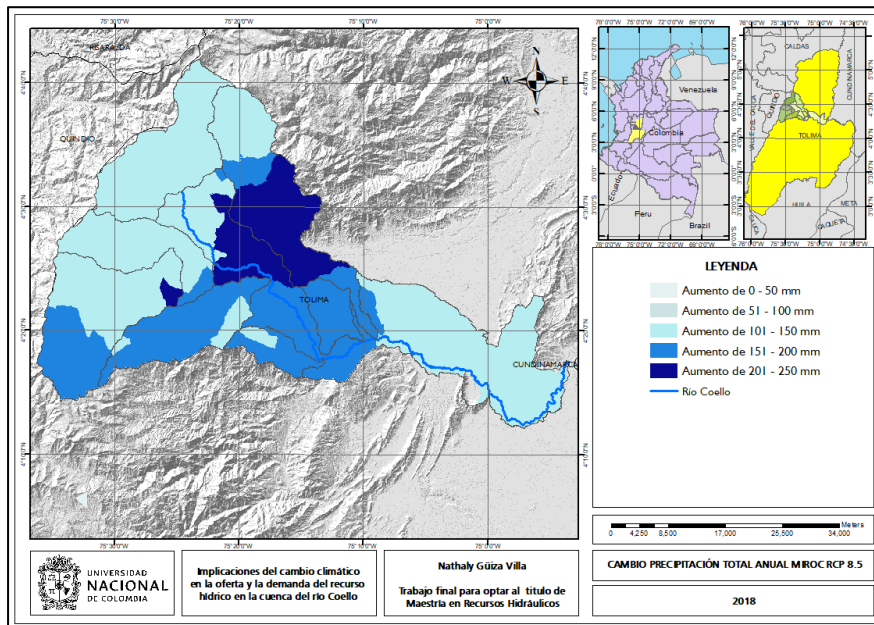


Figura 4-26: Cambio en la precipitación total anual promedio para el modelo MIROC5 en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).



Lo anterior se reproduce a una escala mensual, como en el escenario anterior.

Figura 4-27: Precipitación total mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_LR en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

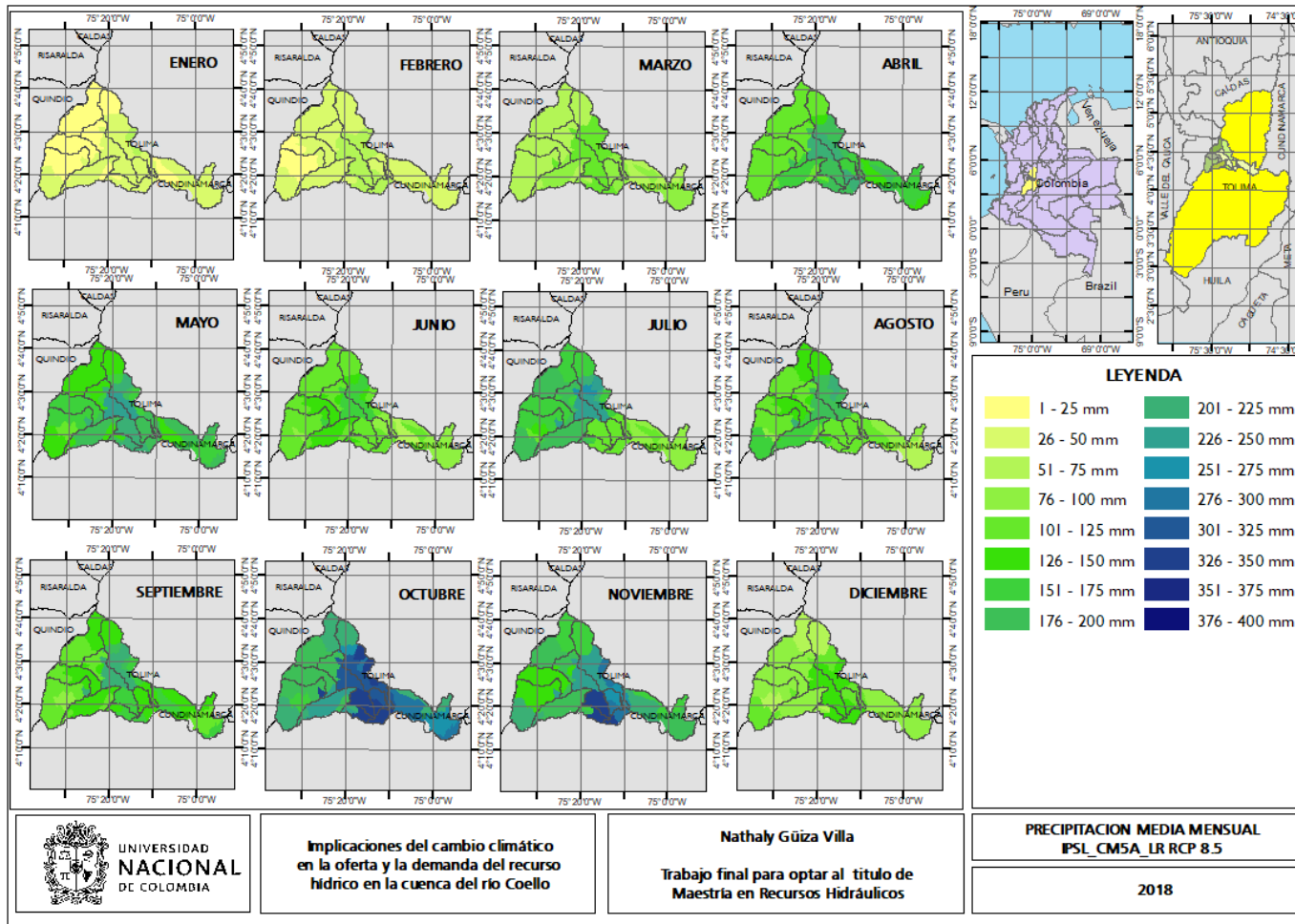


Figura 4-28: Cambio en la precipitación total mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_LR en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

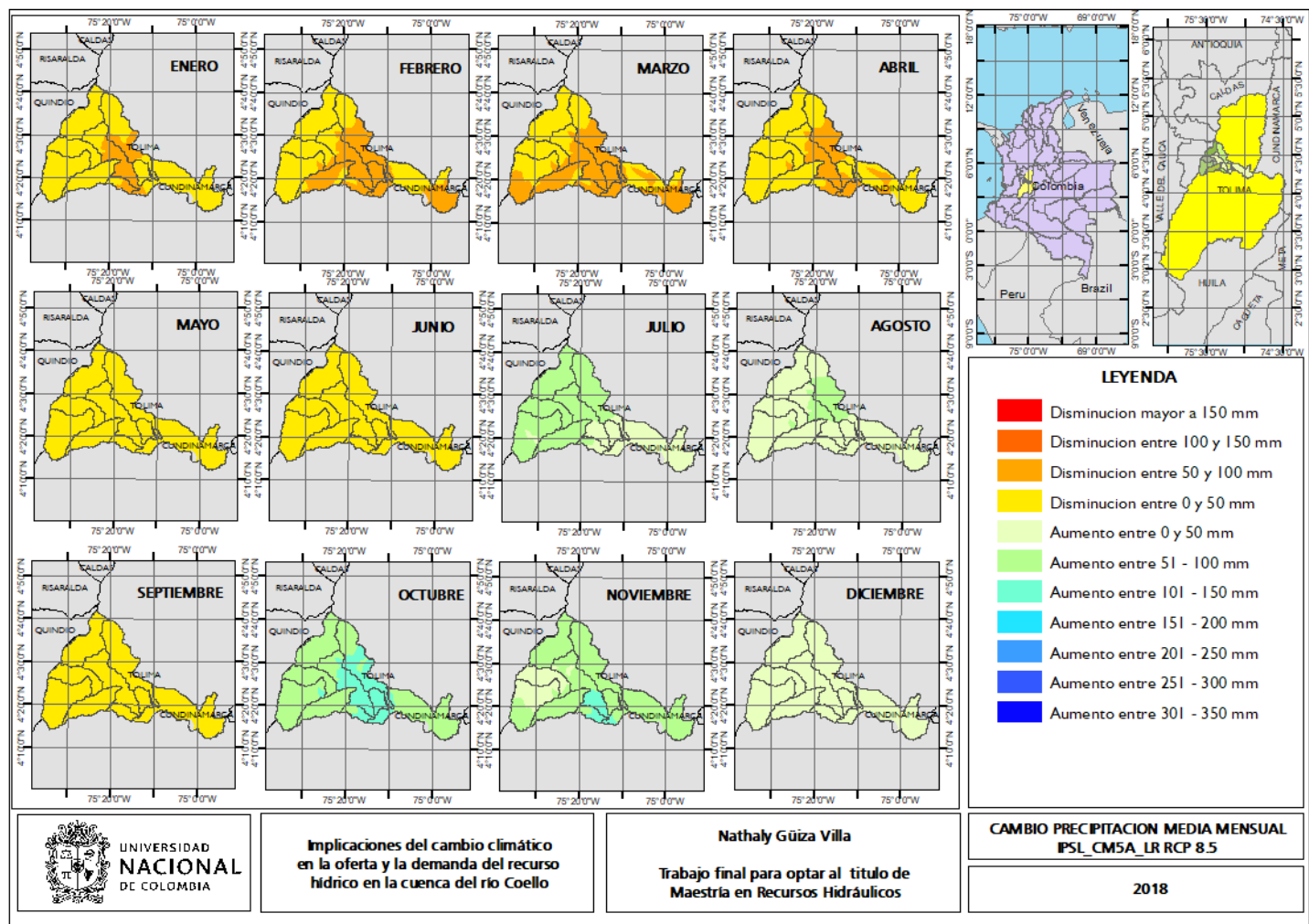


Figura 4-29: Precipitación total mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_MR en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

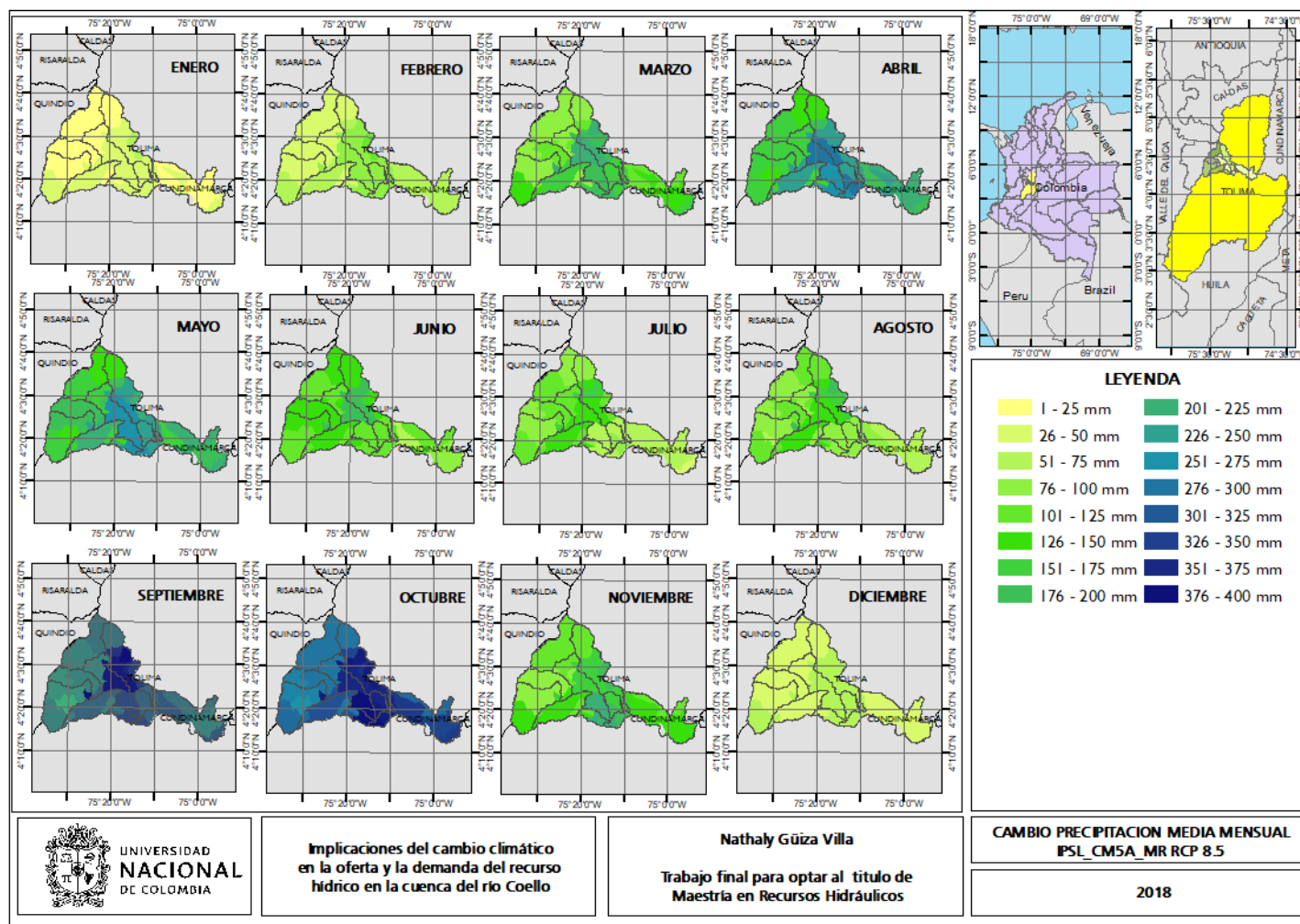


Figura 4-30: Cambio en la precipitación total mensual en cada una de las microcuenclas para el modelo IPSL_CM5A_MR en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

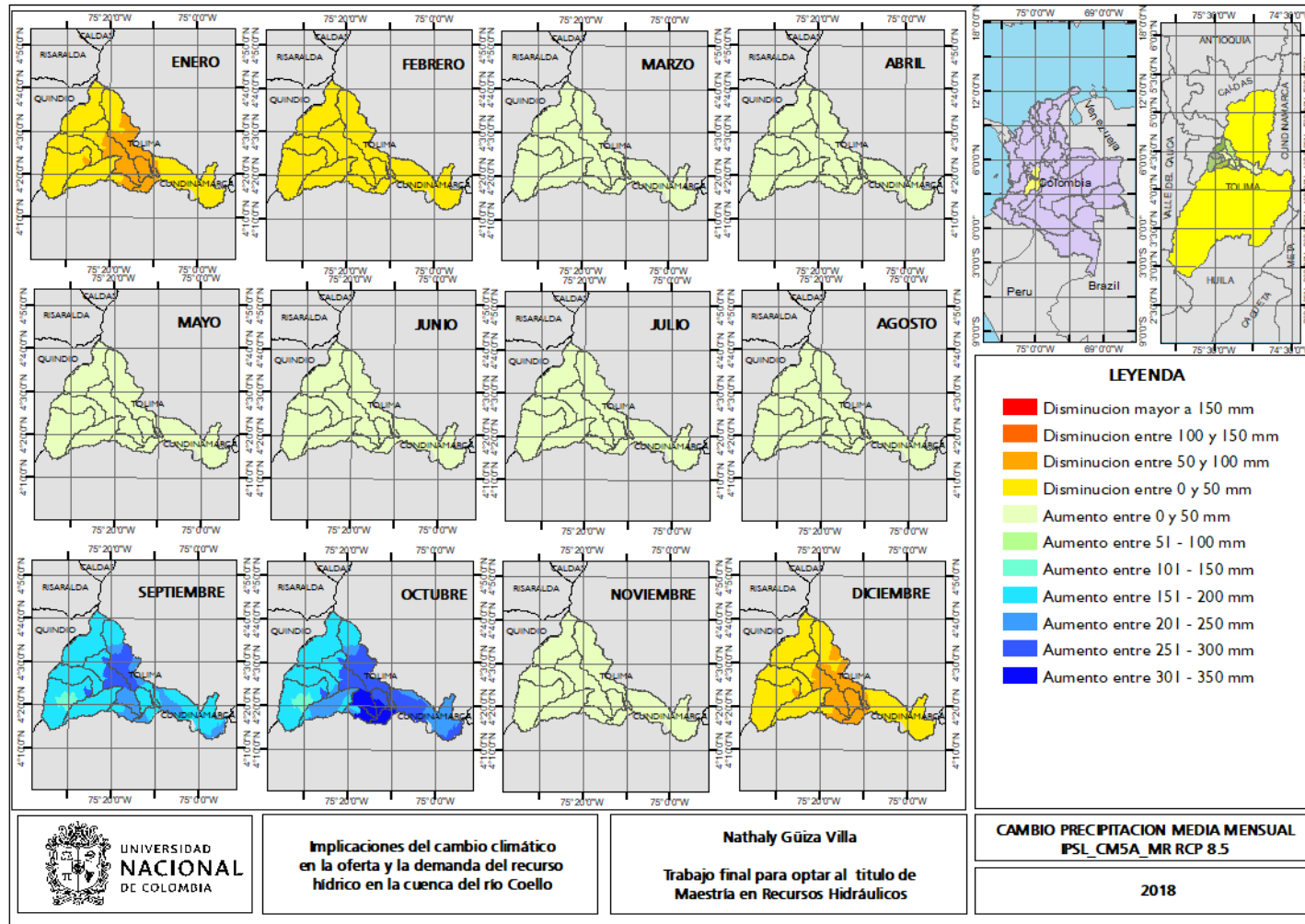


Figura 4-31: Precipitación total mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo MIROC5 en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

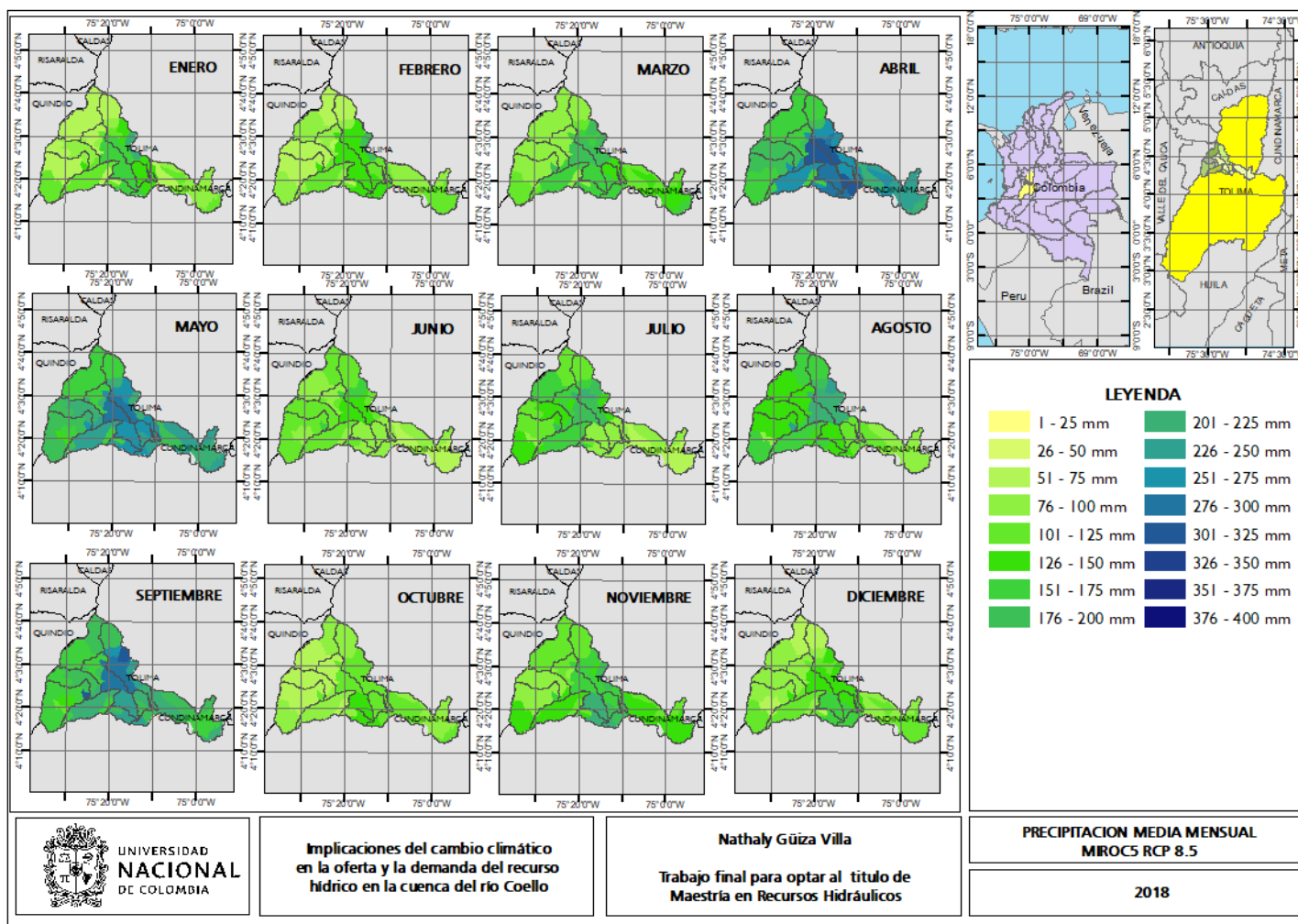
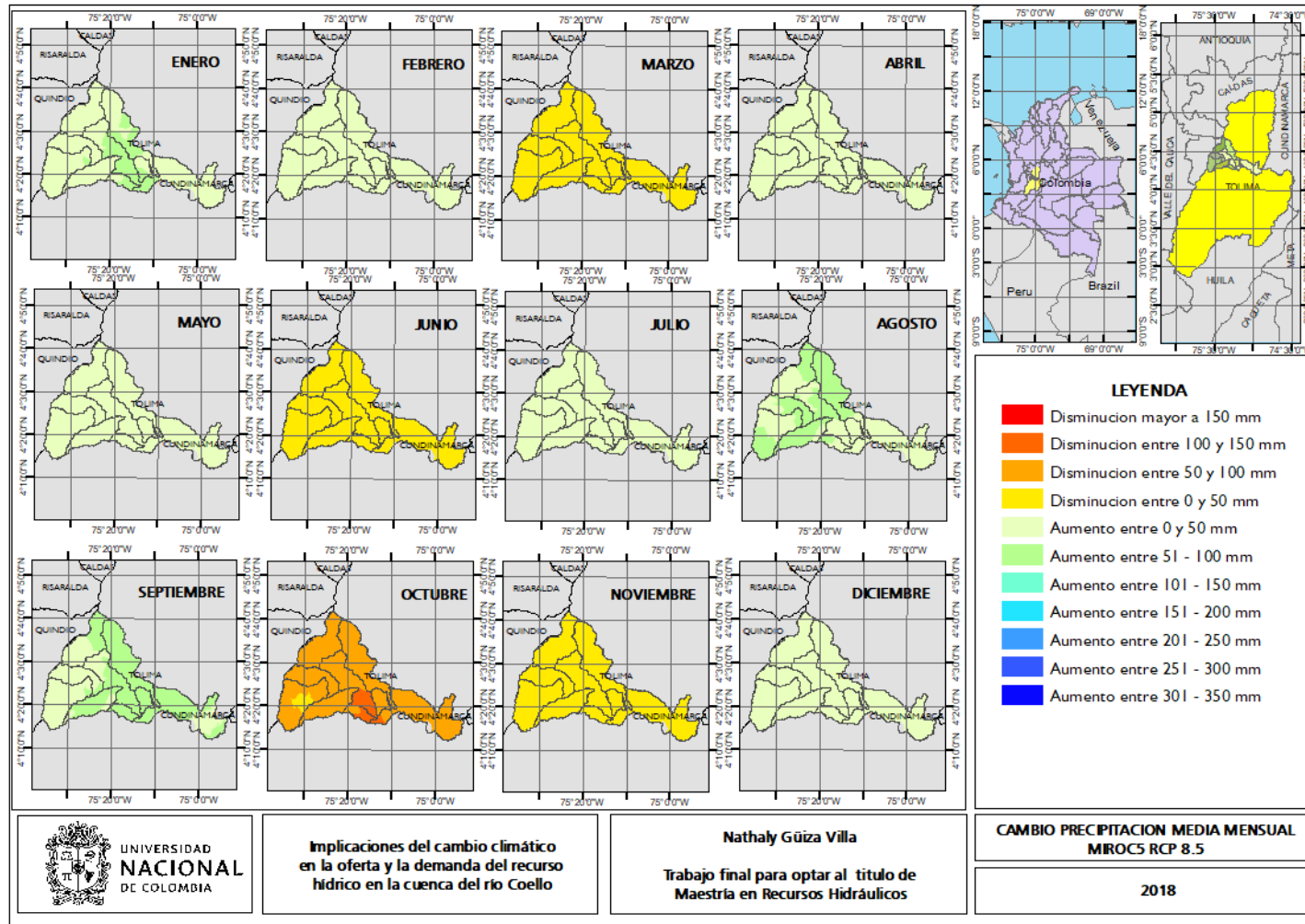


Figura 4-32: Cambio en la precipitación total mensual promedio en cada una de las microcuenclas para el modelo MIROC5 en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).



Como se pudo observar en las gráficas anteriores, la precipitación total mensual puede tener tanto un aumento como una disminución, sin embargo, es evidente en todos los modelos que la magnitud de la diferencia con el valor actual de precipitación tanto en aumento como en disminución es lo bastante grande para tener una influencia directa en las condiciones ambientales de la cuenca, su fauna y su flora, así como en los caudales del cauce. En la mayoría de los modelos persiste una disminución de la precipitación en el periodo seco y un aumento en la misma para el periodo húmedo, teniendo graves consecuencias en el ciclo natural de la cuenca, lo que podría significar también un cambio en sus dinámicas naturales, sociales y económicas asociadas.

Lo anterior podrá tener además una implicación importante en la actividad agrícola dado que algunas especies de cultivos pueden no tener la posibilidad de adaptarse a las nuevas condiciones de la cuenca y en caso de hacerlo, las disminuciones en la precipitación para el periodo seco representarán un aumento en los requerimientos de riego para dicho cultivo. Lo anterior tendrá consecuencias significativas en las dinámicas comerciales y sociales de los habitantes de la región e incluso en la seguridad alimentaria de los consumidores de dichos productos agrícolas en todo el país.

4.5.2 Temperatura

Para esta variable se utilizó el método delta para obtener los valores de temperatura máxima y mínima mensual multianual en 15 estaciones climatológicas. Los datos anteriores son utilizados para construir una curva de temperatura vs elevación sobre el nivel del mar para cada uno de los meses del año, ya sea en la temperatura máxima o la mínima. De acuerdo con las ecuaciones definidas con las curvas mencionadas se establece la temperatura en cada una de las 174 estaciones virtuales que requiere el modelo SWAT, en función de su elevación.

En las **Figura 4-33** se muestran las estaciones climatológicas de las que se extraen los valores para calcular temperatura en las estaciones virtuales del modelo mostradas en la misma gráfica, además en la **Figura 4-34** se muestran las relaciones de la temperatura y la altura para el mes de enero, para observar las relaciones en los demás meses revisar el anexo 4.2.

Figura 4-33: Estaciones virtuales y físicas de temperatura usadas en la modelación.

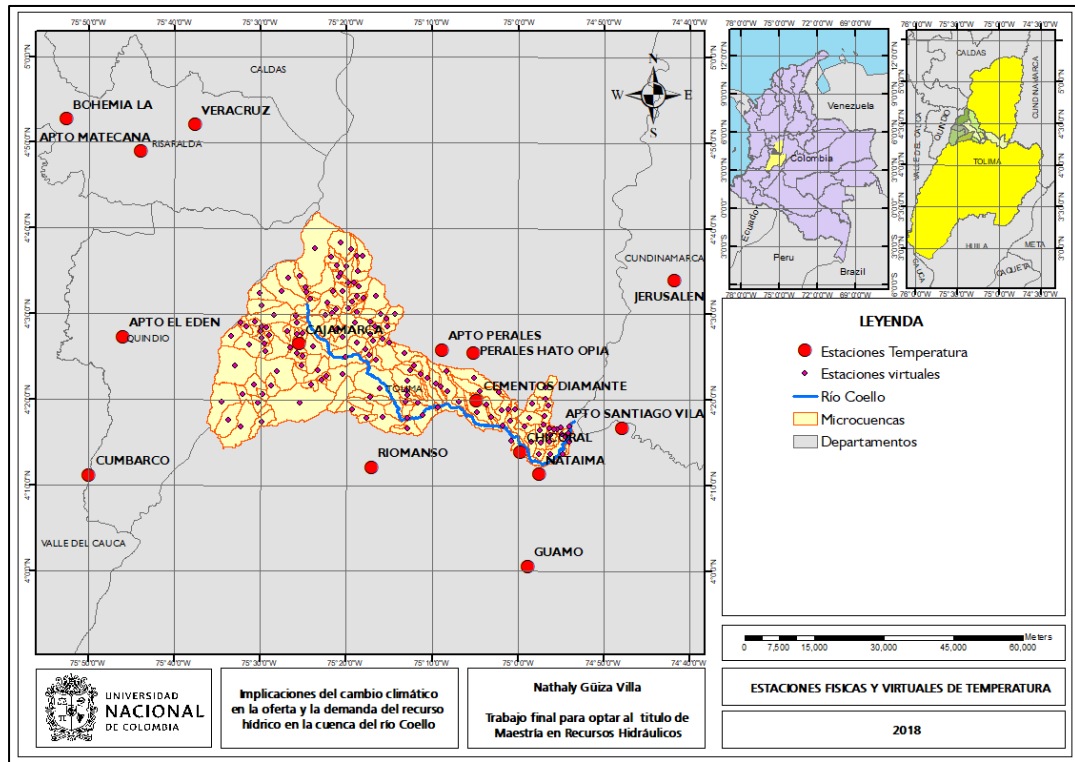
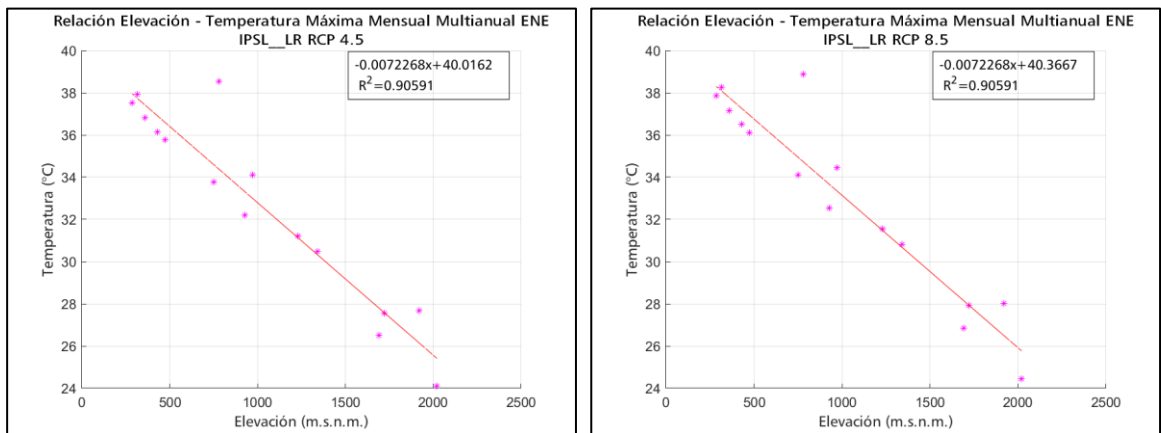
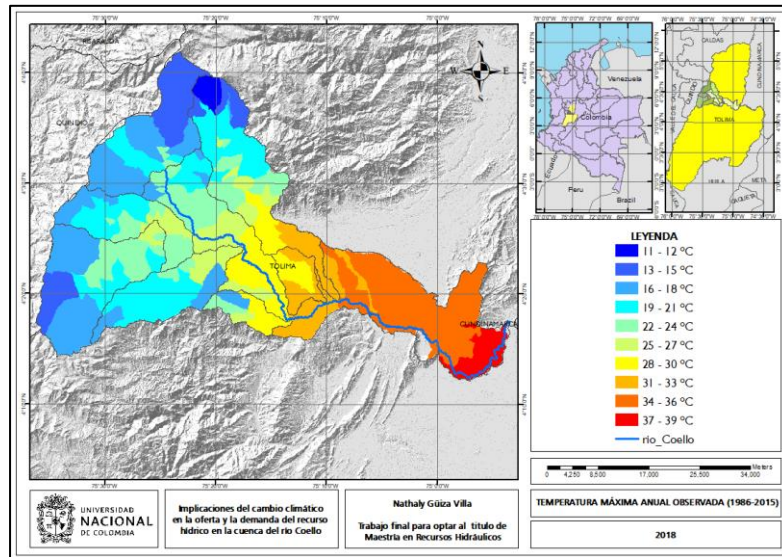


Figura 4-34: Relación temperatura máxima vs elevación en el mes de enero para el modelo IPSL_LR en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.



Se observa además la temperatura máxima anual promedio observada en toda la cuenca en el periodo 1986-2015 en la **Figura 4-35**.

Figura 4-35: Temperatura máxima anual promedio en cada una de las microcuencas para el periodo observado (1986-2015).



En la **Figura 4-36**, la **Figura 4-37** y en la **Figura 4-38** se muestran los valores promedio anuales de la temperatura máxima, en cada una de las microcuencas para cada uno de los modelos, comparando el escenario RCP 4.5 y el RCP 8.5. Para esta variable no se muestra el cambio, ya que como se indicó previamente tiene un aumento progresivo de 1°C hasta 2.5°C.

Figura 4-36: Temperatura máxima anual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_LR en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

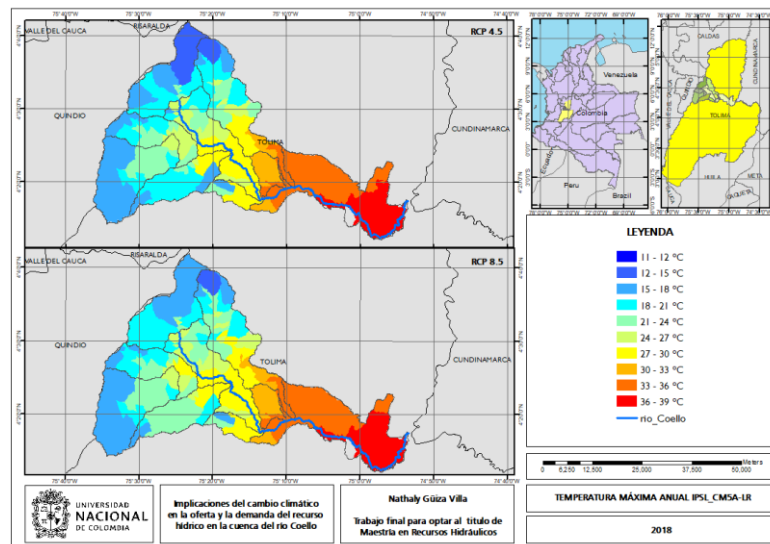


Figura 4-37: Temperatura máxima anual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_MR en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

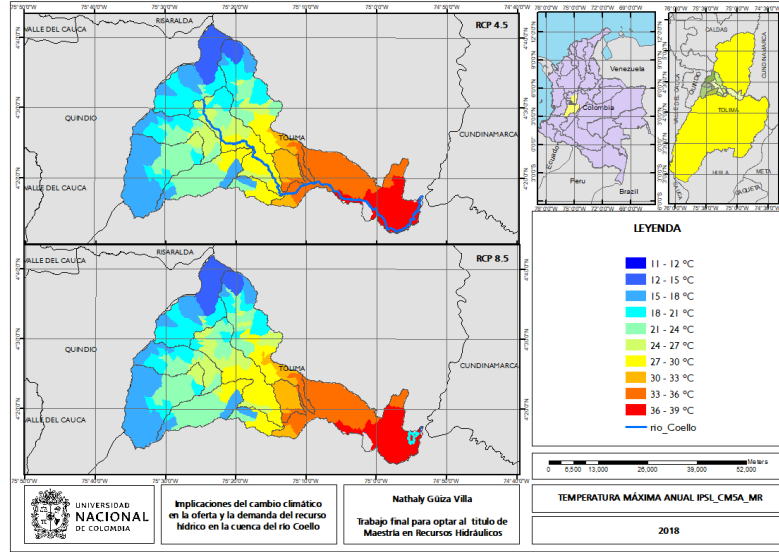
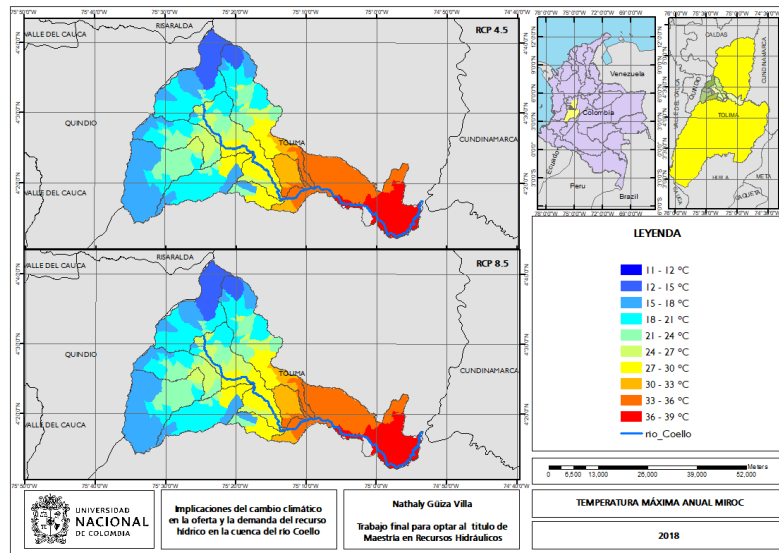


Figura 4-38: Temperatura máxima anual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo MIROC5 en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.



A su vez, se muestran los valores de la temperatura máxima a nivel mensual para el periodo observado, así como para cada uno de los modelos y escenarios, de la misma manera que en el caso anterior no se define un cambio a esta escala ya que se estableció un aumento progresivo que se reproduce en toda la cuenca.

Figura 4-39: Temperatura máxima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el periodo observado (1986-2015).

