

Evaluación de la sensibilidad de la escorrentía como función de los cambios en la temperatura y la precipitación sobre la cuenca del Río Magdalena

**Nidia Cristina Reyes Gil
José David Santos Gómez**



**Pontificia Universidad Javeriana
Facultad de Ingeniería
Carrera de Ingeniería Civil
2013**

Evaluación de la sensibilidad de la escorrentía como función de los cambios en la temperatura y la precipitación sobre la cuenca del Río Magdalena

**Nidia Cristina Reyes Gil
José David Santos Gómez**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

**Director:
Juan Diego Giraldo Osorio IC, MSc, PhD**



**Pontificia Universidad Javeriana
Facultad de Ingeniería
Carrera de Ingeniería Civil
2013**

Bogotá, 5 de Diciembre de 2013

Ingeniera
MARÍA PATRICIA LEÓN NEIRA
Director de carrera
Carrera de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Pontificia Universidad Javeriana

Estimada ingeniera,

Por medio de la presente hacemos entrega del proyecto de grado titulado "*Evaluación de la sensibilidad de la escorrentía como función de los cambios en la temperatura y la precipitación sobre la cuenca del Río Magdalena*".

Atentamente,

NIDIA CRISTINA REYES GIL
C.C. 1136883767

JOSÉ DAVID SANTOS GÓMEZ
C.C. 1118843856

REGLAMENTO DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

Art. 23 de la resolución No. 13 del 6 de julio de 1964

“La Universidad no se hace responsable por los conceptos emitidos por sus alumnos en sus trabajos de tesis. Solo velará porque no se publique nada contrario al dogma y la moral católica y porque las tesis no contengan ataques o polémicas puramente personales; antes bien; se ve en ellas el anhelo de buscar la verdad y la justicia”.

Bogotá, 27 de Enero de 2014

Señores

BIBLIOTECA GENERAL
Pontificia Universidad Javeriana

Estimados señores,

Autorizo a los usuarios interesados, consultar y reproducir parcialmente el contenido del trabajo de grado titulado "*Evaluación de la sensibilidad de la escorrentía como función de los cambios en la temperatura y la precipitación sobre la cuenca del Río Magdalena*", presentado por los estudiantes Nidia Cristina Reyes Gil y José David Santos Gómez como requisito para optar al título de Ingeniero Civil en el año 2014, siempre que mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a sus autores.

Atentamente,

NIDIA CRISTINA REYES GIL
C.C. 1136883767

JOSÉ DAVID SANTOS GÓMEZ
C.C. 1118843856

Dedicatoria

A nuestras madres Lorena Gómez Bermúdez y Nidia Del Carmen Gil De la Hoz, por ser nuestro apoyo constante, el consejo más dulce y voz de aliento en los momentos que más lo necesitamos.

A nuestros padres Edilberto Rafael Santos Moreno y Luis Miguel Reyes Niño, por ser nuestro apoyo constante, el punto de vista más objetivo, la mano amiga más cariñosa y la exigencia que permitió emerger lo mejor de nosotros mismos.

A nuestros hermanos María Alejandra, Ana María y José Andrés, por darnos ánimos siempre; a pesar de las peleas los llevamos en el corazón y esperamos ser para ustedes motivo de orgullo y fuente constante de comprensión y consejo. Muchos éxitos en sus vidas.

A los artículos, informes, libros, secciones de libros, tesis, etc. que algún día escribiremos.

Agradecimientos

A nuestro director Juan Diego Giraldo Osorio por su dedicación, por todo el tiempo que dedicó a resolver nuestras inquietudes, por darnos ánimo, valiosos consejos y un interesante artículo sobre el grupo más probable de Colombia en el mundial.

A Juan Sebastián Fontalvo por su valiosa colaboración en el desarrollo de este trabajo. Muchos éxitos Juan.

A nuestros amigos y amigas por siempre estar ahí: "firmes como siempre". Saludos y gracias especiales a Ingeniería sin Fronteras.

A todo el vallenato viejo, la champeta y la música clásica que nos inspiraron para programar.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCION	15
2	ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	16
3	OBJETIVOS	18
3.1	Objetivo general.....	18
3.2	Objetivos específicos.....	18
4	MARCO CONCEPTUAL.....	19
4.1	El Ciclo hidrológico y sus representaciones	19
4.2	Precipitación y temperatura.....	21
4.3	Conceptos estadísticos básicos.....	22
4.3.1	Estadígrafos de posición.....	22
4.3.2	Estadígrafos de dispersión.....	23
4.4	Elasticidad climática.....	24
4.5	Cambio Climático.....	24
4.5.1	Cambio climático y variabilidad climática.....	25
4.5.2	Escenarios de cambio climático.....	25
4.6	Conceptos estadísticos para estimación de cambio y bondad de ajuste	26
4.6.1	Distribución Normal.....	26
4.6.2	Prueba de Hipótesis sobre dos muestras.....	27
4.6.3	Intervalos de Confianza.....	27
4.7	Conceptos para Validación de la Base de Datos.....	27
4.7.1	Prueba de Kolmogórov-Smirnov.....	27
4.7.2	Probabilidad empírica de no excedencia.	28
4.8	Modelos de elevación digital.....	29
4.9	Sistema de coordenadas usado en Colombia	29
4.10	Base de datos Delaware y otras.....	30
4.11	Modelos de Circulación Globales	31
5	INFORMACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO.....	33
5.1	Características de la cuenca	33
5.1.1	Distribución de la precipitación en la cuenca	33
5.1.2	Divisiones de la cuenca.....	34
5.2	Estudios sobre variabilidad climática y cambio climático de la cuenca	34
6	RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS.....	36
6.1	Validación de la base de datos de la universidad de Delaware	36
6.1.1	Metodología utilizada.....	38
6.1.2	Distribución de probabilidades	39
6.1.3	Mapas de Validación	42
6.1.4	Resultados de la Validación.....	46
6.1.5	Conclusiones Validación	48
6.2	Obtención de información requerida a partir de base de datos	48
6.2.1	Tratamiento inicial dado al MDT.....	48
6.2.2	Obtención de algunas características del terreno	49
6.2.3	Articulación Bases de datos y MDT	50
6.2.4	Delimitación de la cuenca.....	51
6.2.5	Obtención de promedios mensuales anuales.....	56
6.3	Obtención de predicción de cambios de la precipitación y la temperatura.....	59
7	PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	64
7.1	Variabilidad de la precipitación y la temperatura	64
7.2	Comparación entre ventanas temporales	72
7.2.1	Temperatura.....	74

7.2.2	Precipitación.....	78
7.3	Relación entre precipitación, temperatura y caudal.....	84
7.4	Relación entre precipitación y temperatura para Colombia	91
8	RESULTADOS Y ANÁLISIS	93
8.1	Significancia del cambio climático para Colombia.....	93
8.1.1	Temperatura.....	93
8.1.2	Precipitación.....	95
8.2	Elasticidad climática.....	96
8.3	Comportamiento de cambios de precipitación, temperatura y caudal de la cuenca del Río Magdalena.....	101
8.4	Modelos de circulación global en la cuenca del Río Magdalena	102
9	CONCLUSIONES	107
10	RECOMENDACIONES	108
11	BIBLIOGRAFÍA.....	109
	LISTA DE ANEXOS	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representación del ciclo del agua. Fuente: Bertrand-Krajewski (1999/2000 citado en Torres Abello, 2004).....	19
Figura 2. Cuenca representada como un sistema. Fuente: Adaptado de (Chow, 1994).....	20
Figura 3. Escenarios de emisiones. Adaptado de IPCC (2000).....	26
Figura 4. Distribución de la precipitación sobre la Amazonía para 1900-2010.....	37
Figura 5. Estaciones de precipitación en tierra que posee Climate Explorer en la región del Amazonas.....	38
Figura 6. Distribución de probabilidades de excedencia para los datos de precipitación de la grilla (rojo) y las estaciones en tierra (azul) para el ciclo anual (2a), invierno (2b), primavera (2c), verano (2d), otoño (2e).	40
Figura 7. Distribución del ciclo anual de la precipitación para la grilla (azul) y las estaciones en tierra (rojo). El intervalo de confianza de las estaciones en tierra (línea punteada roja).....	41
Figura 8. Distribución del ciclo anual de la temperatura para la grilla (azul) y las estaciones en tierra (rojo). El intervalo de confianza de las estaciones en tierra (línea punteada roja).....	42
Figura 9. Mapas de validación para los datos de precipitación de UD-ATP con respecto a estaciones en tierra a escala anual.	43
Figura 10. Mapas de validación para los datos de precipitación de UD-ATP con respecto a estaciones en tierra para los periodos de invierno (6a), primavera (6b), verano (6c), otoño (6d).	45
Figura 11. Mapas de validación para los datos de temperatura de UD-ATP con respecto a estaciones en tierra a escala anual.	46
Figura 12. Modelo digital de terreno de Colombia.....	49
Figura 13. De arriba abajo: (a) Muestra del mapa de acumulación de flujo del MDT (b) Muestra del mapa de direcciones de drenaje del MDT (c) Muestra del mapa de corrientes del MDT de Colombia.....	50
Figura 14. Ubicación Estación Calamar y cauce del Río Magdalena en el MDT	51
Figura 15. Ubicación corregida Estación Calamar y cauce del Río Magdalena en el MDT.....	52
Figura 16. Ubicación de la estación Calamar sobre el MDT	52
Figura 17. Divisoria de aguas Cuenca Estación Calamar sobre MDT	53
Figura 18. Divisoria de aguas Cuenca Nariño sobre MDT.....	54
Figura 19. Mapa de pendientes de la cuenca Calamar expresadas en grados.	55
Figura 20. Disposición de los datos de precipitación mensual de la Universidad de Delaware (con precisión de 0.5°) en Cuenca Calamar	56
Figura 21. Calentamiento global de la superficie para los distintos escenarios: A2 (rojo), A1B (verde) y B1 (azul), mostrados para proyección del siglo 20. Tomado de Randall et al, 2007. 59	
Figura 22. Ciclo anual de precipitación para: Cuenca Calamar (arriba), Cuenca Nariño (mitad), Colombia (abajo).....	69
Figura 23. Ciclo anual de temperatura para: Cuenca Calamar (arriba), Cuenca Nariño (mitad), Colombia (abajo).....	70
Figura 24. Diagramas de caja de promedios de temperatura multianuales (°C) para las distintas ventanas temporales	74

Figura 25. Mapa de promedios de temperatura multianuales para los periodos 1901-1930 (arriba-izquierda), 1941-1970 (arriba-derecha) y 1981-2010 (abajo-izquierda)	75
Figura 26. Desviación estándar de la serie de valores medios anuales para los periodos 1901-1930 (arriba-izquierda), 1941-1970 (arriba-derecha) y 1981-2010 (abajo-izquierda).....	76
Figura 27. Mapa de diferencias de temperatura media multianual para la primera mitad del siglo (arriba-izquierda), segunda mitad (arriba-derecha) y la totalidad del siglo (abajo-derecha).....	77
Figura 28. Diagrama de cada de diferencias de temperatura media entre ventanas temporales	78
Figura 29. Mapa de promedios de precipitación multianuales (mm/mes) para los periodos 1901-1930 (arriba-izquierda), 1941-1970 (arriba-derecha) y 1981-2010 (abajo-izquierda)	79
Figura 30. Desviación estándar de la serie de valores medios anuales para los periodos 1901-1930 (arriba-izquierda), 1941-1970 (arriba-derecha) y 1981-2010 (abajo-izquierda).....	80
Figura 31. Diagramas de caja de promedios de precipitación multianuales (mm/mes) para las distintas ventanas temporales	81
Figura 32. Diagrama de cada de diferencias de temperatura media entre ventanas temporales	81
Figura 33. Mapa de diferencias de temperatura media multianual para la primera mitad del siglo (arriba-izquierda), segunda mitad (arriba-derecha) y la totalidad del siglo (abajo-izquierda).....	82
Figura 34. Mapa de diferencias porcentuales de precipitación media multianual para la primera mitad del siglo (arriba-izquierda), segunda mitad (arriba-derecha) y la totalidad del siglo (abajo-izquierda)	83
Figura 35. Variabilidad de los cambios en los caudales de salida ante cambios en precipitación y temperatura en Cuenca Nariño 1981-2010 (arriba) y Cuenca Calamar 1970-2011 (abajo) .	85
Figura 36. Contornos de ΔQ función de ΔP y ΔT para diferentes rezagos de ΔQ en Cuenca Calamar. (a) rezago=1 mes (b) rezago =0 (c) rezago =2 meses (d) rezago =3 meses (e) rezago =4 meses.....	89
Figura 37. Contornos de ΔQ función de ΔP y ΔT para diferentes rezagos de ΔQ en Cuenca Nariño. (a) rezago=1 mes (b) rezago =0 (c) rezago =2 meses (d) rezago =3 meses (e) rezago =4 meses.....	90
Figura 38. Mapas de valor p de la temperatura media multianual para la primera mitad del siglo (arriba-izquierda), segunda mitad (arriba-derecha) y la totalidad del siglo (abajo-izquierda).....	94
Figura 39. Mapas de valor p de la precipitación media multianual para la primera mitad del siglo (arriba-izquierda), segunda mitad (arriba-derecha) y la totalidad del siglo (abajo-izquierda).....	95
Figura 39. Contornos de cambios porcentuales del caudal para cambios porcentuales en la precipitación y cambios de magnitud en la temperatura, para Cuenca Calamar (a) y Cuenca Nariño (b).....	102
Figura 40. Contorno ΔP y ΔT vs ΔQ con modelos de circulación global para la cuenca Calamar.	103

Figura 41. Contorno ΔP y ΔT vs ΔQ con modelos de circulación global para la cuenca Nariño.	103
Figura 43. Cambios de caudales obtenidos de los modelos climáticos globales para la cuenca Calamar.	105
Figura 44. Cambios de caudales obtenidos de los modelos climáticos globales para la cuenca Nariño.	106

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Variabilidad de la temperatura mensual 1900-2010 en Cuenca Nariño (arriba), Cuenca Calamar (mitad) y Colombia (abajo)	65
Gráfica 2. Variabilidad de la precipitación mensual 1900-2010 en Cuenca Nariño (arriba), Cuenca Calamar (mitad) y Colombia (abajo)	66
Gráfica 3. Coeficiente de variación mensual de diferentes valores mensuales de temperatura encontrados al interior la Cuenca Calamar (arriba) y Colombia (abajo)	67
Gráfica 4. Coeficiente de variación mensual de diferentes valores mensuales de precipitación encontrados al interior la Cuenca Calamar (arriba) y Colombia (abajo)	68
Gráfica 5. Comparación ciclo anual de temperatura (arriba) y de ciclo anual de precipitación (abajo), entre de Cuenca Calamar, Cuenca Nariño y Colombia.....	71
Gráfica 6. Temperatura mensual multianual en tres ventanas temporales para Cuenca Nariño (arriba) y Cuenca Calamar (abajo)	72
Gráfica 7. Precipitación mensual multianual en tres ventanas temporales para Cuenca Nariño (arriba) y Cuenca Calamar (abajo)	73
Gráfica 8. Variabilidad de los caudales de salida: Cuenca Nariño 1981-2010 (arriba) y Cuenca Calamar 1970-2011 (abajo)	84
Gráfica 9. Correlación cruzada entre los cambios de temperatura y caudal para Cuenca Nariño (arriba) y Cuenca Calamar (abajo)	86
Gráfica 10. Correlación cruzada entre los cambios de precipitación y caudal para Cuenca Nariño (arriba) y Cuenca Calamar (abajo).....	87
Gráfica 11. Correlación cruzada de las variables temperatura y precipitación para Colombia 91	
Gráfica 12. Gráfica de ΔP y ΔT para todo el siglo con regiones estimadas de distribución espacial (abajo). Convenciones de las zonas agrupadas en regiones para estimar ΔP y ΔT correspondidos (arriba).	92
Gráfica 13. Líneas Isotemperatura para Cuenca Calamar (arriba) y Cuenca Nariño (abajo).....	97
Gráfica 14. Líneas Isoprecipitación para Cuenca Calamar (arriba) y Cuenca Nariño (abajo)....	98
Gráfica 15. Elasticidad climática de valores sin ajustar en Cuenca Calamar (arriba) y Cuenca Nariño (abajo)	99
Gráfica 16. Elasticidad climática de valores ajustados en Cuenca Calamar (arriba) y Cuenca Nariño (abajo)	100
Gráfica 17. Z_t vs Z_q para el modelo BCM2.....	104

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Fórmulas para el cálculo de probabilidades empíricas de no excedencia. Tomado de Shabri (2002)	29
Tabla 2. Modelos climáticos globales descritos en el cuarto informe de evaluación del IPCC (2007)	31
Tabla 3. Resultados de la prueba <i>ks</i> para el ciclo anual (3a), invierno (3b), primavera (3c), verano (3d) y otoño (3e) para la Amazonía.....	47
Tabla 4. Información sobre cuencas delimitadas.....	55
Tabla 5. Cambios de Temperatura media mensual multianual (°C) y Precipitación media mensual multianual (mm) en GCMs del periodo de 2040-2069 respecto al periodo de 1961-1990 para la cuenca Calamar.....	61
Tabla 6. Cambios de Temperatura media mensual multianual (°C) y Precipitación media mensual multianual (mm/mes) en GCMs del periodo de 2040-2069 respecto al periodo de 1961-1990 para la cuenca Nariño.....	62
Tabla 7. Precipitación y temperatura media (1900-2010) en Cuenca Calamar, Cuenca Nariño y Colombia.	64

1 INTRODUCCIÓN

La sociedad actual depende casi en su totalidad de la disponibilidad de recursos naturales, para la realización de gran número de actividades económicas que soportan la forma de vida de cada región. La disponibilidad de recursos naturales, particularmente la del recurso hídrico, depende de la variabilidad de las condiciones climáticas. Así, un cambio climático puede afectar a diferentes sectores económicos y sociales, y conducir a un cambio en el modo de vida de la sociedad como la conocemos.

El recurso hídrico, al mostrarse como uno de los recursos naturales de mayor importancia, ha sido objeto de estudio por siglos, considerando en los más recientes la evaluación de su disponibilidad en ríos ante factores como la variabilidad del clima. Siguiendo esta línea de ideas, es realizado este trabajo con el fin de tener noción de la forma en la que varía el caudal del Río Magdalena ante los cambios climáticos, más específicamente ante los cambios en la precipitación y la temperatura.

Debido a que la relación entre el caudal transportado por un río y la variabilidad climática es muy compleja, y las incertidumbres sobre esta relación son aún mayores en el marco del cambio climático, se ha intentado dar respuesta utilizando valores observados de las variables: datos de caudal medidos en una estación, confrontados con otras variables climáticas (básicamente precipitación y temperatura) integradas al interior de la cuenca.

Varios estudios acerca de la sensibilidad de los caudales ante cambios climáticos en cuencas se han realizado en todo el mundo, entendiendo como “sensibilidad” la relación entre los cambios que se presentan en los caudales como consecuencia de cambios en otras variables (e. g. precipitación, temperatura, etc). Una de las maneras más simples de estudiar dicha relación es utilizando el concepto de elasticidad climática. La elasticidad es un concepto utilizado en economía, traído de la física a finales del siglo XIX (Marshall, 2006) y utilizado generalmente en economía para describir el comportamiento de los compradores frente a cambios en las condiciones del mercado (Mankiw & Rabasco, 2007). Este concepto cuantifica la variación relativa de una variable dependiente debido al cambio relativo de otra variable, que se supone es independiente (Ferguson, 1971).

Teniendo en cuenta los factores anteriormente mencionados se presenta aquí, la forma en la que fue establecida la relación caudal-precipitación-temperatura para la cuenca del Río Magdalena y los pasos que para llegar a ella se siguieron. Estos incluyen la validación y tratamiento de los datos de precipitación y temperatura empleados, la evaluación de la existencia de cambio climático en el país, el cálculo de la elasticidad climática y la posterior evaluación de la relación hallada bajo los pronósticos de precipitación y temperatura de diferentes modelos globales de circulación. Cabe anotar que la evaluación de la existencia de cambio climático en el país, fue realizada con el fin de conocer si la cuenca estaba siendo o no ajena a la dinámica mundial de cambio climático, ubicándola al mismo tiempo en un contexto nacional.

La cuenca del Río Magdalena es evaluada aquí teniendo en cuenta dos cuencas de estudio en ella contenidas. La primera de ellas ubicada en la parte alta y la segunda recogiendo toda su área hasta una zona cercana a su desembocadura. Los datos de precipitación y temperatura empleados en el análisis de estas cuencas, fue extraída de la base de datos de la Universidad de Delaware y su tratamiento le fue dado a través del uso de las herramientas computacionales: GRASS GIS 6.4.2 y el software R versión 2.12.2.

2 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Partiendo de la importancia de la disponibilidad del recurso hídrico en la sociedad actual, y de la dependencia de este a los cambios en el clima, se reconoce la importancia de la realización de estudios que contemplen la evaluación y cuantificación del posible cambio climático en Colombia. Esta actividad permite idear mecanismos de adaptación y la toma de medidas en el presente para afrontar posibles situaciones desfavorables que se pueden presentar en el futuro (Intergovernmental Panel on Climate Change, 1992). Muchas situaciones adversas pueden llegar a presentarse en el país, como consecuencia del cambio en la cantidad del recurso hídrico transportado por los ríos que concentran una mayor cantidad de habitantes en su cuenca, como lo es el río Magdalena (Restrepo, Zapata, Díaz, Garzón-Ferreira, & García, 2006). Para el caso específico de este trabajo, el establecimiento de una relación entre las condiciones climáticas y los caudales de ese importante río, permitirá dar una idea del comportamiento de este recurso ante los posibles cambios de variables climáticas como la precipitación y la temperatura.

Diversos estudios acerca de la sensibilidad de la escorrentía ante los cambios climáticos se han realizado en todo el mundo. Muchos de ellos parten de la confrontación de valores de caudal con variables del clima empleando variaciones del concepto de elasticidad climática introducido por Schaake (1990 citado en Fu, Charles, & Chiew, 2007), el cual aborda de una manera sencilla las complejas relaciones presentadas entre los caudales y las variables climáticas al interior de una cuenca.

Un ejemplo de relevancia del empleo de la elasticidad climática es presentado por Sankarasubramanian, Vogel, & Limbrunner (2001), donde relacionan los cambios relativos en la precipitación para numerosas cuencas en Estados Unidos, con los respectivos cambios relativos de los caudales. Este estimador no paramétrico (esto es, sin suponer una distribución de probabilidad que ajuste los datos) es utilizado para construir un mapa de elasticidad de caudales con respecto a la precipitación para Estados Unidos. Al introducir los resultados de cambio en la precipitación desde los modelos climáticos construidos para EEUU, concluyeron que el mapa elasticidad de caudales proporciona una validación métrica para las investigaciones de cambio climático pasado y futuro en Estados Unidos.

El estudio de la elasticidad de los caudales por Sankarasubramanian et al. (2001), cuyo único parámetro es la precipitación, fue ampliado por Fu, Charles, & Chiew (2007) a un índice de elasticidad de caudales como función tanto de la precipitación como de la temperatura, con el fin de evaluar los efectos climáticos de ambas variables sobre la escorrentía. Al aplicar el índice propuesto a dos cuencas con condiciones climáticas diferentes, concluyeron que la precipitación como único parámetro de elasticidad no refleja la compleja relación entre los caudales y los procesos que suceden al interior de la cuenca.

Tebaldi & Sansó (2009) realizaron proyecciones conjuntas de temperatura y precipitación futuras en un marco bayesiano, mediante la estimación de la distribución a posteriori de las señales del cambio climático en términos de tendencias o diferencias entre los períodos actuales y el correspondiente a la finalización del siglo XXI, al tiempo que caracterizan completamente la naturaleza incierta de una serie de otros parámetros, como sesgos, términos de correlación y precisiones específicas del modelo.

Los estudios más relevantes sobre cambio climático en Colombia han sido realizados principalmente en la Universidad Nacional de Colombia, por el Centro de Investigaciones del Clima de Colombia – CICLICO. Poveda (1997) estudia la dinámica del comportamiento de la precipitación y los caudales del río Magdalena, empleando series temporales de temperatura y de caudales medios mensuales, pretendiendo con esto examinar el posible comportamiento caótico de la hidroclimatología colombiana. Dentro los trabajos que han tratado específicamente con el comportamiento de la precipitación en el país, se encuentra el desarrollo de mapas de la distribución espacial de la precipitación en Colombia (Mejía et al., 1999), y la cuantificación de los posibles efectos de cambio climático sobre las tormentas más intensas, empleando los resultados de Modelos de Circulación General (*General Circulation Models, GCM*) para la estimación de curvas IDF, que permitieron prever un aumento significativo en la frecuencia e intensidad de las precipitaciones más fuertes (Acevedo Aristizábal & Poveda Jaramillo, 2010). Otras publicaciones tratan la variabilidad de la hidroclimatología colombiana en diferentes escalas temporales (Poveda, 2004), además de algunos trabajos que persiguen el uso de sistemas de información geográfica para realizar estimaciones hidrológicas a partir de mapas digitales de variables climáticas, permitiendo la realización de análisis estadísticos (Vélez, Mesa, & Poveda, 2002).

Estudios sobre cambio climático, como los mencionados, son de gran importancia para Colombia, pues en un país en vía de desarrollo, con alta desigualdad social y comunidades altamente vulnerables, donde se hace indispensable el conocimiento y la integración de las consideraciones pertinentes para hacer frente a los posibles impactos del cambio climático. Como se afirma en el documento del Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo (2010), “El cambio climático puede acarrear un retroceso en los niveles de desarrollo humano, por este motivo, y porque los impactos del cambio climático son diversos y complejos, estos deben tomarse en cuenta a conciencia dentro de los procesos de planificación del desarrollo”. Los estudios sobre cambio climático son a la vez importantes, porque es necesario conocer si Colombia no es ajena a la aparente dinámica mundial de cambio que están presentando las variables del clima, como son la precipitación y la temperatura.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Evaluar la variabilidad de la esorrentía como una función de los cambios en la temperatura y la precipitación en la cuenca del río Magdalena.

3.2 Objetivos específicos

- Evaluar la significancia de los cambios en la temperatura y la precipitación en Colombia durante el último siglo
- Establecer relaciones entre el cambio de la precipitación y el cambio de la temperatura para todo el país
- Obtener la elasticidad climática de los caudales del Río Magdalena como función de la precipitación y la temperatura
- Vincular las proyecciones de cambio climático para Colombia publicadas por el IPCC con la respuesta del caudal en el Río Magdalena, a partir de la relación esorrentía-precipitación-temperatura observada.

4 MARCO CONCEPTUAL

4.1 El Ciclo hidrológico y sus representaciones

El agua, presente en el planeta Tierra en abundancia, no permanece en un solo lugar o depósito (Berner & Berner, 1996), está continuamente moviéndose de un lugar a otro a través de diferentes caminos que constituyen el objeto de estudio de la hidrología: el ciclo hidrológico (Chow, 1994). La Figura 1 muestra de forma esquemática los procesos que componen este ciclo.

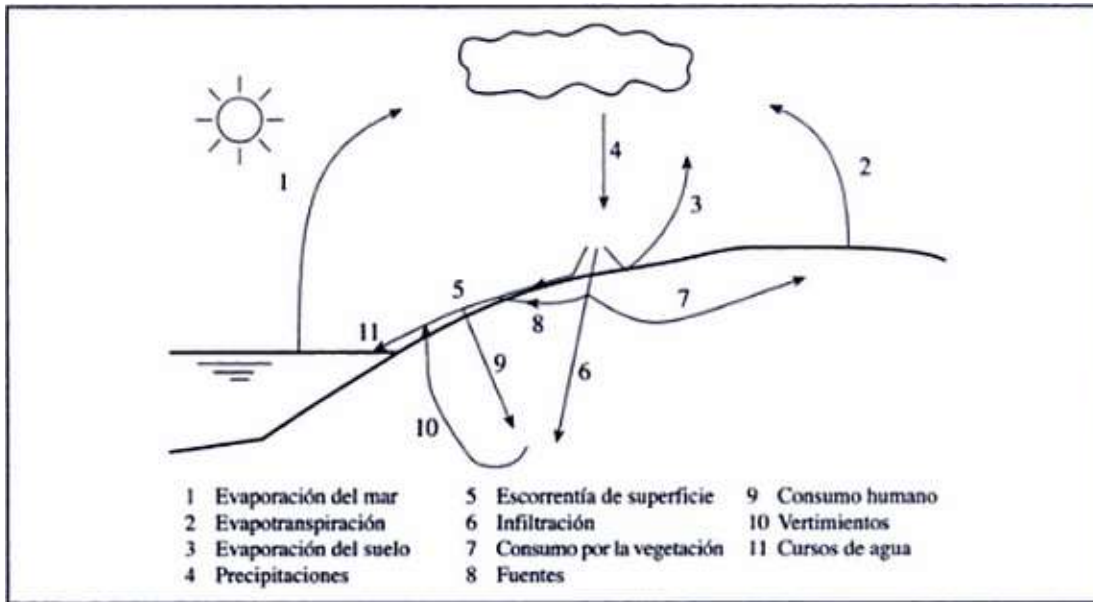


Figura 1. Representación del ciclo del agua. Fuente: Bertrand-Krajewski (1999/2000 citado en Torres Abello, 2004)

El ciclo hidrológico no tiene principio ni fin y sus procesos ocurren de forma continua. El agua se evapora de los océanos hacia la atmósfera; allí, el vapor de agua se transporta y se eleva hasta que se precipita hacia la superficie en forma de lluvia o nieve. El agua precipitada retornará a la atmósfera en forma de evaporación al encontrarse en mares, ríos o lagos, entre otros; pero para llegar a ellos puede tomar, en diferentes proporciones, los siguientes caminos o alternativas (Chow, 1994):

- Al precipitarse ser interceptada por la vegetación y allí evaporarse: Evapotranspiración
- Precipitarse en la superficie y convertirse en flujo superficial que se dirige hacia ríos o lagos y corre o permanece temporalmente en ellos: Escorrentía Superficial. Posteriormente se evapora.
- Precipitarse en la superficie e infiltrarse superficialmente en el suelo, evaporarse allí mismo (Evaporación desde el Suelo) o ser usado como consumo por la vegetación.
- Precipitarse en la superficie e infiltrarse en el suelo, fluir a través de él (Infiltración o Percolación) y convertirse en Flujo Subsuperficial que se descarga

en lagos o ríos y se convierte en Escorrentía Superficial, que terminará evaporándose.

- Precipitarse en la superficie e infiltrarse profundamente en el suelo. Recargar el agua subterránea y emerger a través de manantiales o convertirse en Escorrentía Superficial.
- Convertirse en Escorrentía Superficial (por medio de alguna de las anteriores formas) y ser usado para consumo humano, de animales o plantas. Esta cantidad de agua retornará a ríos u océanos en forma de vertimientos.

La porción restante de agua en los continentes, retorna directamente a la atmósfera por medio de la evaporación (Berner & Berner, 1996).

El fenómeno del ciclo hidrológico es enormemente complejo y está compuesto de muchos procesos interrelacionados de extensión continental, regional y local. El volumen de agua en el ciclo hidrológico global, permanece esencialmente constante, pero su distribución varía constantemente en continentes, regiones y cuencas. El comportamiento y la distribución del recurso hídrico en una región, dependen de patrones particulares del clima como la topografía, la geología y la vegetación (Chow, 1994); estos patrones a la vez influyen la pauta y magnitud de los diferentes factores climatológicos, cuya intervención es necesaria para la ocurrencia de los procesos que componen el ciclo hidrológico. En 4.2 se darán una serie de apreciaciones de dos de esos factores, por considerarse relevantes al tener en cuenta el objeto que persigue este documento.

Por simplicidad, los fenómenos hidrológicos en una región o en una cuenca, son representados por medio de un sistema, analógicamente definido como un volumen en el espacio rodeado por una frontera, que acepta agua y otras entradas, opera en ellas internamente y las produce como salidas (Chow, 1994). Las entradas (entre ellas la precipitación) y salidas (caudal del cauce), son variantes en el tiempo y denominadas por la fuente como $I(t)$ y $Q(t)$, respectivamente. La representación de una cuenca como sistema hidrológico es mostrado en Figura 2.

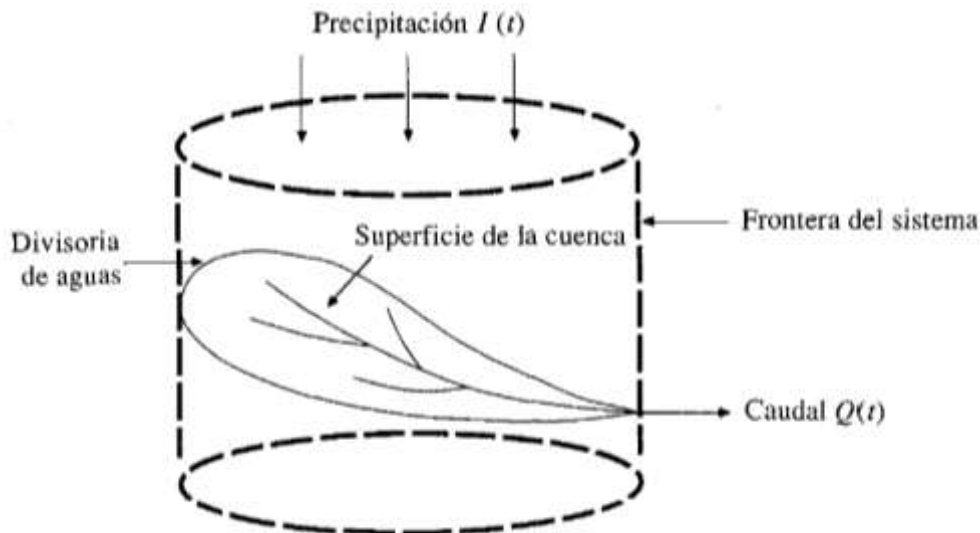


Figura 2. Cuenca representada como un sistema. Fuente: Adaptado de (Chow, 1994).

El objeto de estudio un sistema hidrológico, es entonces el de estudiar la forma en la que opera en su interior y predecir sus salidas de caudal, conociendo o intuyendo sus entradas. El modelo de sistema hidrológico es una aproximación de la realidad de un sistema, que se vale de entradas y

salidas medibles, relacionadas por medio de expresiones matemáticas (Chow, 1994). La siguiente ecuación o modelo de sistema hidrológico, es conocida como la ecuación fundamental de hidrología y aplicada masivamente a los sistemas hidrológicos en cuencas. La variable dS/dt hace referencia a la tasa de cambio de almacenamiento de la cuenca.

$$dS/dt = I(t) - Q(t) \quad (I)$$

Los modelos hidrológicos abstractos¹ pueden emplear variables que dependen del espacio, del tiempo o que al ser aleatorias, son descritas por funciones de probabilidad. Por practicidad y pertinencia, muchos de estos modelos desprecian fuentes de variación de los elementos que los conforman. En primer lugar se encuentran los modelos que no consideran aleatoriedad (determinísticos) y los que sí la consideran (estocásticos). Los determinísticos pueden considerar variación en el espacio (agregados) o no (distribuidos), y a su vez variar con el tiempo o no. Igualmente, los modelos estocásticos pueden presentar o no variación con el espacio y con el tiempo, y ser denominados en diferente forma en cada caso (Chow, 1994).

4.2 Precipitación y temperatura

La precipitación y la temperatura son factores climatológicos que contribuyen a describir la condición de la atmósfera en un periodo de tiempo representativo o en un momento determinado. Hacen parte de los factores climatológicos con la evaporación, el viento y la humedad atmosférica (Monsalve, 1995), radiación solar, insolación y presión atmosférica.

La precipitación hace referencia a las diversas formas de humedad que emana la atmósfera y que se depositan en la superficie de la tierra, en forma de lluvia, granizo y rocío, entre otras. La cantidad de lluvia es cuantificada como la altura de agua caída y acumulada en una superficie determinada; esta es medida haciendo uso de pluviómetros y pluviógrafos. Las medidas de precipitación más comunes son: altura pluviométrica (expresada en mm con frecuencia diaria, mensual o anual), intensidad de precipitación (expresada en mm/hora) y duración de precipitación (Monsalve, 1995). La precipitación tiene un papel de gran importancia para una cuenca, en su ecuación de balance hidrológico.

La temperatura del aire por su parte, es una medida de la cantidad de energía cinética, en forma de calor, contenida por las partículas de aire al compararlas con una referencia. Esta es medida por medio de y expresada según tres escalas principales: Celsius, Fahrenheit o Kelvin. La temperatura, junto a la humedad del aire, condiciona la presión de vapor del mismo, influenciando el gradiente de concentración de vapor entre la superficie de agua y el aire colindante; estos factores actúan como una influencia meteorológica en la evapotranspiración, actor importante en la ecuación de balance hidrológico de una cuenca.

La variabilidad de los valores de precipitación, con sus extremos considerablemente influenciados por la temperatura (Liu, Fu, Shiu, Chen, & Wu, 2009), influye en diversas actividades humanas relacionadas con el manejo de recursos hídricos, operación de labores agrícolas, abastecimiento de agua a la población y prevención de inundaciones y sequías (Ablan, Rigoberto, Vargas, & Acevedo, 2008). Su participación en el ciclo hidrológico hace parte del objeto de estudio de ciertas áreas de la ingeniería, que buscan planear y estudiar la mejor distribución del recurso hídrico, para el desarrollo de proyectos que impliquen su utilización o participación.

¹ Los modelos hidrológicos pueden ser físicos o abstractos. Los primeros se refieren a modelos tangibles a escala reducida y los segundos a representaciones matemáticas (Chow, 1994).

4.3 Conceptos estadísticos básicos

La estadística, al ser un conjunto de procedimientos sistematizados para describir numéricamente los fenómenos (cuantificables) y descubrir las leyes que los regulan (Martínez, 2006), tiene como algunas de sus finalidades:

- Determinar lo normal o típico de un fenómeno
- Determinar los cambios que presentan los fenómenos
- Relacionar dos o más fenómenos
- Hacer estimaciones sobre el comportamiento futuro

Con el propósito de obtener valores que permitan que se cumpla con el primero de los fines anteriormente mencionados, se usan en estadística medidas denominadas estadígrafos, en el caso de las muestras. Estas medidas son aplicables a distribuciones unidimensionales, bidimensionales o pluridimensionales y se consideran de cuatro clases (Martínez, 2006):

- Estadígrafos de posición
- Estadígrafos de dispersión
- Estadígrafos de deformación o asimetría
- Estadígrafos de apuntamiento

Por relevancia y pertinencia al objeto que persigue el presente documento, serán dadas a continuación algunas consideraciones acerca de los estadígrafos de posición y de dispersión, estas son extraídas casi en su totalidad de Martínez (2006).

4.3.1 Estadígrafos de posición

Los Estadígrafos de posición, también conocidos como medidas de tendencia central, son conformados por la media aritmética, la mediana, la moda, la media geométrica, armónica, cuadrática y cúbica, el centro recorrido y los cuantiles. Dentro de estos, la media aritmética (\bar{X}) es el estadígrafo más común, conocido y de más de fácil cálculo, con el inconveniente de mostrarse muy sensible a los valores extremos de la muestra.

Ventajas y desventajas de la media aritmética

Dentro de las ventajas más destacables de la media aritmética se encuentra en primer lugar su facilidad de interpretación y masivo uso; su cálculo es igualmente sencillo aun cuando, por las características de la muestra, no es posible calcular otro tipo de medidas de tendencia central. La media aritmética presenta mucha estabilidad en el muestreo y es altamente sensible a cambios en los datos de la distribución. Cabe anotar además, que es una medida muy adaptable y útil en caso de que se presente la necesidad de realizar cálculos matemáticos posteriores con la muestra.

En cuanto a desventajas, como se mencionó anteriormente, presenta alta sensibilidad a valores extremos, conllevando a que la inclusión de datos de ese tipo ocasione que la media aritmética no sea un valor típico de la muestra. Por otro lado, en el caso de tratar con una distribución asimétrica, al punto de presentar grandes diferencias entre la media, la mediana y la moda, se encuentra que la media aritmética no es exclusivamente el valor representativo de la serie. Además, en caso

de que la distribución de los datos presente forma parabólica (forma de U), este estadígrafo está asociado a los valores menos comunes y por lo tanto da una idea irreal de la distribución.

Se darán ahora, una serie de consideraciones acerca de dos estadígrafos de posición: la mediana y los cuantiles.

La mediana hace referencia a el valor que no supera a, ni es superado por más de la mitad de las observaciones. Presenta como ventaja el hecho de que los valores extremos no influyen en su magnitud. Como desventajas: no se adapta a cálculo matemáticos posteriores y no es sensible a cambios en los elementos que conforman la distribución.

La obtención de los cuantiles se refiere en términos básicos y generales, a la organización y posterior división de los datos de la muestra en cuatro, diez o cien partes, recibiendo en cada caso el nombre de cuartiles, deciles y percentiles. El primer cuartil se define como el valor de la variable que es mayor al 25% de los datos y es superado por el 75%. El segundo cuartil, supera al 50% de las observaciones y superado por el 50%, este valor es el mismo conocido como mediana. Los demás cuartiles siguen ese orden de cálculo. Por su parte, los deciles y percentiles se calculan dividiendo la muestra en mayor número de partes; el quinto decil y el 50 percentil corresponden a la mediana.

4.3.2 Estadígrafos de dispersión

Estos estadígrafos determinan de qué forma se agrupan o dispersan los datos alrededor de un valor promedio, dan una idea de cómo las cifras individuales difieren de los valores representativos arrojados por los estadígrafos de posición. Dentro de los estadígrafos de posición más comunes se encuentran: varianza, desviación típica o estándar, desviación media, coeficiente de variación, desviación mediana, puntaje típico, desviación cuartil, recorrido u oscilación y coeficiente de desviación media.

4.3.2.1 Varianza y desviación estándar

La varianza es una de las medidas de dispersión más conocidas y utilizadas. Es definida como la media aritmética de los cuadrados de las desviaciones respecto a su media, y para datos no agrupados su cálculo se efectúa así:

$$S^2 = \frac{\sum(X_i - \bar{X})^2}{n} \quad (\text{II})$$

Siendo S^2 la desviación típica, \bar{X} la media aritmética, X_i cada uno de los datos de la serie y n el número total de observaciones.

La raíz cuadrada de la varianza es conocida como Desviación Típica (S) o Desviación Estándar, esta es usada muchas veces en vez de la varianza por expresarse en las mismas unidades de la variable.

El coeficiente de variación $C.V.$ surge de la necesidad de comparar la variabilidad de dos series de datos, expresadas en unidades diferentes. Este valor permite expresar la desviación estándar como porcentaje de la media aritmética. Se expresa por la siguiente fórmula:

$$C.V. = \frac{S}{\bar{X}} \quad (\text{III})$$

Siendo S la desviación típica y \bar{X} la media aritmética.

4.4 Elasticidad climática

La elasticidad climática es considerada, en términos generales, como una forma sencilla de abordar la relación existente entre los caudales y las variables del clima en una cuenca. Es un concepto económico traído de la física a finales del siglo XIX (Marshall, 2006) y utilizado generalmente en economía para describir el comportamiento de los compradores frente a cambios en las condiciones del mercado (Mankiw & Rabasco, 2007). Este concepto cuantifica la variación relativa de una variable dependiente debido al cambio relativo de otra variable, que se supone es independiente (Ferguson, 1971).

La elasticidad climática de caudales fue definida como el cambio proporcional en el caudal medio anual dividido sobre el cambio proporcional en la precipitación media anual. La elasticidad es por lo tanto una estimación simple de la sensibilidad de los caudales a largo plazo ante cambios de la precipitación a largo plazo (Chiew, 2006). Sankarasubramanian et al. (2001) definió la elasticidad climática como:

$$\varepsilon(P, Q) = \frac{dQ/Q}{dP/P} = \frac{dQ}{dP} \frac{P}{Q} \quad (\text{IV})$$

Pero una de las dificultades para la estimación de la elasticidad es que a menudo se estimaba a partir de un modelo, y, por supuesto, la distribución del modelo hidrológico es siempre desconocido (Sankarasubramanian et al., 2001). Entonces Sankarasubramanian et al. (2001) introduce un estimador no paramétrico de la elasticidad de los caudales que no depende de la distribución del modelo hidrológico:

$$e_p = \text{mediana} \left(\frac{Q_t - \bar{Q}}{P_t - \bar{P}} \frac{\bar{P}}{\bar{Q}} \right) \quad (\text{V})$$

Luego Fu et al. (2007) amplía el concepto de elasticidad climática cuyo único parámetro es la precipitación y define la elasticidad de caudales como el cambio en la escorrentía en función del cambio de dos variables climáticas como lo son la precipitación y temperatura.

La relación escorrentía-precipitación-temperatura convertida en elasticidad climática de los caudales, es representada mediante la siguiente ecuación:

$$e_{P,\delta T} = \left(\frac{Q_{P,\delta T} - \bar{Q}}{P_{P,\delta T} - \bar{P}} \frac{\bar{P}}{\bar{Q}} \right) \quad (\text{VI})$$

Donde $\delta T = (T - \bar{T})$ es la temperatura de salida.

Este índice de la elasticidad climática del caudal como una función de la precipitación y la temperatura se puede utilizar para evaluar los efectos climáticos de los cambios de precipitación y de temperatura en los regímenes hidrológicos (variaciones en el caudal) para las cuencas en estudio. Así, para una precipitación y temperatura dadas en un escenario de cambio, este índice puede predecir el caudal anual.

4.5 Cambio Climático

En el Cuarto Informe de Evaluación del Intergovernmental Panel Climate Change (2007) se afirma que “el calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencian ya los aumentos

observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar”, con aumentos catastróficos de temperatura por lo menos en 2050.

4.5.1 Cambio climático y variabilidad climática

El cambio climático es definido por el IPCC (2007) como una variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente decenios o períodos más largos. El cambio climático puede deberse a procesos internos naturales, a forzamientos externos o a cambios antropogénicos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso de la tierra.

La variabilidad climática por su parte se refiere a variaciones en las condiciones climáticas medias y otras estadísticas del clima (como las desviaciones típicas, los fenómenos extremos, etc.) en todas las escalas temporales y espaciales que se extienden más allá de la escala de un fenómeno meteorológico en particular. La variabilidad puede deberse a procesos naturales internos que ocurren dentro del sistema climático (variabilidad interna), o a variaciones en el forzamiento externo natural o antropogénico (variabilidad externa).

4.5.2 Escenarios de cambio climático

Los escenarios de cambio climático son representaciones alternativas de lo que podría suceder en el futuro bajo unas concentraciones determinadas de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Los gases de efecto invernadero responden a sistemas dinámicos muy complejos que son determinados por factores como el crecimiento demográfico, el desarrollo socio-económico y el cambio tecnológico (IPCC, 2000), los principales gases producto de las actividades humanas son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), hexafluoruro de azufre (SF₆), hidroclorofluorocarbonos (HCFC), entre otros.

