

TESIS DE MAESTRÍA

INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE COMO PRODUCIR HIETOGRAMAS DE
DISEÑO DE SISTEMAS DE ALCANTARILLADO DE AGUAS LLUVIAS
TENIENDO EN CUENTA EL CAMBIO CLIMÁTICO**

**PRESENTADO POR:
RAFAEL ANDRÉS MUÑOZ QUINTERO**

**NOMBRE DEL ASESOR
JUAN GUILLERMO SALDARRIAGA VALDERRAMA**
*Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, Departamento de
Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia*



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.**

2023



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios que me brinda fortaleza, es mi guía para continuar trabajando por mis sueños y me ha dado las capacidades necesarias para superar los retos que han surgido a lo largo de este camino.

Quiero reconocer el apoyo de mi familia, mi inspiración, siempre han sido mi soporte emocional y principal motivación para levantarme cada día a trabajar en mis proyectos, especialmente a mi padre Rafael Muñoz Caro quien fue fundamental para el desarrollo de la maestría.

Doy las gracias a la Universidad de los Andes que me permitió en estos dos años potenciar mis habilidades y adquirir muchos conocimientos en los temas que me apasionan, los cuales posibilitaron el cumplimiento de esta tesis.

También valoro el trabajo del profesor Juan Saldarriaga Valderrama, director de esta tesis, quien con sus conocimientos me oriento en momentos claves para lograr realizar este proyecto. Asimismo, al grupo de investigación CIACUA, de quienes aprendí mucho y me brindaron su increíble amistad.

Finalmente, agradezco a mis amigos que me motivaron cada día y fueron un soporte fundamental para cumplir este objetivo, particularmente a mi mejor amigo Juan Sacristán Vargas que me brindo su ayuda en el desarrollo de este proyecto.



TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	18
1.1 Introducción	18
1.2 Objetivos	19
1.2.1 Objetivo General.....	19
1.2.2 Objetivos Específicos.....	19
2. JUSTIFICACIÓN	19
2.1 Generación de energía	20
2.2 Agricultura y acceso a alimentos	20
2.3 Desplazamiento	21
2.4 Enfermedades	21
2.5 Deforestación	21
2.6 Desastres naturales	22
2.7 Presión sobre los ecosistemas	22
3. MARCO TEÓRICO	23
3.1 Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático	23
3.2 Cambio Climático en Colombia	26
3.3 Modelos de circulación general (MCG)	30
3.4 Relación entre los RCP y los SSP	33
3.5 Métodos de reducción de escala	34
3.6 Análisis de información climatológica	35
3.7 Métodos de cálculo de curvas IDF para escenarios futuros	36
3.8 Generación de hietogramas por el método de bloques alternos	38
4. METODOLOGÍA	38
4.1 Análisis y tratamiento de registros históricos	40
4.2 Generación de curvas IDF actuales	40
4.3 Pruebas con las metodologías de Pulgarín y CIACUA	41
4.4 Selección de MCG	41
4.5 Reducción de escala	41



4.6	Generación de curvas IDF en perspectiva del Cambio Climático.....	42
4.7	Producción de hietogramas de diseño influenciados por el Cambio Climático.....	42
4.8	Comparación de los hietogramas de diseño	42
5.	CASOS DE ESTUDIO	43
5.1	Caso de Estudio en Bogotá	43
5.2	Casos de Estudio en Medellín	46
6.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	52
6.1	Análisis y tratamiento de registros históricos	52
6.1.1	Cuenca Salitre - Molinos.....	52
6.1.2	Cuenca La Tinajas	66
6.1.3	Cuenca La Doctora	73
6.2	Generación de curvas IDF y hietogramas actuales.....	87
6.2.1	Cuenca Salitre - Molinos.....	88
6.2.2	Cuenca La Tinajas	90
6.2.3	Cuenca La Doctora	92
6.3	Pruebas con las metodologías de Pulgarín y CIACUA.....	95
6.3.1	Cuenca Salitre – Molinos.....	95
6.3.2	Cuenca La Tinajas	97
6.3.3	Cuenca La Doctora	98
6.4	Selección de MCG.....	100
6.4.1	Cuenca Salitre – Molinos.....	101
6.4.2	Cuenca La Tinajas	101
6.4.3	Cuenca La Doctora	101
6.5	Reducción de escala	101
6.5.1	Cuenca Salitre – Molinos.....	102
6.5.2	Cuenca La Tinajas	103
6.5.3	Cuenca La Doctora	104
6.6	Generación de curvas IDF en perspectiva del Cambio Climático.....	105
6.6.1	Cuenca Salitre – Molinos.....	105
6.6.2	Cuenca La Tinajas	108



6.6.3	Cuenca La Doctora	113
6.7	Producción de hietogramas de diseño influenciados por el Cambio Climático.....	118
6.7.1	Cuenca Salitre – Molinos	118
6.7.2	Cuenca La Tinajas	121
6.7.3	Cuenca La Doctora	125
6.8	Comparación de curvas IDF y hietogramas en perspectiva del Cambio Climático.....	129
6.8.1	Cuenca Salitre - Molinos.....	129
6.8.2	Cuenca La Tinajas	136
6.8.3	Cuenca La Doctora	143
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	150
7.1	Conclusiones.....	150
7.2	Recomendaciones para trabajos futuros.....	151
8.	REFERENCIAS.....	151
9.	ANEXOS.....	155



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Cambio de la temperatura global en superficie, aumento con respecto al periodo 1850-1900. Tomado de IPCC (2022)	25
Figura 2 Variaciones globales proyectadas en la precipitación 2021-2040. Tomado de IPCC (2022b)	25
Figura 3 Variaciones globales proyectadas en la precipitación 2041-2060. Tomado de IPCC (2022b)	26
Figura 4 Variaciones globales proyectadas en la precipitación 2081-2100. Tomado de IPCC (2022b)	26
Figura 5 Aumento de la temperatura en Colombia bajo escenarios RCP. Tomado de IDEAM et al. (2015)	27
Figura 6 Proyecciones Cambio Climático en Colombia. Tomado de IDEAM et al. (2015)	28
Figura 7 Proyecciones Cambio Climático en Bogotá. Tomado de IDEAM et al. (2015).....	29
Figura 8 Proyecciones Cambio Climático en Medellín. Tomado de (IDEAM et al., 2015).....	29
Figura 9 Vías socioeconómicas compartidas y combinaciones de forzamiento radiativo del año 2100. Tomado de Environment and Climate Change Canada (2023)	33
Figura 10 Diagrama de flujo de la metodología del proyecto	39
Figura 11 Localización estaciones pluviométricas activas en Bogotá. Tomado y modificado de IDEAM (2022), EAAB (2022) & CAR (2022)	43
Figura 12 Cuenca pluvial Salitre - Molinos. Tomado y modificado de IDEAM (2022) & EAAB (2022).	44
Figura 13 Elevación cuenca pluvial Salitre - Molinos. Tomado y modificado de ASF (2022)	45
Figura 14 Pendiente cuenca pluvial Salitre - Molinos. Tomado y modificado de ASF (2022)	46
Figura 15 Localización estaciones pluviométricas activas en Bogotá. Tomado y modificado de IDEAM (2022) & EPM (2022)	47
Figura 16 Cuenca pluvial La Tinajas. Tomado y modificado de (EPM, 2022)	48
Figura 17 Cuenca pluvial La Doctora. Tomado y modificado de EPM (2022).....	48
Figura 18 Elevación de la cuenca pluvial La Tinajas. Tomado y modificado de ASF (2022).....	49
Figura 19 Elevación de la cuenca pluvial La Doctora. Tomado y modificado de ASF (2022)	50
Figura 20 Pendiente de la cuenca pluvial La Tinajas. Tomado y modificado de ASF (2022).....	51
Figura 21 Pendiente de la cuenca pluvial La Doctora. Tomado y modificado de ASF (2022).....	51
Figura 22 Box Plot Usaquén - San Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022).....	53
Figura 23 Precipitación diaria Usaquén - San Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)..	54
Figura 24 Distribución normal Usaquén - San Ana (2120111). Tomado y modificado de (EAAB, 2022).	54
Figura 25 Cuantiles normal Usaquén - San Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)	55
Figura 26 Análisis de tendencia diario Usaquén - San Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022).....	56



Figura 27 Precipitación mensual Usaqué - San Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)	56
Figura 28 Precipitación anual Usaqué - San Ana (2120111). Tomado y modificado EAAB (2022)	57
Figura 29 Precipitación máxima en 24 horas mensual Usaqué - San Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)	57
Figura 30 Precipitación máxima en 24 horas anual Usaqué - San Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)	58
Figura 31 Número de días con lluvia mensual Usaqué - San Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)	58
Figura 32 Número de días con lluvia anual Usaqué - San Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)	59
Figura 33 Precipitación acumulada Usaqué - San Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)	59
Figura 34 Box Plot Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)	60
Figura 35 Precipitación diaria Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)	61
Figura 36 Distribución normal Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)	61
Figura 37 Cuantiles Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)	62
Figura 38 Análisis de tendencia diario Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)	63
Figura 39 Precipitación mensual Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)	63
Figura 40 Precipitación anual Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)	64
Figura 41 Precipitación máxima en 24 horas mensual Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)	64
Figura 42 Precipitación máxima en 24 horas anual Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)	65
Figura 43 Número de días con lluvia mensual Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)	65
Figura 44 Número de días con lluvia anual Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)	66
Figura 45 Precipitación acumulada Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)	66
Figura 46 Box Plot Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)	67
Figura 47 Precipitación diaria Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)	68
Figura 48 Distribución normal Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)	68
Figura 49 Cuantiles Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)	69
Figura 50 Análisis de tendencia diario Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)	70



Figura 51 Precipitación mensual Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)	70
Figura 52 Precipitación anual Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)	71
Figura 53 Precipitación máxima en 24 horas mensual Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)	71
Figura 54 Precipitación máxima en 24 horas anual Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)	72
Figura 55 Número de días con lluvia mensual Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)	72
Figura 56 Número de días con lluvia anual Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)	73
Figura 57 Precipitación acumulada Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)	73
Figura 58 Box Plot Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)	74
Figura 59 Precipitación diaria Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)	75
Figura 60 Distribución normal Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)	75
Figura 61 Cuantiles normal Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)	76
Figura 62 Análisis de tendencia diario Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)	77
Figura 63 Precipitación mensual Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)	77
Figura 64 Precipitación anual Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)	78
Figura 65 Precipitación máxima en 24 horas mensual Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)	78
Figura 66 Precipitación máxima en 24 horas anual Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)	79
Figura 67 Número de días con lluvia mensual Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)	79
Figura 68 Número de días con lluvia anual Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)	80
Figura 69 Precipitación acumulada Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)	80
Figura 70 Box Plot San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)	81
Figura 71 Precipitación diaria San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)	82
Figura 72 Distribución normal San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)	82
Figura 73 Cuantiles normal San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)	83
Figura 74 Análisis de tendencia diario San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)	84
Figura 75 Precipitación mensual San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)	84
Figura 76 Precipitación anual San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)	85
Figura 77 Precipitación máxima en 24 horas mensual San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)	85



Figura 78 Precipitación máxima en 24 horas anual San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)	86
Figura 79 Número de días con lluvia mensual San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022).....	86
Figura 80 Número de días con lluvia anual San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)	87
Figura 81 Precipitación acumulada San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022).....	87
Figura 82 Curvas IDF Usaquén – Santa Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)	88
Figura 83 Hietograma Usaquén – Santa Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)	89
Figura 84 Curvas IDF Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022).....	89
Figura 85 Hietograma Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022).....	90
Figura 86 Curvas IDF Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)	91
Figura 87 Hietograma Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)	92
Figura 88 Curvas IDF Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)	92
Figura 89 Hietograma Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022).....	93
Figura 90 Curvas IDF San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)	94
Figura 91 Hietograma San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022).....	95
Figura 92 Curvas IDF Pulgarín Usaquén - San Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)	95
Figura 93 Curvas IDF Pulgarín Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM, (2022)	96
Figura 94 Curvas IDF CIACUA Usaquén - San Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)	96
Figura 95 Curvas IDF CIACUA Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)	97
Figura 96 Curvas IDF Pulgarín Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)	97
Figura 97 Curvas IDF CIACUA Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022).....	98
Figura 98 Curvas IDF Pulgarín Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)	99
Figura 99 Curvas IDF Pulgarín San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)	99
Figura 100 Curvas IDF CIACUA Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022).....	100
Figura 101 Curvas IDF CIACUA San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022).....	100
Figura 102 Curvas IDF Pulgarín CNRM-ESM2-1-SSP2-4.5.....	106
Figura 103 Curvas IDF Pulgarín GFDL-CM4-gr2-SSP2-4.5.....	106
Figura 104 Curvas IDF Pulgarín GISS-E2-1-G-SSP2-4.5	106



Figura 105 Curvas IDF CIACUA CNRM-ESM2-1 -SSP2-4.5	106
Figura 106 Curvas IDF CIACUA GFDL-CM4-gr2 -1-SSP2-4.5	106
Figura 107 Curvas IDF CIACUA GISS-E2-1-G -SSP2-4.5	106
Figura 108 Curvas IDF Pulgarín CNRM-ESM2-1-SSP5-8.5.....	107
Figura 109 Curvas IDF Pulgarín GFDL-CM4-gr2- SSP5-8.5.....	107
Figura 110 Curvas IDF Pulgarín GISS-E2-1-G-SSP2-4.5	108
Figura 111 Curvas IDF CIACUA CNRM-ESM2-1 - SSP5-8.5	108
Figura 112 Curvas IDF CIACUA GFDL-CM4-gr2 -1- SSP5-8.5.....	108
Figura 113 Curvas IDF CIACUA GISS-E2-1-G - SSP5-8.5.....	108
Figura 114 Curvas IDF Pulgarín EC-Earth3-SSP2-4.5.....	109
Figura 115 Curvas IDF Pulgarín FGOALS-g3-SSP2-4.5	109
Figura 116 Curvas IDF Pulgarín KIOST-ESM-SSP2-4.5.....	109
Figura 117 Curvas IDF Pulgarín MPI-ESM-1-2-HR-SSP2-4.5	109
Figura 118 Curvas IDF Pulgarín TaiESM1-SSP2-4.5	110
Figura 119 Curvas IDF CIACUA EC-Earth3-SSP2-4.5	110
Figura 120 Curvas IDF CIACUA FGOALS-g3-SSP2-4.5	110
Figura 121 Curvas IDF CIACUA KIOST-ESM-SSP2-4.5.....	110
Figura 122 Curvas IDF CIACUA MPI-ESM-1-2-HR-SSP2-4.5.....	110
Figura 123 Curvas IDF CIACUA TaiESM1-SSP2-4.5.....	110
Figura 124 Curvas IDF Pulgarín EC-Earth3-SSP5-8.5.....	111
Figura 125 Curvas IDF Pulgarín FGOALS-g3- SSP5-8.5	111
Figura 126 Curvas IDF Pulgarín KIOST-ESM- SSP5-8.5.....	112
Figura 127 Curvas IDF Pulgarín MPI-ESM-1-2-HR- SSP5-8.5	112
Figura 128 Curvas IDF Pulgarín TaiESM1- SSP5-8.5	112
Figura 129 Curvas IDF CIACUA EC-Earth3- SSP5-8.5	112
Figura 130 Curvas IDF CIACUA FGOALS-g3- SSP5-8.5.....	112
Figura 131 Curvas IDF CIACUA KIOST-ESM- SSP5-8.5	112
Figura 132 Curvas IDF CIACUA MPI-ESM-1-2-HR- SSP5-8.5.....	113
Figura 133 Curvas IDF CIACUA TaiESM1- SSP5-8.5.....	113
Figura 134 Curvas IDF Pulgarín EC-Earth3-SSP2-4.5.....	114
Figura 135 Curvas IDF Pulgarín FGOALS-g3-SSP2-4.5	114
Figura 136 Curvas IDF Pulgarín KIOST-ESM-SSP2-4.5.....	114
Figura 137 Curvas IDF Pulgarín MPI-ESM-1-2-HR-SSP2-4.5	114



Figura 138 Curvas IDF Pulgarín TaiESM1-SSP2-4.5	114
Figura 139 Curvas IDF CIACUA EC-Earth3-SSP2-4.5	114
Figura 140 Curvas IDF CIACUA FGOALS-g3-SSP2-4.5	115
Figura 141 Curvas IDF CIACUA KIOST-ESM-SSP2-4.5	115
Figura 142 Curvas IDF CIACUA MPI-ESM-1-2-HR-SSP2-4.5.....	115
Figura 143 Curvas IDF CIACUA TaiESM1-SSP2-4.5.....	115
Figura 144 Curvas IDF Pulgarín EC-Earth3-SSP5-8.5.....	116
Figura 145 Curvas IDF Pulgarín FGOALS-g3- SSP5-8.5	116
Figura 146 Curvas IDF Pulgarín KIOST-ESM- SSP5-8.5.....	116
Figura 147 Curvas IDF Pulgarín MPI-ESM-1-2-HR- SSP5-8.5	116
Figura 148 Curvas IDF Pulgarín TaiESM1- SSP5-8.5	117
Figura 149 Curvas IDF CIACUA EC-Earth3- SSP5-8.5	117
Figura 150 Curvas IDF CIACUA FGOALS-g3- SSP5-8.5.....	117
Figura 151 Curvas IDF CIACUA KIOST-ESM- SSP5-8.5	117
Figura 152 Curvas IDF CIACUA MPI-ESM-1-2-HR- SSP5-8.5.....	117
Figura 153 Curvas IDF CIACUA TaiESM1- SSP5-8.5.....	117
Figura 154 Hietograma Pulgarín CNRM-ESM2-1-SSP2-4.5.....	119
Figura 155 Hietograma Pulgarín GFDL-CM4-gr2-SSP2-4.5.....	119
Figura 156 Hietograma Pulgarín GISS-E2-1-G-SSP2-4.5	119
Figura 157 Hietograma CIACUA CNRM-ESM2-1 -SSP2-4.5	119
Figura 158 Hietograma CIACUA GFDL-CM4-gr2 -1-SSP2-4.5.....	119
Figura 159 Hietograma CIACUA GISS-E2-1-G -SSP2-4.5	119
Figura 160 Hietograma Pulgarín CNRM-ESM2-1-SSP5-8.5.....	120
Figura 161 Hietograma Pulgarín GFDL-CM4-gr2- SSP5-8.5.....	120
Figura 162 Hietograma Pulgarín GISS-E2-1-G- SSP5-8.5	120
Figura 163 Hietograma CIACUA CNRM-ESM2-1 - SSP5-8.5	120
Figura 164 Hietograma CIACUA GFDL-CM4-gr2 -1- SSP5-8.5.....	121
Figura 165 Hietograma CIACUA GISS-E2-1-G - SSP5-8.5	121
Figura 166 Hietograma Pulgarín EC-Earth3-SSP2-4.5.....	121
Figura 167 Hietograma Pulgarín FGOALS-g3-SSP2-4.5	121
Figura 168 Hietograma Pulgarín KIOST-ESM-SSP2-4.5.....	122
Figura 169 Hietograma Pulgarín MPI-ESM-1-2-HR-SSP2-4.5	122
Figura 170 Hietograma Pulgarín TaiESM1-SSP2-4.5	122



Figura 171 Hietograma CIACUA EC-Earth3-SSP2-4.5.....	122
Figura 172 Hietograma CIACUA FGOALS-g3-SSP2-4.5	122
Figura 173 Hietograma CIACUA KIOST-ESM-SSP2-4.5.....	122
Figura 174 Hietograma CIACUA MPI-ESM-1-2-HR-SSP2-4.5.....	123
Figura 175 Hietograma CIACUA TaiESM1-SSP2-4.5	123
Figura 176 Hietograma Pulgarín EC-Earth3-SSP5-8.5.....	123
Figura 177 Hietograma Pulgarín FGOALS-g3- SSP5-8.5	123
Figura 178 Hietograma Pulgarín KIOST-ESM- SSP5-8.5.....	124
Figura 179 Hietograma Pulgarín MPI-ESM-1-2-HR- SSP5-8.5	124
Figura 180 Hietograma Pulgarín TaiESM1- SSP5-8.5	124
Figura 181 Hietograma CIACUA EC-Earth3- SSP5-8.5	124
Figura 182 Hietograma CIACUA FGOALS-g3- SSP5-8.5	124
Figura 183 Hietograma CIACUA KIOST-ESM- SSP5-8.5	124
Figura 184 Hietograma CIACUA MPI-ESM-1-2-HR- SSP5-8.5.....	125
Figura 185 Hietograma CIACUA TaiESM1- SSP5-8.5	125
Figura 186 Hietograma Pulgarín EC-Earth3-SSP2-4.5.....	125
Figura 187 Hietograma Pulgarín FGOALS-g3-SSP2-4.5	125
Figura 188 Hietograma Pulgarín KIOST-ESM-SSP2-4.5.....	126
Figura 189 Hietograma Pulgarín MPI-ESM-1-2-HR-SSP2-4.5	126
Figura 190 Hietograma Pulgarín TaiESM1-SSP2-4.5	126
Figura 191 Hietograma CIACUA EC-Earth3-SSP2-4.5.....	126
Figura 192 Hietograma CIACUA FGOALS-g3-SSP2-4.5	126
Figura 193 Hietograma CIACUA KIOST-ESM-SSP2-4.5.....	126
Figura 194 Hietograma CIACUA MPI-ESM-1-2-HR-SSP2-4.5.....	127
Figura 195 Hietograma CIACUA TaiESM1-SSP2-4.5	127
Figura 196 Hietograma Pulgarín EC-Earth3-SSP5-8.5.....	127
Figura 197 Hietograma Pulgarín FGOALS-g3- SSP5-8.5	127
Figura 198 Hietograma Pulgarín KIOST-ESM- SSP5-8.5.....	128
Figura 199 Hietograma Pulgarín MPI-ESM-1-2-HR- SSP5-8.5	128
Figura 200 Hietograma Pulgarín TaiESM1- SSP5-8.5	128
Figura 201 Hietograma CIACUA EC-Earth3- SSP5-8.5	128
Figura 202 Hietograma CIACUA FGOALS-g3- SSP5-8.5	128
Figura 203 Hietograma CIACUA KIOST-ESM- SSP5-8.5	128