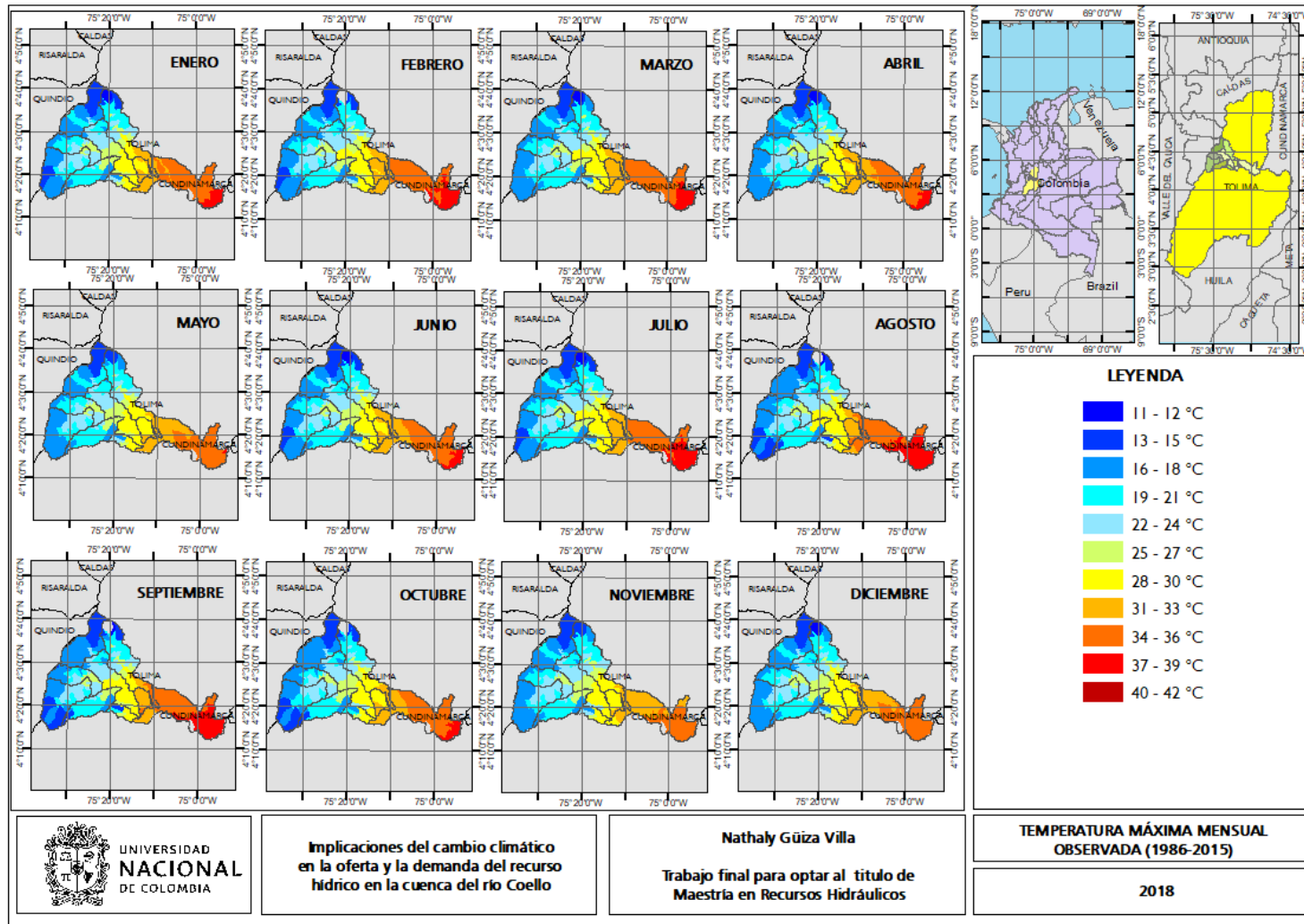


Figura 4-40: Temperatura máxima mensual promedio en cada una de las microcuenclas para el modelo IPSL_CM5A_LR en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

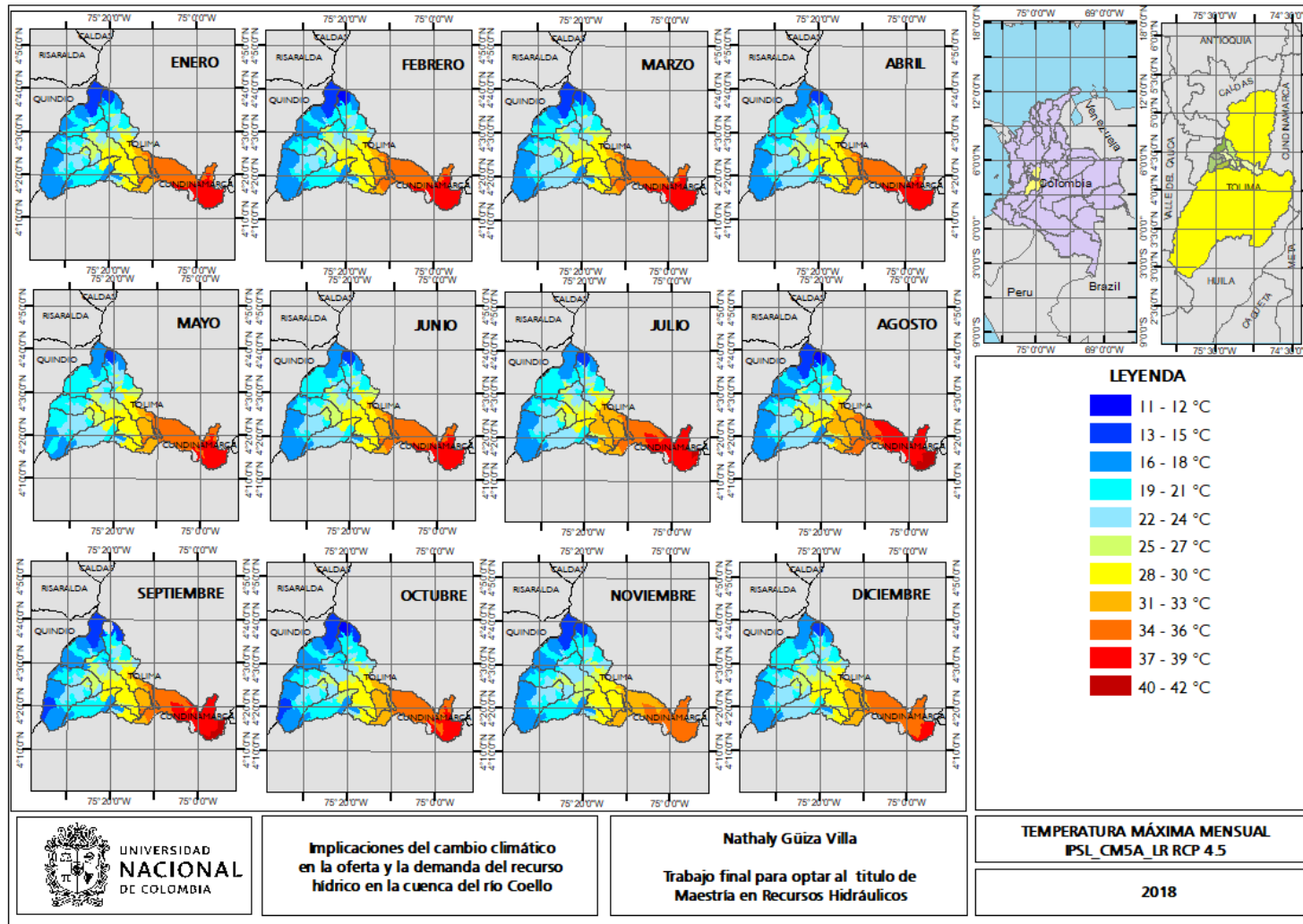


Figura 4-41: Temperatura máxima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_MR en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

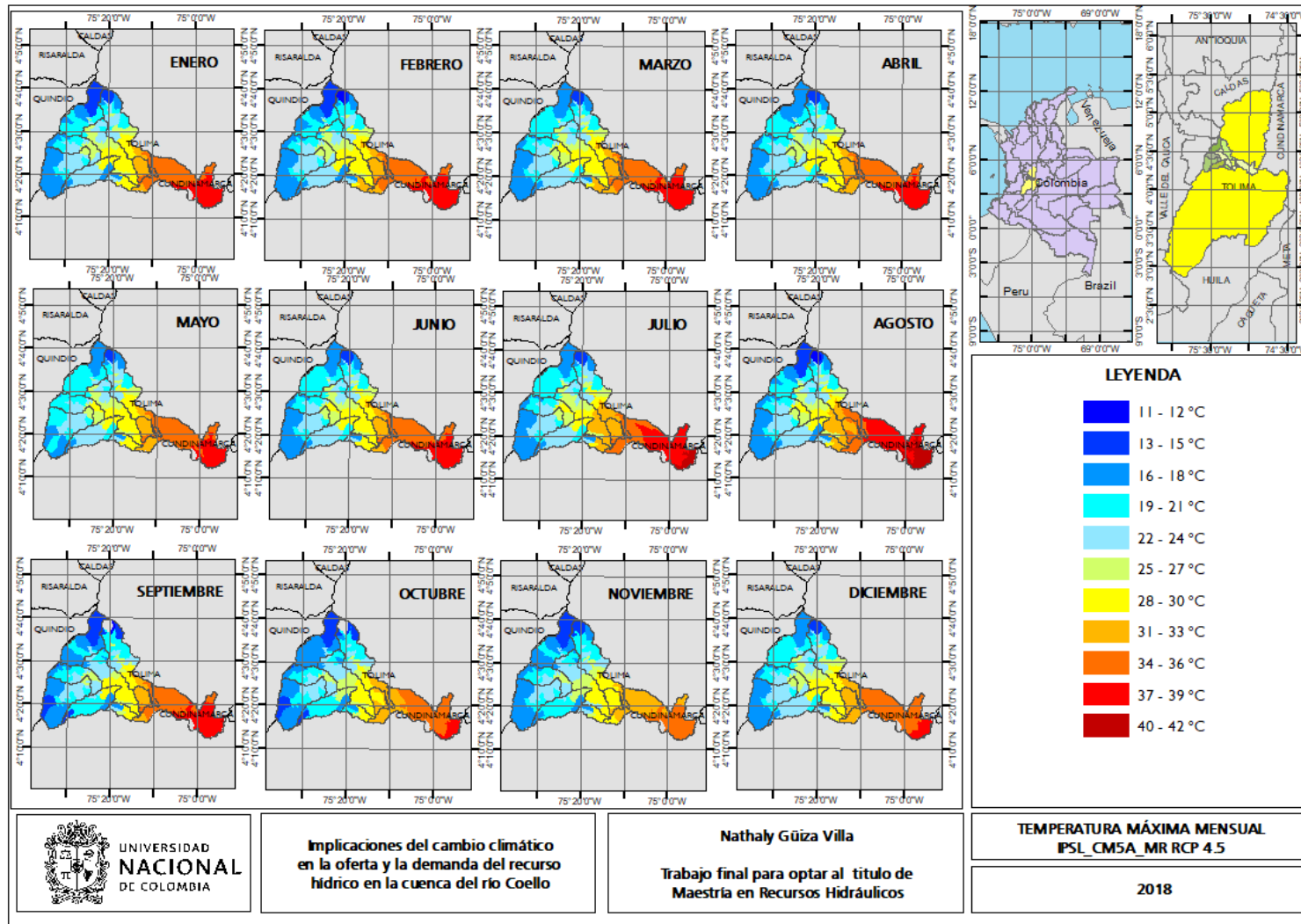


Figura 4-42: Temperatura máxima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo MIROC5 en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

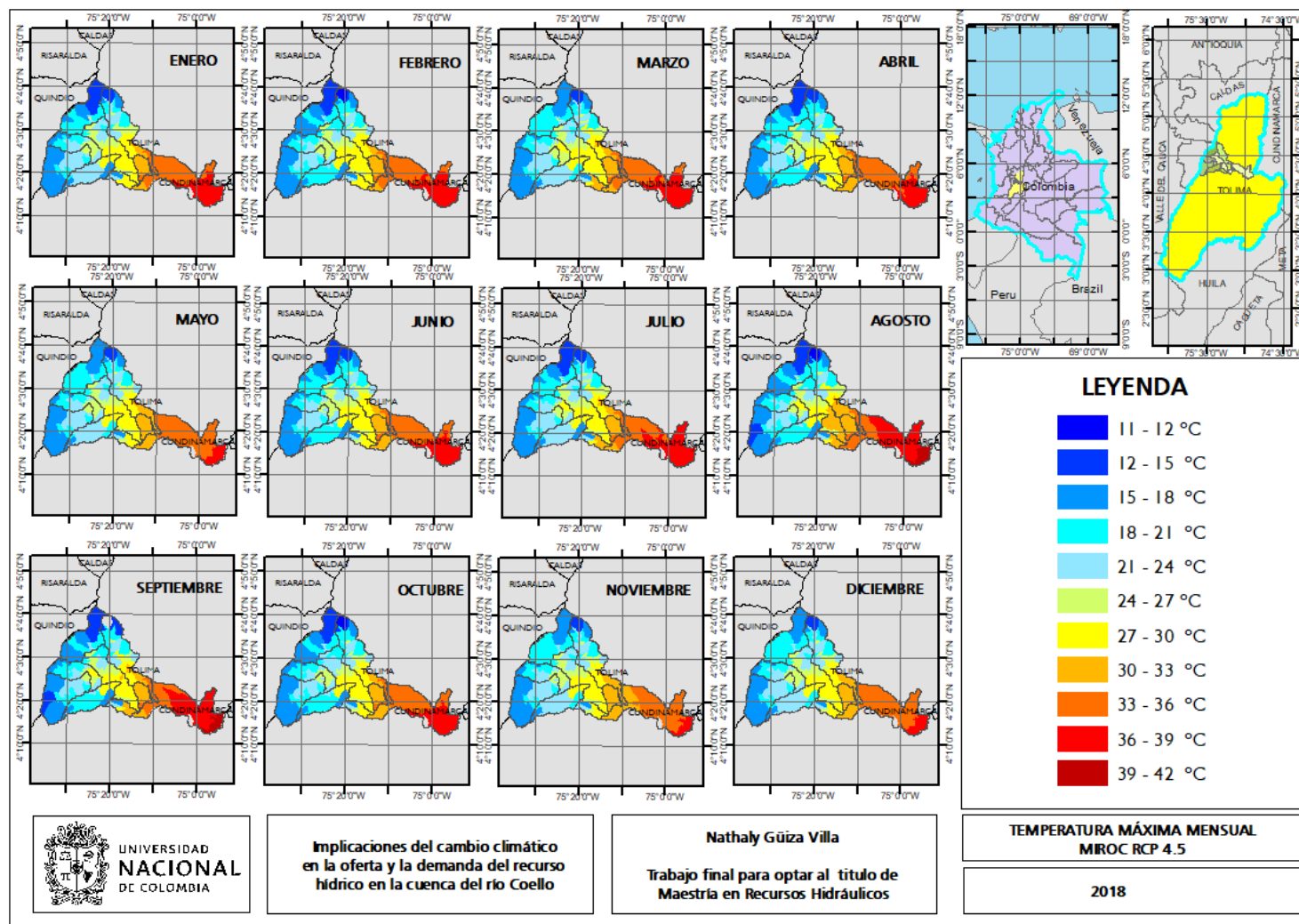


Figura 4-43: Temperatura máxima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_LR en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

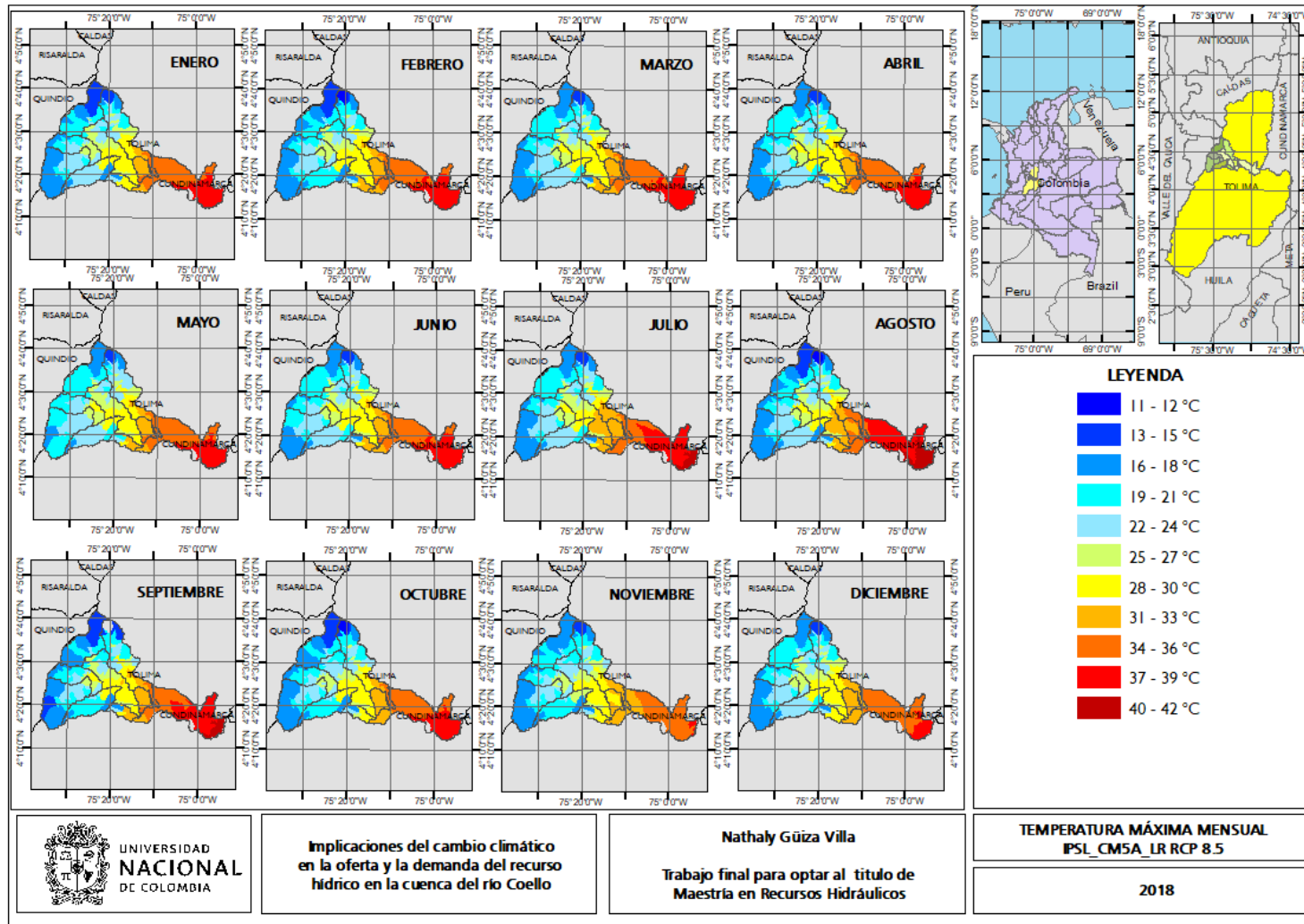


Figura 4-44: Temperatura máxima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_MR en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

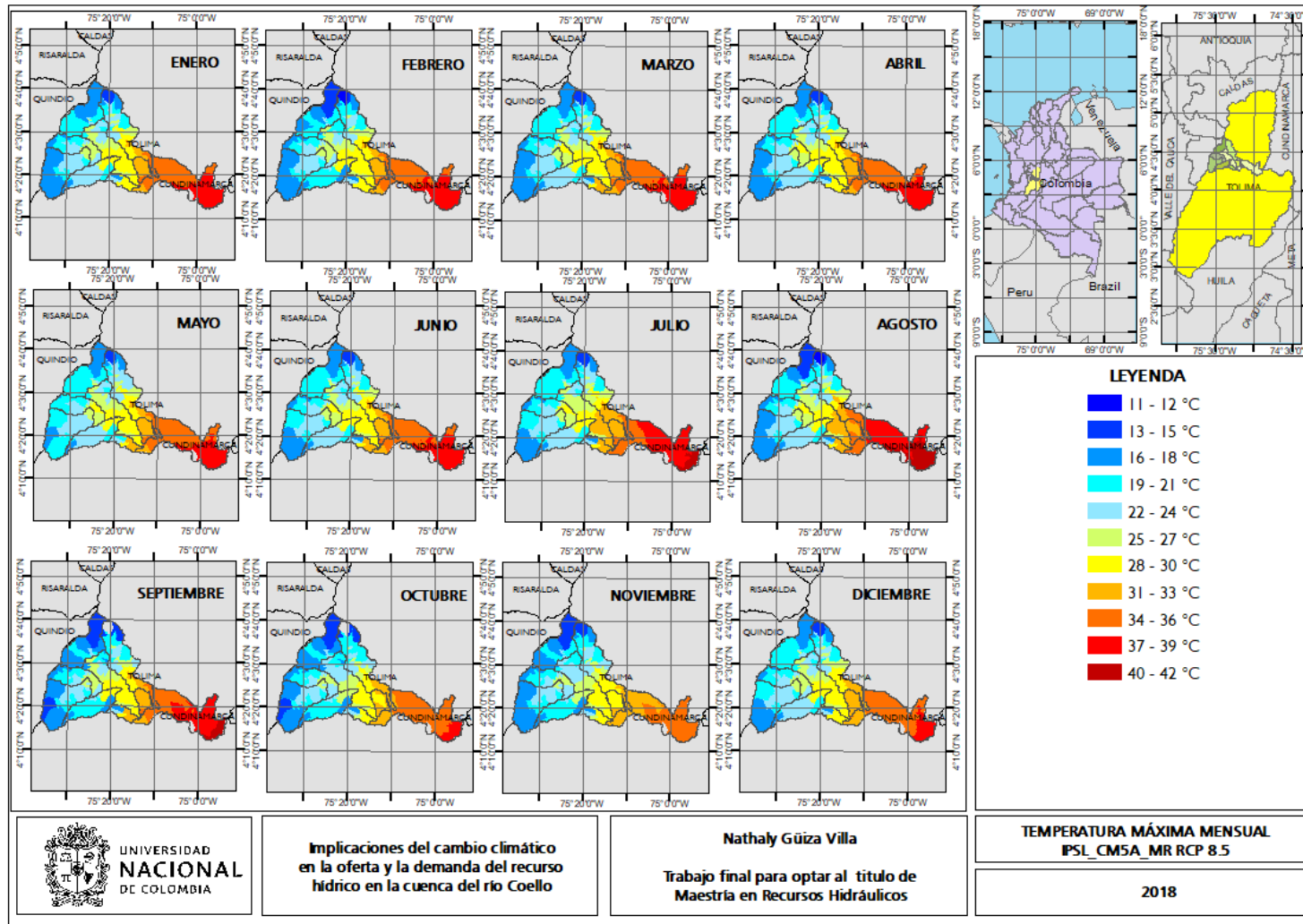
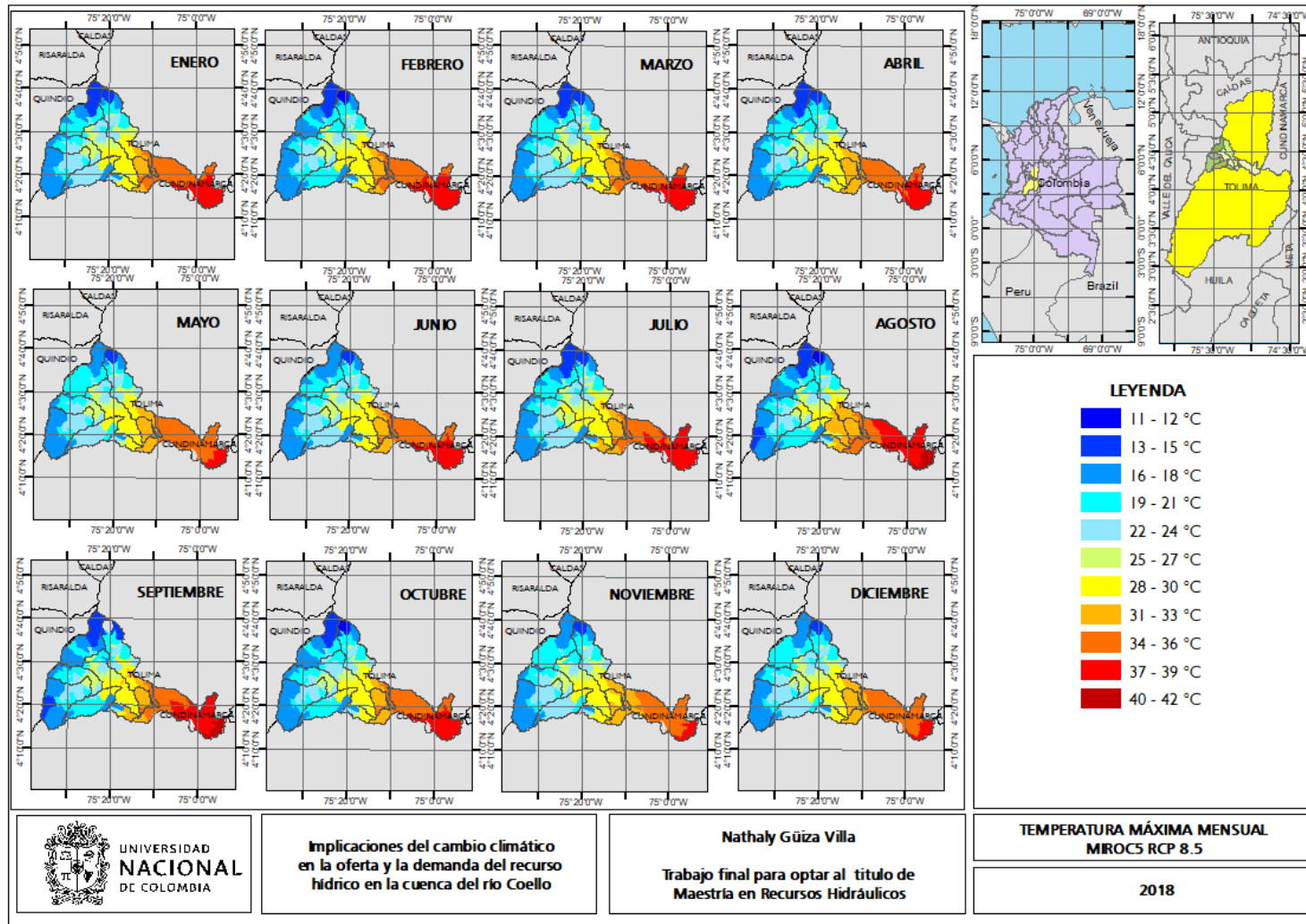


Figura 4-45: Temperatura máxima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo MIROC5 en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).



Además de la temperatura máxima se considera la temperatura mínima, la cual es calculada para todas las microcuencas en función de una regresión lineal de acuerdo con la elevación de la estación virtual, como en el caso del mes de enero de la **Figura 4-46**.

Figura 4-46: Relación temperatura mínima vs elevación en el mes de enero para el modelo IPSL_LR en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

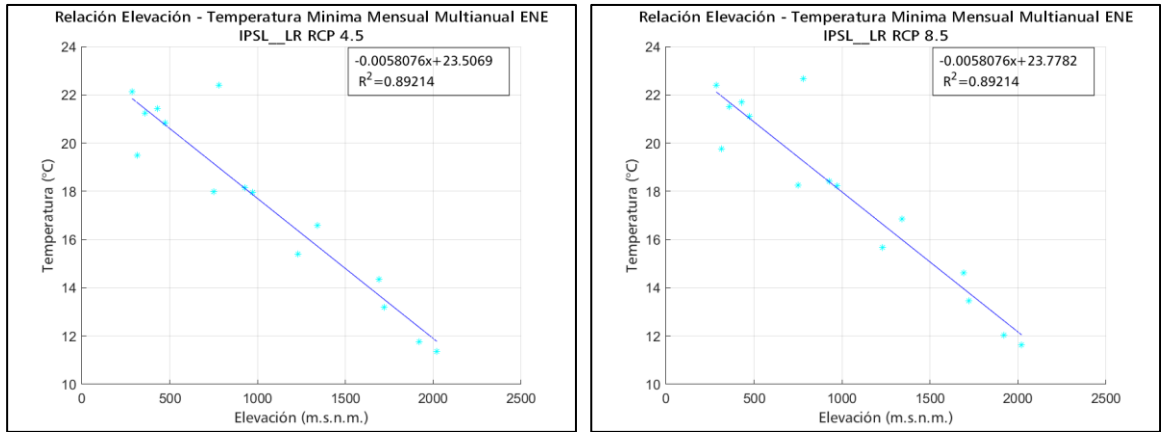
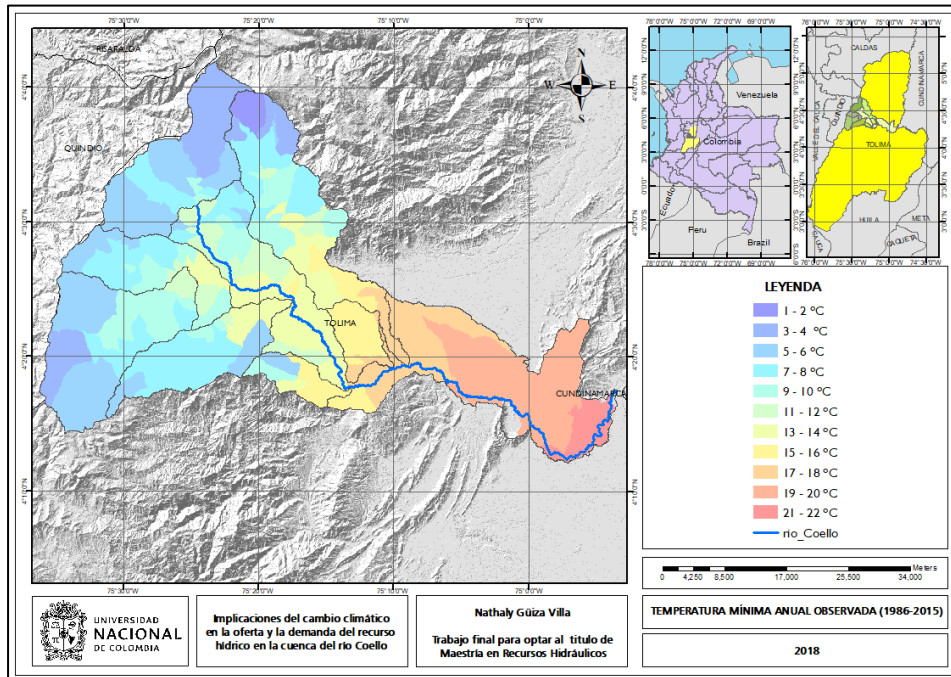


Figura 4-47: Temperatura mínima anual promedio en cada una de las microcuencas para el periodo observado (1986-2015).



Se muestra también dicho valor proyectado para cada uno de los modelos, comparando el escenario RCP 4.5 y el RCP 8.5 se muestra en la **Figura 4-48**, en la **Figura 4-49** y en la **Figura 4-50**

Figura 4-48: Temperatura mínima anual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_LR en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

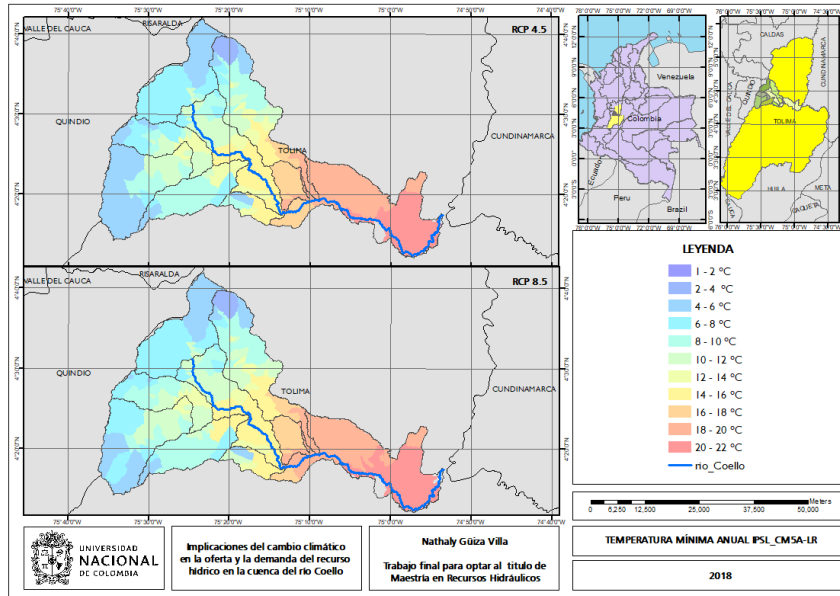


Figura 4-49: Temperatura mínima anual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_MR en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

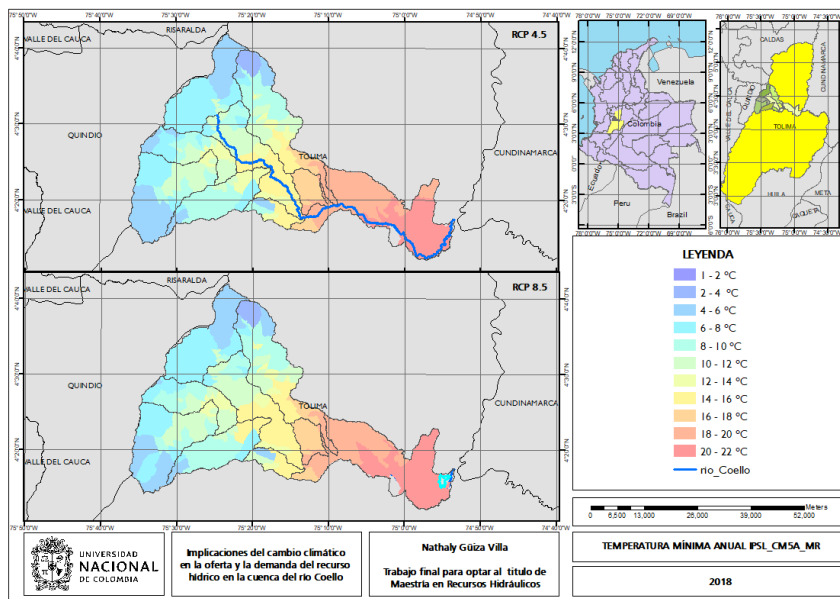
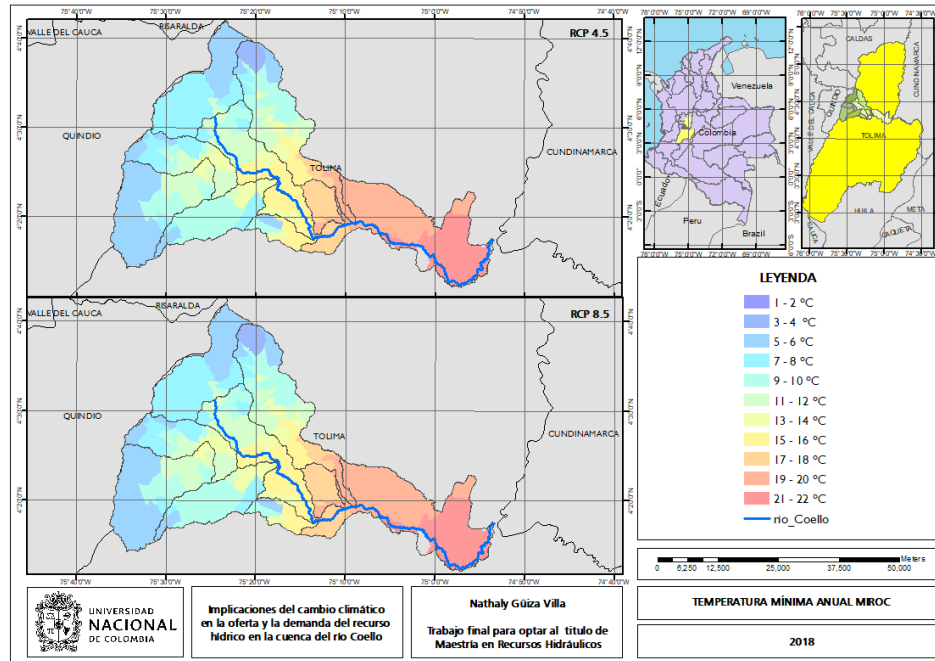


Figura 4-50: Temperatura mínima anual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo MIROC5 en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.



Finalmente se muestran los valores de la temperatura mínima proyectada para cada uno de los meses del año, en los modelos y escenarios establecidos.

Figura 4-51: Temperatura mínima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el periodo observado (1986-2015).

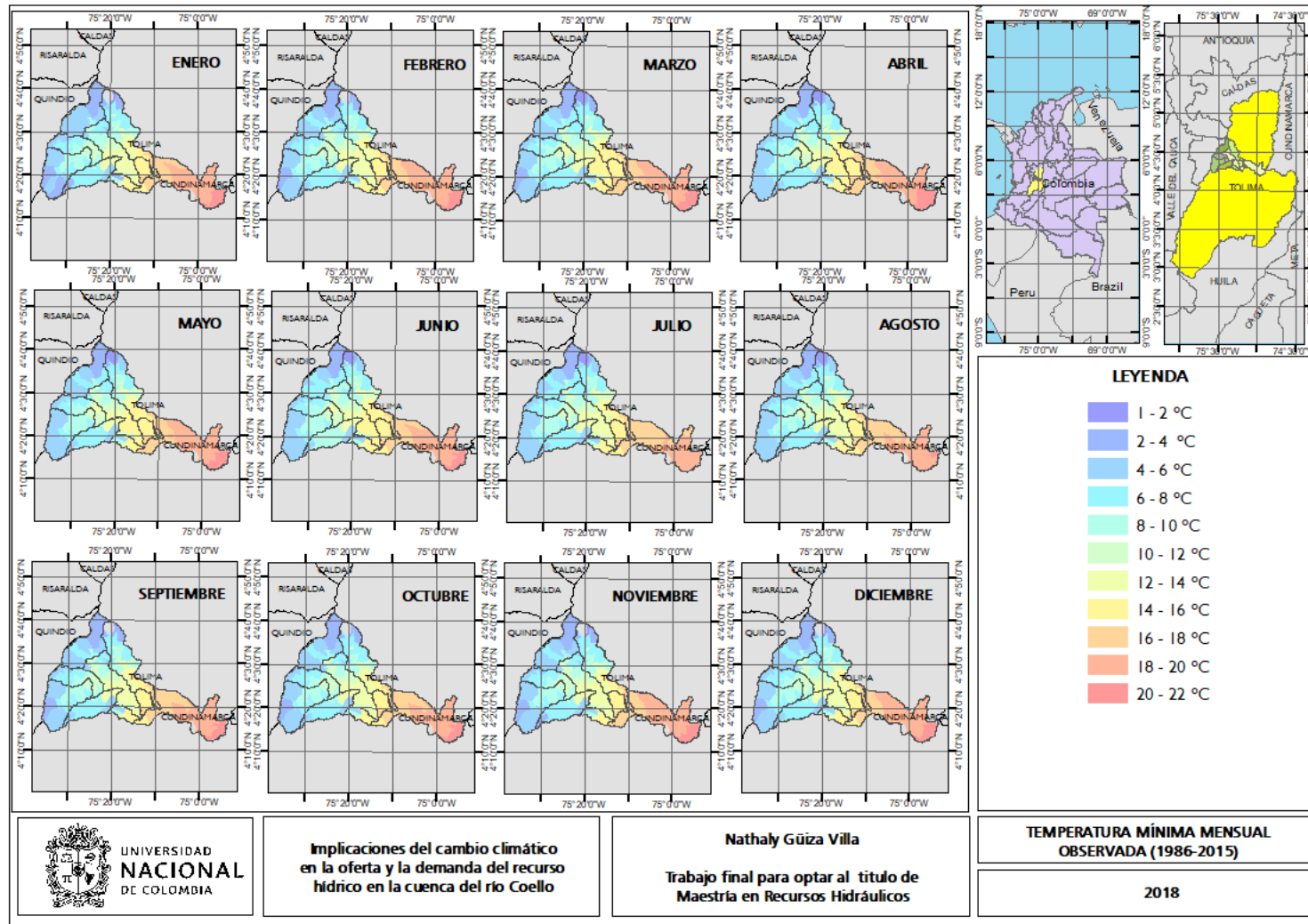


Figura 4-52: Temperatura mínima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_LR en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

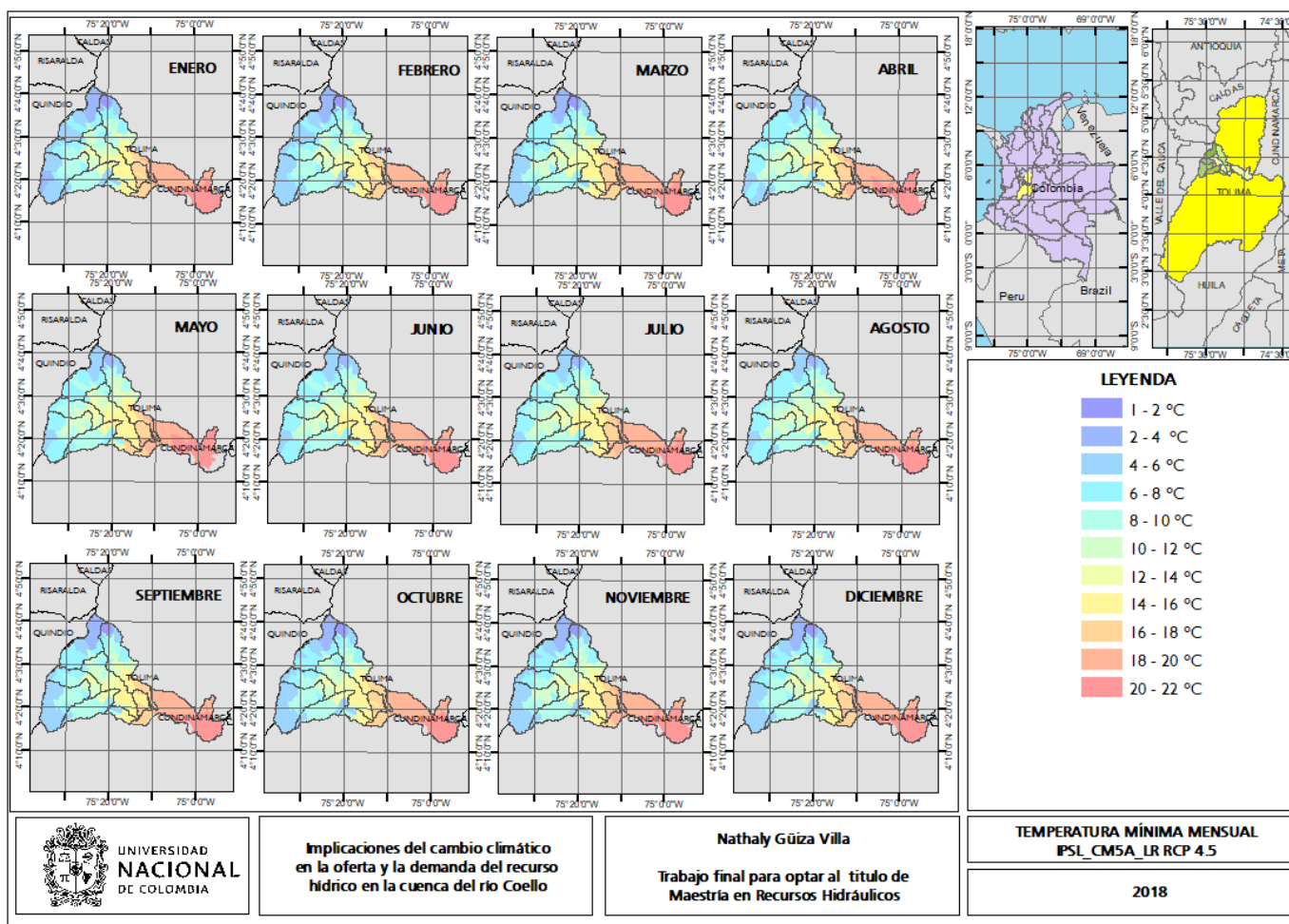


Figura 4-53: Temperatura mínima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_MR en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

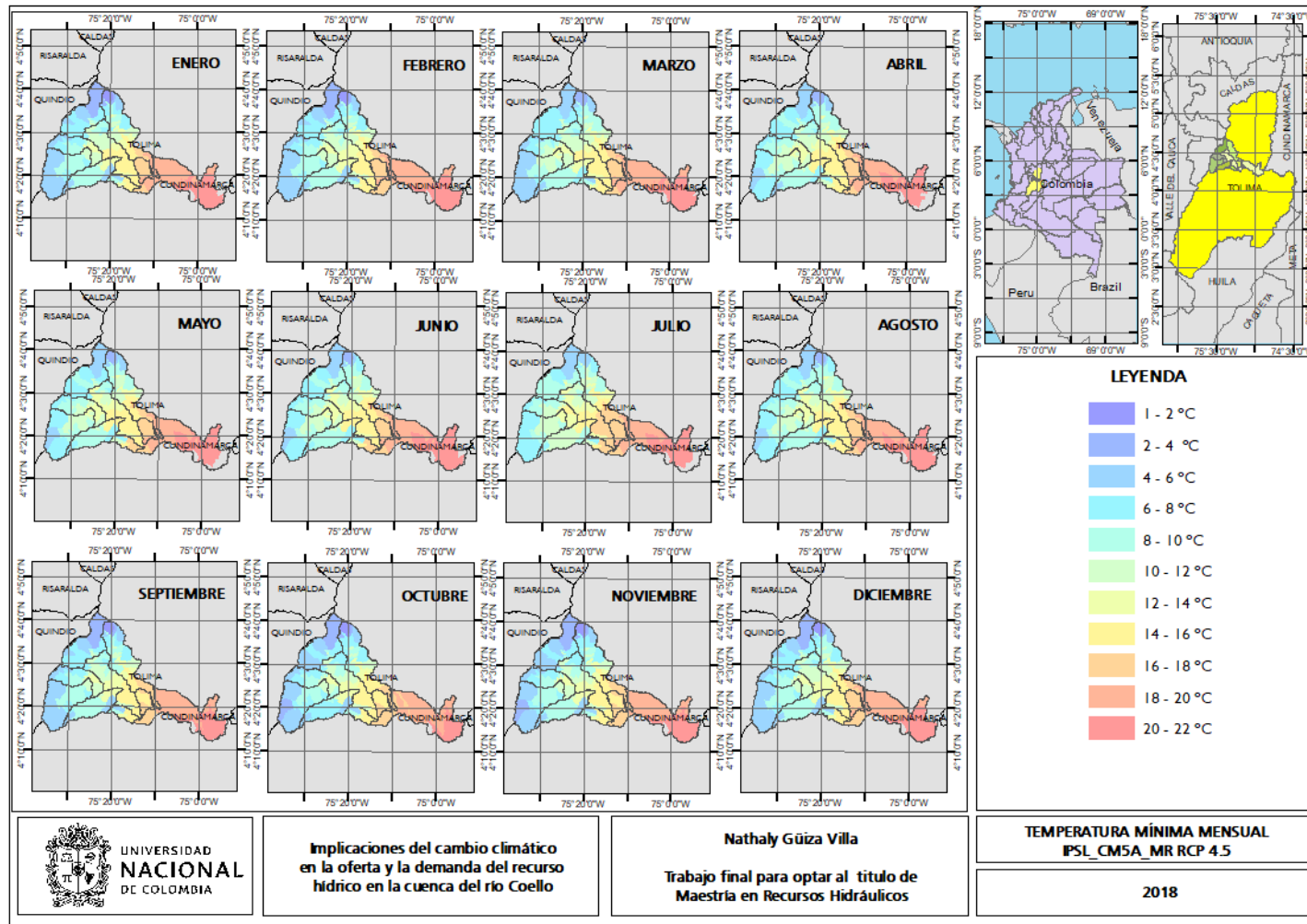


Figura 4-54: Temperatura mínima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo MIROC5 en el escenario RCP 4.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