Los escenarios propuestos por el IPCC en su tercer informe especial no tienen asignadas probabilidades de ocurrencia y son derivados de cuatro líneas evolutivas cualitativas que proporcionan cuatro familias de escenarios, los cuales a su vez se derivan en seis grupos de escenarios como lo indica la Figura 3.

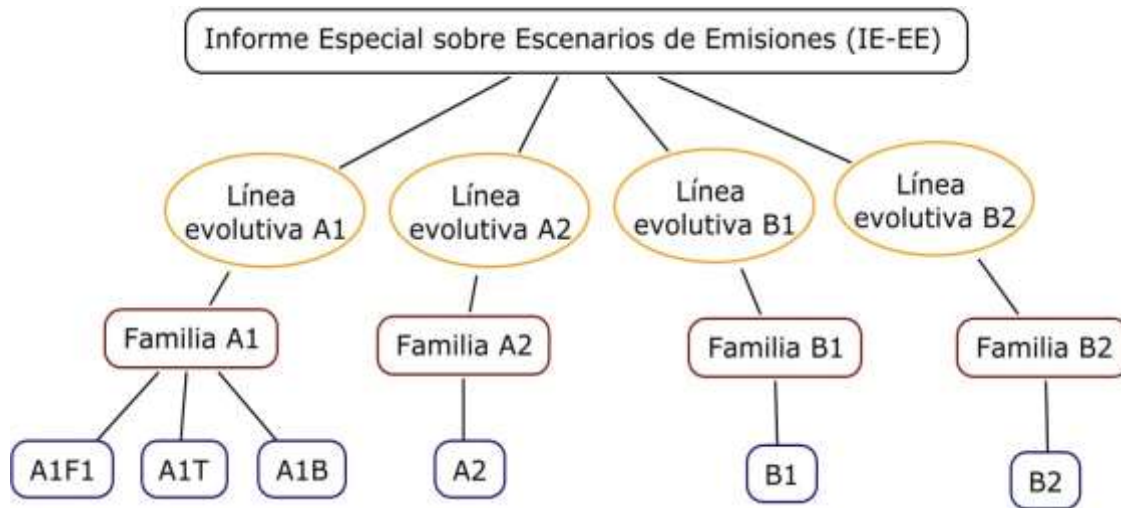


Figura 3. Escenarios de emisiones. Adaptado de IPCC (2000)

Cada línea evolutiva representa un desarrollo demográfico, social, económico, tecnológico y ambiental distinto, las “familias” son constituidas por escenarios que basados en la misma línea evolutiva y los escenarios, por su parte, son interpretaciones cuantitativas específicas de una determinada interpretación cualitativa de una línea evolutiva.

4.6 Conceptos estadísticos para estimación de cambio y bondad de ajuste

4.6.1 Distribución Normal

Según Walpole, Myers, & Myers (1999), la distribución normal es la distribución continua de probabilidad más importante en todo campo de la estadística.

En 1733, el francés Abraham de Moivre desarrolló la ecuación matemática de la curva normal y proporcionó una base sobre la cual se fundamenta gran parte de la teoría de la estadística inductiva. Posteriormente, Carl Friedrich Gauss (1777-1855) elaboró desarrollos más profundos y formuló la ecuación de la curva; de ahí que también se la conozca, más comúnmente, como la “campana de Gauss”. La distribución de una variable normal está completamente determinada por dos parámetros, su media y su desviación estándar, denotadas generalmente por μ y σ . Con esta notación, la densidad de la normal viene dada por la ecuación:

$$n(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)^2\right); -\infty < x < \infty \quad \text{(VII)}$$

Puesto que la curva alcanza su mayor altura en torno a la media, mientras que sus “ramas” se extienden asintóticamente hacia los ejes, cuando una variable siga una distribución normal, será mucho más probable observar un dato cercano al valor medio que uno que se encuentre muy alejado de éste.

A partir de cualquier variable X que siga una distribución, se puede obtener otra característica Z con una distribución normal estándar, sin más que efectuar la transformación:

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad \text{(VIII)}$$

4.6.2 Prueba de Hipótesis sobre dos muestras

Como dice Walpole et al. (1999), se extraen dos muestras aleatorias independientes de tamaño n_1 y n_2 , respectivamente, de dos poblaciones con medias μ_1 y μ_2 y varianzas σ_1^2 y σ_2^2 . Se sabe que la variable aleatoria

$$Z = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\sigma_1^2/n_1 + \sigma_2^2/n_2}} \quad \text{(IX)}$$

Tiene una distribución normal estándar. Suponiendo aquí que n_1 y n_2 son suficientemente grandes por lo que se aplica el teorema del límite central.

La hipótesis bilateral sobre dos medias se puede escribir con bastante generalidad como

$$H_0 = \mu_1 - \mu_2 = d_0 \quad \text{(X)}$$

La alternativa puede ser bilateral o unilateral. La distribución que se utiliza es la distribución de la estadística de prueba bajo H_0 . Los valores x_1 y x_2 se calculan y para σ_1 y σ_2 conocidas, la estadística de prueba está dada por

$$z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - d_0}{\sqrt{\sigma_1^2/n_1 + \sigma_2^2/n_2}} \quad \text{(XI)}$$

Con una región crítica de dos colas en el caso de una alternativa bilateral. Es decir, rechazar H_0 a favor de $H_1 = \mu_1 - \mu_2 \neq d_0$ si $z > z_{\alpha/2}$ o $z < -z_{\alpha/2}$. Las regiones críticas de cola se utilizan en el caso de alternativas unilaterales.

4.6.3 Intervalos de Confianza

Para evaluar el nivel de confianza de los datos de la grilla, se elaboran intervalos de confianza del ciclo anual de las estaciones observadas y verificar si se encuentran dentro de este, si se encuentran algunos dentro algunos meses o si definitivamente se encuentran fuera del rango de valores.

La muestra se distribuye según una distribución normal estándar (Walpole et al., 1999):

$$z = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \quad \text{(XII)}$$

Por tanto el intervalo de confianza tiene la siguiente forma, donde $z_{\alpha/2}$ es el valor de una distribución Normal estándar que deja a su derecha una probabilidad de $\alpha/2$:

$$\bar{x} - z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{x} + z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{(XIII)}$$

4.7 Conceptos para Validación de la Base de Datos

4.7.1 Prueba de Kolmogórov-Smirnov

La idea consiste en comparar las frecuencias acumuladas teóricas $F_n(x)$ contra las frecuencias acumuladas observadas $S_n(x)$, sin agrupar los datos; es decir, para cada uno de los datos de la muestra se calculan ambos valores, y se restan uno del otro. La más grande (en valor absoluto) de estas diferencias es el valor de la prueba (Alvarado & Obagi, 2008).

El estadístico de prueba es:

$$D_n = \text{máx}\{S_n(x) - F_n(x)\} \quad (\text{XIV})$$

Como expresión matemática, la estadística D_n calculada para todo x , se distribuye de acuerdo con la función definida por Kolmogorov-Smirnov.

Si D arroja un valor p mayor al nivel de significancia 0.05, se aceptará la hipótesis.

4.7.2 Probabilidad empírica de no excedencia.

Para calcular probabilidades empíricas de no excedencia se utilizan “fórmulas de posición de ploteo” (probability plotting position), las cuales son usadas para graficar series anuales y estimar la probabilidad que tiene la variable de superar cada valor (Shabri, 2002).

La ecuación general para dichas fórmulas de posición de ploteo, es descrita por Shabri (2002) como:

$$P_i = \frac{i - a}{n + a - 2a} \quad (\text{XV})$$

Dónde:

P = Probabilidad empírica de no excedencia

i = Orden del dato, ordenados ascendentemente

n = Tamaño de la muestra

a = Parámetro de posición de ploteo que depende de la distribución a la que se va a ajustar

Dichas fórmulas empíricas de cálculo de probabilidades de no excedencia han sido estudiadas por años y en la literatura se pueden encontrar para diversas distribuciones como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1. Fórmulas para el cálculo de probabilidades empíricas de no excedencia. Tomado de Shabri (2002).

Proponent	Formula	a	Parent Distribution
Weibull (1939)	$\frac{i}{n+1}$	0	All distributions
Beard (1943)	$\frac{i-0.3175}{n+0.365}$	0.3175	All distributions
APL	$\frac{i-0.35}{n}$	-0.35	Used with Probability Weighted Moments Method (PWM)
Blom (1958)	$\frac{i-3/8}{n+1/4}$	0.375	Normal distributions
Cunnane (1977)	$\frac{i-0.40}{n+0.2}$	0.40	GEV and PIII distributions
Gringorten (1963)	$\frac{i-0.44}{n+0.12}$	0.44	Exponential, EV1 and GEV distributions
Hazen (1914)	$\frac{i-0.5}{n}$	0.50	Extreme Value distributions
Nguyen <i>et.al</i> (1989)	$\frac{i-0.42}{n+0.3\gamma+0.05}$		PIII distribution

4.8 Modelos de elevación digital

Según Durán, Pardo-Igúzquiza, & Robledo (2012) los Modelos Digitales de Terreno (MDTs) se denominan a la representación digital de la topografía de una porción de la superficie terrestre, especialmente indicados para su procesamiento numérico con amplias aplicaciones en ciencias de la tierra e ingeniería.

Para llegar a la elaboración de los modelos digitales es necesario, efectuar un proceso de codificación de la información, que permite una representación virtual en forma de cifras. Las relaciones espaciales o las características que se desean representar se traducen a diferentes tipos de estructuras numéricas (vectores, matrices, conjuntos, etc.) o a expresiones matemáticas que expresan relaciones topológicas y funcionales (Felicísimo, 1999).

4.9 Sistema de coordenadas usado en Colombia

El acelerado desarrollo alcanzado por la tecnología permite la administración de extensos grupos de datos, que para ser utilizados requieren de su ubicación espacial. Esta última es dada por la localización geográfica, la cual es expresada mediante coordenadas geográficas o planas (IGAC, 2004b), que siguen un sistema de referencia determinado. Un sistema de referencia, al ser una concepción o modelo, debe ser materializado mediante puntos reales que permitan su control y aplicación práctica. Estos puntos, de alta precisión (fiduciaros), en conjunto son denominados como marco de referencia. El sistema de referencia y el marco de referencia definen una plataforma de georreferenciación (IGAC, 2004a), la cual es la que soporta la definición espacial de los datos.

El origen de coordenadas del sistema de referencia puede coincidir con el centro de masas terrestre. En este caso se conoce como Sistema Geocéntrico de Referencia, en caso contrario como Sistema Geodésico Local. Cuando la ubicación es expresada en coordenadas geográficas (latitud, longitud), se requiere de la utilización de un elipsoide cuyo centro coincida con el origen del sistema de referencia; su posición asociada al sistema, es conocida como Dátum Geodésico, el cual puede ser caracterizado como Geocéntrico o Local (IGAC, 2004a).

La tecnología, antes de la era espacial, no permitía la utilización de un Sistema Geocéntrico de coordenadas, por tal razón se dio el uso de diversos sistemas de coordenadas locales, asociados a diversos elipsoides que se ajustaban de mejor forma a las características particulares de cada región, conocidos como Dátum Horizontales. Un ejemplo de lo anterior es el Dátum Bogotá, utilizado oficialmente como sistema coordinado en Colombia antes del año 2004. La coordenada correspondiente a la altura era estimada a partir del nivel medio del mar (IGAC, 2004a).

Con el fin de unificar la definición de coordenadas en todo el planeta, el Departamento de Defensa de Estados Unidos, implementó una serie de elipsoides o WGS (World Geodetic System), dentro de los que se encuentra el WGS84, geocéntrico y con características geométricas y físicas definidas. Actualmente, la referencia geodésica global es definida e impulsada por organizaciones multilaterales con presencia en todo el mundo. El IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service), a través de cooperación internacional, es el encargado de proporcionar los sistemas de referencia, convencionales y de carácter oficial, como el ITRS (International Terrestrial Reference System) cuyo marco de referencia es el conocido como ITRF (International Terrestrial Reference Frame). Este último, cuenta con coordenadas cartesianas geocéntricas y velocidades (el movimiento de las placas tectónicas altera las coordenadas), medidas por medio de estaciones ubicadas en todo el planeta; la dinámica de la tierra deriva en la vigencia de la posición de dichas estaciones. El sistema de referencia del ITRF está asociado a las mediciones realizadas por los satélites con tecnología GPS (Global Positioning System) (IGAC, 2004a).

Sin embargo, la cobertura del ITRF no brinda la densidad de información suficiente para aplicaciones prácticas en todas las partes del planeta, siendo necesaria la definición de redes de estaciones GPS continentales y nacionales, ligadas al ITRF. Así, es definida en 1997 para América del Sur, la red SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur), ampliada y redefinida en el 2002 como Sistema de Referencia Geocéntrico para Las Américas. A su vez, SIRGAS debe ser densificada a niveles nacionales.

En Colombia, la densificación de SIRGAS ha sido realizada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, entidad gubernamental encargada de determinar los sistemas de referencia geodésicos nacionales (IGAC, 2004b), a través del proyecto MAGNA (Marco Geocéntrico Nacional de Referencia) que al estar referido a SIRGAS, es comúnmente conocido como MAGNA-SIRGAS. Este marco cuenta con 60 estaciones GPS en todo el país.

4.10 Base de datos Delaware y otras

La base de datos de la Universidad de Delaware: Aire, Temperatura & Precipitación es una recopilación de cifras sobre la climatología mundial en superficie del año 1900 al 2010, con datos de precipitación y temperatura de frecuencia mensual, y completa cobertura espacial sobre las superficies continentales con una resolución de 0.5°. Para su construcción, Matsuura & Willmott (2012) de la Universidad de Delaware, emplearon principalmente los registros de un amplio número de estaciones de medición en tierra, pertenecientes en su mayoría a la GHCN2 (Global Historical Climate Network) y a la ICOADS (International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set), e interpolaciones en el espacio para conseguir la mencionada resolución.

La temperatura del aire en superficie es mostrada por la base de datos en °C y la precipitación terrestre es dada en mm. Los autores llevaron a cabo un análisis de consistencia de los datos, realizaron posteriormente interpolación espacial, que luego sería validada, usando una combinación de diferentes métodos que emplearon modelos de elevación digital e interpolación climatológica, entre otros; dando como resultado una grilla de promedios mensuales de temperatura y precipitación, de 0.5° de latitud por 0.5° de longitud, para todo el planeta.

4.11 Modelos de Circulación Globales

Los modelos numéricos globales permiten simular procesos físicos en la atmósfera, el océano, la criósfera y la superficie terrestre utilizando una grilla tridimensional sobre el globo terráqueo con resolución horizontal típica entre 250 y 600 km, de 10 a 20 capas verticales en la atmósfera y algunas veces con hasta 20 capas en los océanos, permitiendo así, estimar el comportamiento de las variables climáticas para los distintos escenarios de concentraciones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2013).

Los modelos climáticos se derivan de las leyes fundamentales de la física, las cuales están sujetas a aproximaciones físicas apropiadas para sistemas climáticos a grandes escalas, y luego aproximarse aún más a través de discretización matemática.

Tabla 2. Modelos climáticos globales descritos en el cuarto informe de evaluación del IPCC (2007)

Modelo, año	Centro, país	Resolución Atmósfera	Resolución Océano
BCC-CM1, 2005	Centro Climático de Beijing, China	1.9° x 1.9°, L16	1.9° x 1.9°, L30
BCCR-BCM2, 2005	Centro de investigaciones climáticas de Bjerknes, Noruega	1.9° x 1.9°, L31	1.9° x 1.9°, L35
CCSM3, 2005	Centro Nacional para investigaciones atmosféricas, EEUU	1.4° x 1.4°, L26	0.3°-1° x 1°, L40
CGCM3.1 (T47), 2005	Centro de análisis y modelamiento climático Canadiense, Canadá	~2.8° x 2.8°, L31	1.9° x 1.9°, L29
CGCM3.1 (T63), 2006		~1.9° x 1.9°, L31	0.9° x 1.4°, L29
CNRM-CM3, 2004	Centro nacional de investigaciones meteorológicas, Francia	~1.9° x 1.9°, L45	0.5°-2° x 2°, L31
CSIRO-MK3.0, 2001	CSIRO, Australia	~1.9° x 1.9°, L18	0.8° x 1.9°, L31
ECHAM5(MPI-OM), 2005	Instituto de meteorología Max Planck, Alemania	~1.9° x 1.9°, L31	1.5° x 1.5°, L40
ECHOG-G, 1999	University of Bonn/KMA, Alemania/Korea	~3.9° x 3.9°, L19	0.5°-2.8° x 2.8°, L20
FGOALS-g1.0, 2004	LASG/Instituto de física atmosférica, China	1.0° x 1.0°, L16	1.0° x 1.0°, L16
GFDL-CM2.0, 2005	Departamento de comercio/NOAA/GFDL, EEUU	0.3°-1.0° x 1.0°	0.3°-1.0° x 1.0°

Modelo, año	Centro, país	Resolución Atmósfera	Resolución Océano
GFDL-CM2.1, 2005		0.3°-1.0° x 1.0°	0.3°-1.0° x 1.0°
GISS-AOM, 2004	NASA/Instituto de estudios espaciales (GISS), EEUU	3°x 4°, L16	3° x 4°, L16
GISS-EH, 2004		2°x 2°, L16	2° x 2°, L16
GISS-ER, 2004		4°x 5°, L13	4° x 5°, L13
INM-CM3.0, 2004	Instituto de matemáticas numéricas, Rusia	2°x 2.5°, L33	2° x 2.5°, L33
IPSL-CM4, 2005	Instituto Pierre Simon Laplace, Francia	0.5°-1.4° x 1.4°, L43	2° x 2°, L31
MIROC3.2 (hires), 2004	Universidad de Tokyo/Instituto Nacional de estudios ambientales/JAMSTEC, Japón	0.2°x 0.3°, L47	0.2° x 0.3°, L47
MIROC3.2 (medres), 2005		0.5°-1.4° x 1.4°, L43	0.5°-1.4° x 1.4°, L43
MRI-CGCM2.3.2, 2003	Instituto de investigación meteorológica, Japón	0.5°-2.0° x 2.5°, L23	0.5°-2.0° x 2.5°, L23
PCM, 1998	Centro Nacional de investigación atmosférica, EEUU	0.5°-0.7° x 1.1°, L40	0.5°-0.7° x 1.1°, L40
UKMO-HadCM3, 1997	Centro de predicción climática e investigación	1.25° x 1.25°, L20	1.25° x 1.25°, L20
UKMO-HadCM1, 2004	Hadley/Departamento meteorológico, Reino Unido	0.3°-1.0° x 1.0°, L40	0.3°-1.0° x 1.0°, L40

5 INFORMACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

Colombia es conocida por ser una potencia hídrica. El país cuenta con alrededor de 2.112 km³ de volumen de escorrentía al año. Su zonificación hidrográfica, establecida por la Resolución N° 337 de 1978 del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), está conformada por tres niveles:

- Área hidrográfica: Territorio natural que agrupa varios sistemas de drenaje, donde las aguas fluyen hacia el mar, al océano, a un lago o a un río principal. Son identificadas cinco áreas de este tipo: Caribe, Magdalena-Cauca, Orinoco, Amazonas y Pacífico.
- Zona hidrográfica: Región natural que agrupa varias cuencas en un gran sistema de drenaje y sus aguas tributan a través de un afluente principal hacia un Área hidrográfica. Son contabilizadas en el país unas 41 zonas de este tipo.
- Subzona hidrográfica: Subsistema hídrico con características de relieve y drenaje homogéneas, integrado por cuencas de las partes altas, medias o bajas de una Zona hidrográfica. Son identificadas en el país alrededor de 309 subzonas.

El área hidrográfica a la cual pertenece la cuenca del río Magdalena concentra la mayor densidad de población del país y es lugar de operación de las más grandes zonas industriales. Únicamente la cuenca del Río Magdalena equivale al 24% de la superficie del territorio nacional, es lugar de hábitat del 80% de la población y en ella se genera el 85% del PIB (Producto Interno Bruto) del país (Bernal, 2013).

La cuenca del Río Magdalena es el sitio del estudio de este proyecto por la relevancia e impacto que pueden alcanzar los estudios e investigaciones que sobre ella se realicen. Serán realizados a la vez cálculos con datos pertenecientes a todo el territorio nacional, pero con ánimo exclusivo de poner en contexto los estudios realizados sobre la cuenca.

5.1 Características de la cuenca

Los puntos extremos de la cuenca del Río Magdalena se encuentran localizados a los 1° 33' y 11° 6' de latitud Norte y a los 72° 22' y los 76° 58' de longitud Oeste, en sentidos norte-sur y oriente-occidente, respectivamente (Cormagdalena, 2007). El área de la cuenca es de unos 257.440 km²

El río que da nombre a la cuenca del Río Magdalena, tiene su nacimiento a 3.685 m.s.n.m. y se encuentra localizado a 01° 55' 40" de latitud norte y 76° 35' 08" de longitud oeste, en el llamado Páramo de las Papas. Su desembocadura se encuentra ubicada en el sitio denominado Bocas de Ceniza, a los 11° 06' de latitud norte y 74° 51' de longitud oeste. La longitud del cauce es de unos 1.600 km, de los cuales 866 son navegables (Bernal, 2013).

5.1.1 Distribución de la precipitación en la cuenca

La zona de convergencia intertropical (ZCTI) es una franja de nubosidad y alta precipitación que rodea a la Tierra y que cambia de posición durante el año dividiendo la circulación atmosférica del planeta de los hemisferios norte y sur (Cormagdalena, 2007), la variabilidad en la hidroclimatología de Colombia a escala de tiempo anual se debe principalmente a la migración latitudinal de la ZCTI asociada a los vientos alisios del este (Poveda, 2004), que asegura la alta presencia de lluvias por las zonas en las que se encuentra.

Como resultado del doble paso del ZCTI por Colombia y, consecuentemente sobre la cuenca del río Magdalena, el ciclo anual de las precipitaciones dentro de esta se ve claramente marcado en dos

periodos lluviosos (abril-mayo y octubre-noviembre) y dos secos (diciembre-enero-febrero y junio-julio-agosto), es decir un ciclo anual bimodal (Poveda, 2004). Otros sectores de la cuenca, como la parte alta cerca al nacimiento del río, se presentan distribuciones unimodales de la precipitación debido a condiciones locales (Cormagdalena, 2007).

5.1.2 Divisiones de la cuenca

La cuenca del río Magdalena se ha dividido en tres partes con características hidrológicas, climatológicas, topográficas, naturales y económicas distintas. Según Cormagdalena (2007) son definidas así:

Cuenca alta: abarca desde el nacimiento del río en la laguna de la Magdalena, ubicada en el páramo de las Papas en el macizo Colombiano a 3.685 msnm, hasta los rápidos de Honda, situados a 229 msnm, es decir que en dicho trayecto desciende 3.456 m. Este trecho tiene una longitud de 565 km. En los tramos iniciales el río se caracteriza por ser muy pendiente y turbulento. En términos generales, ésta es la parte más seca de la cuenca.

Cuenca media: empieza en Honda, en donde se reinicia la navegación interrumpida por los rápidos del mismo nombre. Durante mucho tiempo éste fue el más importante puerto y punto de trasbordo entre Bogotá y la costa caribe. Este tramo se extiende hasta El Banco, en la desembocadura del río Cesar, situado a una altura de 33 msnm. En términos generales, este sector de la cuenca es el más húmedo.

Cuenca baja: se extiende desde El Banco hasta la desembocadura del río Magdalena en Bocas de Ceniza y en la bahía de Cartagena a través del canal del Dique. En este sector de la cuenca los regímenes de precipitación y humedad vuelven a disminuir. Por ello aquí predominan las condiciones del bosque seco tropical, las llanuras herbáceas y la vegetación acuática.

5.2 Estudios sobre variabilidad climática y cambio climático de la cuenca

En el caso de Colombia un número importante de grupos de investigación han desarrollado estudios sobre cambio climático e Hidro-climatología en el país, la mayoría de ellos a partir de los 90's, según lo registrado por la Plataforma ScienTI de Colciencias. Estos grupos pertenecen a áreas del conocimiento de Geociencias e Ingeniería Sanitaria, principalmente, y reúnen dentro de sus líneas de investigación temáticas como el mencionado cambio climático, la meteorología y la hidrología. Uno de los grupos principales es avalado por el Instituto De Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales IDEAM, los demás por universidades como la Universidad Nacional de Colombia (sedes Bogotá y Medellín), Universidad del Valle y la Escuela De Ingeniería De Antioquia - E.I.A, entre muchas otras.

Los estudios más relevantes sobre cambio climático en Colombia se han centrado principalmente en la Universidad Nacional de Colombia, con el Centro de Investigaciones del Clima de Colombia – CICLICO. Poveda (1997), estudia la dinámica del comportamiento de la precipitación y los caudales del río Magdalena, empleando series temporales de temperatura y de caudales medios mensuales, pretendiendo con esto examinar el posible comportamiento caótico de la hidro-climatología colombiana. Dentro los trabajos que han tratado específicamente con el comportamiento de la precipitación en el país, se encuentra el desarrollo de mapas de la distribución espacial de la precipitación en Colombia (Mejía et al., 1999), y la cuantificación de los posibles efectos de cambio climático sobre las tormentas más intensas, empleando los resultados de Modelos de Circulación General (General Circulation Models, GCM) para la estimación de curvas IDF, que permitieron prever un aumento significativo en la frecuencia e intensidad de las precipitaciones más fuertes (Acevedo Aristizábal & Poveda Jaramillo, 2010). Otras publicaciones tratan la variabilidad de la hidro-climatología colombiana en diferentes escalas temporales (Poveda, 2004), además de algunos trabajos que persiguen el uso de sistemas de información

geográfica que realizan estimaciones hidrológicas a partir de mapas de variables climáticas y permiten la realización de análisis estadísticos (Vélez et al., 2002). Se destaca el trabajo realizado por Acevedo (2009), en donde usando dos escenarios de cambio climático, uno optimista y otro pesimista, calcula mediante un balance hidrológico descrito por Poveda, Vélez, & Mesa (2007) el caudal medio de la cuenca del río Magdalena para dos modelos de circulación globales del IPCC obteniendo un Q promedio de 5388 m³/s (escenario A2) y 5379 m³/s (escenario B1) para el modelo NCCCSM y de 5312 m³/s (escenario A2) y 6406 m³/s (escenario B1) para el MPH5, ambos para el periodo 2046-2065.

6 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

6.1 Validación de la base de datos de la universidad de Delaware

La información de las variables climatológicas en regiones como la Amazonía, y particularmente en Colombia se caracteriza por ser incompleta, fragmentada y desactualizada, lo cual constituye una de las principales limitantes para la realización de estudios climatológicos. En Colombia, donde la información de datos observados es insuficiente debido a que no se cuenta con una considerable cantidad de estaciones de medición, y por consiguiente se encuentran muy zonas amplias con muy poca cobertura de mediciones en tierra, es necesario recurrir a otras bases de datos para subsanar esos vacíos.

Para efectos de este trabajo se define la región del norte de Suramérica como la región encerrada entre las latitudes 20°N y 15°S y las longitudes -85°W y -35°W. Hacen parte del norte de Suramérica entonces: Colombia, Venezuela, Perú, Ecuador, Bolivia y gran parte de Brasil. En Anexo No. 3 y Anexo No. 4, se muestran los mapas promedios de precipitación y temperatura promedio mensual para el norte de Sudamérica, observando que la dinámica en Colombia no es ajena a la de esa región.

La base de datos utilizada en este estudio es la de la Universidad de Delaware: Aire, Temperatura & Precipitación (UD-ATP), cuya información fue proporcionada a partir de la interpolación en el espacio de estaciones de medición en tierra pertenecientes mayoritariamente a la GHCN2 (Global Historical Climate Network) y a la ICOADS (International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set). Entonces se pretende verificar los datos suministrados por la base de datos para la realización de este estudio.

La base de datos consta de valores de precipitación y temperatura con frecuencia temporal mensual entre 1900-2010 y con resolución espacial de 0,5° (aproximadamente 50 km).

Se descargó la información de Precipitación media mensual y temperatura media mensual para todo el globo terráqueo de la Base de datos UD-ATP. Para precipitación, contenida en el archivo "precip.mon.total.v301.nc", la cual tiene formato NetCDF. El formato NetCDF (formulario de datos comunes en red) es un conjunto de interfaces desarrollado por el Unidata Program Center en Colorado, Estados Unidos, como formato de archivo estándar de libre distribución destinado al almacenamiento de datos multidimensionales para que sea usado por lenguajes como C, Fortran, C++, Java, entre otros.

Para la manipulación o visualización de archivos NetCDF existen una gran variedad de softwares disponibles libremente como: ARGOS (Observatorio interactivo de gráficos en tres dimensiones), CDAT (Herramientas de análisis de datos climatológicos), FIMEX (Interpolación de archivos, manipulación y extracción), GrADS (Análisis de grillas y sistemas de visualización), Java interface, nccmp (Compara netCDF), NCbROWSE (Buscador de archivos netCDF), NCO (Operadores NetCDF), nctoolbox (Interfaz de modelo de datos comunes de MATLAB), entre muchos otros.

Una herramienta útil para manipular datos NetCDF es el operador ncks, el cual es una de las utilidades que ofrece el paquete NCO (Operadores NetCDF), que realiza operaciones tales como: extraer, cortar, pegar e imprimir datos.

Cómo la información del "precip.mon.total.v30.nc" es para todo el globo, es incapaz de ser manipulado por R. Como la parte del norte de Sudamérica es de interés para efectos de la validación, y el archivo se encuentra en formato NetCDF se procede a realizar el recorte con comandos Shell para la región.

El archivo netCDF recortado para el norte de Sudamérica se importó a GRASS mediante un programa hecho a la medida para realizar esta operación.

Podemos observar en Figura 4 la distribución de la precipitación mensual multianual en la región de la Amazonía para el periodo de 1900 a 2010, siendo el color rojo aquellas zonas donde las precipitaciones son bajas en comparación con aquellas de color azul oscuro en las cuales se presentaron las mayores precipitaciones durante esos años.

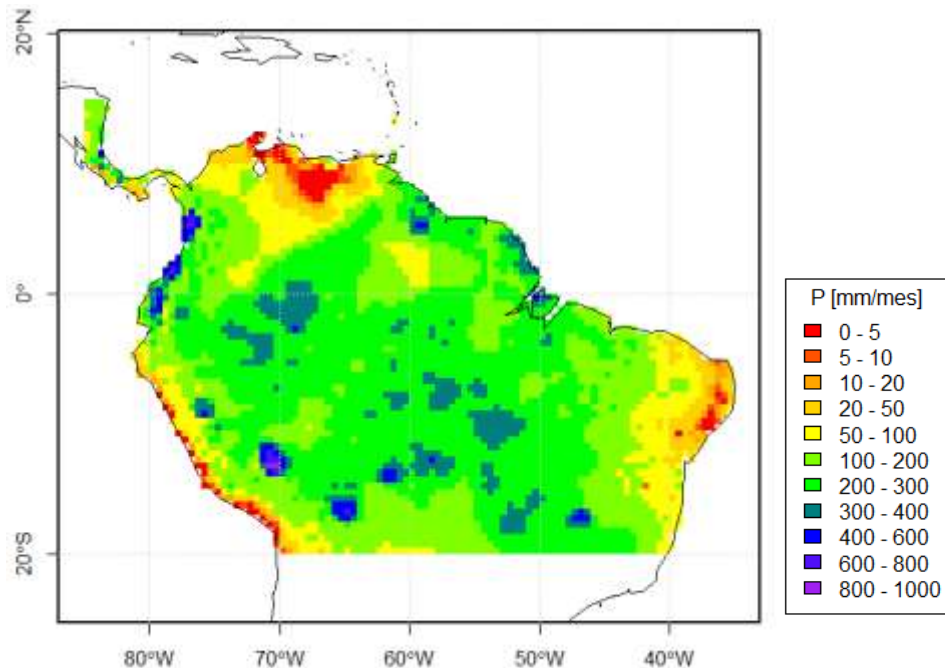


Figura 4. Distribución de la precipitación sobre la Amazonía para 1900-2010. Fuente: Elaboración propia

Los datos en tierra, los cuales son los que se compararán con los datos de la malla, se adquirieron de la página web Climate Explorer (van Oldenborgh, 2013). Esta es una página la cual recolecta de manera gratuita las precipitaciones registradas en todo el mundo. El propósito de esta página es compartir los datos de precipitación ya sea para realizar un estudio o una investigación. En la Figura 5 se muestra todas las estaciones que posee el Climate Explorer para su consulta en la región del norte de Sudamérica.

Como se puede ver en Figura 5, las estaciones tienen diferente cantidad de años de datos lo cual hace que no se utilicen todas las estaciones para realizar la validación de los datos. El criterio utilizado para determinar que estaciones se usarían fue que tuvieran más de 30 años de datos, además que sus series estén lo más completas posibles. Esto porque en muchos casos dicen que tienen más de 30 años de datos, pero en realidad tienen un vacío casi de diez años los cuales no funcionan para realizar el estudio. Una vez definido este criterio se procedió a adquirir la información de la página, utilizando la herramienta R. Para tener los datos de manera organizada se guardaron las estaciones de precipitación en píxel de 0,5 grados, es decir que todas las estaciones que se encontraran dentro de un mismo píxel se guardarían como un grupo, esto para luego poder compararlo con la malla la cual como se dijo tiene una resolución de 0,5 grados. Después de organizar esto se obtuvo un total de 461 píxeles con datos de estaciones en tierra para validar, que dependiendo del lugar podría tener 1 o más estaciones de precipitación.

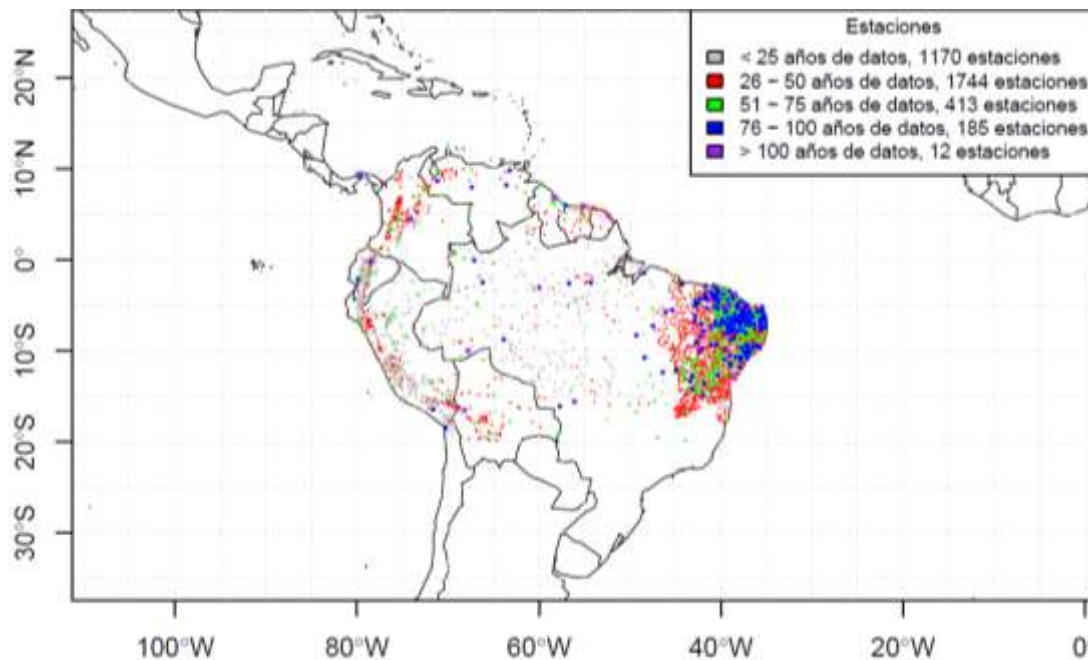


Figura 5. Estaciones de precipitación en tierra que posee Climate Explorer en la región del Amazonas. Fuente: Elaboración propia

Existen píxeles que solo cuentan con una estación, por eso se definió no utilizarlas porque para una distancia tan grande una estación no era representativa para todo el lugar. Una vez realizado esto se adquirieron los datos de la malla interpolada para cada píxel. Ya cuando se tenía en el píxel los datos de precipitación de las estaciones y los datos de la malla, se procedió a realizar el corte de las estaciones en tierra. El corte consistía en que las estaciones tuvieran el mismo rango de años y la misma cantidad de datos, como la malla es más fácil de manipular esta no tuvo que ser recortado o manipulada. Para temperatura, el criterio de selección fue menos riguroso, escogiéndose píxeles con solo una estación debido a la falta de información para esta variable en Climate explorer.

6.1.1 Metodología utilizada

Para verificar si una distribución es adecuada para describir un conjunto de datos, se utilizan pruebas estadísticas, llamadas pruebas de bondad de ajuste. Entre las más comunes se pueden encontrar (Razali & Wah, 2011): Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, prueba de Kolmogorov-Smirnov, criterio de Cramer-von Mises y la prueba de Anderson-Darling.

En el presente trabajo se utiliza la prueba de Kolmogorov-Smirnov ya que permite evaluar el ajuste de cualquier distribución a un conjunto de datos, y la cual consiste en evaluar la función de la distribución acumulada de referencia en comparación con la función de distribución acumulada empírica de los datos, o entre las distribuciones de probabilidad de dos conjuntos de datos, sin necesidad de suponer a priori distribuciones teóricas. En este caso se evalúa la bondad de las estimaciones entre la distribución de precipitación presentada por la base de datos, con la distribución de precipitación observada en las estaciones de medición en tierra, tomada como distribución de referencia.

Para realizar la prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov se requieren asignar probabilidades de no excedencia empíricas a los datos, ordenándolos de manera ascendente.

Para calcular dichas probabilidades se utilizan “fórmulas de posición de ploteo” (probability plotting position), las cuales son usadas para graficar series anuales y estimar la probabilidad que tiene la variable de superar cada valor (Shabri, 2002), como se explicó en 4.7.2.

Se calcula la probabilidad de excedencia por medio de la fórmula de Weibull, ya que puede emplearse para cualquier tipo de distribución. Como $a=0$, la fórmula queda entonces así:

$$P_i = \frac{i}{n + 1} \quad (\text{XVI})$$

Una vez obtenidas y recortadas para un periodo las series de precipitación mensuales y la serie de la base de datos correspondiente a cada píxel se procedió a realizar un código que llenara los datos vacíos que hubiese en cada una de las estaciones, por medio de las estaciones de apoyo como fue explicado. Para llenar los vacíos en temperatura se realiza otro código de auto-llenado de la estación ya que muchos pixeles contaban solo con una estación.

Luego de esto, se elabora un código que realice la prueba de bondad de ajuste entre los datos observados y los datos de la malla. El algoritmo utilizado para realizar la evaluación pixel por pixel sigue los siguientes pasos: se identifican las estaciones dentro del pixel, se agrupan entre ellas obteniéndose una “estación virtual” para ese pixel, a la cual se aplica la prueba Smirnov – Kolmogorov respecto del valor de la grilla.

Para observar ajuste de los datos en las diferentes estaciones del año, se realizó la prueba de ajuste para de los datos de precipitación para Invierno (Dic-Ene-Feb), Primavera (Mar-Abr-May), Verano (Jun-Jul-Ago) y Otoño (Sep-Oct-Nov).

La validación para precipitación se realiza para 137 pixeles distribuidos principalmente en Colombia y Brasil, contándose con un total de 511 estaciones en tierra obtenidas del Climate Explorer. Las estaciones ubicadas en Brasil son las que se encuentran en mayor cantidad y las que en general poseen mayor número de años y mejor calidad de los datos. Las estaciones dentro del territorio Colombiano se encuentran en mucho menor número que las de Brasil pero con suficiente cantidad de estaciones para realizar el análisis. Para la temperatura se realiza la validación para 23 pixeles.

6.1.2 Distribución de probabilidades

Se muestra a continuación las gráficas de distribución de probabilidades del ciclo anual, invierno, primavera, verano y otoño para el pixel con coordenadas 9.25, -75.25 dentro del territorio colombiano ubicado en el departamento de Sucre, donde se encuentran dos estaciones en tierra.

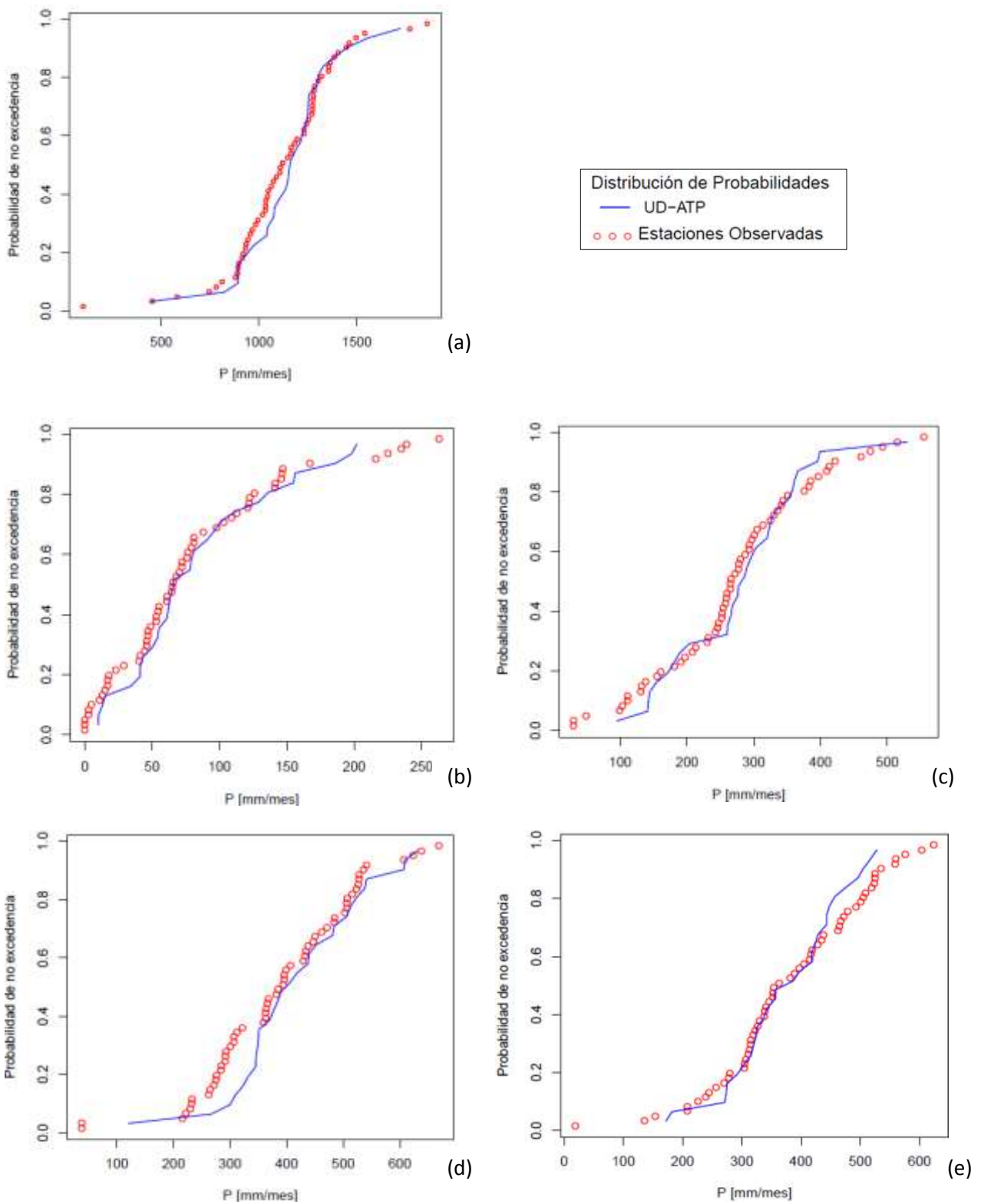


Figura 6. Distribución de probabilidades de excedencia para los datos de precipitación de UD-ATP (azul) y las estaciones en tierra (rojo) para el ciclo anual (7a), invierno (8b), primavera (9c), verano (10d), otoño (11e). Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6 se presenta la distribución de probabilidades de excedencia para los datos de precipitación para la grilla y las estaciones en tierra, donde visualmente todos los trimestres y el ciclo anual de la información de la base de datos se ajustan bien al de las estaciones en tierra. Se observa con poco margen que el trimestre en que mejor se ajustan los datos es el correspondiente a diciembre-enero-febrero (invierno).

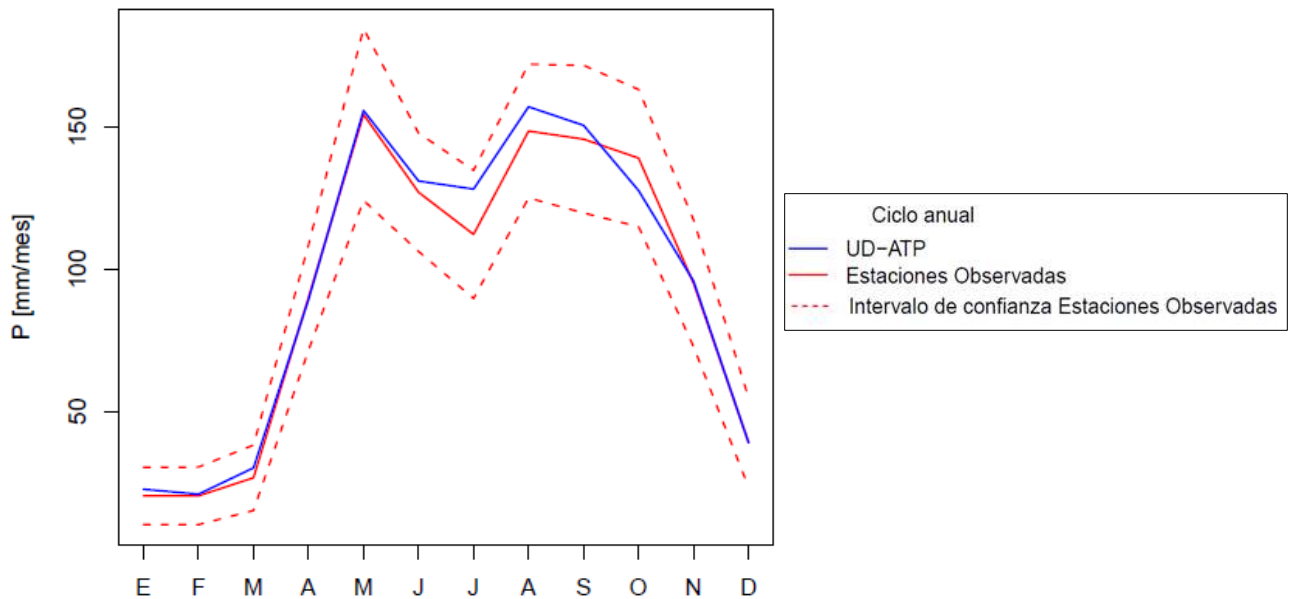


Figura 12. Distribución del ciclo anual de la precipitación para UD-ATP (azul) y las estaciones en tierra (rojo). El intervalo de confianza de las estaciones en tierra (línea punteada roja). Fuente: Elaboración propia

En la Figura 12 se puede ver el comportamiento del ciclo anual con dos picos en los periodos marzo-abril-mayo (primavera) y septiembre-octubre-noviembre (otoño) y dos mínimos en los periodos de diciembre-enero-febrero (invierno) y junio-julio y agosto (verano).