Figura 204 Hietograma CIACUA MPI-ESM-1-2-HR- SSP5-8.5.....	129
Figura 205 Hietograma CIACUA TaiESM1- SSP5-8.5	129
Figura 206 Comparación curvas IDF Pulgarín 5 años SSP2-4.5.....	130
Figura 207 Comparación curvas IDF CIACUA 5 años SSP2-4.5	130
Figura 208 Comparación curvas IDF Pulgarín 25 años SSP2-4.5.....	130
Figura 209 Comparación curvas IDF CIACUA 25 años SSP2-4.5	130
Figura 210 Comparación curvas IDF Pulgarín 100 años SSP2-4.5	130
Figura 211 Comparación curvas IDF CIACUA 100 años SSP2-4.5	130
Figura 212 Comparación hietogramas 5 años Pulgarín SSP2-4.5	132
Figura 213 Comparación hietogramas 5 años CIACUA SSP2-4.5.....	132
Figura 214 Comparación hietogramas 25 años Pulgarín SSP2-4.5	132
Figura 215 Comparación hietogramas 25 años CIACUA SSP2-4.5.....	132
Figura 216 Comparación hietogramas 100 años Pulgarín SSP2-4.5.....	132
Figura 217 Comparación hietogramas 100 años CIACUA SSP2-4.5.....	132
Figura 218 Comparación curvas IDF Pulgarín 5 años SSP5-8.5.....	133
Figura 219 Comparación curvas IDF CIACUA 5 años SSP5-8.5	133
Figura 220 Comparación curvas IDF Pulgarín 25 años SSP5-8.5.....	133
Figura 221 Comparación curvas IDF CIACUA 25 años SSP5-8.5	133
Figura 222 Comparación curvas IDF Pulgarín 100 años SSP5-8.5	134
Figura 223 Comparación curvas IDF CIACUA 100 años SSP5-8.5	134
Figura 224 Comparación hietogramas 5 años Pulgarín SSP5-8.5	135
Figura 225 Comparación hietogramas 5 años CIACUA SSP5-8.5.....	135
Figura 226 Comparación hietogramas 25 años Pulgarín SSP5-8.5	135
Figura 227 Comparación hietogramas 25 años CIACUA SSP5-8.5.....	135
Figura 228 Comparación hietogramas 100 años Pulgarín SSP5-8.5.....	136
Figura 229 Comparación hietogramas 100 años CIACUA SSP5-8.5.....	136
Figura 230 Comparación curvas IDF Pulgarín 5 años SSP2-4.5.....	136
Figura 231 Comparación curvas IDF CIACUA 5 años SSP2-4.5	136
Figura 232 Comparación curvas IDF Pulgarín 25 años SSP2-4.5.....	137
Figura 233 Comparación curvas IDF CIACUA 25 años SSP2-4.5	137
Figura 234 Comparación curvas IDF Pulgarín 100 años SSP2-4.5	137
Figura 235 Comparación curvas IDF CIACUA 100 años SSP2-4.5	137
Figura 236 Comparación hietogramas 5 años Pulgarín SSP2-4.5	138



Figura 237 Comparación hietogramas 5 años CIACUA SSP2-4.5.....	138
Figura 238 Comparación hietogramas 25 años Pulgarín SSP2-4.5	139
Figura 239 Comparación hietogramas 25 años CIACUA SSP2-4.5.....	139
Figura 240 Comparación hietogramas 100 años Pulgarín SSP2-4.5.....	139
Figura 241 Comparación hietogramas 100 años CIACUA SSP2-4.5.....	139
Figura 242 Comparación curvas IDF Pulgarín 5 años SSP5-8.5.....	140
Figura 243 Comparación curvas IDF CIACUA 5 años SSP5-8.5.....	140
Figura 244 Comparación curvas IDF Pulgarín 25 años SSP5-8.5.....	140
Figura 245 Comparación curvas IDF CIACUA 25 años SSP5-8.5.....	140
Figura 246 Comparación curvas IDF Pulgarín 100 años SSP5-8.5.....	140
Figura 247 Comparación curvas IDF CIACUA 100 años SSP5-8.5.....	140
Figura 248 Comparación hietogramas 5 años Pulgarín SSP5-8.5.....	142
Figura 249 Comparación hietogramas 5 años CIACUA SSP5-8.5.....	142
Figura 250 Comparación hietogramas 25 años Pulgarín SSP5-8.5.....	142
Figura 251 Comparación hietogramas 25 años CIACUA SSP5-8.5.....	142
Figura 252 Comparación hietogramas 100 años Pulgarín SSP5-8.5.....	142
Figura 253 Comparación hietogramas 100 años CIACUA SSP5-8.5.....	142
Figura 254 Comparación curvas IDF Pulgarín 5 años SSP2-4.5.....	143
Figura 255 Comparación curvas IDF CIACUA 5 años SSP2-4.5.....	143
Figura 256 Comparación curvas IDF Pulgarín 25 años SSP2-4.5.....	144
Figura 257 Comparación curvas IDF CIACUA 25 años SSP2-4.5.....	144
Figura 258 Comparación curvas IDF Pulgarín 100 años SSP2-4.5.....	144
Figura 259 Comparación curvas IDF CIACUA 100 años SSP2-4.5.....	144
Figura 260 Comparación hietogramas 5 años Pulgarín SSP2-4.5.....	145
Figura 261 Comparación hietogramas 5 años CIACUA SSP2-4.5.....	145
Figura 262 Comparación hietogramas 25 años Pulgarín SSP2-4.5.....	146
Figura 263 Comparación hietogramas 25 años CIACUA SSP2-4.5.....	146
Figura 264 Comparación hietogramas 100 años Pulgarín SSP2-4.5.....	146
Figura 265 Comparación hietogramas 100 años CIACUA SSP2-4.5.....	146
Figura 266 Comparación curvas IDF Pulgarín 5 años SSP5-8.5.....	147
Figura 267 Comparación curvas IDF CIACUA 5 años SSP5-8.5.....	147
Figura 268 Comparación curvas IDF Pulgarín 25 años SSP5-8.5.....	147
Figura 269 Comparación curvas IDF CIACUA 25 años SSP5-8.5.....	147



Figura 270 Comparación curvas IDF Pulgarín 100 años SSP5-8.5	147
Figura 271 Comparación curvas IDF CIACUA 100 años SSP5-8.5	147
Figura 272 Comparación hietogramas 5 años Pulgarín SSP5-8.5	149
Figura 273 Comparación hietogramas 5 años CIACUA SSP5-8.5.....	149
Figura 274 Comparación hietogramas 25 años Pulgarín SSP5-8.5	149
Figura 275 Comparación hietogramas 25 años CIACUA SSP5-8.5.....	149
Figura 276 Comparación hietogramas 100 años Pulgarín SSP5-8.5.....	149
Figura 277 Comparación hietogramas 100 años CIACUA SSP5-8.5.....	149



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Los cuatro caminos de FR seleccionados por el IPCC para evaluar el comportamiento de la concentración de emisiones GEI en el planeta a 2100. Tomado de IDEAM et al. (2015).....	27
Tabla 2 Modelos CMIP6. Tomado de NASA CENTER FOR CLIMATE SIMULATION (2022).....	31
Tabla 3 Estaciones pluviométricas para el caso de estudio de Bogotá. Tomado y modificado de IDEAM (2022) & EAAB (2022).....	44
Tabla 4 Estaciones pluviométricas para el caso de estudio de Medellín. Tomado y modificado de EPM (2022).....	47
Tabla 5 Cuantiles Usaquén - San Ana (2120111). Tomado y modificado de (EAAB, 2022).	55
Tabla 6 Cuantiles Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de (EAAB, 2022).	62
Tabla 7 Cuantiles Pedregal (2701481). Tomado y modificado de (EAAB, 2022).	69
Tabla 8 Cuantiles Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022).....	75
Tabla 9 Cuantiles San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022).....	83
Tabla 10 Coeficientes curvas IDF Usaquén – Santa Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022).....	88
Tabla 11 Coeficientes curvas IDF Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022).....	90
Tabla 12 Coeficientes curvas IDF Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022).....	91
Tabla 13 Coeficientes curvas IDF Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)	93
Tabla 14 Coeficientes curvas IDF San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022).....	94
Tabla 15 Parámetros para el proceso de reducción de escala “Delta Change” para la Cuenca Salitre – Molinos.	102
Tabla 16 Resultados de intensidad media diaria tras el proceso de reducción de escala “Delta Change” para la Cuenca Salitre – Molinos.	102
Tabla 17 Resultados de intensidad media diaria tras el proceso de reducción de escala “Quantile Mapping” para la Cuenca Salitre – Molinos.	102
Tabla 18 Parámetros para el proceso de reducción de escala “Delta Change” para la Cuenca La Tinajas	103
Tabla 19 Resultados de intensidad media diaria tras el proceso de reducción de escala “Delta Change” para la cuenca La Tinajas	103
Tabla 20 Resultados de intensidad media diaria tras el proceso de reducción de escala “Quantile Mapping” para la Cuenca La Tinajas	103
Tabla 21 Parámetros para el proceso de reducción de escala “Delta Change” para la Cuenca La Doctora	104
Tabla 22 Resultados de intensidad media diaria tras el proceso de reducción de escala “Delta Change” para la Cuenca La Doctora	104



Tabla 23 Resultados de intensidad media diaria tras el proceso de reducción de escala “Quantile Mapping” para la Cuenca La Doctora	104
Tabla 24 Precipitación total hietogramas para el SSP2-4.5 Pulgarín	131
Tabla 25 Precipitación total hietogramas para el SSP2-4.5 CIACUA	131
Tabla 26 Precipitación total hietogramas para el SSP5-8.5 Pulgarín	134
Tabla 27 Precipitación total hietogramas para el SSP5-8.5 CIACUA	134
Tabla 28 Precipitación total hietogramas para el SSP2-4.5 Pulgarín	138
Tabla 29 Precipitación total hietogramas para el SSP2-4.5 CIACUA	138
Tabla 30 Precipitación total hietogramas para el SSP5-8.5 Pulgarín	141
Tabla 31 Precipitación total hietogramas para el SSP5-8.5 CIACUA	141
Tabla 32 Precipitación total hietogramas para el SSP2-4.5 Pulgarín	145
Tabla 33 Precipitación total hietogramas para el SSP2-4.5 CIACUA	145
Tabla 34 Precipitación total hietogramas para el SSP5-8.5 Pulgarín	148
Tabla 35 Precipitación total hietogramas para el SSP5-8.5 CIACUA	148



1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

En el marco del Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (2022a), se prevé un aumento de temperatura que alcanzaría 1.5 °C a corto plazo, el cual provocaría un aumento inevitable de múltiples peligros climáticos y múltiples riesgos para los ecosistemas y los seres humanos.

En Colombia, la Tercera Comunicación de Cambio Climático sugiere que los regímenes de precipitación en el territorio nacional sufrirán cambios, algunos ejemplos de esto son ciudades como Bogotá y Medellín, en donde para la primera se proyectan aumentos entre el 0% a más del 40% para los horizontes de Cambio Climático de los años 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100, mientras que en la segunda las variaciones esperadas se encuentran desde el 11% a más del 40% para los escenarios de 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100. Siendo progresivo el aumento de área con mayor porcentaje de alteración conforme el periodo es más lejano en el tiempo (IDEAM et al., 2015).

En ese sentido, los cambios proyectados anteriormente descritos en los regímenes de precipitación representan disminuciones en la capacidad de los sistemas de drenaje urbano, las cuales se encuentran fijas desde su diseño original y se espera que la intensidad en la precipitación aumente en las ciudades colombianas en menos de 30 años (Garzón, 2019).

Por lo cual, se desarrollaron tres casos de estudio con el fin de evaluar los aumentos en la precipitación a través del desarrolló de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) afectadas por el Cambio Climático y hietogramas de diseño, con el fin de demostrar los efectos del Cambio Climático sobre los sistemas de drenaje urbano.

Los casos de estudio en mención, corresponden a la ciudad de Bogotá, específicamente en la cuenca pluvial de Salitre-Molinos, la cual cuenta con un área de 925.84 ha y se encuentra instrumentada por las estaciones Usaquéen – Santa Ana (2120111) y Enmanuel D Alzón (2120123). Para el caso de Medellín se generaron dos casos de estudio, el primero de estos en la cuenca pluvial La Tinajas, esta posee un área de 320.78 ha y cuenta con influencia directa de la estación Pedregal (2701481). El caso de estudio restante corresponde a la cuenca pluvial La Doctora, que tiene un área de 1456.27 ha y cuenta con los registros de las estaciones Ayurá (2701093) y San Antonio del Prado (2701038).

Aunado a lo anterior, en función de lo proyectado en el Sexto Informe de Evaluación del IPCC se generaron actualizaciones sobre los Modelo de Circulación General (MCG), los cuales surgen con el ánimo de responder a dos limitaciones, la primera de estas se



relaciona con la capacidad para capturar los detalles espaciales en los patrones climáticos que a menudo se requieren o desean en los análisis regionales o locales y la segunda con mejorar las proyecciones que son globalmente precisas, pero localmente sesgadas en sus características estadísticas.

De este modo, en el presente informe se desarrolló el tratamiento estadístico de los registros históricos de precipitación de los lugares estudiados, así como la definición de los MCG más adecuados para cada caso de estudio y la aplicación de metodologías de reducción de escala para los resultados de los MCG, a partir de los cuales se generaron las series definitivas para construir las curvas IDF bajo las metodologías de Pulgarín y del Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA). Finalmente, mediante el proceso de bloques alternos se determinaron los hietogramas de diseño afectados por el Cambio Climático.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Evaluar los efectos del Cambio Climático en la precipitación para producir hietogramas de diseño de sistemas de alcantarillados de aguas lluvias.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar las variables físicas que condicionan los eventos de precipitación y su relación con el Cambio Climático.
- Analizar las alteraciones en la precipitación producidas por los efectos de Cambio Climático a partir de procesos de reducción de escala.
- Construir hietogramas de diseño a partir de la información desarrollada.

2. JUSTIFICACIÓN

De acuerdo con el Sexto Informe de Evaluación del IPCC (2022a), los cambios sostenidos en todos los elementos principales del sistema climático mundial: la atmósfera, la tierra, la criósfera, la biosfera y océano evidencian que los recientes cambios climáticos a gran escala no tienen precedentes en un contexto multimilenario y que representan un compromiso para los elementos de respuesta lenta del sistema climático.

En ese sentido, para Colombia los efectos del Cambio Climático se encuentran relacionados con diversas afectaciones y manifestaciones en distintos ámbitos.



Lo anterior se correlaciona con las alteraciones climáticas, un ejemplo de esto es el cambio promedio en el número medio de días expuestos a olas de calor (definido como un período de al menos 2 días en el que las temperaturas mínimas y máximas diarias están por encima del percentil 95 para sus respectivas climatologías) en los periodos 2016-2020 en relación con 1986–2005, en donde los registros correspondientes para Colombia fueron de 9.3 días (IPCC, 2022a).

En ese sentido, algunos de los principales efectos del Cambio Climático referidos por el IPCC (2022a) corresponden a afectaciones en la generación de energía, agricultura y abastecimiento de alimentos y de agua, desplazamiento, enfermedades, deforestación, desastres naturales y presión sobre ecosistemas. A continuación, se describe lo reportado por IPCC (2022a) para cada uno de los ámbitos mencionados:

2.1 Generación de energía

En Colombia, se prevé que la producción de energía hidroeléctrica disminuya en ~10 % en el escenario seco en el camino de concentración representativa (RCP) 4.5 para 2050 (Arango-Aramburo et al., 2019) referido por (IPCC, 2022a).

2.2 Agricultura y acceso a alimentos

En la cuenca fluvial más grande de los Andes colombianos, el Cambio Climático regional y las actividades de uso de la tierra (arado, pastoreo y deforestación) causaron un aumento de la tasa de erosión del 34 % durante 10 años (2008 - 2018), con una tasa de erosión antropogénica del suelo superior a la tasa de erosión impulsada por el clima (Restrepo & Escobar, 2018) referido por (IPCC, 2022a).

En otro estudio de la Amazonía colombiana, se informó que el uso de alimentos silvestres es vulnerable a eventos climáticos extremos que afectan los patrones de migración de las especies o restringen el acceso a rondas de pesca y caza (Torres-Vitolas et al., 2019) referido por (IPCC, 2022a).

Con respecto a las tecnologías agrícolas, se reportó que no necesariamente están cambiando, pero la actividad económica sí lo está haciendo para acomodar la creciente variación climática y adaptarse a los cambios en la disponibilidad de agua y las condiciones ideales de crecimiento (nivel de confianza alto), como se observa en Argentina, Colombia y Brasil (McMartin et al., 2018) referido por (IPCC, 2022a).

Los cambios en la temperatura y los patrones de precipitación estacional afectan el momento y la disponibilidad de agua para las actividades agrícolas (nivel de confianza alto), por ejemplo, en los Andes bolivianos; el piedemonte andino-amazónico de Colombia, Ecuador y Perú, el Alto Atlas de Marruecos, Hong Kong y la provincia de Golestán de Irán (IPCC, 2022a).



2.3 Desplazamiento

En las pequeñas ciudades de Colombia, el estrés por calor aumenta la migración a largo plazo de los hombres, impulsada por un efecto negativo en los ingresos agrícolas (Tovar-Restrepo & Irazábal, 2014) referidos por (IPCC, 2022a).

Por ejemplo, en Colombia, se ha observado que la migración del campo a la ciudad cuenta con características diferenciales de acuerdo con el género, es así como en atención al estrés climático por el cual los hombres migran debido a las sequías, mientras que las mujeres migran debido a los factores desencadenantes de lluvias excesivas. Perú, Colombia y Guatemala se encuentran entre los países con mayores desplazamientos promedio por causas hidrometeorológicas. (Tovar-Restrepo & Irazábal, 2014) referidos por (IPCC, 2022a).

2.4 Enfermedades

La malaria es causada principalmente por cinco especies distintas de parásitos: plasmodium (*Plasmodium falciparum*, *Plasmodium vivax*, *Plasmodium malariae*, *Plasmodium ovale* y *Plasmodium knowlesi*) y es transmitida por mosquitos. La evidencia sugiere que, en las zonas altas de Colombia, la malaria se ha desplazado en los años más cálidos hacia altitudes más altas, lo que indica que, sin intervención, la malaria aumentará en las zonas altas a medida que el clima se calienta (Siraj et al., 2014) referidos por (IPCC, 2022a).

La variación de los vientos, las temperaturas de la superficie del mar y la lluvia sobre el Océano Pacífico oriental tropical (El Niño-Oscilación del Sur; ENSO) se han relacionado con una mayor incidencia del dengue en Colombia (Quintero-Herrera et al., 2015); (McGregor et al., n.d.) referidos por (IPCC, 2022a).

Se prevé que los casos de dengue aumenten en los escenarios de calentamiento de 1.5 °C y 3.7 °C para 2050 y 2100, con aumentos que van desde 28,900 a 88,800 en Perú, 34,600 a 110,000 en Ecuador y 97,400 a 317,000 en Colombia, aunque esto no considera los efectos potenciales de las vacunas o las trayectorias socioeconómicas (Colón-González et al., 2018) referido por (IPCC, 2022a).

2.5 Deforestación

La tasa de deforestación y la incidencia de incendios están aumentando en la Amazonía de Brasil, Colombia y Perú (Seymour & Harris, 2019) referido por (IPCC, 2022a). Así, en 2019 se registró un aumento del 60 % en el conteo acumulado de incendios en Brasil, Colombia y Perú en comparación con el mismo período de 2018, y un aumento del 12 %



en comparación con el mismo período en un año extremadamente seco en 2016 (GFED, 2019) referido por (IPCC, 2022a).

Así mismo, se abordó el efecto combinado del Cambio Climático y del uso de la tierra en los incendios forestales amazónicos los impactos y riesgos en cascada en el ámbito social de la región.

2.6 Desastres naturales

Se proyecta que los eventos de precipitación extrema que resultan en inundaciones, deslizamientos de tierra y sequías, se intensifiquen en magnitud y frecuencia debido al Cambio Climático (nivel de confianza medio). Las inundaciones y deslizamientos de tierra representan un riesgo para la vida y la infraestructura; un aumento de 1.5 °C daría como resultado un aumento de 100 a 200 % en la población afectada por inundaciones en Colombia, Brasil y Argentina, 300 % en Ecuador y 400 % en Perú (nivel de confianza medio) (IPCC, 2022a).

De la misma manera, se visualizan condiciones cálidas y más secas a través de la reducción de precipitación total anual, precipitación extrema y consecutiva días húmedos y un aumento de días secos consecutivos (Chou et al., 2014) referido por (IPCC, 2022a).

Las olas de calor aumentarán en frecuencia y severidad en lugares cercanos a Colombia, con una disminución, pero fuerte humedecimiento en zonas costeras, inundaciones pluviales y fluviales y aumento medio del viento (Feron et al., 2019) referido por (IPCC, 2022a).

Los vínculos directos entre el Cambio Climático y la salud en las regiones montañosas se reconocen en términos de lesiones físicas o muertes debido a la exposición a peligros relacionados con el clima, como inundaciones o deslizamientos de tierra, o a enfermedades transmitidas por vectores, como la malaria o el dengue, los cuales se están presentando en elevaciones más altas con el aumento de temperaturas (nivel de confianza medio), como en Colombia (Siraj et al., 2014) referidos por (IPCC, 2022a).

2.7 Presión sobre los ecosistemas

También la biodiversidad y las actividades dependientes del agua donde la estacionalidad y los patrones de lluvia están cambiando y donde otras fuentes de cambio no climáticas, como el uso de la tierra, afectan la capacidad de los ecosistemas para proporcionar servicios hidrológicos (nivel de confianza muy alto) (Cerrón et al., 2019) referido por (IPCC, 2022a); (Molina et al., 2020) referido por (IPCC, 2022a).



De forma que, los países de esta subregión (Colombia, Ecuador y Perú) se encuentran entre los más vulnerables en términos de bienestar y salud (Nagy et al., 2018) referido por (IPCC, 2022a).

Teniendo en cuenta los impactos que ha generado el Cambio Climático, en Colombia se desarrolló la Tercera Comunicación de Cambio Climático, el cual es el documento oficial a nivel nacional de la emisión de informes relacionados. En ese sentido, en este se predijo que para el periodo 2071-2100 se espera que la precipitación aumente entre 10 a 30% en cerca del 14% del territorio nacional (Nariño, Cauca, Huila, Tolima, Eje Cafetero, occidente de Antioquia, norte de Cundinamarca, Bogotá y centro de Boyacá), resultado del aumento de emisiones globales, produciendo que la temperatura media anual en Colombia se incremente gradualmente para el fin del Siglo XXI (año 2100) en 2.14°C (IDEAM et al., 2015).

En consecuencia, las alteraciones en el Cambio Climático se traducen en problemas para los sistemas de aguas lluvias, tal como los describe Garzón (2019), mientras la capacidad del drenaje urbano se encuentra fija desde su diseño original, la intensidad de las lluvias se espera que incremente en menos de 30 años en las ciudades colombianas.

Así mismo, la impermeabilización del suelo debida al crecimiento urbano implica un cambio en las condiciones hidrológicas locales; adicionalmente, se espera que el Cambio Climático genere un incremento en la frecuencia de periodos intensos de lluvia en algunas regiones (Enríquez et al., 2022).