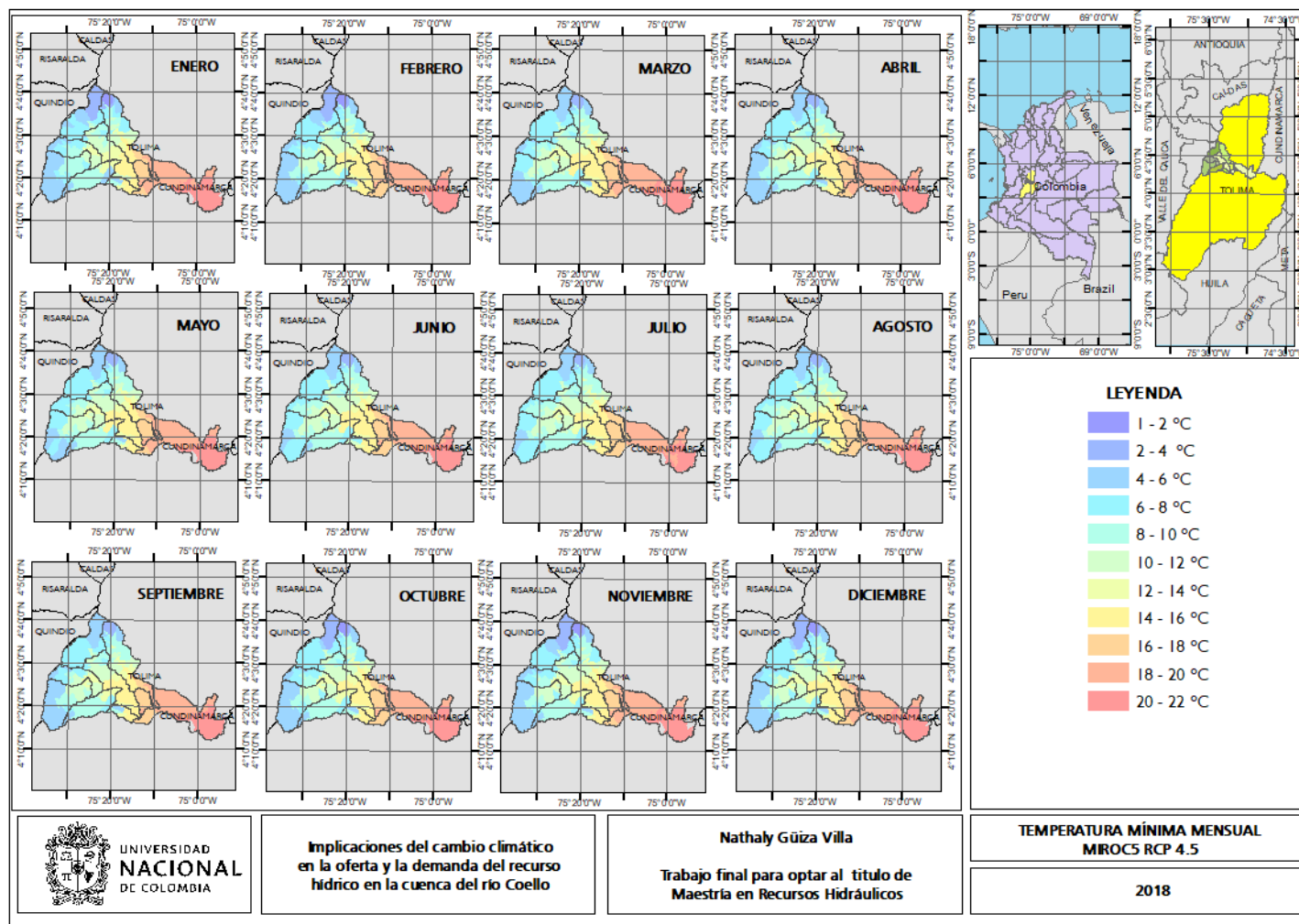


Figura 4-55: Temperatura mínima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_LR en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

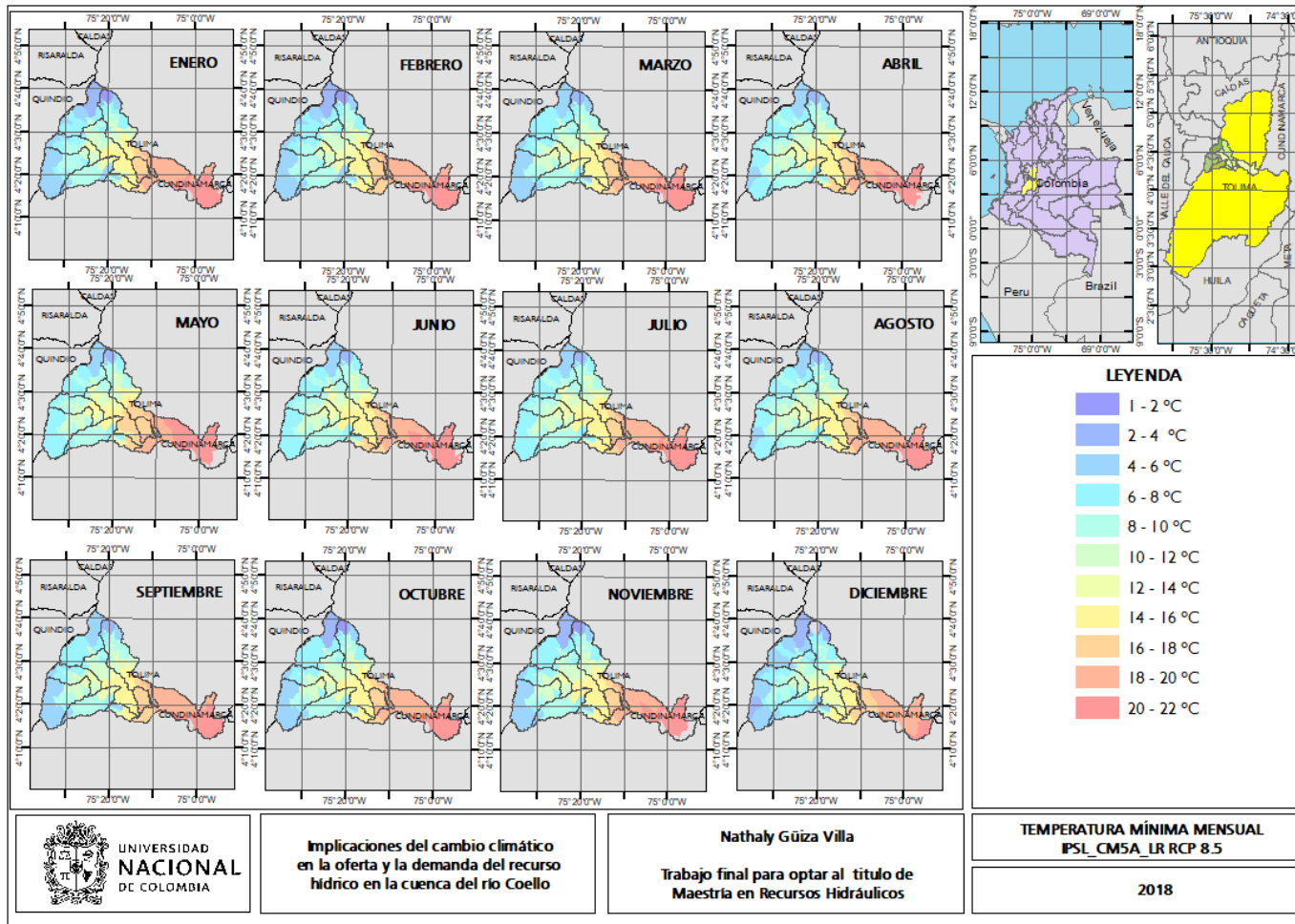


Figura 4-56: Temperatura mínima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo IPSL_CM5A_MR en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).

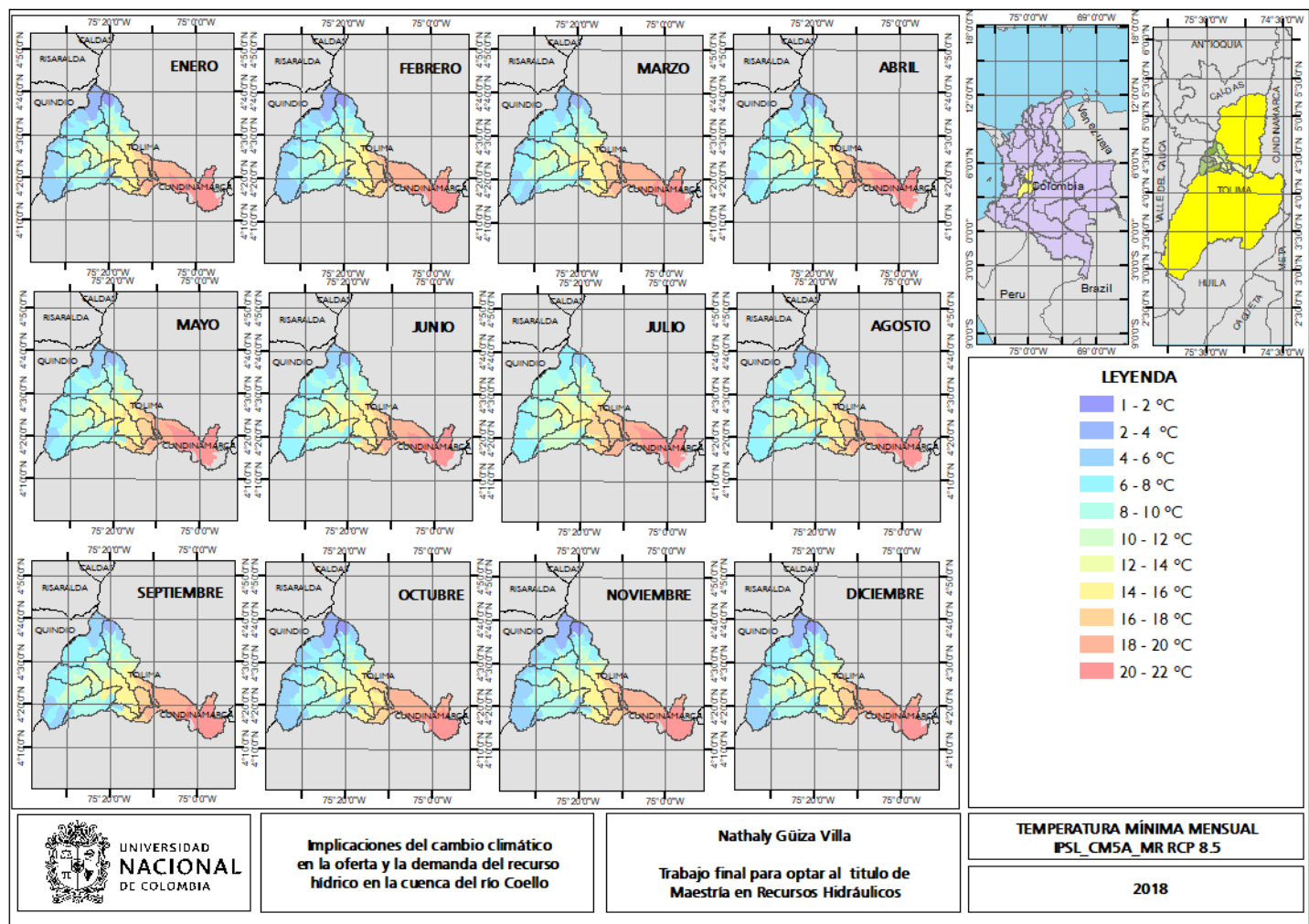
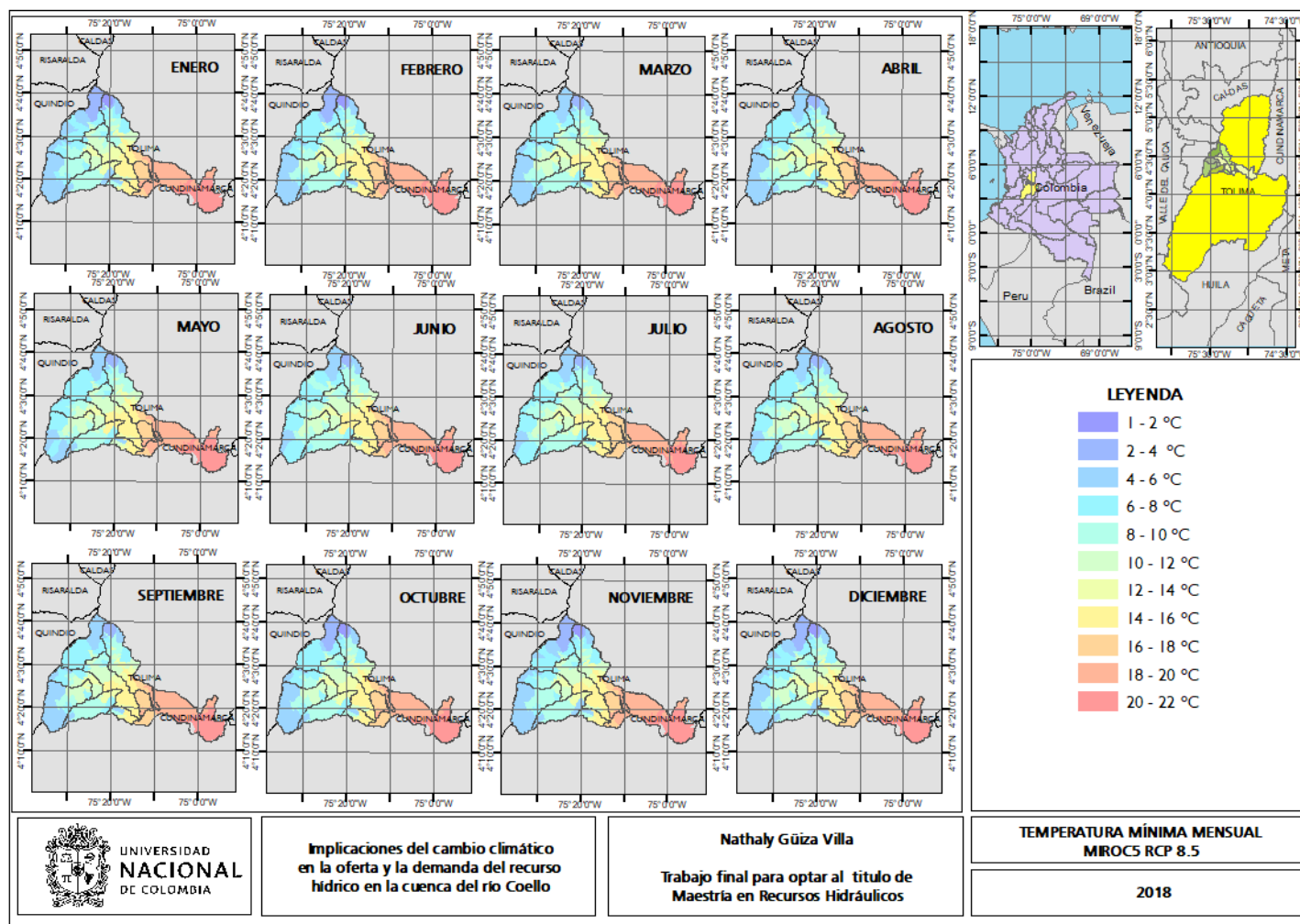


Figura 4-57: Temperatura mínima mensual promedio en cada una de las microcuencas para el modelo MIROC5 en el escenario RCP 8.5, para el periodo proyectado (2020-2050).



Se puede observar en las anteriores gráficas que sin importar la microcuenca la temperatura, ya sea máxima o mínima es creciente de 1 hasta 2.5°C, lo cual puede ser altamente perjudicial para las especies tanto animales como vegetales que habitan la cuenca ya que las condiciones ambientales de esta se verán seriamente afectadas.

4.5.3 Radiación solar

Este parámetro se considera constante en el tiempo, por lo tanto, se indicará la forma de cálculo del periodo actual. Fue definido en función de las horas de brillo solar, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\frac{RS}{RA} = a + b \frac{n}{N} \quad (4.1)$$

Donde,

Rs: radiación solar (MJ/m² día)

Ra: radiación extraterrestre (MJ/m² día)

N: Horas de brillo solar teórico, función de la latitud de la zona de estudio

n: horas medidas de brillo solar

a, b: coeficientes específicos

Para definir los coeficientes a y b en el modelo base, fue usado el modelo de Cenicafé que determino dichos valores en la región cafetera del Quindío a una misma latitud que la región de estudio, de acuerdo con lo mostrado en la **Tabla 4-3**

Tabla 4-3: Coeficientes de regresión para índices de radiación y brillo solar para todas las estaciones en la zona cafetera. Fuente: (Pontificia Universidad Javeriana, 2017)

Agrupación	a	L.I.	L.S.	b	L.I.	L.S.	R2
Zona norte	0.167	0.146	0.187	0.696	0.65024	0.74222	0.834
Zona central andina	0.234	0.224	0.243	0.497	0.47142	0.52285	0.776
Cordillera oriental	0.249	0.230	0.269	0.515	0.43759	0.49032	0.675
Zona Sur	0.253	0.243	0.263	0.464	0.44987	0.58015	0.871
Única	0.221	0.214	0.228	0.553	0.534	0.572	0.790

L.I.=Límite inferior; L.S.=Límite superior.

Reemplazando los coeficientes definidos en la **Tabla 4-3** en la ecuación (4.1) se obtiene la ecuación para la región de estudio:

$$RS = RA * \left(0.234 + 0.497 \frac{n}{N} \right) \quad (4.2)$$

La radiación solar extraterrestre es función de la latitud y del mes de interés, de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$RA = \frac{24 * 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\delta) + \text{cos}(\varphi) \text{cos}(\delta) \text{sen}(\omega_s)] \quad (4.3)$$

Donde,

G_{sc} : constante solar = 0.082 (MJ/m²min)

ω_s : ángulo de radiación de la puesta de sol (rad)

d_r : distancia relativa inversa de la tierra al sol.

φ : Latitud (rad)

δ : declinación solar (rad)

La distancia relativa inversa de la tierra al sol se calcula de la siguiente manera,

$$d_r = 1 + 0.033 * \cos\left(\frac{2\pi}{365} * J\right) \quad (4.4)$$

Donde J corresponde al día juliano de cada mes, que se refiere al día 15 de cada mes, dentro de los 365 días del año.

La declinación solar se calcula con la siguiente ecuación,

$$\delta = 0.409 * \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365} * J - 1.39\right) \quad (4.5)$$

El ángulo de radiación de la puesta de sol corresponde a:

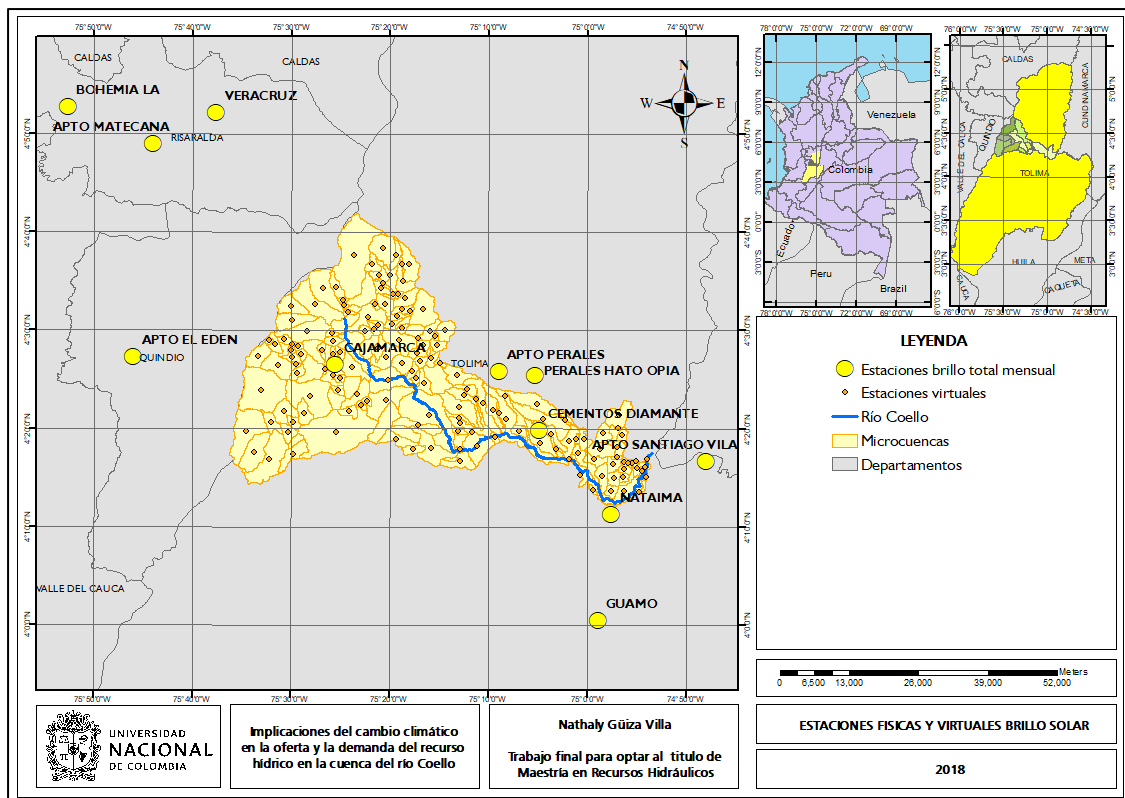
$$\omega_s = \arccos(-\tan(\varphi) \tan(\delta)) \quad (4.6)$$

El valor de las horas de brillo solar teórico (N), es función de el ángulo de radiación de la puesta de sol con la siguiente ecuación,

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (4.7)$$

El brillo solar mensual diario (n), es medido en las estaciones ubicadas en la cuenca y sus alrededores, como se observa en la **Figura 4-58**.

Figura 4-58: Estaciones virtuales y físicas de brillo solar usadas en la modelación.



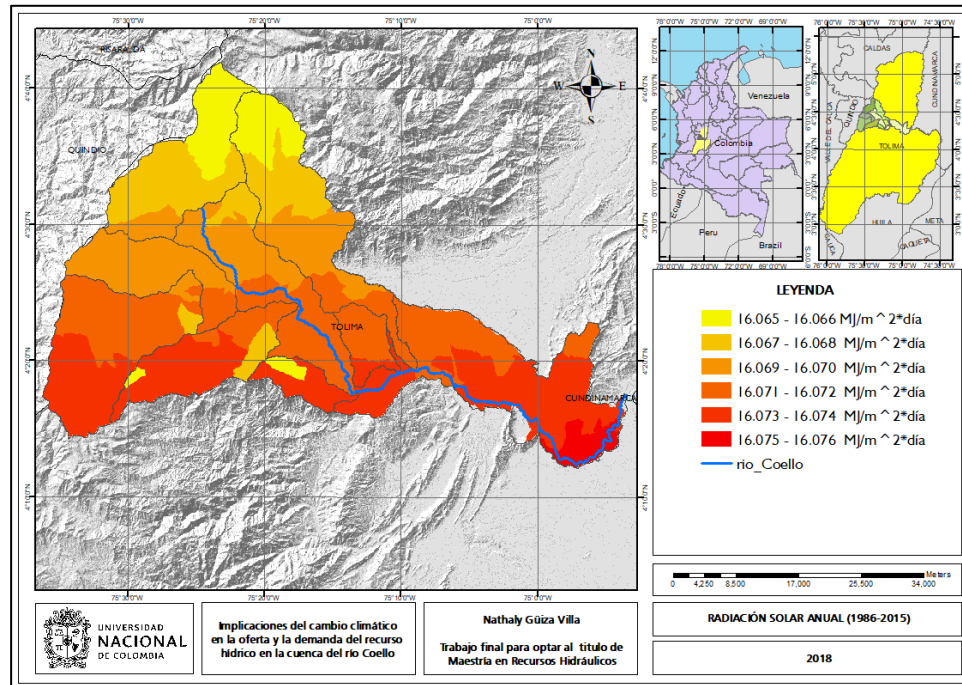
De acuerdo con los valores promedio mensuales de brillo solar para las estaciones mencionadas anteriormente, se define un promedio mensual de horas de brillo solar para la cuenca, como se relaciona en la **Tabla 4-4**.

Tabla 4-4: Horas brillo solar (n) promedio en la cuenca del río Coello.

BRILLO SOLAR (Horas/día)													
NOMBRE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
NATAIMA	6.2	5.1	5.1	4.9	5.5	5.6	6.3	6.5	5.8	5.7	5.4	5.9	5.7
GUAMO	6.9	5.5	5.0	4.7	5.5	5.7	6.4	6.3	5.7	6.0	5.8	6.0	5.8
APTO SANTIAGO VILA	6.4	5.4	5.3	4.9	5.5	5.6	6.2	6.2	5.8	5.8	5.8	6.2	5.8
CAJAMARCA	5.1	4.4	4.5	3.7	4.0	3.9	4.3	4.4	4.3	4.3	4.2	4.9	4.3
CEMENTOS DIAMANTE	6.2	5.0	4.9	4.7	5.5	5.5	6.2	6.1	5.5	5.3	5.5	6.0	5.6
PERALES HATO OPIA	6.1	4.7	4.6	4.2	5.0	5.5	6.4	6.4	5.5	5.1	4.7	5.5	5.3
APTO PERALES	5.7	4.6	4.4	4.3	5.0	5.4	6.2	6.3	5.8	5.1	4.5	5.2	5.2
APTO EL EDEN	5.5	4.7	4.5	4.2	4.1	4.5	5.8	6.1	4.9	4.4	4.3	4.8	4.8
APTO MATECANA	6.1	5.2	5.0	4.3	4.4	4.9	6.0	5.9	4.9	4.6	4.8	5.4	5.1
BOHEMIA LA	6.7	5.5	5.6	4.7	4.8	5.0	6.1	6.3	5.4	5.1	5.2	6.0	5.5
VERACRUZ	4.5	3.9	3.5	3.0	3.1	3.5	4.3	4.2	3.4	3.3	3.5	3.9	3.7
PROMEDIO CUENCA	6.0	4.9	4.8	4.3	4.8	5.0	5.8	5.9	5.2	5.0	4.9	5.4	5.2

Conforme a lo anterior se define el valor de la radiación solar (RS) para cada una de las estaciones virtuales en función de su latitud, obteniendo su valor para cada una de las microcuencas como se observa en la **Figura 4-59**.

Figura 4-59: Radiación solar promedio en la cuenca del río Coello.



4.5.4 Punto de rocío

El punto de rocío se define como la temperatura en la cual se enfría el aire con un contenido de vapor de agua constante, si la temperatura de enfriamiento es menor que el punto de rocío se condensa, produciendo neblina, rocío o escarcha en temperaturas muy bajas y puede calcularse como se indica a continuación (IDEAM, 2010a). Este parámetro se considera constante dado que se calcula de la siguiente manera:

$$PR = \frac{237.31 * \ln e_a - 429.29943}{19.038525 - \ln e_a} \quad (4.8)$$

Donde:

PR: punto de rocío (°C)

e_a : presión real de vapor (kPa)

La presión real de vapor es despejada de la siguiente ecuación.

$$HR = \frac{e_a}{e^o(T)} * 100 \quad (4.9)$$

Donde:

HR: humedad relativa (%)

e_a : presión real de vapor (kPa)

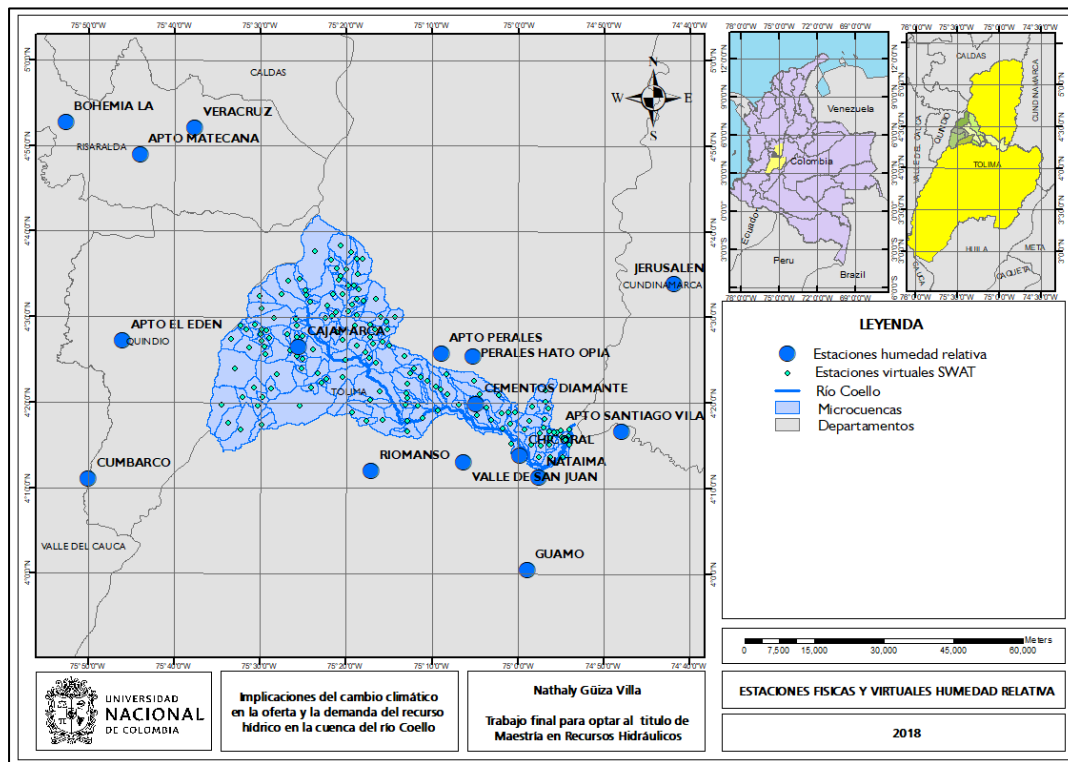
$e^o(T)$: presión de saturación a la temperatura T(kPa), la cual se calcula con la ecuación a continuación.

$$e^o(T) := 0.6108 * \exp\left(\frac{17.269425 * t}{237.30 + t}\right) \quad (4.10)$$

Donde t es la temperatura media del mes ($^{\circ}\text{C}$).

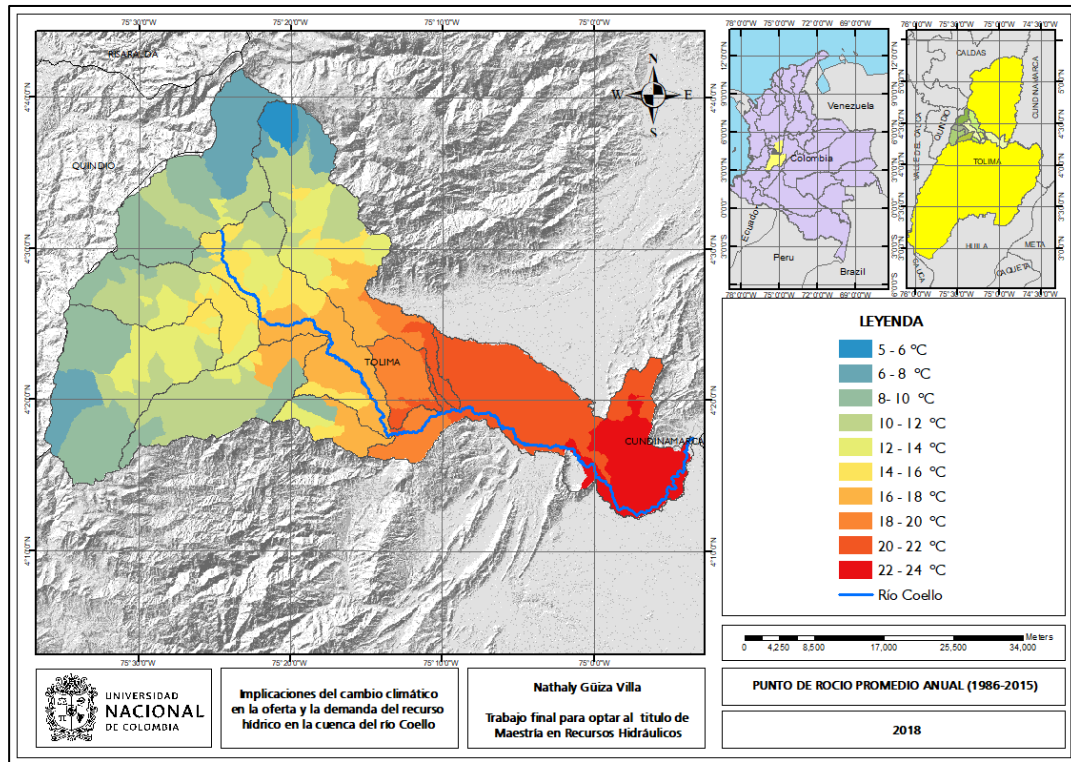
Dado que la presión de saturación depende de la temperatura, esta variable tendrá un cambio en el tiempo debido a los aumentos de temperatura del cambio climático, por consiguiente, habrá un cambio en la humedad relativa. Por lo anterior, se considera constante la presión real de vapor, y como el punto de rocío depende únicamente de dicha variable según la ecuación (4.8), este parámetro también será invariable en el tiempo, utilizando entonces los datos del estudio base que usa la humedad relativa medida en las estaciones de la **Figura 4-60**.

Figura 4-60: Estaciones virtuales y físicas de humedad relativa usadas en la modelación.



Los datos de humedad relativa fueron usados en conjunto con los datos de temperatura indicados anteriormente con el fin de definir el punto de rocío en cada una de las 174 estaciones virtuales del modelo, para cada uno de los doce meses del año considerando su valor constante, teniendo los datos de la **Figura 4-61**.

Figura 4-61: Punto de rocío promedio en la cuenca del río Coello.



4.5.5 Velocidad del viento

Este parámetro se considera constante, por lo tanto, se hace uso de los datos del estudio base los cuales utilizan la información de las estaciones climatológicas que miden esta variable la cuales se muestran en la **Figura 4-62**, junto con las estaciones virtuales de las microcuencas para el modelo SWAT, para definir el valor de cada una de ellas se utilizó la velocidad del viento medida en la estación climatológica más cercana, sin embargo es de destacar que la diferencia de valores medidos no es muy notoria, con valores de 2.34 m/s a 2.37 m/s como se observa en la **Figura 4-63**.

Figura 4-62: Estaciones virtuales y físicas de velocidad del viento usadas en la modelación.

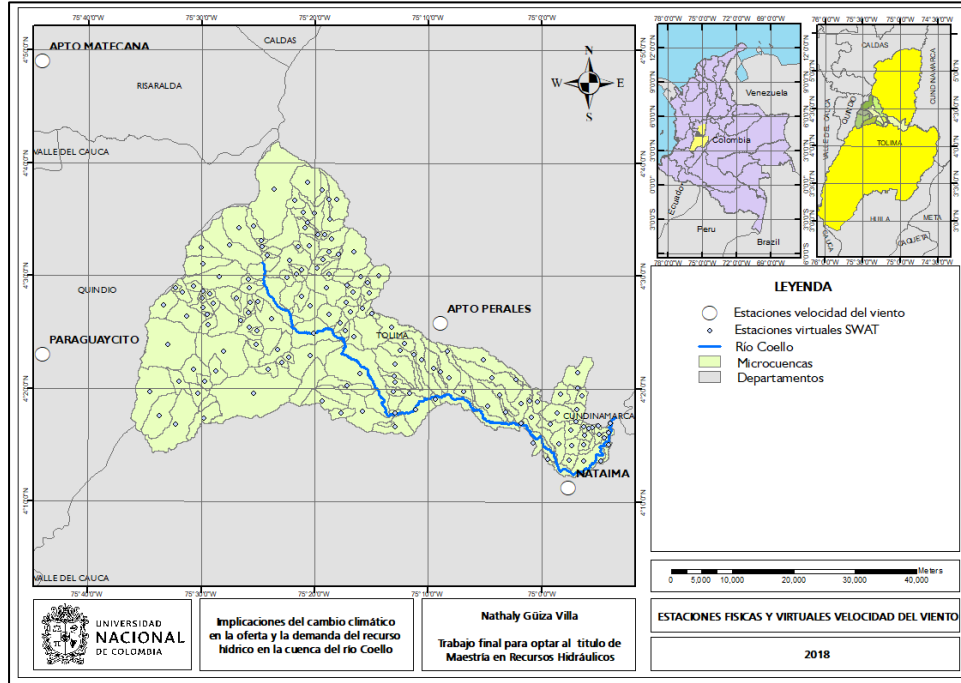
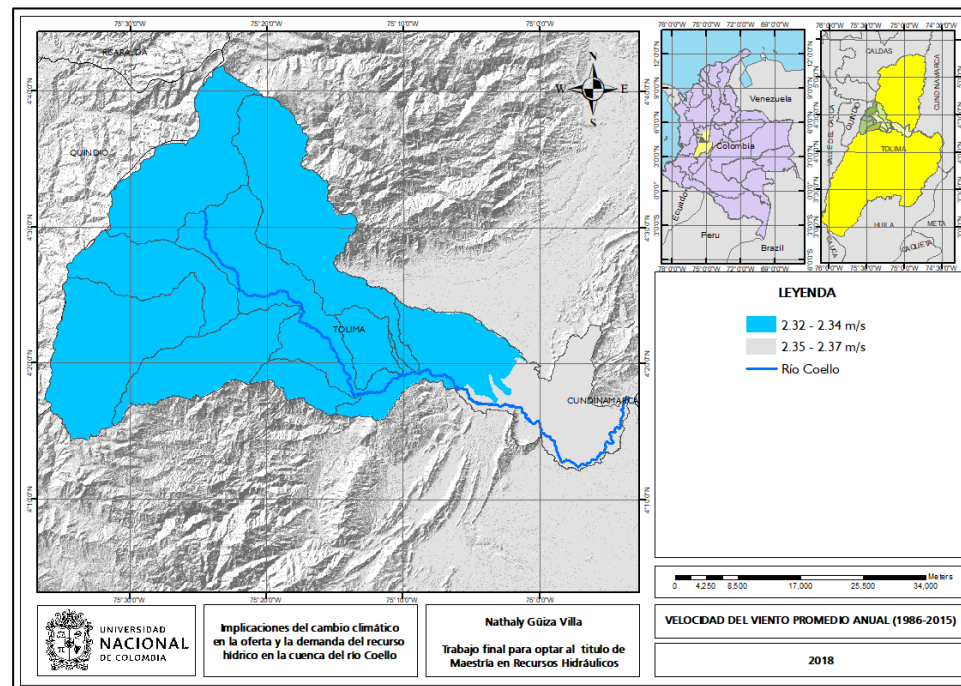


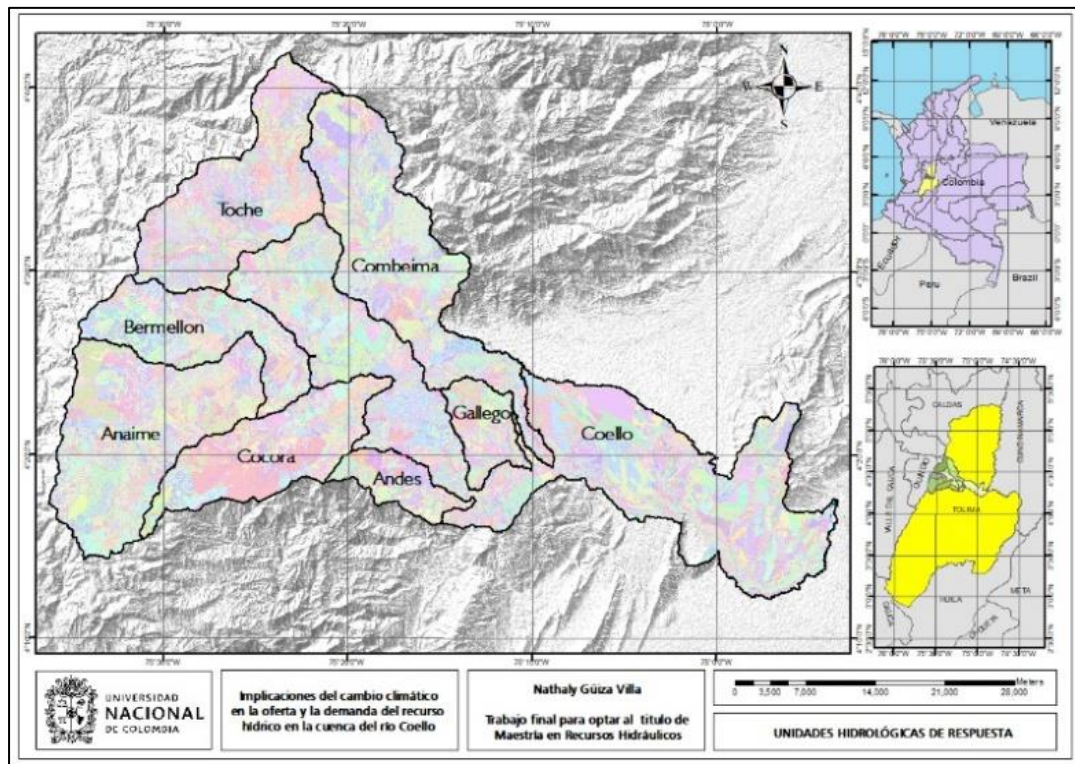
Figura 4-63: Velocidad del viento promedio en la cuenca del río Coello.



4.6 Unidades hidrológicas de respuesta (URH)

Con las entradas anteriores el software creo 3485 unidades hidrológicas de respuesta, superponiendo el 5% del uso de suelos, el 5% de los tipos de suelos y el 10% de las pendientes, estas unidades se muestran en la **Figura 4-64**.

Figura 4-64: Unidades hidrológicas de respuesta cuenca del río Coello.



4.7 Calibración y validación del modelo

En primera medida se reprodujo el modelo para la línea base, calibrándolo y validándolo en los periodos, 1986-1996 y 1996-2005, respectivamente. Fueron usados como estimación inicial los parámetros de calibración del estudio base (2017) para definir los valores de calibración del modelo de este trabajo, los cuales se muestran en la **Tabla 4-5**.

Tabla 4-5: Parámetros calibración modelo SWAT. Fuente: (Pontificia Universidad Javeriana, 2017)

Código en SWAT	Parámetro	Unidades
ALPHA_BF	Constante de recesión de flujo base	1/día
CN2	Numero de curva	Adimensional
ESCO	Factor de compensación de evaporación del agua en el suelo	Adimensional
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible en las capas del suelo	mm/hr
SOL_K2	Conductividad hidráulica saturada del suelo	mm/hr
REVAPMN	Profundidad mínima de agua en el acuífero superficial para la ocurrencia de percolación al acuífero profundo	mm
GWQMN	Profundidad mínima de agua en el acuífero superficial para la ocurrencia de escurrimiento subsuperficial	mm
RCHRG_DP	Porción de agua percolada que llega al acuífero profundo	Adimensional

Dichos parámetros dependen del tipo de suelo y de su cobertura, variables que este trabajo considera constantes, por lo tanto, se asume que los parámetros de calibración no tendrán un cambio en el tiempo para su uso con las variables climáticas a modificar en el modelo (Precipitación y temperatura). La calibración se realiza de manera automática, separando el periodo de observación de caudales en dos. Los valores finales de calibración usados en este trabajo se indican en la tabla a continuación.