Se observa también en la Figura 12 que el ciclo anual dibujado por la grilla UD-ATP se encuentra dentro los intervalos de confianza de las estaciones que se hallan dentro del pixel, lo que indica un buen ajuste de la distribución en referencia a la distribución empírica.

En la temperatura se observó en el ciclo anual mostrado en Figura 13 que en general las temperaturas más bajas registradas en las estaciones de Brasil, que es el país con que se cuenta mayor información, son dadas en junio-julio-agosto con máxima en Julio y las temperaturas más altas en octubre-noviembre-diciembre. El ciclo anual es bien dibujado por la grilla en el pixel -9.25 -40.25, ya que se ajusta a los intervalos de confianza de las estaciones en tierra.

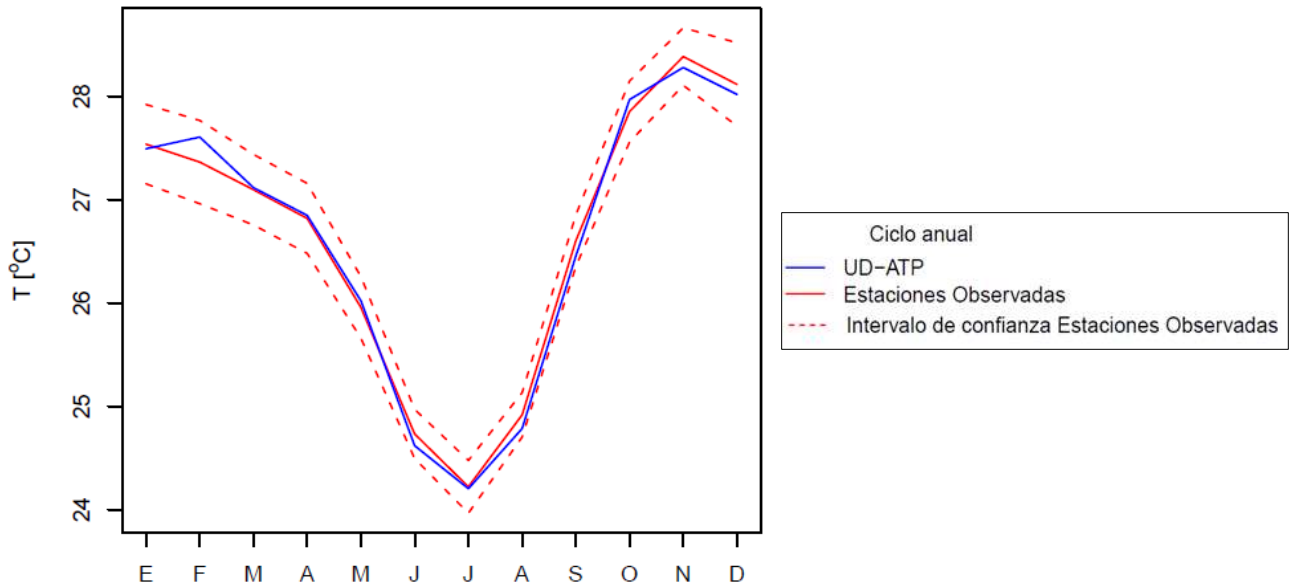


Figura 13. Distribución del ciclo anual de la temperatura para la grilla (azul) y las estaciones en tierra (rojo). El intervalo de confianza de las estaciones en tierra (línea punteada roja). Fuente: Elaboración propia

6.1.3 Mapas de Validación

Para efectos de este trabajo se considera un buen ajuste cuando el valor p de la prueba de Kolmogorov-Smirnov es mayor a 0.05, regular ajuste a un valor p entre 0.01-0.05, mal ajuste a un valor p entre 0.001-0.1 y un muy mal ajuste a un valor p menor a 0.001.

La Figura 14 muestra el mapa de la Amazonía considerada en el estudio en el que se presentan los valores p de la prueba ks para todos los pixeles utilizados, a escala anual de la precipitación.

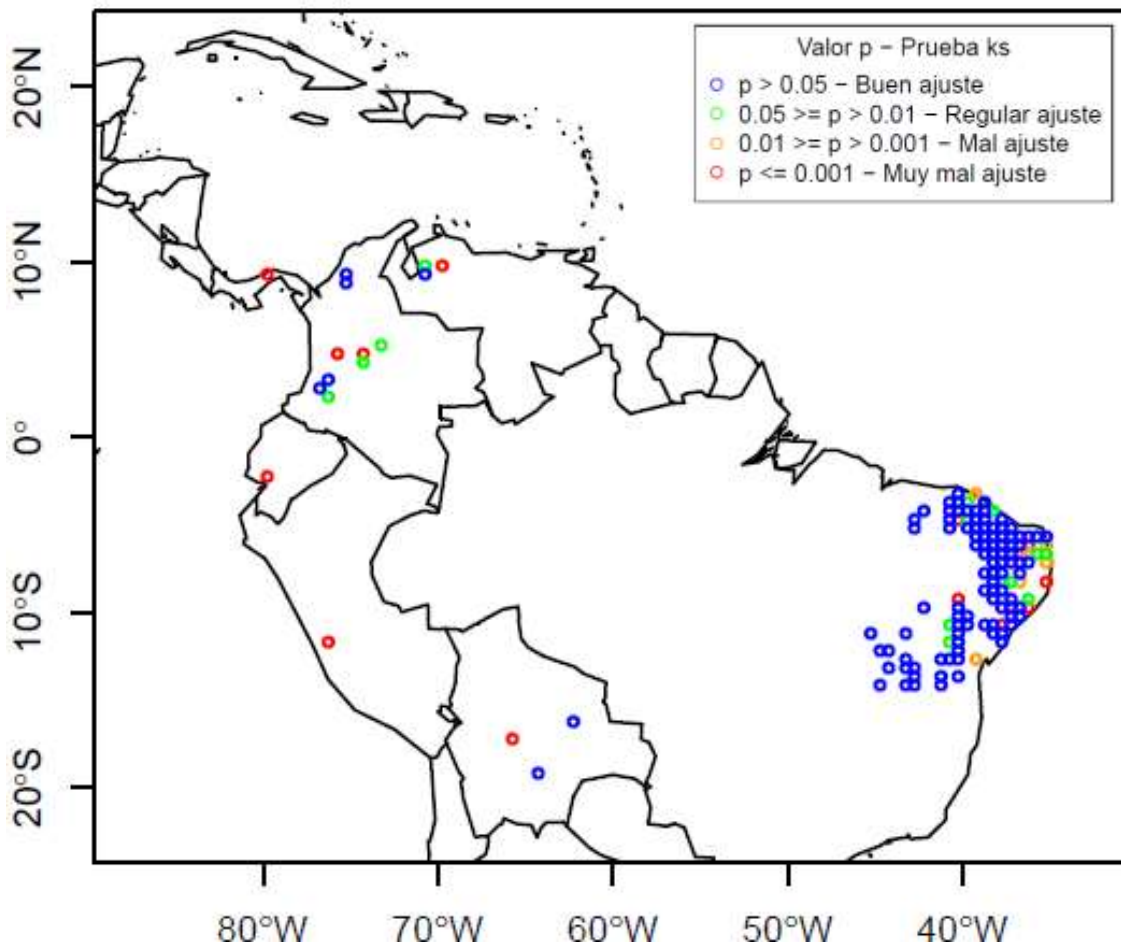
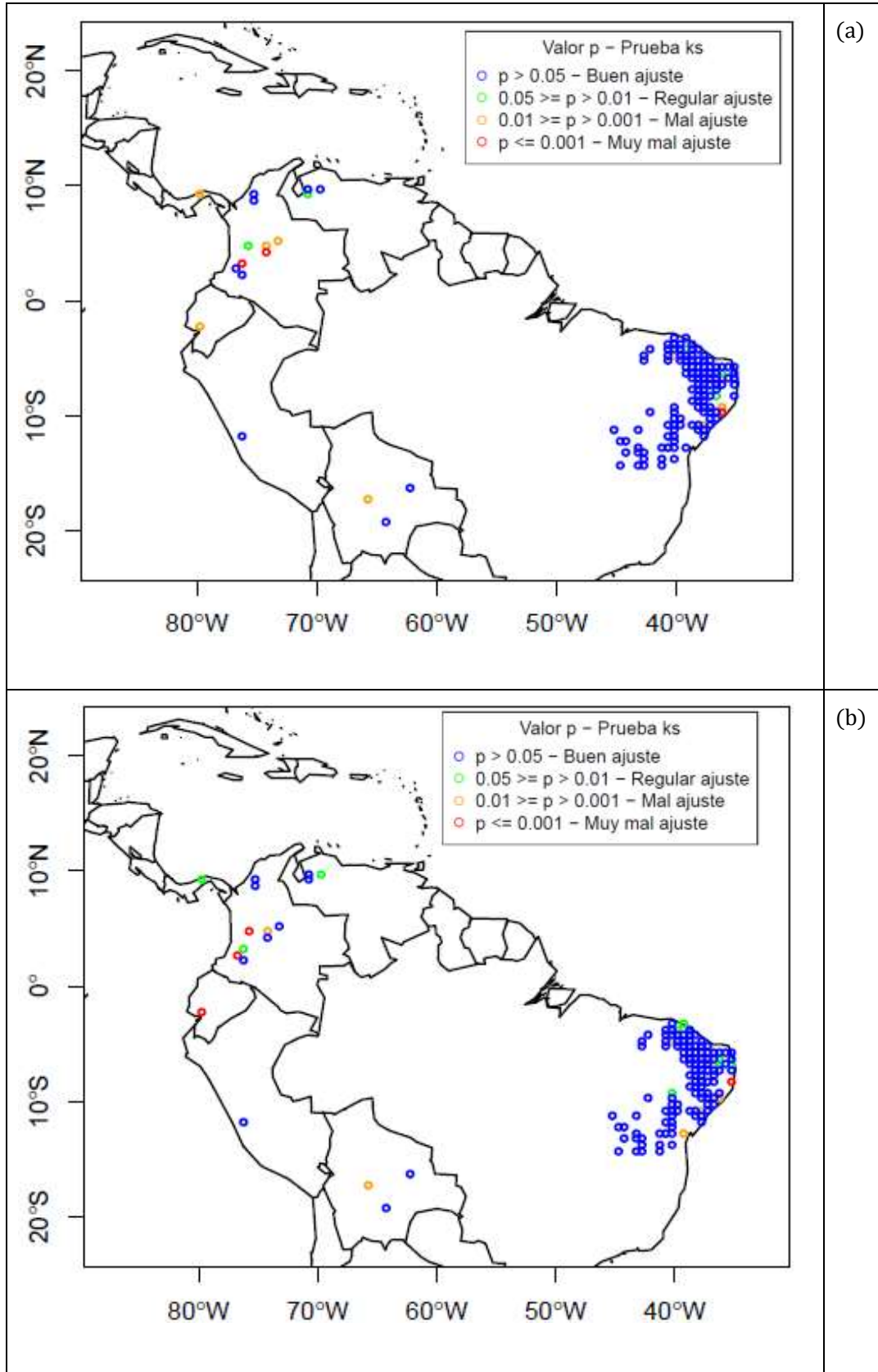


Figura 14. Mapas de validación para los datos de precipitación de UD-ATP con respecto a estaciones en tierra a escala anual. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 14 se observa que la mayoría de los estimativos de ajuste de los pixeles validados para las estaciones en tierra poseen un “buen ajuste” de acuerdo a la prueba no paramétrica ks, es decir el valor p de la prueba es mayor a 0.05. Las estaciones de Brasil se encuentran agrupadas principalmente entre -45°W y -35°W donde en la Figura 14 se observa que es la región con mayor número y mejor calidad en cuanto a años de las estaciones, por lo tanto son las que también en mayor número tienen un buen ajuste.

Particularmente en Colombia algunos pixeles tienen ajuste “regular”, “malo” y “muy malo”, aunque la mayoría tiene “buen ajuste”. Esta variación de los ajustes posiblemente obedece a la interacción de la precipitación con la cordillera de los Andes que pueden generar anomalías en interpolación realizada por la base de datos, además de que muchas estaciones poseen información precaria.

A continuación se muestran los mapas de validación estacional para los pixeles utilizados en el norte de Suramérica:



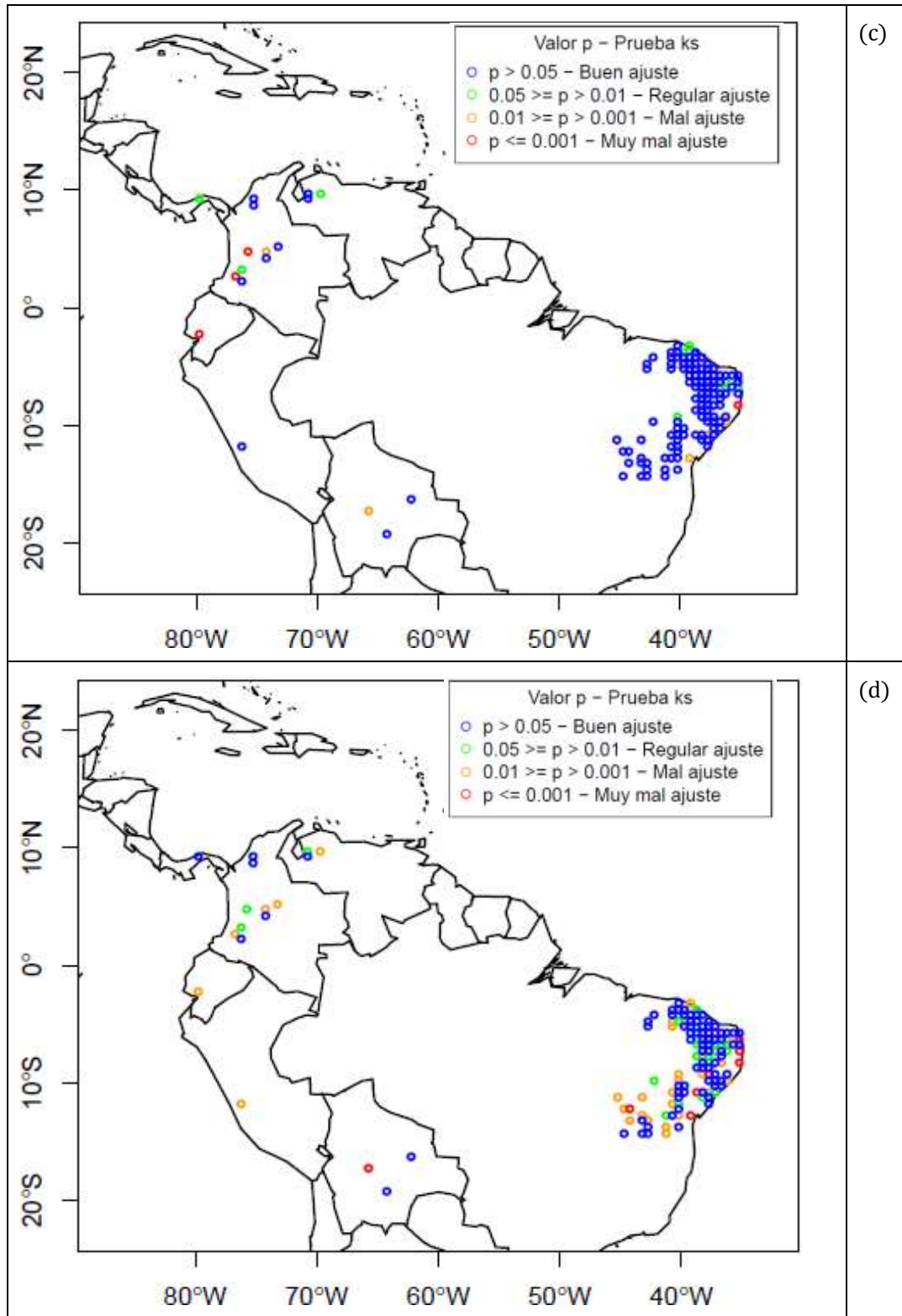


Figura 15. Mapas de validación para los datos de precipitación de UD-ATP con respecto a estaciones en tierra para los periodos de invierno (6a), primavera (6b), verano (6c), otoño (6d).

Fuente: Elaboración propia

En el análisis por trimestres de la Figura 15 se destaca que los trimestres en que se presentan los mejores ajustes para Colombia son primavera y verano, siendo los periodos en los que hay un mayor número de comparaciones con valor p mayor a 0.05. Se presentan en cambio menor cantidad de ajustes buenos en Colombia para el trimestre de invierno, aunque para Brasil es el correspondiente a otoño.

Para la temperatura se realizó un procedimiento similar al de la precipitación, pero para la temperatura se contó con grandes restricciones en la fuente de información, ya que se contó con muy pocas estaciones en tierra en el Climate Explorer con más de 30 años. De la Figura 16 se obtiene que 10 de los pixeles utilizados pasan la prueba, es decir un 43% del total. Como no se contó con información suficiente, los resultados no son contundentes para validar esta variable.

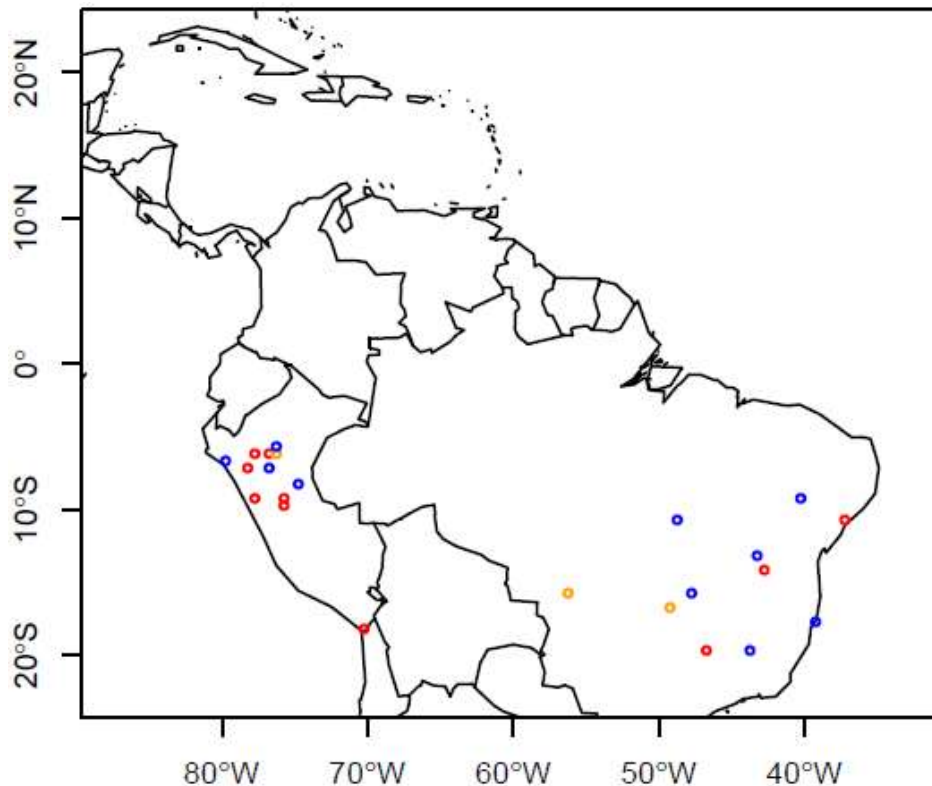


Figura 16. Mapas de validación para los datos de temperatura de UD-ATP con respecto a estaciones en tierra a escala anual. Fuente: Elaboración propia

6.1.4 Resultados de la Validación

A continuación se presentan los resultados de la validación para la precipitación a escala anual (Tabla 3a), y para los trimestres: invierno (Tabla 3b), primavera (Tabla 3c), verano (Tabla 3d) y otoño (Tabla 3e). Los resultados indican que el trimestre mejor validado por la UD-ATP para el norte de Suramérica es invierno.

Tabla 3. Resultados de la prueba ks para el ciclo anual (3a), invierno (3b), primavera (3c), verano (3d) y otoño (3e) para la Amazonía.

Valor p	Número de pixeles	% de del total	(a)
$p > 0.05$	102	74.5 %	
$0.05 \geq p > 0.01$	14	10.2 %	
$0.01 \geq p > 0.001$	7	5.1 %	
$p < 0.001$	14	10.2 %	

Valor p	Número de pixeles	% de del total	(b)
$p > 0.05$	120	87.6 %	
$0.05 \geq p > 0.01$	5	3.6 %	
$0.01 \geq p > 0.001$	4	2.9 %	
$p < 0.001$	8	5.8 %	

Valor p	Número de pixeles	% de del total	(c)
$p > 0.05$	117	85.4 %	
$0.05 \geq p > 0.01$	9	6.6 %	
$0.01 \geq p > 0.001$	4	2.9 %	
$p < 0.001$	7	5.1 %	

Valor p	Número de pixeles	% de del total	(d)
$p > 0.05$	117	85.4 %	
$0.05 \geq p > 0.01$	9	6.6 %	
$0.01 \geq p > 0.001$	4	2.9 %	
$p < 0.001$	7	5.1 %	

Valor p	Número de pixeles	% de del total	(e)
$p > 0.05$	77	56.2 %	
$0.05 \geq p > 0.01$	22	16.1 %	
$0.01 \geq p > 0.001$	10	7.3 %	
$p < 0.001$	28	20.4 %	

6.1.5 Conclusiones Validación

Las bases de datos poseen información muy útil para la realización de estudios hidroclimatológicos, pero en general presentan incertidumbres en cuanto a la representación de las variables del clima que las constituyen. La construcción correcta de la grilla se hace complicada debido a que las variables hidrológicas como la precipitación y temperatura responden a una gran cantidad de relaciones complejas de la zona.

El porcentaje de píxeles a escala anual de precipitación que pasan la prueba con valor p mayor a 0.05 es de 74.4 % respecto al total de 137, para los datos de precipitación. El periodo mejor validado por la base de datos en toda el norte de Suramérica es invierno con 87.6 %, a diferencia de Colombia los cuales fueron primavera y verano. El periodo peor validado por la base de datos es otoño con un 56.2 % de los píxeles que superan la prueba con p mayor a 0.05. En Colombia los mejores resultados se produjeron en zonas planas donde la topografía de las cordilleras puede decirse que no genera anomalías en el régimen de la precipitación. Para la temperatura no se cuenta con resultados contundentes de validación debido a falta de datos disponibles.

De acuerdo con los resultados se concluye que la base de datos de la Universidad de Delaware: Aire, Temperatura & Precipitación, presenta en general un buen ajuste en comparación a las estaciones en tierra en el norte de Suramérica.

6.2 Obtención de información requerida a partir de base de datos

Para tratar la información de precipitación y temperatura de la base de datos de la Universidad de Delaware, primero fue necesario obtener el Modelo Digital de Terreno (MDT) para Colombia, con el fin de delimitar las cuencas de estudio. Esta delimitación era necesaria, para extraer de la base de datos únicamente la información encontrada en el área de interés.

6.2.1 Tratamiento inicial dado al MDT

Los MDT son herramientas que juegan un papel muy importante en el campo de la modelación hidrológica y la gestión del recurso hídrico (Ramírez, 2002), pudiéndose utilizar para realizar la caracterización de cuencas, generar modelos lluvia escorrentía (Vélez, 2001), análisis de las propiedades morfométricas de cuencas (Mantilla, 1999), entre otras aplicaciones.

Para obtener el MDT correspondiente a Colombia primero se ingresó a la página webearthexplorer.usgs.gov perteneciente al *U.S. Geological Survey*, la cual utiliza Google Map como guía para la búsqueda y referencia del sitio de interés. El MDT descargado es un modelo de elevación mundial con datos actuales, de alta calidad y con resolución espacial de 7,5 segundos de arco (aproximadamente 250m).

Primero se descargan dos modelos de elevación digital GMTED2010 para cubrir toda Colombia, obteniéndose los mapas norte y sur para la región requerida y luego se importan los datos a GRASS.

Se crea una `location` llamada `AmazoniaLatLon` que usa el `wgs84` como datum geodésico, se selecciona como región de trabajo las coordenadas que a grandes rasgos delimitan Colombia (90W-60W, 30N-10S) y se importan los mapas raster descargados con la función `r.in.gdal`, obteniéndose el MDT que se muestra en la Figura 15.

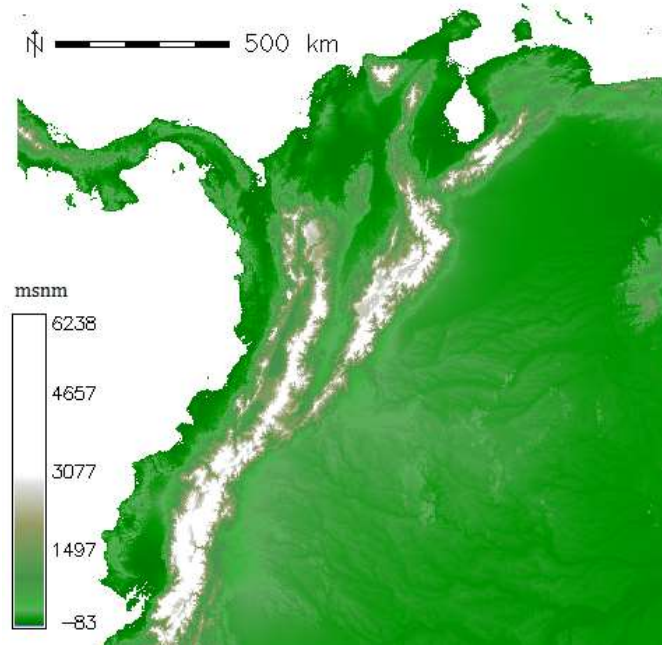


Figura 17. Modelo digital de terreno de Colombia. Fuente: Elaboración propia

6.2.2 Obtención de algunas características del terreno

Para evaluar las características hidrológicas de un terreno es necesaria la obtención de algunos mapas a partir del MDT que representen algunas de ellas; entre las más importantes se encuentran la dirección y acumulación de flujo, las redes de drenaje y las corrientes principales.

Estos mapas cuya codificación hace uso del interior de la región basada en una descomposición del espacio cartográfico dentro de una malla cuadrada al que a cada área se le asigna un valor de elevación se llaman mapas tipo raster (Ramírez, 2002). Para la generación de mapas de interés para el modelado hidrológico a partir de los MDT, el SIG GRASS posee la función `r.watershed`, la cual da como resultados el mapa de acumulación de flujo que representa la cantidad de flujo superficial que atraviesa cada celda (Figura 18c), el mapa de dirección de drenaje que determina la dirección del flujo en cada punto de la superficie del terreno (Figura 18b) y el mapa de corrientes que muestra los valores de los cursos que existen en las cuencas (Figura 18c).

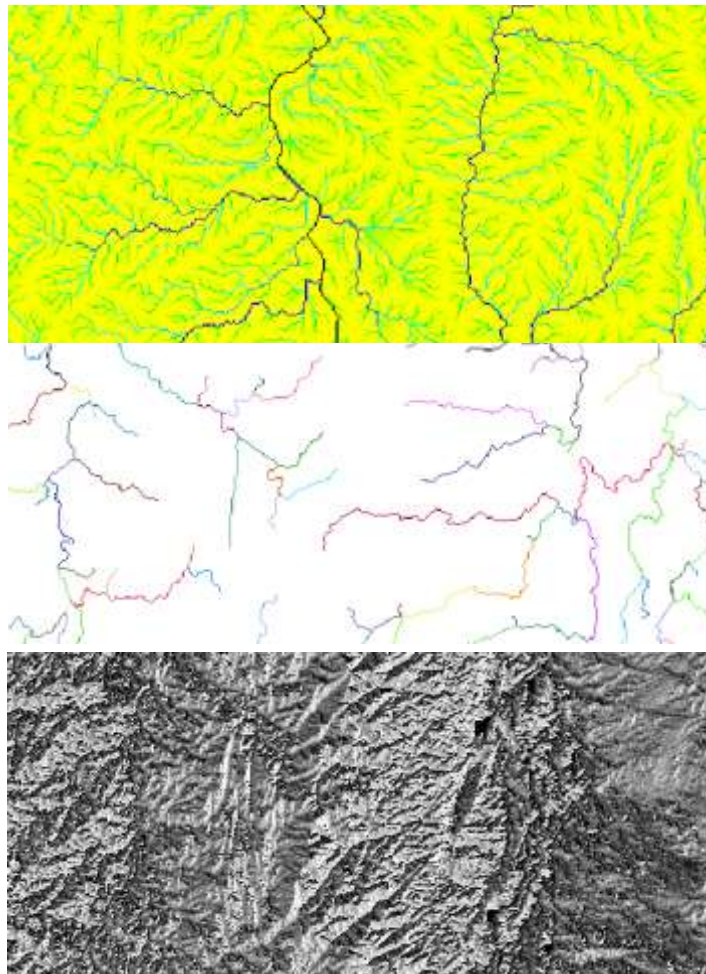


Figura 18. Detalle de los mapas generados con el procesamiento del MDT. De arriba abajo: (a) Mapa de acumulación de flujo del MDT (b) Mapa de direcciones de drenaje del MDT (c) Mapa de corrientes del MDT de Colombia. Fuente: Elaboración propia

6.2.3 Articulación Bases de datos y MDT

Como la información de la base de datos UD-ATP se encuentra originalmente a una resolución de $0,5^\circ$, (30 Arcomin), es necesario realizar una transformación para dejarlos en la misma resolución que el MDT, el cual se encuentra a 7,5 arcosegundos.

Ubicados en GRASS, en la Location AmazoniaLatLon y dentro el Mapset que contenga los mapas de Precipitación o Temperatura, se cambia la resolución de todos los mapas a 7,5 arcosegundos.

Entonces van a existir 240x240 píxeles del MDT embebidos en un píxel del mapa de precipitación y/o temperatura; esto se realiza para tener en consideración que algunos de esos píxeles de precipitación y/o temperatura de $0,5^\circ$ de resolución espacial no están totalmente contenidos dentro de la cuenca.

6.2.4 Delimitación de la cuenca

Una cuenca es un área definida topográficamente, drenada por un curso de agua o un sistema conectado de cursos de agua, tal que todo el caudal efluente es descargado a través de una salida simple (Monsalve, 1995).

La delimitación de una cuenca hidrográfica generalmente se realiza a partir de la divisoria topográfica que separa las precipitaciones que caen dentro de la cuenca en cuestión de las cuencas circunvecinas. La metodología usada en este estudio para delimitar la cuenca del río Magdalena consiste en determinar el punto de salida de la cuenca y a partir de allí comenzar a trazar la divisoria topográfica, es decir uniendo los puntos de máxima cota que van interceptando perpendicularmente las curvas de nivel. Este procedimiento se realizó con la ayuda de GRASS, definiendo las coordenadas del punto de salida de la cuenca dentro del MDT de Colombia previamente cargado al programa.

La primera cuenca de estudio se define a partir de un punto próximo a la desembocadura del río Magdalena en el Mar Caribe. Este punto corresponde a las coordenadas de una estación de medición de caudales, permitiendo así que todas las corrientes que escurren al río Magdalena hagan parte de la cuenca definida. Cabe anotar que no se considera oportuno elegir como punto de salida de la cuenca, uno justamente ubicado sobre la desembocadura, pues el nivel del mar afectaría considerablemente las mediciones de caudal y tenerlo en cuenta está fuera de los alcances de este trabajo.

Para delimitar correctamente las cuencas del río Magdalena para el trabajo y comenzar a relacionar los valores de precipitación y temperatura de UD-ATP con los caudales del río, se utilizaron en primer lugar, las coordenadas de la estación de caudales Calamar; la cuenca delimitada a partir del punto de salida será llamada de aquí en adelante Cuenca Calamar.

En el mapa de acumulación de flujo del MDT, se verifica que las coordenadas geográficas de la estación se encuentren exactamente sobre el cauce de río para realizar la delimitación. En la Figura 19 se muestra que la estación Calamar no se encuentra sobre el cauce del río Magdalena.

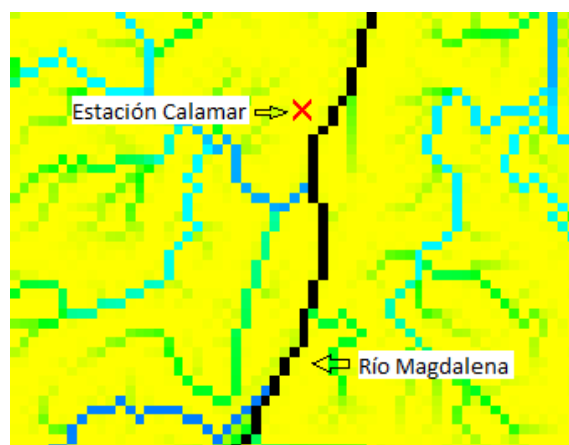


Figura 19. Ubicación Estación Calamar y cauce del Río Magdalena en el MDT. Fuente: Elaboración propia

Entonces se procedió a corregir las coordenadas de la estación para ubicarla sobre el cauce, esto se realizó siguiendo la dirección de la distancia más corta entre el punto y el cauce. En la Figura 20 se muestra la ubicación corregida de la estación Calamar sobre el cauce del río.

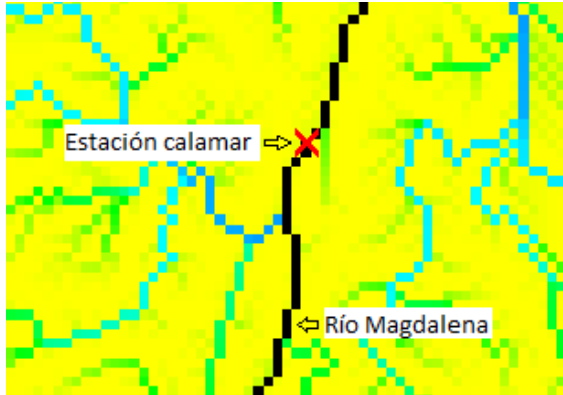


Figura 20. Ubicación corregida Estación Calamar y cauce del Río Magdalena en el MDT. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 21 se observa la ubicación de la estación Calamar sobre el MDT de Colombia.

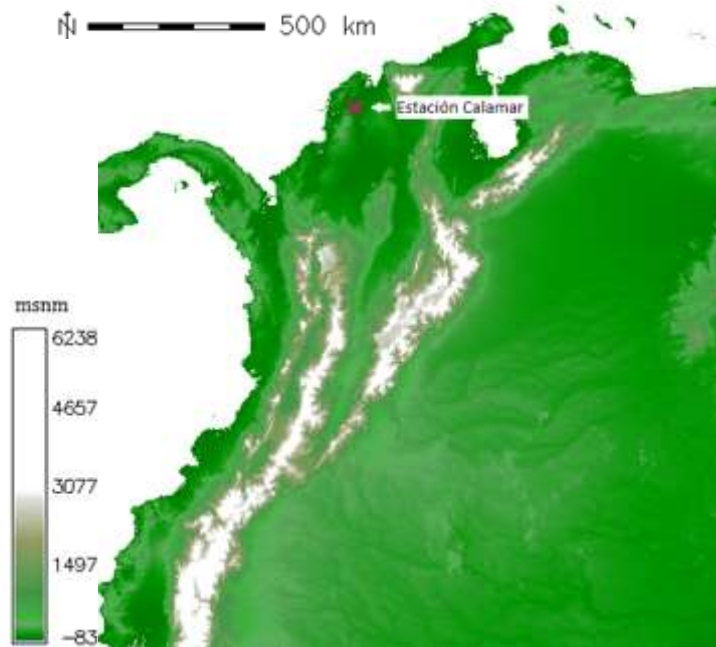


Figura 21. Ubicación de la estación Calamar sobre el MDT. Fuente: Elaboración propia

Luego se crean la cuenca desde el punto de la estación corregida, usando la función `r.water.outlet`. El producto de esta función es un elemento de tipo *raster*.

La línea divisoria de aguas de la Cuenca Calamar es mostrada sobre el MDT en Figura 22. Se incluye la línea fronteriza de Colombia para dar claridad a la ubicación de la cuenca delimitada.

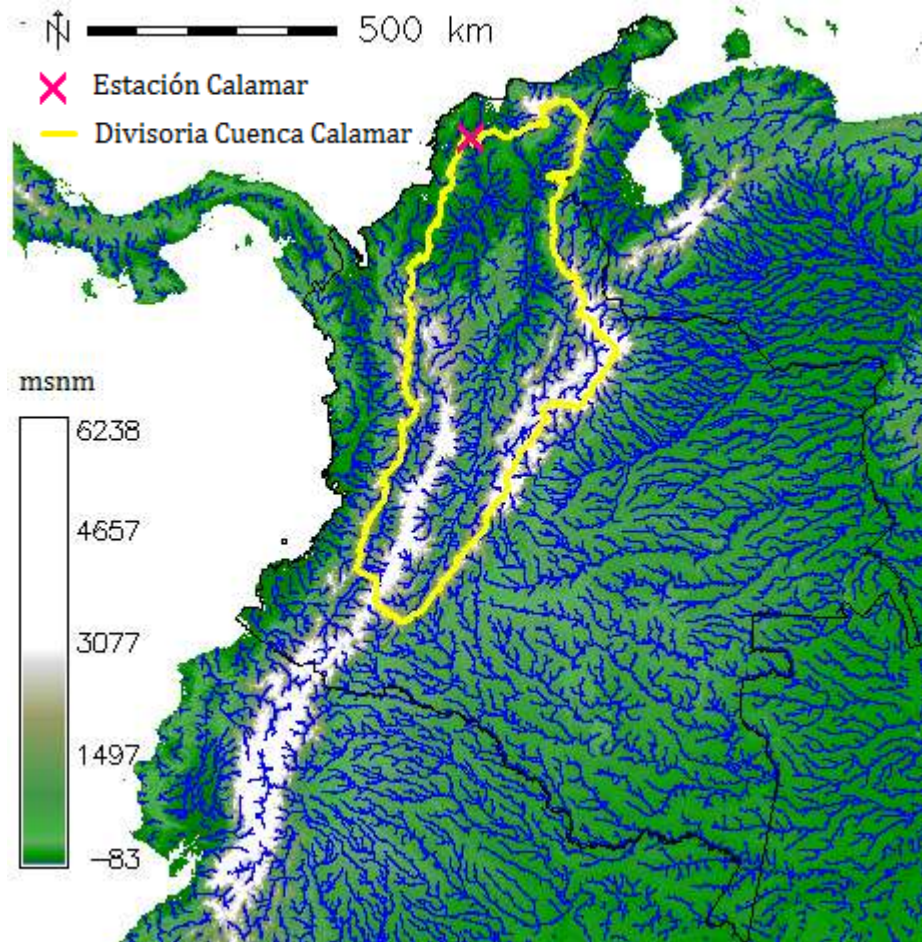


Figura 22. Divisoria de aguas Cuenca Estación Calamar sobre MDT. Fuente: Elaboración propia

El procedimiento anteriormente descrito fue realizado para una segunda cuenca, más pequeña y ubicada en la parte alta del Río Magdalena. El punto de salida de esta cuenca es la ubicación de la estación de medición de caudales Nariño, sobre el Río Magdalena. La línea divisoria de aguas de esta cuenca sobre el MDT es mostrada en la Figura 26.

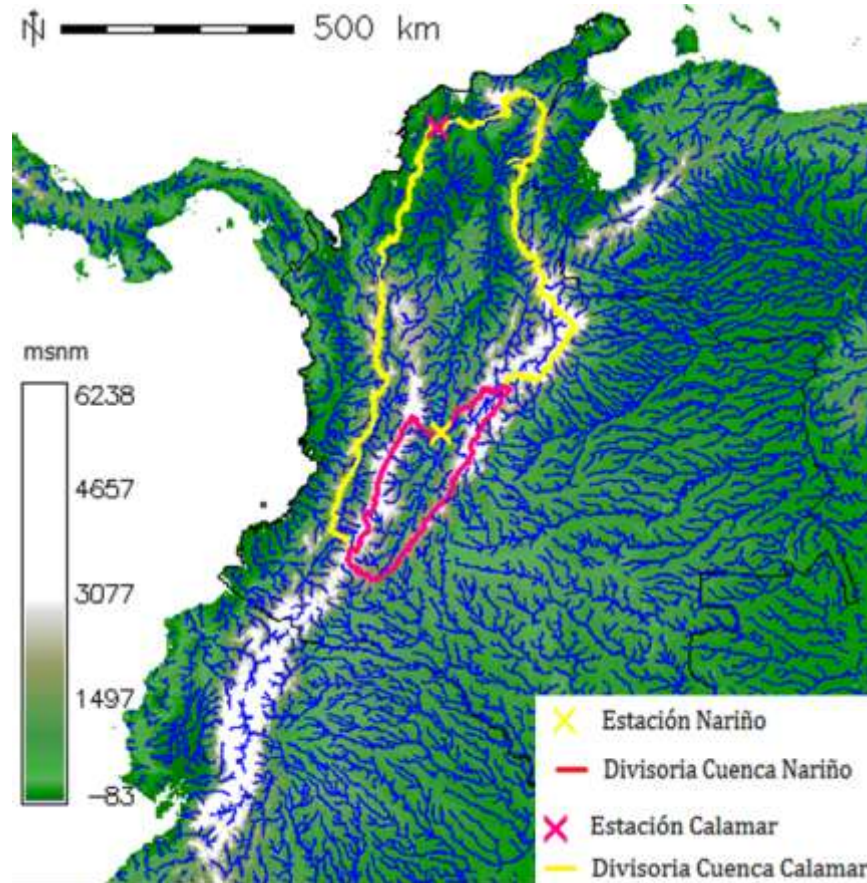


Figura 23. Divisoria de aguas Cuenca Nariño sobre MDT. Fuente: Elaboración propia

Se delimitaron entonces dos cuencas, una en la parte baja de la cuenca del Río Magdalena: Cuenca Calamar, y otra en la parte alta: Cuenca Nariño. Las coordenadas de sus puntos de salida y su área, se muestran en Tabla 4. El área de cada cuenca fue obtenida usando la función de GRASS `r.stats` y la pendiente media de cada una por medio de la función `r.slope.aspect`.

En la Figura 24 se muestra el mapa de pendientes en grados de la cuenca Calamar, donde el color amarillo representa las pendientes más bajas con valores alrededor de 0° a 5° el cual se presenta sobretodo la parte de la cuenca ubicada en la Costa Atlántica; los valores verdes entre 5° y 16° se presentan en la región Andina como consecuencia de la presencia de las cordilleras y en general de las zonas montañosas, es decir, para la cuenca Calamar los valores de pendiente son altos (colores verdes), ya que su topografía se caracteriza por ser altamente montañosa.

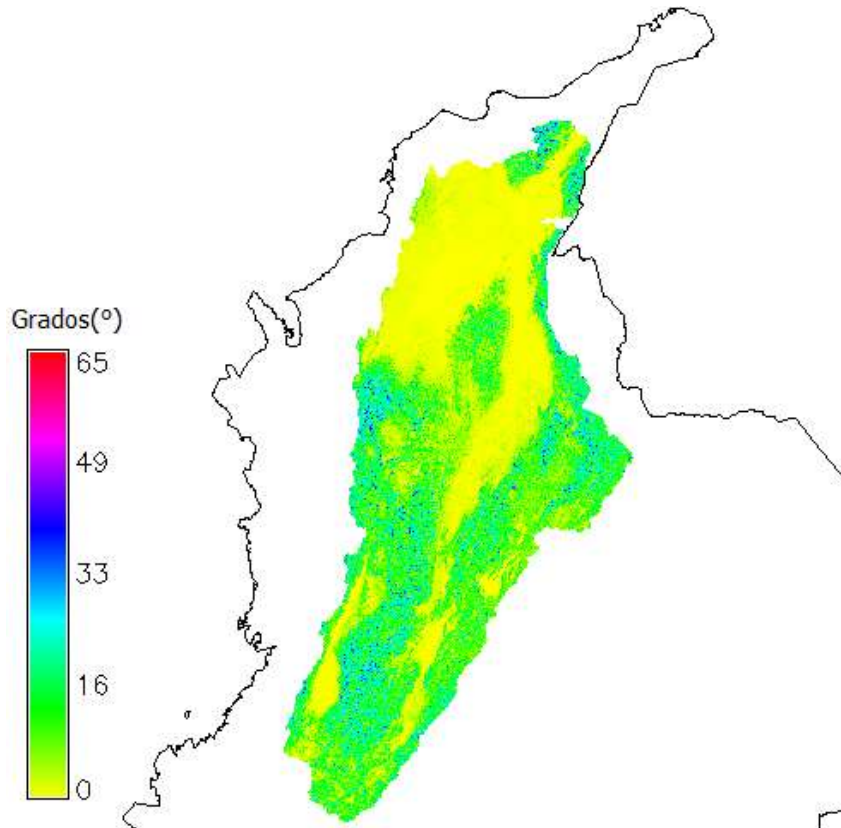


Figura 24. Mapa de pendientes de la cuenca Calamar expresadas en grados. Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Información sobre cuencas delimitadas. Fuente: Elaboración propia

	Punto de salida de la cuenca			Área (km ²)	Pendiente media (%)
Cuenca Calamar	Estación Calamar			256,684.50	6.86
		Latitud	Longitud		
	Sin corregir	74°54'0.0"W	10° 15' 0"N		
	Corregida	74°54'33.33"	10° 14'59.44"N		
Cuenca Nariño	Estación Nariño			48,134.65	20.32
		Latitud	Longitud		
	Sin corregir	74°50'0.0"W	4°23'0.0"N		
	Corregida	74°50'23.63"W	4°22'55.82"N		

6.2.5 Obtención de promedios mensuales anuales

Para poder establecer los promedios mensuales de precipitación y temperatura en la cuenca del Río Magdalena, usando la UD-ATP se desarrolló un código que al ser leído en la consola de GRASS with MSYS, se ejecutara para cada mapa mensual de precipitación y temperatura disponible, calculando la media de los valores de todos los pixeles (que representan un valor con una precisión de 0.5°), encontrados al interior de cada cuenca delimitada según el numeral 6.2.4. El cálculo es realizado haciendo uso de la función de GRASS `r.univar`, la cual calcula valores medios, extremos y desviación estándar, y puede ser usada para una máscara establecida (un área delimitada, como una cuenca, es llamada máscara o `mask` en GRASS).