De acuerdo con los antecedentes identificados en el marco del Sexto Informe de Evaluación del IPCC (2022a) y la Tercera Comunicación de Cambio Climático para Colombia (2015), surge la necesidad de establecer una metodología para realizar la construcción de hietogramas de diseño para los nuevos escenarios de Cambio Climático, con el fin de identificar posibles variaciones en la capacidad de los alcantarillados de aguas lluvias.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

Este informe reconoce la interdependencia del clima, los ecosistemas, la biodiversidad y las sociedades humanas, e integra los conocimientos de las ciencias naturales, ecológicas, sociales y económicas en mayor medida que las anteriores evaluaciones del IPCC. La evaluación de los impactos y riesgos del Cambio Climático, así como de la adaptación, se sitúa en el contexto de las tendencias mundiales no climáticas que se desarrollan simultáneamente, como la pérdida de biodiversidad, el consumo insostenible de recursos



naturales, la degradación del suelo y de los ecosistemas, la rápida urbanización, los cambios demográficos, las desigualdades sociales y económicas y una pandemia (IPCC, 2022a).

Las evaluaciones de los riesgos climáticos tienen en cuenta el posible Cambio Climático futuro, el desarrollo de la sociedad y las respuestas ante los distintos horizontes proyectados. El informe evalúa la bibliografía basada en simulaciones de modelos climáticos que forman parte de la quinta y sexta fase del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP5, CMIP6) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas. Las proyecciones futuras se basan en las emisiones y/o concentraciones de los escenarios ilustrativos de los RCP y los caminos socioeconómicos compartidos (SSP) (IPCC, 2022a).

En ese sentido, se prevé un aumento de temperatura que alcanzaría 1,5 °C a corto plazo, provocaría un aumento inevitable de múltiples peligros climáticos y múltiples riesgos para los ecosistemas y los seres humanos (nivel de confianza muy alto). El nivel de riesgo dependerá de las tendencias concurrentes a corto plazo en vulnerabilidad, exposición, nivel de desarrollo socioeconómico y adaptación (confianza alta). De modo que, las medidas a corto plazo que limiten el calentamiento global a cerca de 1,5 °C reducirían sustancialmente las pérdidas y los daños previstos relacionados con el Cambio Climático en los sistemas humanos y los ecosistemas, en comparación con niveles de calentamiento más elevados, pero no pueden eliminarlos por completo (IPCC, 2022a).

El calentamiento global de 1.5 °C con respecto a 1850-1900 se superaría durante el siglo XXI en los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero intermedias, altas y muy altas considerados en este informe (SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5, respectivamente). En los cinco escenarios ilustrativos, a corto plazo (2021-2040), es muy probable que se supere el nivel de calentamiento global de 1,5 °C en el escenario de emisiones de gases de efecto invernadero muy altas (SSP5-8.5), es probable que se supere en los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero intermedias y altas (SSP2-4.5 y SSP3-7.0), es más probable que no se supere en el escenario de bajas emisiones de gases de efecto invernadero (SSP1-2.6) y más probable que no se alcance en el escenario de muy bajas emisiones de gases de efecto invernadero (SSP1-1.9) (IPCC, 2022a) (Ver Figura 1).

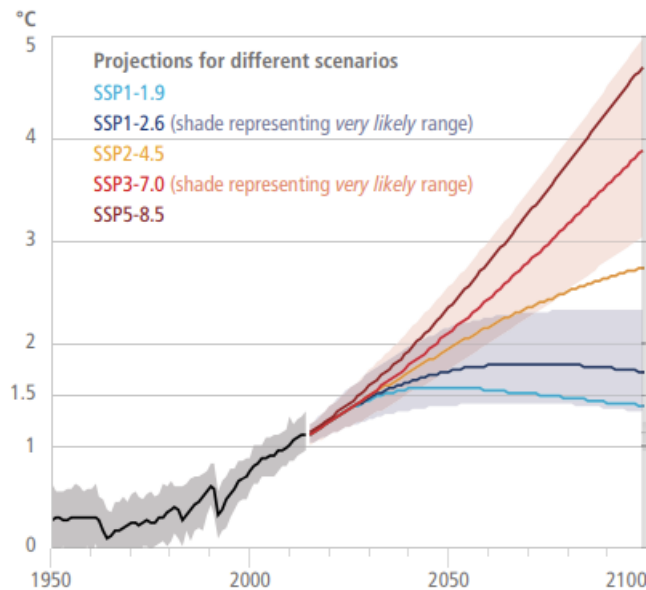


Figura 1 Cambio de la temperatura global en superficie, aumento con respecto al periodo 1850-1900. Tomado de IPCC (2022)

Asimismo, mediante el Atlas interactivo del IPCC (2022b), se identificaron las variaciones proyectadas de precipitación para el escenario del SPP5-8.5 para los horizontes de Cambio Climático de 2021-2040, 2041-2060 y 2081-2100. Esta información incluye el análisis de 33 modelos climáticos, analizados bajo el supuesto de aumento de 2° y con el escenario de referencia de 1850 a 1900. Esta información es presentada en las Figura 2 a Figura 4.

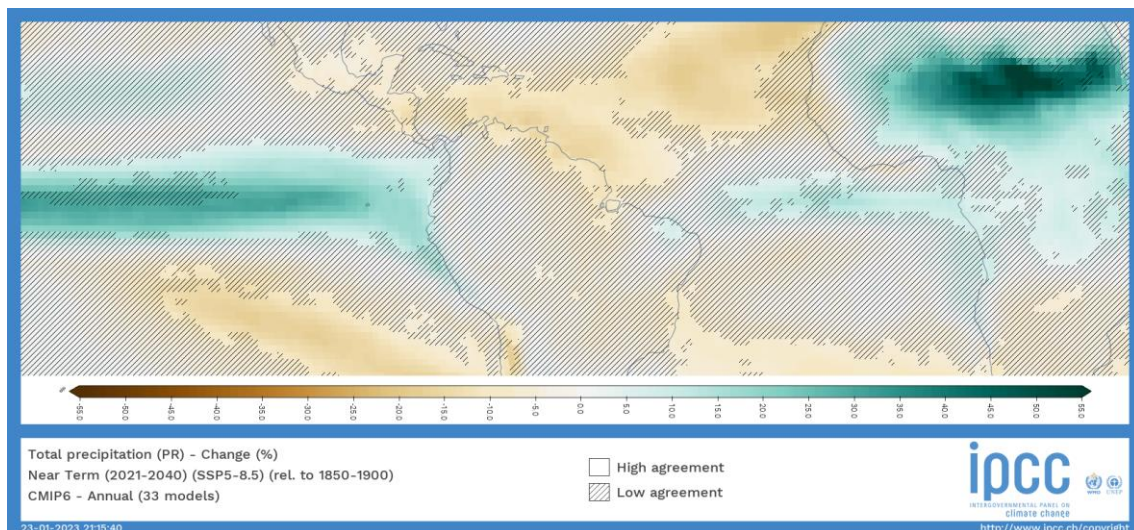


Figura 2 Variaciones globales proyectadas en la precipitación 2021-2040. Tomado de IPCC (2022b)

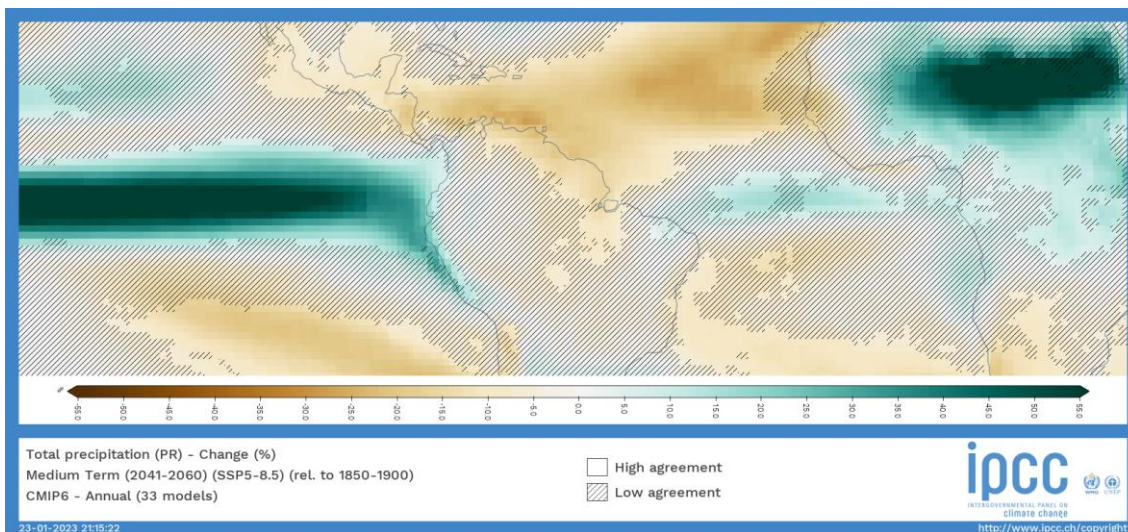


Figura 3 Variaciones globales proyectadas en la precipitación 2041-2060. Tomado de IPCC (2022b)

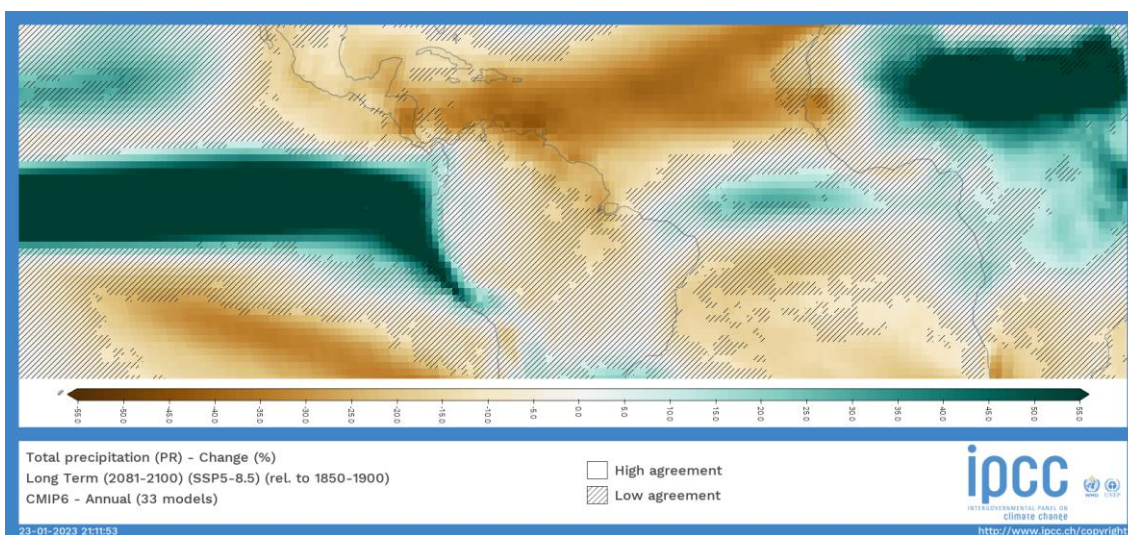


Figura 4 Variaciones globales proyectadas en la precipitación 2081-2100. Tomado de IPCC (2022b)

3.2 Cambio Climático en Colombia

Los escenarios de Cambio Climático para Colombia siguen las rutas metodológicas propuestas por el IPCC en su Quinto Informe de Evaluación (AR5) del año 2013. Para su desarrollo los científicos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) tomaron los 16 modelos globales que mejor representan el clima de referencia de Colombia (1976-2005) y que modelan la temperatura y la precipitación hasta el año 2100. Estos modelos fueron regionalizados con métodos estadísticos con el fin de proyectarlas en el contexto nacional (IDEAM et al., 2015).

En el AR5 se definieron cuatro nuevos escenarios de emisión, denominados RCP. Éstos se caracterizan por su Forzamiento Radiativo (FR) total para el año 2100 que oscila entre 2.6 y 8.5 vatios por metro cuadrado (W/m^2) (IDEAM et al., 2015) (Ver Tabla 1).



Tabla 1 Los cuatro caminos de FR seleccionados por el IPCC para evaluar el comportamiento de la concentración de emisiones GEI en el planeta a 2100. Tomado de IDEAM et al. (2015)

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

Conforme a lo anterior, tras el ensamble de 16 MCG, se establecieron los aumentos de temperatura esperados para cada RCP (Ver Figura 5).

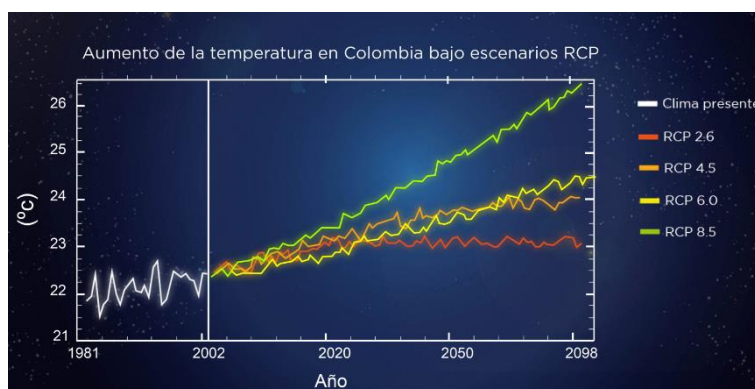


Figura 5 Aumento de la temperatura en Colombia bajo escenarios RCP. Tomado de IDEAM et al. (2015)

A partir del análisis de estos escenarios es posible inferir que el país en su conjunto estaría afectado por el Cambio Climático; pero no de la misma forma para todo Colombia. Esto implica que las medidas para hacer frente a posibles fenómenos extremos deben ser diferentes para cada región del territorio nacional (IDEAM et al., 2015).

Así mismo, se determinó que si los niveles de emisiones globales de gases efecto invernadero aumentan (que es lo más probable), la temperatura media anual en Colombia podría incrementarse gradualmente para el fin del Siglo XXI (año 2100) en 2.14°C. Los mayores aumentos de temperatura para el periodo 2071 – 2100, se esperan en los departamentos de Arauca, Vichada, Vaupés y Norte de Santander (+2,6°C) (IDEAM et al., 2015).

Por su parte, en los años en que se presente el fenómeno de La Niña, las regiones donde se esperan aumentos de precipitación podrán ser más afectadas, ya que este fenómeno se caracteriza por el aumento de las lluvias. En ese sentido, para el periodo 2071-2100 se espera que la precipitación aumente entre 10 a 30% en cerca del 14% del territorio



nacional (Nariño, Cauca, Huila, Tolima, Eje Cafetero, occidente de Antioquia, norte de Cundinamarca, Bogotá y centro de Boyacá) (IDEAM et al., 2015).

De acuerdo con la información relacionada anteriormente se presentan las variaciones en precipitación esperadas para Colombia para los distintos horizontes de Cambio Climático (Ver Figura 6 a Figura 8).

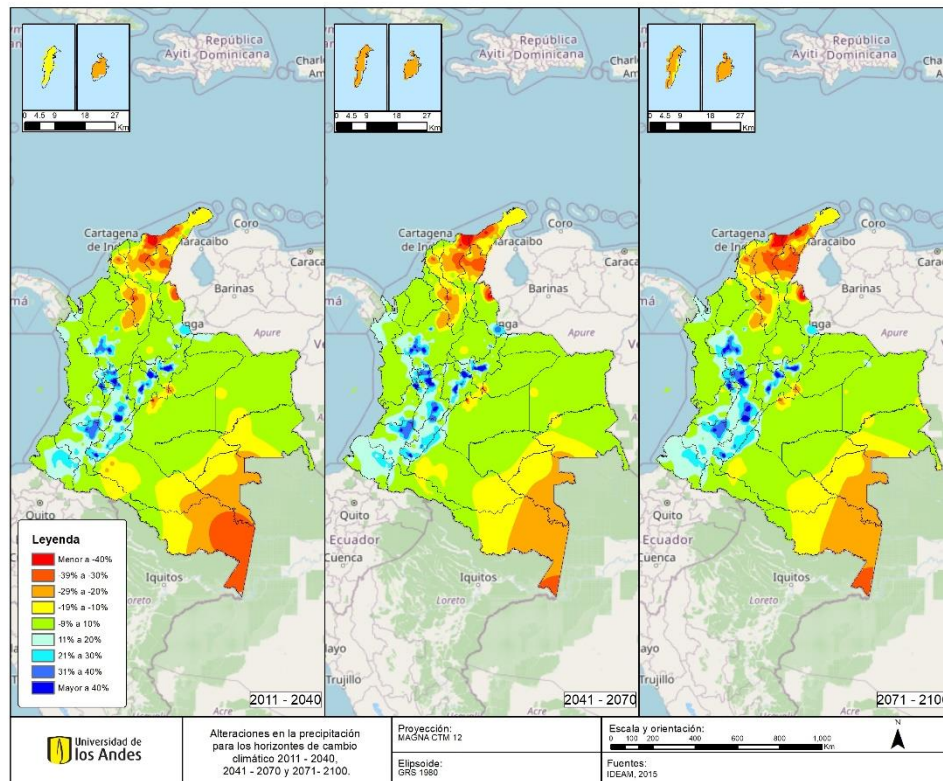


Figura 6 Proyecciones Cambio Climático en Colombia. Tomado de IDEAM et al. (2015)

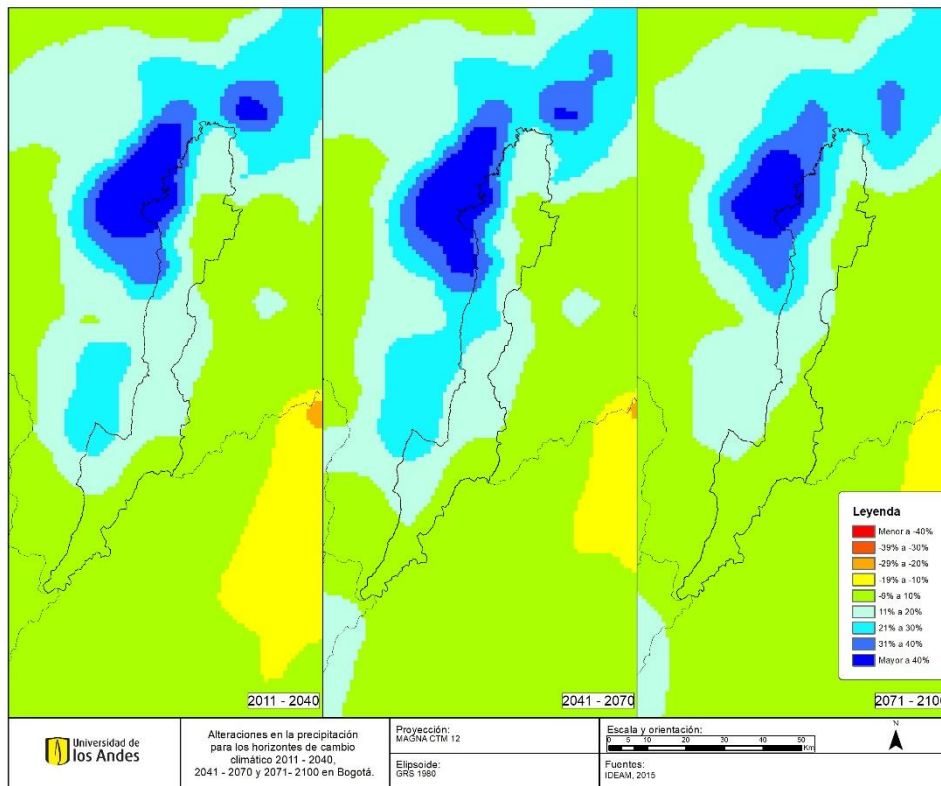


Figura 7 Proyecciones Cambio Climático en Bogotá. Tomado de IDEAM et al. (2015)

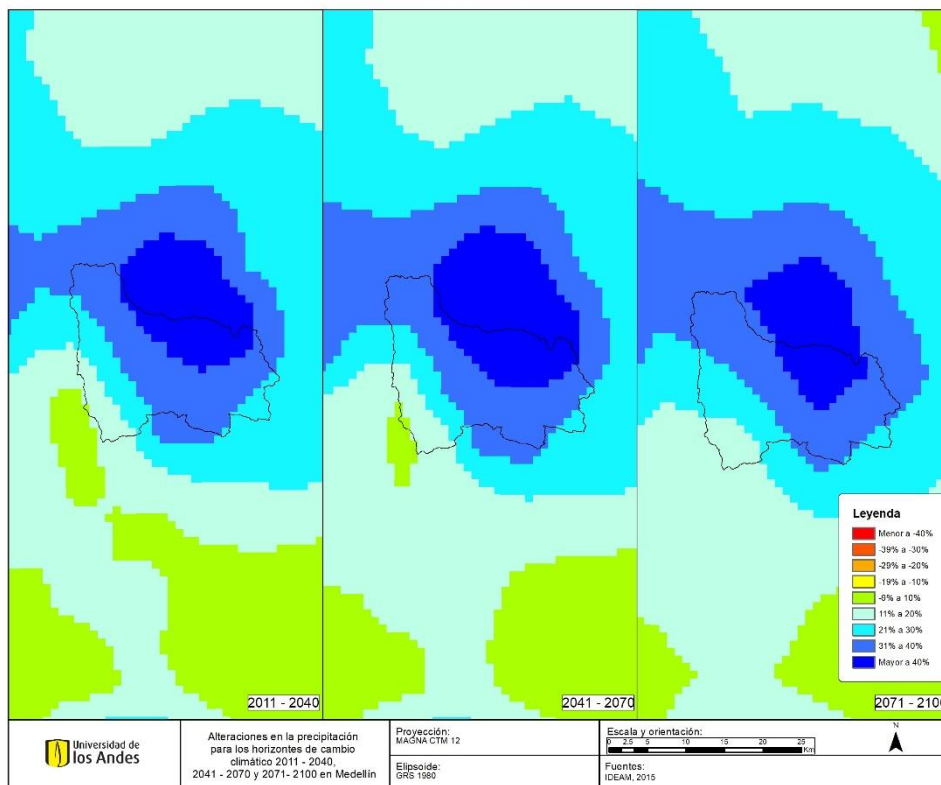


Figura 8 Proyecciones Cambio Climático en Medellín. Tomado de (IDEAM et al., 2015)



3.3 Modelos de circulación general (MCG)

El conjunto de datos Global Daily Downscaled Projections (GDDP) de NASA Earth Exchange (NEX) está destinado a los usuarios que deseen aplicar el conjunto de datos NEX-GDDP-CMIP6 en estudios de impactos del Cambio Climático (NASA CENTER FOR CLIMATE SIMULATION, 2022).

Este conjunto de datos de la NASA es una herramienta para ayudar a la comunidad científica a realizar estudios de los impactos del Cambio Climático a escala local y regional y para mejorar la comprensión pública de posibles cambios futuros en los patrones climáticos a escala espacial de pueblos, ciudades y cuencas hidrográficas individuales (NASA CENTER FOR CLIMATE SIMULATION, 2022).