Tabla 4-6: Valores de los parámetros calibración usados en el modelo SWAT

Código en SWAT	Tipo de variación	Valor inicial (Pontificia Universidad Javeriana, 2017)	Valor final
ALPHA_BF	Reemplazo	0.048	0.15
CN2	Relativa	-10%	14%
ESCO	Reemplazo	0.7	0.15
SOL_AWC	Relativa	47%	-8%
SOL_K2	Relativa	-50%	-114%
REVAPMN	Reemplazo	75	12.89
GWQMN	Reemplazo	3500	3666
RCHRG_DP	Reemplazo	0.3	0.27

Una vez calibrado el modelo se evalúa su eficiencia haciendo uso del índice de Nash-Sutcliffe, el cual es calculado con la siguiente ecuación.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim\ i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad (4.11)$$

Donde,

E: coeficiente de Nash-Sutcliffe

$Q_{sim\ i}$: caudal simulado (m³/s)

Q_i : caudal medido (m³/s)

\bar{Q} : media de los caudales observados. (m³/s)

Este índice tiene un valor desde 1 hasta menos infinito, mientras más cercano sea el valor de E a 1, mejor representa el modelo los caudales observados, de acuerdo con los valores sugeridos mostrados a continuación.

Tabla 4-7: Valores de referencia del coeficiente de Nash-Sutcliffe (Pontificia Universidad Javeriana, 2017).

E	Ajuste
<0.2	Insuficiente
0.2-0.4	Satisfactorio
0.4-0.6	Bueno
0.6-0.8	Muy bueno
>0.8	Excelente

Además del índice anterior, se realiza una revisión del valor de R en la dispersión de los datos observados y simulados, así como del mínimo error cuadrático medio (RMSE) calculado con la ecuación (3.12). El proceso de calibración y validación del modelo fue realizado en la estación Payandé para el periodo 1986-1995 y 1996-2004 respectivamente, teniendo las series mostradas en las siguientes gráficas.

Figura 4-65: Caudal simulado en la estación Payandé, periodo de calibración.

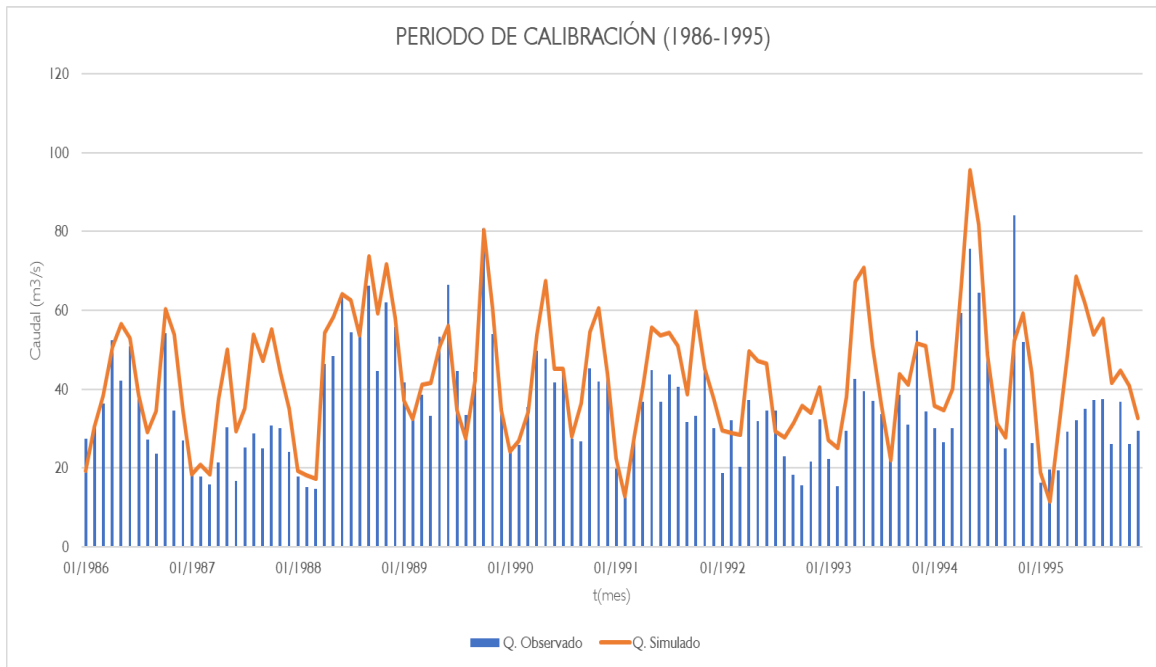


Figura 4-66: Caudal simulado en la estación Payandé, periodo de validación.

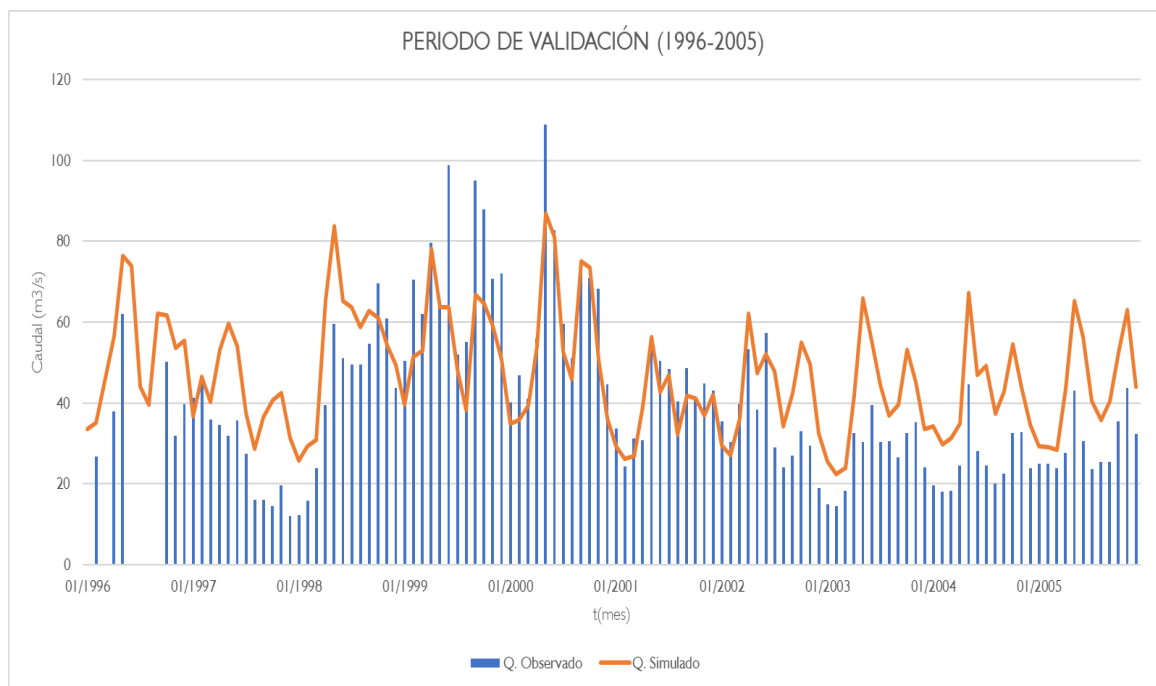
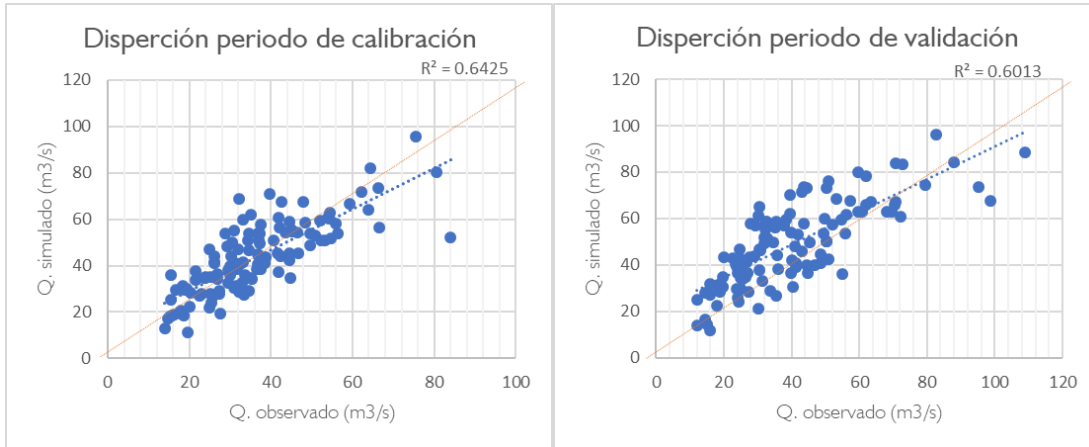


Figura 4-67: Dispersión datos simulados y observados



De los datos anteriores se tienen los coeficientes de error mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 4-8: Valores del coeficiente de Nash-Sutcliffe calculados para las series de calibración y validación.

Periodo	Estación de aforo	E	RMSE	R2
Calibración (1986-1995)	Payandé	0.29	12.05	0.64
Validación (1996-2004)	Payandé	0.42	15.18	0.60

Se considera una simulación satisfactoria de acuerdo con los valores mencionados y como criterio principal el coeficiente de Nash-Sutcliffe, que es cercano a 0.3 para la calibración y aproximadamente 0.4 para la validación.

4.8 Caudales resultantes modelo SWAT

Una vez calibrado y validado el modelo, se reproduce nuevamente con los datos de precipitación y temperatura proyectados, obteniendo las series de caudales para los cierres de las 174 microcuencas definidas, en las gráficas a continuación se pueden observar las series de caudales tanto observadas como futuras para la estación Payandé,

Figura 4-68: Comparación caudales para cada uno de los modelos en el escenario RCP 4.5, estación Payandé.

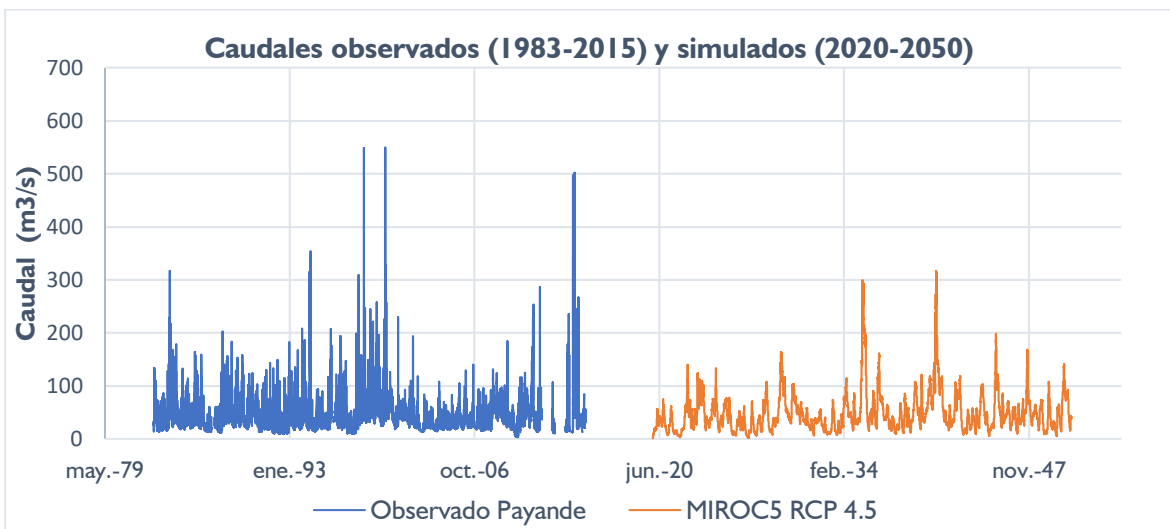
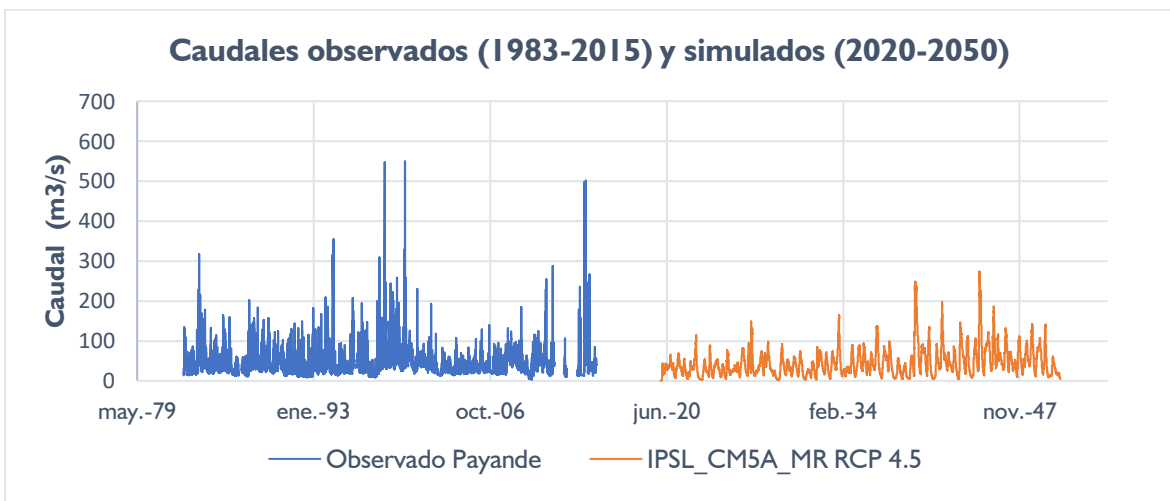
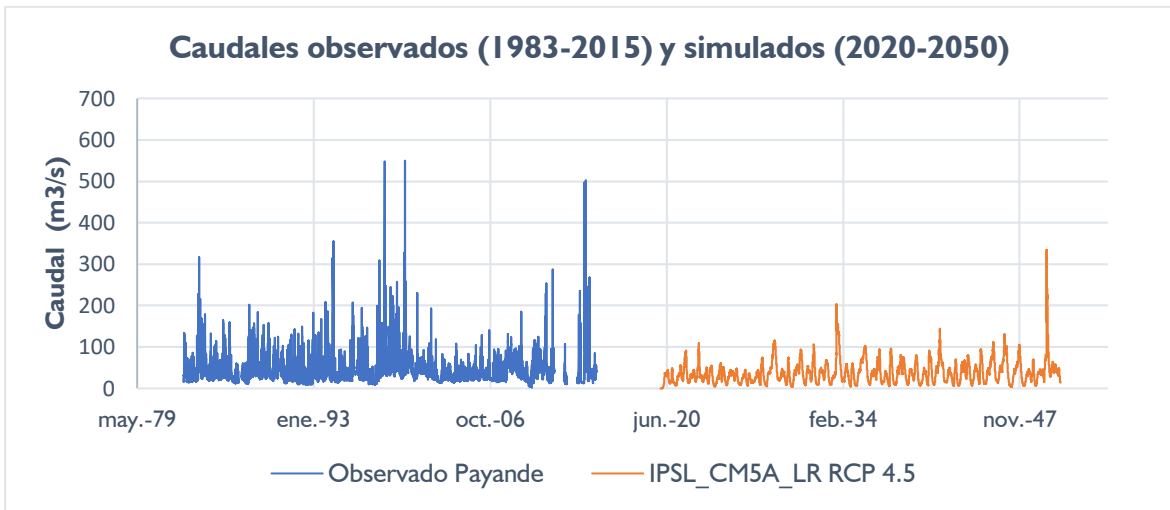
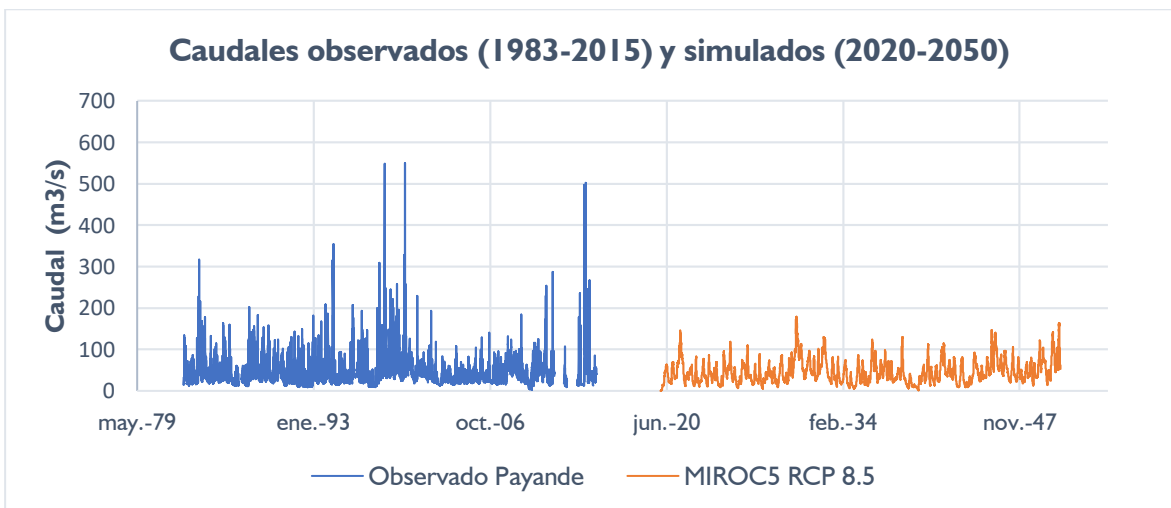
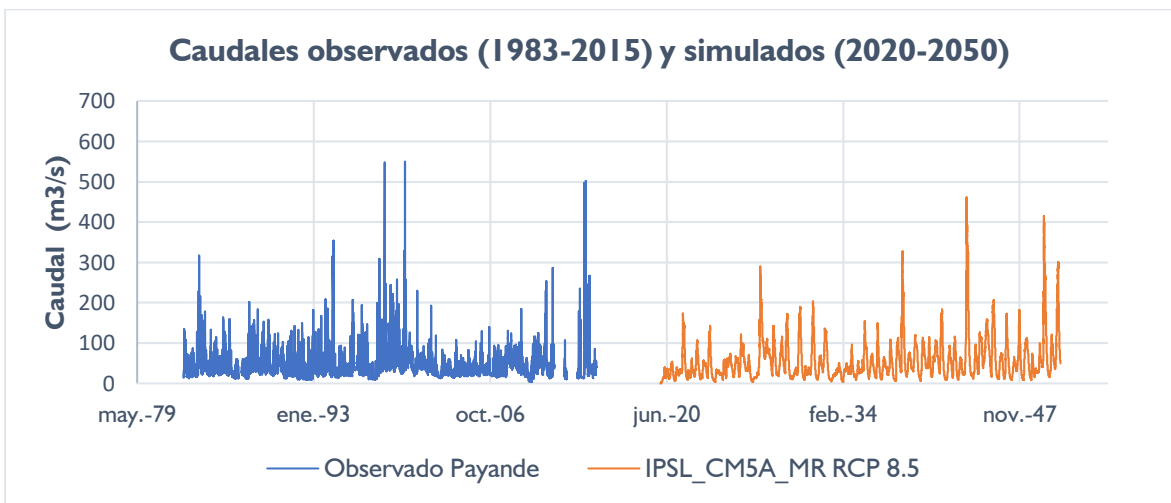
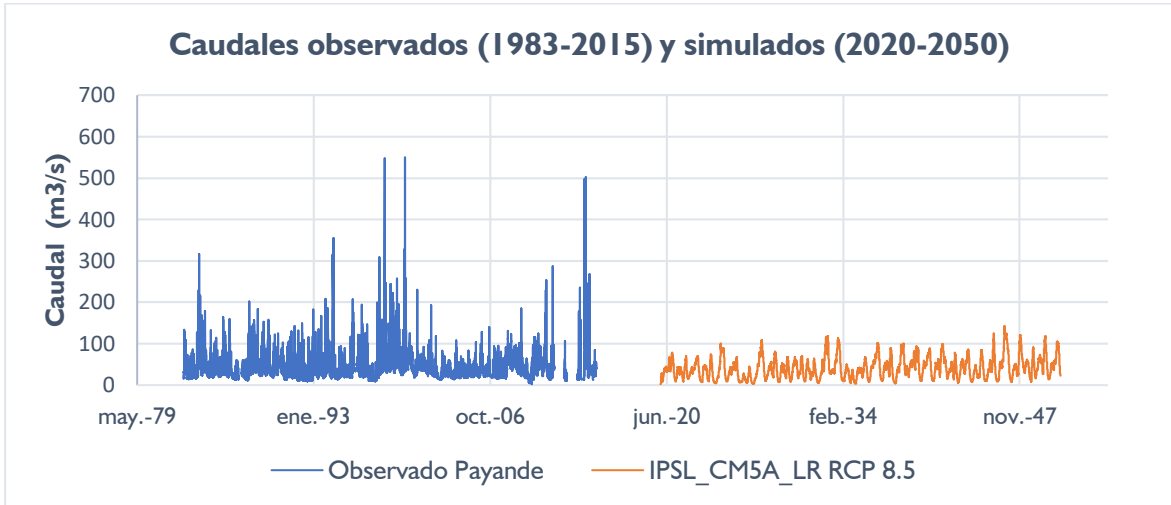


Figura 4-69: Comparación caudales para cada uno de los modelos en el escenario RCP 8.5, estación Payandé.



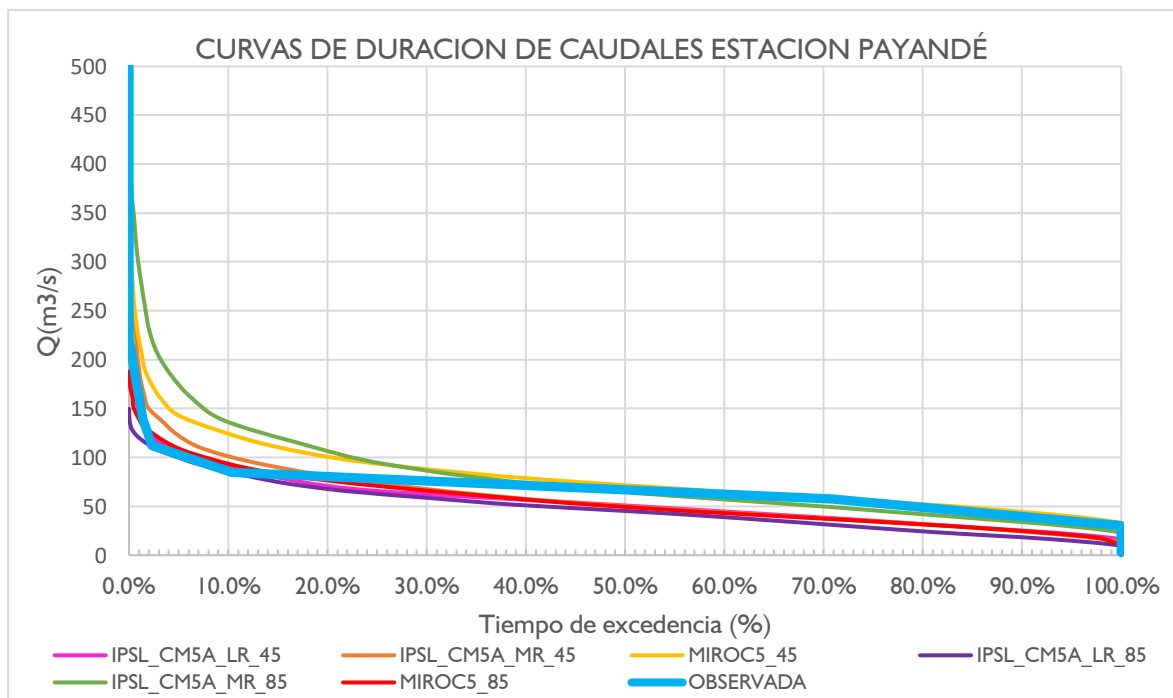
En las anteriores gráficas se observa un descenso en los valores de los caudales en todos los modelos y escenarios, con excepción de los modelos MIROC5 en el RCP 4.5 y el modelo IPSL:CM5A_MR RCP 8.5, que como se indicó anteriormente tienen incrementos en la precipitación en varios meses del año.

4.9 Curva de duración de caudales

Una curva de duración de caudales indica el porcentaje de tiempo en que cada caudal es igualado o excedido. Para ello se realizó un análisis estadístico clasificando sus valores de mayor a menor para posteriormente calcular su frecuencia absoluta (duración del caudal). Para construir la curva se grafican los valores de caudal en el eje de las ordenadas y en el eje de las abscisas su frecuencia acumulada relativa (%) asociada. (Monsalve, 1999).

El anterior proceso se realiza para establecer los valores de caudal en cada uno de los porcentajes de excedencia del tiempo con los valores de salida del modelo SWAT para cada uno de los modelos escenarios, lo cual puede verse gráficamente en la estación Payandé, en la Figura 4-70.

Figura 4-70: Comparación de curvas de duración de caudales, estación Payandé

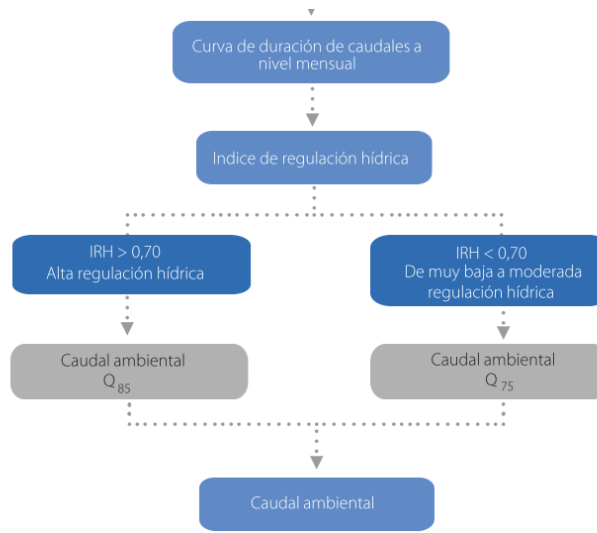


En dicha figura es posible observar que la curva de duración de caudales en todos los casos se desplaza hacia arriba en el eje de las ordenadas del 0 al 30% de tiempo de excedencia indicando un posible aumento de los eventos extremos como se ha mostrado también en las gráficas de precipitación, a su vez se presenta una disminución con respecto al valor observado del 30% al 100% del tiempo, sustentando las gráficas anteriores en las que se observa una reducción en el caudal.

4.10 Caudal ambiental

Una vez definida la curva de duración de caudales es posible calcular el valor del caudal ambiental, siguiendo el procedimiento propuesto por el IDEAM(2015), en el estudio nacional del agua conforme al diagrama de flujo de la **Figura 4-71**.

Figura 4-71: Diagrama de flujo para el cálculo del caudal ambiental



El procedimiento anterior fue realizado con los caudales resultantes del modelo SWAT, teniendo en cuenta los valores del índice de regulación hídrica (IRH) calculados en el numeral 6.1 de este documento, en cada una de las microcuencas, para todos los modelos y escenarios escogidos.

Figura 4-72: Caudal ambiental en el modelo IPSL_CM5A_LR RCP 4.5.

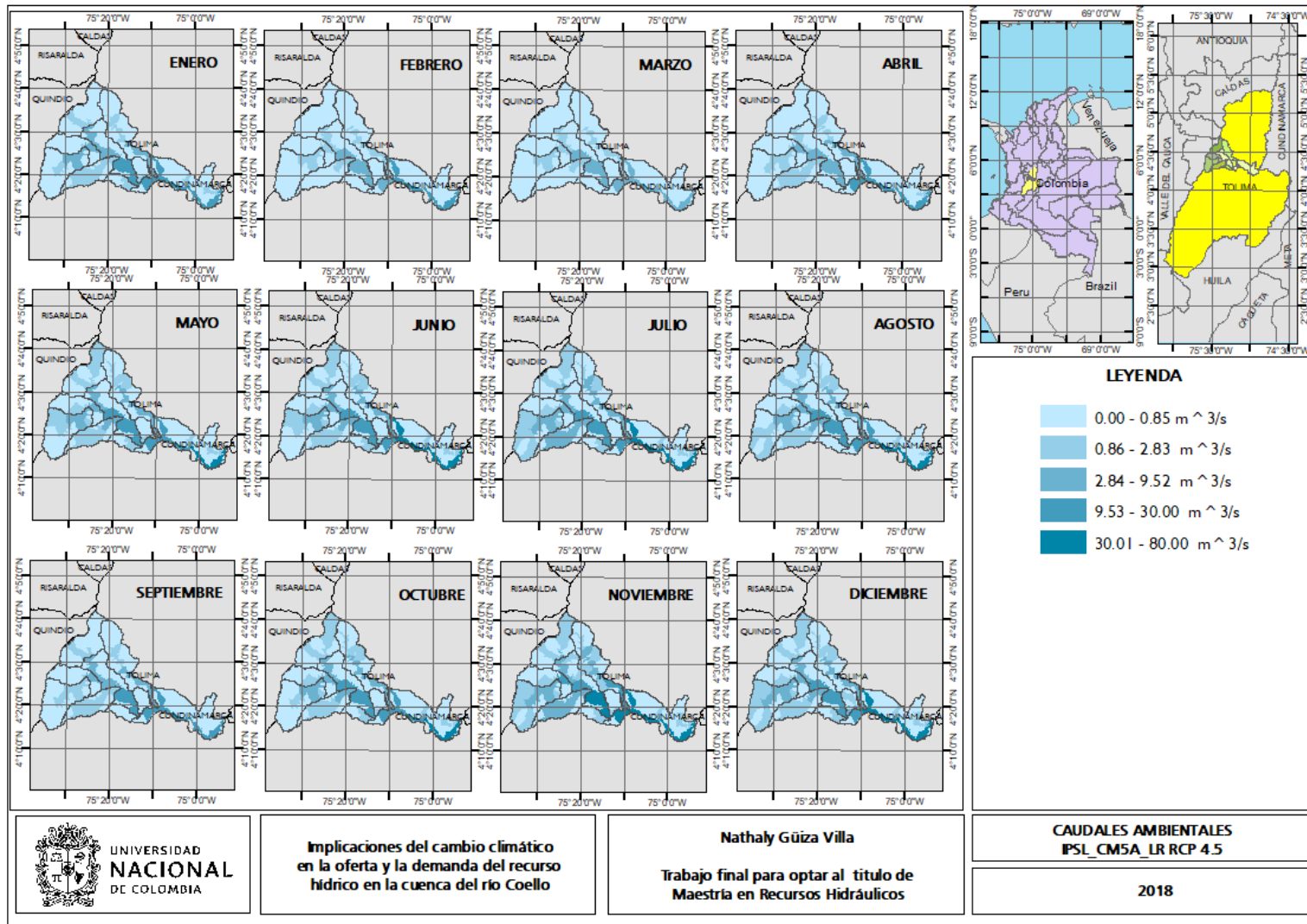


Figura 4-73: Caudal ambiental en el modelo IPSL_CM5A_MR RCP 4.5.

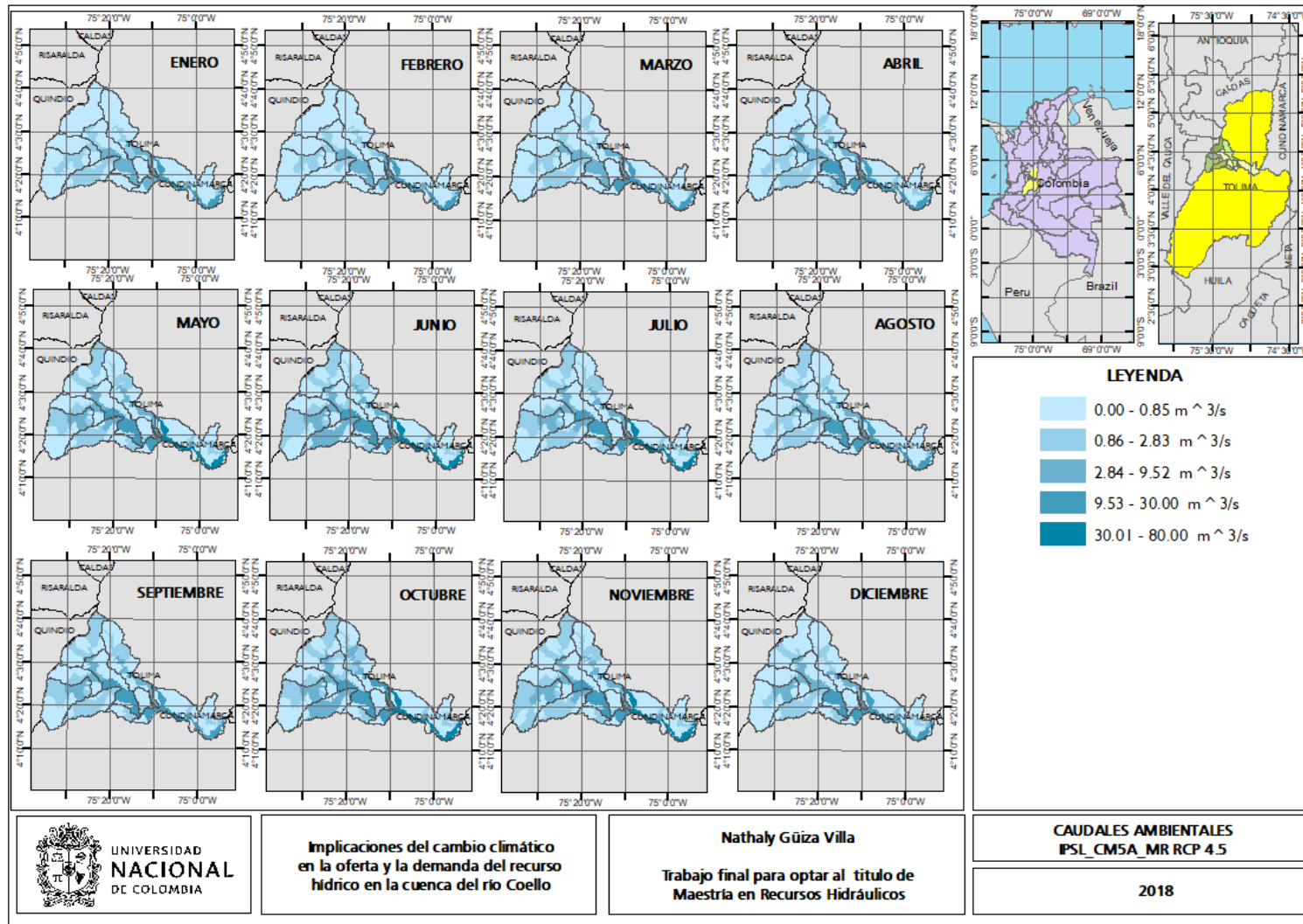


Figura 4-74: Caudal ambiental en el modelo MIROC5 RCP 4.5.

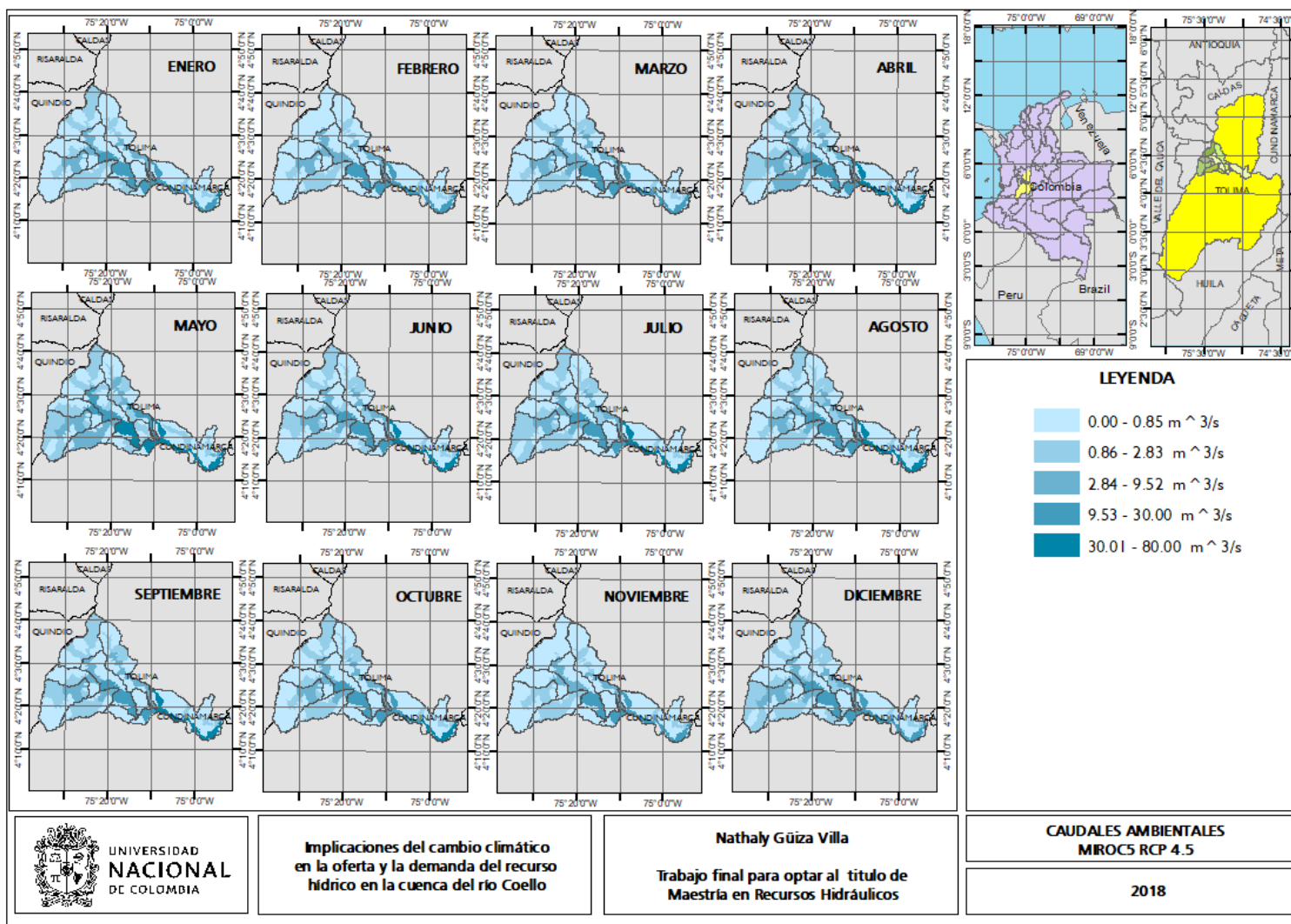


Figura 4-75: Caudal ambiental en el modelo IPSL_CM5A_LR RCP 8.5.

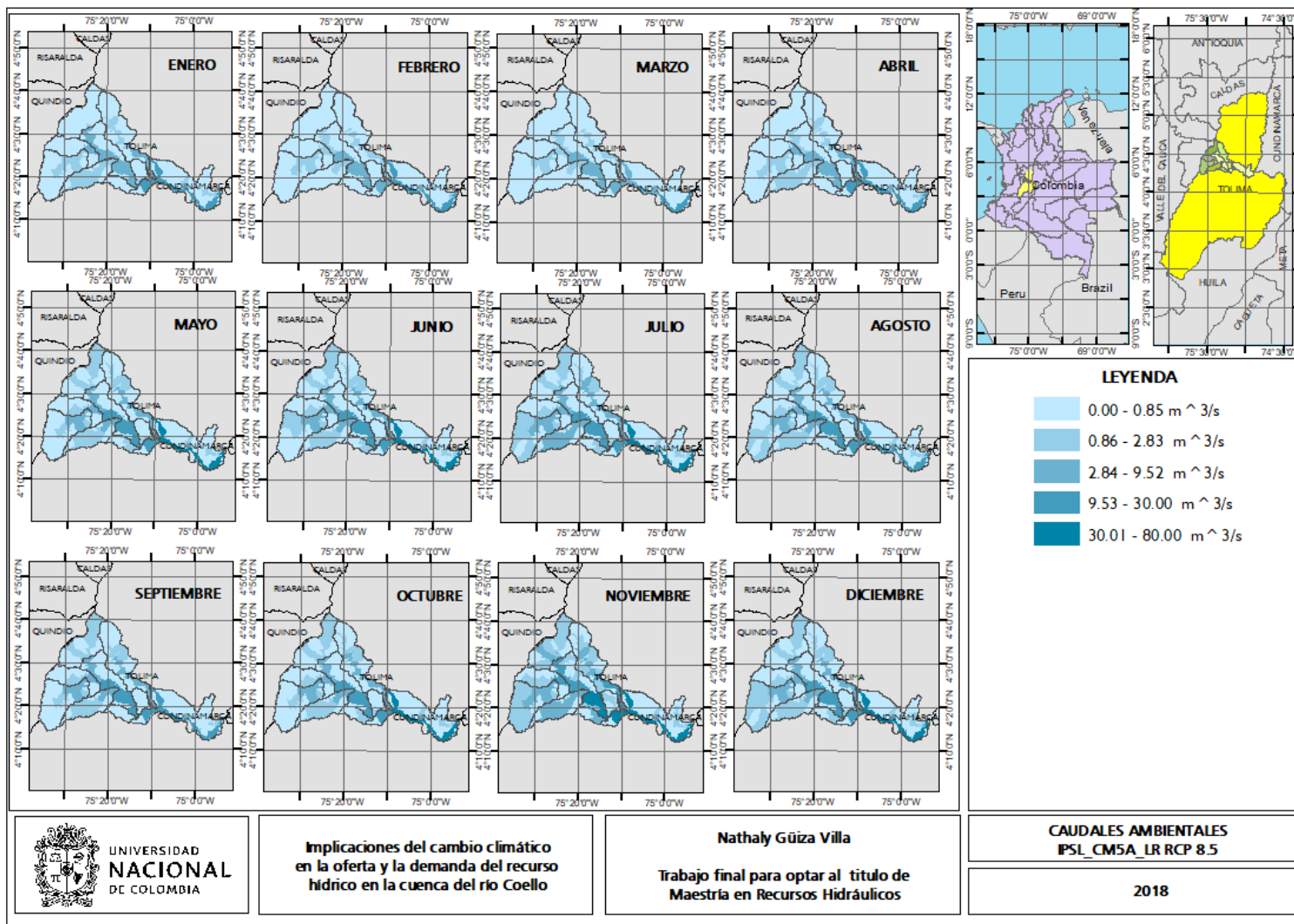


Figura 4-76: Caudal ambiental en el modelo IPSL_CM5A_MR RCP 8.5.