Se observa en Figura 25 una muestra de la disposición de la información de la base de datos de la Universidad de Delaware (en forma de pixeles representando valores de precipitación o temperatura) dentro de la máscara de la Cuenca Calamar.

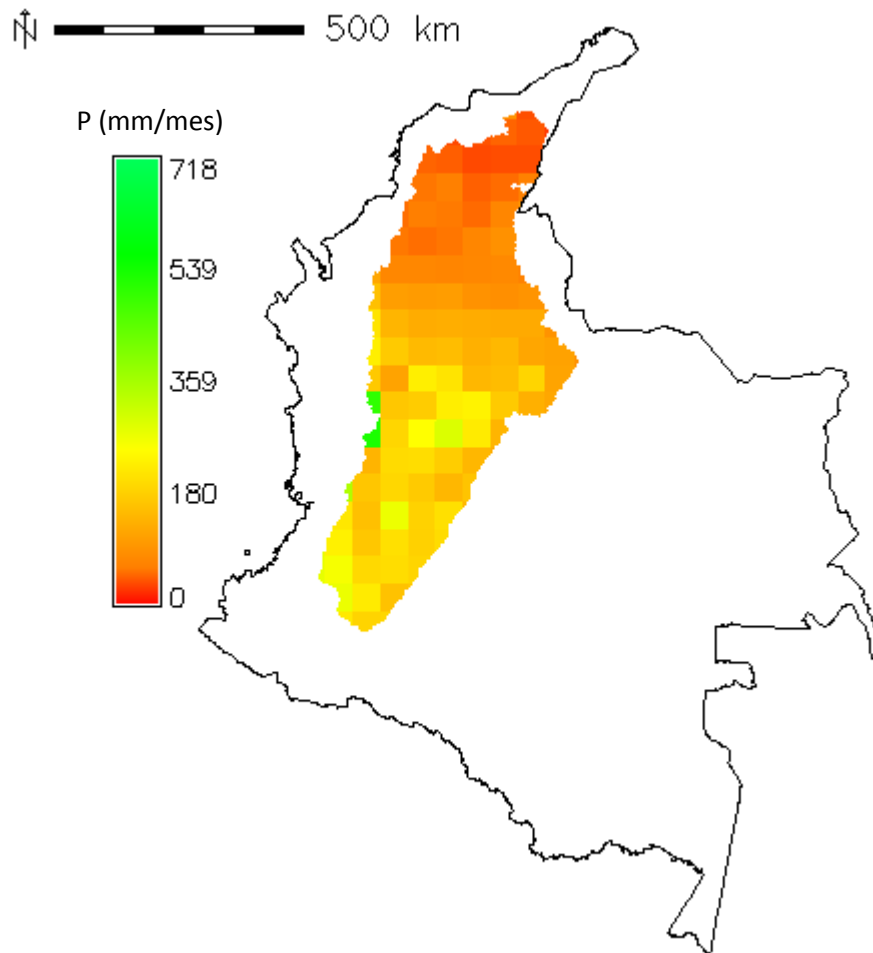


Figura 25. Disposición de los datos de precipitación mensual de la Universidad de Delaware (con precisión de 0.5°) en Cuenca Calamar. Fuente: Elaboración propia

El código construido fue adaptado y ejecutado en dos ocasiones por cuenca: una para el cálculo de temperatura media mensual y otra para el de precipitación; estos dos códigos

se ejecutan de forma independiente y presentan variaciones limitadas a cambios de rótulos y directorio de archivos. El código correspondiente al cálculo de precipitación media mensual se esquematiza en Diagrama 1, teniendo en cuenta que para ejecutarlo es necesario seguir, previamente y en su orden, las actividades que se muestran enseguida (por supuesto luego de haber definido la máscara):

- Crear archivo de texto llamado *lista.list* con los nombres de los mapas que serán objeto de cálculo.
- Abrir la consola GRASS with MSYS
- Seleccionar en la interfaz de GRASS: la proyección *Project Location* y el directorio *Accesible mapset* de los mapas que serán objeto de cálculo.
- En la consola GRASS with MSYS, seleccionar el directorio con la ubicación del archivo de texto *.sh* que contiene el código. Ejecutar.

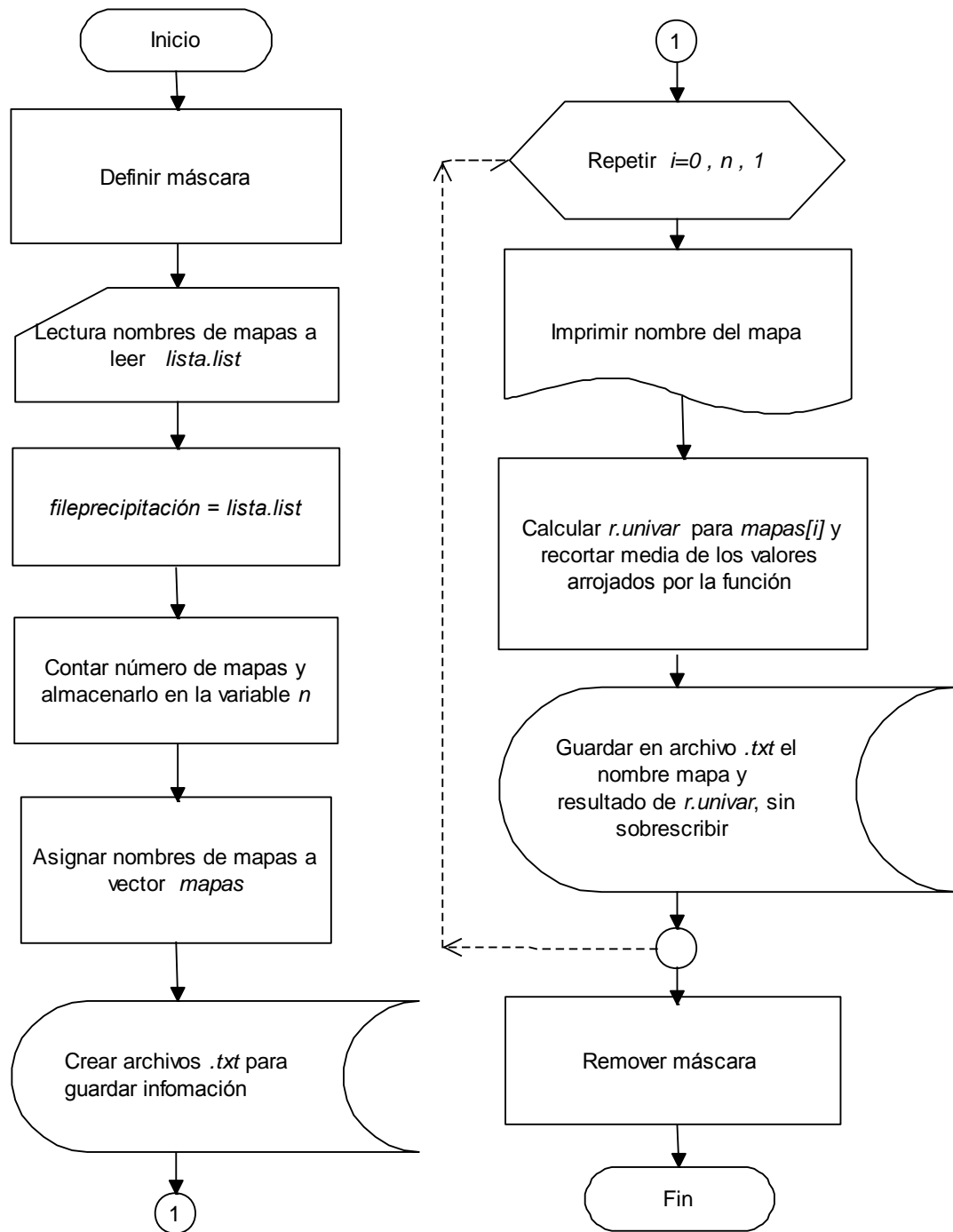


Diagrama 1. Obtención de valores medios mensuales de precipitación y temperatura. Fuente: Elaboración propia

El código anteriormente descrito, fue adaptado y usado a la vez para obtener valores máximos mensuales, mínimos mensuales y desviación estándar, de los valores de precipitación y temperatura encontrados al interior de las cuencas (mostrados para Cuenca Calamar en Anexo No. 1). Toda la información obtenida quedó almacenada en

diferentes archivos de texto, con rótulos indicando el tipo de mapa al que hacía referencia (precipitación o temperatura) y el mes y año al que correspondía. Adicionalmente, se obtuvieron de la misma forma valores medios para todo el país, usando como máscara la línea fronteriza de Colombia; esto se hizo con el propósito de cumplir con el primer objetivo específico de este trabajo. Los valores máximos, mínimos y desviación estándar de precipitación y temperatura para Colombia, son mostrados en Anexo No. 2.

6.3 Obtención de predicción de cambios de la precipitación y la temperatura

Se pretende evaluar los cambios porcentuales de los caudales en la cuenca del río Magdalena, respecto a los cambios de precipitación y temperatura proyectados en cada uno de los modelos de circulación global (GCM) del IPCC con información disponible para Colombia.

Para efecto de los resultados de este estudio, aunque ningún escenario es más probable de suceder, se utiliza el escenario A1B, ya que no es el más pesimista ni el más optimista de todos ellos (ver Figura 26). El escenario A1B asume un mundo futuro con rápido crecimiento económico, bajo crecimiento de la población y una rápida introducción de nuevas y más eficientes tecnologías, los temas más importantes son la convergencia económica y cultural, la capacidad de construcción y una reducción de la diferencia en el ingreso per cápita entre regiones, todo lo anterior sin depender excesivamente de una fuente de energía, es decir existiendo un balance a través de todas las fuentes (IPCC, 2000).

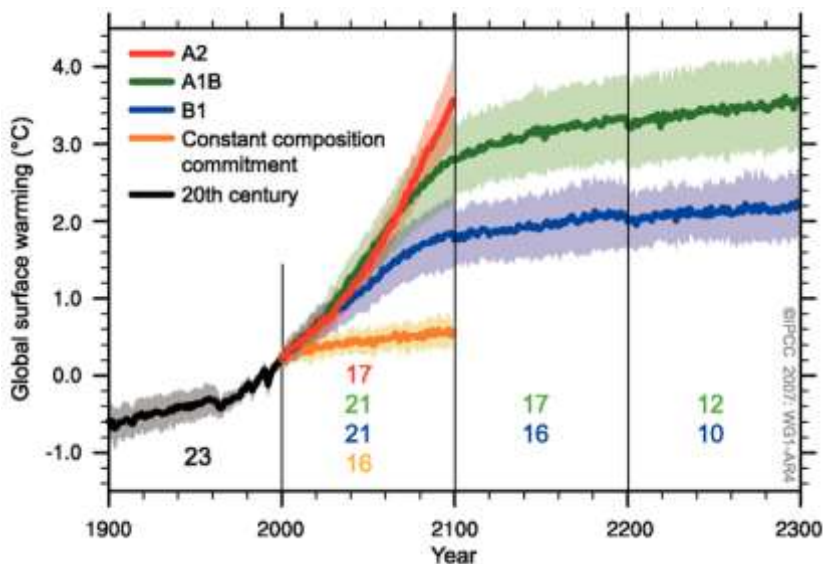


Figura 26. Calentamiento global de la superficie para los distintos escenarios: A2 (rojo), A1B (verde) y B1 (azul), mostrados para proyección del siglo 20. Tomado de Randall et al, 2007

Se descargaron 21 modelos disponibles en la página web del IPCC, que contienen datos de precipitación y temperatura pertenecientes al escenario A1B descritos en el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC en el año 2007.

La ventana temporal disponible de referencia utilizada para calcular los cambios de precipitación y temperatura en cada uno de los modelos corresponde a 1961-1990 (ventana 1961), es decir, esta es la serie histórica empleada para comparar con las proyecciones futuras. Por su parte, la

ventana de proyección futura escogida corresponde a 2040-2069 (ventana 2040) ya que es la más próxima que se tenía disponible y que no contiene años que ya han ocurrido.

Luego de descargar los modelos, estos deben ser proyectados en GRASS para calcular los cambios de precipitación y de temperatura ocurridos, según los modelos, entre la ventana 1961 y la ventana 2040.

Se desarrolló un código para realizar la conexión entre R y GRASS, y por medio de la función `writeRAST6` se dibujaron los mapas de los modelos en el `location` y el `mapset` deseados.

El código construido fue adaptado y ejecutado en dos ocasiones por variable climática: una para el cálculo del cambio de temperatura media y otra para el cambio de precipitación; estos dos códigos se ejecutan de forma independiente y presentan variaciones limitadas a cambios de rótulos y directorio de archivos.

Al mostrar por medio de la función `d.rast` los modelos GCM, se aprecia que algunos no tienen cobertura espacial para Colombia. Al finalizar, se cuenta con 13 GCMs disponibles para el país, los cuales son: BCM2, CGHR, CGMR, CNCM3, ECHOG, GFCM20, GFCM21, GIAOM, INCM3, MIMR, MRCGCM, NCCCSM y NCPCM.

Para cada GCM se obtuvieron los valores promedios mensuales multianuales de precipitación y temperatura para los dos periodos de trabajo y luego, se calcularon los cambios de la temperatura media y precipitación media al interior de la cuenca Calamar y Nariño por medio de la calculadora de mapas de GRASS. El código correspondiente para la obtención de los Δ Temperatura y Δ Precipitación se esquematiza en el Diagrama 2, siendo estas variables el almacenamiento de la operación final del diagrama. Se hace referencia allí con la palabra `pixel`, a la información de P o T con precisión de 7.5 arcossegundos. La operación mostrada fue realizada de forma independiente para la precipitación y la temperatura, y para cada modelo.

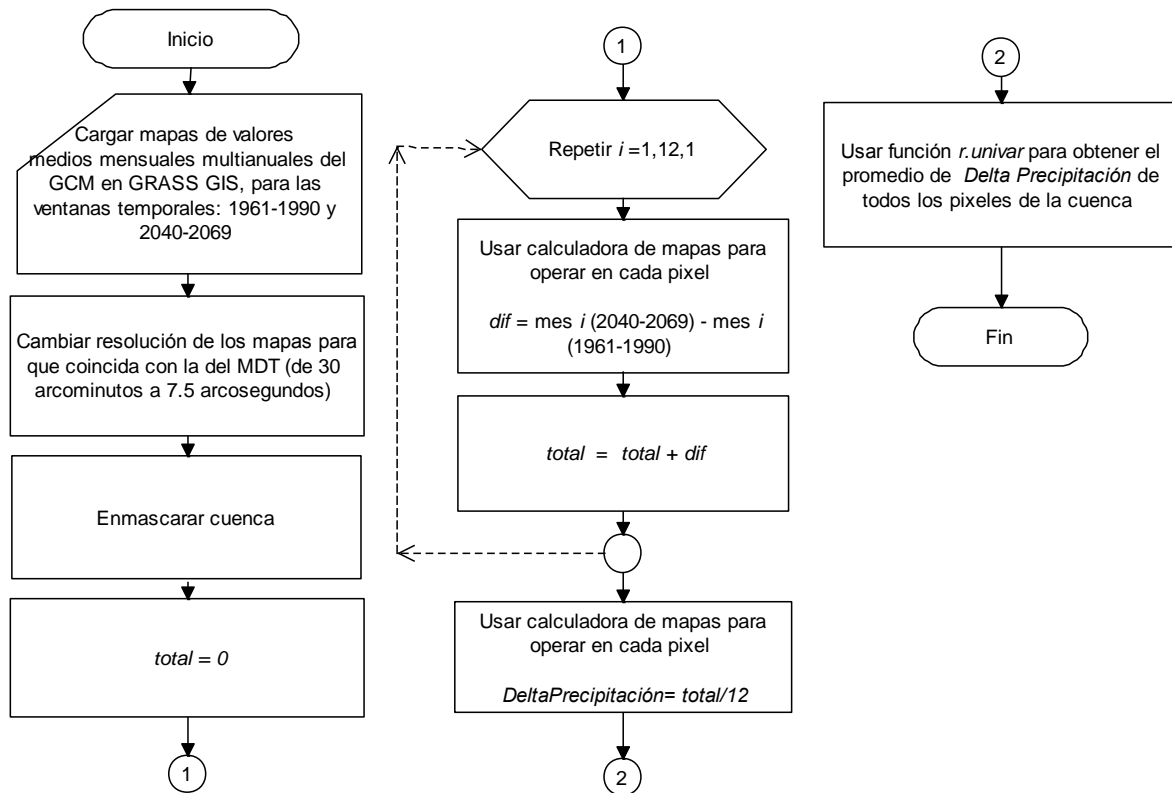


Diagrama 2. Obtención de Δ Precipitación (*Delta Precipitación*) entre las ventanas temporales 1961-1990 y 2040-2069 por modelo climático. Fuente: Elaboración propia

Se observa en la Tabla 5 que los cambios de temperatura en la cuenca Calamar son positivos en todos los modelos con valores entre 1.41°C y 2.86°C. En las precipitaciones se observan en su mayoría cambios positivos hasta de 25.56 mm/mes en el modelo ECHOG, pero también se presentan cambios negativos en CGHR y NCPCM de -12.3 mm/mes y -1.04 mm/mes, respectivamente.

Tabla 5. Cambios de Temperatura media mensual multianual (°C) y Precipitación media mensual multianual (mm) en GCMs del periodo de 2040-2069 respecto al periodo de 1961-1990 para la cuenca Calamar. Fuente: Elaboración propia

Modelo Climático Global	Δ Temperatura (°C)	Δ Precipitación (mm/mes)
BCM2	1.74	4.46
CGHR	2.86	-12.30
CGMR	2.38	1.97
CNCM3	2.44	12.32
ECHOG	1.91	25.56
GFCM20	2.15	2.15
GFCM21	2.34	11.52
GIAOM	2.32	5.94
INCM3	1.97	0.29
MIMR	2.07	19.35
MRCGCM	1.67	10.61
NCCCSM	2.04	15.37
NCPCM	1.41	-1.04

Se observa en la Tabla 6 que los cambios de temperatura para la cuenca Nariño son positivos en todos los modelos con valores entre 1.32°C y 2.79°C. En las precipitaciones se observa en su mayoría cambios positivos hasta de 29.27 mm/mes en el ECHOG y un cambio negativo en el NCPCM de -1.05 mm/mes.

Tabla 6. Cambios de Temperatura media mensual multianual (°C) y Precipitación media mensual multianual (mm/mes) en GCMs del periodo de 2040-2069 respecto al periodo de 1961-1990 para la cuenca Nariño. Fuente: Elaboración propia

Modelo Climático Global	Δ Temperatura (°C)	Δ Precipitación (mm/mes)
BCM2	1.74	4.46
CGHR	2.79	1.69
CGMR	2.32	6.86
CNCM3	2.44	12.23
ECHOG	1.89	29.27
GFCM20	2.15	2.15
GFCM21	2.34	11.52
GIAOM	1.54	20.66
INCM3	1.77	10.39
MIMR	2.07	19.38
MRCGCM	1.67	10.61
NCCCSM	1.77	24.77
NCPCM	1.32	-1.05

De las Tabla 5 y Tabla 6 se puede destacar que el promedio de ΔT para la cuenca Calamar fue de 2.1°C y el de la cuenca Nariño de 1.99°C. En general, los modelos predicen un mayor aumento de la temperatura para la ventana 2040 en la cuenca baja que en la cuenca alta del río Magdalena. En cuanto al promedio de ΔP , en la cuenca Calamar fue de 7.4 mm/mes y el de la cuenca Nariño de 11.76 mm/mes, es decir que para los modelos el aumento de la precipitación será mayor en la ventana 2040 para la cuenca alta del río Magdalena.

De las Tabla 5 y Tabla 6 también se puede estimar que el cambio anual de la precipitación promedio de los 13 GCMs para la cuenca Calamar es de 88.79 mm/año y para la cuenca Nariño de 141.16 mm/año.

Al comparar los valores de las dos cuencas se observa que el modelo CGHR es aquel que presenta ciertas anomalías, ya que en la cuenca Calamar presenta un ΔP negativo de -147.7 mm/mes y en la cuenca Nariño presenta ΔP positivo de 20.24 mm/mes, esto se debe a que para este modelo los cambios fueron precisamente positivos en las zonas cercanas a la cuenca Nariño, pero grandes cambios negativos se produjeron en el resto de la cuenca Calamar. El modelo NCPCM es el único modelo que exhibe cambios negativos de la precipitación en las dos cuencas. En cuanto al INCM3

fue el que obtuvo el mayor cambio del ΔP , de 10.39 mm/mes en la ventana 2040 respecto a su valor en la ventana 1960 de 0.29 mm/mes.

Se presentaron valores similares de cambio entre las dos cuencas para los modelos CNCM3, GFCM20, GFCM21, MIMR, MRCGCM y NCPCM.

7 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

7.1 Variabilidad de la precipitación y la temperatura

Los valores medios obtenidos de la base de datos de La Universidad de Delaware (según procedimiento indicado en 6.2.5), con frecuencia mensual y cobertura temporal de 1900 a 2010, fueron organizados y procesados con el fin de obtener información acerca de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación y la temperatura, y de sus cambios a lo largo del siglo en todo el país y más específicamente en la cuenca del río Magdalena. Inicialmente, los datos correspondientes a todo el territorio Colombiano serán incluidos junto con los de las dos cuencas de estudio, Cuenca Calamar y Cuenca Nariño, buscando ubicarlas en contexto dentro del país para saber a grandes rasgos, si su dinámica general es ajena o no a la presentada en toda Colombia. Se debe tener en cuenta que cada área está contenida dentro de la siguiente de mayor tamaño.

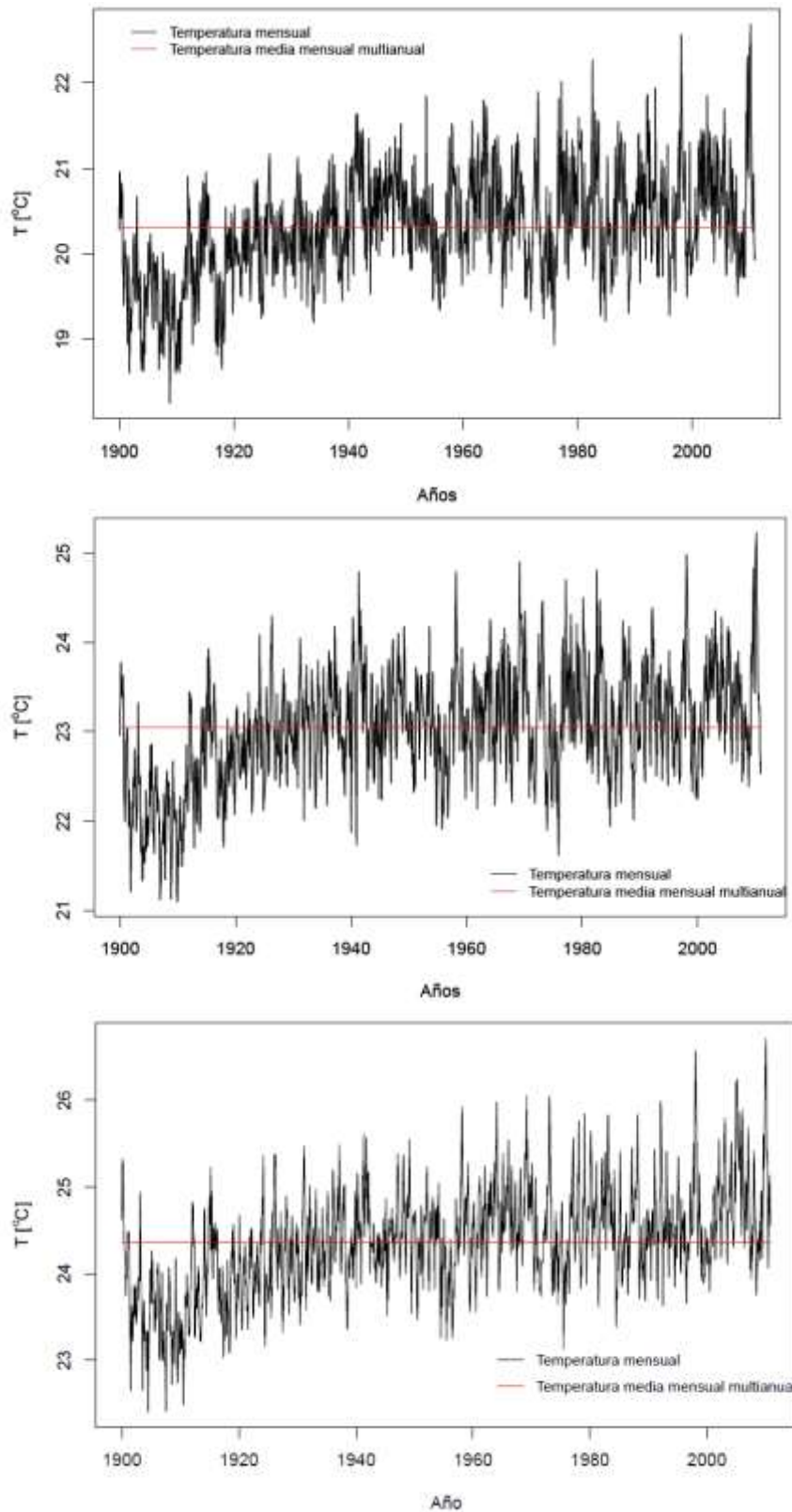
Los promedios espaciales mensuales de temperatura al interior de la Cuenca Calamar, de la Cuenca Nariño y Colombia, se muestran en la Gráfica 1, indicando a la vez cuál es el valor medio de todos esos valores. En las tres áreas se puede observar como existe una tendencia creciente de los valores de temperatura. Los valores más bajos del periodo se presentan en las dos primeras décadas y los más altos a finales del siglo XX y en lo transcurrido del siglo XXI.

En cuanto a la precipitación, mostrada en Gráfica 2, no parece existir tendencia de cambio en ninguna de las tres áreas y en general, no se observan periodos definidos en los que hubiesen ocurrido valores extremos.

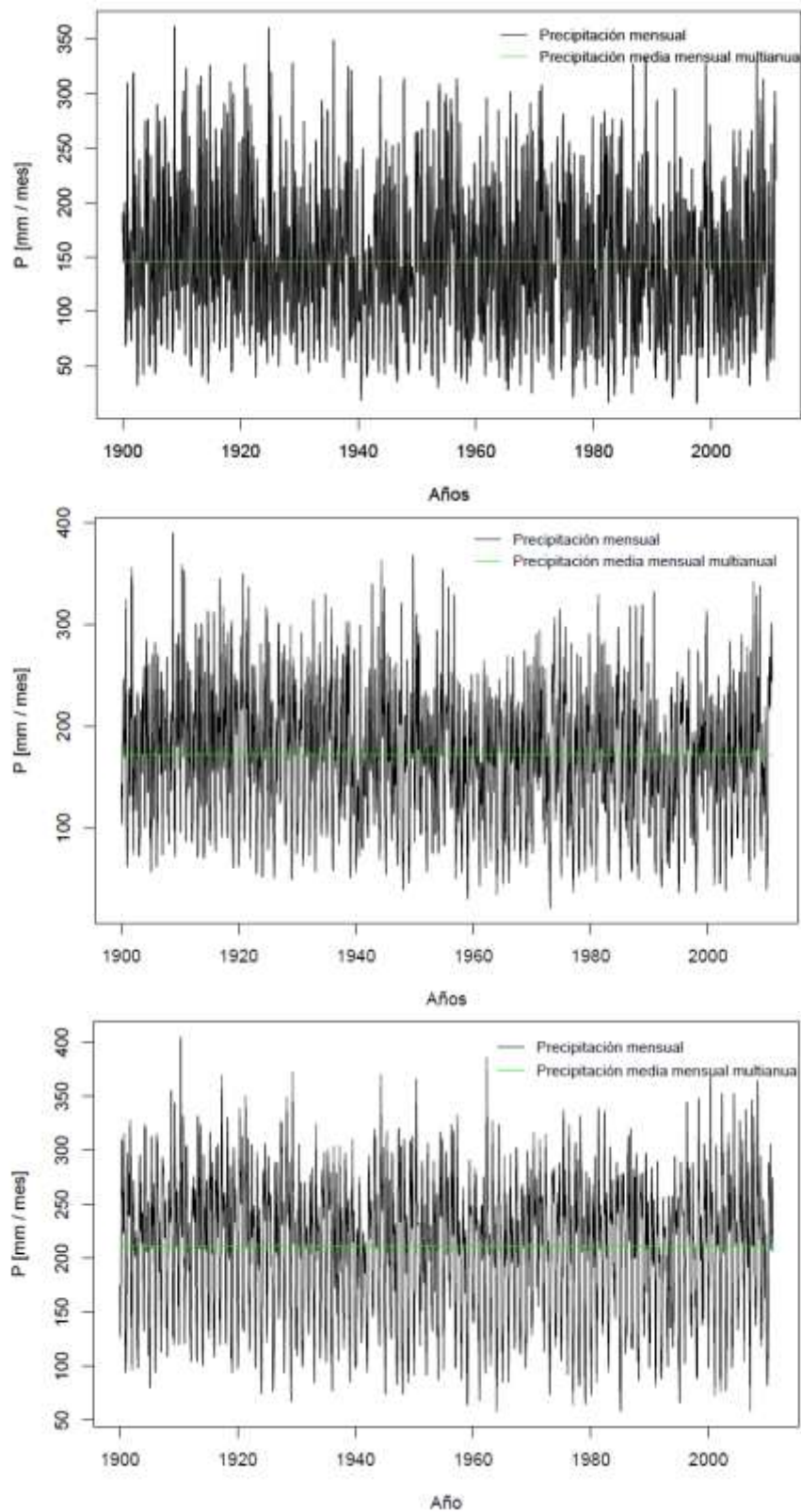
Se relacionan en Tabla 7 los valores medios multianuales para precipitación y temperatura de la Cuenca Nariño, Cuenca Calamar y Colombia. Se puede observar que la precipitación media en Cuenca Nariño es mucho menor que la de Cuenca Calamar, a pesar de comprender la zona montañosa de esta, que se esperaría aportara casi la totalidad de la precipitación de la cuenca; esto indica que las demás cuencas, la del río Cauca y en general las ubicadas en el Eje Cafetero y en Antioquia, contribuyen en parte importante a la precipitación y posterior escorrentía de la cuenca del Río Magdalena.

Tabla 7. Precipitación y temperatura media (1900-2010) en Cuenca Calamar, Cuenca Nariño y Colombia. Fuente: Elaboración propia

	Precipitación media multianual (mm/mes)	Temperatura media multianual (°C)
Cuenca Calamar	172.36	23.05
Cuenca Nariño	145.90	20.31
Colombia	211.04	24.36



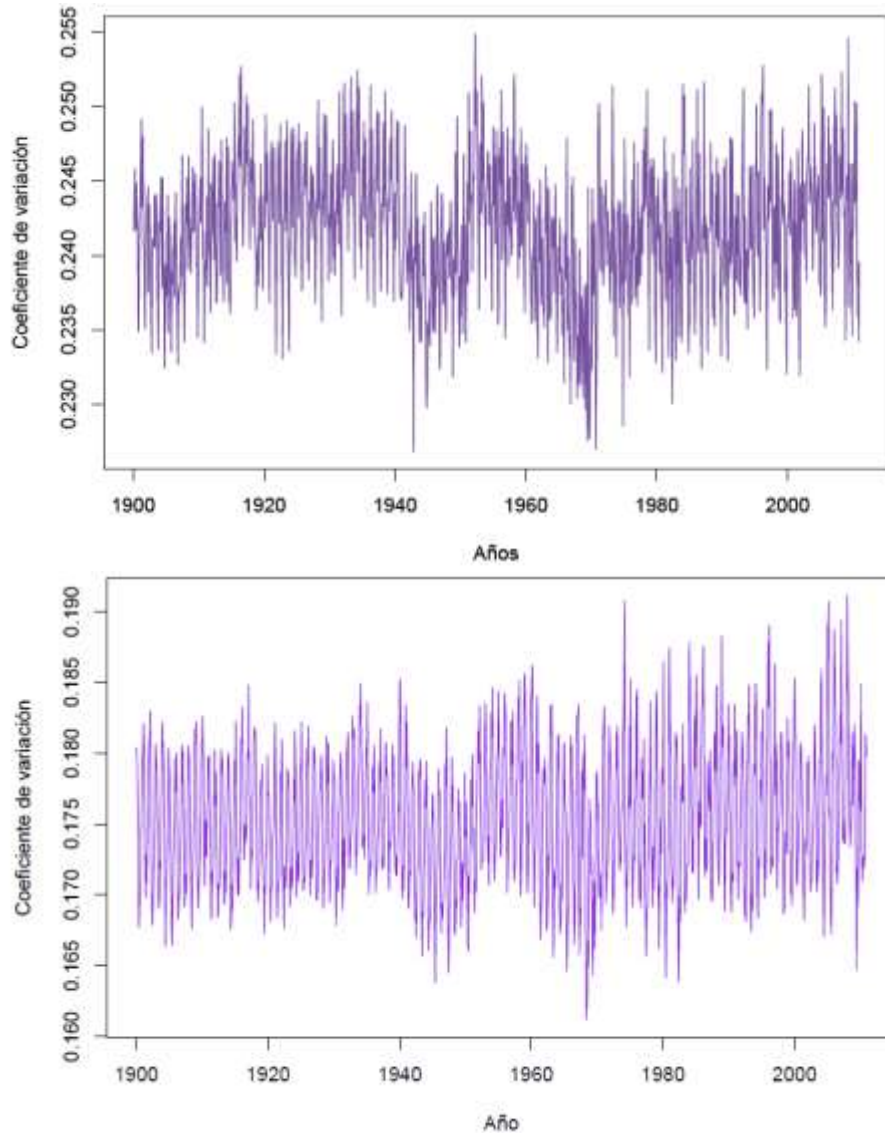
Gráfica 1. Variabilidad de la temperatura mensual 1900-2010 en Cuenca Nariño (arriba), Cuenca Calamar (mitad) y Colombia (abajo). Fuente: Elaboración propia



Gráfica 2. Variabilidad de la precipitación mensual 1900-2010 en Cuenca Nariño (arriba), Cuenca Calamar (mitad) y Colombia (abajo). Fuente: Elaboración propia

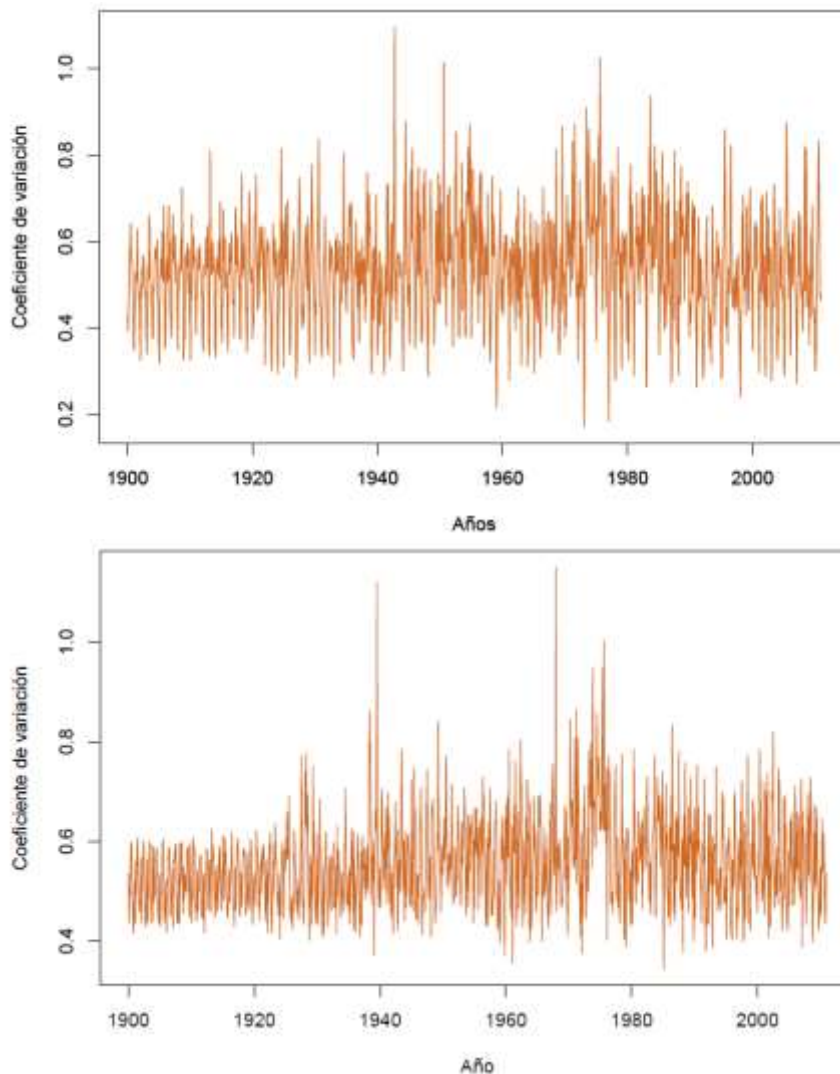
Con el fin de dar más información al lector acerca de los valores a partir de los cuales se calcularon los medios mensuales mostrados arriba, se muestra el coeficiente de variación espacial de tales valores para la temperatura (Gráfica 3) y la precipitación (Gráfica 4). El coeficiente de variación fue calculado según lo indicado en 6.2.5 y se muestra para Cuenca Calamar y Colombia.

El coeficiente de variación de la temperatura es por supuesto mucho menor que el de la precipitación. Sin embargo, resulta interesante el hecho de que la base de datos presente mayor dispersión de información al interior de la Cuenca Calamar que en toda de Colombia. Esto puede estar relacionado con el hecho que existen grandes zonas planas al este del país con valores de precipitación relativamente constantes en el espacio.



Gráfica 3. Coeficiente de variación mensual de diferentes valores mensuales de temperatura encontrados al interior la Cuenca Calamar (arriba) y Colombia (abajo). Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la precipitación, se observan mayores dispersiones de la base de datos alrededor de la década de 1940 y de 1970. Esto puede deberse a la inclusión de mayor número de estaciones de medición de precipitación durante estos periodos.



Gráfica 4. Coeficiente de variación mensual de diferentes valores mensuales de precipitación encontrados al interior la Cuenca Calamar (arriba) y Colombia (abajo). Fuente: Elaboración propia

La frecuencia de la información calculada (valores promedio) permite calcular medianas mensuales multianuales de precipitación y temperatura. Así, se puede notar (Figura 27) que el ciclo anual de precipitación es bimodal en Cuenca Calamar, con Mayo y Octubre como los meses más lluviosos y Febrero y Junio como los de menos precipitación. La misma tendencia se puede observar para Colombia, con la excepción de que el periodo más seco de mitad de año se presenta en Agosto. Cuenca Nariño muestra una distribución diferente al respecto, pues a pesar de ser igualmente bimodal, presenta como los meses más lluviosos Abril y Noviembre. Se puede ver igualmente que en Cuenca Nariño, exceptuando los meses de julio y agosto, los datos son más dispersos, al existir una mayor diferencia de valor entre el primer cuartil y el tercero.

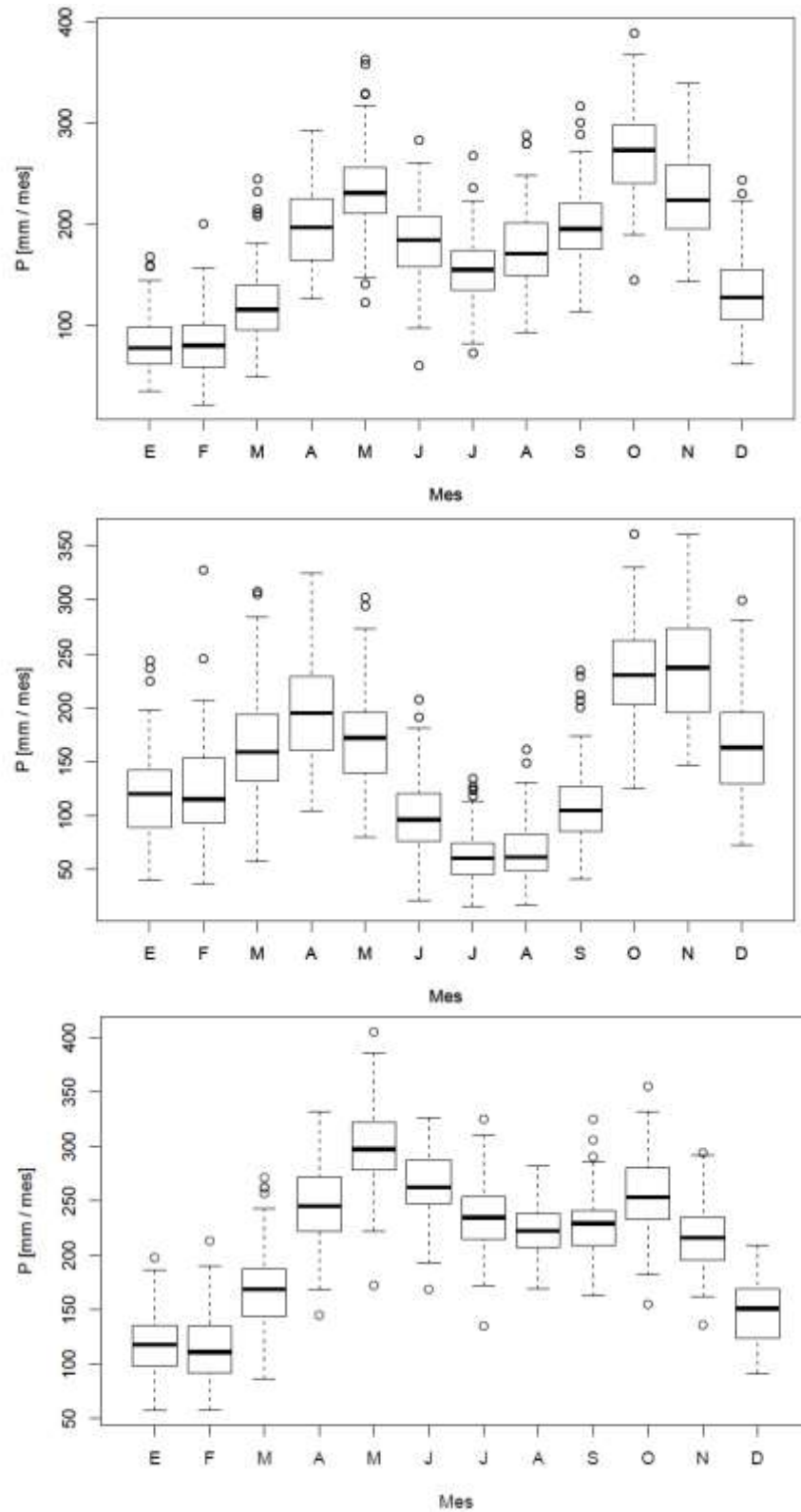


Figura 27. Ciclo anual de precipitación para: Cuenca Calamar (arriba), Cuenca Nariño (mitad), Colombia (abajo). Fuente: Elaboración propia

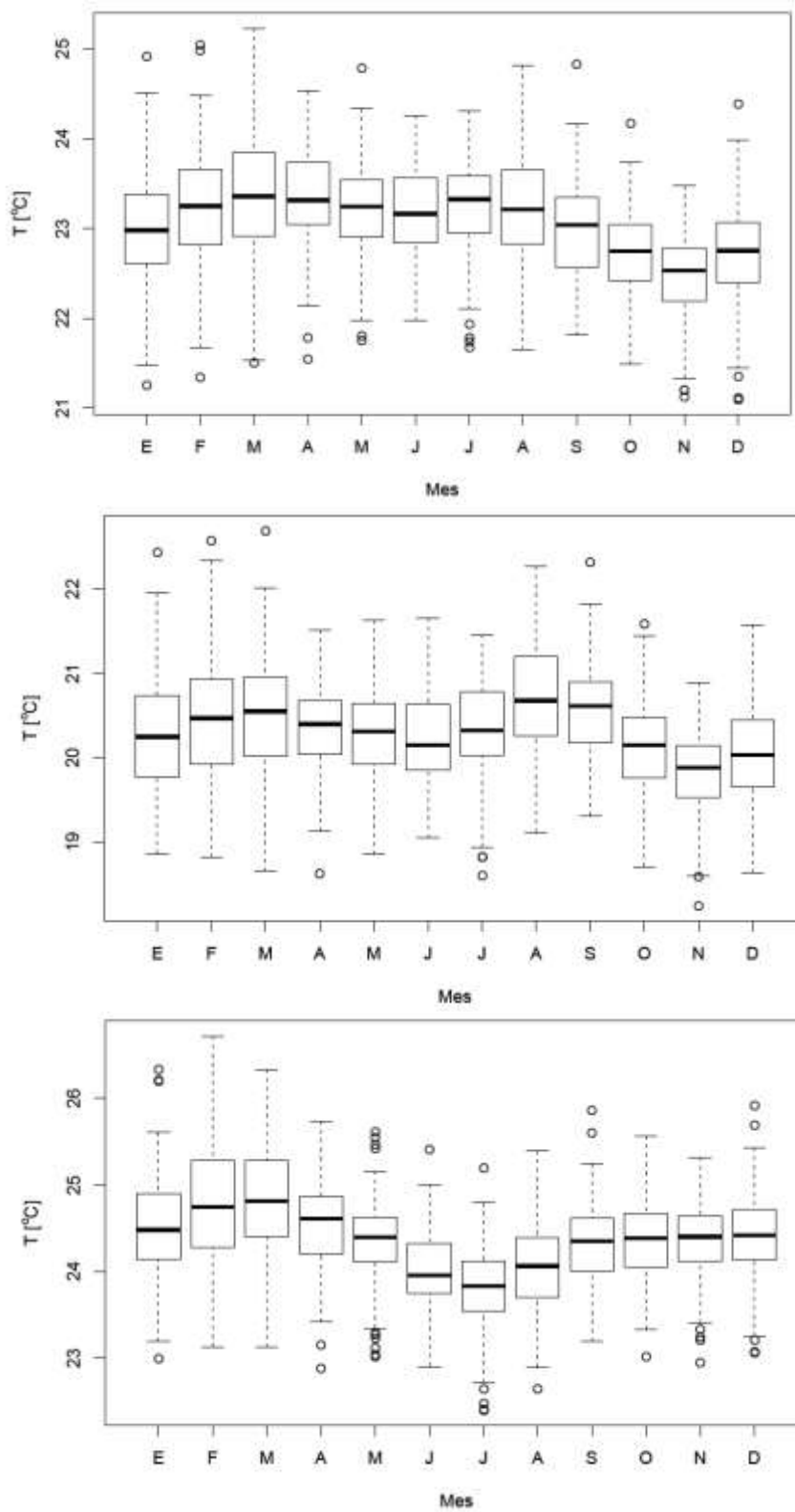
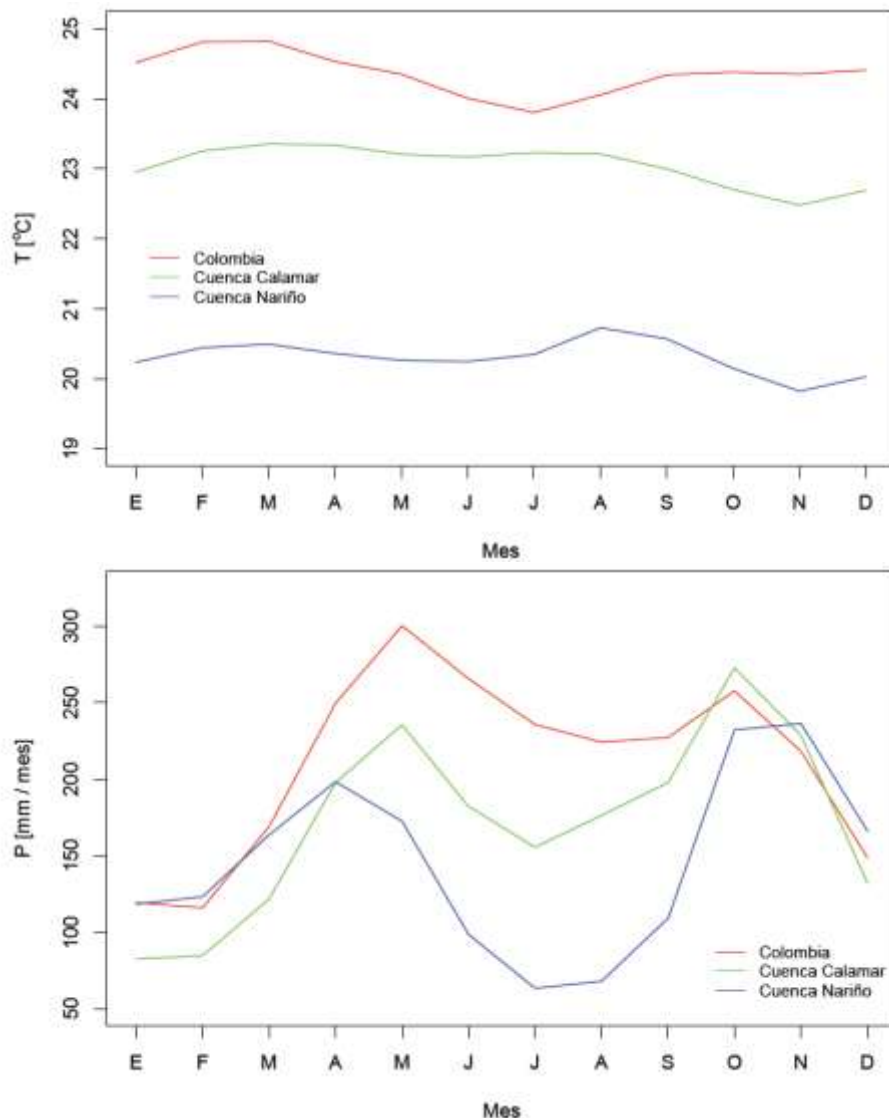


Figura 28. Ciclo anual de temperatura para: Cuenca Calamar (arriba), Cuenca Nariño (mitad), Colombia (abajo). Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los ciclos anuales de temperatura (Figura 28) el ciclo anual en las dos cuencas y el país no puede considerarse modal; en general, estos ciclos no muestran una tendencia clara en cuanto a periodos se trata. Igualmente, no se encuentran claras similitudes entre los ciclos de las cuencas de estudio y Colombia, esto claro debido a la gran variedad de zonas geográficas y pisos térmicos que se encuentran en el país, que derivan en ciclos de temperatura especialmente variados.