El conjunto de datos NEX-GDDP-CMIP6 se compone de escenarios climáticos globales reducidos derivados de las ejecuciones del MCG realizadas bajo el CMIP6 y en dos de los cuatro escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero de "Nivel 1" conocidos como SSP. Las proyecciones para CMIP6-MCG se desarrollaron en apoyo del Sexto Informe de Evaluación (AR6) del IPCC (NASA CENTER FOR CLIMATE SIMULATION, 2022).

La demanda de reducción de escala de los resultados de MCG surge de dos limitaciones principales inherentes a los resultados de la simulación global actual. En primer lugar, la mayoría de los MCG utilizan cuadrículas de resolución relativamente baja, (por ejemplo, unos pocos grados o 102 km), lo que limita su capacidad para capturar los detalles espaciales en los patrones climáticos que a menudo se requieren o desean en los análisis regionales o locales. En segundo lugar, incluso el MCG más avanzado puede producir proyecciones que son globalmente precisas, pero localmente sesgadas en sus características estadísticas (es decir, media, varianza, etc.) en comparación con las observaciones (NASA CENTER FOR CLIMATE SIMULATION, 2022).

El método de desagregación espacial con corrección de sesgo (BCSD) utilizado para generar el conjunto de datos NEX-GDDP-CMIP6 es un algoritmo de reducción de escala estadístico desarrollado específicamente para abordar estas limitaciones de los resultados globales de MCG. El algoritmo compara los resultados del MCG con las observaciones climáticas correspondientes durante un período común y utiliza la información derivada de la comparación para ajustar las proyecciones climáticas futuras para que sean progresivamente más consistentes con los registros climáticos históricos y, presumiblemente, más realistas para el dominio espacial de interés. El algoritmo también utiliza el detalle espacial proporcionado por conjuntos de datos derivados de la observación para interpolar los resultados de MCG en cuadrículas de mayor resolución (NASA CENTER FOR CLIMATE SIMULATION, 2022).



A partir de la producción de un conjunto de datos globales de proyecciones climáticas CMIP6 reducidas para facilitar la evaluación de los impactos del Cambio Climático. El conjunto de datos compila proyecciones climáticas de treinta y cinco MCG de la CMIP6 (Tabla 2) y cuatro escenarios SSP (SSP2-4.5, SSP5-8.5, SSP1-2.6 y SSP3-7.0) para el período de 2015 a 2100, así como el experimento histórico de cada modelo para el período 1950-2014. Cada una de estas proyecciones climáticas se reduce a una resolución espacial de 0.25 grados x 0.25 grados (NASA CENTER FOR CLIMATE SIMULATION, 2022).

Tabla 2 Modelos CMIP6. Tomado de NASA CENTER FOR CLIMATE SIMULATION (2022)

Model	Variant	hurs	huss	pr	rlds	rsds	sfcWind	tas	tasmax	tasmin
ACCESS-CM2	r1i1p1f1									
ACCESS-ESM1-5	r1i1p1f1									
BCC-CSM2-MR	r1i1p1f1									
CanESM5	r1i1p1f1									
CESM2	r4i1p1f1									
CESM2-WACCM	r3i1p1f1									
CMCC-CM2-SR5	r1i1p1f1							*	*	*
CMCC-ESM2	r1i1p1f1									
CNRM-CM6-1	r1i1p1f2									
CNRM-ESM2-1	r1i1p1f2									
EC-Earth3	r1i1p1f1									
EC-Earth3-Veg-LR	r1i1p1f1									
FGOALS-g3	r3i1p1f1									
GFDL-CM4 (gr1)	r1i1p1f1									
GFDL-CM4 (gr2)	r1i1p1f1									
GFDL-ESM4	r1i1p1f1									
GISS-E2-1-G	r1i1p1f2									
HadGEM3-GC31-LL	r1i1p1f3									
HadGEM3-GC31-MM	r1i1p1f3									
IITM-ESM**	r1i1p1f1									
INM-CM4-8	r1i1p1f1									
INM-CM5-0	r1i1p1f1									
IPSL-CM6A-LR	r1i1p1f1									
KACE-1-0-G	r1i1p1f1									



Model	Variant	hurs	huss	pr	rlds	rsds	sfcWind	tas	tasmax	tasmin
KIOST-ESM	r1i1p1f1	***								
MIROC-ES2L	r1i1p1f2									
MIROC6	r1i1p1f1									
MPI-ESM1-2-HR	r1i1p1f1									
MPI-ESM1-2-LR	r1i1p1f1									
MRI-ESM2-0	r1i1p1f1									
NESM3	r1i1p1f1									
NorESM2-LM	r1i1p1f1									
NorESM2-MM	r1i1p1f1									
TaiESM1	r1i1p1f1									
UKESM1-0-LL	r1i1p1f2									

* Salida original de MCG tasmax y tasmin retraída por CMCC.

** Salida original de MCG que falta el año 2100 y SSP3.70 que falta el año 2099 para todas las variables.

*** Salida original de MCG para hurs SSP2.45 año faltante 2058, hurs SSP1.26 año faltante 2023.

En la Tabla 2 se presenta en color verde los casos en los que se cuenta con todos los SSP disponibles, en amarillo algunos SSP disponibles y en rojo sin datos disponibles para las distintas variables (Hurs: Humedad relativa cerca de la superficie, Huss: Humedad específica cerca de la superficie, Pr: Precipitación, Rlds: Radiación de onda larga, Rsds: Radiación de onda corta, SfcWind: Velocidad del viento y Tas: Temperatura del aire).

Cada una de las proyecciones climáticas incluye variables promedio diarias para los períodos de 1950 a 2014 (“simulación retrospectiva”) y de 2015 a 2100 (“simulación prospectiva”). Durante el proceso de reducción de escala, las simulaciones retrospectivas sirven como datos de entrenamiento y se comparan con los registros climáticos observacionales. Las relaciones derivadas de la comparación se aplican luego para reducir la escala de las proyecciones climáticas prospectivas (NASA CENTER FOR CLIMATE SIMULATION, 2022).

Finalmente, el enfoque BCSD utilizado para generar este conjunto de datos a escala reducida asume inherentemente que los patrones espaciales relativos observados desde 1960 hasta 2014 permanecerán constantes bajo el Cambio Climático futuro. Aparte de la resolución espacial más alta y la corrección de sesgo, este conjunto de datos no agrega



información más allá de la contenida en los escenarios originales de CMIP6 y preserva la frecuencia de los períodos de valores anormalmente altos y bajos (es decir, eventos extremos) dentro de cada escenario individual (NASA CENTER FOR CLIMATE SIMULATION, 2022).

3.4 Relación entre los RCP y los SSP

Cada SSP impulsa una proyección futura correspondiente de las emisiones de gases de efecto invernadero y el cambio de uso de la tierra bajo el argumento del SSP de referencia. Como se mencionó anteriormente, los SSP se diseñaron para funcionar en combinación con una versión nueva y mejorada de los RCP (Environment and Climate Change Canada, 2023).

En este sentido, se presentan las posibles combinaciones, junto con los RCP correspondientes, en donde se establecen los niveles de prioridad a algunos escenarios de Nivel 1 (azul) y se consideraron la máxima prioridad. Estos escenarios de Nivel 1 abarcan una amplia gama de incertidumbre en las futuras vías de forzamiento socioeconómico y climático y sirven como buenas comparaciones con los escenarios RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 utilizados para CMIP5. Los escenarios de 'Nivel 2' (amarillo) incluyen escenarios adicionales de interés para que los centros de modelado exploren si los recursos lo permiten (Environment and Climate Change Canada, 2023).

De este modo, la Figura 9 representa la relación entre cada RCP respecto a los nuevos SSP, para el caso del presente estudio se utilizaron los SSP2 y SSP5, los cuales son equivalentes a los RCP de 4.5 y 8.5, respectivamente.

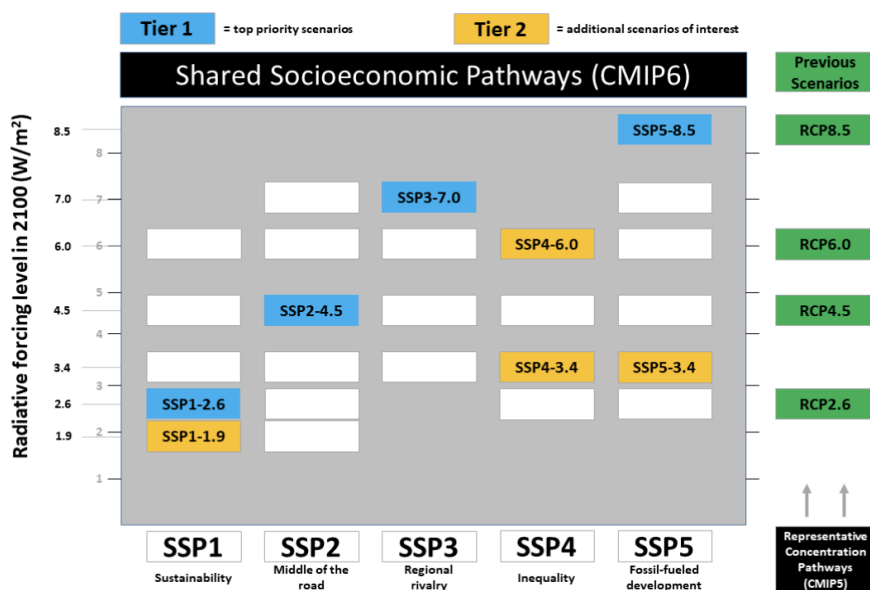


Figura 9 Vías socioeconómicas compartidas y combinaciones de forzamiento radiativo del año 2100. Tomado de Environment and Climate Change Canada (2023)



3.5 Métodos de reducción de escala

Los métodos de reducción de escala son empleados con el objetivo de generar proyecciones más precisas teniendo en cuenta la resolución de los MCG, de modo que estos sean más representativos y se ajusten de forma adecuada a las series históricas de una determinada área de estudio. A continuación, se relacionan las metodologías del “Delta Change” y el “Quantile Mapping”, las cuales corresponden a dos aproximaciones que permiten ajustar la tendencia de los datos a escalas locales.

Para la aproximación del “Delta Change” se tiene como objetivo la obtención de factores de conversión con los cuales sea posible convertir las lluvias observadas en lluvias futuras bajo el Cambio Climático. Para esto, se hace uso de los resultados de los MCG. En términos generales se presenta como una estrategia similar a la anterior con la diferencia que en esta estrategia no se hace necesaria la corrección de los errores sistemáticos de los MCG (Universidad de Los Andes & Mexichem, 2016).

Una de las principales utilidades de este método es que permite disminuir la escala de los resultados de los MCG para ser utilizados en modelos hidrológicos. Frente a otros métodos existentes para ajustar las escalas de los modelos, éste se presenta como una alternativa simple y computacionalmente económica (Universidad de Los Andes & Mexichem, 2016).

En términos generales, la aproximación se basa en el uso de un factor igual a la proporción entre el valor medio de una variable hidrológica proyectada a un periodo futuro, con el valor medio para la misma variable en un periodo histórico. Ambos valores se obtienen a partir de los resultados dados por los MCG (Ruiter, 2012) (Ver Ecuación 1).

$$FC = \frac{P_{MCG\ Futura}}{P_{MCG\ Historica}}$$

Ecuación 1

Donde

$P_{MCG\ Futura}$: serie temporal de precipitación futura. (mm)

$P_{MCG\ Historica}$: serie temporal de precipitación histórica. (mm)

Una vez, obtenido el valor del factor de cambio este es relacionado con los registros históricos de la estación objeto de estudio, de modo que en esta metodología se supone que los cambios son independientes de la escala (Universidad de Los Andes & Mexichem, 2016) (Ver Ecuación 2).

$$E_{Futuro} = FC * E_{observado}$$

Ecuación 2



Donde

E_{Futuro} : estadístico futuro. (mm)

$E_{observado}$: estadístico histórico. (mm)

Por su parte, el método “Quantile Mapping” permite encontrar una función que luego de ser aplicada a los datos obtenidos con downscaling, generando una corrección de su distribución haciéndola semejante a la de los datos observados (Gudmundsson et al., 2012). Se puede expresar mediante la expresión relacionada en la Ecuación 3:

$$V_o = h * V_m$$

Ecuación 3

Donde

V_o : serie temporal de precipitación futura. (mm)

h : función para arreglo de la distribución. (mm)

V_m : serie temporal de precipitación histórica. (mm)

Para aplicar esta técnica es necesario tener instalado el programa R Studio, instalado este la librería “qmap”. Una vez cumplidos estos pasos, se procede a alimentar al programa con datos de precipitación de las series históricas de la estación pluviométrica observada y las series futuras de los MCG. Posteriormente mediante scripts se corre el “Quantile Mapping” obteniendo diferentes resultados al aplicar los distintos métodos de cálculo (Guanuchi, 2015).

Finalmente, con los datos obtenidos se procede a comparar los métodos a través de indicadores estadísticos. Con los resultados de esta comparación se elegirá el método que mejor desempeño obtenga (Guanuchi, 2015).

3.6 Análisis de información climatológica

Siguiendo los lineamientos establecidos por el IDEAM (2018), en la revisión de datos es necesario identificar la cantidad de registros con que cuenta la estación o estaciones hidrológicas identificadas, de tal manera que se cuente con una serie de tiempo con registros no menores a 15 años. Sin embargo, teniendo en cuenta que generalmente las estaciones no cuentan con datos completos, se debe seguir un proceso de imputación de datos en estaciones con menos del 30% de datos faltantes.

Asimismo, se deben identificar los datos anómalos, los cuales son considerados como datos dudosos que se alejan de la tendencia de la serie de datos analizada al encontrarse



distantes o alejados de la varianza, debido a errores de calibración de equipos, error humano durante la medición, cambio en la localización espacial de la estación, y otros. Por ello en la identificación de estos permite evitar la sobreestimación o subestimación de la variable estudiada, para esto se hace uso del análisis de Box Plot, revisión de coincidencia con eventos macroclimáticos, confirmación con los datos climatológicos de otras estaciones hidrometeorológicas y pruebas de puntuación “Z”, con el fin de confirmar si corresponde a eventos extremos.

Luego de esto, se debe realizar la imputación de datos, la cual consiste en realizar la estimación de datos faltantes o aquellos datos identificados como datos atípicos a través de una técnica informática o estadística, por lo que de acuerdo con las características de los registros se utiliza el método estadístico de distribución normal para la asignación de registros faltantes (Castro, 2014).

Este método realiza varias imputaciones de las observaciones faltantes para luego analizar los conjuntos de datos completos y combinar los resultados obtenidos para obtener una estimación final. El análisis de imputación está dividido en tres secciones: imputación de datos, análisis y puesta en común; en la primera se crea múltiples copias de los conjuntos de datos (m) generando varias iteraciones para la estimación de valores perdidos. En la segunda se realiza el análisis del conjunto de datos completos y finalmente la última sección combina todo en un conjunto simple de resultados (Castro, 2014).

Una vez establecidas las series diarias objeto de estudio, es posible las variables asociadas al parámetro de precipitación, en las que se incluyen la precipitación total diaria, la cual es la registrada en el pluviómetro, la precipitación total mensual, que representa la suma de los valores diarios de precipitación, y para poder calcular se debe contar con mínimo 20 días con datos para cada mes, la precipitación máxima mensual en un día, que corresponde al valor más alto registrado en un día durante el mes y el número de días con lluvia que es la cantidad de días con precipitación ≥ 0.1 mm (IDEAM, 2019).

3.7 Métodos de cálculo de curvas IDF para escenarios futuros

Las curvas IDF constituyen una de las herramientas más utilizadas en la estimación de caudales de diseño de obras de drenaje en vías y alcantarillados pluviales en zonas urbanas y rurales, así como en la estimación de las tormentas de diseño en sitios donde, debido a la falta de información de caudales, es necesario recurrir a los modelos lluvia-escorrentía para el cálculo de los caudales máximos. Las intensidades máximas de la lluvia en distintos intervalos de tiempo en un mismo sitio y con distintas probabilidades de excedencia o períodos de retorno, se resumen en las curvas IDF (Pulgarín, 2009).

En ese sentido, se establece que las curvas IDF son una herramienta fundamental para el diseño de estructuras hidráulicas basadas en modelación lluvia – escorrentía y se sugiere



el desarrollo de estas herramientas bajo un enfoque que permite relacionar variables temporales con sistemas espaciales y características morfológicas de las cuencas, analizando series temporales con propiedades de escala y relacionarlas a su entorno. (Pulgarín, 2009)

A continuación, se presentan las siguientes expresiones para el cálculo de la intensidad para cualquier periodo de retorno para duraciones entre 1 y 24 horas (60 a 1440 minutos) utilizando la metodología de escalamiento (Pulgarín, 2009) (Ver Ecuación 4 y Ecuación 5).

$$I_t^T = \left(\left[0.88 * I_{24h} - 0.004 + \left[0.12 * \frac{I_{24h}}{0.5772} * -\ln \left[\left(-\ln \left(1 - \left(\frac{1}{T} \right) \right) \right) \right] \right] \right] \right) * \left(\frac{t}{1440} \right)^{-0.829}$$

Si $t \geq 60$

Ecuación 4

$$I_t^T = I_{60} * (0.54t^{0.25} - 0.5)$$

Si $t < 60$

Ecuación 5

Donde:

I_{24h} : intensidad promedio diaria. (mm)

T : periodo de retorno. (años)

t : duración. (min)

I_{60} : intensidad para una duración de una hora. (mm/h)

Por su parte, el CIACUA presentó la siguiente aproximación, la cual calibra los parámetros específicos de la zona de estudio a partir de la curva IDF obtenida la metodología de relacionada anteriormente (Universidad de Los Andes & Mexichem, 2016).

$$\frac{I_t}{I_T} = \frac{\alpha}{\left(\frac{t}{T} + \beta \right)^n}$$

Donde:

I_T : intensidad de un evento de 24 horas. (mm)

I_t : intensidad de un evento de menor duración. (mm/hr)

α, β, n : parámetros calibrados.



3.8 Generación de hietogramas por el método de bloques alternos

La metodología de bloques alternos es una forma simple para desarrollar un hietograma de diseño utilizando una curva de IDF. El hietograma de diseño producido por este método especifica la profundidad de precipitación que ocurre en N intervalos de tiempo sucesivos de la misma duración sobre una duración total (Chow et al., 1994).

Después de seleccionar el periodo de retomo de diseño, la intensidad es leída en una curva IDF para cada una de las duraciones; y la profundidad de precipitación correspondiente se encuentra al multiplicar la intensidad y la duración. Tomando diferencias entre valores sucesivos de profundidad de precipitación, se encuentra la cantidad de precipitación que debe añadirse por cada unidad adicional de tiempo (Chow et al., 1994).

Estos incrementos o bloques se reordenan en una secuencia temporal de modo que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración requerida y que los demás bloques queden en orden descendente alternativamente hacia la derecha y hacia la izquierda del bloque central para formar el hietograma de diseño (Chow et al., 1994).

En relación con la pertinencia de esta metodología, (Soldevila, 2018) afirma que, los autores de este método conscientes de esta debilidad del método declararon que el patrón de tormenta sintética tendría un período de retorno mayor que la curva de IDF de la cual fue derivado, lo cual se traduce en un criterio conservador para la definición de los hietogramas de diseño.

4. METODOLOGÍA

El desarrollo metodológico se encuentra configurado por tres etapas, las cuales, a su vez se componen de actividades para cumplir el objetivo del proyecto. Las fases planteadas dan respuesta a los objetivos del proyecto y se encuentran acompañadas de actividades y subactividades, las cuales determinan la dirección del presente estudio.

La primera etapa comprendió el desarrollo de la caracterización de las variables físicas que condicionan los eventos de precipitación y su relación con el Cambio Climático, en consecuencia, se desarrolló la línea base de acuerdo con la información recolectada a partir de fuentes secundarias, que posteriormente fue procesada y a partir de las cuales se construyeron las curvas IDF actuales y se realizó la prueba de las metodologías para la construcción de estas de acuerdo con los planteamientos de Pulgarín y CIACUA.

Luego de esto, se dio inicio a la segunda etapa en donde se desarrolló una evaluación detallada sobre las alteraciones en la precipitación, producidas por los efectos de Cambio Climático a través de una valoración de la información sobre las variables y procesos físicos que condicionan los eventos de precipitación y su relación con el Cambio



Climático lo cual se desarrolló a partir de la selección de los MCG más apropiados para cada caso de estudio y la implementación de procesos de reducción de escala para establecer las condiciones de diseño de los hietogramas para el Cambio Climático.

Finalmente, en la tercera etapa se efectuó la construcción de las curvas IDF y hietogramas afectados por el Cambio Climático, de este modo se llevó a cabo una validación y se realizaron los ajustes necesarios en los cálculos y modelos desarrollados para construir hietogramas de diseño afectados por el Cambio Climático, a partir de una evaluación de los resultados obtenidos con el fin de comparar los hietogramas de diseño de Cambio Climático respecto al escenario actual.

A continuación, en la Figura 10 se presenta el diagrama de flujo de la metodología general del proyecto.