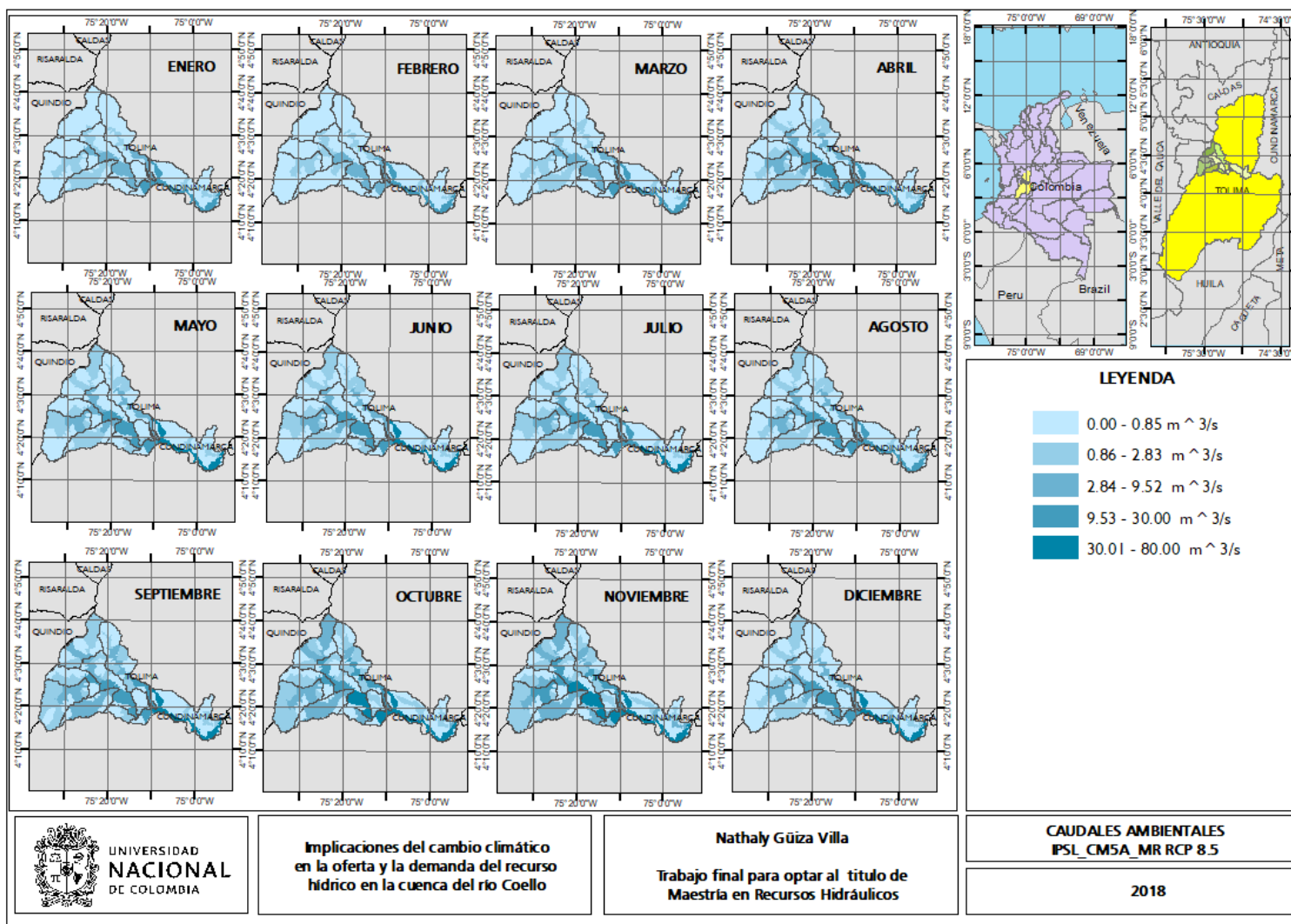
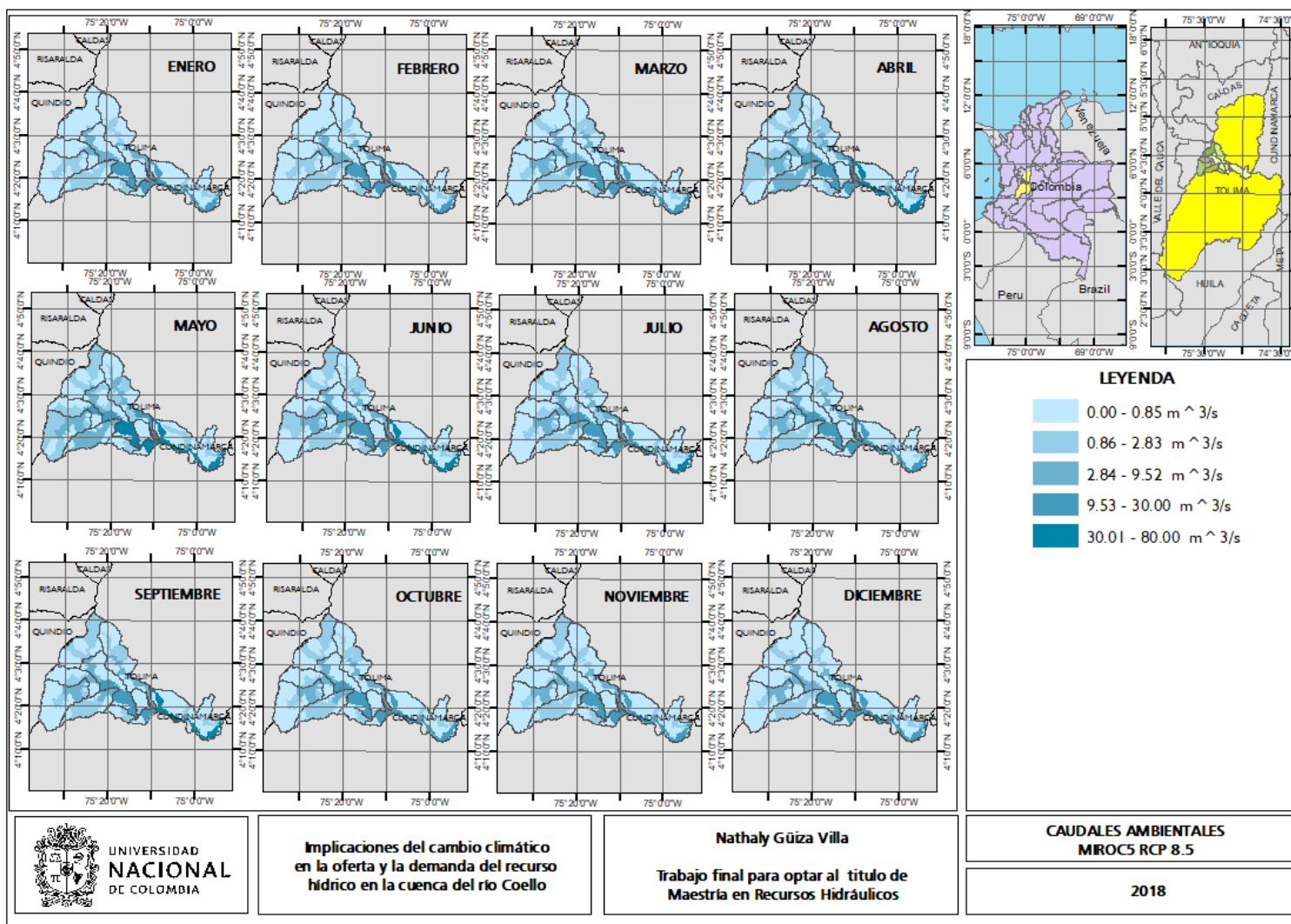


Figura 4-77: Caudal ambiental en el modelo MIROC5 RCP 8.5.



En las gráficas anteriores se puede observar que el caudal ambiental para cada modelo y escenario coincide con los periodos lluviosos y secos, incrementando o disminuyendo su valor respectivamente, dado que este caudal es tenido en cuenta para el cálculo de la oferta hídrica total disponible, su valor es de gran importancia dada su implicación en los ciclos ecológicos, por lo anterior, se debe hacer lo posible para que este valor sea conservado, extrayendo para las actividades propias de la cuenca un valor de caudal que garantice que el caudal ambiental se conserve permanentemente en el cauce.

4.11 Resumen modelación hidrológica.

En este capítulo se mostró en primera medida las variables requeridas para la realización de la modelación hidrológica, por lo anterior se especifican las variables climáticas proyectadas (precipitación y temperatura), así como su posible cambio futuro para cada una de las microcuencas definidas para ese propósito. La temperatura como se mencionó en el capítulo anterior presenta un incremento constante de 2°C para el escenario más optimista y de 2.5°C, en el caso de la precipitación su aumento o disminución depende del modelo evaluado y del mes de interés. Una vez realizada la modelación al obtener los caudales futuros fue evidente una disminución en sus valores diarios con respecto a los caudales históricos, pero con un posible aumento de los valores extremos lo cual es evidente en el cambio de la pendiente de la curva de duración de caudales la cual disminuye en todos los casos en un porcentaje de excedencia mayor al 30% y aumenta el valor de los caudales para tiempos de excedencia menores a dicho valor. Finalmente se realiza un cálculo del caudal ambiental, su valor dependerá del mes de interés dadas las condiciones de precipitación de cada modelo y escenario. Todo lo descrito previamente podrá tener graves implicaciones en las dinámicas ecológicas, sociales, económicas, entre otras que pueden verse afectadas por los cambios en la temperatura y en la precipitación, así como por plausibles escenarios de riesgo producto de la posibilidad del aumento de los eventos extremos.

5 Proyección de la demanda

En esta fase se proyectaron las demandas para los sectores doméstico, industrial y agrícola, con el fin de obtener la demanda total asociada a la cuenca.

5.1 Sector agrícola

Esta demanda se refiere a los requerimientos hídricos del cultivo, que deben ser suplidos de manera natural o artificial, por lo tanto, su valor es calculado en función de la evapotranspiración del cultivo y el agua aportada por la precipitación (IDEAM, 2013). Tanto la evapotranspiración del cultivo como la precipitación se verán afectados por el cambio climático, luego estas variables calculadas previamente componen la proyección de esta demanda, siguiendo el procedimiento propuesto por el IDEAM (2013), indicado a continuación.

Inicialmente se calcula la evapotranspiración de referencia de acuerdo con la metodología de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), utilizando la ecuación de Penman-Monteith mostrada a continuación (FAO, 1990).

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(RN - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2(e^o(T) - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad (5.1)$$

Donde:

ET_o : evapotranspiración de referencia (mm/día)

RN: radiación neta en la superficie del cultivo ($MJ/m^2 \cdot día$)

G: flujo de calor del suelo ($MJ/m^2 \cdot día$)

T: temperatura media del aire a 2 m de altura (°C)

u_2 : velocidad del viento a 2 m de altura (m/s)

$e^o(T)$: presión de vapor de saturación (kPa) calculada con la ecuación (4.10)

e_a : presión real de vapor (kPa) calculada con la ecuación (4.9) considerada constante.

$e^o(T) - e_a$: déficit de presión de vapor (kPa)

Δ : pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)

γ : constante psicrométrica (kPa/°C)

Lo anterior se calculó en función de las siguientes ecuaciones:

$$RN = R_{ns} - R_{nl} \quad (5.2)$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha)RS \quad (5.3)$$

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{(T_{max,k})^4 + (T_{min,k})^4}{2} \right] * (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) * \left(1.35 * \frac{RS}{RS_0} - 0.35 \right) \quad (5.4)$$

$$RS_0 = 0.731 * RA \quad (5.5)$$

Donde,

Rns: radiación neta solar (MJ/m²*día)

Rnl: radiación neta de onda larga (MJ/m²*día)

Rs: radiación solar (MJ/m²) la cual es calculada con la ecuación (4.2)

α : Albedo, fracción de la radiación que es reflejada por la superficie, para el cultivo de referencia tiene un valor de 0.23

σ : Constante de Stefan – Boltzman que tiene un valor de $4.903 \cdot 10^{-9}$ (MJ/k⁴*m²*día)

$T_{max,k}$: Temperatura máxima en un periodo de 24 horas (k)

$T_{min,k}$: Temperatura mínima en un periodo de 24 horas (k)

RS_0 : radiación solar en un día despejado (MJ/m²*día)

RA: radiación extraterrestre (MJ/m²*día) calculada con la ecuación (4.3)

$$G = 0.07 * (T_{mes.i+1} - T_{mes.i-1}) \quad (5.6)$$

$$\Delta = \frac{e^{\circ}(T) * 4098}{(T + 237.3)^2} \quad (5.7)$$

$$\gamma = 0.665 * 10^{-3}P \quad (5.8)$$

$$P = 101.3 * \left(\frac{293 - (0.0065 * z)}{293} \right)^{5.26} \quad (5.9)$$

$T_{mes\ i+1}$: Temperatura media del mes inmediatamente siguiente al mes calculado (°C).

$T_{mes\ i-1}$: Temperatura media del mes inmediatamente anterior al mes calculado (°C)

P: (kPa)

z: Elevación (m.s.n.m)

Posterior a ello se calcula la evapotranspiración del cultivo,

$$ET_c = K_c * ET_o \quad (5.10)$$

Donde:

ET_c : evapotranspiración del cultivo [mm/día]

K_c : coeficiente del cultivo [adim], función de la duración del periodo de crecimiento.

ET_o : evapotranspiración del cultivo de referencia [mm/día]

Posteriormente se calcularon los requerimientos de agua del cultivo haciendo uso del software Cropwat (FAO, 1990), incluyendo las variables de precipitación, temperatura y humedad relativa, para cada uno de los modelos y escenarios, calculadas a lo largo de este trabajo. Adicional a ello se usaron los valores de suelos definidos para realizar la modelación hidrológica en SWAT.

En la cuenca, así como en el departamento se cultiva gran variedad de productos agrícolas de acuerdo con el estudio base se tienen los productos y sus áreas de producción mostradas en la **Tabla 5-1**.

Tabla 5-1: Área y producción estimada de los cultivos dentro de la cuenca para los años 2011 y 2015 (Pontificia Universidad Javeriana, 2017).

Cultivo	Área estimada cuenca 2015 (Ha)
Arroz riego	27354
Frijol	537
Maíz	303
Yuca	153
Banano	2797
Cacao	3898
Café	16148
Caña Panelera	2295
Mango	290
Plátano	1436
Aguacate	14
Guanábana	3
Limón	73
Arracacha	445
Algodón	2632

Para estimar las demandas futuras para cada mes, se definió el inicio de siembra de acuerdo con el proyecto de Plan de ordenación y manejo de la Cuenca del río Coello (CORTOLIMA, 2006), así como la duración de las etapas de crecimiento y su coeficiente único del cultivo de las tablas realizadas por la FAO (1990) como se muestra en la **Tabla 5-2**.

Tabla 5-2: Inicio de siembra, etapas de crecimiento y coeficientes de cultivo.

Cultivo	Época de siembra (Meses)	Duración de las etapas de crecimiento del cultivo para distintos periodos de siembra (días)					Valores del coeficiente del cultivo		
		Inic. (Lini)	Des. (Ldes)	Med (Lmed)	Final (Lfin)	Total fecha de siembra	Kc ini	Kc med	Kc fin
Arroz riego	Mayo y Noviembre	30	30	60	30	150	1.05	1.2	0.8
Frijol	Marzo y septiembre	20	30	40	20	110	0.4	1.15	0.35
Maíz	12 de marzo y 12 de sept.	20	35	40	30	125	0.3	1.2	0.35
Yuca	Abril	150	40	110	60	360	0.3	1.1	0.5
Banano	Marzo	90	165	45	30	330	0.5	1.1	1.1
Cacao	Marzo	90	90	90	90	360	1	1.05	1.05
Café	Mayo y noviembre	50	60	70	44	224	1.05	1.1	1.1
Caña Panelera	Enero	30	60	180	95	365	0.4	1.25	0.75
Mango	Mayo	90	90	90	95	365	0.9	1.1	0.9
Plátano	Marzo	120	90	120	60	390	1	1.2	1.1
Aguacate	Febrero	40	60	60	30	190	0.6	0.85	0.75
Guanábana	Febrero	50	120	120	30	320	0.45	0.89	0.62
Limón	Abril	60	90	120	95	365	0.7	0.65	0.7
Arracacha	Marzo y Agosto	30	30	60	60	180	0.2	1.05	0.95
Algodón	20 de febrero	30	50	60	55	195	0.35	1.2	0.6

Establecidos los valores anteriores fue posible obtener los requerimientos de agua de riego para cada cultivo en todos los meses del año, contemplando las variables climáticas, que como se ha mostrado en capítulos anteriores tienen un cambio considerable. Utilizando el software cropwat se definieron los valores de temperatura y precipitación para la microcuenca donde se presentaba el escenario más crítico de dichas variables (mayor aumento y disminución respectivamente) dentro del área de siembra de cada uno de los cultivos, estableciendo su tipo de suelo y los coeficientes asociados al cultivo para cada uno de los ciclos de siembra definidos en la tabla anterior. Además, se repitió el proceso usando los datos observados en el periodo actual para establecer la magnitud del cambio en el requerimiento de riego del cultivo.

Dichos valores fueron agregados a nivel anual para mostrar el resumen indicado a continuación de los valores de requerimiento anual en metros cúbicos (m³) para cada uno de los modelos y escenarios, como se relaciona en la **Tabla 5-3**.

Tabla 5-3: Requerimientos hídricos de cada cultivo para cada modelo y escenario.

Demandas / Cultivo	Caña panelera	Banano	Plátano	Arracacha	Arroz
Modelo	(m³/año)	(m³/año)	(m³/año)	(m³/año)	(m³/año)
Actual	13,526,730	10,586,645	5,435,260	2,000,720	296,271,174
IPSL_LR45	20,755,980	12,443,853	6,388,764	1,768,430	393,076,980
IPSL_MR45	16,250,895	14,150,023	7,264,724	2,221,440	367,528,344
MIROC5_45	20,363,535	10,256,599	5,265,812	1,726,600	314,379,522
IPSL_LR85	19,092,105	19,523,060	10,023,280	1,762,645	390,751,890
IPSL_MR85	21,226,455	14,082,895	7,230,260	2,184,950	362,905,518
MIROC5_85	13,074,615	10,164,298	5,218,424	1,877,455	322,175,412
Demandas / Cultivo	Frijol	Maíz	Yuca	Cacao	Café
Modelo	(m³/año)	(m³/año)	(m³/año)	(m³/año)	(m³/año)
Actual	1,198,584	1,090,194	727,362	36,613,914	183,522,020
IPSL_LR45	1,629,258	1,295,325	982,872	50,693,490	245,481,896
IPSL_MR45	1,692,087	1,447,734	965,736	45,641,682	234,372,072
MIROC5_45	1,722,696	1,298,355	887,400	42,745,468	210,359,996
IPSL_LR85	1,543,875	1,289,568	940,950	49,820,338	243,624,876
IPSL_MR85	1,595,427	1,427,433	972,774	43,988,930	227,266,952
MIROC5_85	1,650,738	1,294,113	909,126	43,423,720	211,441,912
Demandas / Cultivo	Mango	Aguacate	Guanábana	Limón	Algodón
Modelo	(m³/año)	(m³/año)	(m³/año)	(m³/año)	(m³/año)
Actual	2,626,240	42,462	14,127	329,011	12,299,336
IPSL_LR45	3,605,860	63,798	18,648	525,235	16,249,968
IPSL_MR45	3,245,970	53,830	18,066	465,740	14,647,080
MIROC5_45	3,038,620	41,524	18,198	375,804	12,157,208
IPSL_LR85	3,520,890	63,154	18,189	506,547	16,115,736
IPSL_MR85	3,134,320	55,426	16,644	468,149	14,812,896
MIROC5_85	3,091,110	46,858	17,994	386,900	13,054,720

Se observa en la tabla anterior un aumento generalizado de los requerimientos de riego en el cultivo, con algunas excepciones en los modelos donde existe un incremento considerable de la precipitación en el periodo húmedo.

Finalmente se convierten los valores anteriores a m³/s, dividiendo por el total de segundos en un año (31536000 s) para establecer la demanda hídrica para el sector agrícola, la cual se muestra en la **Tabla 5-4**.

Tabla 5-4: Demanda hídrica agrícola total para cada modelo y escenario.

Modelo y escenario	Demanda Total (m3/s)
Actual	17.73
IPSL_CM5A LR RCP 4.5	27.55
IPSL_CM5A MR RCP 4.5	26.12
MIROC5 RCP 4.5	23.42
IPSL_CM5A LR RCP 8.5	27.67
IPSL_CM5A MR RCP 8.5	25.84
MIROC5 RCP 8.5	23.52

5.2 Sector domestico

La demanda de este sector se refiere a la cantidad de agua necesaria para que un habitante satisfaga sus necesidades básicas (IDEAM, 2013), su dotación máxima es función del nivel de complejidad del municipio de interés, por lo tanto, se usaron los valores mostrados en la **Tabla 5-5**, extraídos del estudio base mencionado a lo largo de este documento.

Tabla 5-5: Dotación neta máxima (Pontificia Universidad Javeriana, 2017).

Municipio	Altura promedio	Población urbana (hab.)	Clasificación	Importancia económica	Nivel de complejidad	Dotación neta máxima
	m.s.n.m.	2015		Rango		l/hab.*día
Cajamarca	1814	9968	Medio	Bajo	Medio	115
Coello	629	1866	Bajo	Bajo	Bajo	100
Espinal	323	58367	Medio-Alto	Medio-Alto	Medio-Alto	135
Flandes	285	25056	Medio-Alto	Bajo	Medio-Alto	135
Ibagué	1285	528233	Alto	Alto	Alto	140
Rovira	949	9913	Medio	Bajo	Medio	125
San Luis	503	3705	Medio	Bajo	Medio	125

Los valores anteriores fueron multiplicados a la cantidad de habitantes de cada municipio proyectada para el año 2050, lo cual se realizó de acuerdo al método de crecimiento geométrico (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000)

$$P_f = P_0 * (1 + r)^t \quad (5.11)$$

Dónde:

P_f : población futura.

P_0 : población inicial.

r : factor que determina la tasa de crecimiento de la población

t : periodo que se desea estimar.

Los valores del factor que determina la tasa de crecimiento de la población fueron determinados en función de las proyecciones de población para cada municipio realizadas por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), obteniendo las proyecciones de población mostradas en la **Tabla 5-6**

Tabla 5-6: Proyecciones de población para el año 2050

MUNICIPIO	FACTOR r	POBLACIÓN 2005 (hab.)	POBLACIÓN 2050 (hab.)
Cajamarca	-0.07%	19789	19211
Coello	0.77%	9017	12734
Espinal	0.02%	76237	76775
Flandes	0.44%	27943	34017
Ibagué	1.09%	498130	810482
Rovira	-0.49%	21665	17352
San Luis	-0.05%	19262	18838

De acuerdo con las proyecciones anteriores se calculó la demanda hídrica del sector doméstico usando la dotación neta máxima para cada municipio obteniendo los valores mostrados en la **Tabla 5-7**

Tabla 5-7: Demanda hídrica sector doméstico año 2050.

MUNICIPIO	POBLACIÓN 2050 (hab.)	DOTACIÓN NETA MÁXIMA (L/hab.*d)	DEMANDA (L/Día)	DEMANDA (L/s)
Cajamarca	19211	115	2209268.583	25.57
Coello	12734	100	1273415.976	14.74
Espinal	76775	135	10364667.39	119.96
Flandes	34017	135	4592340.142	53.15
Ibagué	810482	140	113467467.5	1313.28
Rovira	17352	125	2168978.853	25.10
San Luis	18838	125	2354717.336	27.25

Realizando una comparación entre las demandas actuales calculadas por el estudio base, se tiene una diferencia de casi el doble de las demandas por la población como se muestra en la **Tabla 5-8**.

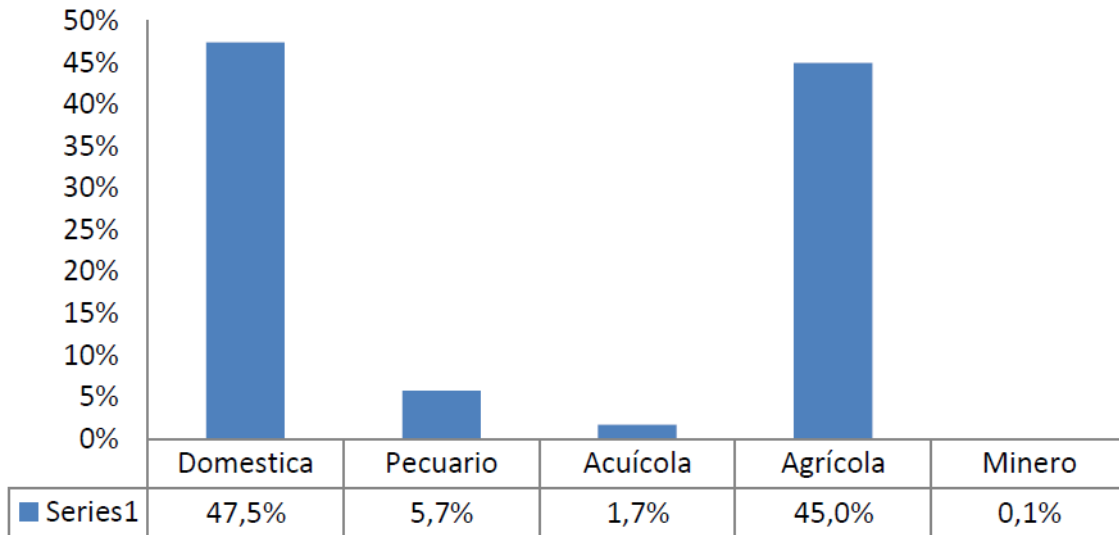
Tabla 5-8: Comparación demanda hídrica sector doméstico años 2015 y 2050.

MUNICIPIO	DEMANDA 2015 (L/S)	DEMANDA 2050 (L/S)
Cajamarca	26.15	25.57
Coello	4.14	14.74
Espinal	40.18	119.96
Flandes	38.59	53.15
Ibagué	774.97	1313.28
Rovira	2.16	25.10
San Luis	1.46	27.25
TOTAL	887.65	1579.06

5.3 Sector industrial

Según el censo realizado por CORTOLIMA citado en el estudio de la Pontificia Universidad Javeriana(2017), los usuarios del recurso hídrico están distribuidos en las actividades mostradas en la **Figura 5-1**.

Figura 5-1: Distribución de usuarios según censo realizado (Pontificia Universidad Javeriana, 2017)



Por lo anterior, en este apartado se considera como sector industrial las actividades pecuarias y acuícolas, considerando que la minería tiene un valor despreciable con relación a los demás y que el sector hidroeléctrico ni siquiera es mencionado.

Para proyectar sus demandas hídricas, de acuerdo al IDEAM (2013): “Las proyecciones por sector se calculan haciendo análisis sobre el comportamiento histórico de su tamaño y adoptando criterios sobre el aumento de su capacidad de producción”. Es por ello que para este sector se realizó un diagnóstico para calcular un factor de crecimiento de la industria en la cuenca. Ese factor fue utilizado para proyectar la demanda del sector industrial el cual se aplicó a cada una de las actividades mencionadas a continuación.

5.3.1 Sector pecuario

Para este sector se calculó un factor de crecimiento en función del valor agregado anual indicado en las cuentas departamentales con base en el año 2005 por rama de actividad económica, en este caso para la actividad de agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca, se tienen los valores indicados en la **Tabla 5-9**.

Tabla 5-9: Valor agregado para la agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca, departamento del Tolima, 2006-2016 (DANE, 2016).

ACTIVIDADES ECONÓMICAS (CIFRAS EN MILES DE MILLONES DE PESOS)	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca	1218	1483	1369	1418	1451	1437	1516	1516	1378	1338	1351
Producción pecuaria y caza	177	186	215	215	237	246	236	233	270	290	263
Pesca, producción de peces	5	24	14	15	14	15	15	16	18	18	17

De acuerdo con lo anterior se tiene una fluctuación en el crecimiento, su promedio anual es del 3% para la producción pecuaria y caza incluyendo las actividades de veterinaria, sin embargo dadas las fluctuaciones debidas a agentes externos como enfermedades, eventos extremos, entre otros, se decide usar la mitad de ese valor (1.5%/año) para aplicarse a las demandas hídricas pecuarias del año 2016 calculadas por la Pontificia Universidad Javeriana(2017), para obtener la demanda de este sector en el año 2050, como se muestra en la **Tabla 5-10**.

Tabla 5-10: Valor demanda hídrica sector pecuario.

ESPECIE	CONSUMO 2016 (m ³ /d)	CONSUMO 2050 (m ³ /d)
BOVINO	2819.6	4257.60
EQUINO	360.3	544.05
PORCINO	70.2	106.00
OVINO	35.3	53.30
CAPRINO	2.0	3.02
AVES	1611.5	2433.37
TOTAL	4898.9	7397.34

Se tiene entonces que de un consumo de 0.05m³/s en 2016 aumenta a un valor de 0.09 m³/s en 2050, teniendo los consumos discretizados por municipio mostrados en la **Tabla 5-11**.

Tabla 5-11: Valor demanda hídrica sector pecuario por municipio.

Municipio	Consumo (m ³ /día)
Cajamarca	942.03
Coello	813.82
Espinal	379.06
Flandes	358.24
Ibague	4375.68
Rovira	528.51
TOTAL	7397.34

5.3.2 Sector acuícola

Utilizando los datos de la Tabla 5-9 se establece una tasa de crecimiento promedio anual de 0.2% teniendo entonces las demandas proyectadas que se muestran en la **Tabla 5-12**.

Tabla 5-12: Valor demanda hídrica sector acuícola.

Tipo de pescado	Consumo 2016 (m ³ /año)	Consumo 2050 (m ³ /año)	Consumo 2050 (m ³ /s)
Cachama	34045	221333.439	0.007
Trucha	8184628	53209924	1.687
Otra	18688	121494.472	0.004
Total	8237361	53552751.9	1.698

Se tiene entonces un incremento desde un consumo de 0.26 m³/s en el año 2016 hasta 1.7 m³/s en el año 2050

5.4 Demanda hídrica total

De acuerdo con lo anterior se obtienen los valores de demanda hídrica total para la cuenca, estableciendo el valor de cada una de las microcuencas en función de los municipios en los que fue calculada, y de las microcuencas en las que se establecen los diferentes cultivos mencionados. Se establece un aumento considerable del valor de la demanda considerando una escala de esta para el periodo actual de 0 a 27 m³/s la cual aumenta hasta 48 m³/s para el año 2050 principalmente en la parte baja de la cuenca donde se concentran las actividades sociales y económicas, como se observa a continuación.

Figura 5-2: Demandas hídricas totales actuales

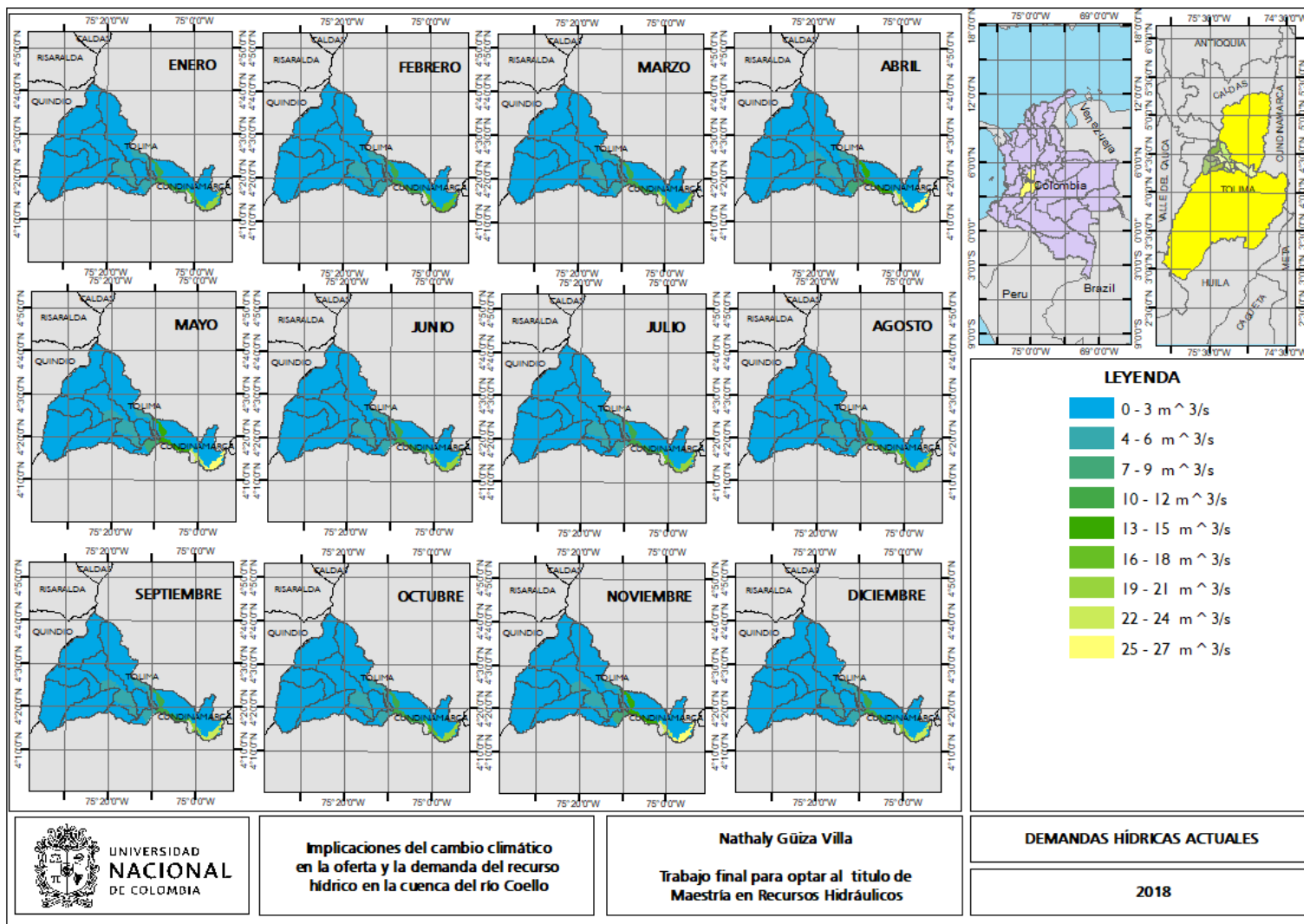


Figura 5-3: Demandas hídricas totales modelo IPSL_CM5A_LR RCP 4.5.

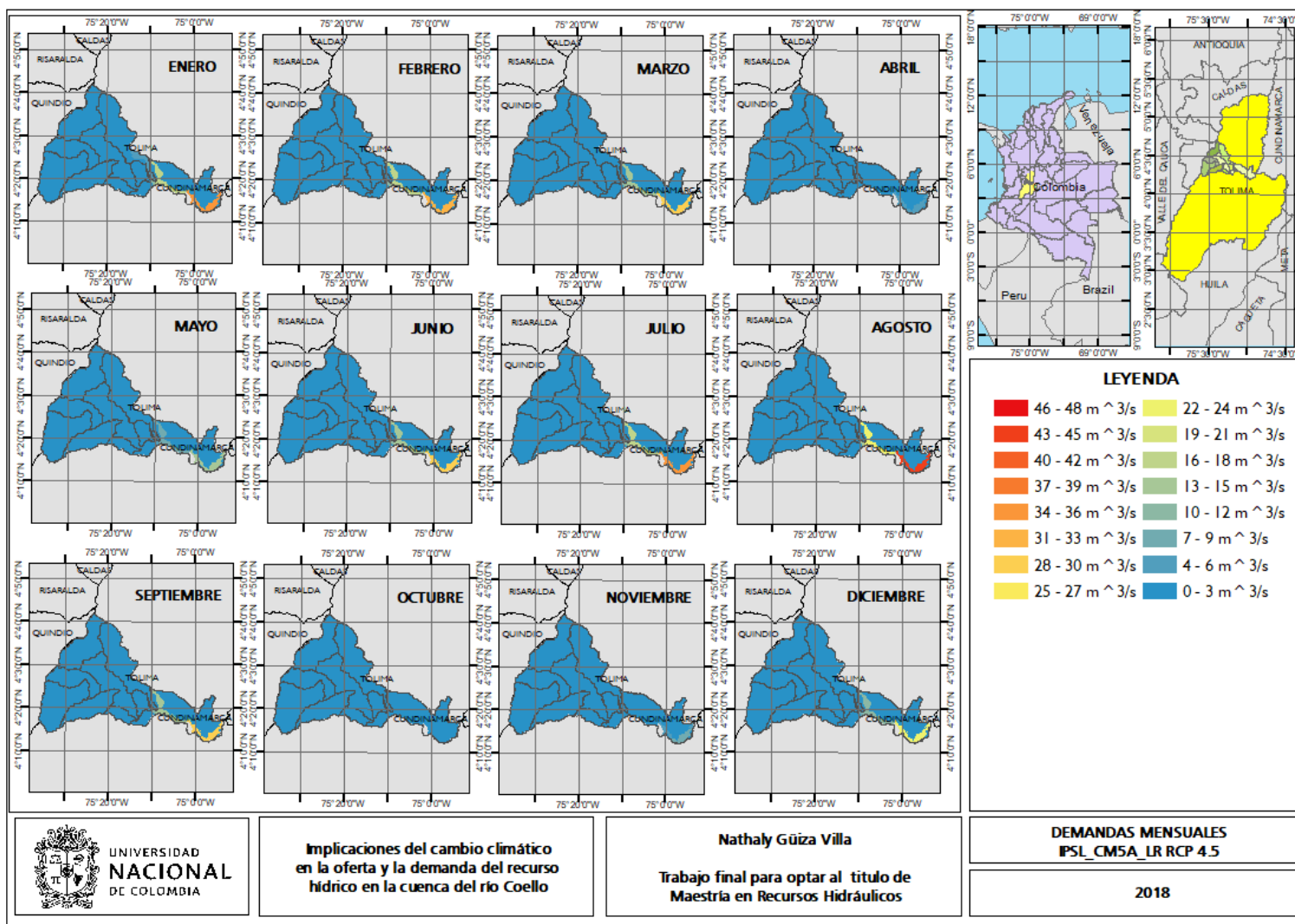


Figura 5-4: Demandas hídricas totales modelo IPSL_CM5A_MR RCP 4.5.

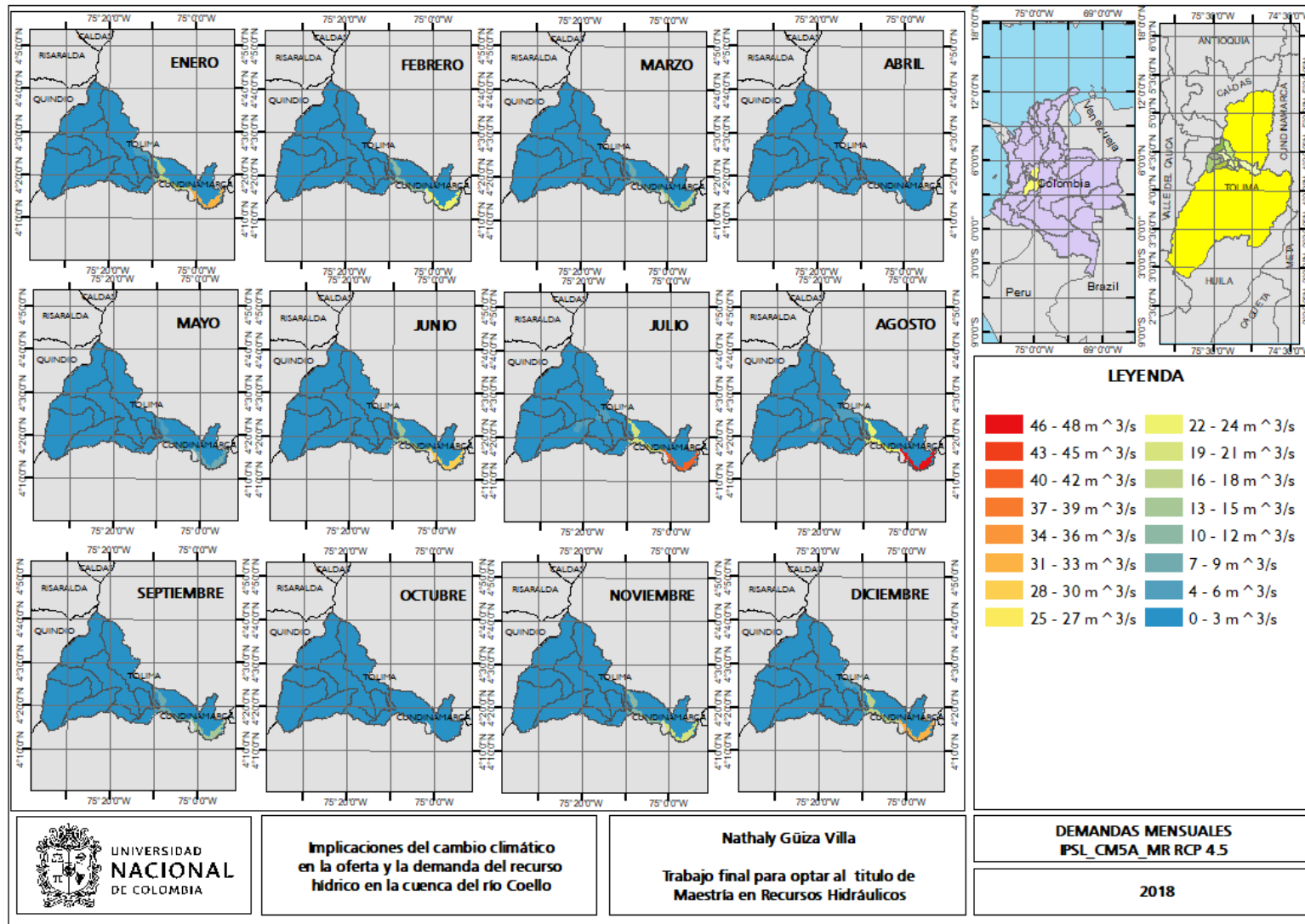


Figura 5-5: Demandas hídricas totales modelo MIROC5 RCP 4.5.