Los ciclos anuales de temperatura y precipitación (con valores medios) de Cuenca Calamar, Cuenca Nariño y Colombia, pueden observarse con mayor claridad en Gráfica 5. Se observa allí que los ciclos de precipitación para las tres áreas son similares, mientras que en la temperatura existen mayores semejanzas entre las dos cuencas. La gran diferencia de precipitación entre Cuenca Calamar y Cuenca Nariño se debe a la gran cantidad de zonas planas, y de altas temperaturas, que posee la primera de ellas.

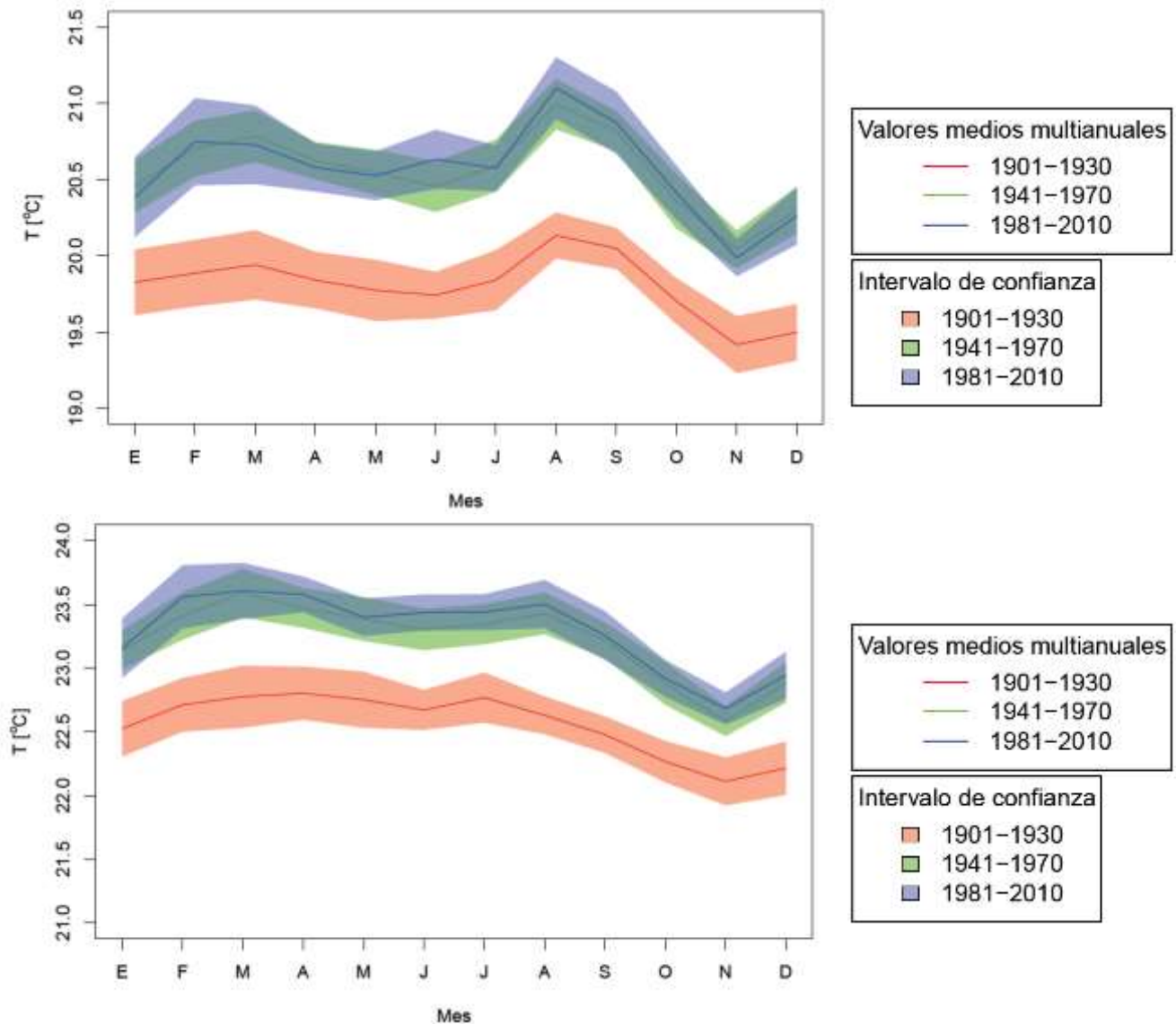


Gráfica 5. Comparación ciclo anual de temperatura (arriba) y de ciclo anual de precipitación (abajo), entre de Cuenca Calamar, Cuenca Nariño y Colombia. Fuente: Elaboración propia

7.2 Comparación entre ventanas temporales

Teniendo en cuenta la cobertura temporal de la base de datos de la Universidad de Delaware y en búsqueda de la evaluación del cambio en la precipitación y en la temperatura, se utilizan periodos de 30 años (o ventanas temporales) para que la media y la desviación estándar tengan un número suficiente de datos para ser calculados.

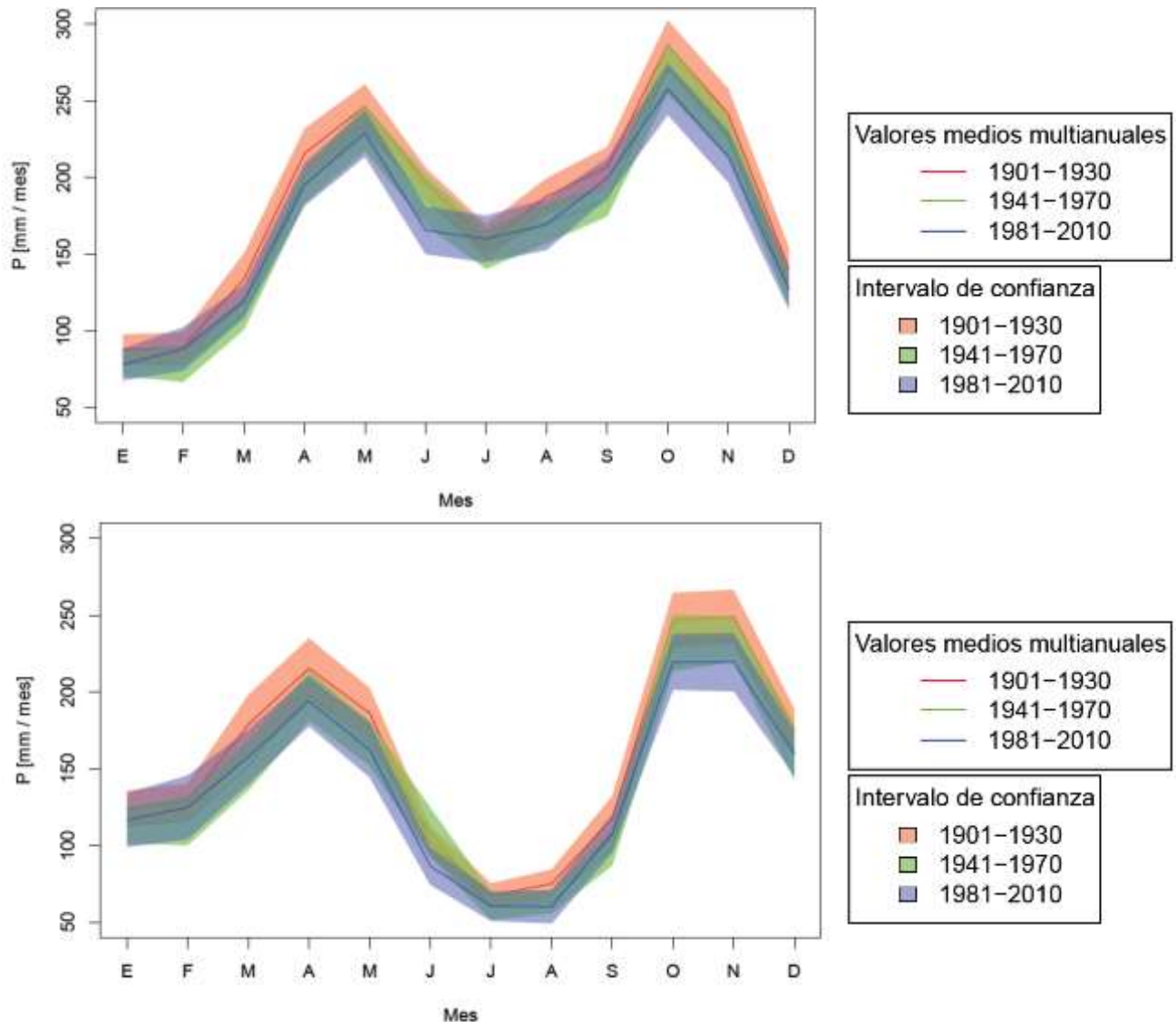
Así, se escogen tres ventanas temporales para saber si existen cambios de las variables en cuestión en todo el país, y lograr establecer a la vez en qué momento del siglo se presentó el mayor cambio. Las ventanas temporales definidas son: 1901-1930, 1941-1970 y 1981-2010.



Gráfica 6. Temperatura mensual multianual en tres ventanas temporales para Cuenca Nariño (arriba) y Cuenca Calamar (abajo). Fuente: Elaboración propia

Se muestra en Gráfica 6 y Gráfica 7, los ciclos anuales de temperatura y precipitación de las dos cuencas de estudio, para las tres ventanas temporales definidas. Las zonas sombreadas indican los

intervalos de confianza de cada ciclo para poder establecer si los valores mensuales entre ventanas pueden llegar a considerarse los mismos o no. Los intervalos fueron calculados usando distribución normal y con un nivel de confianza del 95%.



Gráfica 7. Precipitación mensual multianual en tres ventanas temporales para Cuenca Nariño (arriba) y Cuenca Calamar (abajo). Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la temperatura, se observa que no se presentó cambio en la segunda mitad del siglo (diferencia entre 1941-1970 y 1981-2010). Sin embargo, se evidencia un cambio en la primera mitad (diferencia entre 1901-1930 y 1941-1970) de alrededor de 0.5°C. La precipitación por su parte, no muestra cambio de magnitud entre las ventanas temporales, al encontrarse los valores medio de cada una de ellas, dentro de los intervalos de confianza de las que las suceden.

Los valores medios de precipitación y temperatura mensual por ventana temporal para Colombia, incluida parte de la zona de la Amazonía y en general el área comprendida entre las longitudes 65°W - 80°W y las latitudes 5°S y 15°N, será mostrada en los numerales 7.2.1y 7.2.2. Allí se mostrarán las diferencias entre ventanas temporales teniendo en cuenta la variabilidad espacial

con una precisión de 0.5°. Para esos cálculos no se empleó la información obtenida según 6.2.5, la base de datos fue tratada directamente desde R empleando las librerías “ncdf” y “mapproj”.

Se mostrarán entonces, en los numerales indicados, los mapas con la variabilidad espacial de los valores promedios multianuales de temperatura y precipitación por ventana temporal. Luego se mostrarán las diferencias de magnitud presentadas a lo largo de todo el siglo, discriminando a la vez, la primera mitad de la segunda; estas diferencias también serán mostradas en forma de porcentajes del valor inicial. La desviación estándar de los valores anuales que permiten obtener las diferencias con las que se evaluará el cambio, también serán mostradas.

7.2.1 Temperatura

Para cada una de las ventanas se construyó un mapa indicando el valor promedio espacial de temperatura. En la Figura 30 se puede visualizar la distribución espacial de la variabilidad de la temperatura, notándose cómo la base de datos diferencia de forma acertada las zonas montañosas de las zonas planas en el país. Se puede presumir además que se ha presentado un calentamiento en la zona suroriental de Colombia y en la Amazonía, a lo largo del siglo.

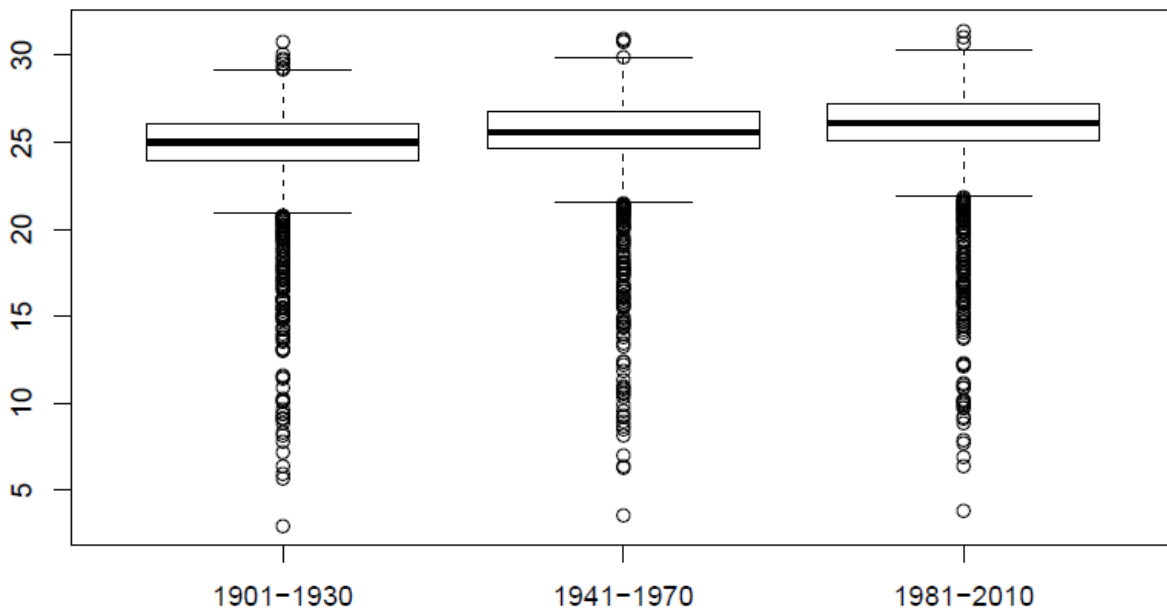


Figura 29. Diagramas de caja de promedios de temperatura multianuales (°C) para las distintas ventanas temporales. Fuente: Elaboración propia

En Figura 29 se observan los diagramas de caja de los valores medios de temperatura por ventana temporal. Allí se puede notar que se ha presentado un aumento en la magnitud de todos los cuartiles y que las temperaturas menores a 20° no representan un porcentaje representativo dentro de ninguna de las series, distinguiéndose incluso por ser valores atípicos.

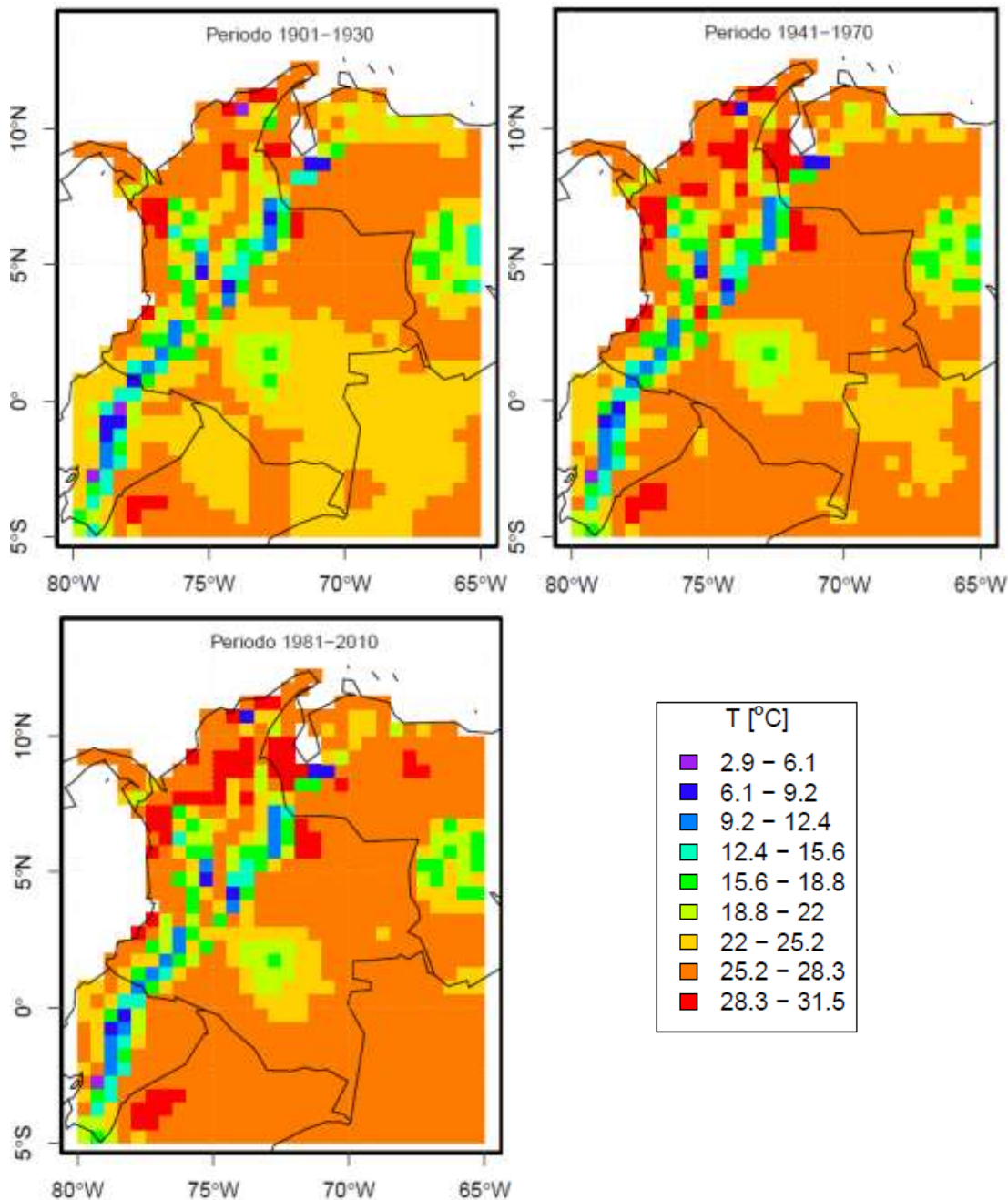


Figura 30. Mapa de promedios de temperatura multianuales para los periodos 1901-1930 (arriba-izquierda), 1941-1970 (arriba-derecha) y 1981-2010 (abajo-izquierda). Fuente: Elaboración propia

Los valores medios de temperatura a partir de los cuales fueron obtenidos los promedios por venta temporal mostrados en Figura 30, presentan una desviación estándar mostrada por cada periodo en Figura 31. Las desviaciones estándar de mayor magnitud se encuentran en la dos últimas ventanas temporales, esto se considera ocurre debido al posible incremento de estaciones de medición durante estos periodos, que ocasiona que la interpolación realizada por la base de datos posea mayor cantidad de puntos y produzca valores más dispersos que los encontrados en la primera ventana

temporal. La mayor magnitud de dispersión parece encontrarse en los departamentos de Putumayo y Santander.

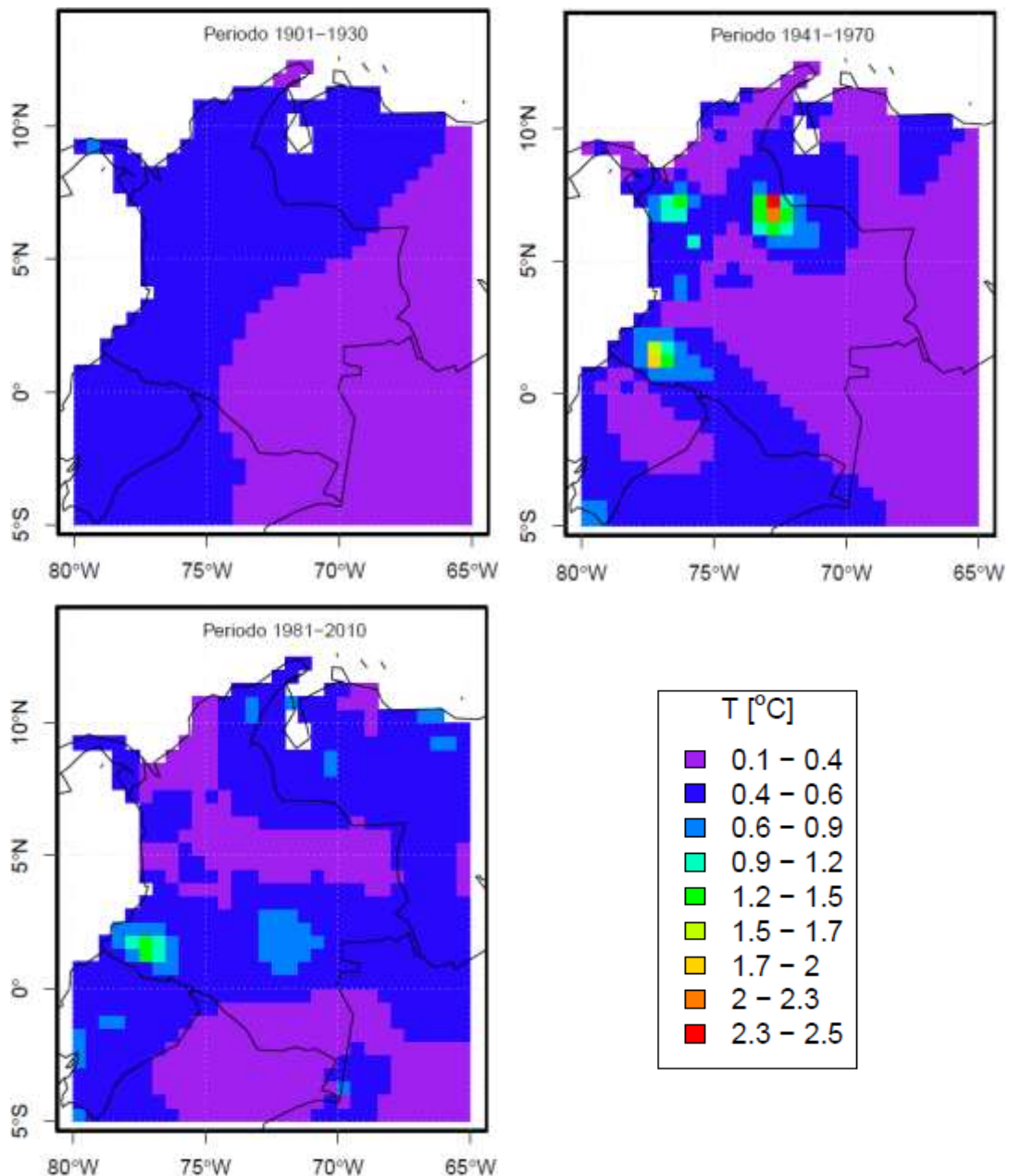


Figura 31. Desviación estándar de la serie de valores medios anuales para los periodos 1901-1930 (arriba-izquierda), 1941-1970 (arriba-derecha) y 1981-2010 (abajo-izquierda). Fuente: Elaboración propia

Las diferencias obtenidas tras restar los valores promedio de temperatura de la misma área en dos ventanas temporales son mostradas en Figura 32, a la ventana más reciente le fue restada la menos reciente. Allí se puede notar, cómo las mayores diferencias se presentaron en la primera mitad del siglo, llegando a ser de 0.5°C a 1.2°C de aumento, que es prácticamente la totalidad de cambio presentada a 2010. Las mayores

diferencias, tras el transcurso del siglo, pueden observarse en el área de la Amazonía y en la zona oriental de Venezuela, alcanzando valores de aumento de 2.1°C. En la zona central de Colombia se encuentran diferencias negativas en la segunda mitad del siglo del orden de 0.5°C, ocasionando que no se hayan presentado cambios significativos al final del siglo, a pesar de mostrar aumentos significativos en la primera parte de este.

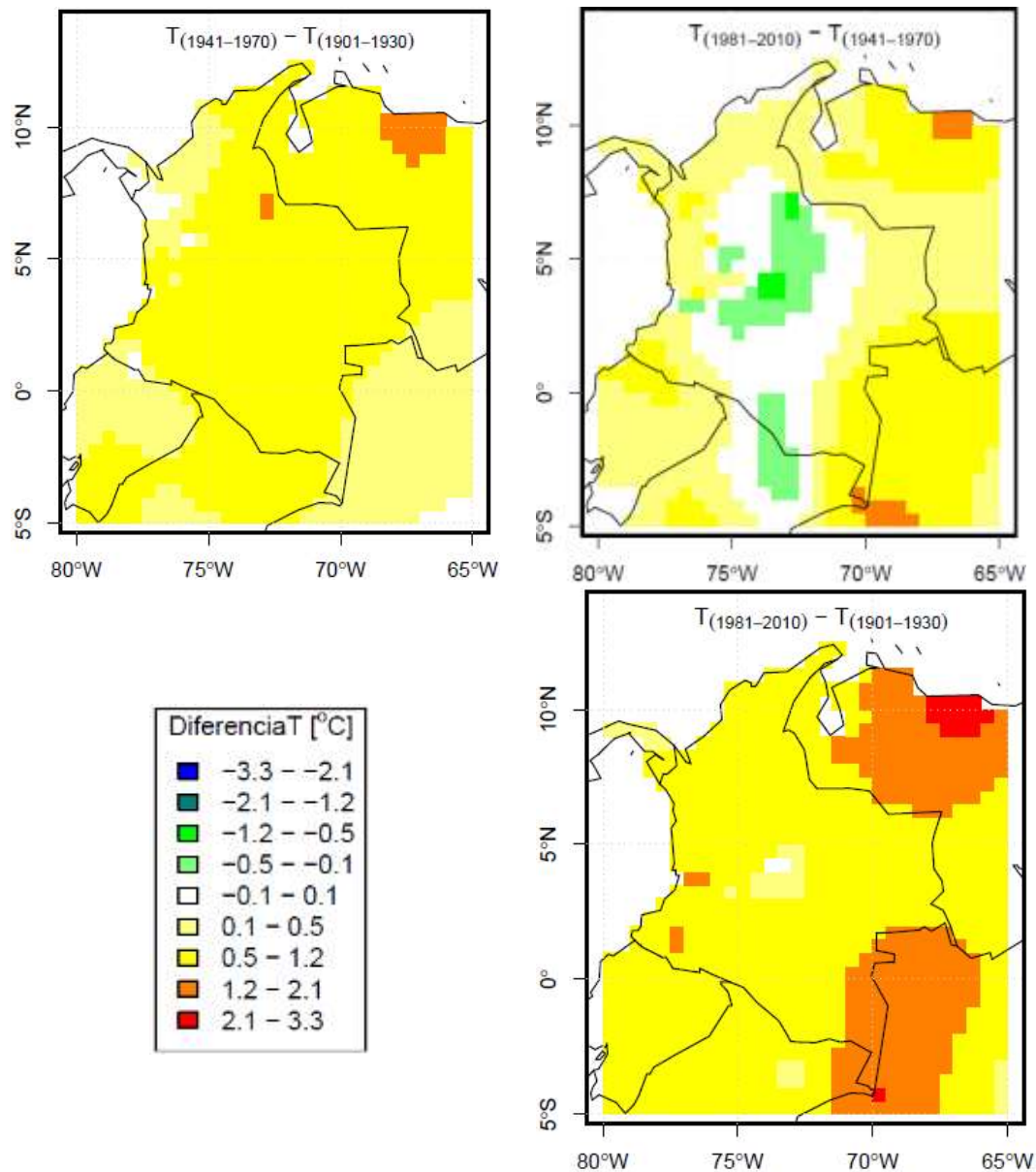


Figura 32. Mapa de diferencias de temperatura media multianual para la primera mitad del siglo (arriba-izquierda), segunda mitad (arriba-derecha) y la totalidad del siglo (abajo-derecha). Fuente: Elaboración propia

En Figura 33, se pueden ver gráficamente los cuartiles de las diferencias calculadas en las dos mitades del siglo. En la primera mitad del siglo se presentan únicamente aumentos de temperatura, mientras en la segunda se presentan aumentos y disminuciones equivalentes a un 20% o 25% de los datos. La diferencias entre los

cuartiles del 25% y del 75% para la segunda mitad del siglo, permite inferir que estas diferencias se encuentran más dispersas en el territorio.

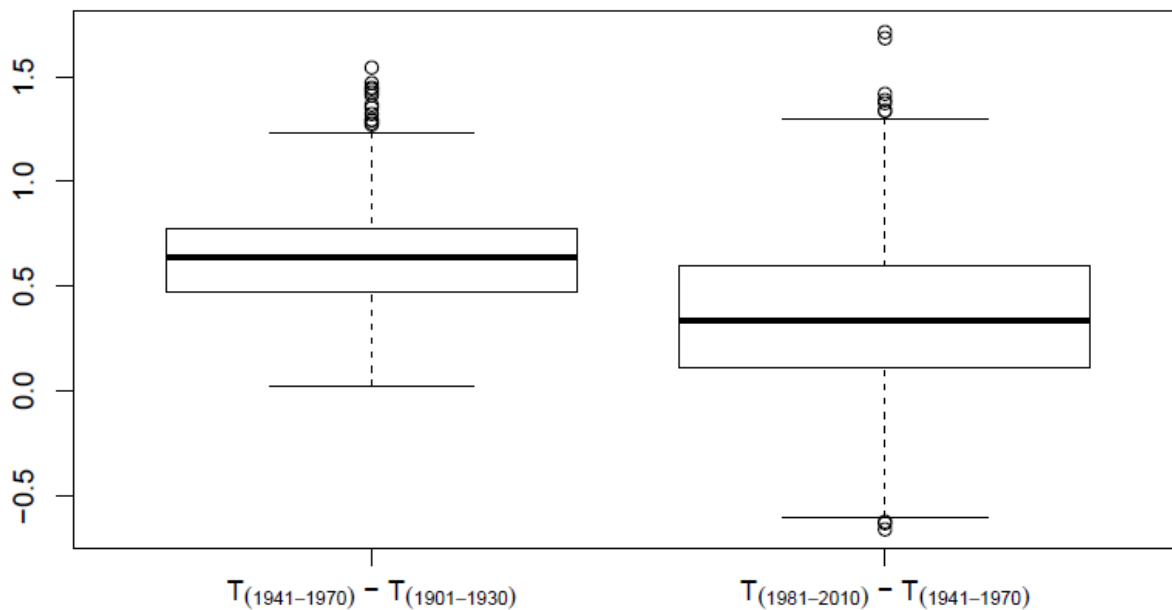


Figura 33. Diagrama de caja de diferencias de temperatura media entre ventanas temporales.
Fuente: Elaboración propia

7.2.2 Precipitación

Fue construido un mapa por ventana temporal indicando el valor promedio de precipitación con precisión de 0.5° . En la Figura 34 se puede visualizar la distribución espacial de esta variable. Resulta interesante el hecho de que precipitaciones bajas se presenten sobre la cordillera oriental, que se esperaba fueran mayores por pertenecer a un área montañosa. Las zonas más lluviosas, como la Amazonía y la costa sobre el Pacífico, son diferenciadas adecuadamente por la base de datos.

Los valores medios de temperatura a partir de los cuales fueron obtenidos los promedios por venta temporal mostrados en Figura 34, presentan una desviación estándar mostrada por cada ventana en Figura 35. Al igual que con la temperatura, las desviaciones estándar de mayor magnitud se encuentran en la dos últimas ventanas temporales, esto se atribuye al incremento de estaciones de medición durante estos periodos. La mayor magnitud de desviación estándar se encuentra en la zona de la Amazonía, incluyendo al norte de Perú y en departamento del Chocó; estas son las zonas más lluviosas y por lo tanto van a estar más alejadas del valor medio mensual de precipitación calculado y usado en este trabajo para la estimación de cambio.

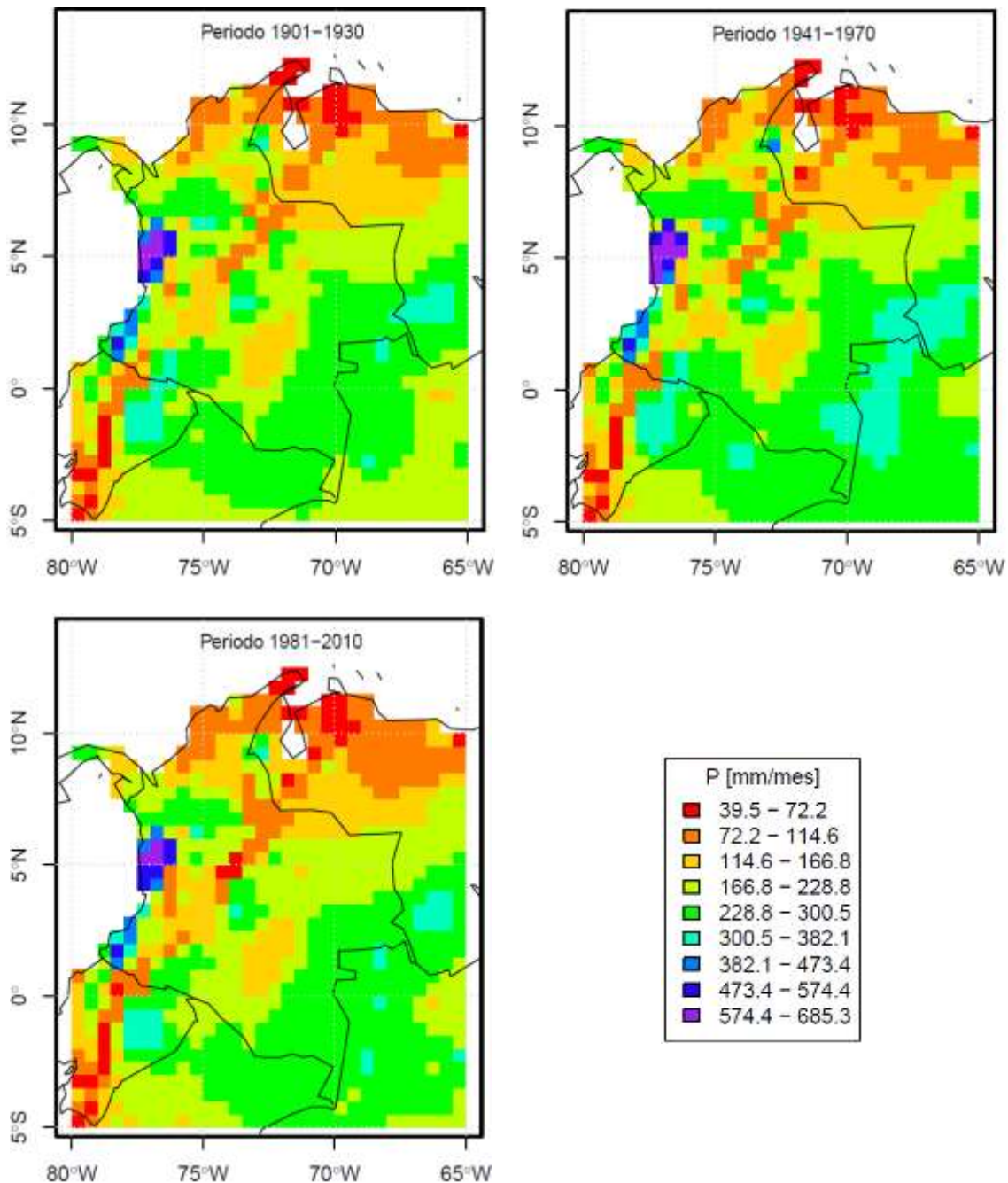


Figura 34. Mapa de promedios de precipitación multianuales (mm/mes) para los periodos 1901-1930 (arriba-izquierda), 1941-1970 (arriba-derecha) y 1981-2010 (abajo-izquierda). Fuente: Elaboración propia

En Figura 36 se observan los diagramas de caja de los valores medios de precipitación por ventana temporal. No se observa tendencia de aumento en la magnitud de los cuartiles, distinguiéndose los de la mitad del siglo por ser los mayores. Contrario a la temperatura, los valores atípicos de precipitación parecen ubicarse por encima del tercer cuartil, correspondientes estos por supuesto a las ya mencionadas zonas

lluviosas de Amazonía y Chocó. La mitad de los datos de cada serie se encuentra ubicada prácticamente entre los 150 y 250 mm/mes.

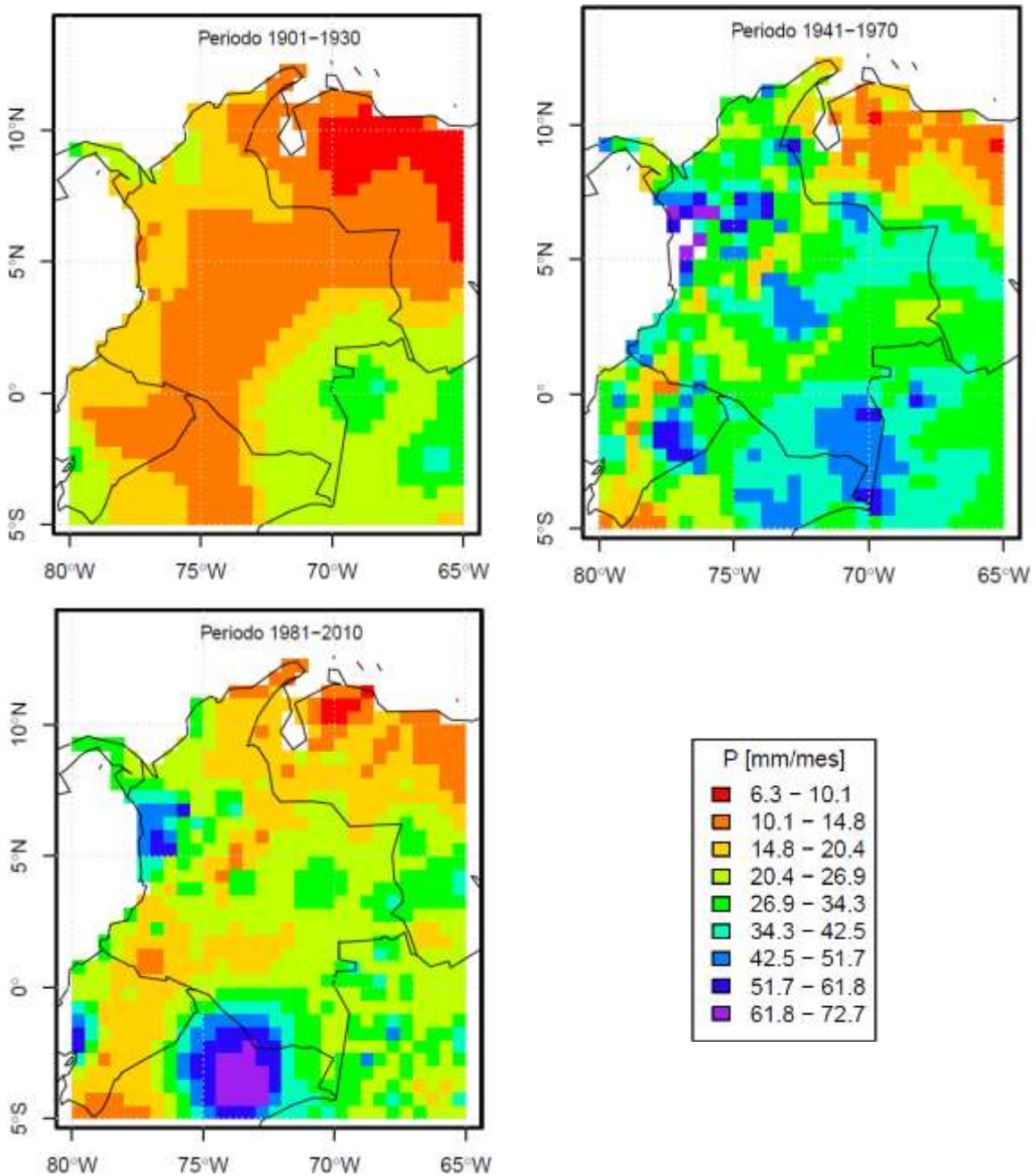


Figura 35. Desviación estándar de la serie de valores medios anuales para los periodos 1901-1930 (arriba-izquierda), 1941-1970 (arriba-derecha) y 1981-2010 (abajo-izquierda). Fuente: Elaboración propia

Fueron obtenidas diferencias de valores de precipitación tras restar los valores de cada pixel entre ventanas temporales, a la ventana más reciente le fue restada la menos reciente. Se puede observar la variabilidad espacial es de estas diferencias en Figura 38

y esa misma diferencia presentada como porcentaje del valor inicial (correspondiente) se muestra en Figura 39.

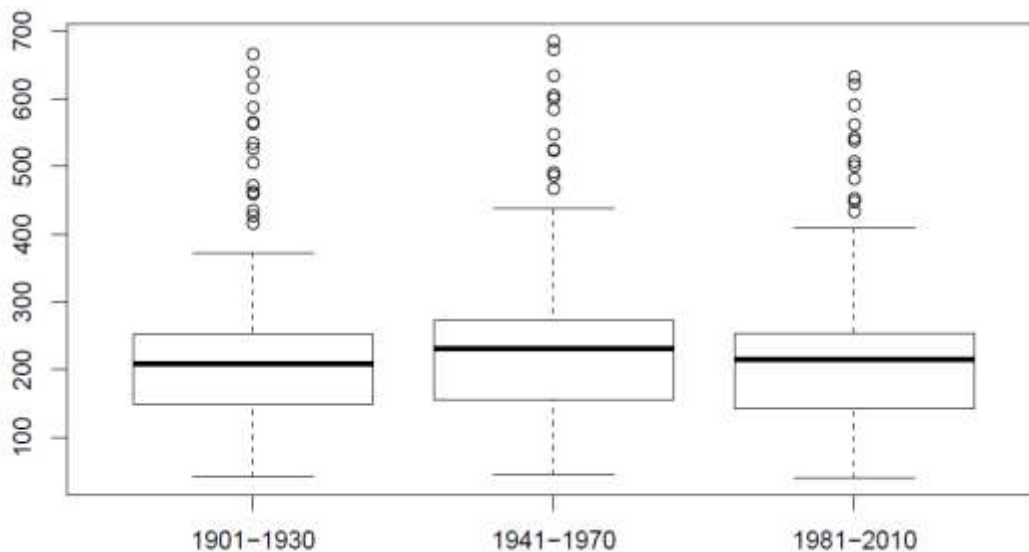


Figura 36. Diagramas de caja de promedios de precipitación multianuales (mm/mes) para las distintas ventanas temporales. Fuente: Elaboración propia

En términos generales se presentó un aumento de precipitación en la Amazonía y una disminución en las cordilleras del país y más notoriamente en la costa pacífica. En la zona de la Amazonía se observan diferencias positivas de más 37 mm/mes en la primera mitad del siglo. En este mismo periodo, se presentó una aumento de 2.3 a 20.8 mm/mes en la mayoría de zonas planas del país, mientras que en gran parte de las cordilleras se presentó una disminución de la precipitación que del inicio al fin del siglo alcanzó de unos 9.3 a 20.8 mm/mes.