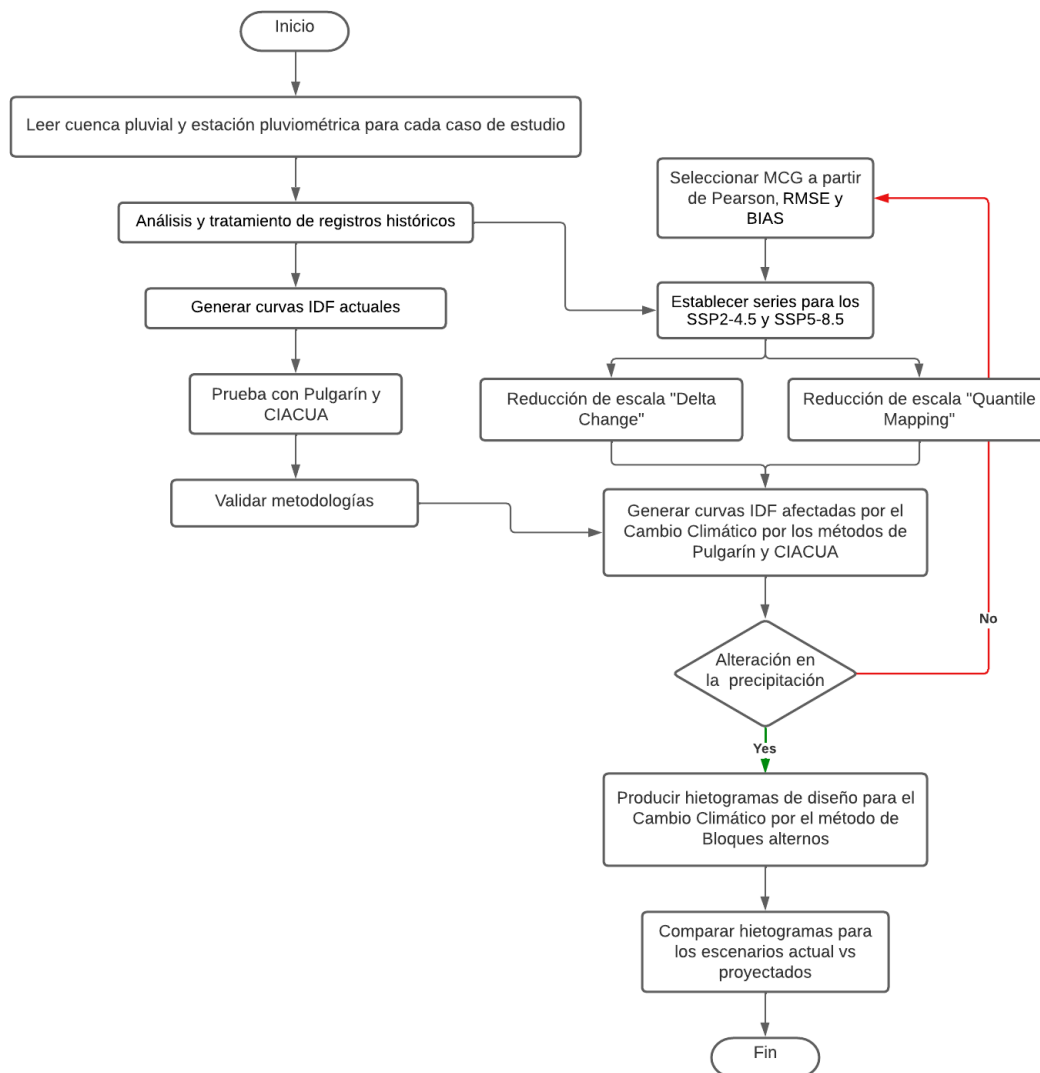


Figura 10 Diagrama de flujo de la metodología del proyecto



A partir de la información presentada en la Figura 10, la metodología para la generación de hietogramas de diseño afectados por el Cambio Climático para sistemas de alcantarillado de aguas lluvias se encuentra definida por un procedimiento de ocho pasos, los cuales son detallados a continuación: 1. Análisis y tratamiento de los registros históricos de las estaciones pluviométricas, 2. Cálculo de variables de la precipitación y curvas IDF actuales, 3. Pruebas con las metodologías de Pulgarín y CIACUA con las series históricas de precipitación, 4. Selección de los MCG a implementar, 5. Aplicación de los métodos de reducción de escala, 6. Construcción de curvas IDF en perspectiva del Cambio Climático, 7. Producción de hietogramas de diseño influenciados por el Cambio Climático y 8. Comparación de los hietogramas de diseño actuales respecto a los generados con influencia del Cambio Climático.

4.1 Análisis y tratamiento de registros históricos

A partir de la identificación de las estaciones pluviométricas asociadas a cada caso de estudio se procedió a realizar el análisis de los registros históricos, para lo cual fue necesario establecer previamente el periodo base, calcular el porcentaje de valores faltantes y completar los datos faltantes de estas.

El tratamiento de la información pluviométrica incluye el reconocimiento de los datos faltantes en los registros de las series de tiempo y la definición de los datos anómalos mediante diagramas Box Plot, pruebas de puntuación “Z” y su comparación respecto a la ocurrencia de eventos macroclimáticos y registros de estaciones pluviométricas vecinas.

Una vez seleccionados los registros objeto de estudio se realizaron procesos de imputación de datos con el fin de completar las series históricas a escala diaria, lo cual se realizará a través de la librería “Mice” del programa RStudio.

A partir de los registros de las series históricas se realizaron pruebas estadísticas mediante análisis de tendencia y significancia con el fin de determinar si se presentan variaciones en los promedios históricos respecto a los últimos años de registro para las series de precipitación de cada estación pluviométrica estudiada.

Asimismo, se establecieron los registros históricos a escala diaria, mensual y anual para la precipitación total, la precipitación máxima en 24 horas y el número de días con lluvia, los cuales fueron comparados respecto a los últimos 10 años de registro.

4.2 Generación de curvas IDF actuales

Para la construcción de las curvas IDF se utilizó la información proporcionada por las entidades competentes, en este caso los registros históricos de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), el IDEAM y la Empresa de Servicios Públicos de Medellín (EPM), en donde a partir de los distintos coeficientes compartidos por cada



entidad se construyeron las curvas IDF actuales para los periodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años y duraciones de 5 a 180 minutos.

4.3 Pruebas con las metodologías de Pulgarín y CIACUA

Con el fin de verificar la pertinencia de las metodologías propuestas para evaluar las curvas IDF afectadas por el cambio climático se construyeron para el escenario actual dichas curvas, para esto se utilizaron los registros históricos de las series de precipitación para cada caso de estudio y se aplicaron los métodos de Pulgarín y CIACUA, los cuales se encuentran detallados en el apartado 3.7 Métodos de cálculo de curvas IDF para escenarios futuros.

4.4 Selección de MCG

Los MCG más adecuados para el análisis de la precipitación futura se seleccionaron de acuerdo con los resultados obtenidos en comparación a los registros históricos mediante los métodos de correlación de Pearson (r), la raíz del error medio cuadrático (RMSE) y el error sistemático (BIAS). La elección de los MCG se determinó en función de los valores más aceptables en los tres métodos de correlación mencionados anteriormente para las escalas mensual y trimestral.

En el caso, de que no se destacara ninguno de los métodos de calibración respecto a los otros, se establecieron los MCG a utilizar de acuerdo a una ponderación entre las calificaciones correspondientes de cada uno de estos, es decir, para las tres pruebas de calibración se realizó una clasificación de las series históricas de los MCG desde el que más se ajustaba a los datos observados hasta el que menos a escala mensual y trimestral, luego de esto, se promediaron los resultados de la calificación según cada método de calibración, los MCG con menor valor fueron los seleccionados para el desarrollo del caso de estudio correspondiente.

Asimismo, es necesario mencionar los SSP que fueron proyectados, en este caso se desarrolló el estudio bajo las consideraciones de los SSP2-4.5 y SSP5-8.5.

Es importante mencionar que para los casos de estudio que contaban con más de una estación pluviométrica se construyeron polígonos de Thiessen con el objetivo de construir la serie definitiva a partir de la definición de la influencia de cada estación sobre el centroide de la cuenca pluvial analizada.

4.5 Reducción de escala

El proceso de reducción de escala se realizó a partir de los métodos “Delta Change” y “Quantile Mapping”, para el primero fue necesario establecer el factor de cambio para los estadísticos de las series de precipitación y para los parámetros de las funciones de



probabilidad ajustadas, este proceso se realizó para cada MCG definido en cada caso de estudio y para los horizontes de Cambio Climático de los SS2-4.5 y SSP5-8.5.

Por su parte, para el segundo método se utilizó la librería “qmap” del software RStudio, el código implementado fue definido en función de los desarrollado por (Maintainer & Gudmundsson, 2022), a través de este establecieron las relaciones entre los MCG para los escenarios de Cambio Climático SS2-4.5 y SSP5-8.5 y las series de precipitación observadas para los ajustes: PTF, DIST, RQUANT, QUANT Y SSPLIN.

4.6 Generación de curvas IDF en perspectiva del Cambio Climático

Una vez establecidas las series de precipitación mediante los procesos de reducción de escala para los MCG definidos en cada caso de estudio en los SS2-4.5 y SSP5-8.5, se implementaron las metodologías expuestas en el apartado 3.7 Métodos de cálculo de curvas IDF para escenarios futuros, relacionadas a las propuestas desarrolladas por Pulgarín (2009) y Universidad de Los Andes & Mexichem (2016) para los periodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años y duraciones de 5 a 180 minutos.

4.7 Producción de hietogramas de diseño influenciados por el Cambio Climático

Los hietogramas de precipitación afectados por el cambio climático fueron calculados para los periodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años, de acuerdo con la metodología de bloques alternos expuesta por Chow et al. (1994), la cual fue definida en la sección 3.8 Generación de hietogramas por el método de bloques alternos, esta fue implementada para todos los MCG definidos en los casos de estudio desarrollados en la perspectiva de los SS2-4.5 y SSP5-8.5.

4.8 Comparación de los hietogramas de diseño

De acuerdo con los resultados obtenidos de la generación de los hietogramas de diseño tanto para el escenario actual como para los horizontes de Cambio Climático se realizó una comparación para evaluar las variaciones producidas por los efectos de este.

Lo anterior se determinó desde la información actual proporcionada por las entidades con jurisdicción de las estaciones pluviométricas asociadas a los casos de estudio, respecto al análisis desarrollado en la sección 4.7 Producción de hietogramas de diseño influenciados por el Cambio Climático, para los dos SSP relacionados, de este modo se determinó el aumento en el volumen total de la precipitación para cada MCG en eventos de duración de 35 minutos.



5. CASOS DE ESTUDIO

Con el fin de evaluar los MCG que mejor representan las condiciones climáticas que puedan presentarse a partir del Cambio Climático se desarrollaron tres casos de estudio en dos de las principales ciudades de Colombia, Bogotá y Medellín. De este modo, bajo la aplicación de la metodología explicada en el numeral anterior se realizó el análisis y la construcción de hietogramas de diseño bajo los efectos del cambio climático.

5.1 Caso de Estudio en Bogotá

Para establecer el caso de estudio en Bogotá se analizó la distribución espacial y temporal de las estaciones con registros pluviométricos disponibles de las distintas entidades que cuentan con estaciones con información relacionada con el parámetro de precipitación (Ver Figura 11).

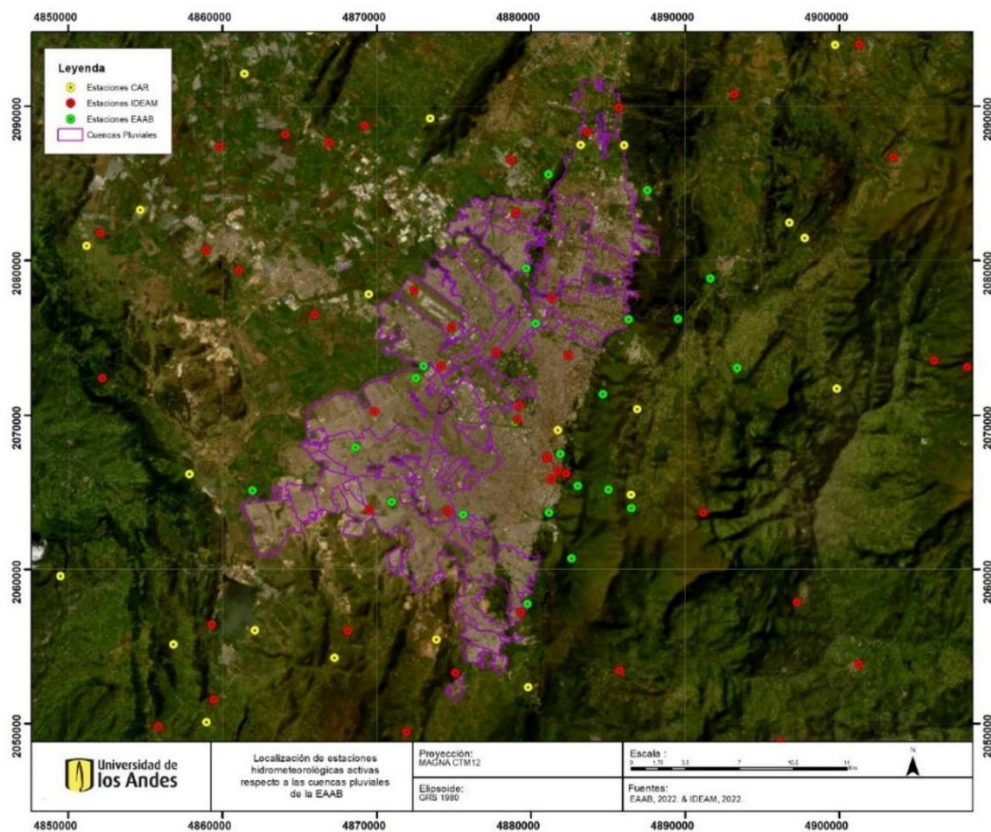


Figura 11 Localización estaciones pluviométricas activas en Bogotá. Tomado y modificado de IDEAM (2022), EAAB (2022) & CAR (2022)

El caso de estudio de Bogotá se desarrolló en la cuenca pluvial de Salitre-Molinos, la cual cuenta con un área de 925.84 ha y se encuentra instrumentada por las estaciones Usaquén – Santa Ana (2120111) administrada por la EAAB y Enmanuel D Alzón (2120123), la cual se encuentra bajo jurisdicción del IDEAM (Ver Tabla 3).



Tabla 3 Estaciones pluviométricas para el caso de estudio de Bogotá. Tomado y modificado de IDEAM (2022) & EAAB (2022)

Cód.	TE	Nombre estación	Entidad	Elevación (msnm)	Coordenadas CTM12	
					Este	Norte
2120111	PG	Usaquén – Santa Ana	EAAB	2647	4886340.48	2076192.03
2120123	PM	Enmanuel D Alzón	IDEAM	2520	4881340.44	2077559.70

En la Figura 12 se presenta la localización espacial de las estaciones pluviométricas presentadas en la Tabla 3, las cuales fueron las seleccionadas para el análisis de las series de tiempo de precipitación para el caso de estudio de la ciudad de Bogotá.

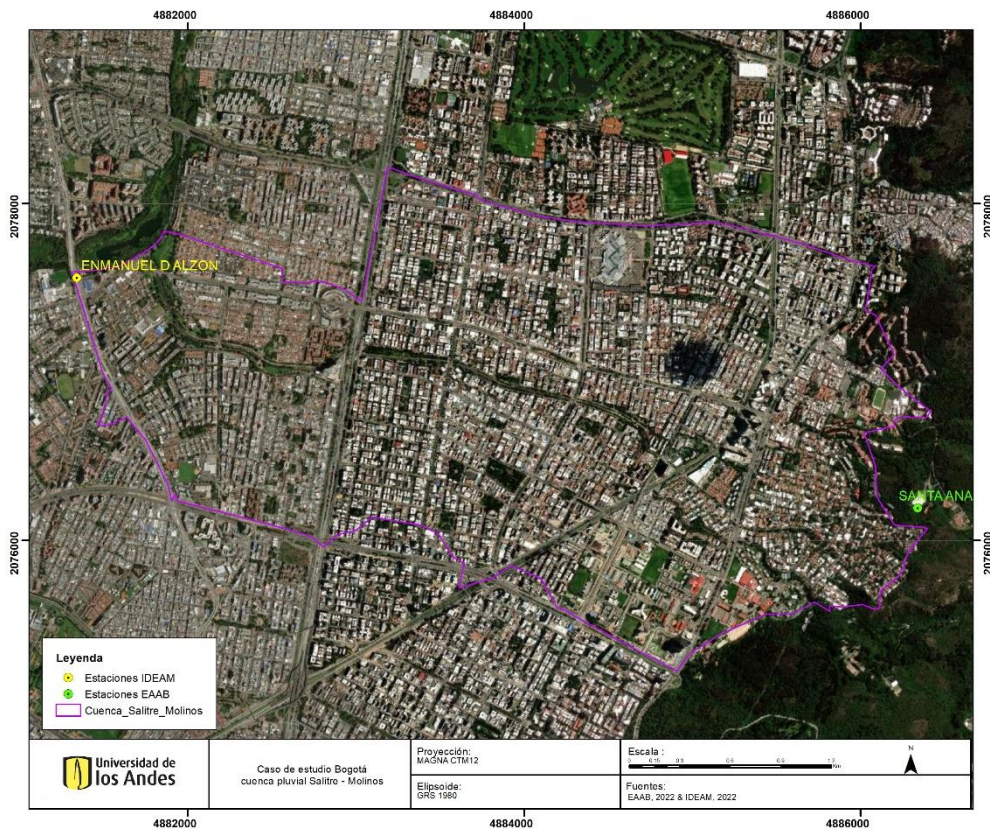


Figura 12 Cuenca pluvial Salitre - Molinos. Tomado y modificado de IDEAM (2022) & EAAB (2022)

Posteriormente, se identificaron las variaciones en la elevación para el área objeto de estudio (Ver Figura 13), a partir de un Modelo de Elevación Digital (DEM), el cual cuenta con una resolución de 12.5 m y fue descargado del conjunto de datos de ALOS PALSAR (ASF, 2022).

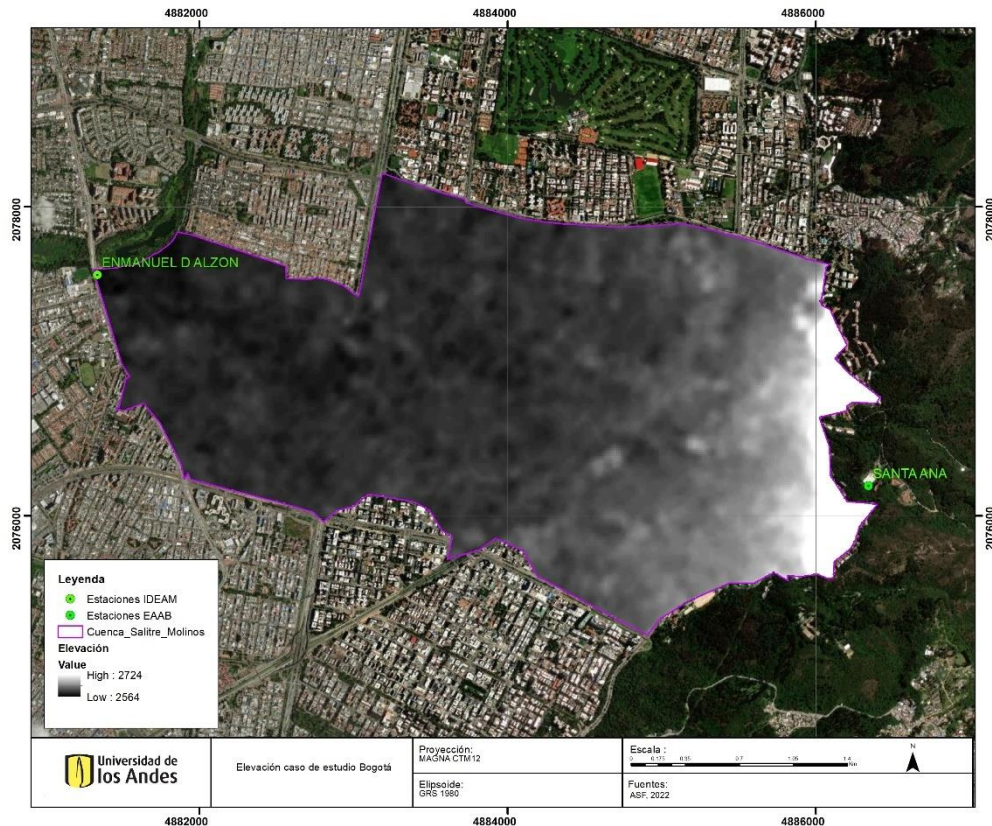


Figura 13 Elevación cuenca pluvial Salitre - Molinos. Tomado y modificado de ASF (2022)

De acuerdo con las elevaciones obtenidas para el área de interés se establecieron los valores de las pendientes en porcentaje, con el fin de tener una primera aproximación de lo que puede ser la respuesta de la cuenca pluvial ante un evento de precipitación (Ver Figura 13). En este caso, se identificaron variaciones en la elevación entre los 2564 msnm y 2724 msnm, lo cual relaciona con las pendientes obtenidas, las cuales se encuentran en el rango de 0% a 72% (Ver Figura 14).

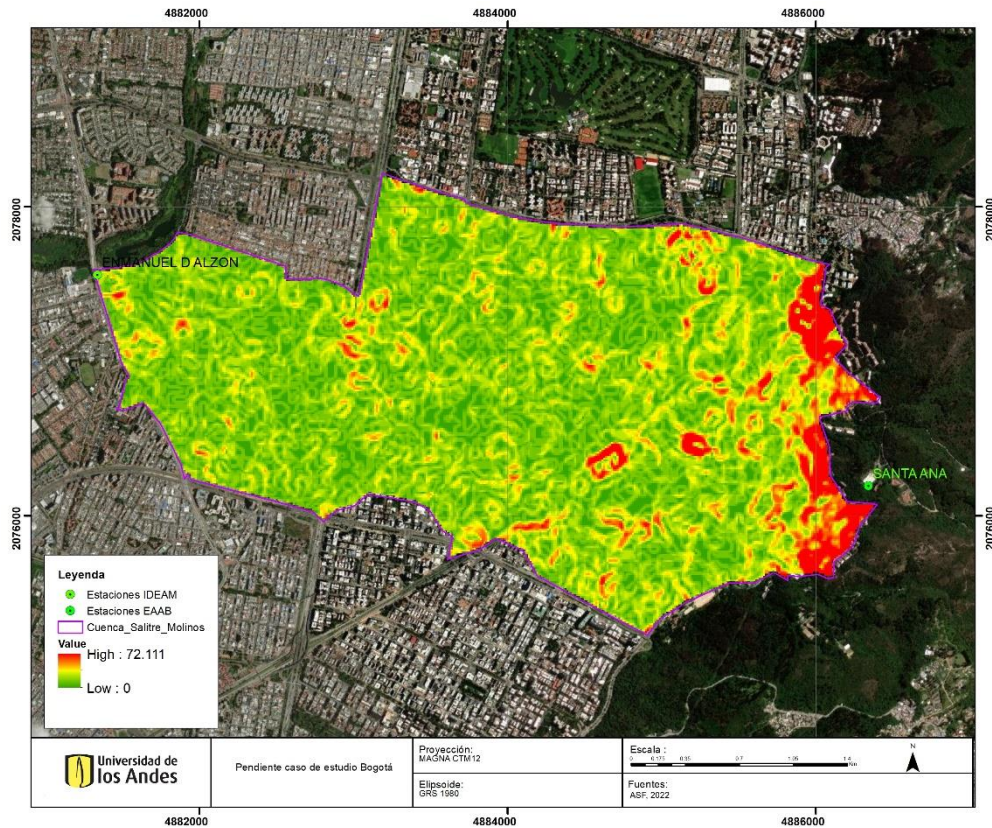


Figura 14 Pendiente cuenca pluvial Salitre - Molinos. Tomado y modificado de ASF (2022)

5.2 Casos de Estudio en Medellín

Para la ciudad de Medellín se propusieron dos casos de estudio, los cuales se desarrollaron sobre las cuencas pluviales La Tinajas y La Doctora, estas fueron seleccionadas a partir de la identificación de estaciones pluviométricas próximas a las distintas áreas de interés, de este modo se realizó una revisión de la información disponible de registros históricos para cada uno de los casos de estudio (Ver Figura 15).