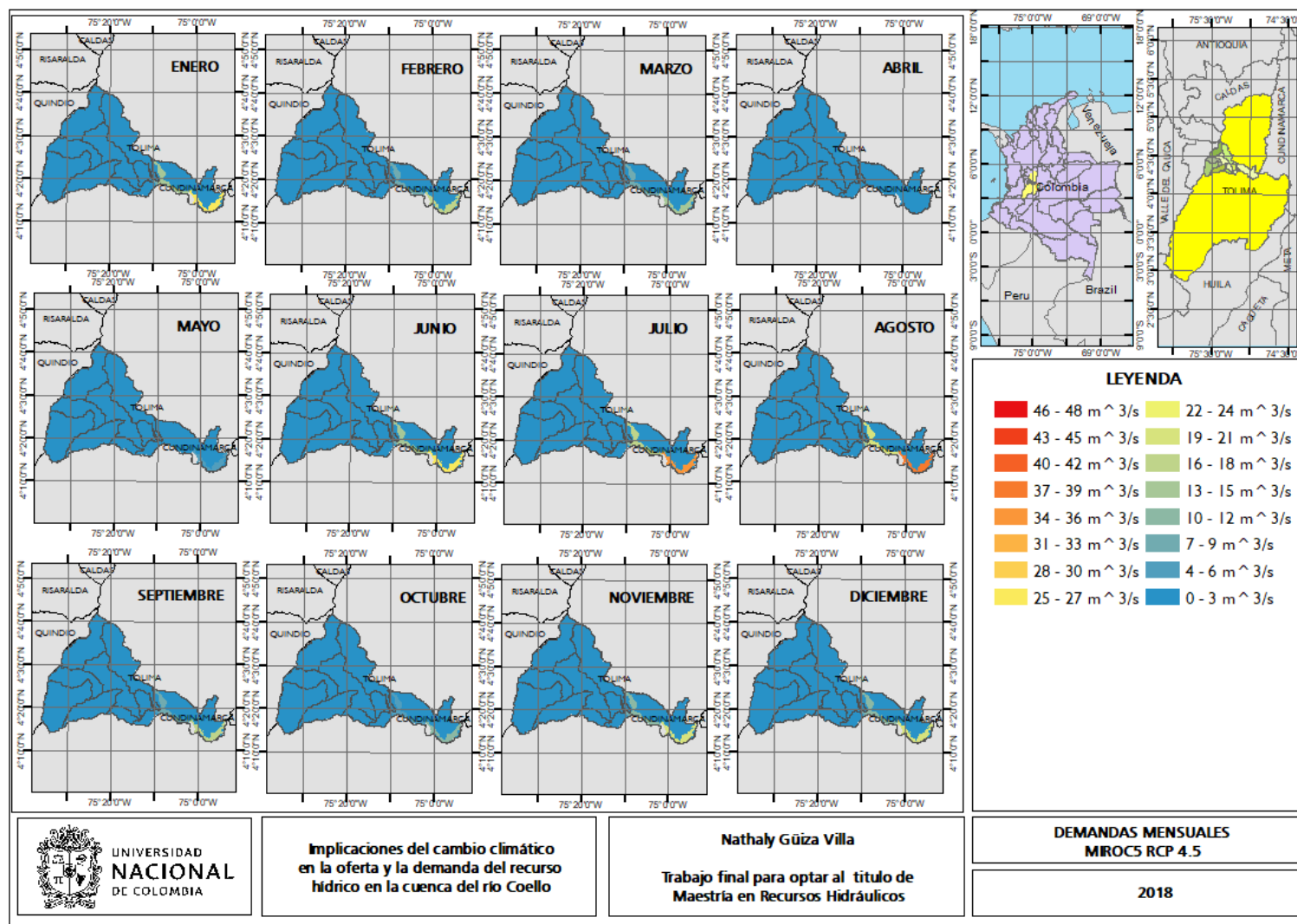


Figura 5-6: Demandas hídricas totales modelo IPSL_CM5A_LR RCP 8.5.

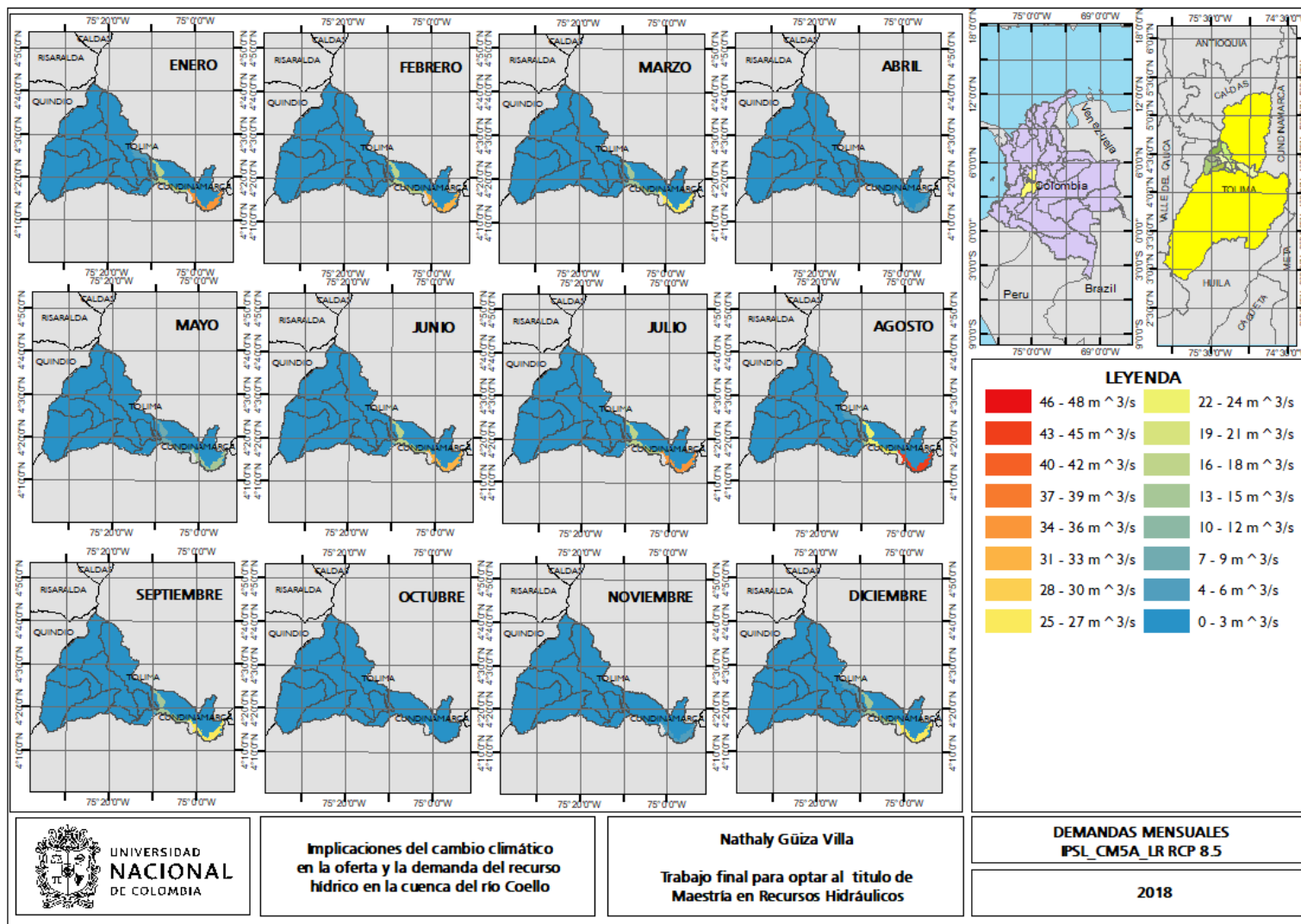


Figura 5-7: Demandas hídricas totales modelo IPSL_CM5A_MR RCP 8.5.

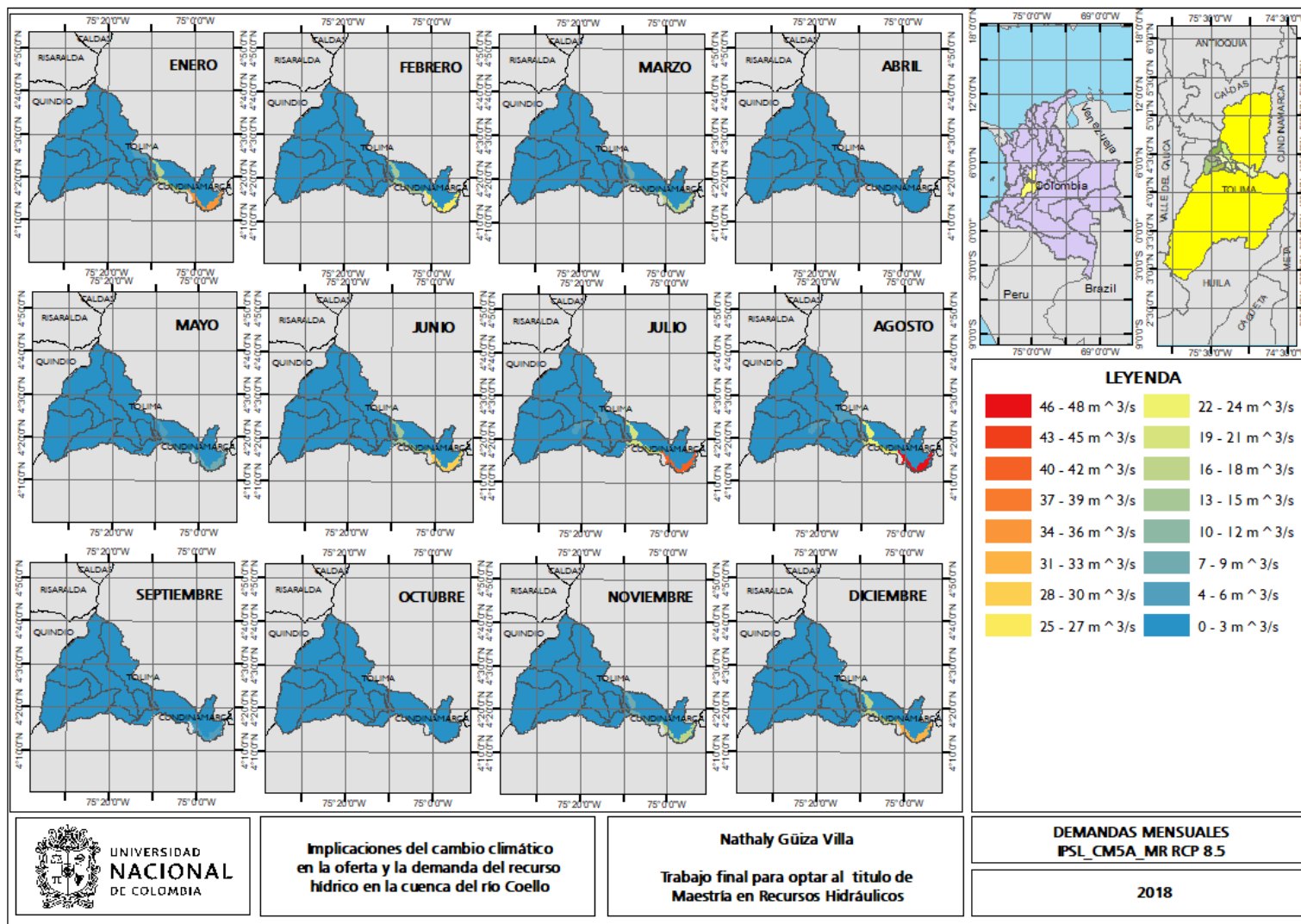
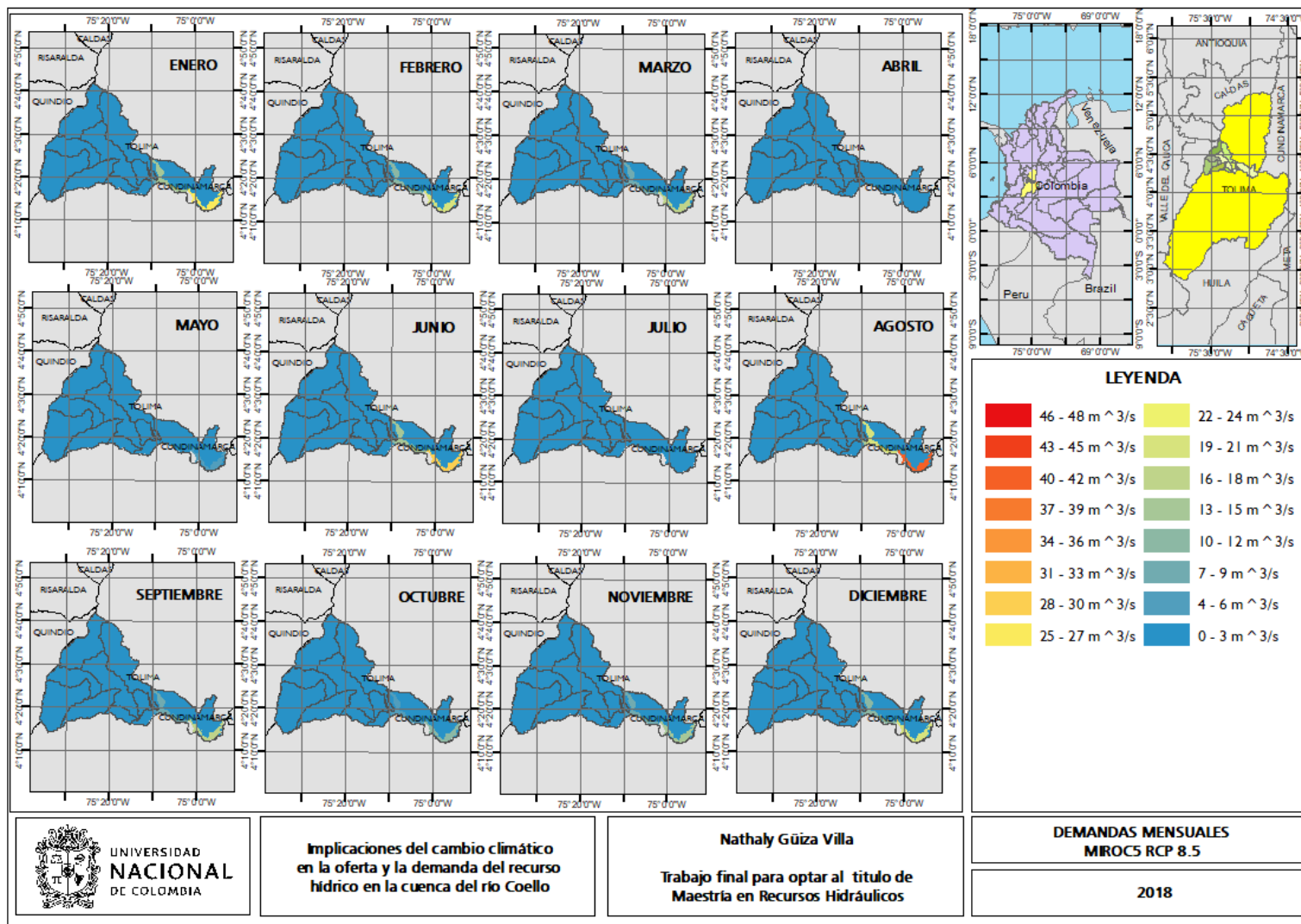


Figura 5-8: Demandas hídricas totales modelo MIROC5 RCP 8.5.



En los anteriores mapas se evidencia en gran parte de la cuenca demandas hídricas menores a los 3 m³/s sin embargo en la parte baja de la cuenca sus demandas pueden aumentar hasta un máximo de 48 m³/s en el mes de agosto, el cual será producto del aumento en el requerimiento hídrico de los cultivos sembrados en esta zona. Es importante resaltar que las demandas hídricas de la cuenca son en su gran mayoría del sector agrícola y dado que el requerimiento hídrico del cultivo es función del tipo de cultivo, sus periodos de crecimiento y los ciclos de siembra de este, así como de las variables climáticas del área cultivada es muy posible un aumento en dicho requerimiento el cual será fruto del aumento de las temperaturas y de la posible disminución de la precipitación. Lo anterior representa un considerable aumento posible en la presión sobre el recurso hídrico, el cual debe considerarse seriamente para la realización de futuros Planes de Ordenamiento Territorial (POT), Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH), entre otras herramientas que garanticen el adecuado manejo del recurso hídrico.

6 Estimación de los índices de estado del recurso hídrico

Una vez calculados tanto la oferta como la demanda, será posible estimar los índices de estado del recurso hídrico asociados al sistema hídrico natural, a la intervención antrópica y al riesgo al desabastecimiento.

6.1 Índice de retención y regulación hídrica (IRH)

De acuerdo a su definición, establece la capacidad de retener humedad de la cuenca, de acuerdo a una relación entre valores extraídos de la curva de duración de caudales según la ecuación (6.1) (IDEAM, 2013).

$$IRH = \frac{V_p}{V_t} \quad (6.1)$$

Donde:

IRH: Índice de retención y regulación hídrica.

V_p : Volumen representado por el área que se encuentra por debajo de la línea de caudal medio en la curva de duración de caudales diarios.

V_t : Volumen total representado por el área bajo la curva de duración de caudales diarios.

De acuerdo a los valores de IRH calculados, se realizó un mapa de distribución espacial en la cuenca, utilizando la tabla de colores mostrada en la **Tabla 6-1** (IDEAM, 2013)

Tabla 6-1: Categorías del índice de retención y regulación hídrica (IRH) (IDEAM, 2013)

Rango de valores IRH	Categoría	Características
>0.85	Muy Alto	Capacidad de la cuenca para retener y regular muy alta
0.75-0.85	Alto	Capacidad de la cuenca para retener y regular alta
0.65-0.75	Medio	Capacidad de la cuenca para retener y regular media
0.50-0.65	Bajo	Capacidad de la cuenca para retener y regular baja
<0.5	Muy bajo	Capacidad de la cuenca para retener y regular muy baja

Los posibles índices de retención hídrica futura para cada modelo y escenario se muestran en las gráficas a continuación. Como se indicó en el primer capítulo, este índice según el estudio realizado por la Universidad Javeriana (2017), su valor predominante es bajo y medio para todos los meses del año, en el periodo seco su valor puede ser muy bajo en algunas microcuencas. Para el escenario RCP 4.5 en todos los modelos es evidente una posible capacidad media de la cuenca para retener y regular agua en gran parte de esta. Los modelos difieren en algunas zonas de alta, baja o muy baja regulación, sin presentar ninguno una muy alta regulación.

De acuerdo con lo anterior, este índice puede tener un cambio favorable con respecto a los valores observados en la actualidad, dado que ahora se presenta predominantemente una capacidad media de la cuenca para regular y retener, representando un aumento de algunas zonas donde su valor era bajo. A su vez se observa una mayor presencia de zonas con una alta capacidad, lo cual no era tan notorio en el periodo actual. Se considera entonces que para el periodo futuro (2020-2050) la capacidad de regulación y retención de la cuenca tiene una mejora sustancial con respecto al periodo actual, del cual pueden visualizarse los índices realizados por el estudio base (2017) en el anexo 6.2

Figura 6-1: Índice de retención hídrica modelo IPSL_CM5A_LR RCP 4.5.

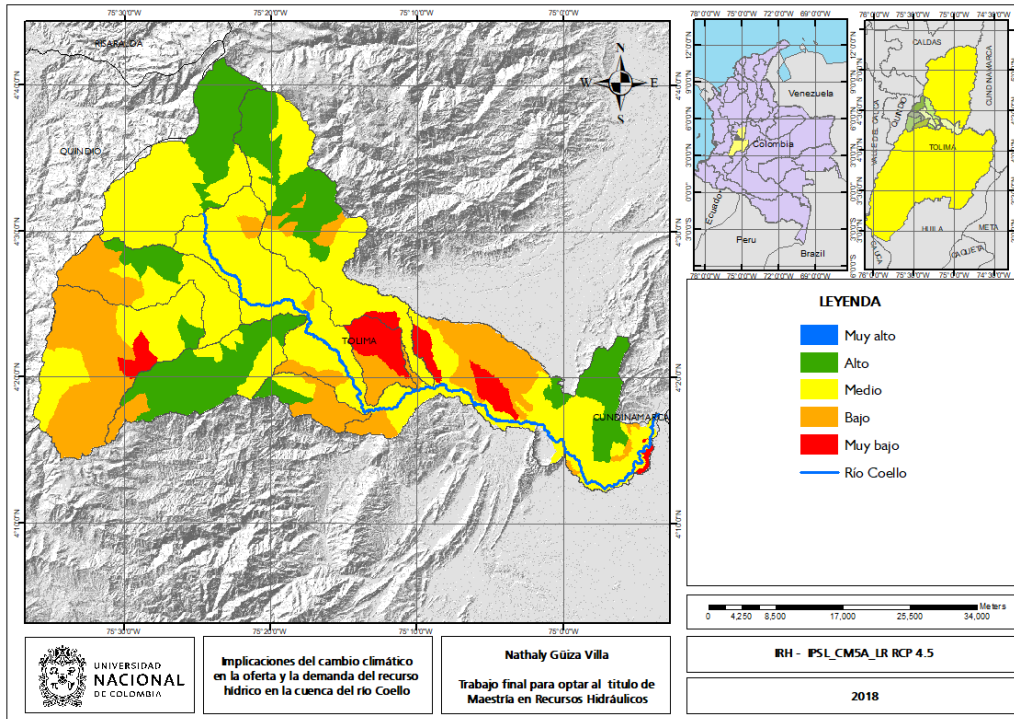


Figura 6-2: Índice de retención hídrica modelo IPSL_CM5A_MR RCP 4.5.

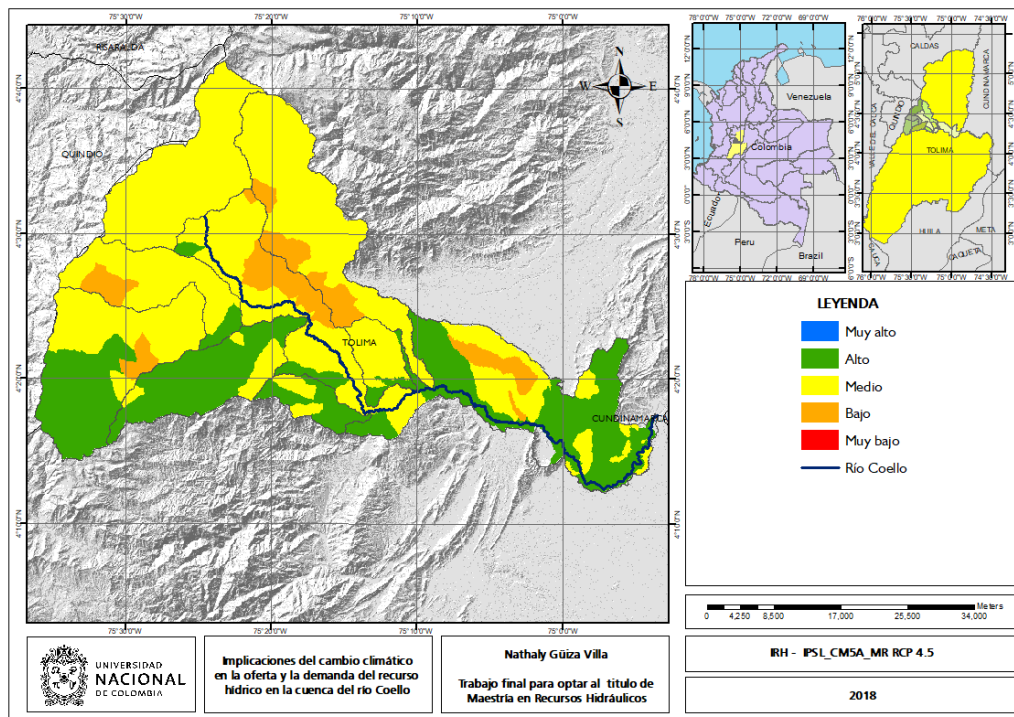
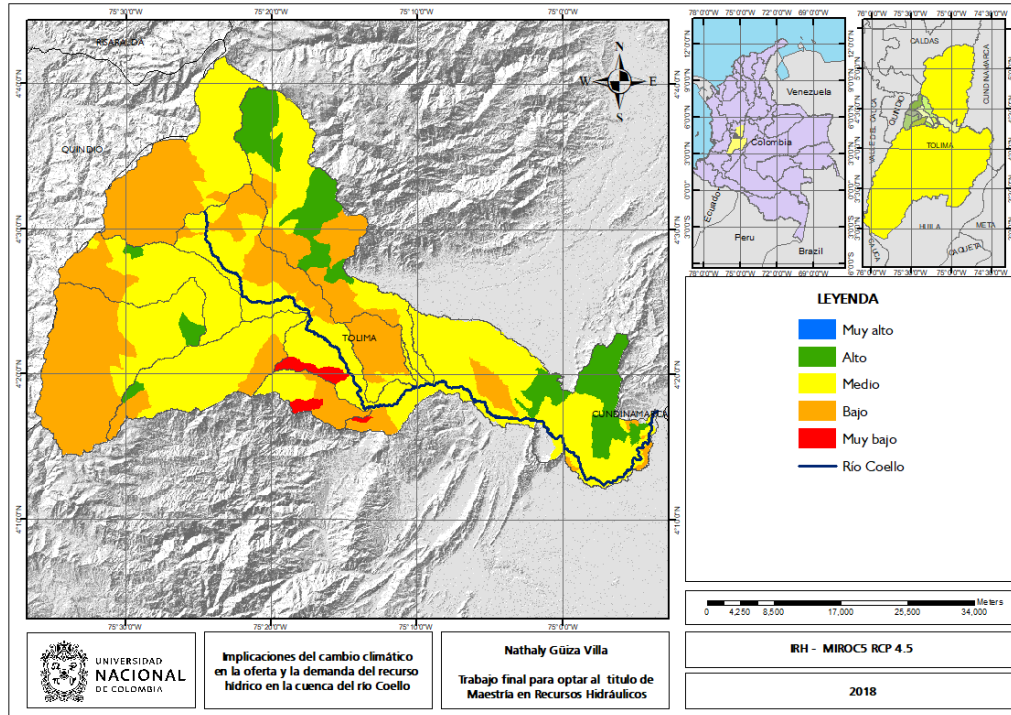


Figura 6-3: Índice de retención hídrica modelo MIROC5 RCP 4.5.

Para el escenario RCP 8.5 que es el pesimista en lo que a forzamientos radiativos se refiere, parece ser el escenario optimista para el índice de retención hídrica, indicando una capacidad de regulación alta y en algunos casos muy alta para los modelos IPSL_CM5A_LR y MIROC5, sin embargo, el modelo IPSL_CM5A_MR difiere de los anteriores al mostrar una posible retención hídrica media a baja.

Según lo anterior y como se mencionó previamente el cambio con respecto a la actualidad para el escenario 8.5 es aún más favorable, al presentarse valores de alta retención en la gran mayoría de las microcuencas, incluso con valores de muy alta retención y regulación los cuales no están presentes en el periodo observado.

Figura 6-4: Índice de retención hídrica modelo IPSL_CM5A_LR RCP 8.5.

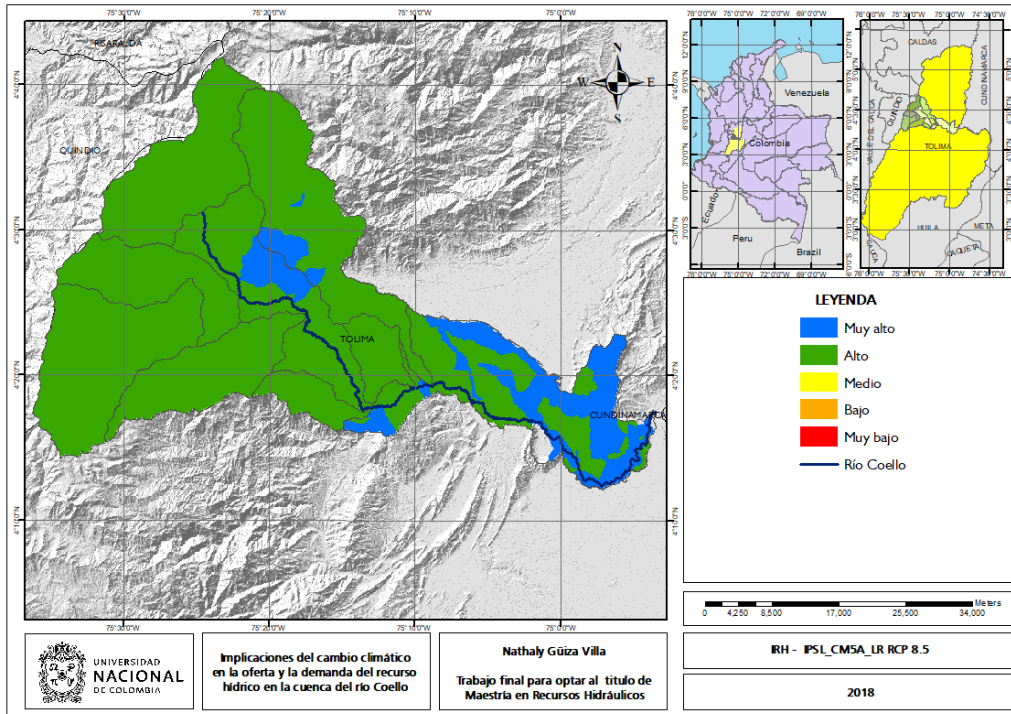


Figura 6-5: Índice de retención hídrica modelo IPSL_CM5A_MR RCP 8.5.

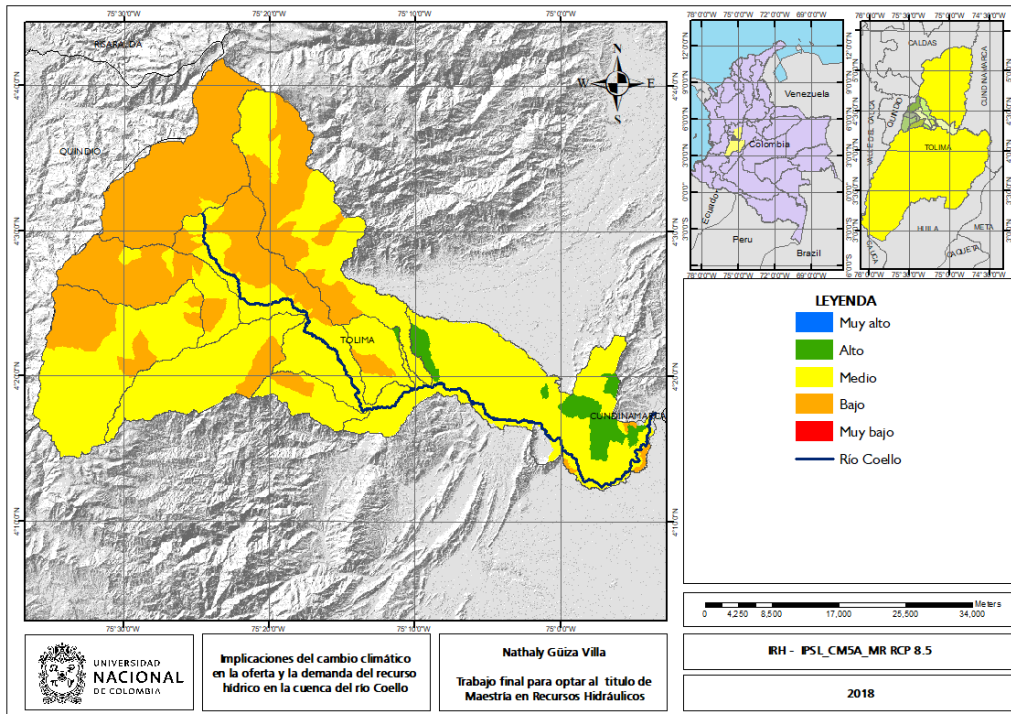
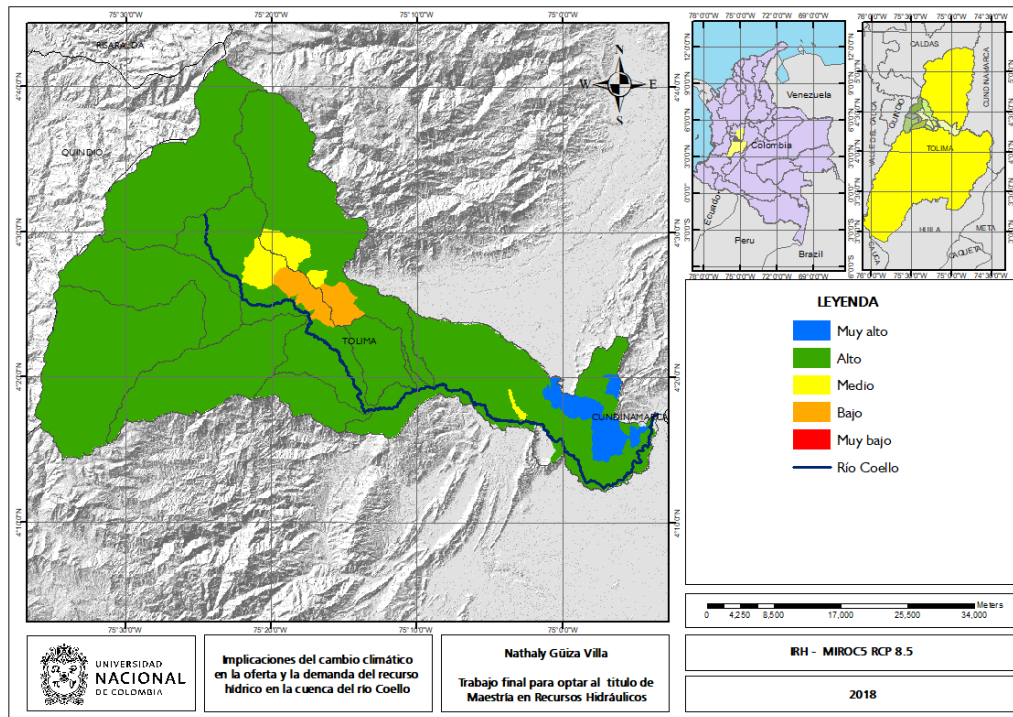


Figura 6-6: Índice de retención hídrica modelo MIROC5 RCP 8.5.



6.2 Índice de aridez (IA)

Su valor fue función de la evapotranspiración potencial y real de acuerdo con la ecuación (6.2) (IDEAM, 2013).

$$IA = \frac{ETP - ETR}{ETP} \tag{6.2}$$

Donde:

IA: Índice de aridez (adimensional)

ETP: Evapotranspiración potencial (mm)

ETR: Evapotranspiración real (mm)

La evapotranspiración potencial se calculó con la ecuación propuesta por Penman-Monteith (Ecuación (5.1)) indicada en el capítulo de demandas, específicamente en las

demandas agrícolas. La evapotranspiración real fue calculada con la ecuación propuesta por Budiko (IDEAM, 2010b) mostrada a continuación.

$$ETR = \sqrt{\left[\left(ETP * P * \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right) \right) * \left(1 - \cosh\left(\frac{ETP}{P}\right) + \sinh\left(\frac{ETP}{P}\right) \right) \right]} \quad (6.3)$$

Donde,

ETR: evapotranspiración real (mm)

ETP: evapotranspiración potencial (mm)

P: precipitación (mm)

De acuerdo a los valores de IA calculados, se realizó un mapa de distribución espacial en la cuenca, para cada uno de los modelos y escenarios utilizando la tabla de colores mostrada en la **Tabla 6-2**.

Tabla 6-2: Categorías del índice de aridez (IA) (IDEAM, 2013) .

Rango de valores IA	Categoría	Características
<0.15		Altos excedentes de agua
0.15-0.19		Excedentes de agua
0.20-0.29		Entre moderado y excedentes de agua
0.30-0.39		Moderado
0.40-0.49		Entre moderado y deficitario de agua
0.50-0.59		Deficitario de agua
>0.6		Altamente deficitario de agua

Una vez realizados los mapas de este índice se observó en todos los modelos y escenarios una coincidencia en déficits de agua para los meses de diciembre, enero y febrero, con un menor porcentaje en los meses de julio y agosto, observando el déficit hacia la parte baja de la cuenca. Los excedentes de agua se presentan en los meses húmedos de cada modelo usualmente en el trimestre de septiembre, octubre y noviembre, incluyendo en algunos casos el mes de abril.

Figura 6-7: Índice de aridez mensual modelo IPSL_CM5A_LR RCP 4.5.

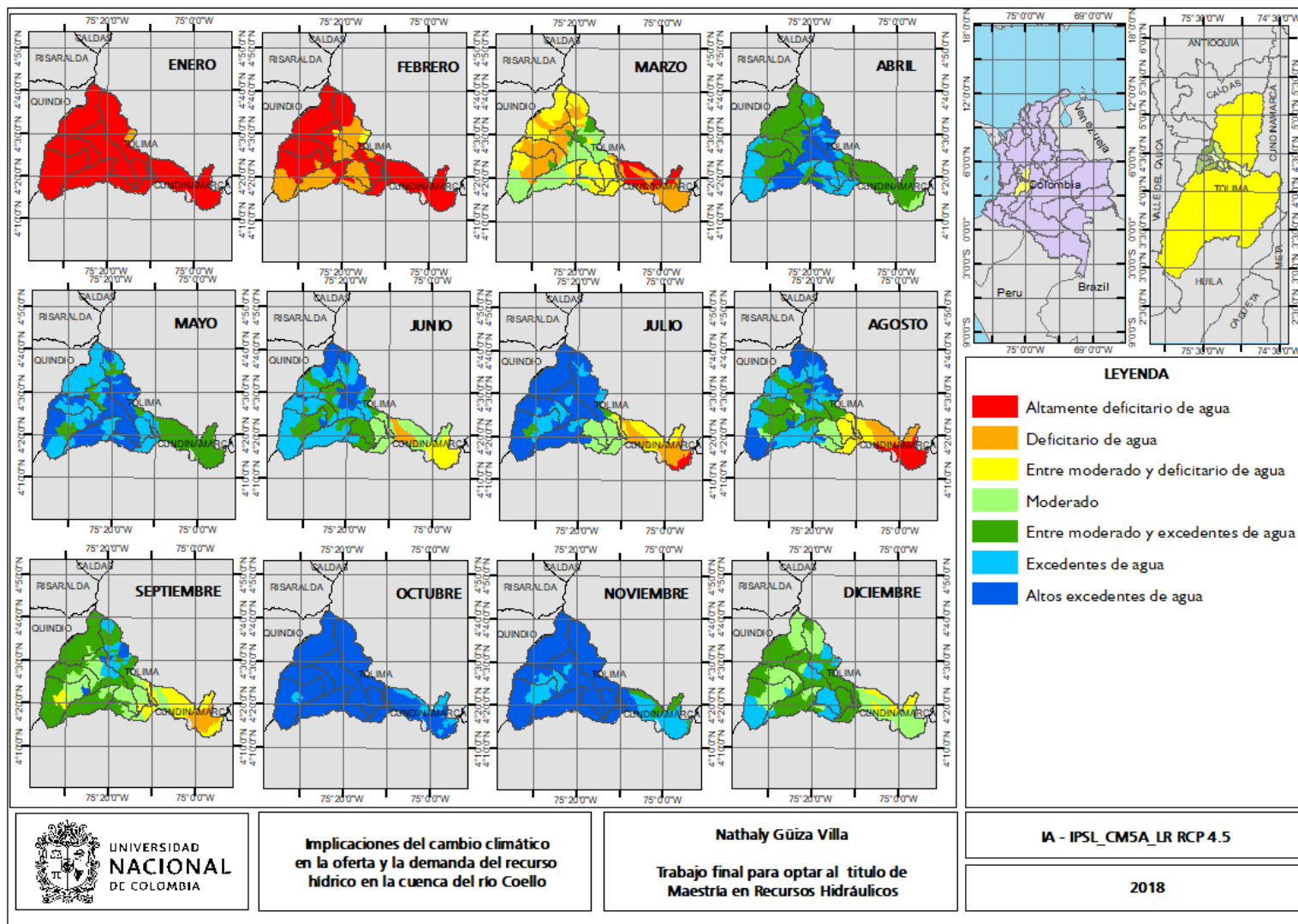


Figura 6-8: Índice de aridez mensual modelo IPSL_CM5A_MR RCP 4.5.

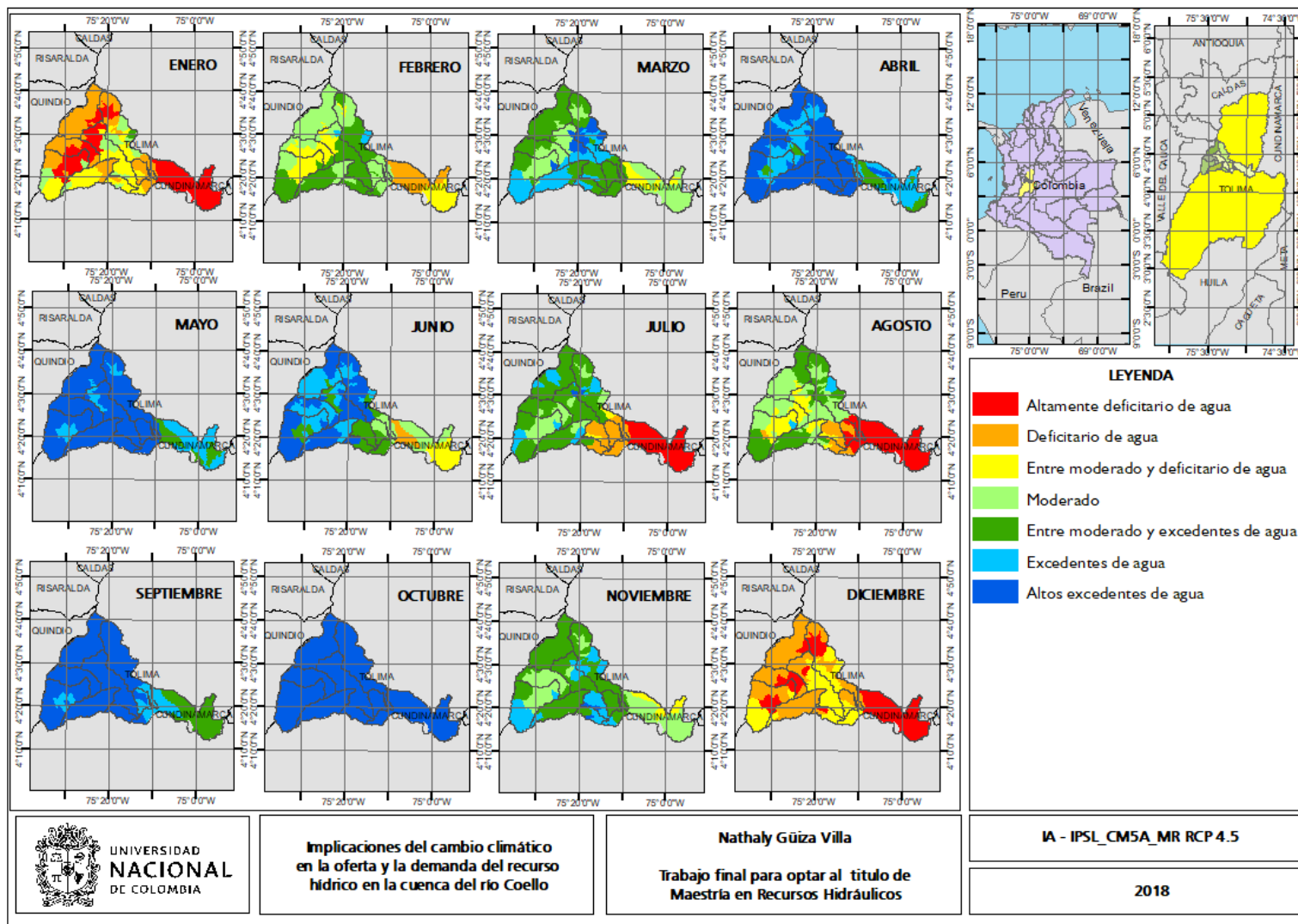


Figura 6-9: Índice de aridez mensual modelo MIROC5 RCP 4.5.