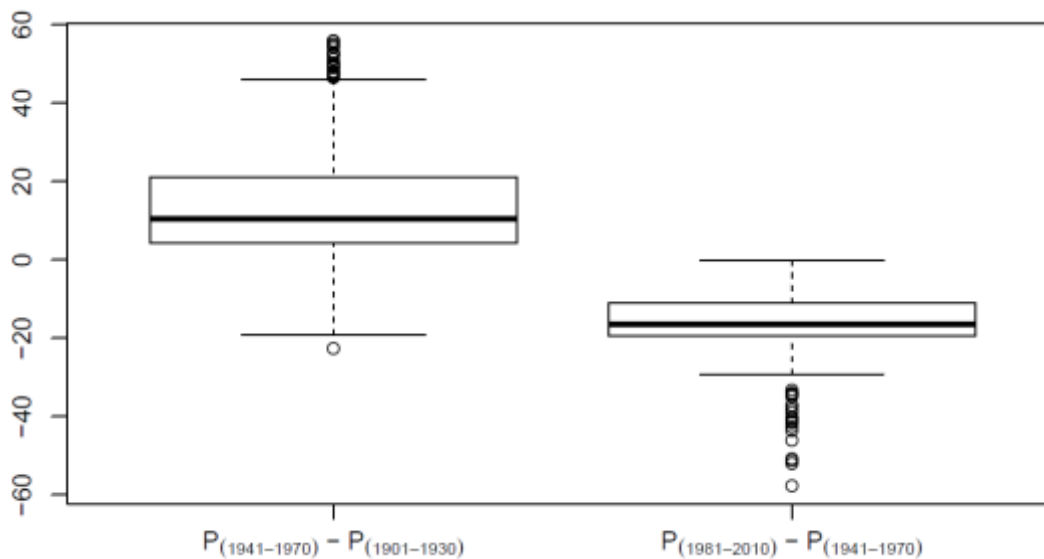


Figura 37. Diagrama de cada de diferencias de precipitación media entre ventanas temporales. Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, las diferencias no presentaron la misma tendencia en las dos mitades del siglo, como se observa en Figura 37, en la primera mitad más del 75% de los datos evidenció aumento de precipitación, mientras que en la segunda se presentaron únicamente disminuciones. Más del 50% de los aumentos no excedieron los 20 mm/mes en la primera mitad, presentándose valores atípicos de más de 40 mm/mes en la parte norte de Chocó y Amazonía. En la segunda mitad, más del 50% de las disminuciones tampoco excedieron los 20mm/mes, presentándose disminuciones atípicas muy altas en la parte central del Chocó y la zona sur de la cordillera occidental.

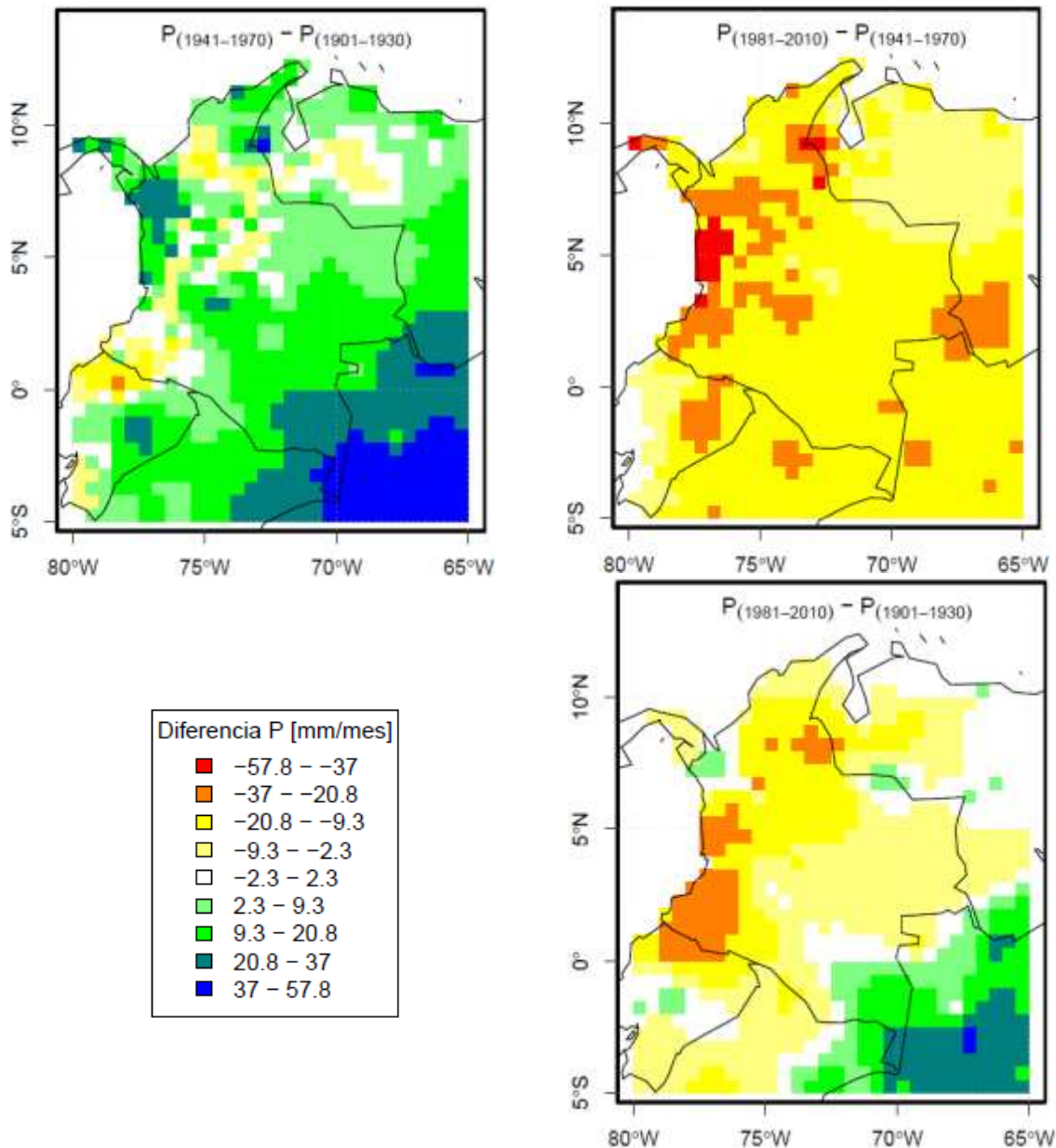


Figura 38. Mapa de diferencias de temperatura media multianual para la primera mitad del siglo (arriba-izquierda), segunda mitad (arriba-derecha) y la totalidad del siglo (abajo-izquierda). Fuente: Elaboración propia

Realizando un balance general de los ocurrido de principio a fin de siglo con la precipitación, se puede decir que se presentaron disminuciones de alrededor de 15% en las áreas pertenecientes a las cordilleras, departamentos de Putumayo, Norte de Santander y sur de Bolívar, mientras se evidenciaron aumentos de un 15% en la zona sur del departamento de la Amazonía.

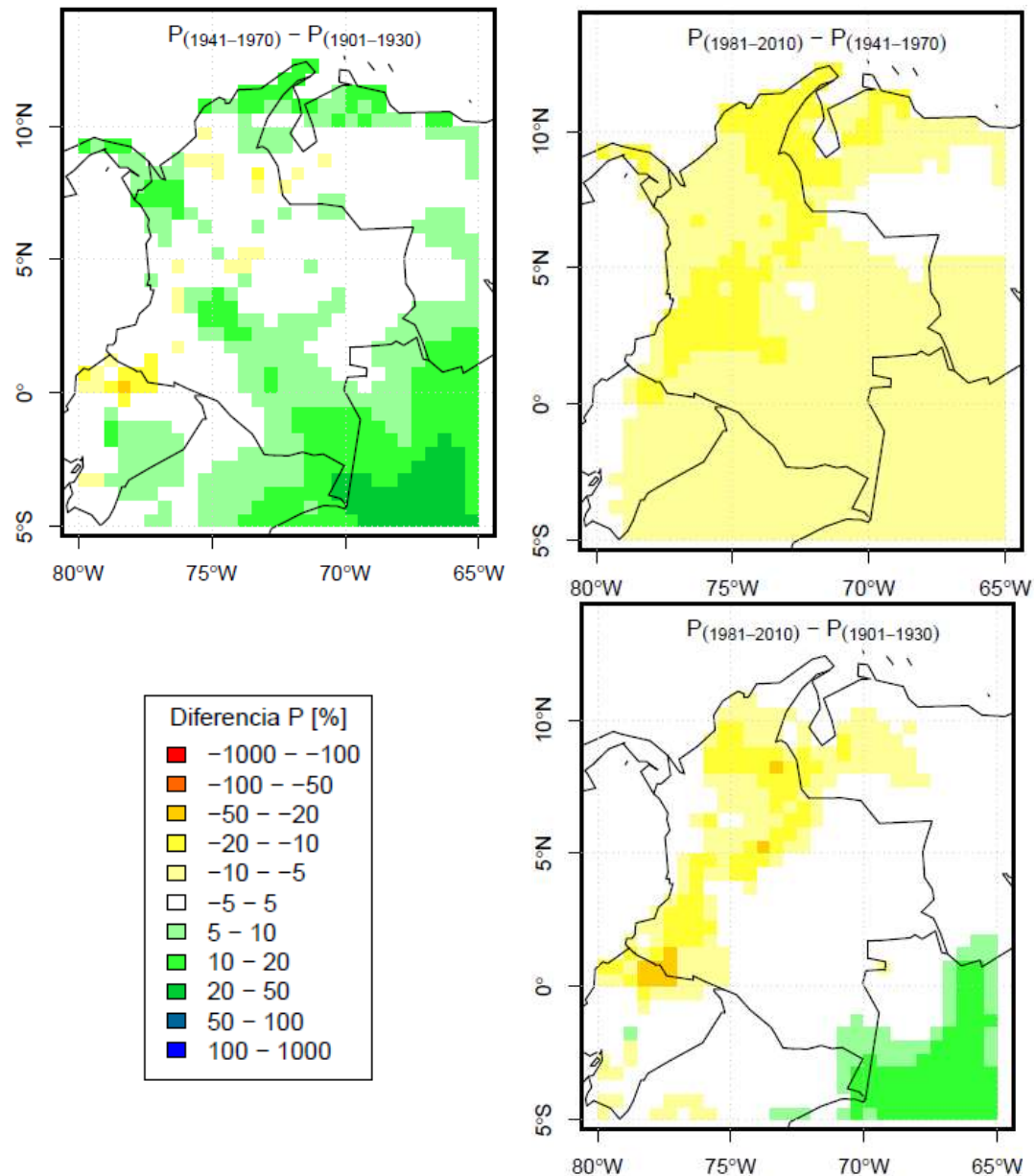
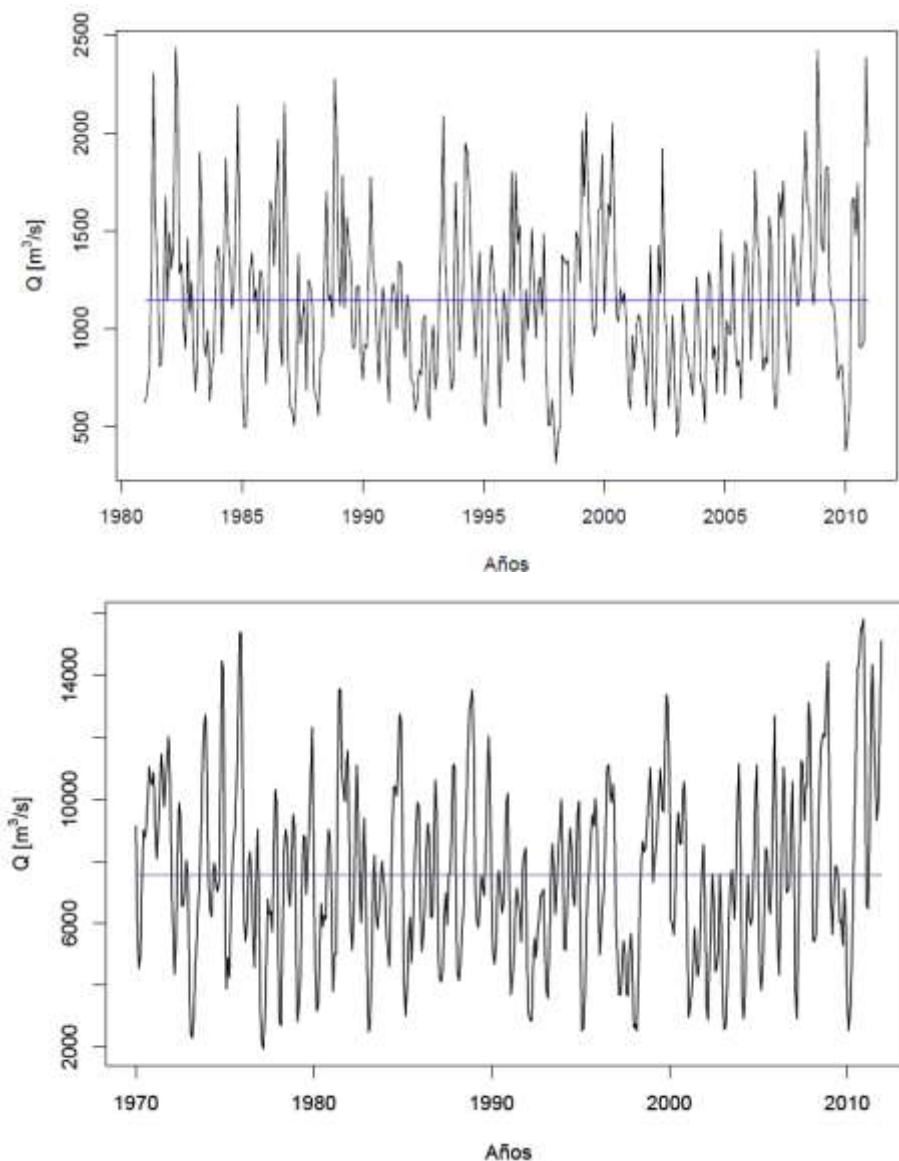


Figura 39. Mapa de diferencias porcentuales de precipitación media multianual para la primera mitad del siglo (arriba-izquierda), segunda mitad (arriba-derecha) y la totalidad del siglo (abajo-izquierda). Fuente: Elaboración propia

7.3 Relación entre precipitación, temperatura y caudal

Las estaciones de medición de caudal a partir de las cuales fueron definidas Cuenca Nariño y Cuenca Calamar poseen datos mensuales de caudales del periodo 1981-2010 y 1970-2011, respectivamente. Estas series presentaban vacíos sobre todo entre los años 2001 y 2003, que fueron llenados empleando información de estaciones de medición cercanas. El caudal medio multianual para Cuenca Nariño es de $1144.3 \text{ m}^3/\text{s}$ y el de Cuenca Calamar de $7546.4 \text{ m}^3/\text{s}$.



Gráfica 8. Variabilidad de los caudales de salida: Cuenca Nariño 1981-2010 (arriba) y Cuenca Calamar 1970-2011 (abajo). Fuente: Elaboración propia

Uno de los propósitos centrales de este trabajo es establecer una relación entre los caudales y los cambios en la precipitación y la temperatura. Para tal fin, se relacionan en primer lugar los cambios (Δ) de las tres variables en la misma fecha de ocurrencia, entendiéndose el cambio como la diferencia entre la media calculada y el valor presentado (ver ecuación (XVII)). La relación, por coincidencia de fecha, entre los cambios de las tres variables, es mostrada en Figura 40.

$$\Delta P = P_i - P_{\text{media}}$$

$$\Delta T = T_i - T_{\text{media}} \quad (\text{XVII})$$

$$\Delta Q = Q_i - Q_{\text{media}}$$

Se puede observar como los cambios de caudal ΔQ negativos están asociados en general, y para las dos cuencas, con ΔP negativos y ΔT positivos, indicando que el caudal disminuye cuando se presentan incrementos en la temperatura y disminución en la precipitación, una idea coherente si se tiene en cuenta la reducción que se genera en la Escorrentía por disminución de lluvias y aumento de la Evapotranspiración, representada aquí indirectamente por la temperatura.

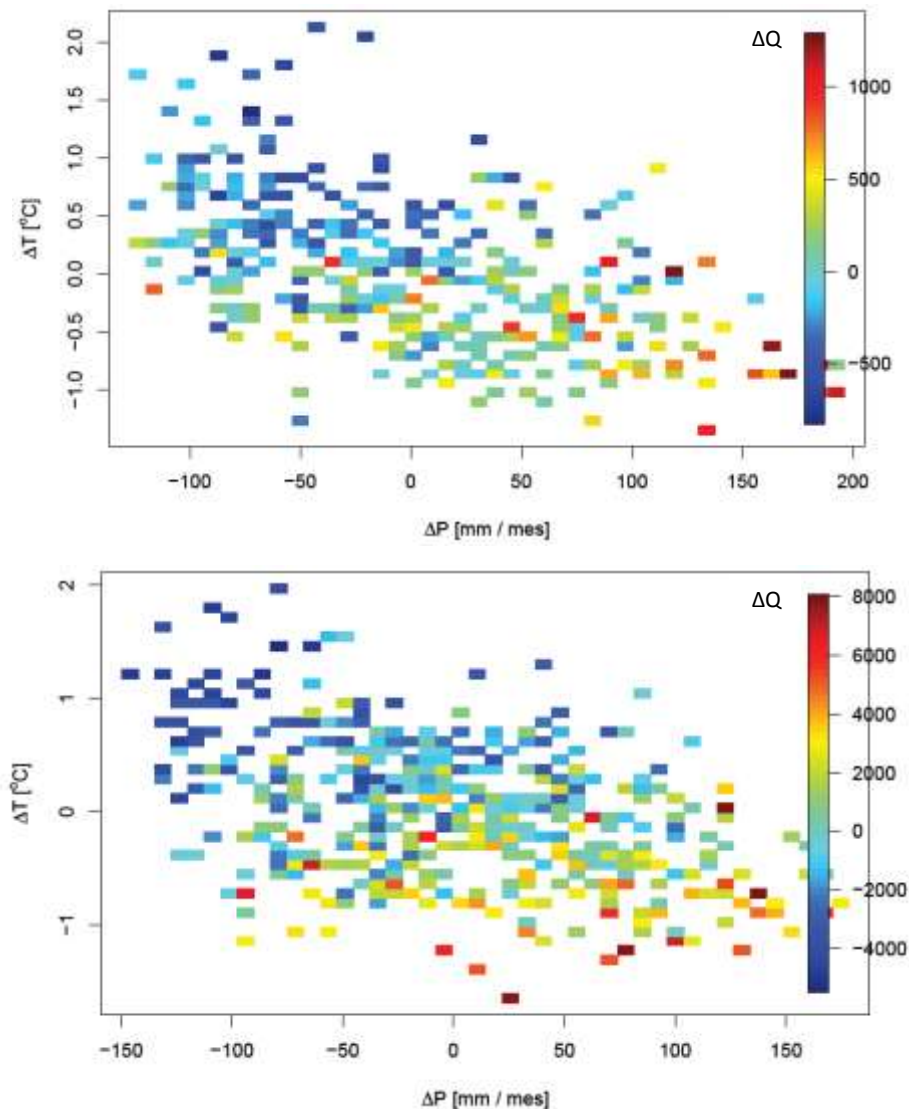
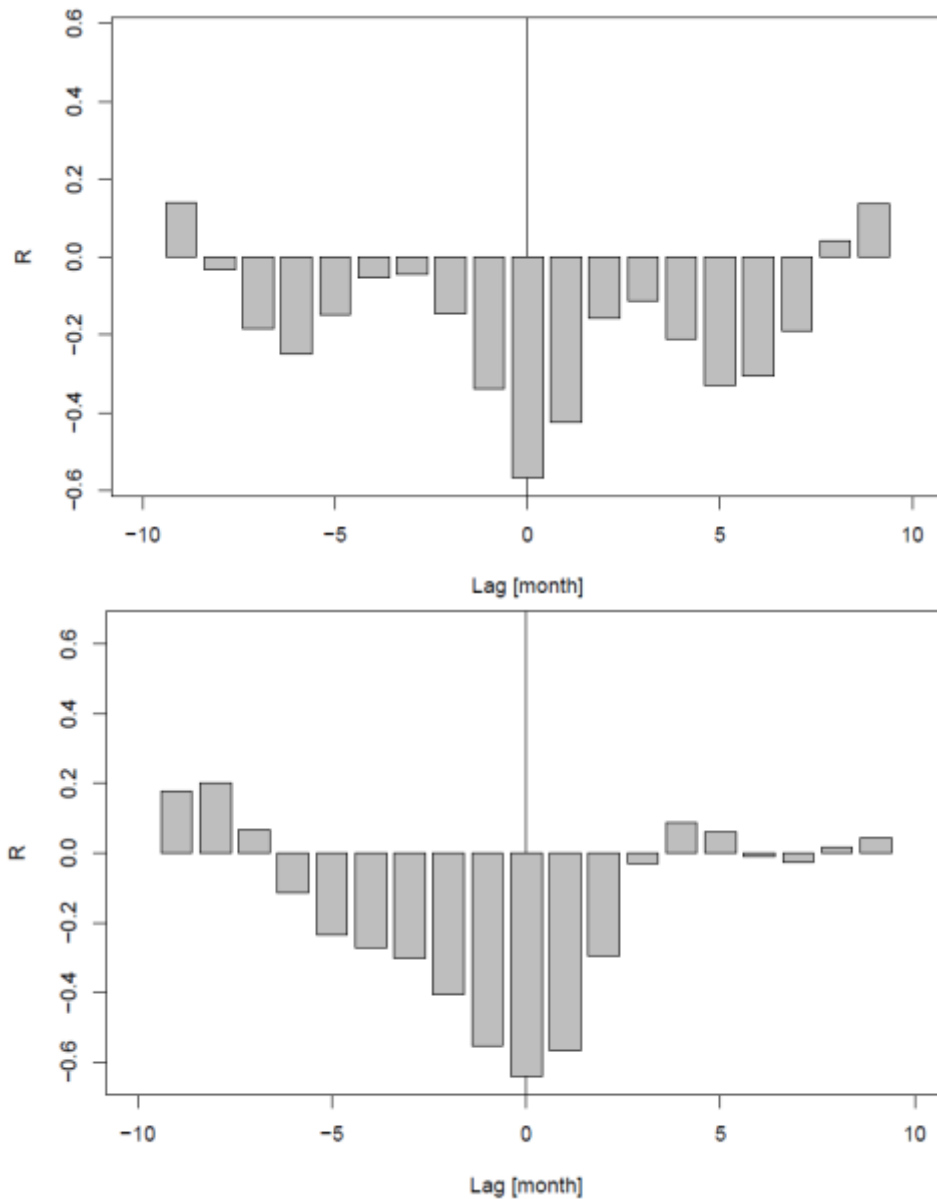


Figura 40. Variabilidad de los cambios en los caudales de salida (representado por la escala de colores), con la variabilidad de la precipitación y la temperatura al interior de las mismas: Cuenca Nariño 1981-2010 (arriba) y Cuenca Calamar 1970-2011 (abajo). Fuente: Elaboración propia

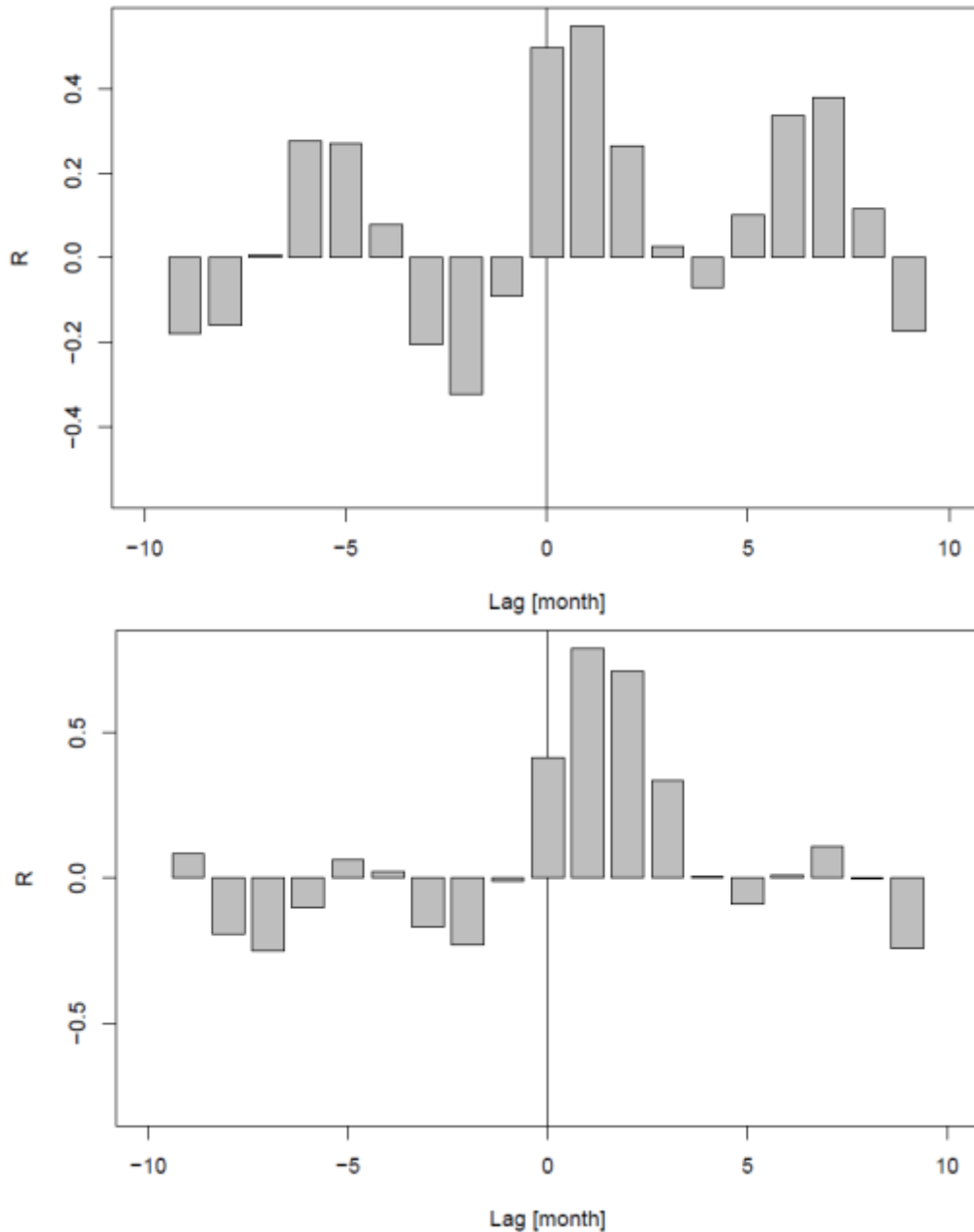
Los ΔQ positivos y de mayor valor, se ven asociados por su parte a ΔP positivos y ΔT negativos, asociado esto a razones opuestas a las dadas para el caso anterior.

Por otra parte, siguiendo en la línea de establecer la más cercana relación existente entre los caudales y la otras dos variables en cuestión, se realizó una prueba de correlación cruzada, la cual da un indicativo de para qué magnitud de rezago (Lag en inglés) de una de las variables con respecto a la otra, se produce una coincidencia entre los aumentos y disminuciones, dando bajo ciertas condiciones una muestra de dependencia (ver Martínez, (2006)). Esta prueba es realizada con el fin de tener en cuenta el hecho de que los caudales de salida de cuencas de gran tamaño no se producen inmediatamente al presentarse la precipitación. Se dispone de información con frecuencia de un mes, por lo que esta es la magnitud de rezago que se usa en la prueba.



Gráfica 9. Correlación cruzada entre los cambios de temperatura y caudal para Cuenca Nariño (arriba) y Cuenca Calamar (abajo). Fuente: Elaboración propia

La correlación cruzada realizada entre la temperatura (variable independiente) y el caudal (variable dependiente) arroja unos resultados mostrados en Gráfica 9 para las dos cuencas de estudio. Los resultados de correlación entre la precipitación (variable independiente) y el caudal son mostrados en Gráfica 10.



Gráfica 10. Correlación cruzada entre los cambios de precipitación y caudal para Cuenca Nariño (arriba) y Cuenca Calamar (abajo). Fuente: Elaboración propia

La temperatura muestra tener una influencia en el caudal en el mismo mes, al presentar en el rezago igual a cero el mayor valor absoluto de la variable R. La precipitación por su parte alcanza ese máximo valor de correlación para rezago igual a 1 mes, lo que indica que su correlación más alta se consigue al comparar la precipitación con el caudal del mes siguiente. Lo anteriormente dicho aplica para Cuenca Calamar y Cuenca Nariño, que para resultados aplicables en este trabajo,

obtuvieron el mismo resultado en la prueba. Sin embargo, el comportamiento de ambas cuencas no fue el mismo, destacándose el que en la cuenca de menor tamaño el valor de R para rezago igual a 0 tiene alta similitud con el obtenido para rezago igual a 1, el cual no es el caso de la cuenca de mayor tamaño. Esto se atribuye justamente al tamaño de las cuencas, el cual es uno de los factores determinantes en la magnitud del tiempo de concentración; la correlación máxima en Cuenca Nariño se alcanza con un desfase menor al necesario para Cuenca Calamar. Queda por anotar que el signo negativo del valor R hace referencia a aquí, a que los caudales y la temperatura tienen una relación inversa.

Fueron construidos contornos de valores de ΔQ basándose en la información mostrada en Figura 40. Para construirlos, fue necesario realizar una interpolación que permitiera obtener valores de ΔQ en las parejas de ΔP y ΔT intermedias que no se habían presentado en el periodo de estudio. Dicha interpolación fue lineal y realizada a través de la función interp de R. Se obtuvo así una matriz con valores de ΔQ con variación en un sentido de $\Delta P=10\text{mm/mes}$ y de $\Delta T=0.1^\circ\text{C}$ en el otro.

Los contornos fueron construidos para ambas cuencas, teniendo en cuenta diferentes magnitudes de rezagos, con el fin de observar la forma en la que variaba el comportamiento de los caudales cuando se buscaba tener en cuenta el tiempo de retorno. Así, se presentan en Figura 41 y Figura 42 los contornos de ΔQ para rezagos de 0 a 4 meses en Cuenca Clamar y Cuenca Nariño, respectivamente.

Para Cuenca Calamar, el contorno con desfase de 1 mes se muestra coherente con lo que ocurre al interior de una cuenca, pues para disminuciones ΔP y aumentos de ΔT presenta disminuciones de caudal y aumentos para el caso inverso. La línea que representa $\Delta Q=0$ muestra pendiente positiva y en general una dependencia mayor de la precipitación que de la temperatura. La áreas cerradas que se muestran en medio de los contornos pueden deberse a valores atípicos que modifican los resultados de la interpolación realizada. En cuanto a las diferencias entre los diferentes desfases empleados, es notorio que los correspondientes a los dos mayores desfases muestran un comportamiento de los caudales casi caótico y sin dependencia clara de ΔP y ΔT , llegando a arrojar resultados incoherentes de lo que se espera suceda en una cuenca. El contorno con desfase de 2 meses muestra un comportamiento de caudales dependiente casi en su totalidad de la precipitación e independiente de la temperatura. El contorno que relaciona los datos sin tener en cuenta desfase alguno, se muestra dependiente en mayor medida de la temperatura y presenta sus incrementos más altos de caudal para incrementos de ΔP muy bajos y disminuciones de ΔT . En resumen, y como lo indicaba la prueba de correlación, la relación más acertada y coherente con el comportamiento de una cuenca como la que se estudia (con los datos disponibles), es la resultante de vincular precipitaciones y temperaturas ocurridas simultáneamente con los caudales de salida generados al mes siguiente. Se aclara sin embargo, que esta relación puede ser óptima al evaluar desfases con frecuencia semanal y no mensual.

En Cuenca Nariño, para el contorno de desfase de un mes, no se muestra un comportamiento tan claro como el observado en la cuenca de mayor tamaño. Esto se presume ocurre justamente por el tamaño de cuenca, que deriva en tiempos de concentración menores a un mes. El contorno correspondiente a desfase de cero, tiende a mostrar mayor dependencia de ΔP que la mostrada para el mismo caso en Cuenca Calamar. Los contornos para 2, 3 y 4 meses de desfase se muestran caóticos y sin orden aparente, esto explicado nuevamente por el hecho de que los desfases empleados están muy lejanos del tiempo de concentración real de la cuenca.

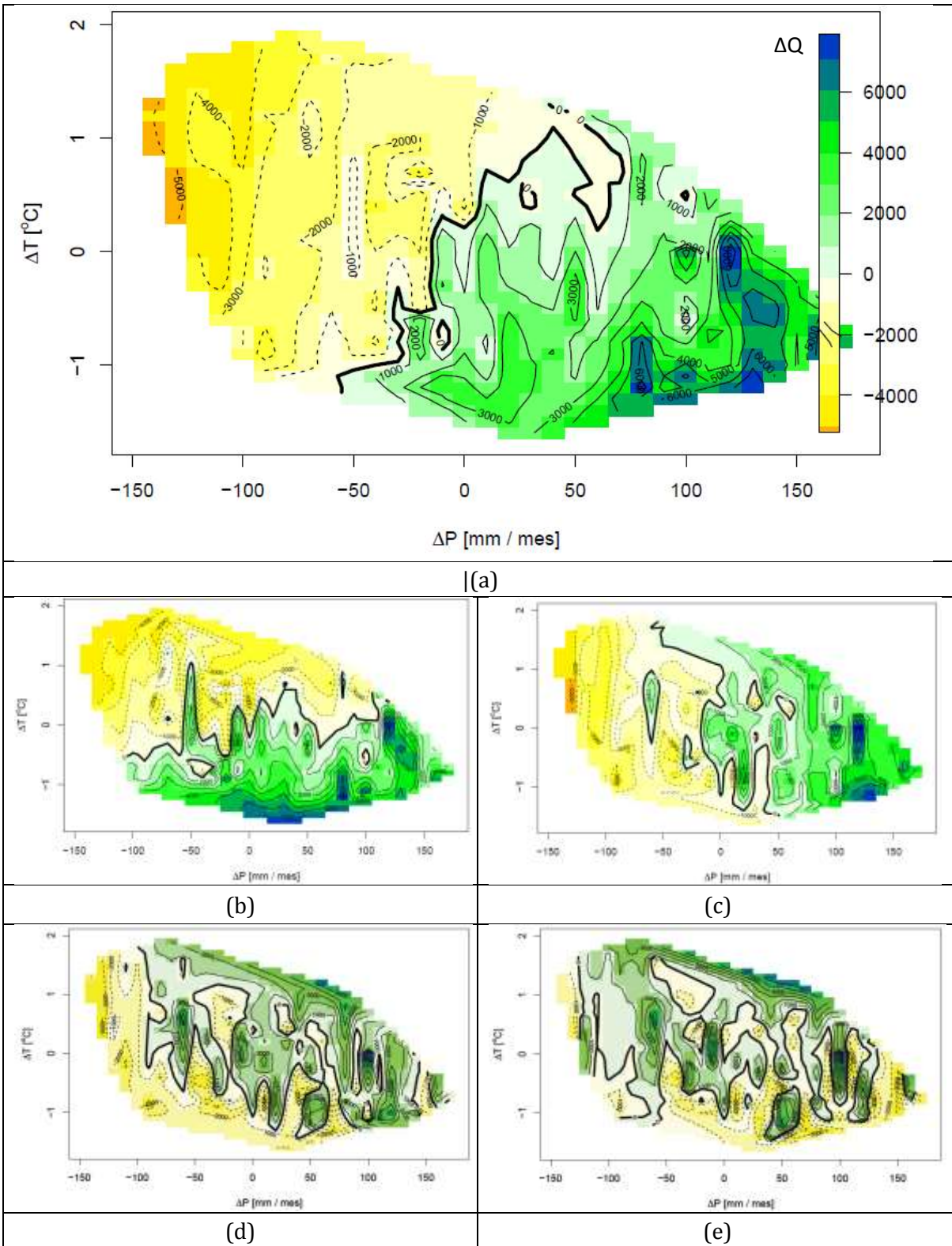


Figura 41. Contornos de ΔQ (m^3/s) función de ΔP y ΔT para diferentes rezagos de ΔQ en Cuenca Calamar. (a) rezago=1 mes (seleccionado para análisis posteriores) (b) rezago =0 (c) rezago =2 meses (d) rezago =3 meses (e) rezago =4 meses. Fuente: Elaboración propia

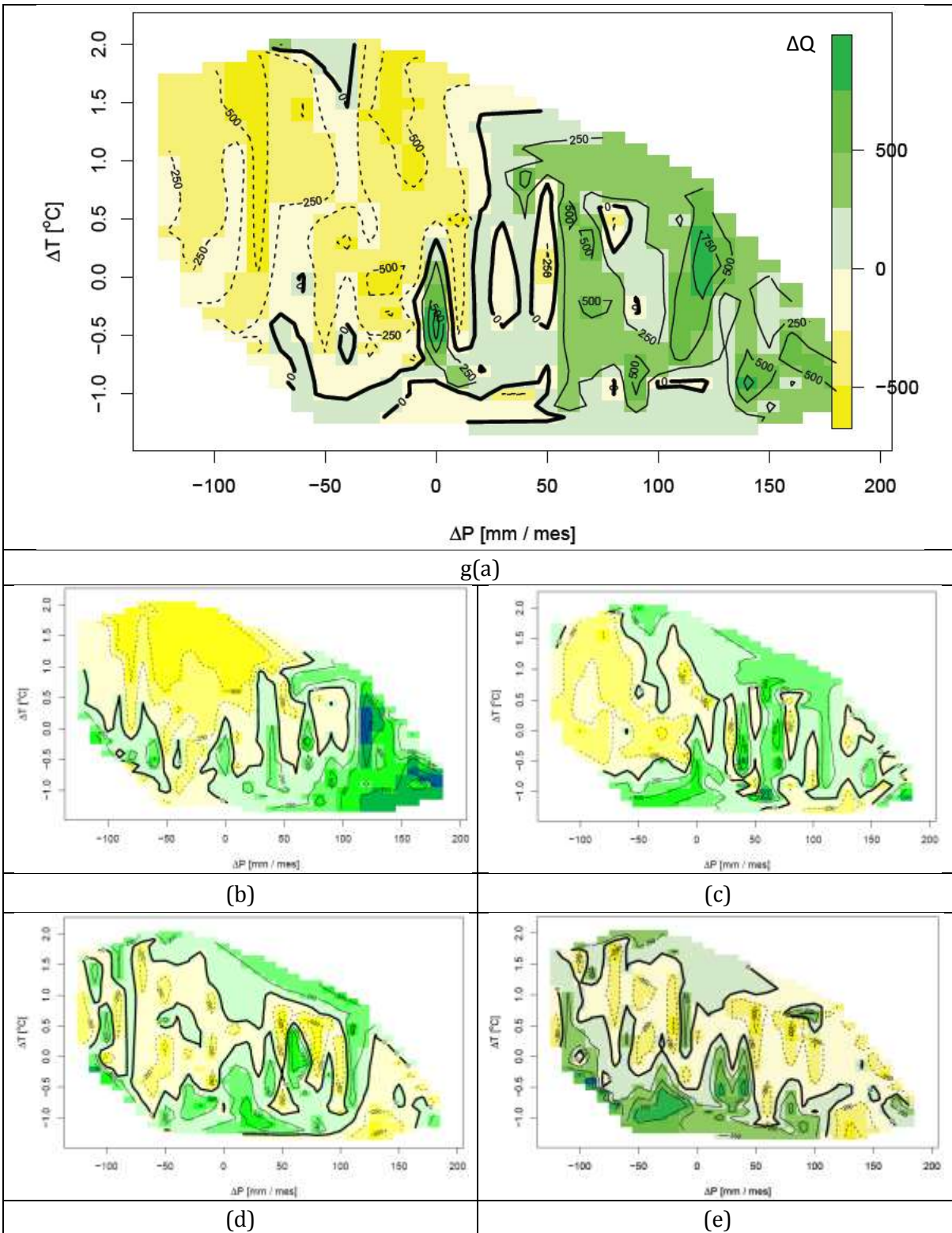
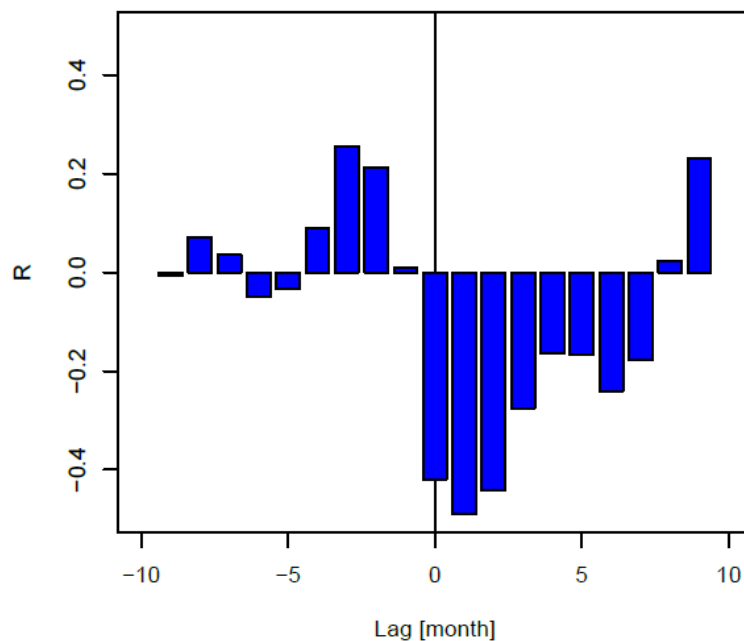


Figura 42. Contornos de ΔQ (m^3/s) función de ΔP y ΔT para diferentes rezagos de ΔQ en Cuenca Nariño. (a) rezago=1 mes (seleccionado para análisis posteriores) (b) rezago =0 (c) rezago =2 meses (d) rezago =3 meses (e) rezago =4 meses. Fuente: Elaboración propia

7.4 Relación entre precipitación y temperatura para Colombia

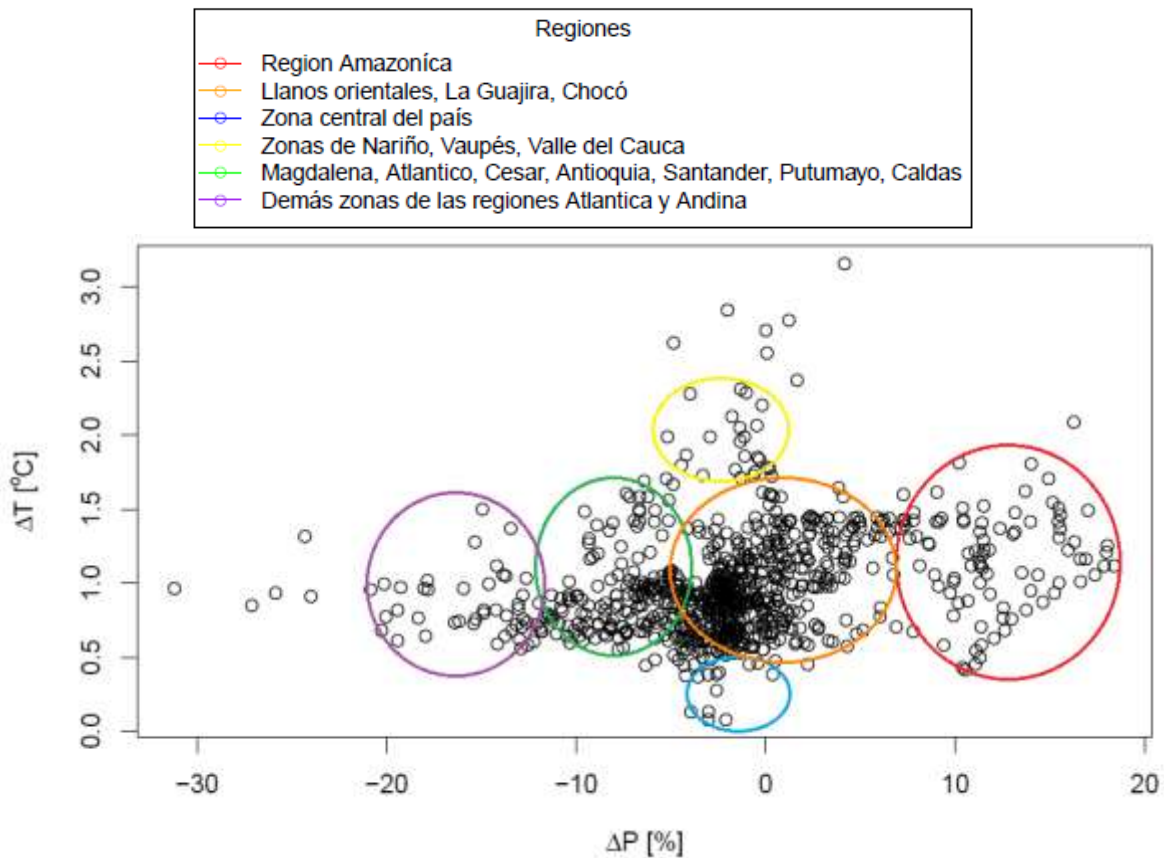
Para establecer la relación entre los cambios de precipitación y de temperatura para el país, se realiza una prueba de correlación cruzada para establecer, por medio del coeficiente de correlación lineal R , si hay dependencia entre ambas variables, y si existe, definir la relación de las dos variables en el tiempo. Los resultados de la correlación cruzada realizada entre la precipitación (variable dependiente) y la temperatura (variable independiente) se muestra en la Gráfica 11 para Colombia.



Gráfica 11. Correlación cruzada de las variables temperatura y precipitación para Colombia.
Fuente: Elaboración propia

De la Gráfica 11 se puede obtener que cuando las barras del gráfico presentan subidas ($R > 0$) representa una relación de dependencia directa entre P y T , es decir cuando la temperatura sube, la precipitación también lo hace; por otro lado, cuando las barras presentan bajadas ($R < 0$) representa una relación de dependencia inversa entre las variables, es decir que cuando sube la temperatura, la precipitación baja y viceversa. Se concluye también de la Gráfica 11, que la temperatura muestra tener una influencia en la precipitación en el mismo mes, al presentar en el rezago (Lag) igual a cero el mayor valor absoluto de la variable R , es decir que aumentos de temperatura se ven reflejados en disminuciones de la precipitación con mejor relación en el mes siguiente.