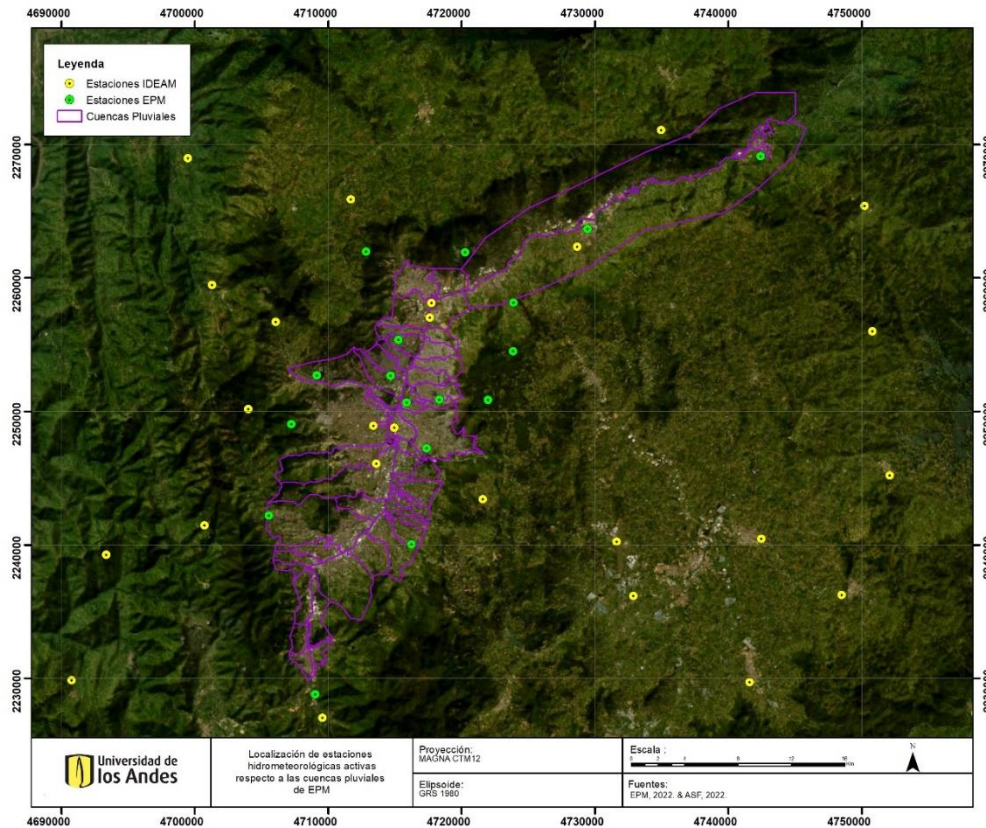


Figura 15 Localización estaciones pluviométricas activas en Bogotá. Tomado y modificado de IDEAM (2022) & EPM (2022)

Para los casos de estudio en Medellín se determinaron las cuencas pluviales correspondientes a La Tinajas y la Doctora, que cuentan con un área de 320.78 ha y 1456.27 ha respectivamente. Asimismo, estas se encuentran instrumentadas por estaciones pluviométricas administradas por EPM, para el primer caso se cuenta con la estación Pedregal (2701481), mientras que para el segundo se utilizaron los registros de las estaciones Ayurá (2701093) y San Antonio del Prado (2701038) (Ver Tabla 4).

Tabla 4 Estaciones pluviométricas para el caso de estudio de Medellín. Tomado y modificado de EPM (2022)

Cód.	TE	Nombre estación	Entidad	Elevación (msnm)	Coordenadas CTM12	
					Este	Norte
2701481	PM	Pedregal	EPM	1651.74	4715285.24	2255349.38
2701093	PM	Ayurá	EPM	1768.69	4716259.01	2240030.03
2701038	PM	San Antonio del Prado	EPM	2034.16	4705546.72	2242193.2

Asimismo, se espacializaron los casos de estudio correspondientes, los cuales se relacionan en las Figura 16 y Figura 17.

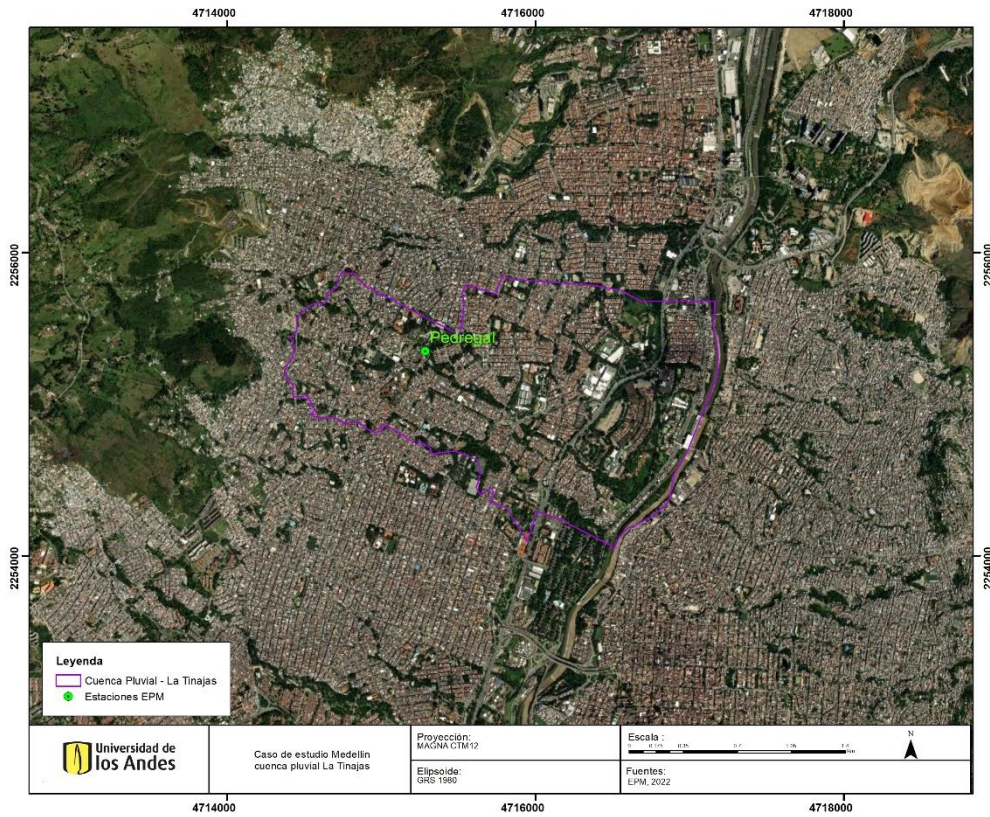


Figura 16 Cuenca pluvial La Tinajas. Tomado y modificado de (EPM, 2022)

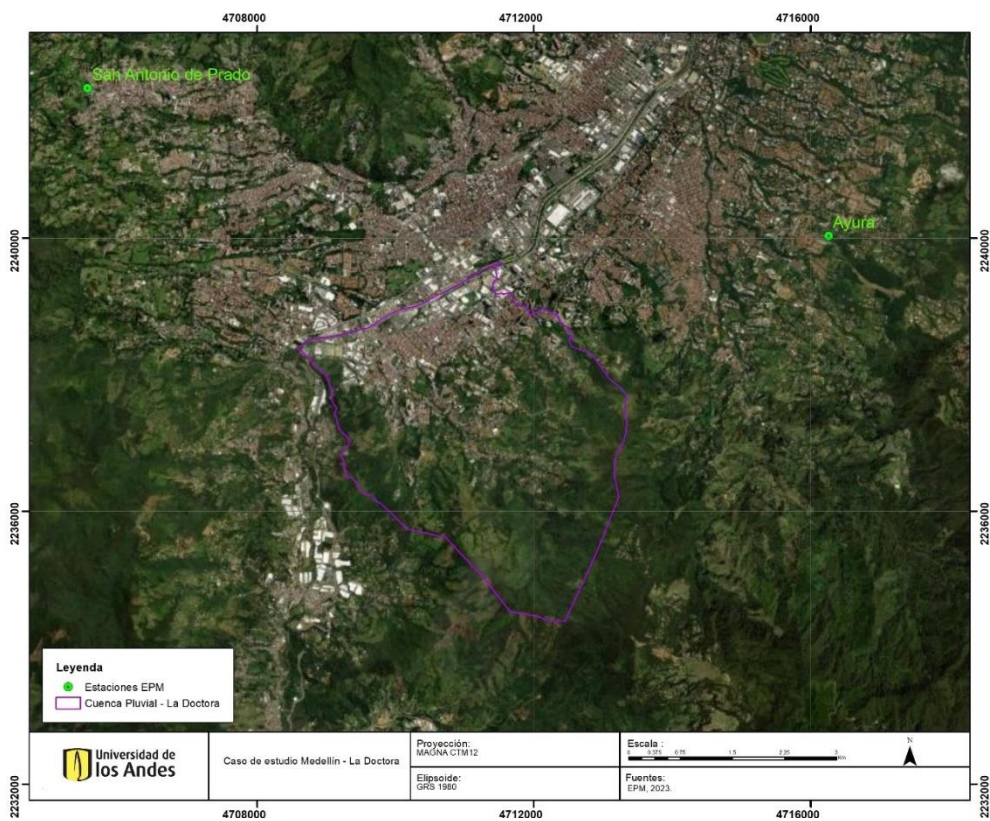


Figura 17 Cuenca pluvial La Doctora. Tomado y modificado de EPM (2022)



Luego de esto, mediante un DEM generado por EPM (2022), de resolución de 0.75 m se definieron los rangos de elevaciones de las cuencas pluviales estudiadas, los cuales se encuentra entre 1434.94 m y 1792.41 m para La Tinajas y 2282 m y 1552.05 m para La Doctora, tal como se presenta en la Figura 18 y Figura 19.

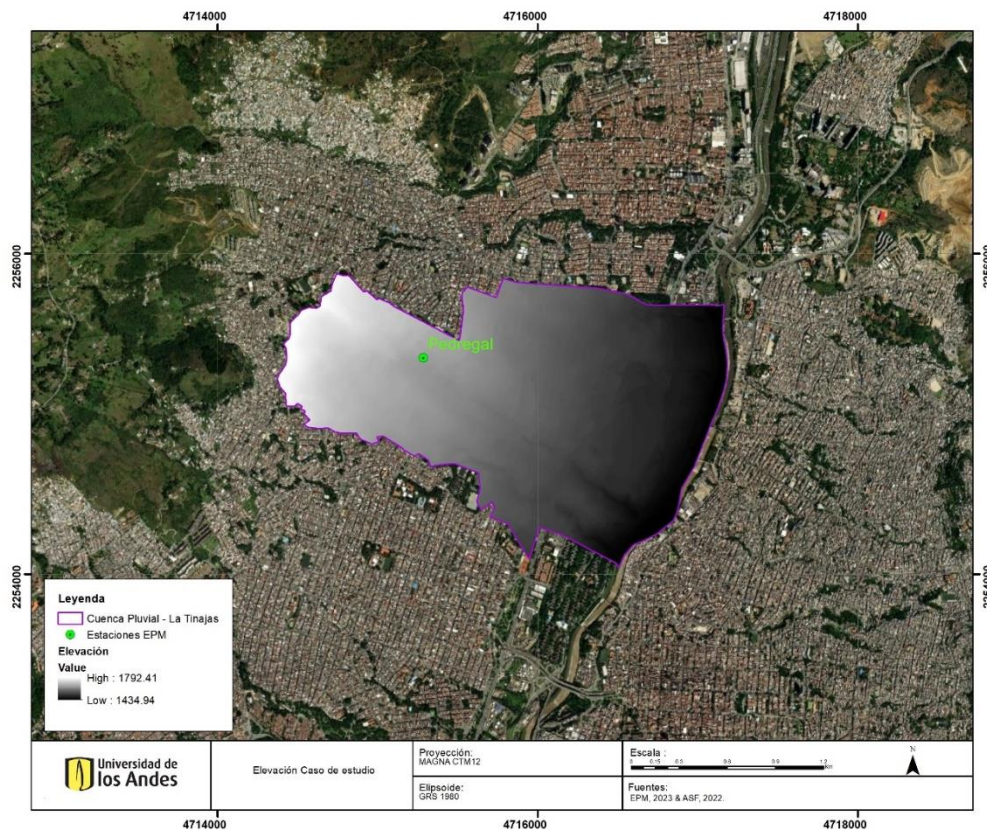


Figura 18 Elevación de la cuenca pluvial La Tinajas. Tomado y modificado de ASF (2022)

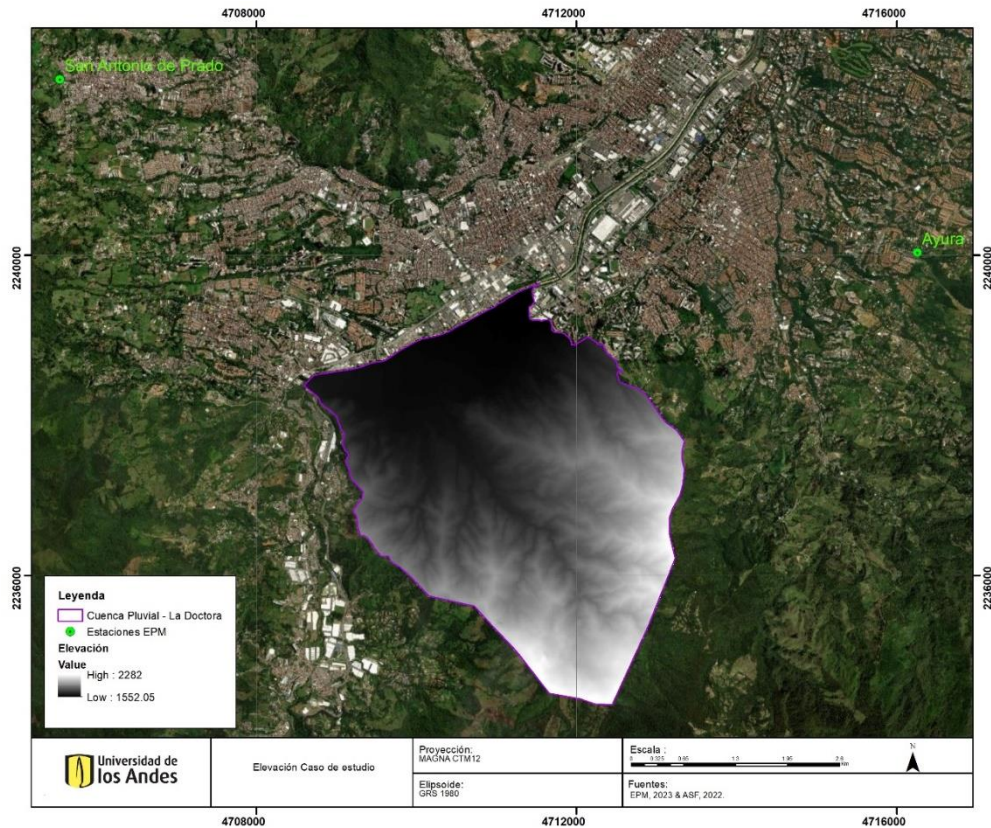


Figura 19 Elevación de la cuenca pluvial La Doctora. Tomado y modificado de ASF (2022)

Asimismo, en los dos casos de estudio se identificaron variaciones de pendiente entre 0% a más del 100%, tal como se puede observar en la Figura 20 y Figura 21.

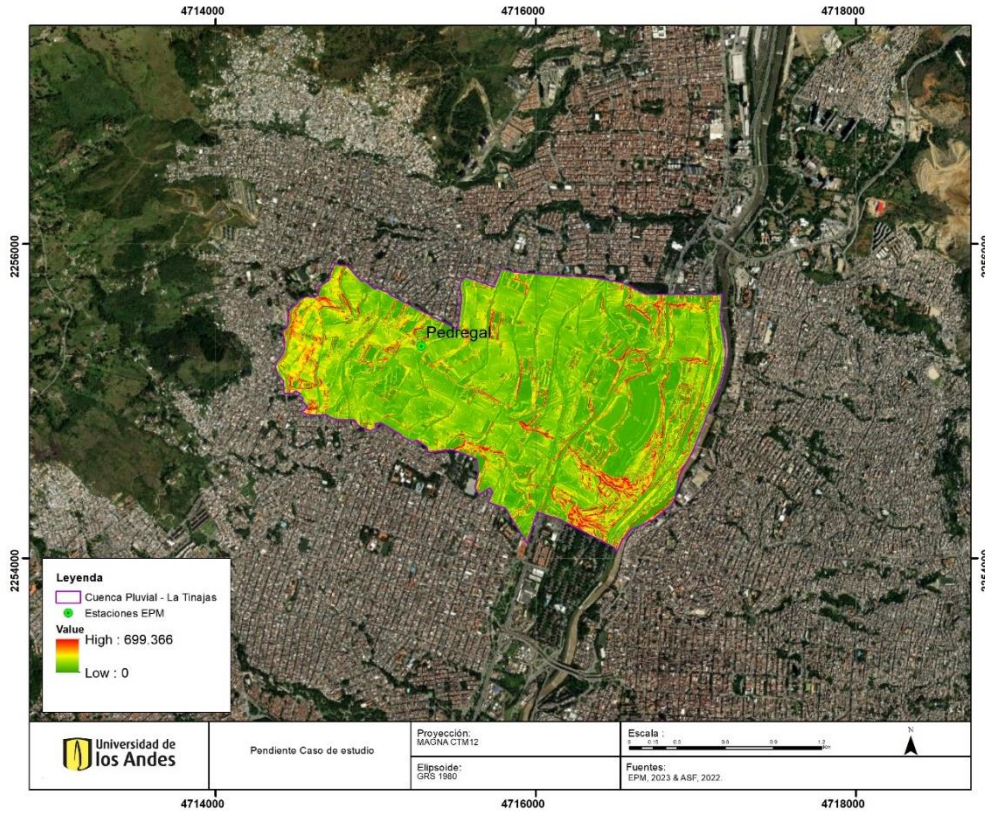


Figura 20 Pendiente de la cuenca pluvial La Tinajas. Tomado y modificado de ASF (2022)

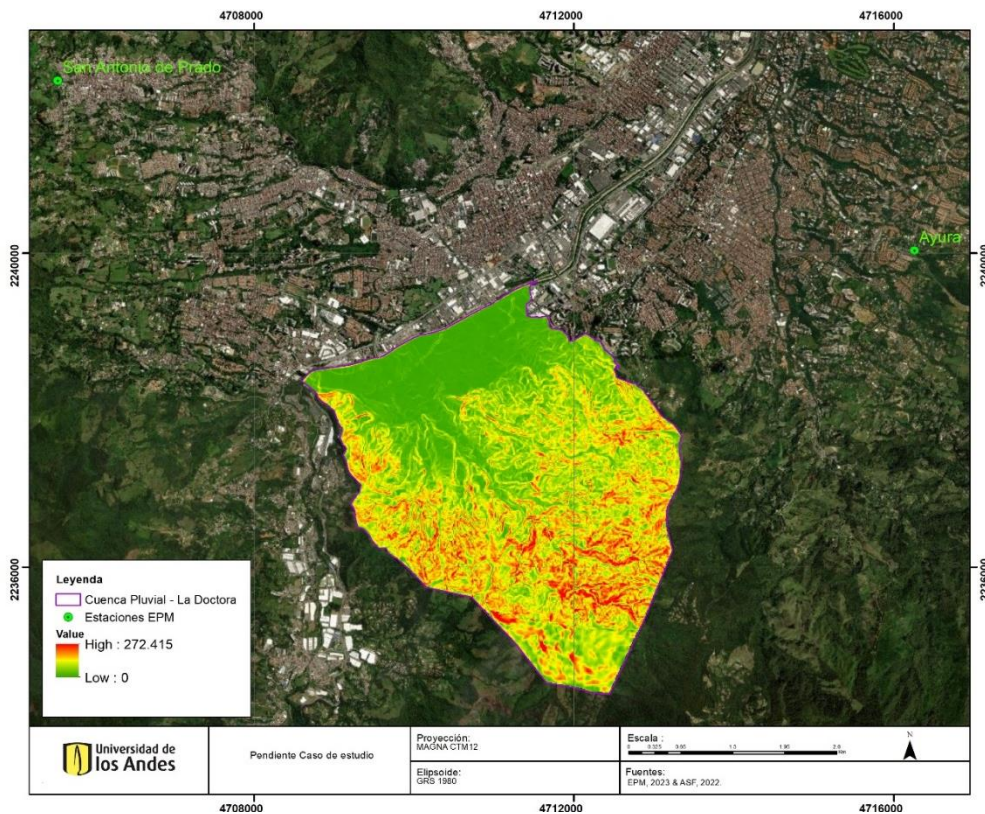


Figura 21 Pendiente de la cuenca pluvial La Doctora. Tomado y modificado de ASF (2022)



6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente apartado se describen los resultados obtenidos para cada una de las fases propuestas en la metodología, así como los resultados parciales y finales del desarrollo de la presente investigación.

6.1 Análisis y tratamiento de registros históricos

En la revisión de datos se realizó la observación de la cantidad de registros con que cuentan las estaciones pluviométricas identificadas, de tal manera que se cuente con una serie de tiempo con registros considerables para realizar un correcto análisis de la información. Sin embargo, teniendo en cuenta que generalmente las estaciones no cuentan con datos completos, se realizó un proceso de imputación para complementar estas series temporales (Ver Anexo 1 Procesamiento de información).

A partir de las series construidas se realizó un análisis gráfico para las estaciones objeto de estudio a escala diaria, mensual y anual, en donde se incluyen los datos disponibles, la identificación de los datos anómalos, la imputación de datos, los registros definitivos, análisis de significancia y tendencia y comparaciones con los registros de la última década.

En el caso de las pruebas de homogeneidad se implementaron las sugeridas por Pettitt (1979), la cual corresponde a una prueba no paramétrica, es sensible para detectar cambios que se presentan en la mitad de la serie de datos y no tiene en cuenta la normalización de los valores de la serie, basándose en el orden de los rangos de estos. De modo que, solo es necesario que las variables sobre las que se aplica la prueba sean continuas. (Ocampo, 2019)

6.1.1 Cuenca Salitre - Molinos

Para el caso de estudio de la cuenca pluvial Salitre - Molinos se tuvieron en cuenta el estudio de dos estaciones pluviométricas, las cuales corresponden a Usaquén – Santa Ana (2120111) y Enmanuel D Alzón (2120123).

6.1.1.1 Usaquén – Santa Ana (2120111)

En la estación Usaquén – Santa Ana (2120111) se identificaron registros desde el año 1977 hasta el año 2021, asimismo se establecieron 16347 registros a escala diaria, lo que indica que el porcentaje de datos faltantes es del 2.71%.