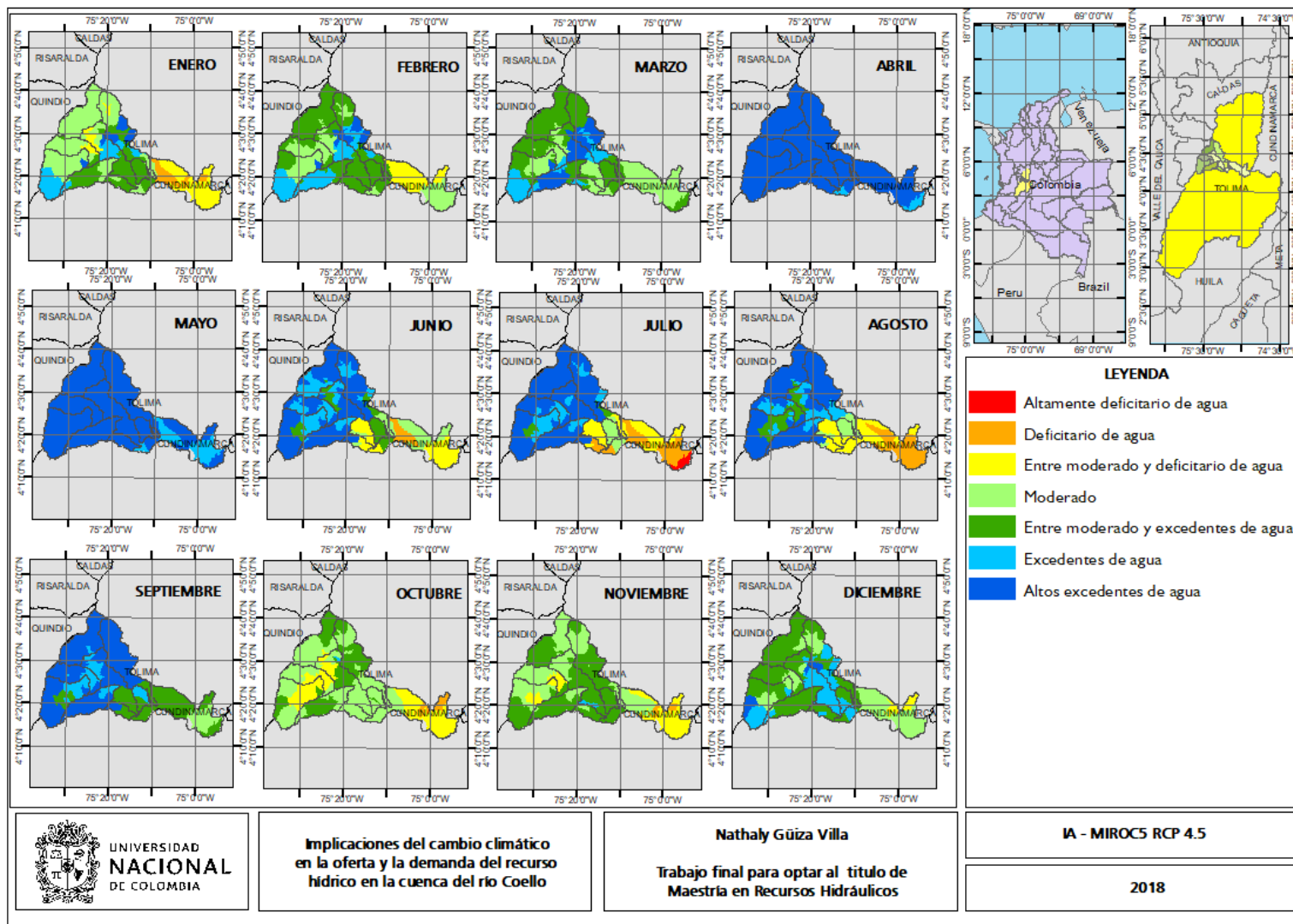


Figura 6-10: Índice de aridez mensual modelo IPSL_CM5A_LR RCP 8.5.

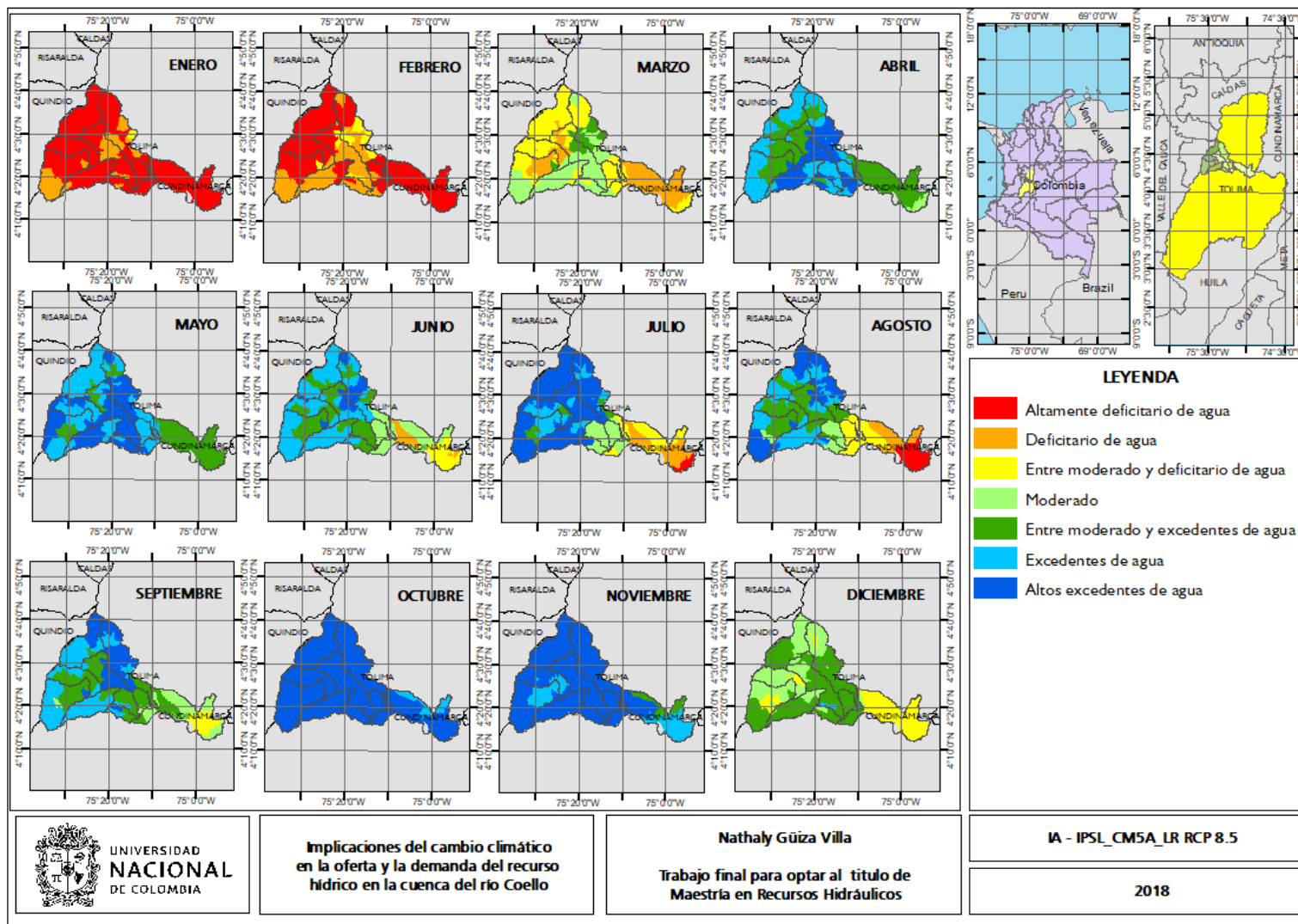


Figura 6-11: Índice de aridez mensual modelo IPSL_CM5A_MR RCP 8.5.

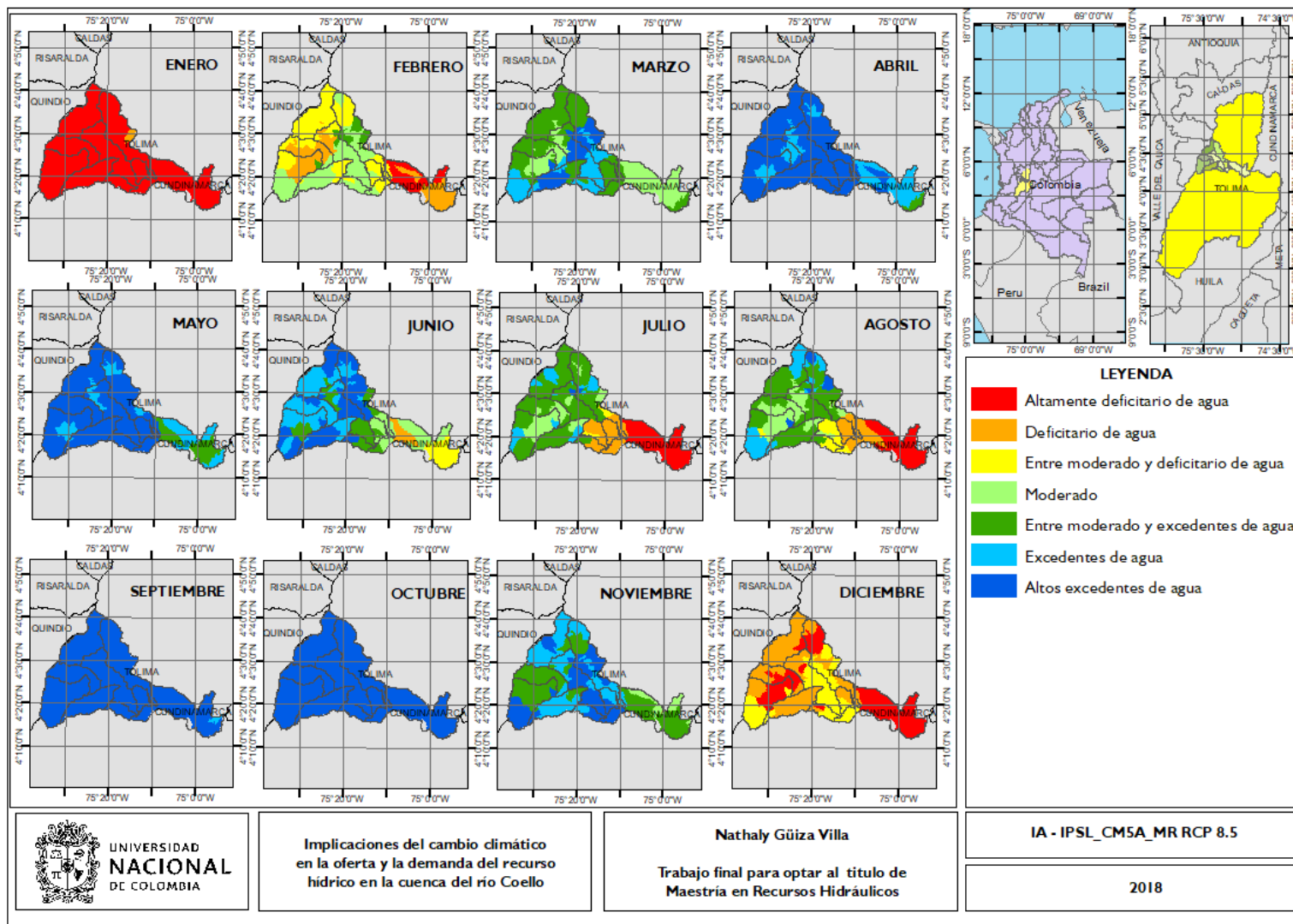
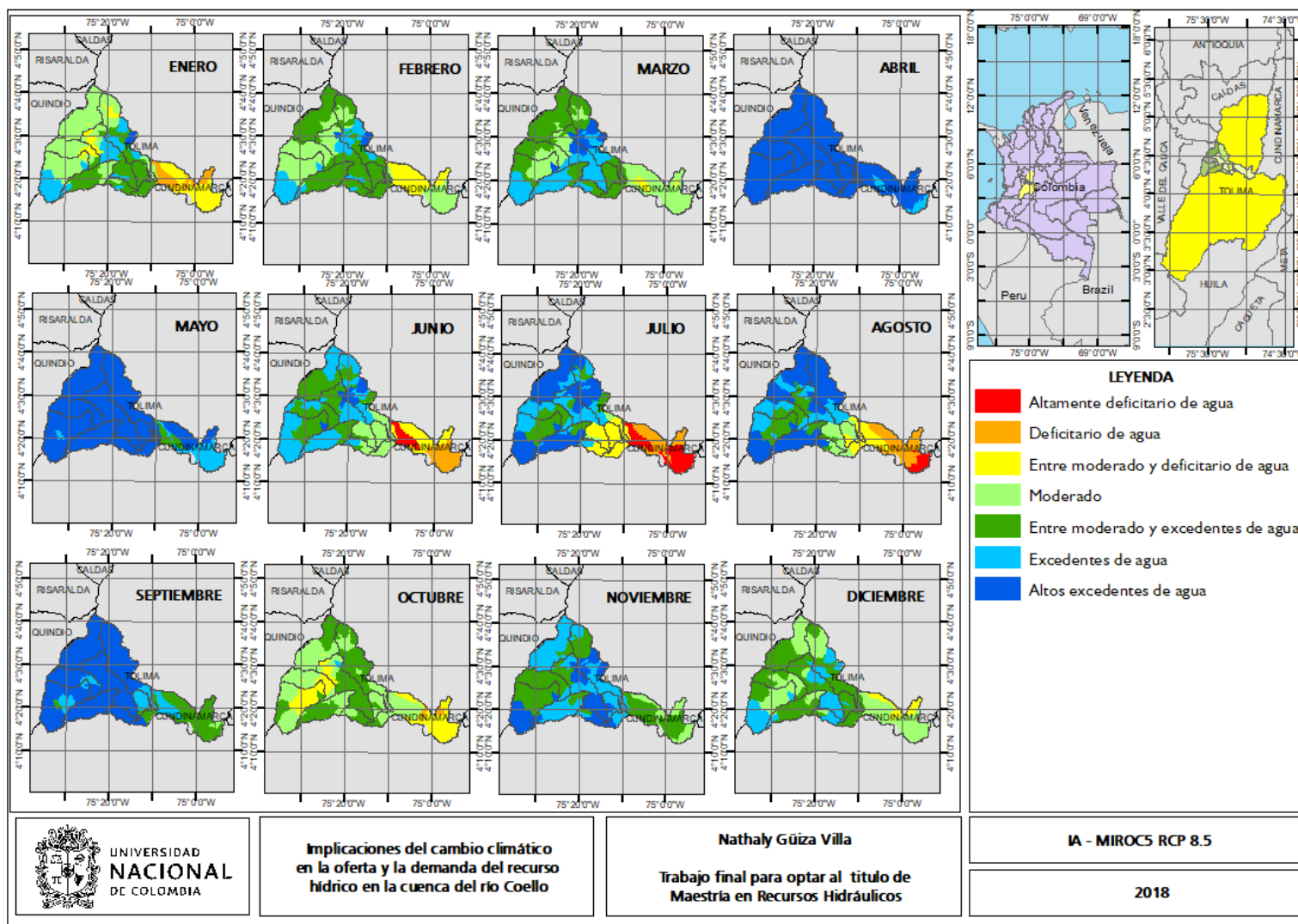


Figura 6-12: Índice de aridez mensual modelo MIROC5 RCP 8.5.



Para este índice se observan cambios importantes con respecto al mes de interés, en el caso de los meses húmedos que tenían un valor de alta excedencia en la parte alta de la cuenca pasan a tener dicho valor en toda la cuenca, en el caso de los meses secos, el valor de alto déficit que solía presentarse únicamente en la parte baja de la cuenca, pasa a ser constante en toda ella, indicando entonces una magnitud importante del cambio, pasando de una condición natural a una posible condición extrema.

6.3 Índice de uso del agua superficial (IUA)

Este índice se calcula como la relación entre la oferta y la demanda de acuerdo con la siguiente ecuación (IDEAM, 2013).

$$IUA = \frac{Dh}{OHRD} * 100 \quad (6.4)$$

Donde:

IUA: Índice de uso del agua.

Dh: Volumen de agua extraída para usos sectoriales en un periodo determinado.

OHRD: Oferta hídrica superficial regional disponible, calculada con la siguiente ecuación,

$$OHRD = OHTS - Q_{amb} + R \quad (6.5)$$

Donde,

OHRD: corresponde a la oferta hídrica total superficial (OHTS), extraída de los caudales obtenidos con la modelación en SWAT, para cada uno de los modelos y escenarios.

Q_{amb} : caudal ambiental definido en el capítulo anterior en función del índice de retención hídrica para cada modelo y escenario

R: retornos que puedan existir en la cuenca, los cuales fueron considerados constantes ya que en su mayoría son función del distrito de riego USOCOELLO y no se considera correcto establecer una proyección para dicho valor

De acuerdo a los valores de IUA calculados, se realizó un mapa de distribución espacial en la cuenca, utilizando la tabla de colores mostrada en la **Tabla 6-3**(IDEAM, 2013)

Tabla 6-3: Rangos y categorías del índice de uso del agua (IUA) (IDEAM, 2013) .

Rango de valores IUA	Categoría	Características
>50	Muy Alto	La presión de la demanda es muy alta con respecto a la oferta disponible.
20.01-50	Alto	La presión de la demanda es alta con respecto a la oferta disponible.
10.01-20	Medio	La presión de la demanda es moderada con respecto a la oferta disponible.
1-10	Bajo	La presión de la demanda es baja con respecto a la oferta disponible.
<1	Muy bajo	La presión de la demanda no es significativa con respecto a la oferta disponible.

En los mapas siguientes es evidente un posible uso del agua muy alto en todos los meses del año. El valor del índice de uso de agua disminuye en cierta medida en los meses lluviosos de cada modelo y escenario, pero el valor de la presión de la demanda sobre la oferta disponible es muy alto en gran parte de la cuenca, siendo este valor repetitivo en mayor medida en la zona central de la cuenca y hacia la parte baja de la mismas, correspondiendo con las zonas de mayor presión hídrica debido a los requerimientos de riego de los cultivos de esa zona, y las necesidades domésticas de las poblaciones allí asentadas.

Figura 6-13: Índice de uso de agua mensual modelo IPSL_CM5A_LR RCP 4.5.

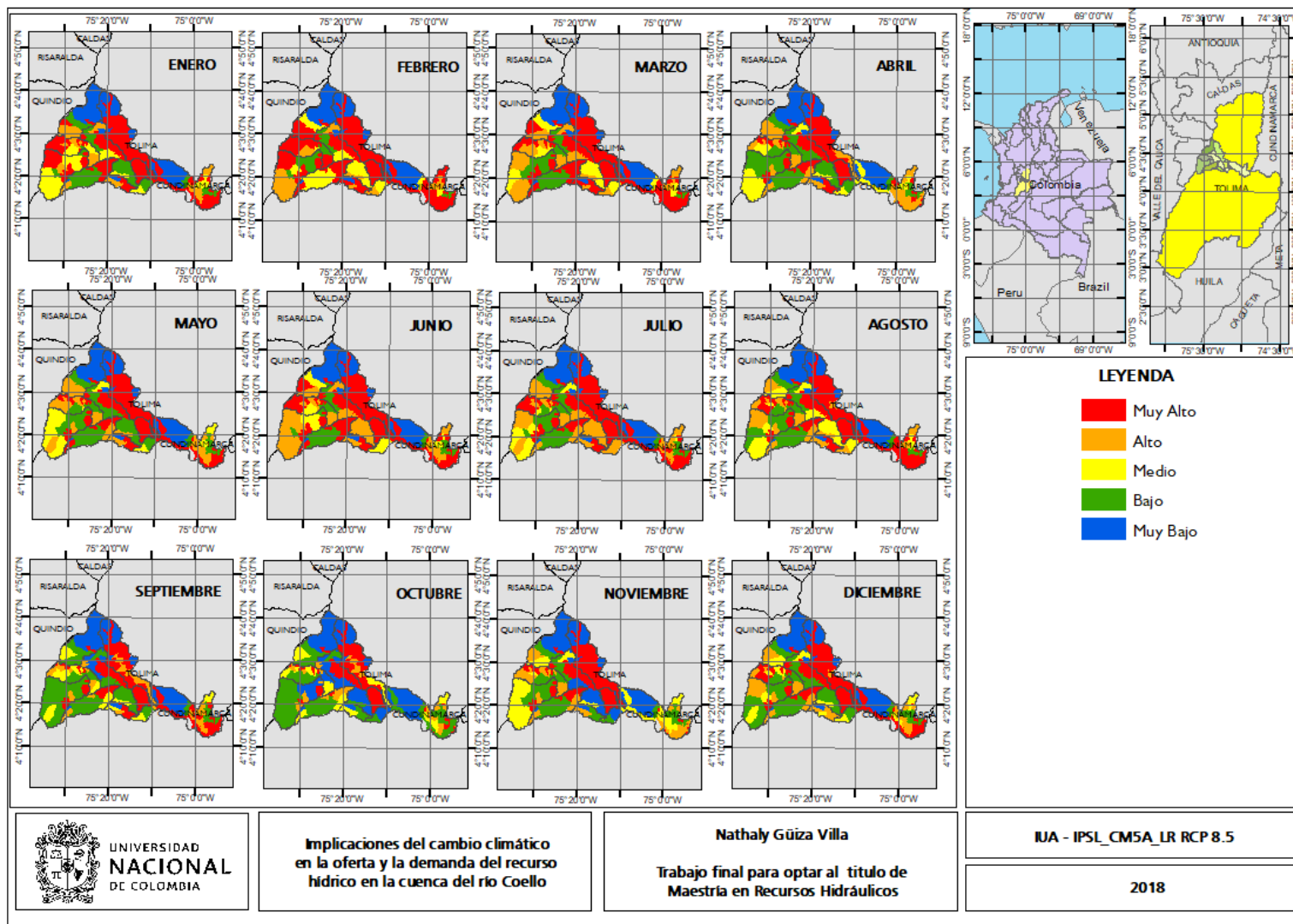


Figura 6-14: Índice de uso de agua mensual modelo IPSL_CM5A_MR RCP 4.5.

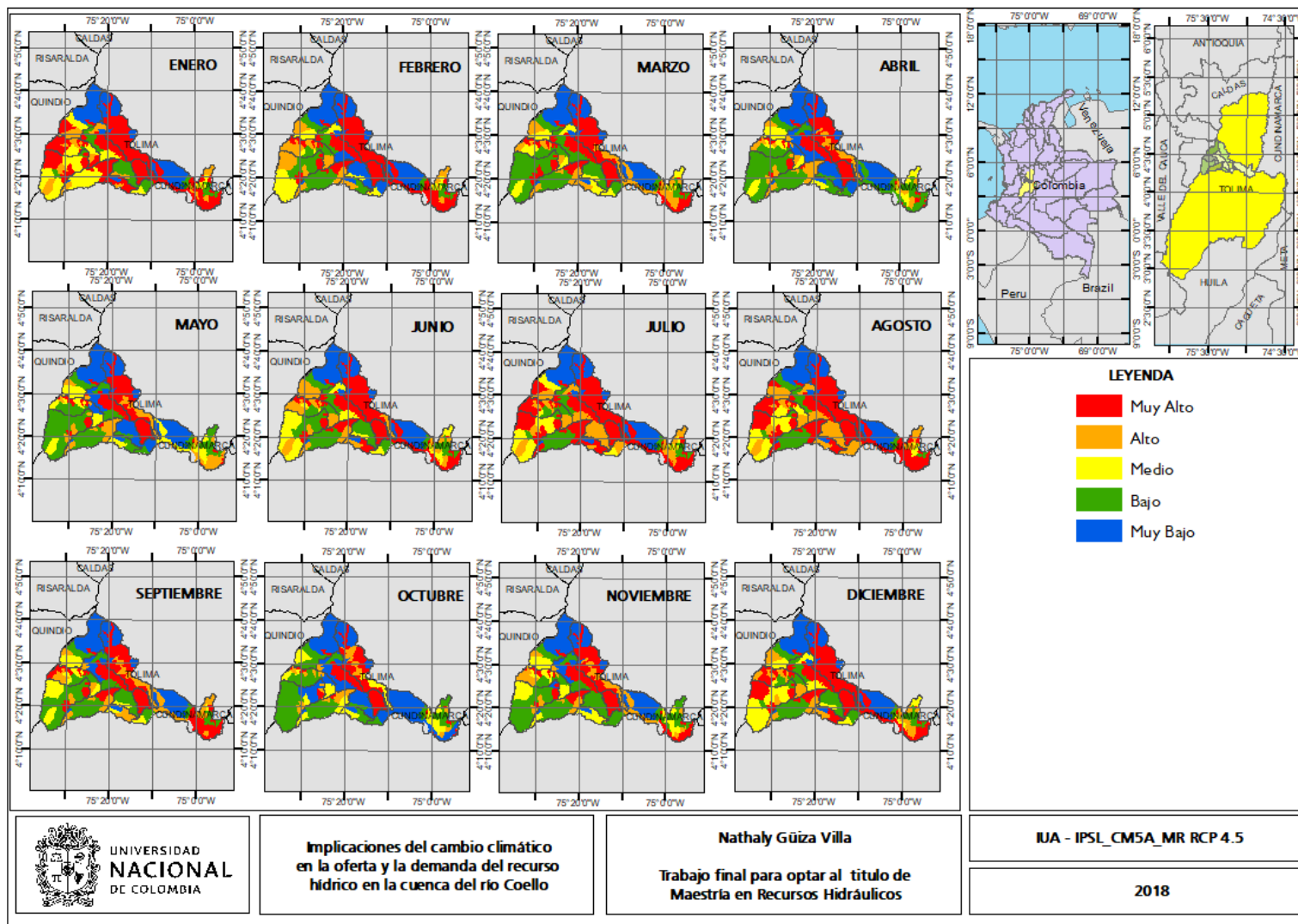


Figura 6-15: Índice de uso de agua mensual modelo MIROC5 RCP 4.5.

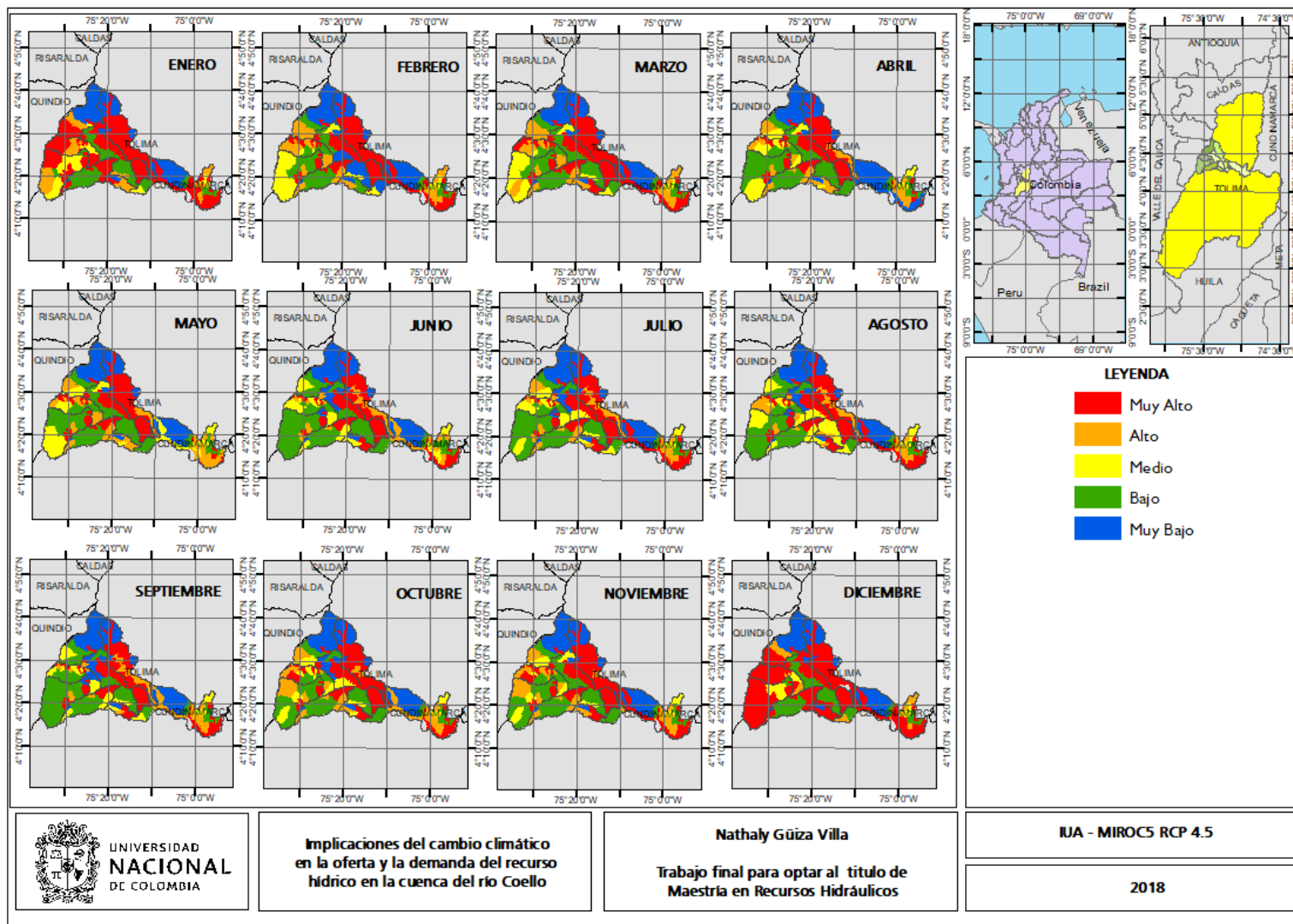


Figura 6-16: Índice de uso de agua mensual modelo IPSL_CM5A_LR RCP 8.5.

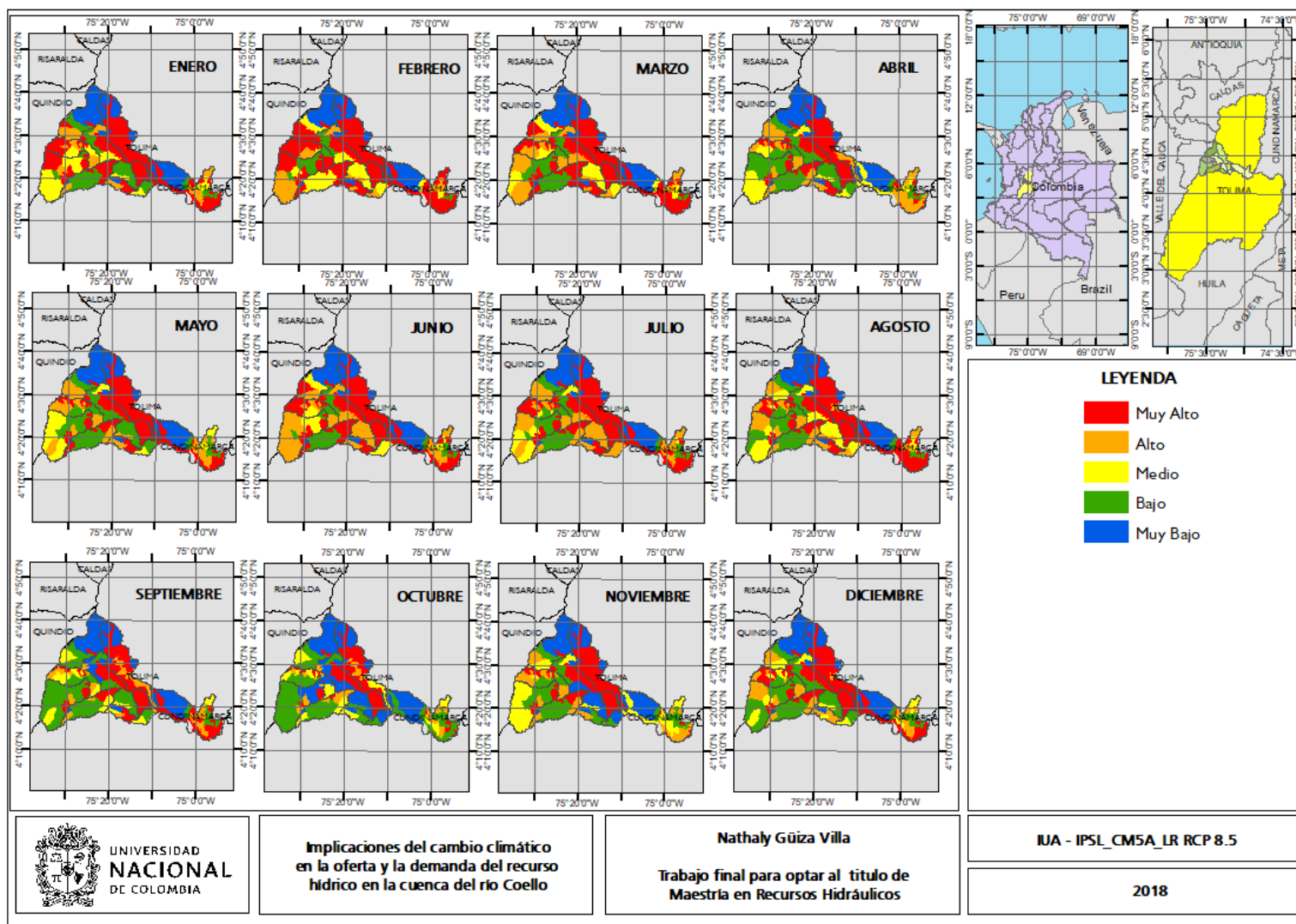


Figura 6-17: Índice de uso de agua mensual modelo IPSL_CM5A_MR RCP 8.5.

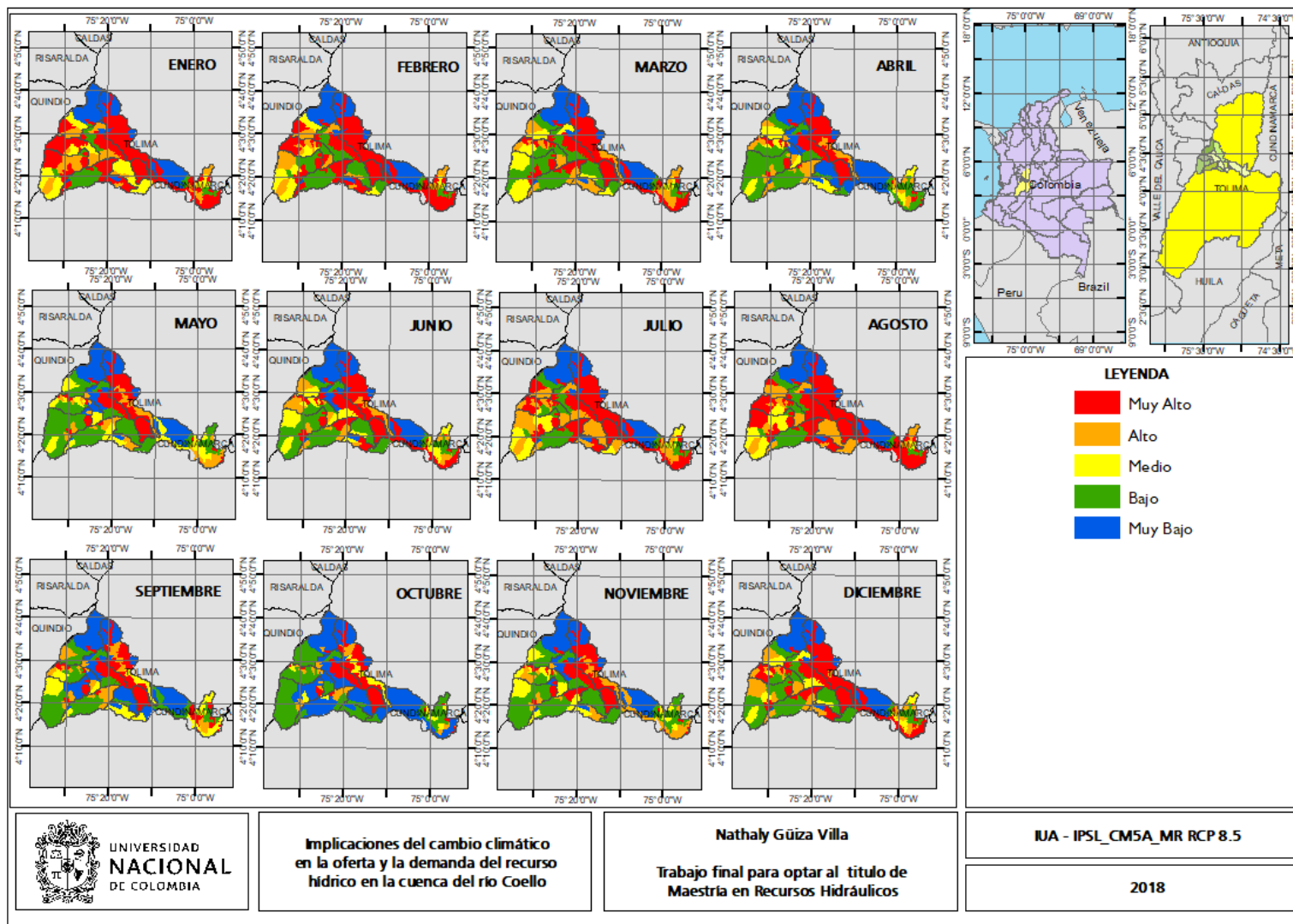
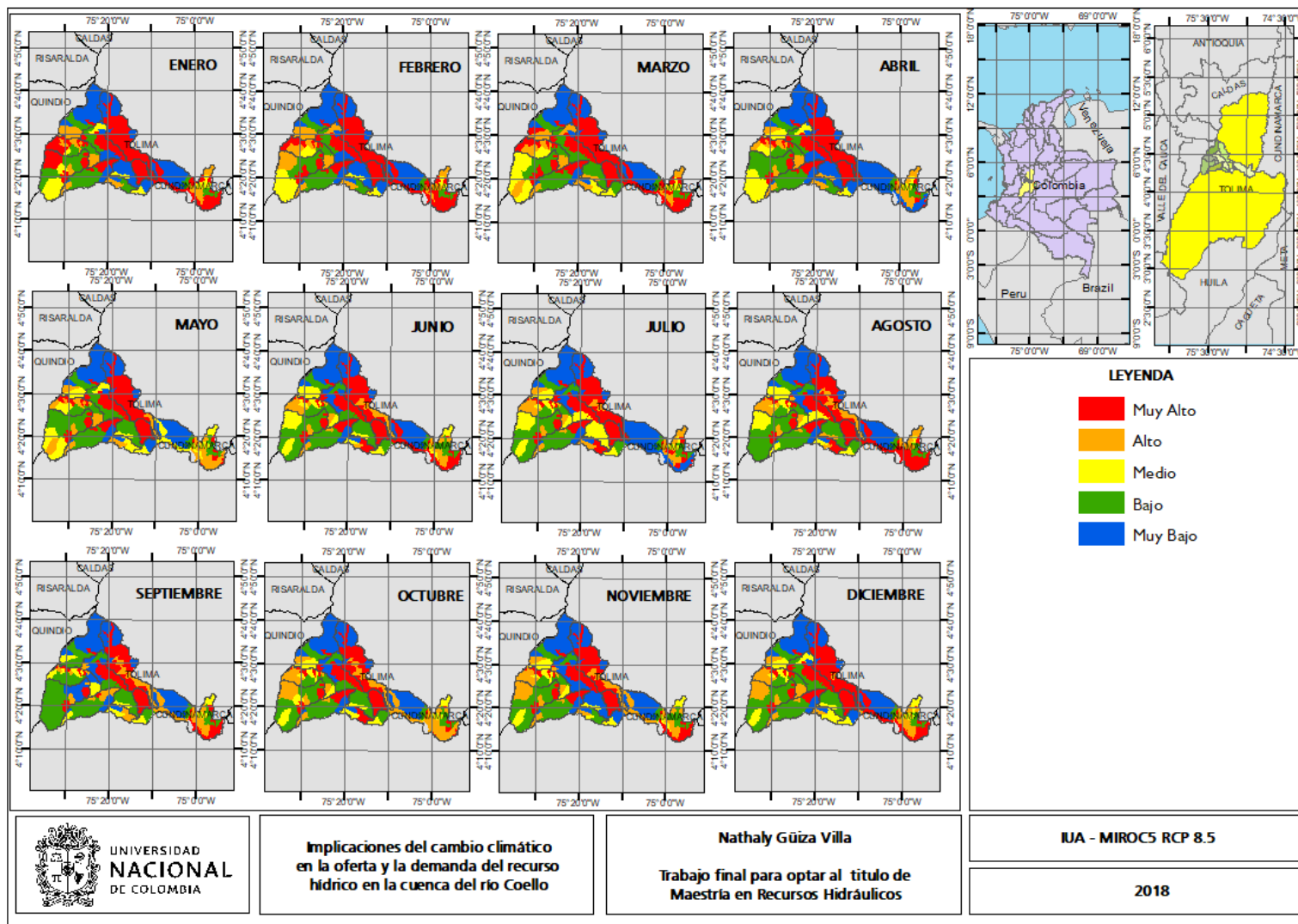


Figura 6-18: Índice de uso de agua mensual modelo MIROC5 RCP 8.5.



Como se observó en los mapas anteriores este índice no tiene mucha variación entre modelos y escenarios, su valor predominante es muy alto hacia la zona central de la cuenca y su desembocadura. Con respecto a los valores actuales, como se indicó en el primer capítulo se definió un índice de uso de agua muy bajo en la parte alta de la cuenca y de medio a muy alto en su zona central y baja, para el periodo futuro (2020-2050) se observa un incremento en el área con un índice de uso muy alto, además la zona alta que solía tener un valor muy bajo pasa a tener valores de bajo a alto uso del recurso hídrico.

6.4 Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico (IVH)

Se refiere a una relación entre el índice de retención hídrica y el índice de uso de agua, por lo tanto, su definición se realiza de acuerdo a una matriz de relación de los resultados de esos índices como se muestra en la **Tabla 6-4**, de acuerdo a los colores definidos en esa matriz se realiza la zonificación espacial del índice.