A continuación se muestra en la Gráfica 12 la distribución de las parejas ΔP y ΔT calculadas para todo el siglo, es decir entre la ventana 1901-1930 y 1982-2010, donde se trata de observar si existe alguna relación espacial entre estas dos variables para el país. Se puede decir que no se logra observar una relación clara entre ΔP y ΔT , ya que los puntos se encuentran dispersos, pero mediante un ejercicio de observación de los mapas de cambios porcentuales para P (Figura 39) y cambios de T (Figura 32) se pueden estimar las regiones que abarcan predominantemente cierta zona de los valores ΔP y ΔT graficados.



Gráfica 12. Gráfica de ΔP y ΔT para todo el siglo con regiones estimadas de distribución espacial (abajo). Convenciones de las zonas agrupadas en regiones para estimar ΔP y ΔT correspondidos (arriba). Fuente: Elaboración propia

Se observa de la Gráfica 12 que la región Amazónica es la que posee los cambios ΔP más positivos entre 10 y 20% de aumento; en las regiones de los Llanos Orientales, La Guajira y el Chocó la precipitación ha variado poco a lo largo del siglo, entre -5% y 5% y cambios de temperatura con variación entre 0.5°C y 1.5°C; la zona central del país (cerca a Cundinamarca) es la única parte de la que se estimaron ΔT y ΔP cercanos a cero; la región conformada por los departamentos: Magdalena, Atlántico, César, Antioquia, Santander, Putumayo, Caldas, cuyos ΔP estuvieron entre -5% y -10% con ΔT entre 0.5°C y 1.5°C; las demás zonas no mencionadas de la región Andina y Atlántica presentan ΔP entre -10% y -20% con ΔT en su mayoría entre 0.5 y 1; por último las zonas que pueden llamarse anómalas ya que su ΔT supera 1.5 con ΔP entre 0% y 5% que se encuentra en algunas partes de los departamentos de Nariño, Vaupés y Valle del Cauca. En general, la temperatura para Colombia a lo largo del siglo cambió entre 0.5°C y 1.2°C con una concentración mayoritaria de cambios negativos de la precipitación entre 0% y -5%.

8 RESULTADOS Y ANÁLISIS

8.1 Significancia del cambio climático para Colombia

Se pretende evaluar la significancia del cambio de la temperatura y la precipitación para Colombia mediante las ventanas temporales, y establecer, si existe, en que parte del siglo se presentó el mayor cambio.

Se realiza una prueba de hipótesis para dos muestras independientes (como se explicó en 4.6.2) en la primera mitad de siglo, la segunda mitad de siglo y para todo el siglo mediante la ecuación (IX). Es decir este contraste se realiza para todas las combinaciones de las ventanas temporales, de esta manera se calcula el valor Z tres veces: para la primera mitad de siglo, la segunda mitad y el siglo completo. Donde la hipótesis nula H_0 a verificar es que no ha existido cambio significativo del clima en Colombia, es decir que las medias de las dos muestras o ventanas temporales contrastadas son estadísticamente iguales, como se muestra en la ecuación (X).

Luego se procede a calcular el valor p , el cual representa la probabilidad calculada suponiendo que H_0 es verdadera, de obtener un valor estadístico de prueba por lo menos tan contradictorio a H_0 como el que en realidad se obtuvo (Devore, 2008). Entre más pequeño sea p más contradictorios los datos a H_0 , por lo tanto se tienen en cuenta estas dos condiciones:

- ✓ Si el valor p es menor que el nivel de significancia, H_0 se rechaza.
- ✓ Si el valor p es mayor que el nivel de significancia, H_0 no se rechaza.

Mediante el área acumulativa capturada por el valor z $\Phi(z)$, se determina el valor p a partir de la fórmula (Devore, 2008):

$$p = 2(1 - \Phi|z|) \quad \text{(XVIII)}$$

El nivel de significancia α tomado para este trabajo es de 0.05, es decir un nivel de confianza de 90%. El cálculo se realizó mediante el programa R.

8.1.1 Temperatura

En la Figura 43 se puede observar la distribución espacial del valor p correspondiente al contraste de temperaturas medias multianuales de las ventanas temporales sobre el territorio continental de Colombia; los valores más amarillos y rojos representan un valor p menor a 0.05, es decir, menor al nivel de significancia; y los valores verdes y azules indican aumentos significativos del valor p mayores a 0.95.

Para la primera mitad del siglo, el mapa es casi totalmente rojo, con excepción de algunas zonas en los departamentos de Chocó y Antioquia en los que el valor p oscila entre 0.1 y 0.9 (ver Figura 43 arriba-izquierda). En la segunda mitad del siglo, el cambio de la temperatura no fue significativo en parte del departamento de Amazonas, los Llanos orientales y en toda la región Andina donde los valores de p fueron incluso cercanos a 1, aunque sí lo fue para algunas regiones de la Costa atlántica, Nariño, los extremos de los Llanos orientales, el Amazonas, el Chocó y Antioquia donde anteriormente no había ocurrido cambio (ver Figura 43 arriba-derecha). Para todo el siglo, el cambio fue significativo en todo el territorio menos en una pequeña zona en el centro del país (ver Figura 43 abajo-izquierda).

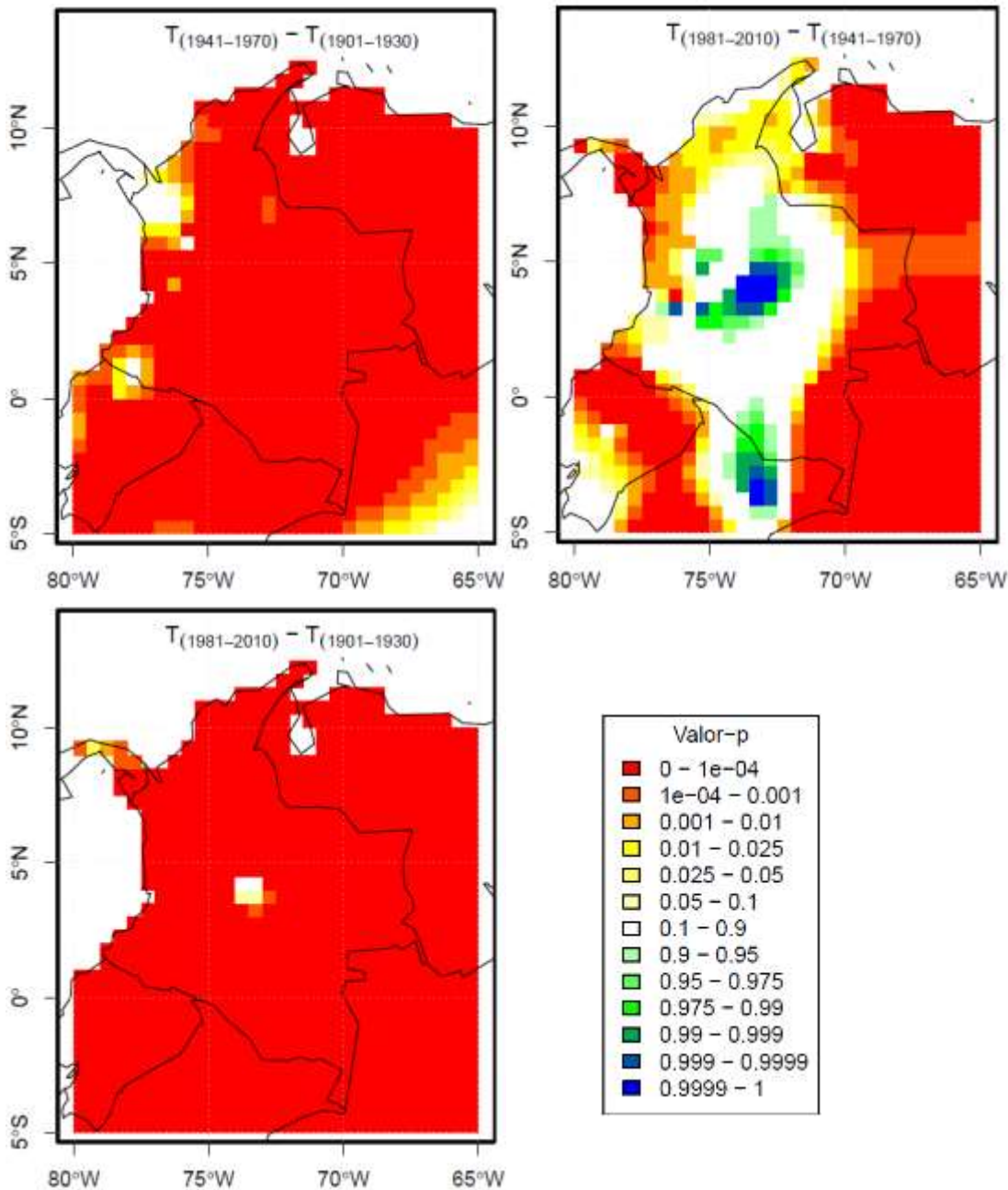


Figura 43. Mapas de valor p de la temperatura media multianual para la primera mitad del siglo (arriba-izquierda), segunda mitad (arriba-derecha) y la totalidad del siglo (abajo-izquierda).

Fuente: Elaboración propia

La evidencia estadística disponible que se muestra en la Figura 43, permite concluir que el cambio climático de la variable de temperatura *es significativo* para Colombia y que es más significativo en la primera mitad del siglo 20 ya que los valores *p* fueron menores a 0.05 para casi todo el territorio.

8.1.2 Precipitación

En la Figura 44 se puede observar la distribución espacial del valor p correspondiente al contraste de precipitaciones medias multianuales de las ventanas temporales sobre el territorio continental de Colombia; los valores más amarillos y rojos representan un valor p menor a 0.05, es decir, menor al nivel de significancia; y los valores verdes y azules indican aumentos significativos del valor p .

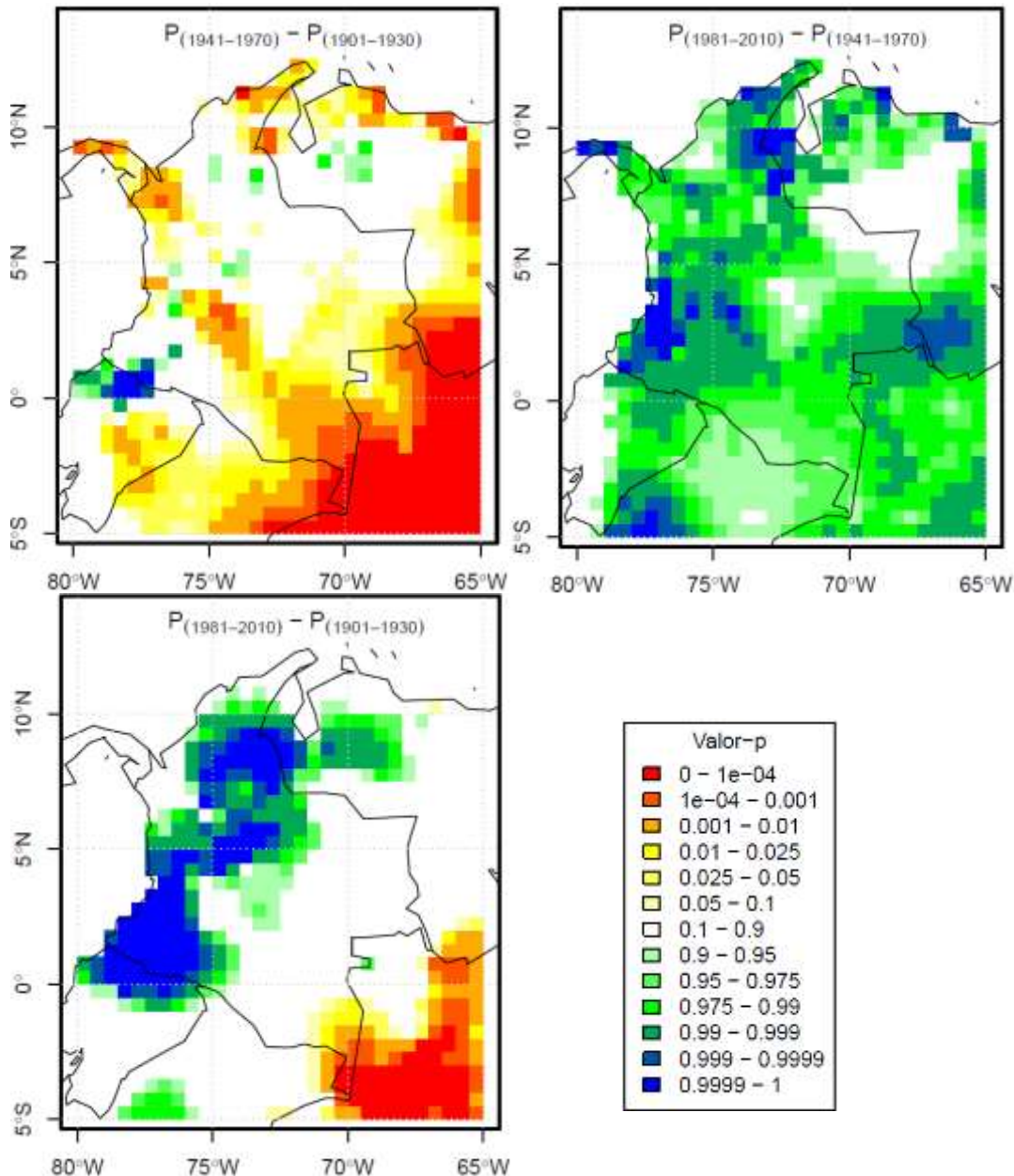


Figura 44. Mapas de valor p de la precipitación media multianual para la primera mitad del siglo (arriba-izquierda), segunda mitad (arriba-derecha) y la totalidad del siglo (abajo-izquierda). Fuente: Elaboración propia

De la Figura 44 se puede destacar que para la primera mitad del siglo el mapa tiene pixeles con valor p mayores a 0.05 en La Guajira, el Amazonas, en el brazo de Guainía, en la parte baja de región Andina y algunas zonas del Chocó y Antioquia (ver Figura 44 arriba-izquierda). En la segunda mitad del siglo el cambio de la precipitación no fue significativa en ninguna zona del país, ya que los valores p estuvieron entre 0.1 y 1 (ver Figura 44 arriba-derecha). En el mapa de totalidad del siglo, cabe mencionar que la única zona del país en que resulta cambio significativo es el extremo sur del departamento de Amazonas; el resto del país no presentó cambio y en la región Andina, parte de la Costa Atlántica y del Pacífico los valores p fueron entre 0.95 y 1 (ver Figura 44 abajo-izquierda).

La evidencia estadística disponible que se muestra en la Figura 44, permite concluir que el cambio climático de la variable de precipitación *no es significativo* para Colombia y que a pesar que en la primera mitad se presentaron algunos cambios, en la segunda mitad del siglo no se presentó en ninguna zona del país.

8.2 Elasticidad climática

El cálculo de la elasticidad climática se efectuó en este trabajo con el fin de cuantificar la variación relativa de los caudales Q debido al cambio en las variables P y T que se suponen independientes. La definición de elasticidad empleada inicialmente, es la definida por Fu et al. (2007) y mostrada en ecuación (VI).

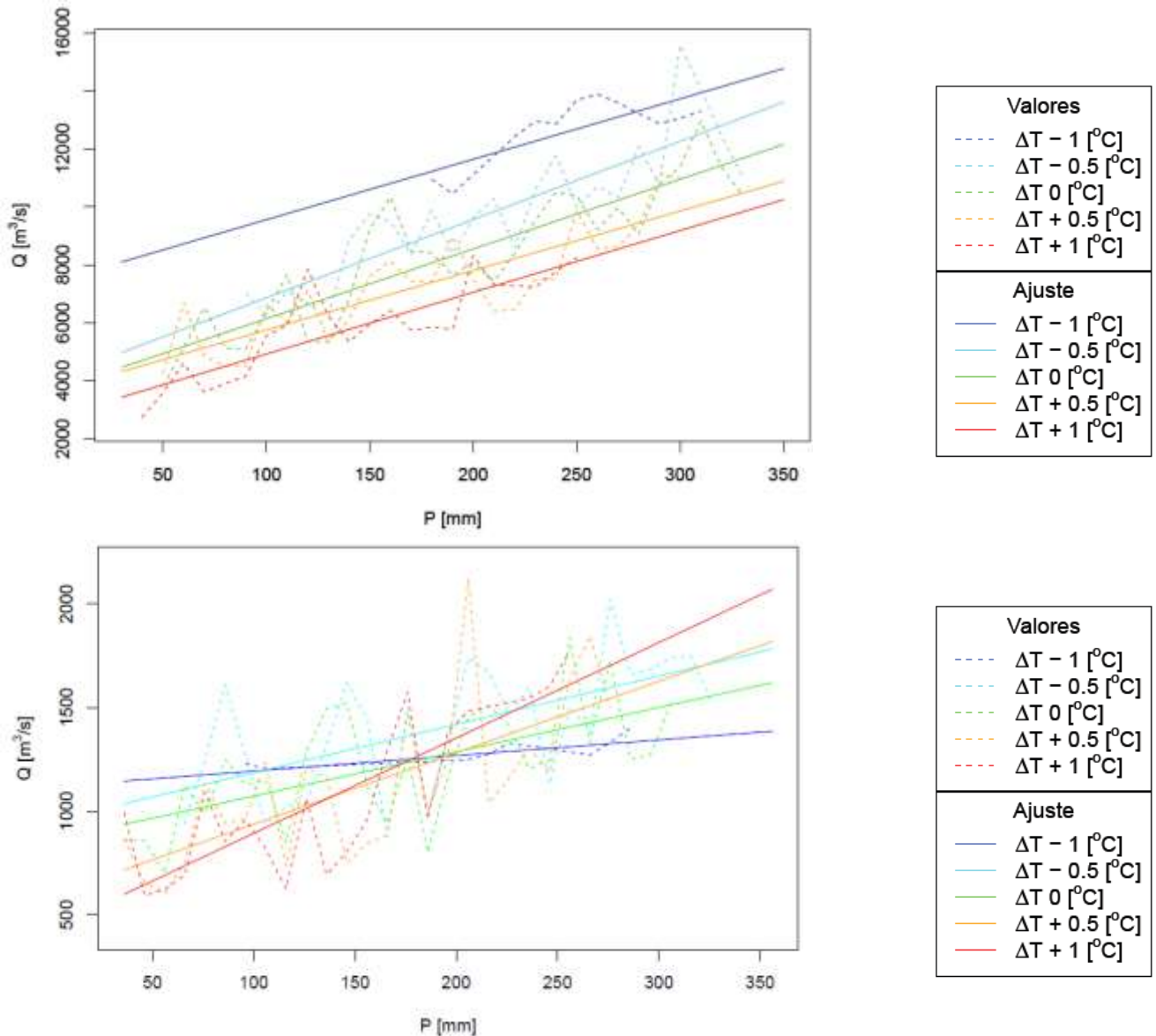
Esta definición de elasticidad fue la usada por ser la más fácil interpretación y por presentar resultados coherentes con el comportamiento de los caudales de salida de una cuenca. Su cálculo implica poseer valores de Q y de P definidos para diferentes ΔT , por lo que se construyó una matriz de valores de caudal, similar a la explicada en la parte final del numeral 7.3 con información de Q para intervalos de P de 10mm y de T de 0.1°C, iniciando la variación de estas dos últimas variables en sus respectivos valores mínimos y finalizándola en sus máximos.

Se definieron como valores de ΔT , las variaciones de T con su respecto a su media de -1°C, -0.5°C, 0°C, 0.5°C y 1°C. Con estos ΔT se procedió en primer lugar a construir gráficas Isotemperatura que dieran una idea de cómo variaba P con respecto a Q . Estas líneas se muestran en Gráfica 13 para las dos cuencas de estudio. Para interpretarlas de mejor forma y evaluar adecuadamente su tendencia, les fue realizado un ajuste lineal que también se muestra. Como se observa en las gráficas, los valores de Q no se encuentran definidos para todos los mismos valores de P en todos los ΔT , esto debido a que no se dispone de información de Q para tales puntos. La diferencia de cantidad de información de Q para cada ΔT , hace que los ajustes tengan pendientes muy distintas entre ellos, como las observadas en ΔT -0.5 y ΔT -1 en Cuenca Nariño. Las pendientes de Isotemperatura presentadas en Cuenca Calamar son mucho más similares que las mostradas en la otra cuenca; en ellas se puede observar cómo para disminuciones en la temperatura, los cambios en la precipitación generan mayores cambios en los caudales, que los generados bajo temperaturas mayores a la media.

Los cruces entre las líneas Isotemperatura presentadas en Cuenca Nariño, se pueden interpretar como valores de precipitación que definen cómo será el comportamiento de Q con respecto ΔT antes y después de ellos. Una explicación que se le puede dar a este comportamiento en Cuenca Nariño, es el hecho de que es parte de la cuenca alta y cuenta con mayor cantidad de erosión; en cierta forma es una cuenca árida que ante grandes aumentos en la temperatura y en la precipitación, presenta disminuciones en la vegetación que reducen la retención de agua por esta ejercida y conllevan a aumentos en la Esorrentía. Así, en esta cuenca los aumentos de la temperatura bajos aumentos en la precipitación generan aumentos de caudal y bajo disminuciones

en la precipitación generan disminuciones el mismo. Por otro lado, también se debe tener en cuenta que se trabaja con matrices que no poseen la misma cantidad de datos para todos los ΔT , traduciéndose en ajustes lineales no son paralelos e introduciendo ruido que dificulta la correcta interpretación.

Realizando el experimento de reducir las magnitudes de ΔT para la construcción de las Isotemperatura, se encuentra que los ajustes tienden a ser más paralelos en la medida que la magnitud de ΔT es disminuida, esto atribuido nuevamente a la cantidad de información de caudal, que es más abundante en la medida que aproxima a la media, es decir a ΔT igual a cero.

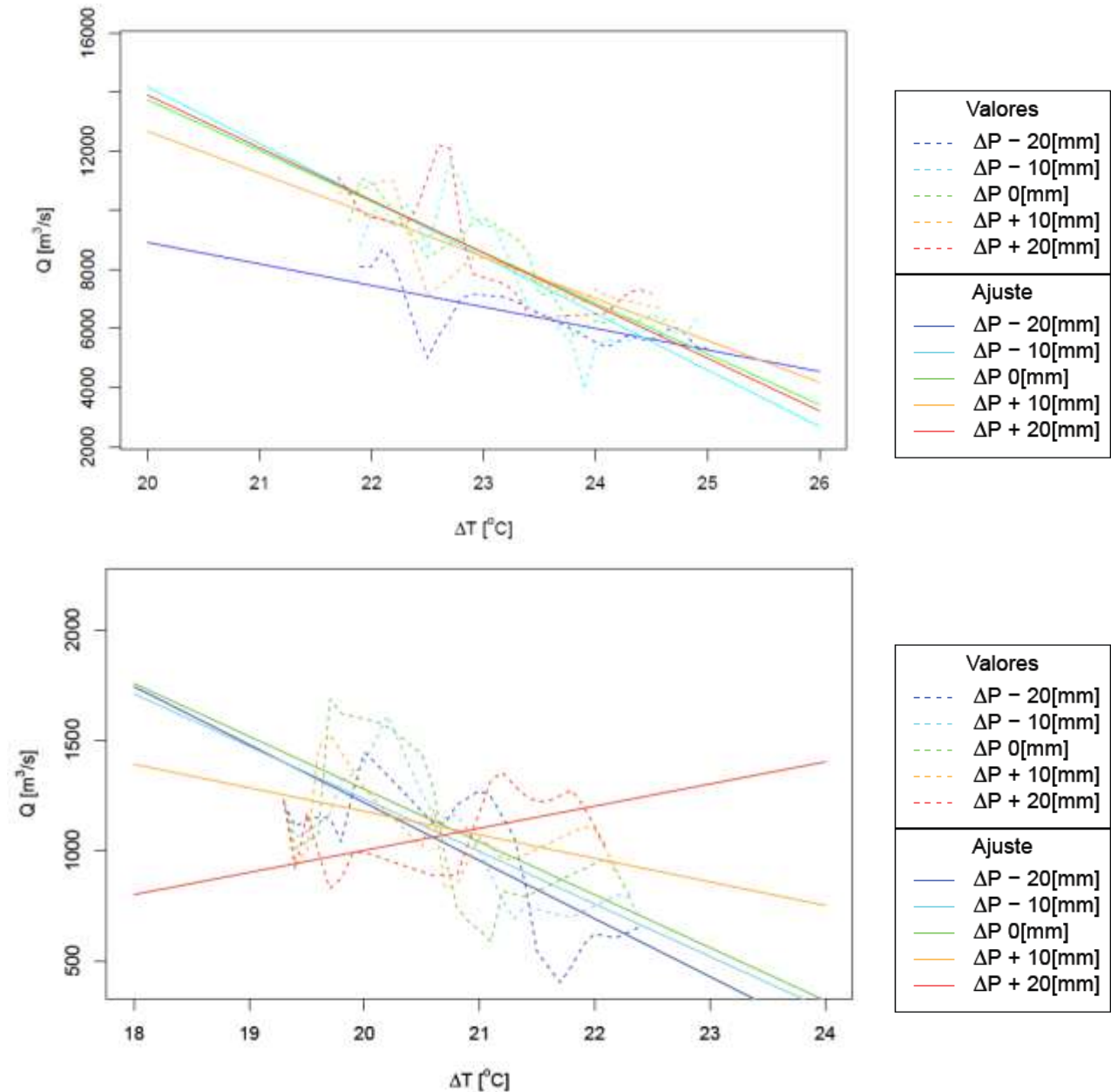


Gráfica 13. Líneas Isotemperatura para Cuenca Calamar (arriba) y Cuenca Nariño (abajo).
Fuente: Elaboración propia

Se construyen de la misma forma, líneas de Isoprecipitación, mostradas en Gráfica 14, con valores ΔP de 20mm/mes, 40mm/mes, 0 mm/mes, -20mm/mes y 40 mm/mes. Estas líneas poseen en su mayoría pendientes negativas, lo que indica que su relación con los caudales es inversamente proporcional. Además, por su falta de orden aparente permiten inferir y confirmar que los

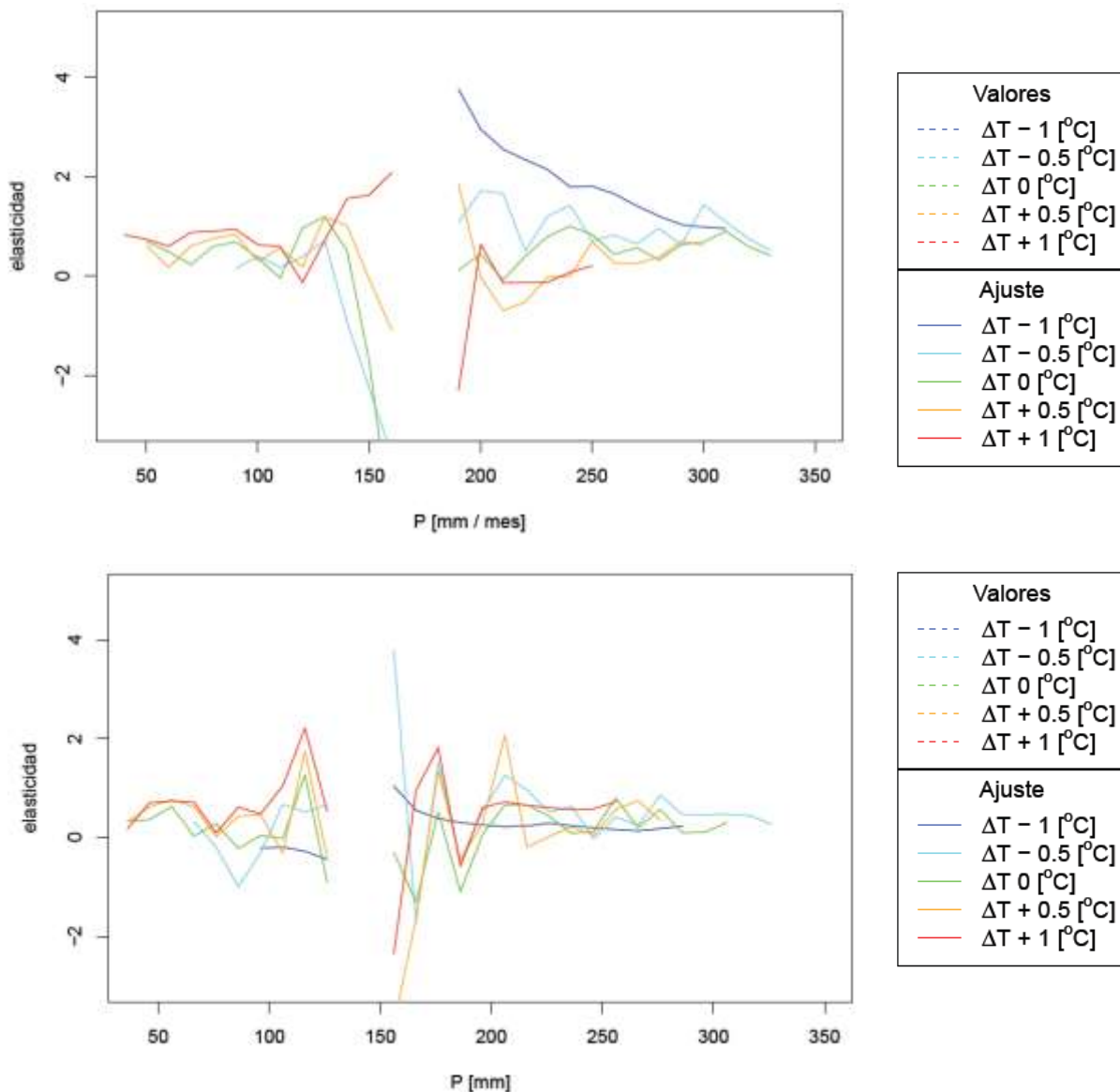
caudales de las cuencas dependen de manera más clara y directa de los cambios presentados en la precipitación. Notando sin embargo, que para aumentos en la precipitación la variación de la temperatura se traduce en magnitudes de caudal más altas que para las disminuciones, en el caso de Cuenca Calamar. Se debe tener igualmente en cuenta, que estas líneas se ven afectadas por la falta de información en ciertos valores de ΔP , similar al caso de los ΔT en las líneas Isotemperatura.

En Cuenca Nariño, el comportamiento mostrado por la línea isoprecipitación correspondiente a $\Delta P + 20\text{mm}$, puede encontrarse en el hecho de considerarse una cuenca árida, como se mencionó con anterioridad, conllevando a que altos aumentos en la precipitación ocasionen que la relación entre el caudal y la temperatura sea directamente proporcional.



Gráfica 14. Líneas Isoprecipitación para Cuenca Calamar (arriba) y Cuenca Nariño (abajo).
Fuente: Elaboración propia

Pasando ahora al cálculo de la elasticidad climática, empleándose la ecuación se obtuvieron para los valores sin ajustar, las elasticidades para los valores cada ΔT definido en ambas cuencas. Estas líneas de elasticidad se muestran en Gráfica 15.

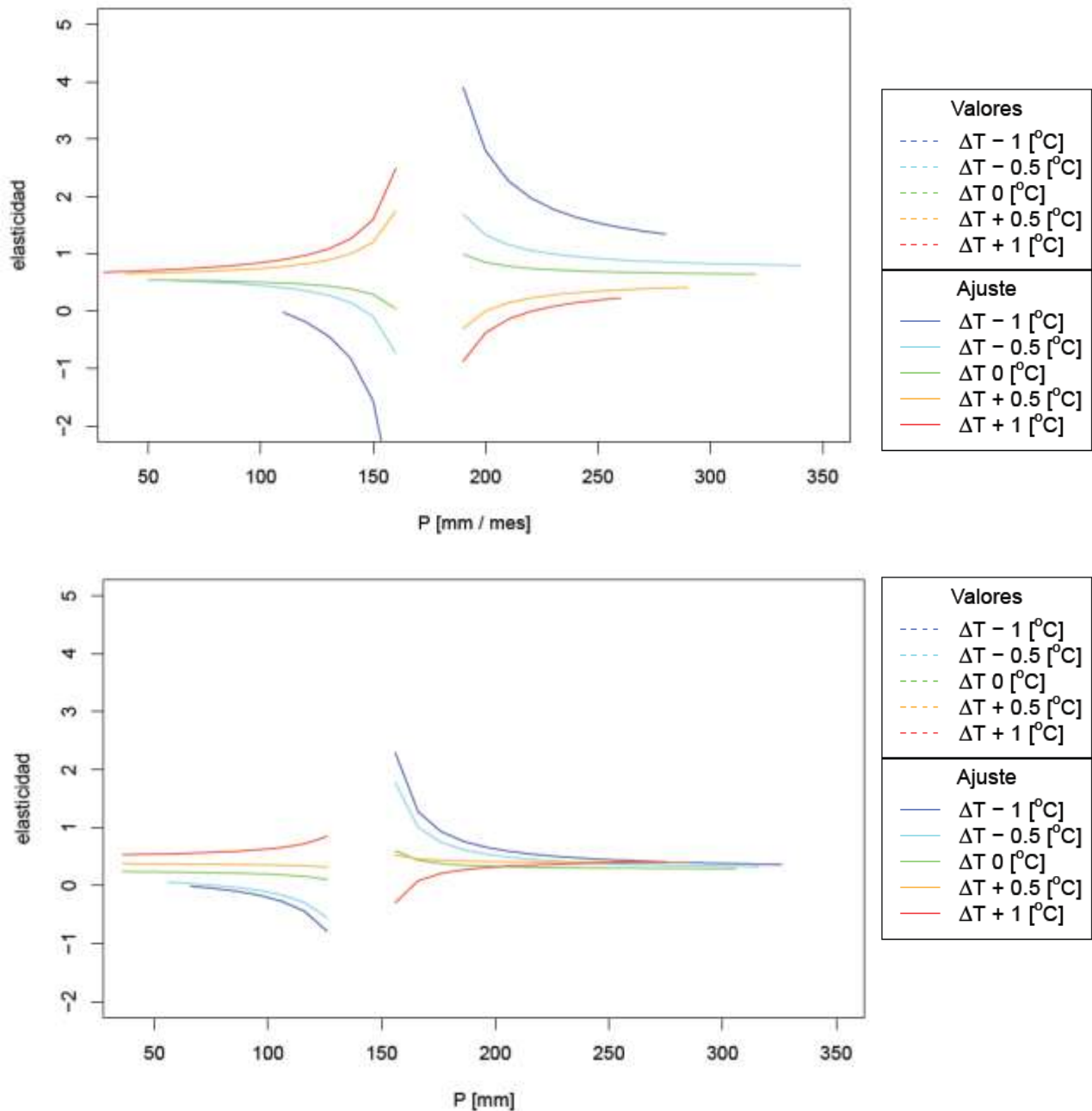


Gráfica 15. Elasticidad climática de valores sin ajustar en Cuenca Calamar (arriba) y Cuenca Nariño (abajo). Fuente: Elaboración propia

La elasticidad climática de los valores ajustados, según lo mostrado en las líneas Isotemperatura, es mostrada en Gráfica 16. En ambas gráficas de elasticidades se observa, cómo era de esperarse por la forma de la ecuación, como los valores tienden a infinito al acercarse a la precipitación media y se vuelven indefinidos cuando llegan a ella. Así, no se obtienen valores de elasticidad climática para ΔP menores de 10mm/mes.

La forma de la gráfica de elasticidad es simétrica en el sentido del eje Y con respecto a la precipitación media, esto explicado por la forma de la ecuación. En el cuarto superior izquierdo e inferior derecho, se muestran los ΔT de $+1^{\circ}\text{C}$, indicando que para estos valores solo presentarán

elasticidades crecientes con el aumento de la precipitación, cuando esta sea menor del medio, para precipitaciones mayores a la media la elasticidad climática tiende a tomar un valor constante. Caso opuesto es el presentado por los ΔT de -1°C . La forma en la que se muestra la elasticidad para valores intermedios de ΔT , indican que cambios en su valor absoluto derivan en líneas de elasticidad con mayor pendiente, que sugieren que conforme aumenta el valor absoluto de ΔT la elasticidad varía en mayor grado con la precipitación.



Gráfica 16. Elasticidad climática de valores ajustados en Cuenca Calamar (arriba) y Cuenca Nariño (abajo). Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los valores obtenidos de elasticidad, estos indican por ejemplo, que en la Cuenca Calamar con un ΔT de $+1^\circ\text{C}$ y elasticidad de 2, un cambio porcentual de la precipitación se traduce

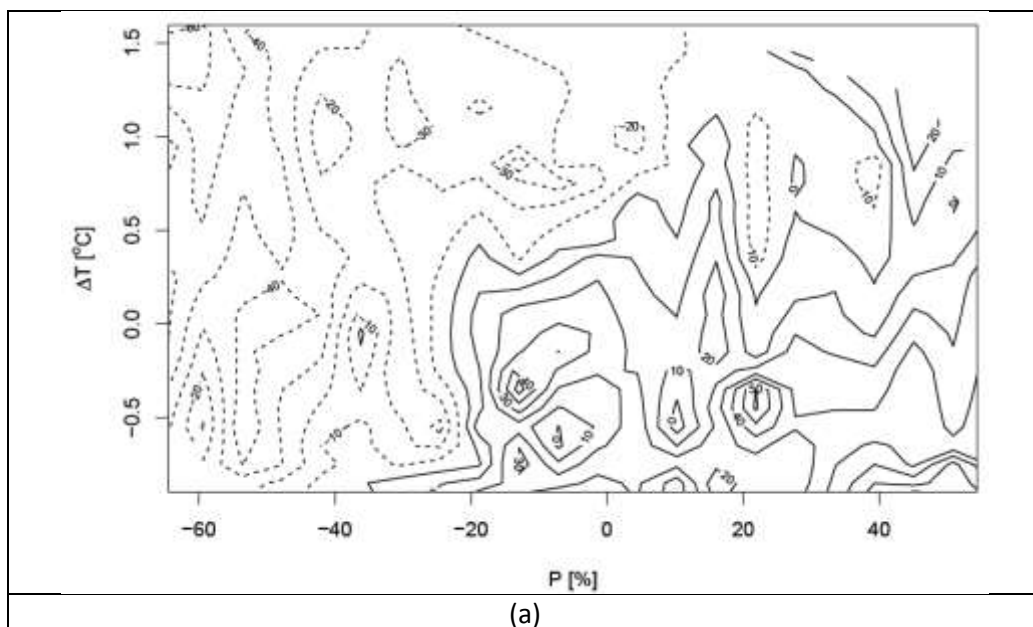
en un cambio porcentual de los caudales del doble de magnitud. Conllevando a que una elasticidad de 1 sea equivalente a que cambios porcentuales de precipitación en la misma magnitud generen cambios porcentuales en los caudales.

En el caso de Cuenca Nariño, para valores de precipitación menores a la precipitación media, el comportamiento de la elasticidad es básicamente el mismo encontrado en Cuenca Calamar. Sin embargo, para precipitaciones mayores a la media, las líneas de los ΔT tienden a superponerse. Esto podría explicarse nuevamente en la caracterización árida de esta cuenca, que hace que los ΔT positivos, tiendan a generar para aumentos en la precipitación, elasticidades negativas y no positivas como ocurre en Cuenca Calamar.

Por otra parte, fue calculada la elasticidad climática utilizando el estimado no paramétrico propuesto por Sankarasubramanian et al. (2001) mostrado en la ecuación (V), este dio un resultado de 0.4 para Cuenca Calamar y de 0.36 para Cuenca Nariño. Este estimador, dependiente únicamente de la precipitación, debería ser de utilidad para hallar una estimación del aumento porcentual de los caudales para un aumento porcentual en la precipitación dado.

8.3 Comportamiento de cambios de precipitación, temperatura y caudal de la cuenca del Río Magdalena

La variación relativa de los caudales Q debido al cambio en las variables P y T , es presentada por medio de los contornos de cambios porcentuales del caudal mostrados en Figura 45, para Cuenca Calamar y Cuenca Nariño. En estos se observa cómo se producen disminuciones de caudal cuantificables para decrementos porcentuales en la precipitación y variaciones de temperatura desde 0.5°C de disminución hasta unos 1.5°C de aumento, en Cuenca Calamar. Los contornos para Cuenca Nariño no presentan una forma muy clara, atribuida a un tiempo de concentración menor a la frecuencia mínima con la que se cuenta con datos en este trabajo. Consideraciones acerca de la forma como fueron obtenidos estos contornos, son mostradas en el numeral 7.3 de este trabajo. Cabe aclarar que estos contornos se encuentran recortados para mostrar únicamente aumentos en la precipitación entre -60% y 50% .



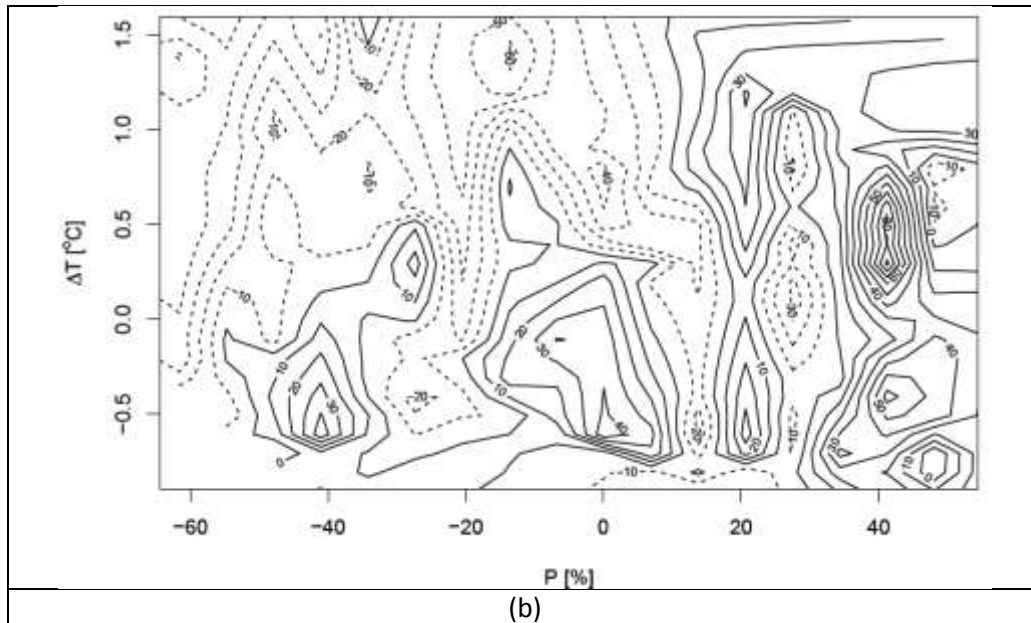


Figura 45. Contornos de cambios porcentuales del caudal para cambios porcentuales en la precipitación y cambios de magnitud en la temperatura, para Cuenca Calamar (a) y Cuenca Nariño (b). Fuente: Elaboración propia

8.4 Modelos de circulación global en la cuenca del Río Magdalena

Se observa en la Figura 46 y Figura 47 la nube de puntos correspondiente a los ΔP y ΔT obtenidos para la cuenca Calamar y Nariño, a partir de los GCMs disponibles para Colombia. Se ve claramente que las parejas ΔP y ΔT se encuentran por fuera del contorno de ΔQ calculado para los cambios ΔP y ΔT observados en la cuenca, cuya única excepción es el modelo NCPCM; esto se debe a que esas parejas no se han presentado en el pasado, más concretamente los valores de temperatura ya que los ΔT son bastante grandes entre 1.4°C y 3°C , lo que representan cambios significativos en esa variable.

La nube de puntos se concentra entre 1.4°C y 3°C y entre 0 y 25 mm/mes, con excepción del modelo CGHR que es el más alejado de la nube de puntos con un ΔT de 2.9°C y ΔP de -19 mm/mes.

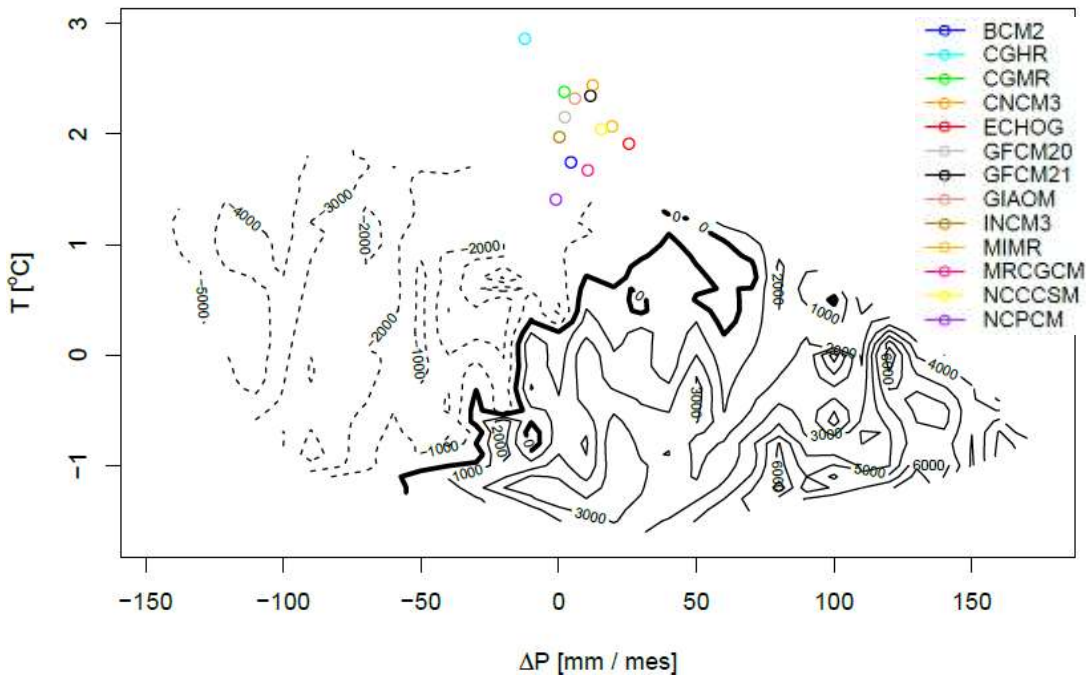


Figura 46. Contorno ΔP y ΔT vs ΔQ con modelos de circulación global para la cuenca Calamar.
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 47 se puede apreciar la nube de puntos de los modelos para la cuenca Nariño se concentra por fuera del contorno entre 1.3°C y 2.8°C y entre 0 y 30 mm/mes, con excepción del único modelo que presentó un ΔP negativo de -12.6 mm/mes. Algunas modelos están en las cercanías al contorno, pero no podría determinarse con precisión el valor del caudal correspondiente y sería más un ejercicio de imaginación.