Posteriormente, se establecieron los datos anómalos a partir del análisis de Box Plot y una confirmación con los datos climatológicos de otras estaciones hidrometeorológicas, con el fin de verificar su correspondencia con eventos de precipitación (Ver Figura 22).

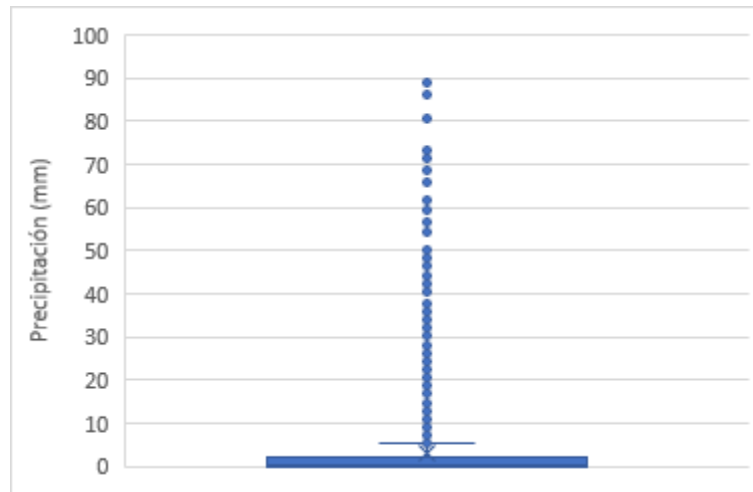


Figura 22 Box Plot Usaquén - San Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)

En este sentido, se realizó el análisis de Box Plot presentado en la Figura 22 para identificar los datos atípicos, presentando el comportamiento de los datos considerados como outliers, determinando en la serie aproximadamente 2428 datos fuera de la tendencia, de los cuales 751 coinciden con eventos macroclimáticos, que se presentan durante la Niña.

Igualmente, se realizó un comparativo con la estación climatológica Emmanuel D Alzón (2120123) con registros de precipitación diaria. Para el restante de los outliers se realizó la prueba puntuación “Z”, que analiza cada uno de los registros con respecto a la media y la desviación estándar, dando como resultado 1246 registros se encuentran entre el rango de $-3 < Z > 3$, es decir no son datos atípicos.

Finalmente, los datos que se encuentran dentro del rango de aceptación de la prueba puntuación “Z”, y tampoco hacen parte de los eventos macroclimáticos, ni periodos de fuertes precipitaciones, se consideran como datos atípicos, es decir que 18 registros fueron retirados.

Una vez definidos los datos válidos para el análisis se procedió a la estimación los datos faltantes utilizando el programa RStudio usando la librería “Mice”, en donde se generaron los registros faltantes mediante la imputación simple, manteniendo los parámetros estadísticos de la muestra original de tal forma que no se altere el comportamiento del régimen de precipitación.

De este modo en las series de precipitación a escala diaria para la estación Usaquén – Santa Ana (2120111), en donde el promedio de lluvias diarias corresponde a 2.83 mm (Ver Figura 23).

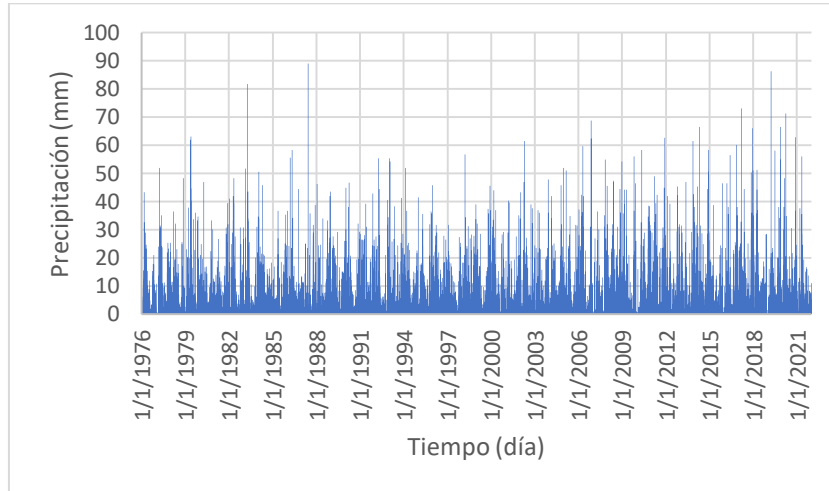


Figura 23 Precipitación diaria Usaquéen - San Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)

Para determinar la significancia estadística de los datos de la serie se realizaron dos tipos de análisis, el primero corresponde a la distribución normal de la serie, mientras que el segundo es la prueba de cuantiles. Para la distribución normal se encontró que el valor promedio de la serie corresponde a 2.83 mm y la desviación estándar equivale a 6.73 mm, lo cual se relaciona directamente con que tan alejados se encuentran los datos del promedio. Una vez calculada la distribución normal fue posible identificar que a medida que aumenta el valor del registro menor es la probabilidad de ocurrencia (Ver Figura 24).

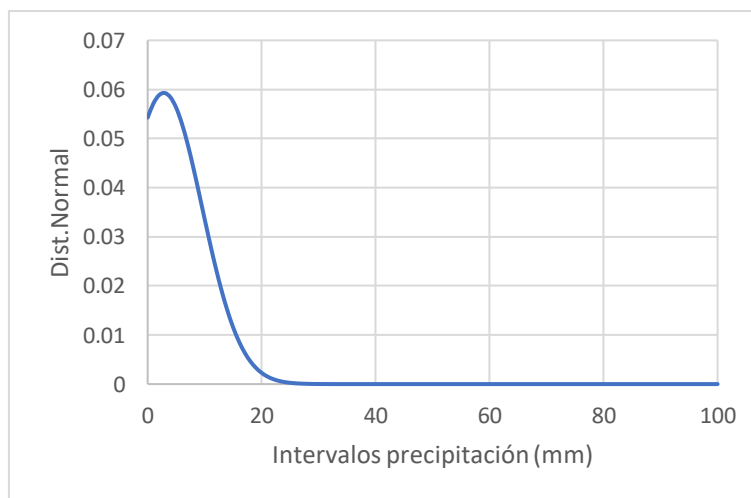


Figura 24 Distribución normal Usaquéen - San Ana (2120111). Tomado y modificado de (EAAB, 2022).

En el segundo análisis realizado se determinaron los valores correspondientes a cada percentil considerado representativo, teniendo en cuenta el registro relacionado con los límites inferior y superior (Ver Tabla 5 y Figura 25).



Tabla 5 Cuantiles Usaquén - San Ana (2120111). Tomado y modificado de (EAAB, 2022).

Percentil	Valor	Límite inferior (Basado en la distribución Normal)	Límite superior (Basado en la distribución Normal)
Máximo 100%	89.00		
0.99	34.00	32.50	35.80
0.95	15.40	15.00	16.30
0.9	8.50	8.20	9.00
3° Cuartil 75%	2.00	2.00	2.20
Mediana 50%	0.20	0.20	0.20
1° Cuartil 25%	0.00	0.00	0.00
0.1	0.00	0.00	0.00
0.05	0.00	0.00	0.00
0.01	0.00	0.00	0.00
Mínimo 0%	0.00		

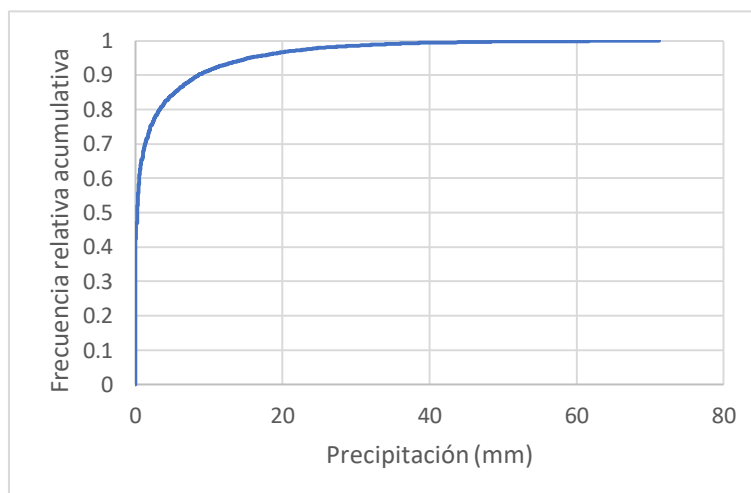


Figura 25 Cuantiles normal Usaquén - San Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)

Por su parte, a partir de la información descrita en la Figura 23 se realizó el análisis de tendencia correspondiente, en el cual se evidencia un aumento en la media de precipitación a escala diaria de 2.58 mm a 2.89 mm para el año 1985 (Ver Figura 26).

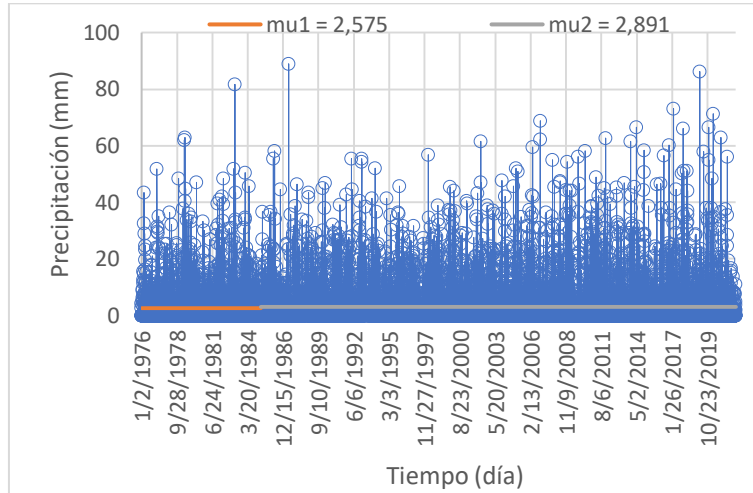


Figura 26 Análisis de tendencia diario Usaquén - San Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)

Para el análisis a escala mensual se definió un régimen de lluvias bimodal con picos en los meses de marzo a mayo y octubre a noviembre y recesiones en los meses restantes. En comparación a los registros de los últimos 10 años se identificó que en todos los meses excepto enero y octubre ha habido un aumento en el promedio mensual respecto a los registros históricos (Ver Figura 27).

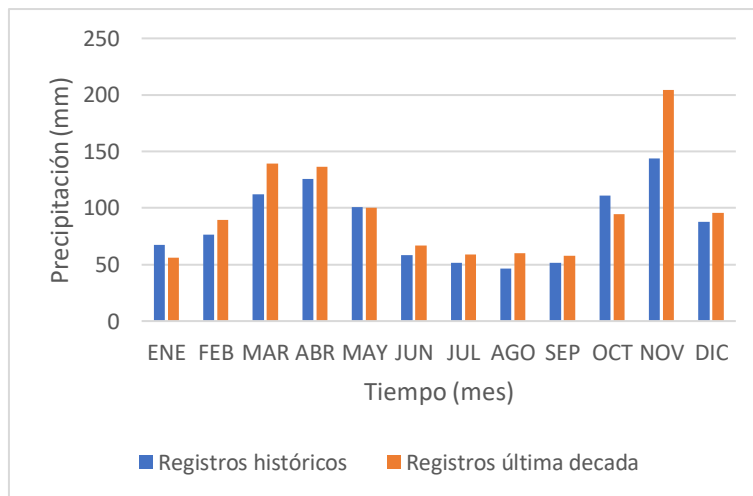


Figura 27 Precipitación mensual Usaquén - San Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)

Por su parte, los valores anuales reflejan una tendencia al crecimiento a medida que transcurren los años, lo cual puede verificarse mediante el análisis de tendencia correspondiente, en donde los aumentos en el promedio ocurren en el año 2004, pasando de 956.01 mm a 1152 mm anuales (Ver Figura 28).

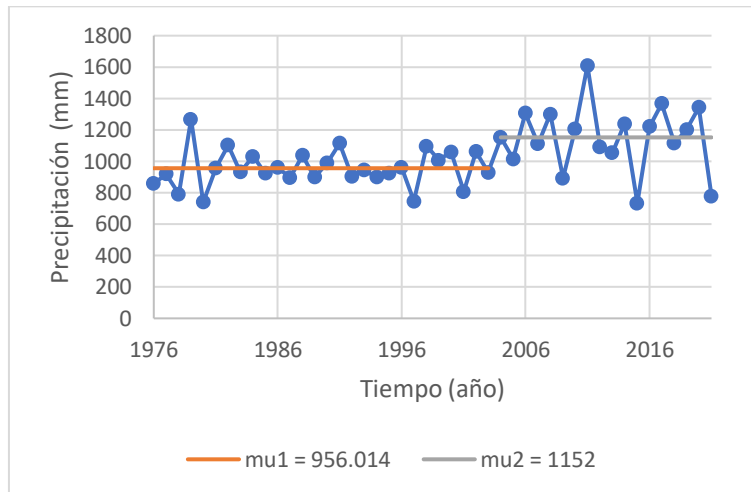


Figura 28 Precipitación anual Usaquén - San Ana (2120111). Tomado y modificado EAAB (2022)

Asimismo, se establecieron las series de precipitación máxima en 24 horas a escala mensual y anual. En donde se evidenció un comportamiento que describe el régimen bimodal, en donde se alcanzan los mayores registros en los periodos de mayor precipitación. Tal como se identificó en los registros de precipitación media mensual multianual, para la precipitación máxima en 24 horas el único mes con registros inferiores al promedio multianual de los últimos 10 años respecto a los registros históricos es enero (Ver Figura 29).

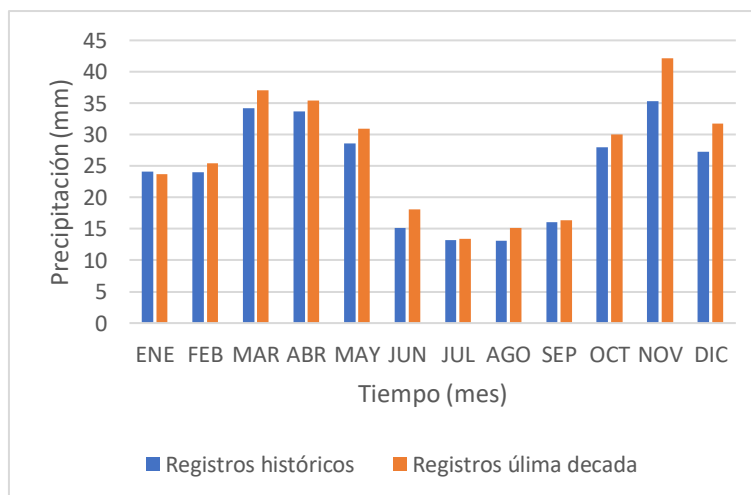


Figura 29 Precipitación máxima en 24 horas mensual Usaquén - San Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)

Igualmente, se reconoció una tendencia al crecimiento en la intensidad de los eventos de precipitación acentuada en los últimos años evaluados. Esto fue verificado a partir de las pruebas de tendencia, en donde desde el año 2002 se evidenció un aumento en el promedio anual de la precipitación, este corresponde a una variación de 49.27 mm a 59.26 mm (Ver Figura 30).

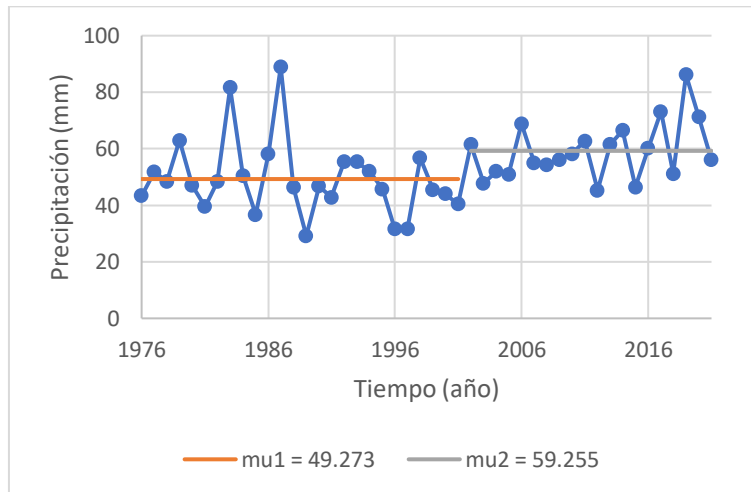


Figura 30 Precipitación máxima en 24 horas anual Usaqué - San Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)

Por otro lado, se realizó el análisis de los valores del número de días con lluvia a escala mensual y anual. Para el caso de los registros mensuales el único mes con valores superiores en el promedio de los últimos 10 años en comparación con los datos históricos es noviembre. En ese sentido, el análisis de la información de esta estación sugiere un aumento en la intensidad de los eventos de precipitación, pero una disminución en la frecuencia de estos (Ver Figura 31).

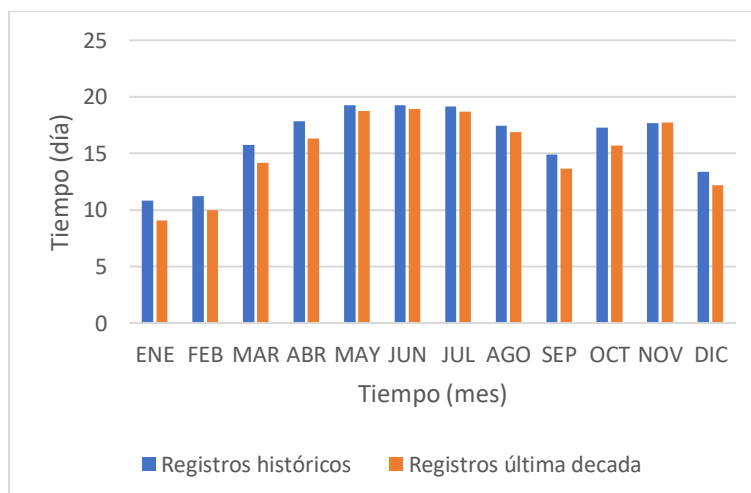


Figura 31 Número de días con lluvia mensual Usaqué - San Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)

En cuanto a la tendencia anual no se identificó una variación en la tendencia de la serie respecto al promedio histórico que corresponde a 194 días de lluvia al año (Ver Figura 32).

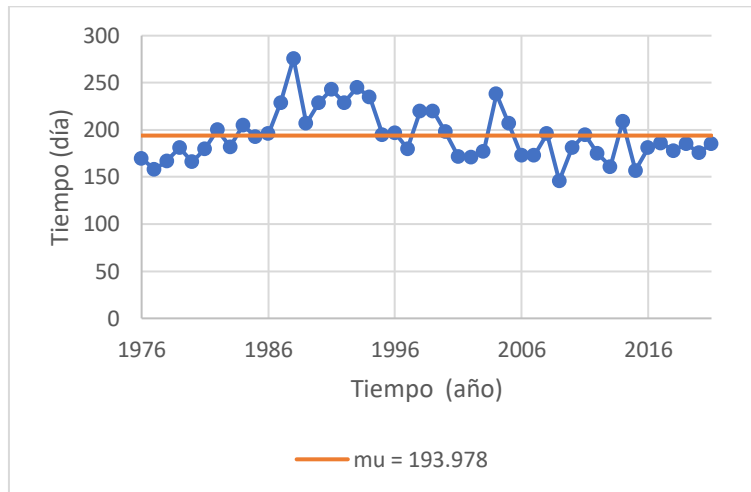


Figura 32 Número de días con lluvia anual Usaquén - San Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)

Finalmente, se desarrolló el análisis de precipitación acumulada con el fin de identificar cualquier tipo de variación en la pendiente en los registros correspondientes a los últimos 10 años y de este modo confirmar el aumento en las lluvias. En el caso de la estación Usaquén - San Ana (2120111) se reconoció un incremento en la pendiente de 2.69 a 3.15 en la última década (Ver Figura 33).

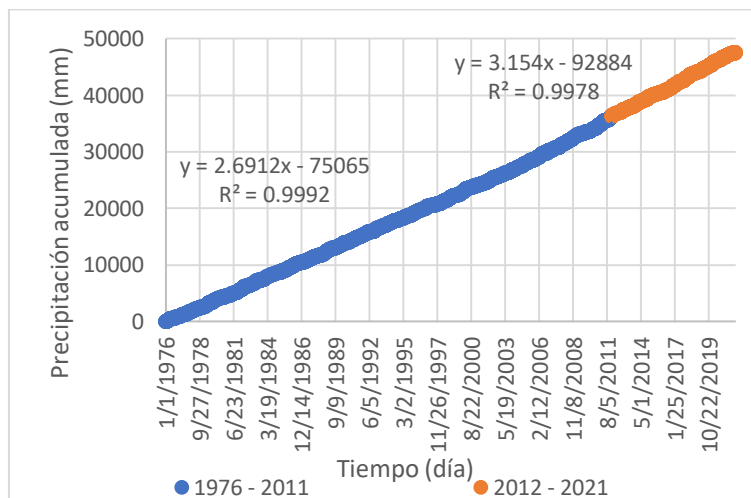


Figura 33 Precipitación acumulada Usaquén - San Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)

6.1.1.2 Enmanuel D Alzón (2120123)

Los registros históricos de precipitación diaria para la estación Enmanuel D Alzón (2120123) disponibles se encuentran en el rango entre 1977 hasta el año 2021. Por su parte, se reconocieron 15845 registros a escala diaria, lo que indica que el porcentaje de datos faltantes es del 3.6%.



Una vez establecidos los registros disponibles se procedió a identificar los datos anómalos de la serie mediante diagramas del tipo Box Plot, con el fin de confirmar si estos se encuentran fuera de la tendencia (Ver Figura 34).



Figura 34 Box Plot Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)

Para el análisis de valores atípicos se realizó el mismo procedimiento que en el caso de la estación Usaquén – Santa Ana (2120111). En este caso, se identificaron 2589 datos, de los cuales 674 coinciden con eventos macroclimáticos, que se presentan durante La Niña. Igualmente se realizó un comparativo con la estación climatológica Usaquén – Santa Ana (2120111), en donde se identificaron 1604 valores que coinciden con días en lluvia en dicha estación. Por último, en la prueba puntuación “Z” se determinaron los registros que se encuentran fuera del rango de $-3 > Z < 3$, por lo cual se eliminaron de la serie 5 datos.

Luego de esto, se realizó la imputación de datos en donde se generaron los registros faltantes a partir del programa RStudio usando la librería “Mice”.

Los resultados obtenidos para las series de precipitación a escala diaria, mensual y anual para la estación Enmanuel D Alzón (2120123) se presentan en la Figura 35. En donde el promedio de lluvias diarias corresponde a 2.53 mm.