Tabla 6-4: Categorías Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento (IDEAM, 2010b)

Categorías índice de vulnerabilidad al desabastecimiento (IVH)		
Índice de uso de agua	Índice de regulación	Categoría índice
Muy bajo	Alto	Muy bajo
Muy bajo	Moderado	Bajo
Muy bajo	Bajo	Medio
Muy bajo	Muy bajo	Medio
Bajo	Alto	Bajo
Bajo	Moderado	Bajo
Bajo	Bajo	Medio
Bajo	Muy bajo	Medio
Medio	Alto	Medio
Medio	Moderado	Medio
Medio	Bajo	Alto
Medio	Muy bajo	Alto
Alto	Alto	Medio
Alto	Moderado	Alto
Alto	Bajo	Alto

Alto	Muy bajo	Muy alto
Muy alto	Alto	Medio
Muy alto	Moderado	Alto
Muy alto	Bajo	Alto
Muy alto	Muy bajo	Muy alto

Este índice se realizó para todos los modelos y escenarios como una relación de los índices calculados previamente, los cuales podrán observarse a continuación, de acuerdo a ellos se establece una posible vulnerabilidad al desabastecimiento, predominantemente alta para el escenario RCP 4.5 en la zona central y de desembocadura de la cuenca, coincidiendo con las zonas de mayor presión hídrica. Sin embargo, para la zona alta de la cuenca se tiene una vulnerabilidad baja a muy baja en todos los modelos. Para el escenario 8.5 se presenta una vulnerabilidad media predominante debido a los altos índices de retención hídrica de este escenario, teniendo además valores de baja a muy baja vulnerabilidad

Lo anterior contrastado con los valores observados en la actualidad indica un aumento del riesgo al desabastecimiento dado que zonas con valores bajos a muy bajos, tienden a tener posibles valores futuros altos y muy altos, conservándose constante el valor muy alto en la zona baja y central de la cuenca. Sin embargo, las zonas en las que se observa un valor muy bajo, en la actualidad tienen un valor bajo a medio, por lo que el escenario en estas zonas es más favorable para el periodo de 2020-2050 con respecto a la actualidad.

No obstante, las zonas que permanecen con valores muy altos de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico, así como las que aumentan su valor deben ser tenidas en cuenta para la toma de decisiones con el fin de evitar escenarios de escasez para las actividades fundamentales.

Figura 6-19: Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico mensual modelo IPSL_CM5A_LR RCP 4.5.

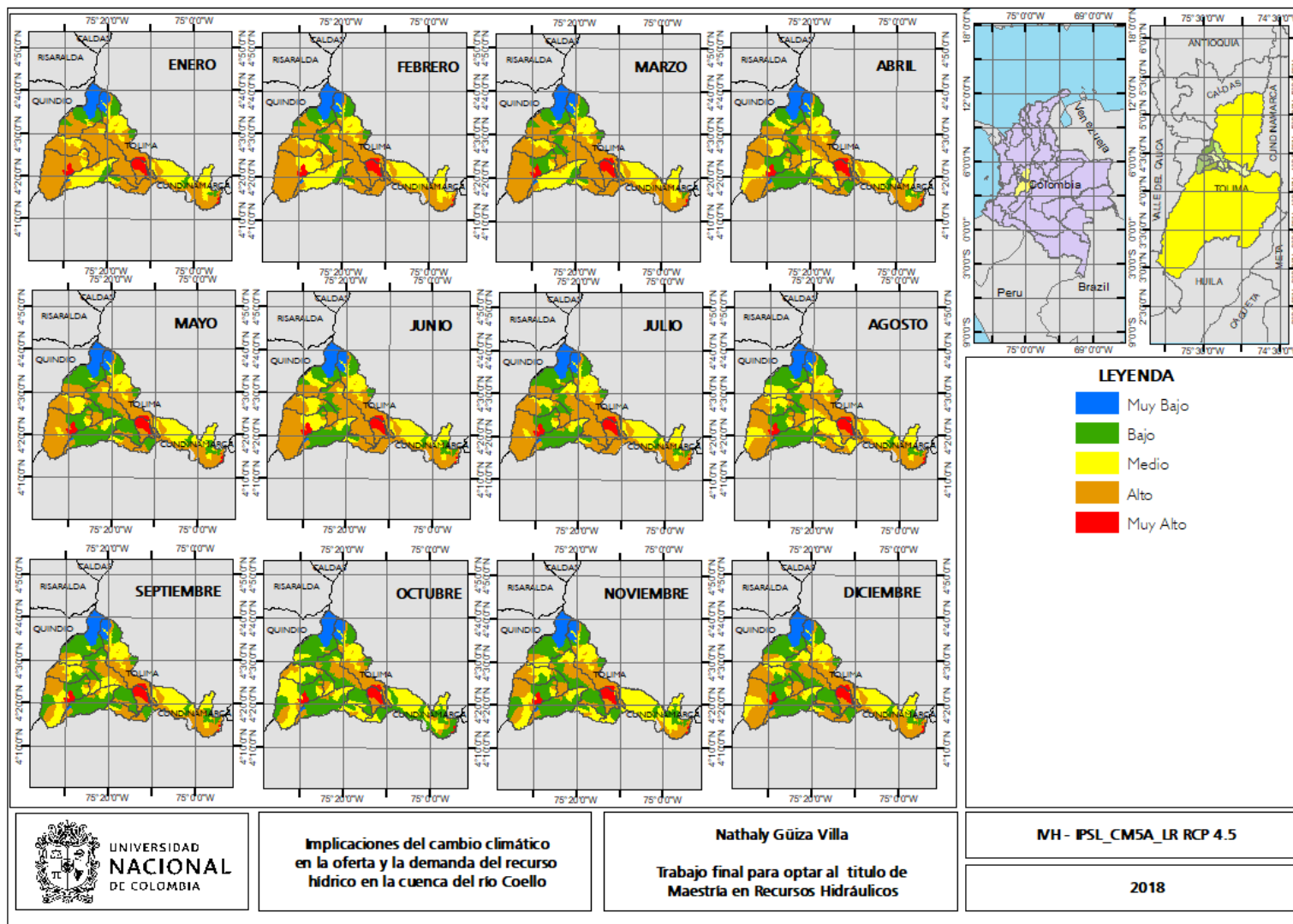


Figura 6-20: Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico mensual IPSL_CM5A_MR RCP 4.5.

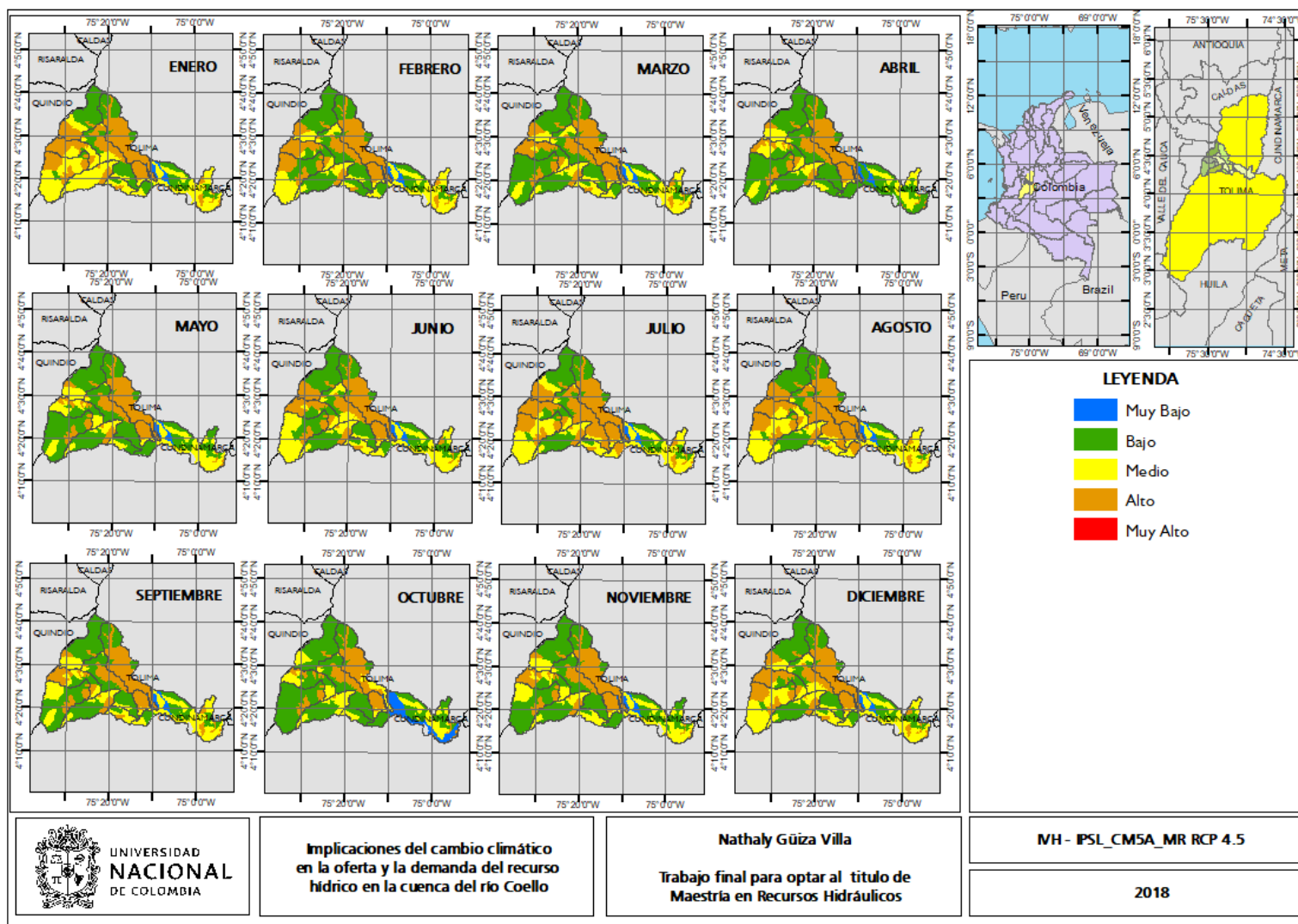


Figura 6-21: Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico mensual modelo MIROC5 RCP 4.5.

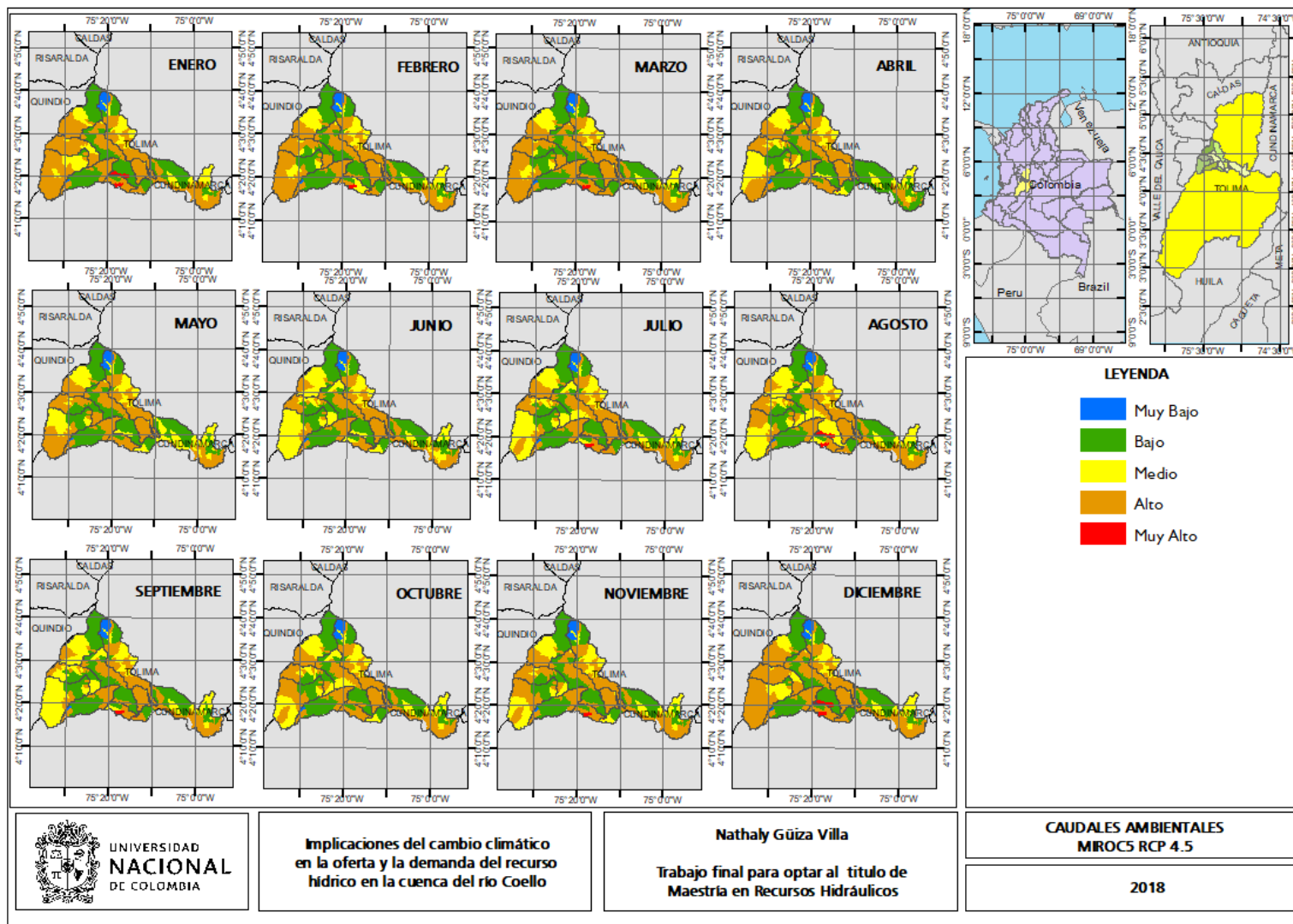


Figura 6-22: Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico mensual modelo IPSL_CM5A_LR RCP 8.5.

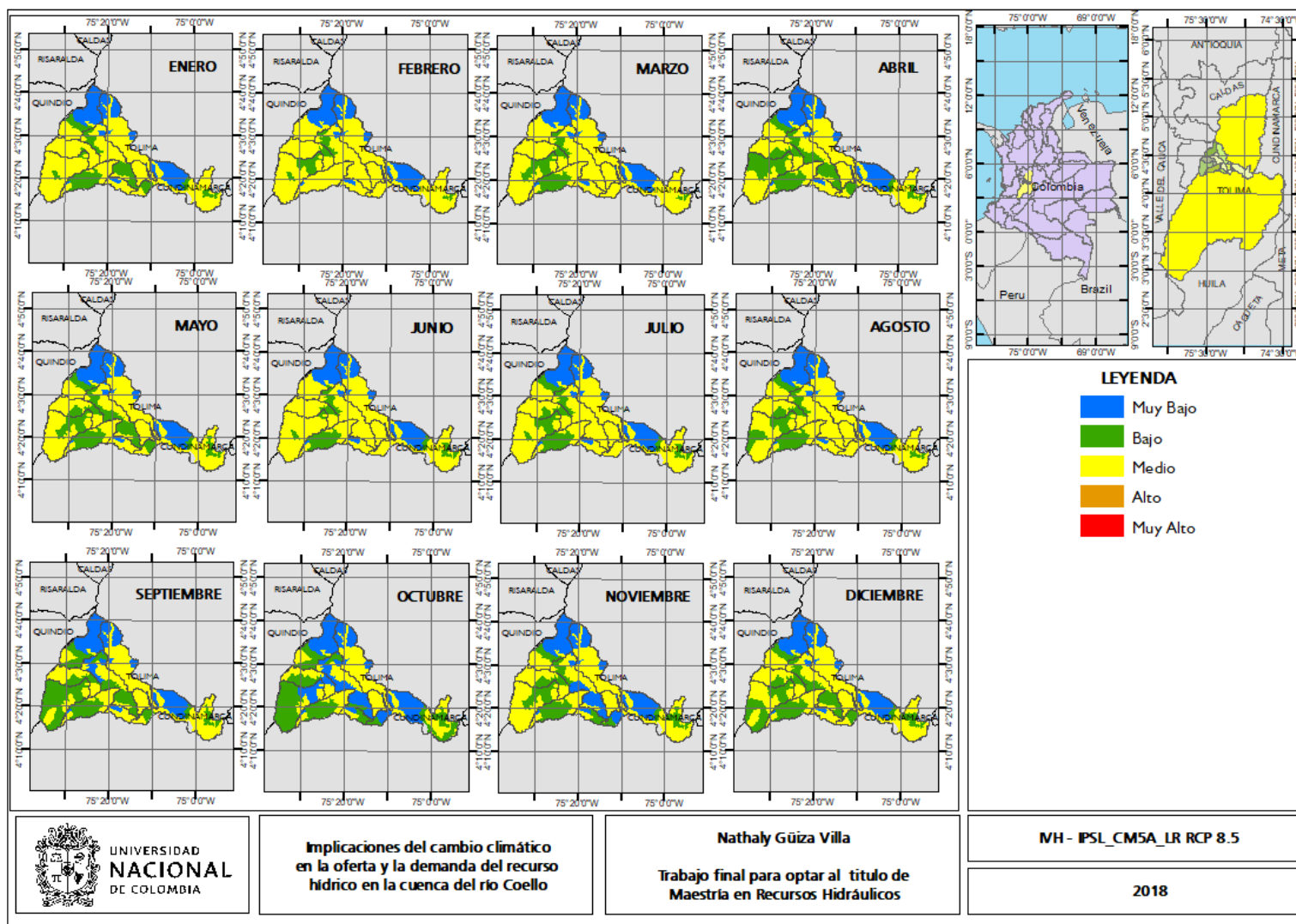


Figura 6-23: Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico mensual modelo IPSL_CM5A_MR RCP 8.5.

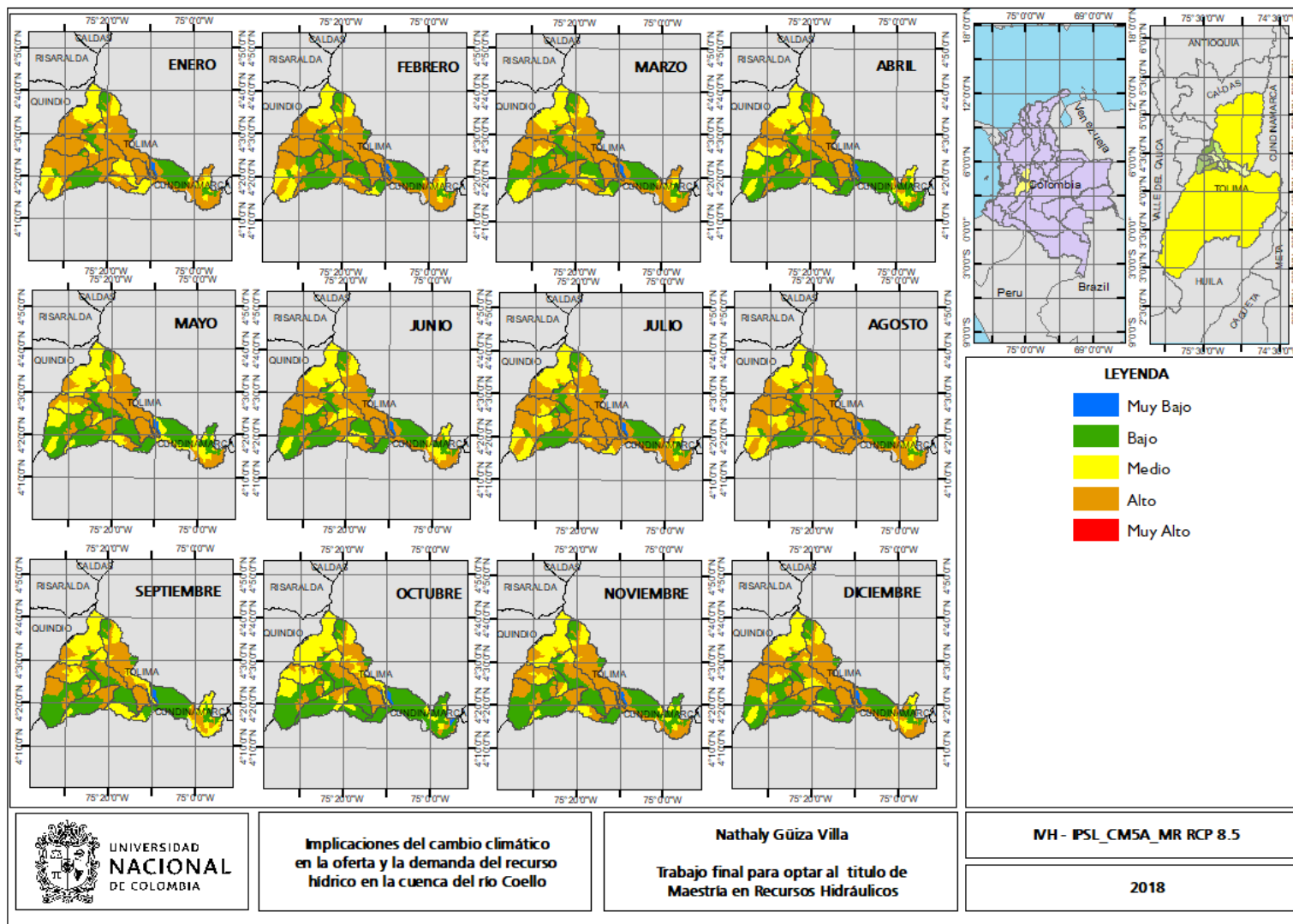
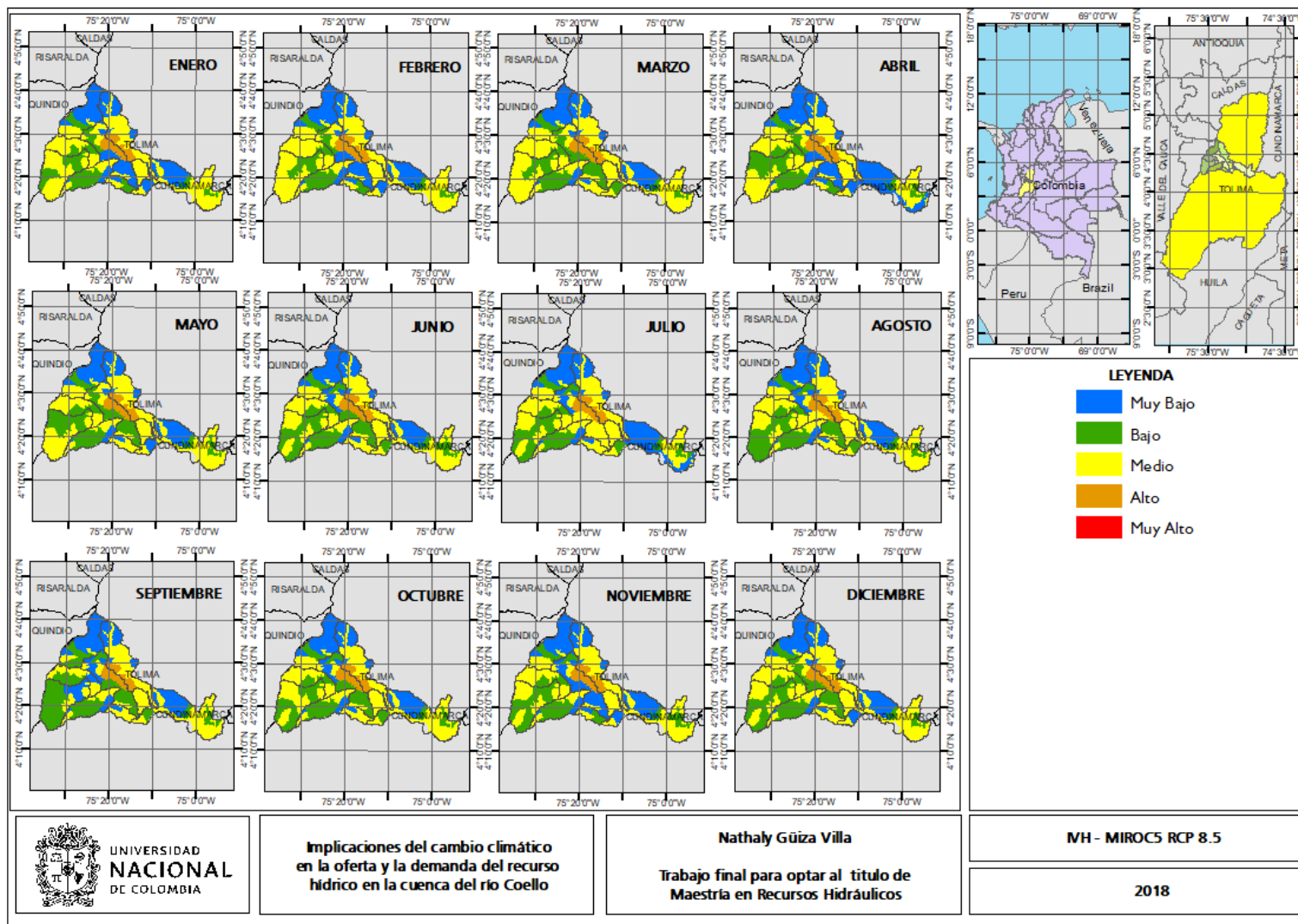


Figura 6-24: Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico mensual modelo MIROC5 RCP 8.5.



6.5 Posible estado futuro del recurso hídrico

Al realizar los índices anteriores se puede definir un posible estado futuro del recurso hídrico de acuerdo con los escenarios proyectados. En el caso de la regulación y retención hídrica el escenario 4.5 hace evidente una posible capacidad media en gran parte de la cuenca, presentando zonas de alta, baja o muy baja regulación, sin presentar ningún modelo una muy alta regulación. Caso contrario al escenario RCP 8.5 el cual demuestra una posible retención alta a muy alta en dos de los tres modelos seleccionados (IPSL_CM5A_LR y MIROC5), el otro modelo (IPSL_CM5A_MR) coincide con el anterior escenario al indicar una regulación de media a baja.

En cuanto al índice de aridez se evidencia un posible déficit de agua para el primer trimestre del año (DEF), que puede observarse en menor medida en los meses de julio y agosto. Sin embargo, se presentan también altos excedentes de agua en el trimestre de septiembre, octubre y noviembre y en algunos casos el mes de abril. El índice de uso de agua demuestra una gran presión sobre el recurso, siendo este muy alto en todos los meses del año, aun cuando su valor disminuye en cierta medida en los meses lluviosos. Sus altos valores son constantes en la parte central y baja de la cuenca, dado el uso para actividades agrícolas y dotacionales. Finalmente, para la vulnerabilidad hídrica, se tienen dos escenarios, uno con un posible alto valor en la zona de desembocadura de la cuenca, como en su zona central, contrastando con una vulnerabilidad baja a muy baja en la zona alta de la cuenca y otro que presenta una vulnerabilidad media predominante con valores de baja a muy baja vulnerabilidad.

7 Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

En primera medida este trabajo buscó implementar una metodología que incluyera los patrones de precipitación asociados a los datos medidos en las estaciones pluviométricas, con el fin de representar de la mejor manera dicha variable extraída de los modelos de cambio climático en la zona de estudio, con el propósito de reducir de alguna manera la incertidumbre asociada a tales modelos. Para lo anterior, fue utilizado el principio de máxima entropía, aduciendo a un criterio de honestidad en el cual se usan únicamente los datos conocidos. Esta metodología permitió obtener la precipitación de los modelos de circulación global a una resolución diaria, intentando conservar la variabilidad climatológica asociada a la zona de estudio, así como preservando el valor de la precipitación mensual como la sumatoria de sus valores diarios. Lo mencionado previamente tiene grandes posibilidades de uso en el país, su valor agregado es el permitir hacer uso de los datos observados aun cuando sean series menores a los 30 años utilizados comúnmente en los estudios hidrológicos y meteorológicos, facilitando su aplicación en cuencas pobremente instrumentadas o de instrumentación reciente. Además, reproduce adecuadamente el comportamiento histórico diario de la precipitación, lo que hace posible utilizar los datos de los modelos climáticos globales que no tienen en cuenta las grandes variaciones climatológicas que existen en el país, para una zona de estudio determinada.

Una vez obtenida la precipitación a nivel diario según la metodología propuesta, usando el principio de máxima entropía, fue evidente una posible reducción de la precipitación a esta resolución, comparado con los valores de la serie histórica. Se visualizan algunos años con totales mensuales más elevados que el promedio anual observado, coincidiendo con el aumento de precipitación proyectado por la tercera comunicación de cambio climático (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, 2015a). Sin embargo, se considera que la reducción del

promedio diario puede deberse a una posible concentración de la precipitación en días o meses específicos. Dichas concentraciones fueron observadas en los cambios de precipitación desde el periodo observado (1986-2015) hasta el periodo proyectado (2020-2050), en donde se evidencian posibles disminuciones de precipitación en el periodo seco y un aumento considerable de esta variable en el periodo húmedo. Esto último podrá representar un incremento en la ocurrencia de eventos extremos y en su intensidad. En cuanto a la temperatura se observa un aumento progresivo de esta variable que para el año 2050 habrá aumentado en 2°C para el escenario RCP 4.5 y en 2.5°C en el escenario RCP 8.5, que comparándolo con las proyecciones realizadas en la tercera comunicación de cambio climático, el aumento es mayor para el año 2050, al calculado por el IDEAM ya que considera un aumento promedio de 1.6°C para el periodo 2041-2070 (IDEAM, PNUD, MADS, DNP, 2015a)

Las variables proyectadas previamente fueron ingresadas en el modelo hidrológico SWAT, calibrado y validado, permitiendo obtener caudales a resolución diaria que caracterizaron la oferta hídrica de la cuenca. En este respecto, se observa una marcada disminución de la magnitud diaria de los caudales, lo cual se ve reflejado en la curva de duración de caudales al disminuir el valor de esta variable que es excedido del 30 al 100% del tiempo, sin embargo, para los valores de caudal excedidos del 0 al 30% su valor parece aumentar, indicando la posibilidad de la ocurrencia de los eventos extremos mencionados. La curva de duración indicada fue la base para la definición de los caudales ambientales en cada uno de los cauces estudiados, precisando de esta manera la oferta hídrica total disponible en la cuenca del río Coello.

Las demandas fueron proyectadas en función de un índice de crecimiento, con excepción de las demandas agrícolas para las cuales se consideraron las variaciones en la climatología de las zonas de siembra. Lo anterior con el fin de tener una mayor certeza de la posible implicación del cambio climático en los requerimientos de riego del cultivo, los cuales en su mayoría se ven incrementados por el aumento de las temperaturas y en algunos casos la disminución de la precipitación, aumentando entonces la presión sobre el recurso hídrico. El sector mencionado es el de mayor participación en la demanda hídrica de la cuenca, con un requerimiento de hasta 30 m³/s dentro de una demanda total máxima

de 40m³/s. Lo anterior, debería ser tenido en cuenta para la utilización de herramientas de gobernanza del recurso hídrico, así como para los planes de ordenamiento territorial de los municipios asentados en la cuenca, dada la posibilidad de superar la oferta hídrica disponible evitando garantizar el caudal ambiental que requiere para proveer sus servicios ecosistémicos.

Una vez establecida la oferta y la demanda del recurso hídrico en la cuenca de estudio fue posible definir algunos índices de estado del recurso. La cuenca podrá tener una capacidad media promedio de regulación y retención hídrica en el caso del escenario RCP 4.5, para todos los modelos, en el caso del otro escenario (RCP 8.5) la capacidad aumenta teniendo valores de retención altos y muy altos. El índice de aridez con los valores proyectados indica un posible déficit de agua para los meses de enero y febrero, con un menor valor de déficit en los meses de julio y agosto. Se presentan además altos excedentes de agua en los meses de septiembre, octubre y noviembre y en algunos casos en el mes de abril. En cuanto al índice de uso de agua se evidencia una presión importante sobre el recurso hídrico, indicando un uso de agua muy alto en todos los meses del año, aun cuando su valor disminuye en cierta medida en los meses lluviosos. Se observa un valor alto generalizado para todos los meses del año en la parte central y baja de la cuenca, lugar de mayor densidad poblacional y de zonas cultivadas. La relación entre el índice de retención hídrica y el índice de uso de agua, conocida como vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico, tendrá dos escenarios posibles ya que como se menciono es función de la capacidad de la cuenca para retener o regular agua, en el caso del escenario RCP 4.5 existe la posibilidad de una alta vulnerabilidad tanto en la zona baja como en la zona central de la cuenca y una vulnerabilidad baja y muy baja predominante en el resto de la cuenca. En el segundo caso, el escenario RCP 8.5, se tiene un valor de vulnerabilidad media en gran parte de la cuenca, con valores de baja a muy baja vulnerabilidad en el resto de esta.

Durante el desarrollo de este trabajo se pudo ver la importancia de hacer estudios de cambio climático que incluyan el análisis de los cambios proyectados de variables climáticas como la precipitación o la temperatura, sumado a un análisis de los posibles

cambios en la regulación hídrica de una cuenca. El uso de índices permite tener una herramienta para apreciar los posibles cambios del recurso hídrico, más allá de ver los aumentos o disminuciones porcentuales futuros de los valores de precipitación en una región. Lo anterior, se convierte en una herramienta para gestionar adecuadamente el recurso hídrico, garantizando los ciclos naturales del cauce, el valor del caudal ambiental que requiere y buscando evitar a toda costa el agotamiento del valioso recurso que es el agua.

7.2 Recomendaciones

Inicialmente la selección de modelos de circulación general (GCM) que incluyen escenarios de cambio climático fueron seleccionados en función de una relación visual entre los datos observados a nivel trimestral dentro de la cuenca y los datos históricos proporcionados por cada uno de los modelos, en este sentido podría realizarse una selección más elaborada de acuerdo con diferentes métricas y considerando más modelos que los utilizados por el IDEAM.

Este trabajo consideró constantes los usos de suelo y sus coberturas, sin embargo, esto puede tender a variar en el tiempo al responder a las dinámicas económicas y sociales de la cuenca, lo que posibilita realizar una investigación que contemple dichos cambios, dentro del marco del cambio climático, así como los instrumentos de planificación territoriales a escala regional y local, para establecer nuevos usos del suelo y su implicación en el recurso hídrico de la cuenca.

Además, como se mencionó anteriormente se plantea la posibilidad de el incremento de los eventos extremos y/o de su intensidad, por lo anterior es posible realizar un trabajo que evalúe las posibles implicaciones del cambio climático dentro del marco de la gestión del riesgo.

En cuanto al requerimiento hídrico de los cultivos dado que se establecen las especies sembradas como invariantes en el tiempo, es posible realizar una investigación enfocada

desde el punto de vista agrícola de las especies de cultivos que pueden adaptarse a las posibles nuevas condiciones de la cuenca, así como las implicaciones que ello conlleva.

Dado que este trabajo se realizó siguiendo los lineamientos para una evaluación regional del agua propuestos por el IDEAM (2013), se considera que bajo la temática de cambio climático sería posible proponer nuevas escalas para los indicadores que tengan en cuenta las posibles magnitudes futuras. Aduciendo al caso del Índice del Uso de Agua (IUA) donde se contemplan únicamente valores mayores a 50, en la relación entre la oferta y la demanda, se observó que este valor puede ser sobrepasado en gran medida. Por lo anterior, tener una escala secundaria en la cual se contemplen las zonas con mayor presión hídrica con respecto a las demás, podría representar un instrumento importante para la toma de decisiones frente al uso y aprovechamiento del recurso hídrico.

A su vez, el índice de retención hídrica es calculado en función de la relación entre el valor de área bajo la curva de duración de caudales y el área bajo la curva de caudal medio, en determinados casos donde el caudal tiene un comportamiento constante, sin una variabilidad determinada, el valor del área bajo el caudal promedio será muy cercano al valor del área total, por lo tanto, su valor no es un indicador de la magnitud de los caudales, pudiendo estos ser menores a los observados previamente. Es el caso del escenario RCP 8.5 donde se observan retenciones hídricas altas a muy altas, disminuyendo entonces el valor de la vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico, situación que no es consecuente con los incrementos en la demanda determinados y con la posible reducción de la precipitación. Por lo anterior se considera que en el marco de la realización de estudios de cambio climático de este tipo al igual que para el índice de uso de agua es necesario definir una escala complementaria o alternativa que evidencie realmente cual será el posible estado del recurso hídrico futuro.

Finalmente, hay que destacar que este estudio es un conjunto de posibles escenarios basados en modelos de circulación global con la inclusión de cambio climático, pero en ningún momento se espera representen fielmente la realidad de lo que puede ocurrir. Se tienen incertidumbres asociadas tanto a los modelos como a los patrones de precipitación

y temperatura observados en campo, por lo tanto, se debe hacer uso de esta información de manera responsable, como un posible indicador de los problemas que pueden presentarse en un futuro para establecer herramientas de gobernanza que de alguna manera limiten o disminuyan la vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico en esta zona. A su vez cabe la posibilidad de realizar un estudio alterno donde se evalúen las incertidumbres asociadas a este trabajo y a los consecuentes impactos del cambio climático en la zona.

A. Lista de Anexos por capítulo

Capítulo 2

- Anexo 2.1. Comportamiento medio mensual de la precipitación
- Anexo 2.2. Comportamiento mensual de la precipitación
- Anexo 2.3. Comportamiento anual de la precipitación
 - Anexo 2.3.1. Comportamiento anual
 - Anexo 2.3.2. Comportamiento anual definiendo tipología
- Anexo 2.4. Comportamiento mensual discriminado de la precipitación
- Anexo 2.5. Comportamiento trimestral discriminado de la precipitación
- Anexo 2.6. Mapas

Capítulo 3

- Anexo 3.1. Selección de los modelos climáticos globales
- Anexo 3.2. Variables climáticas futuras extraídas de los GCM seleccionados
- Anexo 3.3. Metodología propuesta para reducción de escala de datos de cambio climático
 - Anexo 3.3.1. Programa desarrollado para Downscaling
 - Anexo 3.3.2. Series de precipitación anuales RCP 4.5
 - Anexo 3.3.3. Series de precipitación anuales RCP 8.5
- Anexo 3.4. Series futuras de precipitación y temperatura
 - Anexo 3.4.1. Series diarias de precipitación futura
 - Anexo 3.4.2. Series mensuales multianuales de precipitación futura
 - Anexo 3.4.3. Series anuales de temperatura futura
- Anexo 3.5. Mapas

Capítulo 4

Anexo 4.1. Datos climáticos de entrada modelo SWAT

Anexo 4.2. Graficas de relación de temperatura y altura

Anexo 4.3. Caudales microcuencas

Anexo 4.4. Mapas

Capítulo 5

Anexo 5.1. Demandas microcuencas

Anexo 5.2. Mapas

Capítulo 6

Anexo 6.1. Indicadores futuros

Anexo 6.2. Indicadores periodo actual (Pontificia Universidad Javeriana, 2017)

Anexo 6.3. Mapas

Bibliografía

- Anandhi, A., Frei, A., Pierson, D., Schneiderman, E., Zion, M., Lonsbury, D., & Matonse, A. (2011). *Examination of change factor methodologies for climate change impact assessment*. *Water Resources Research* (Vol. 47). <https://doi.org/10.1029/2010WR009104>
- CORTOLIMA. (2006). *Proyecto de ordenacion y manejo de la cuenca hidrográfica mayor del río Coello*. Ibagué.
- CORTOLIMA. (2011). Estudio de CORTOLIMA establece el comportamiento climático en la cuenca Coello a 30 años. Retrieved April 1, 2017, from <http://www.cortolima.gov.co/estudio-cortolima-establece-comportamiento-climatico-cuenca-coello-30-años>
- DANE. (2016). Cuentas departamentales PIB departamental / 2000 - 2016 provisional. Retrieved from <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales>
- FAO. (1990). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*.
- Fasullo, J. T., Nerem, R. S., Mitchum, G. T., Beckley, B. D., Masters, D., & Hamlington, B. D. (2018). Climate-change–driven accelerated sea-level rise detected in the altimeter era. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. <https://doi.org/10.1073/pnas.1717312115>
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, C. (2015a). *Escenarios de Cambio Climático para Precipitación y Temperatura para Colombia 2011-2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Estudio Técnico Completo : Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, C. (2015b). *Nuevos escenarios de cambio climático para Colombia 2011-2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque*

- Nacional - Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.*
Bogotá.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, C. (2015c). *Nuevos escenarios de cambio climático para Colombia 2011-2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional - Regional: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. 3ra Comunicación Nacional de Cambio Climático.*
- IDEAM. (2010a). *Atlas climatológico de Colombia.*
- IDEAM. (2010b). *Estudio Nacional del Agua 2010.*
- IDEAM. (2013). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua.*
- IDEAM. (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014.* Bogotá D.C.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis.* (M. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt & T. and H. L. Miller, Eds.). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- IPCC. (2013). *Cambio climático 2013 Bases físicas. Resumen para responsables de políticas, Resumen técnico y Preguntas frecuentes.* (T. F. Stocker, D. Qin, G. Plattner, M. B. Tignor, S. Allen, J. Boschung, ... P. M. Midgley, Eds.).
- IPCC. (2014a). *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis.* (Intergovernmental Panel on Climate Change, Ed.), *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis.* Cambridge: Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- IPCC. (2014b). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* (C. B. Field, D. J. V.R. Barros, K. J. Dokken, M. D. Mach, T. E. Mastrandrea, M. Bilir, ... L. L. White, Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability.*
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Kapur, J. N., & Kesavan, H. K. (1992). *Entropy Optimization Principles with Applications.* Waterloo: Academic Press.
- Khalili, M., & Van Nguyen, V. T. (2016). *An efficient statistical approach to multi-site*

- downscaling of daily precipitation series in the context of climate change. Climate Dynamics* (Vol. 49). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3443-6>
- Lemus, R. P. (2015). *Proyecciones de cambio climático para la precipitación en América tropical mediante técnicas de downscaling estadístico*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10481/41555>
- Ministerio de Desarrollo Económico, _ . (2000). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico - RAS 2000*. Bogotá D.C.
- Monsalve, G. (1999). *Hidrología en la ingeniería* (Segunda Ed). Bogotá D.C: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- NASA. (2016). NASA, NOAA Data Show 2016 Warmest Year on Record Globally. Retrieved April 14, 2017, from <https://www.giss.nasa.gov/research/news/20170118/>
- NASA. (2017). Global Climate Change. Vital Signs of the Planet. Retrieved from <https://climate.nasa.gov/evidence/>
- NASA. (2018). Vertex Alaska Satellite Facility. Retrieved from <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>
- NCIDC. (2017). MEaSUREs Northern Hemisphere Terrestrial Snow Cover Extent Daily 25km. Retrieved April 15, 2017, from <https://nsidc.org/data/nsidc-0530/versions/1>
- Pontificia Universidad Javeriana. (2017). *Modelación hidrológica e hidráulica de la cuenca del río Coello, de acuerdo con los lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua - ERA*.
- USAID. (2014). *A review of downscaling methods for climate change projections. United States Agency for International Development by Tetra Tech ARD*.
- Wuebbles, D. J., Fahey, D. W., Hibbard, K. A., Dokken, D. J., Stewart, B. C., & Maycock, T. K. (Eds.). (2017). *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I*. Washington, DC. <https://doi.org/10.7930/J0J964J6>