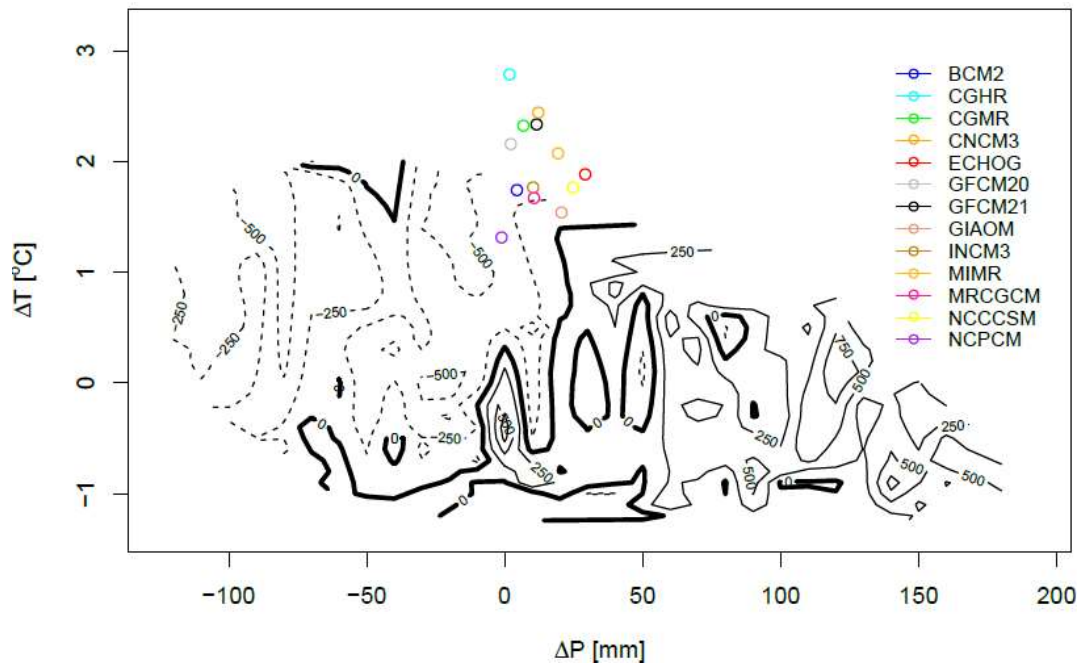


Figura 47. Contorno ΔP y ΔT vs ΔQ con modelos de circulación global para la cuenca Nariño.
Fuente: Elaboración propia

Al encontrarse los cambios de precipitación y temperatura por fuera de los contornos, es necesario realizar un tipo de extrapolación para obtener valores aproximados de caudal para cada cambio pronosticado por cada modelo de circulación global. Así, mediante la distribución normal estándar y haciendo uso de los cambios de precipitación ΔP y temperatura ΔT obtenidos para los modelos climáticos se predicen los cambios en los caudales del río Magdalena en la estación Calamar y Nariño.

A partir de los ΔP de cada modelo se obtienen los caudales correspondientes a los ΔT ya conocidos de -1°C , -0.5°C , 0°C , 0.5°C y 1°C indicados en Gráfica 13, luego se procede a obtener la característica Z de los ΔT con una distribución normal estándar, efectuando la siguiente transformación:

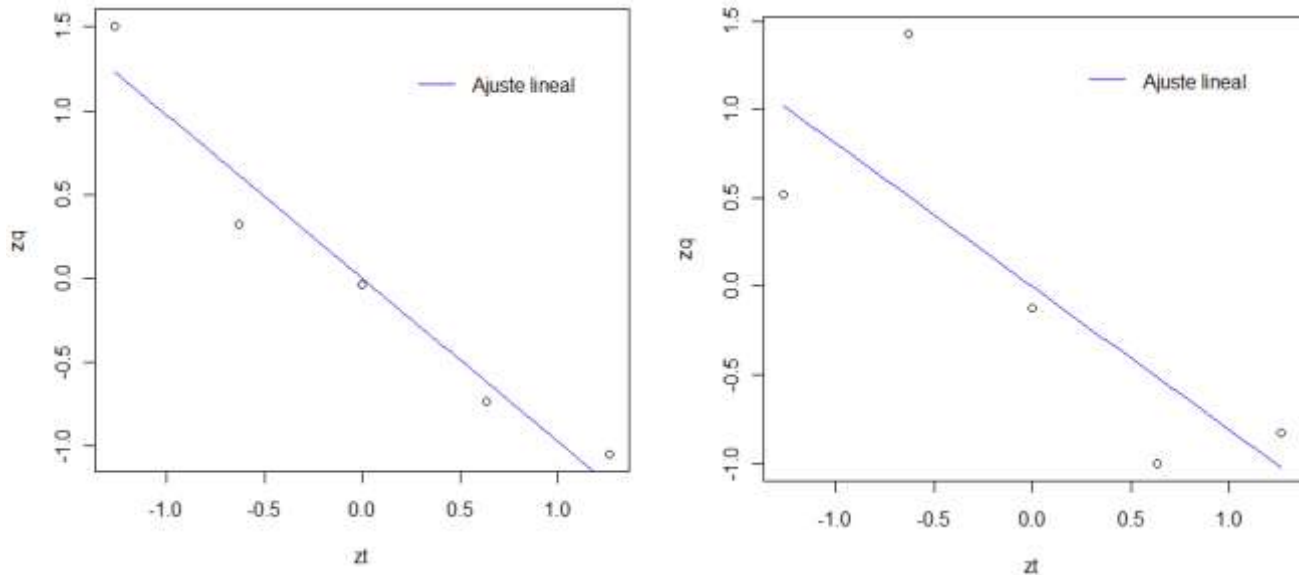
$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (\text{XIX})$$

Z_t : siendo X el valor ΔT , la media $\mu = 0^\circ\text{C}$ y la desviación estándar σ de los valores ΔT .

Z_q : siendo X el valor Q correspondiente al P en la Gráfica 13 la media μ de los Q_s y la desviación estándar σ de los valores de Q .

Luego se transforma el valor Z_t del valor real de cambio de los GCMs en Z_q de caudales multiplicando ese valor por la pendiente m de la gráfica Z_t vs Z_q (ver Gráfica 17):

$$Z_q = Z_t * m \quad (\text{XX})$$



Gráfica 17. Z_t vs Z_q para el modelo BCM2 en Cuenca Calamar (izquierda) y Cuenca Nariño (derecha). Fuente: Elaboración propia

Luego se procede calcular el valor del cambio de caudal ΔQ para los modelos climáticos despejando el Q de la fórmula de Z :

$$Q = Z + \mu * Z_q \quad (\text{XXI})$$

Como se observa en la Figura 48, todos los caudales obtenidos con la metodología anteriormente mencionada de los GCMs tienen valores negativos. Aunque para algunos modelos los ΔP son

considerablemente grandes como en ECHOG y MIMR de 19.35 mm/mes y 25.56 mm/mes respectivamente, las subidas de temperatura de más de 2°C hicieron que la media de los caudales bajara. El modelo CGHR presentó la máxima disminución del caudal medio $\Delta Q = -4488.7 \text{ m}^3/\text{s}$ ya que presentó también la máxima disminución de la temperatura $\Delta T = 2.86^\circ\text{C}$, en cuanto al menor cambio de caudal fue exhibido por el modelo NCPCM con un valor $\Delta Q = -2013.1 \text{ m}^3/\text{s}$ es decir un caudal medio igual a $5533.3 \text{ m}^3/\text{s}$ para la ventana 2040.

Para la cuenca Calamar el promedio de ΔQ como resultado de las proyecciones de los modelos es de $3037.1 \text{ m}^3/\text{s}$, valor que significaría un caudal medio de $4509.3 \text{ m}^3/\text{s}$, es decir el caudal disminuiría en aproximadamente un 40% del valor actual.

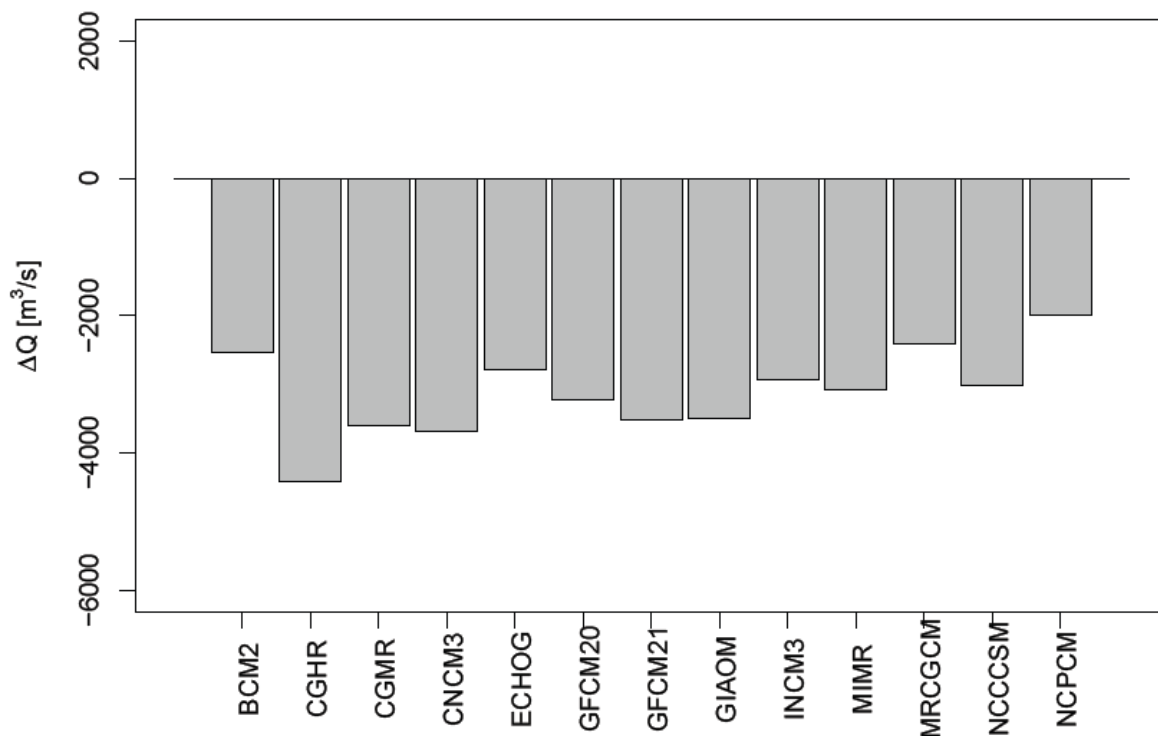


Figura 48. Cambios de caudales obtenidos de los modelos climáticos globales para la cuenca Calamar. Fuente: Elaboración propia

De igual manera en la Figura 49, los cambios de caudal obtenidos para la cuenca Nariño son en su mayoría negativos, pena de menores magnitudes ya que el caudal medio de la cuenca es de $1144.3 \text{ m}^3/\text{s}$. El modelo que presentó la mayor disminución del caudal medio con $\Delta Q = -201.3 \text{ m}^3/\text{s}$ fue al igual que para Cuenca Calamar el CGHR ya que contó con un ΔT de 2.79°C , siendo el mayor de todos los modelos. La menor disminución de caudal fue dada por el modelo MIMR con un $\Delta Q = -28.7 \text{ m}^3/\text{s}$. Tres de los modelos generaron un aumento en el caudal: el ECHOG que pronostica el mayor aumento en la precipitación con 29.3 mm/mes , el NCCSM con el segundo mayor aumento en la precipitación y el GIAOM con el tercer mayor aumento en la precipitación mensual. Los tres modelos que pronosticaron aumento en el caudal y el modelo que pronosticó la menor disminución en esta cuenca, fueron los modelos con los mayores aumentos en la precipitación; igualmente se debe tener en cuenta lo observado en Gráfica 13, donde las precipitaciones mayores a la precipitación media, al estar asociadas a aumentos en la temperatura mayores a ΔT de 1°C tienden a generar caudales superiores al caudal medio. En general puede decirse que en promedio,

se generaría una disminución del caudal para la ventana 2040 de $-71.4 \text{ m}^3/\text{s}$, equivalente al 6.2% del caudal medio de esta cuenca.

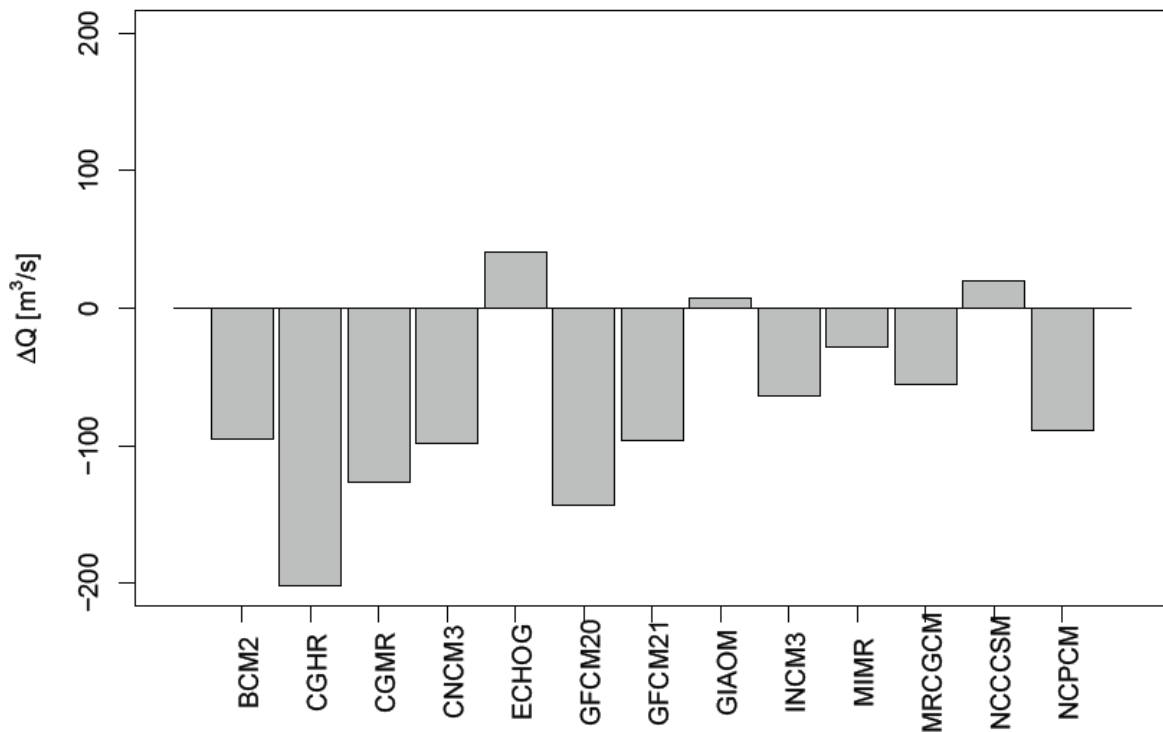


Figura 49. Cambios de caudales obtenidos de los modelos climáticos globales para la cuenca Nariño. Fuente: Elaboración propia

De la Gráfica 13 se deduce que los caudales son muy sensibles a pequeños cambios porcentuales de la temperatura, más que a cambios de similar magnitud en la precipitación, debido a que esos cambios relativamente pequeños de la temperatura son muy significativos. Por ejemplo, para la precipitación media de 172.36 mm/mes un cambio ΔT de -1°C generaría una reducción de casi $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ del caudal medio de $7546.4 \text{ m}^3/\text{s}$ de la cuenca calamar. Como los ΔT son todos positivos con un rango entre 1.3°C y 2.9°C para las dos cuencas, los cuales son bastante grandes para esta variable, entonces los ΔQ se hacen negativos a pesar del cambio positivo ΔP .

Finalmente, al tratar de comparar los aumentos de caudal anteriormente obtenidos con los resultantes de emplear el estimador no paramétrico de la elasticidad climática propuesto por Sankarasubramanian et al. (2001) y mostrado en el numeral 8.2, se encuentra que los últimos son considerablemente menores para todos los modelos y por lo tanto es notable cómo la inclusión de la temperatura es un factor influyente en la magnitud de los caudales de salida de la cuenca.

9 CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados, se concluye que la base de datos UD-ATP, presenta en general un buen ajuste luego de compararla con las estaciones en tierra del norte de Sudamérica y por lo tanto es validada para esta región. El porcentaje de píxeles a escala anual que pasan la prueba de ajuste es de 74.4 %, para los datos de precipitación. El periodo de mejores resultados del ajuste en la región es el invierno del hemisferio norte (Dic-Ene-Feb), con 87.6 % de píxeles que pasan la prueba. La información aquí validada se espera sirva de apoyo a futuras investigaciones sobre modelación climática para cualquier zona del país, aunque cabe mencionar que al poseer una resolución de 0.5° existe incertidumbre sobre la información suministrada ya que la dinámica de la hidro-climatología colombiana se ve influenciada por muchos factores.

Según la base de datos de la Universidad de Delaware y la prueba estadística realizada, la temperatura en Colombia mostró un cambio significativo en el siglo XX, presentándose mayor cambio en la primera mitad con un aumento de 0.64°C y una disminución de 0.34°C en la segunda. Esta dinámica de cambio, aumento en la primera mitad y disminución en la segunda, fue observada en toda Colombia con excepción de un área ubicada en el centro del país. Por su parte, la precipitación no presentó un cambio significativo a lo largo del siglo XX, exceptuando lo ocurrido en el extremo sur del departamento de Amazonas donde se evidencia un aumento cercano al 15% y algunas disminuciones en la segunda mitad del siglo.

Se estableció una relación temporal entre la precipitación y la temperatura, encontrándose que esta última influencia los valores de precipitación del mes siguiente. No se observó una relación espacial clara entre estas dos variables.

La relación escorrentía-precipitación-temperatura observada en la cuenca del río Magdalena, fue evaluada empleando la predicción de cambio de las variables climáticas para 2040-2069, de trece Modelos de Circulación Global. En cuenca Calamar, los trece modelos estuvieron asociados con la disminución del caudal medio del río, siendo el promedio de estas disminuciones de 3037,1 m³/s. En Cuenca Nariño, diez de los modelos generaron disminuciones de caudal, obteniéndose allí una disminución promedio de 71,4 m³/s. Aunque se consideraron un conjunto de trece modelos climáticos para tratar de cubrir el espectro de las posibles condiciones futuras del clima en el escenario escogido, no se puede evitar mencionar que hay una muy alta incertidumbre de lo que puede llegar a suceder en el futuro por lo tanto los resultados obtenidos se consideran poco probables que ocurran.

Los resultados de este proyecto son coherentes con lo publicado en el Estudio Nacional del Agua del 2010 (ENA, 2010). En el ENA (2010) se presenta un mapa para Colombia que representa el cambio de la escorrentía en el periodo 2041-2070, respecto del periodo base 1970-2000 (Fig. 720, pág. 314 del informe). De acuerdo con esta figura, la reducción de la escorrentía al interior de la cuenca del río Magdalena es superior al 30% en prácticamente todo su territorio.

El cálculo del estimador no paramétrico de elasticidad climática (Sankarasubramanian et al., 2001), dependiente únicamente de la precipitación, fue en Cuenca Calamar de 0.40 y en Cuenca Nariño de 0.36. Esta definición de elasticidad, se considera no representa la compleja relación entre los caudales y las variables climáticas, donde la temperatura tiene un rol de gran importancia.

10 RECOMENDACIONES

En primer lugar, se recomienda realizar el análisis de cambio climático de registros hidrológicos y climatológicos de Colombia mediante otros procedimientos estadísticos, como las pruebas de homogeneidad: prueba de sumas acumuladas, Análisis bayesiano y prueba de Friedman, entre otras, con el fin de abordar la evaluación y cuantificación del cambio desde otros puntos de vista. Adicionalmente, sería interesante emplear otra fuente para los registros, como otras bases de datos de variables climáticas e incluso información de estaciones de medición en tierra, esto buscando confirmar los resultados encontrados y evaluar la dinámica ocurrida en zonas, de topografía muy variada, que pudieron no haber sido descritas de la forma apropiada por la base de datos empleada.

En segundo lugar, se recomienda realizar pruebas empleando diferentes métodos de interpolación que capturen las tendencias de los cambios de los caudales ante cambios en la precipitación y la temperatura, buscando evitar la presencia de datos atípicos que dificulten su interpretación.

Es recomendable igualmente, realizar un estudio de la relación entre la variabilidad de la temperatura y la de la precipitación en Colombia, empleando series de datos con una frecuencia menor a la mensual, que permitan evaluar la dependencia de estas dos variables principalmente en lo relacionado a la ocurrencia de eventos extremos de precipitación, que como lo indica Liu et al. (2009), es considerablemente influenciada por incrementos en la temperatura. Lo anterior se recomienda con el fin de abordar de una mejor forma, las relaciones de dependencia que conllevan a los cambios de escorrentía generados en la cuenca. Por otro lado, siguiendo con la relación de estas dos variables, se recomienda que se realice el estudio separadamente por regiones del país, pues esta relación se muestra dependiente de la zona geográfica y tratar de unificarla para toda Colombia, puede no ser apropiado.

Adicionalmente, se recomienda incluir en el análisis de la sensibilidad de la escorrentía de los caudales del Río Magdalena, otras variables climáticas como la humedad relativa y la presión del aire, que puedan ayudar a describir de mejor manera el comportamiento de los caudales de salida y sirvan para representar en mejor forma la variabilidad de la Evapotranspiración. Se sugiere a la vez, calcular la elasticidad climática de los caudales por medio de otros enfoques diferentes a los usados en este trabajo y evaluar las diferencias, ventajas de interpretación y coherencia de los diferentes resultados.

Finalmente, ya que los modelos climáticos regionales poseen una representación de variables climáticas con mejor resolución espacial en zonas con topografía difícil, que la poseída por los modelos globales, se recomienda utilizarlos para evaluar la variabilidad espacial de la precipitación y la temperatura.

11 BIBLIOGRAFÍA

- Ablan, M., Rigoberto, A., Vargas, M. P., & Acevedo, M. (2008). Propuesta metodológica para el control de calidad de datos de precipitación. *Agronomía Tropical*, 58(1), 57-60.
- Acevedo Aristizábal, L., & Poveda Jaramillo, G. (2010). Construcción y análisis de curvas Intensidad-Frecuencia-Duración (IDF), bajo escenarios de cambio climático en Colombia. *Revista Colombia Amazónica*, 11-29.
- Acevedo, L. A. (2009). *Estimación hidrológica bajo escenarios de cambio climático en Colombia* (Maestría en Ingeniería). Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Alvarado, J. A., & Obagi, J. J. (2008). *Fundamentos de inferencia estadística*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Bernal, E. (2013). El Río Magdalena: Escenario primordial de la patria. *Revista Credencial*.
- Berner, E. K., & Berner, R. A. (1996). *Global environment: water, air, and geochemical cycles*. Prentice Hall.
- Chiew, F. (2006). Estimation of rainfall elasticity of streamflow in Australia. *Journal des Sciences Hydrologiques*, 51(4).
- Chow, V. T. (1994). *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá: McGraw-Hill.
- Cormagdalena. (2007). *Atlas Cuenca del Río Grande de la Magdalena*. Bogotá D.C.: Imprenta Nacional de Colombia.
- Devore, J. L. (2008). *Probabilidad Y Estadística para Ingenierías Y Ciencias*. Cengage Learning Editores.
- Durán, J. ., Pardo-Igúzquiza, E., & Robledo, P. . (2012). Detección automática de drepresiones utilizando el modelo digital del terreno y su aplicación a la cartografía geomorfológica. En *Avances de la Geomorfología en España 2010-2012* (p. 690).
- Felicísimo, A. M. (1999). La utilización de los MDT en los estudios del medio físico.
- Ferguson, C. E. (1971). *Teoría microeconómica*. Fondo de Cultura Económica.
- Fu, G., Charles, S. P., & Chiew, F. H. (2007). A two-parameter climate elasticity of streamflow index to assess climate change effects on annual streamflow. *Water Resources Research*, 43(W11419). Recuperado a partir de <http://www.agu.org/journals/wr/wr0711/2007WR005890/2007WR005890.pdf>
- IDEAM. (2010). *Estudio nacional del agua 2010*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá D.C.
- IGAC. (2004a). *Adopción del marco geocéntrico nacional de referencia MAGNA-SIRGAS como datum oficial de Colombia*. Bogotá D.C.
- IGAC. (2004b). *Aspectos prácticos de la adopción del marco geocéntrico nacional de referencia MAGNA-SIRGAS como datum oficial de Colombia*. Bogotá D.C.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.
- IPCC. (2000). *Special report emissions scenarios of IPCC working group III: summary for policymakers*.
- IPCC. (2007). *Cambio Climático 2007: Informe de síntesis*. Ginebra, Suiza.
- IPCC. (2013). What is a GCM? Recuperado 4 de noviembre de 2013, a partir de http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html
- Liu, S. C., Fu, C., Shiu, C.-J., Chen, J.-P., & Wu, F. (2009). Temperature dependence of global precipitation extremes. *Geophysical Research Letters*, 36(17). doi:10.1029/2009GL040218
- Mankiw, N. G., & Rabasco, E. (2007). *Principios de economía*. Editorial Paraninfo.

- Mantilla, R. (1999). *Análisis multiescala de propiedades morfométricas y de caudales máximos de cuencas hidrográficas de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Marshall, A. (2006). *Principles of Economics: Abridged Edition* (abridged edition.). Cosimo Inc.
- Martínez, C. (2006). *Estadística básica aplicada*. Ecoe Ediciones.
- Matsuura, K., & Willmott, C. (2012). Terrestrial Air Temperature: 1900-2010 Gridded Monthly Time Series. University of Delaware. Recuperado a partir de http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/Global2011/README.GlobalTsT2011.html
- Mejía, F., Mesa, O., Poveda, G., Velez, J., Hoyos, C., Mantilla, R., ... Botero, B. (1999). Distribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia. *Revista de la Facultad de Minas. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín*.
- Monsalve, G. (1995). *Hidrología en la ingeniería*. Santafé de Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Poveda, G. (2004). La hidrocimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria. *Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales*, 28(107), 201-222.
- Poveda, G., Vélez, J. I., & Mesa, A. (2007). Linking long-term water balances and statistical scaling to estimate River flows along the drainage network of Colombia. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(12), 4-13.
- Poveda Jaramillo, G. (1997). ¿Atractores extraños (caos) en la Hidro-climatología de Colombia? *Revista de la Academia colombiana de Ciencias Exactas, Física y Naturales*, 431-444.
- Poveda Jaramillo, G. (2004). La hidrocimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria. *Revista académica colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 201-222.
- Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo. (2010). El cambio climático en Colombia y en el Sistema de las Naciones Unidas. Revisión de riesgos y oportunidades asociados al cambio climático. Resumen para tomadores de decisión. Proyecto Integración de riesgos y oportunidades del cambio climático en los procesos nacionales de desarrollo y en la programación de país de las Naciones Unidas. Recuperado 24 de septiembre de 2012, a partir de http://www.pnud.org.co/img_upload/61626461626434343535373737353535/Brochure%20resumen%20Proyecto.pdf
- Ramírez, J. M. (2002). *Extracción automática de redes de drenaje a partir de modelos digitales de terreno*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Razali, N., & Wah, Y. (2011). Power comparisons of Shapiro-wilk, kolmogorov smirnov, lilliefors and anderson-darling tests. *Journal of statistical modeling and analytics*, 2(1), 21-33.
- Restrepo, J. D., Zapata, P., Díaz, J. M., Garzón-Ferreira, J., & García, C. B. (2006). Fluvial fluxes into the Caribbean Sea and their impact on coastal ecosystems: The Magdalena River, Colombia. *Global and Planetary Change*, 50(1-2), 33-49. doi:10.1016/j.gloplacha.2005.09.002
- Sankarasubramanian, A., Vogel, R., & Limbrunner, J. (2001). Climate elasticity of streamflow in the United States. *Water Resources Research*, 37(6), 1771-1781.
- Schaake, J. (1990). From climate to flow. En *Climate Change and U.S. Water Resources* (P. E. Waggoner., pp. 177- 206). New York.
- Shabri, A. (2002). A comparasion of plotting formulas for the pearson type III distribution. *Jurnal Teknologi*, 36(C), 61-74.

- Tebaldi, C., & Sansó, B. (2009). Joint Projections of Temperature and Precipitation Change from Multiple Climate Models: A Hierarchical Bayes Approach. *Journal of the Royal Statistical Society*, 172, 83-106.
- Torres Abello, A. E. (2004). *Apuntes de clase sobre hidrología urbana*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Van Oldenborgh, G. J. (2013). The KNMI Climate Explorer. Recuperado a partir de <http://climexp.knmi.nl/start.cgi?id=someone@somewhere>
- Vélez, J. I. (2001). *Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de crecidas* (Ph.D tesis). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Vélez, J. I., Mesa, O. J., & Poveda, G. (2002). Hidrosig Java: Una herramienta para la visualización y análisis de datos hidroclimatológicos. *Meteorología colombiana*, 6, 65-71.
- Walpole, R. E., Myers, R. H., & Myers, S. L. (1999). *Probabilidad y estadística para ingenieros*. Pearson Educación.

LISTA DE ANEXOS

Anexo No. 1: Precipitación y temperatura mensual mínima y máxima al interior de la cuenca Calamar (1901-2010)

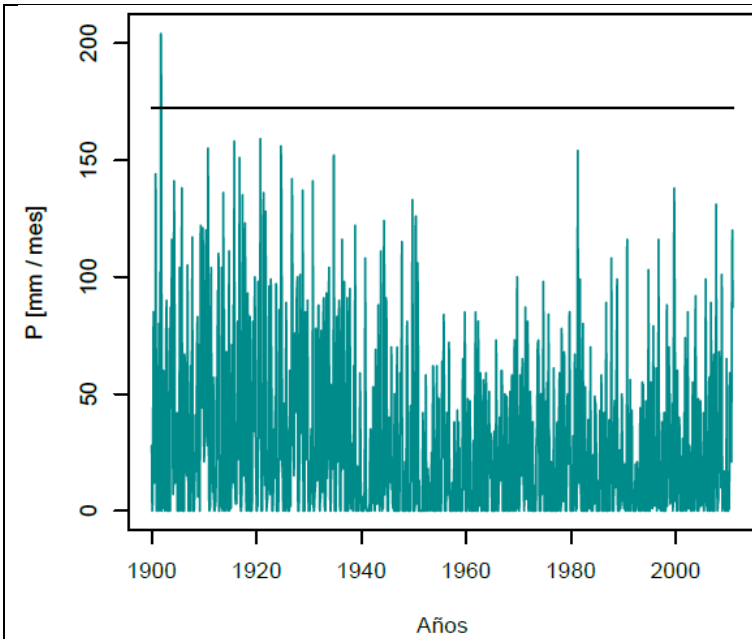
Anexo No. 2: Precipitación y temperatura mensual mínima y máxima en Colombia (1901-2010)

Anexo No. 3: Mapas promedio de precipitación mensual multianual para el norte de Sudamérica

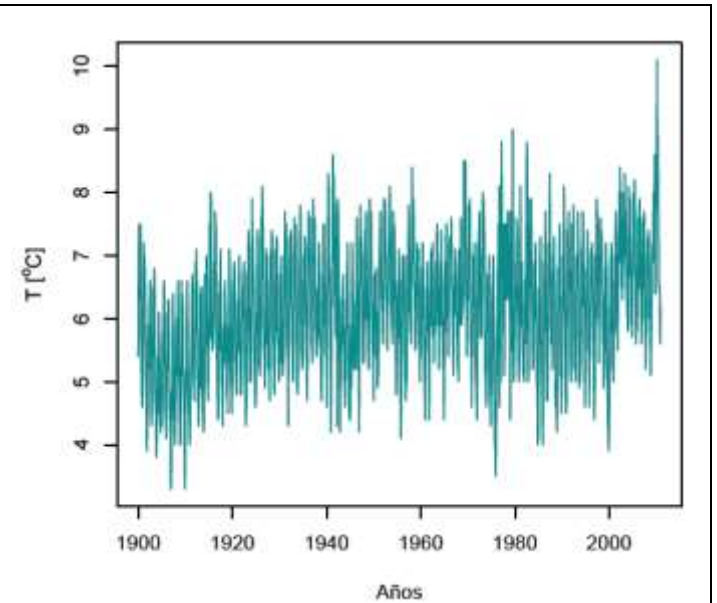
Anexo No. 4: Mapas promedio de temperatura mensual multianual para el norte de Sudamérica

ANEXOS

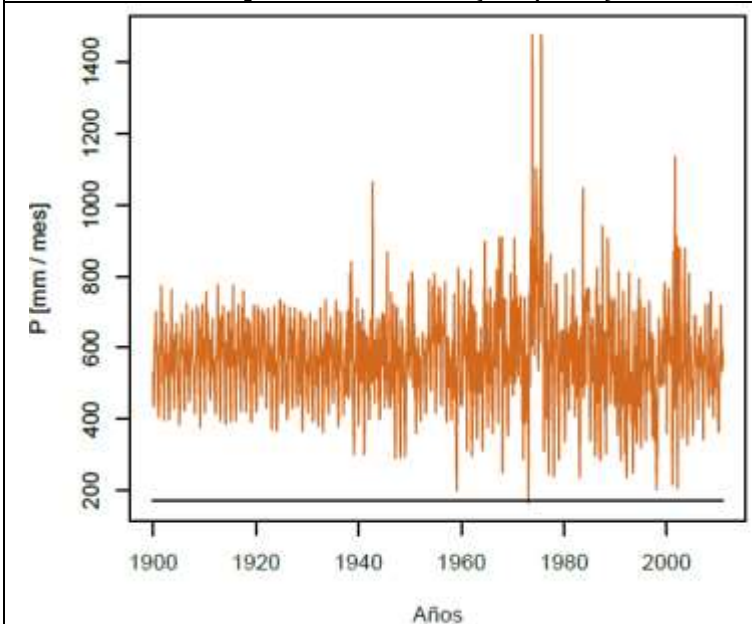
ANEXO 1. Precipitación y temperatura mensual mínima y máxima al interior de la cuenca Calamar (1901-2010)



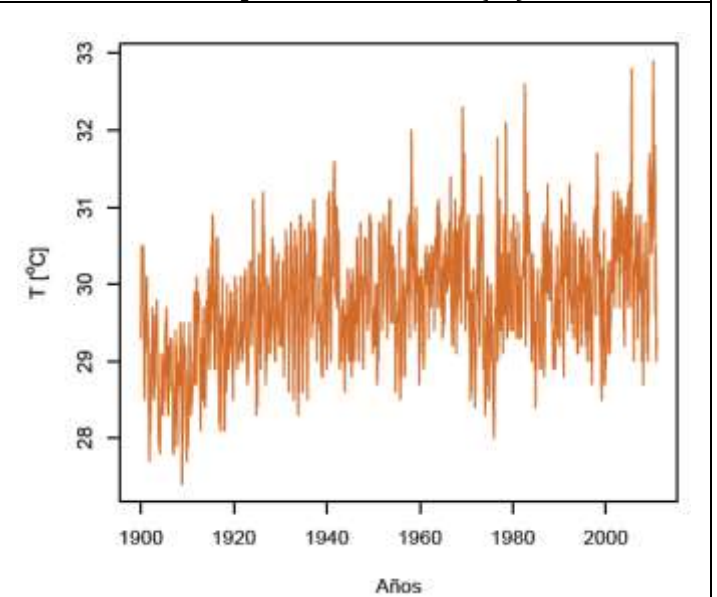
Precipitación mínima (mm/mes)



Temperatura mínima (°C)

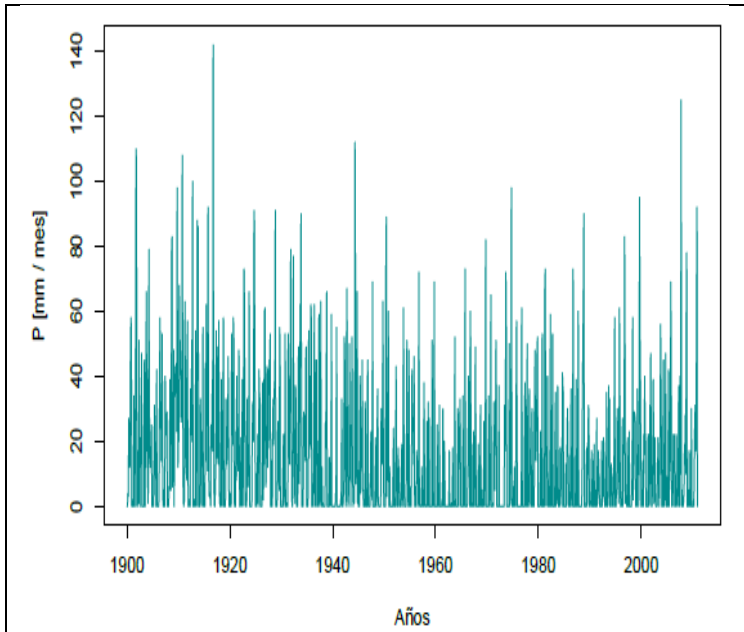


Precipitación máxima (mm/mes)

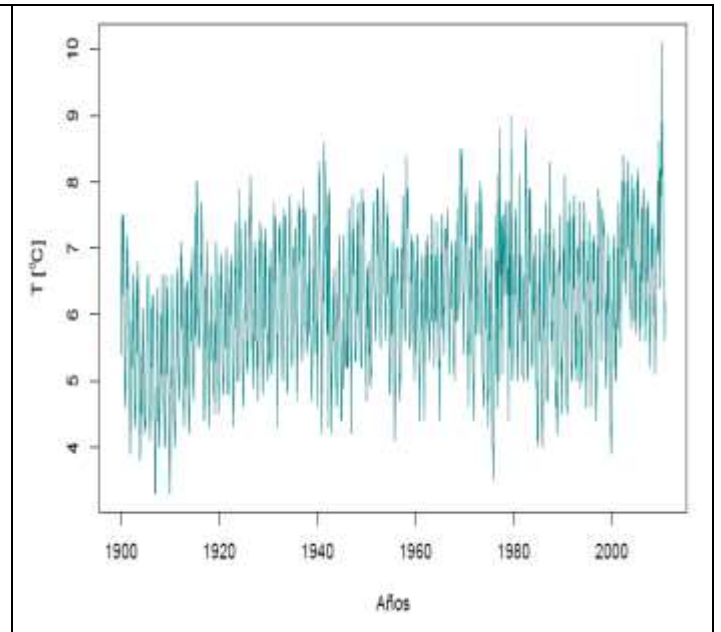


Temperatura máxima (°C)

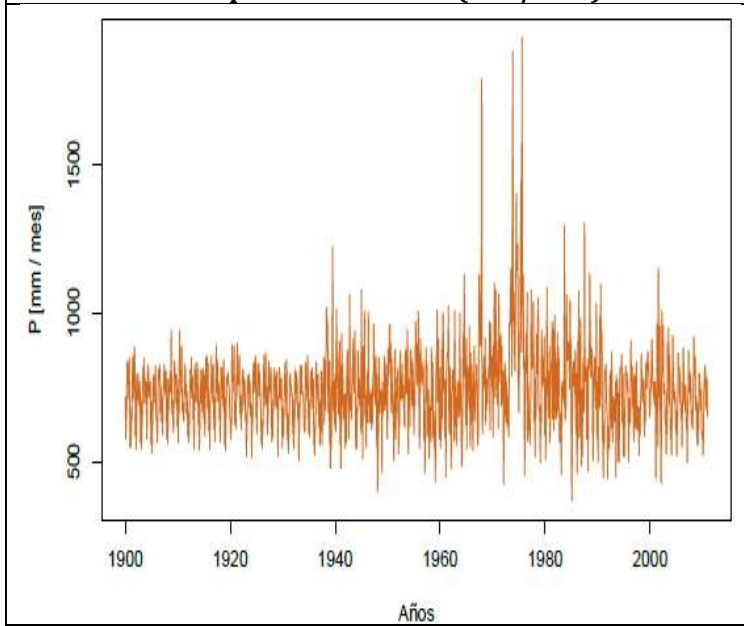
ANEXO 2. Precipitación y temperatura mensual mínima y máxima en Colombia (1901-2010)



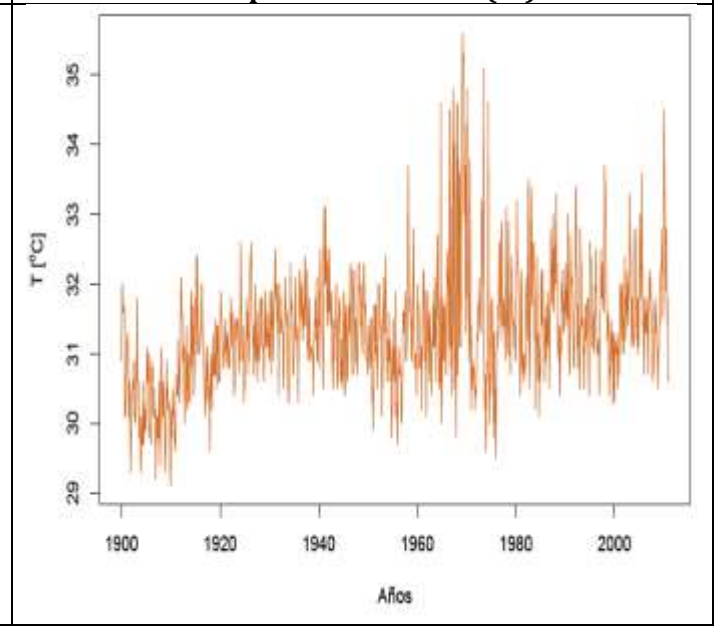
Precipitación mínima (mm/mes)



Temperatura mínima (°C)

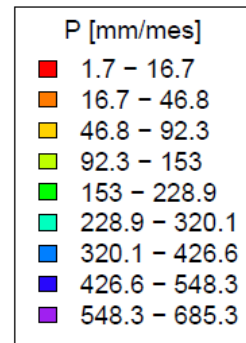
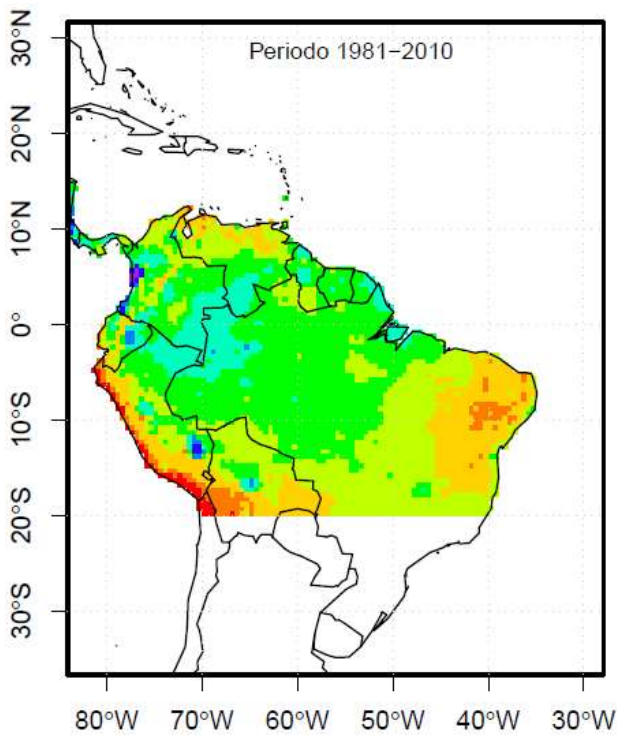
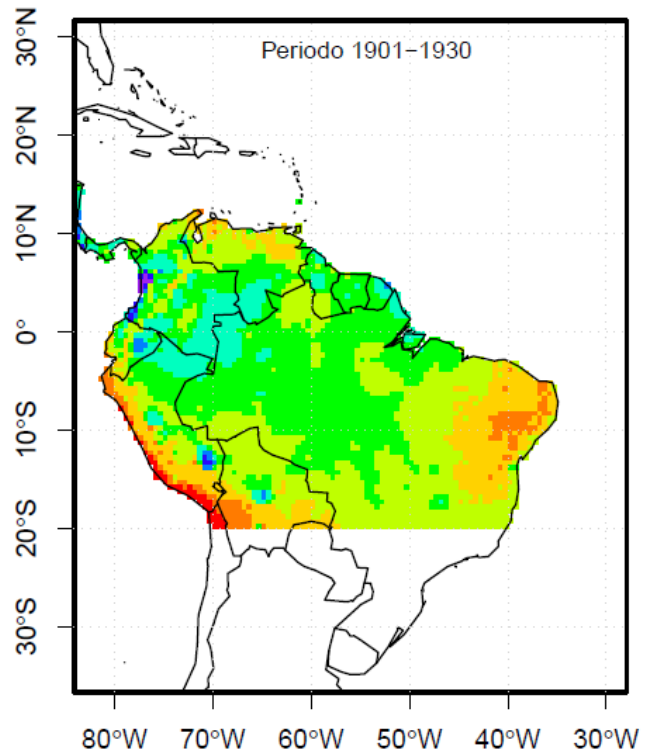
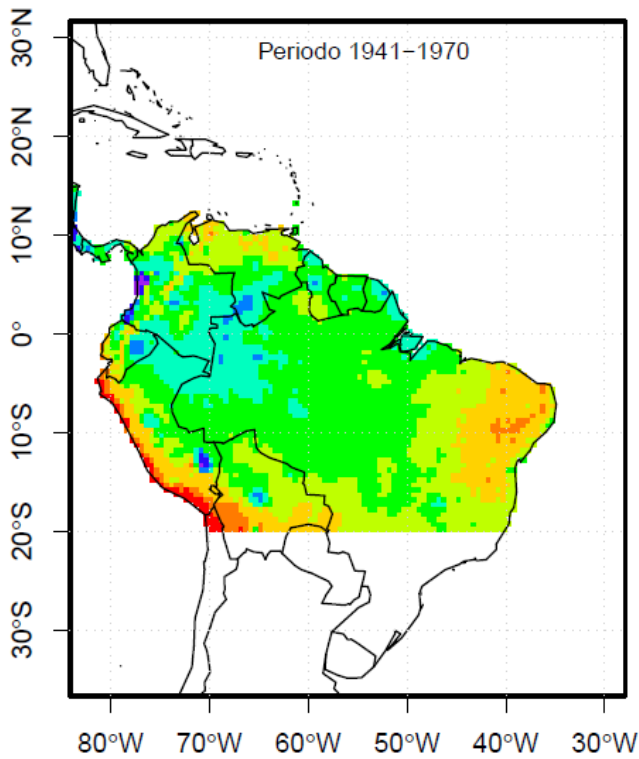


Precipitación máxima (mm/mes)



Temperatura máxima (°C)

ANEXO 3. Mapas promedio de precipitación mensual multianual para el norte de Sudamérica



ANEXO 4. Mapas promedio de temperatura mensual multianual para el norte de Sudamérica