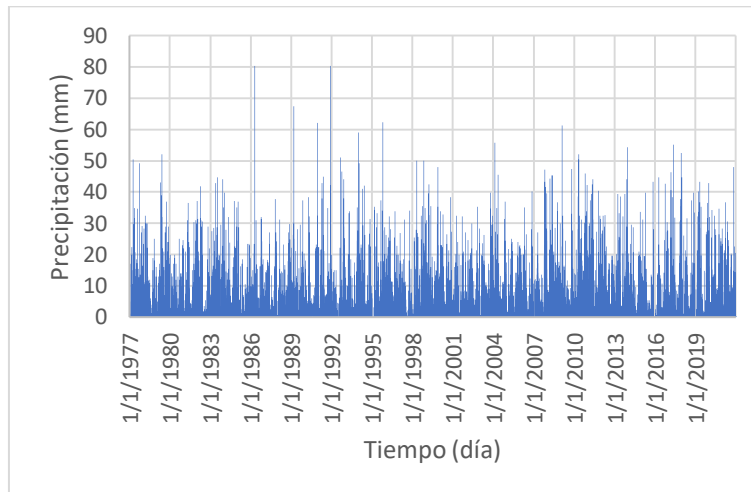


Figura 35 Precipitación diaria Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)

En este caso, la significancia estadística de los registros históricos de la estación Enmanuel D Alzón (2120123) se realizó del mismo modo que en la estación Usaquéen - San Ana (2120111), en donde fueron evaluados los métodos de la distribución normal y la prueba de cuantiles.

Para el primer método se identificó un valor promedio de 2.53 mm y una desviación estándar de 6.19 mm, esto permitió determinar la distancia de los datos respecto a la media. Así, se estableció que a medida que aumenta el valor de la precipitación, menor es la probabilidad de que ocurra un evento con esta magnitud (Ver Figura 36).

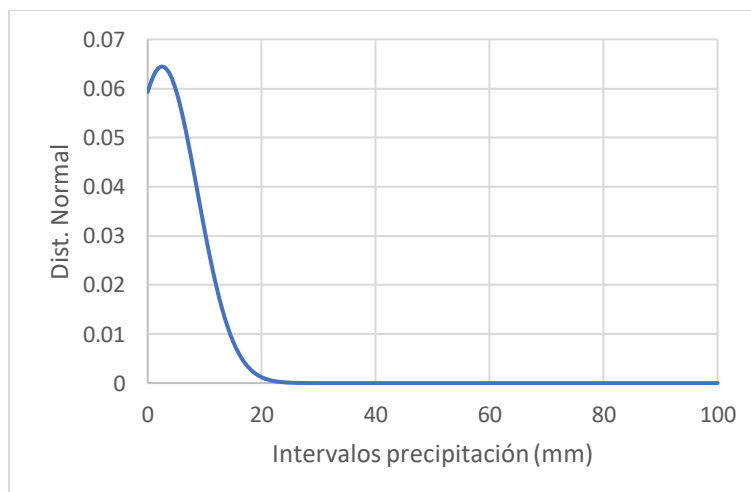


Figura 36 Distribución normal Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)

Para el segundo método de análisis se calcularon los valores de cada percentil representativo para la serie de los registros históricos, los resultados obtenidos se relacionan en la Tabla 6 y Figura 37.



Tabla 6 Cuantiles Emmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de (EAAB, 2022).

Percentil	Valor	Límite inferior (Basado en la distribución Normal)	Límite superior (Basado en la distribución Normal)
Máximo 100%	80.30		
0.99	31.00	29.80	32.40
0.95	15.00	14.40	15.70
0.9	8.60	8.20	9.00
3° Cuartil 75%	1.60	1.50	1.80
Mediana 50%	0.00	0.00	0.00
1° Cuartil 25%	0.00	0.00	0.00
0.1	0.00	0.00	0.00
0.05	0.00	0.00	0.00
0.01	0.00	0.00	0.00
Mínimo 0%	0.00		

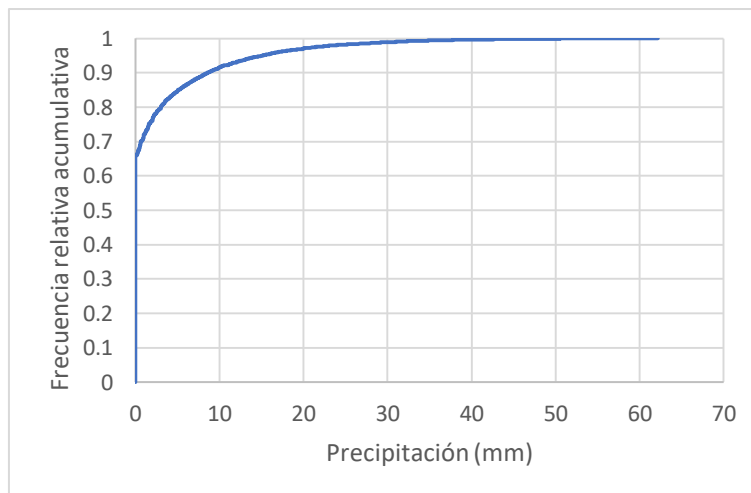


Figura 37 Cuantiles Emmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)

De acuerdo con el análisis de la información de la figura anterior, se desarrolló la prueba de tendencia correspondiente, en donde se identificó que la media de la precipitación aumenta de 2.36 mm a 2.77 mm a partir del año 2004 (Ver Figura 38).

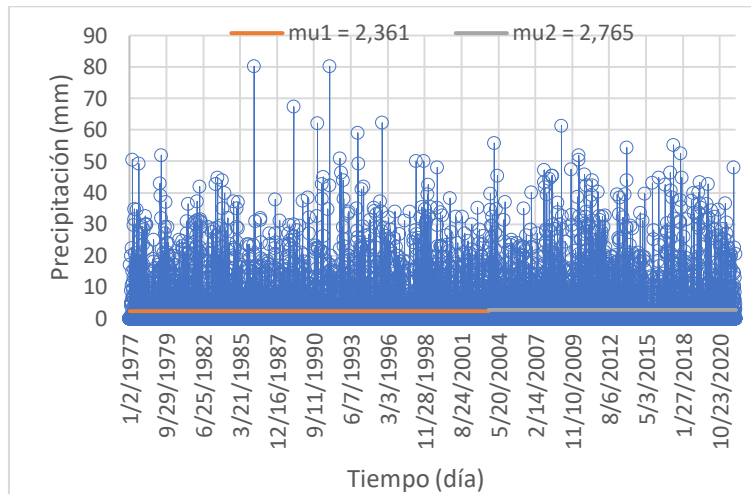


Figura 38 Análisis de tendencia diario Emmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)

En la escala mensual se identificó un régimen de lluvias bimodal similar al de la estación Usaquéen – Santa Ana (2120111), con picos en los meses de marzo a mayo y octubre a noviembre y recesiones en los meses restantes. En contraste con los últimos 10 años de registros se evidenció un aumento en los registros de precipitación para los meses de febrero, marzo, abril, mayo, noviembre y diciembre (Ver Figura 39).

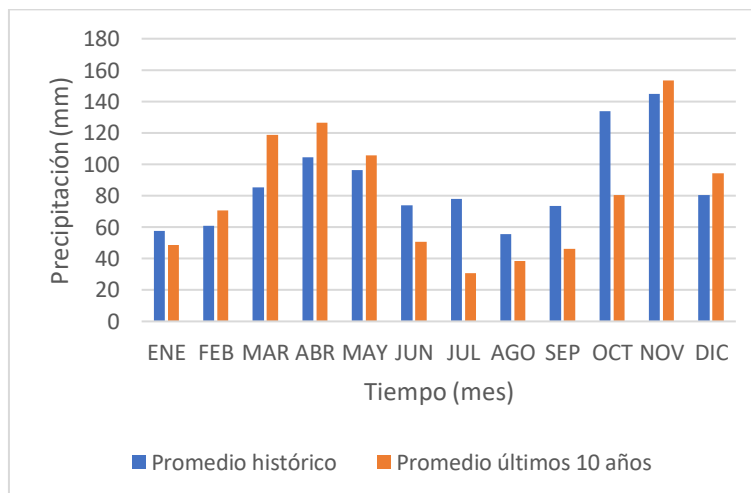


Figura 39 Precipitación mensual Emmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)

Para la precipitación anual no se reconocieron aumentos en la precipitación en los datos correspondientes al promedio histórico anual, el cual es equivalente a 922.88 mm, tal como se relaciona en la Figura 40.

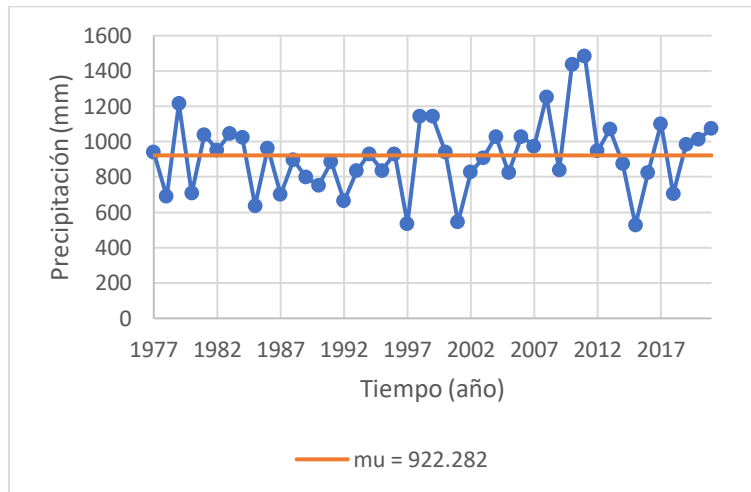


Figura 40 Precipitación anual Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)

Por su parte, los valores de la precipitación máxima en 24 horas a escala mensual y anual se registran en las Figura 41 y Figura 42. Al igual que en el caso de la estación Usaqué – Santa Ana (2120111), se evidenció un comportamiento que describe el régimen bimodal, alcanzando los mayores registros en los periodos de mayor precipitación. Respecto a los eventos de los últimos 10 años se evidenció que para el primer pico de lluvias del año se tiene un aumento en la intensidad de la precipitación, mientras que para el segundo se cuenta con una disminución (Ver Figura 41).

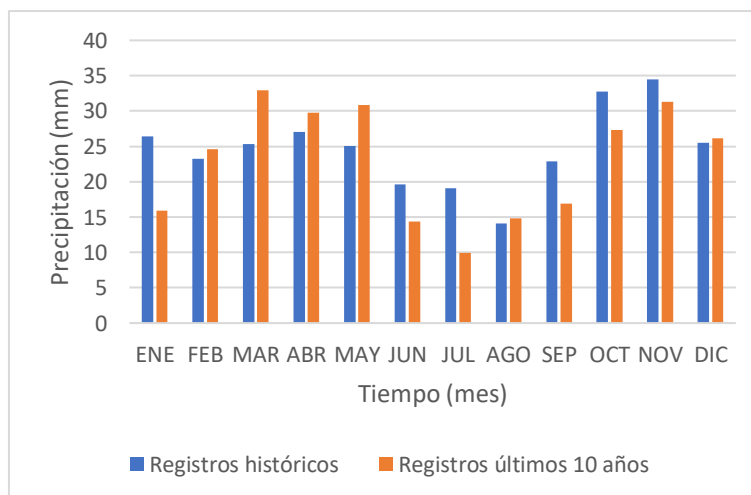


Figura 41 Precipitación máxima en 24 horas mensual Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)

Del mismo modo, en la Figura 42 se determinó que no se presentan incrementos en la tendencia de los datos de precipitación máxima en 24 horas en todo el periodo de los registros de la estación Enmanuel D Alzón (2120123), así su promedio anual es de 45.62 mm.

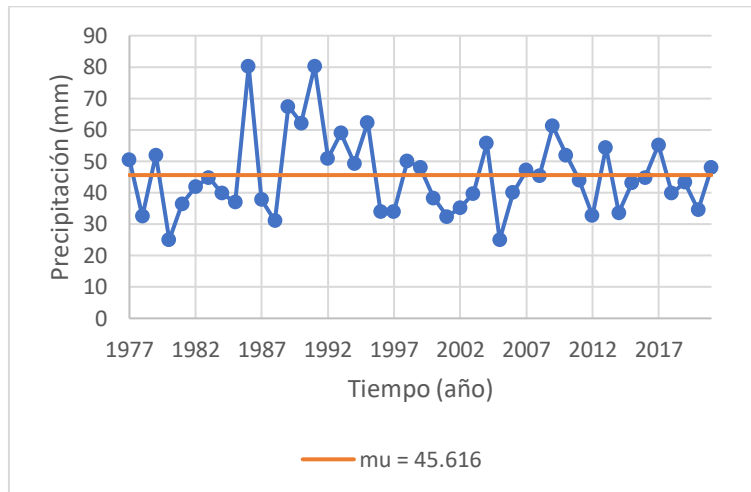


Figura 42 Precipitación máxima en 24 horas anual Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)

Por su parte, para los valores del número de días con lluvia a escala mensual se reconoció un aumento en los registros de los últimos 10 años comparado con las series históricas en todos los meses excepto en julio, agosto y septiembre, tal como se puede observar en la Figura 43. En ese sentido, el análisis realizado sugiere un aumento en la frecuencia en los registros de esta estación para casi todos los meses del año.

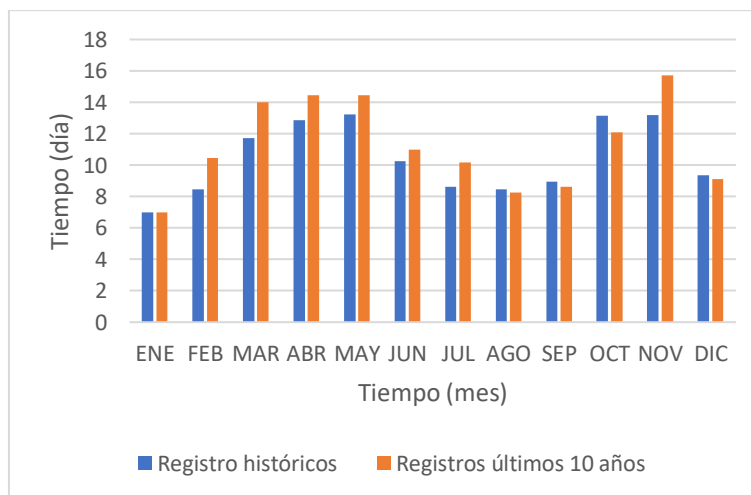


Figura 43 Número de días con lluvia mensual Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)

Para la tendencia anual se estableció que no existen aumentos en el número de eventos ocurridos durante el periodo de análisis de la estación a escala anual, para este caso el promedio histórico de días con lluvia para la estación Enmanuel D Alzón (2120123) es de 124 días (Ver Figura 44).

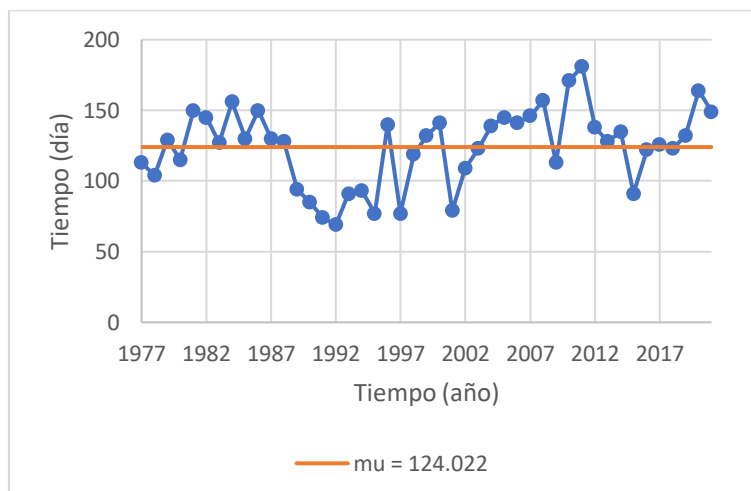


Figura 44 Número de días con lluvia anual Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)

Finalmente, se realizó el análisis para determinar variaciones de los registros de precipitación históricos respecto a los últimos 10 años de registros, en este caso se evidenció un aumento en la pendiente de la gráfica de precipitación acumulada de 2.41 a 2.69 (Ver Figura 45).

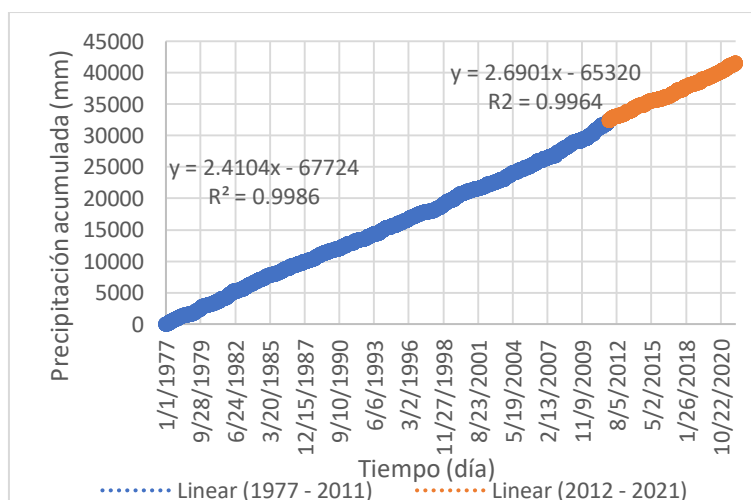


Figura 45 Precipitación acumulada Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)

6.1.2 Cuenca La Tinajas

Para el caso de estudio de la cuenca pluvial La Tinajas se tuvo en cuenta únicamente la estación pluviométrica Pedregal (2701481), la cual se encuentra dentro de la cuenca pluvial relacionada y sus registros cubren el periodo de 1996 a 2021.



6.1.2.1 Pedregal (2701481)

Para la estación Pedregal (2701481) los registros históricos corresponden a la temporalidad de 1996 hasta 2021, la serie relacionada cuenta con 9285 datos y 2.23% de datos faltantes respecto a la cantidad total esperada.

A partir de la serie de precipitación histórica se construyeron los diagramas de tipo Box Plot, con el fin de identificar valores fuera de la tendencia de los registros de la estación estudiada, de este modo se inició el análisis para descartar datos que se consideraron anómalos (Ver Figura 46).



Figura 46 Box Plot Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)

En función de los análisis desarrollados se determinó que 1038 registros se encuentran fuera de la tendencia en el diagrama Box Plot, de estos 609 no corresponden a eventos durante eventos macroclimáticos, de los cuales 69 no coinciden con eventos de precipitación registrados por la estación La Iguana (27011120).

Finalmente, a partir de la prueba de puntuación “Z” para verificar la tendencia de la serie se evidenció que 10 de los datos de la secuencia histórica correspondían a datos anómalos.

Posteriormente, se definió la serie objeto de análisis para este caso de estudio mediante la generación de los datos faltantes en la serie a escala diaria desde el programa RStudio usando la librería “Mice”. Con los resultados obtenidos a escala diaria para la estación Pedregal (2701481), en donde su promedio correspondiente es de 3.78 mm (Ver Figura 47).

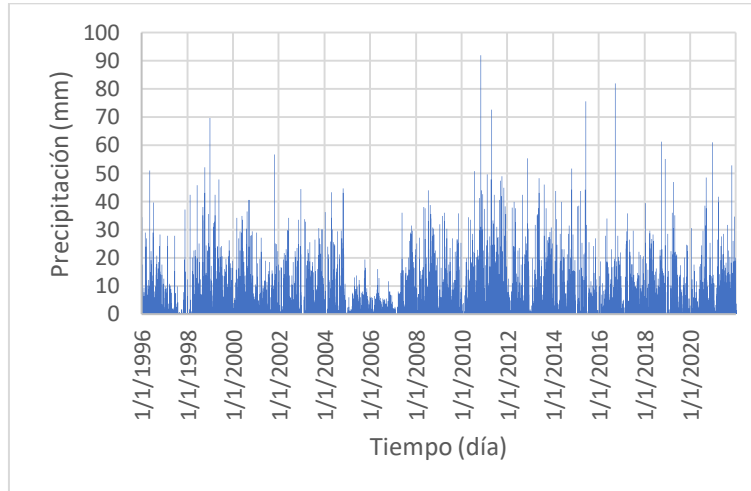


Figura 47 Precipitación diaria Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)

De acuerdo con la información presentada en la Figura 47 se realizaron los análisis de significancia estadística, en los cuales se aplicó el mismo análisis del caso de estudio de Bogotá. Para la distribución normal la serie de registros estudiados definió una media de 3.78 mm y una desviación estándar de 7.11 mm, de acuerdo con lo anterior fue posible inferir que mientras menor es el valor del registro de precipitación, mayor es la probabilidad de que este suceda (Ver Figura 48).

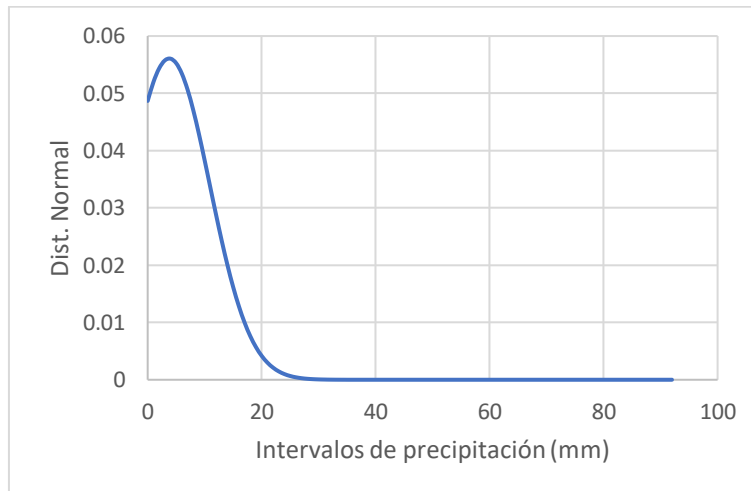


Figura 48 Distribución normal Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)

En el caso de la prueba de cuantiles se establecieron los valores equivalentes en cada uno de los percentiles considerados más representativos, estos son relacionados en la Tabla 7 y Figura 49.



Tabla 7 Cuantiles Pedregal (2701481). Tomado y modificado de (EAAB, 2022).

Percentil	Valor	Límite inferior (Basado en la distribución Normal)	Límite superior (Basado en la distribución Normal)
Máximo 100%	91.94		
0.99	33.77	32.20	35.50
0.95	18.49	18.00	17.50
0.9	11.94	11.60	12.40
3° Cuartil 75%	4.57	4.50	4.70
Mediana 50%	0.50	0.50	0.50
1° Cuartil 25%	0.00	0.00	0.00
0.1	0.00	0.00	0.00
0.05	0.00	0.00	0.00
0.01	0.00	0.00	0.00
Mínimo 0%	0.00		

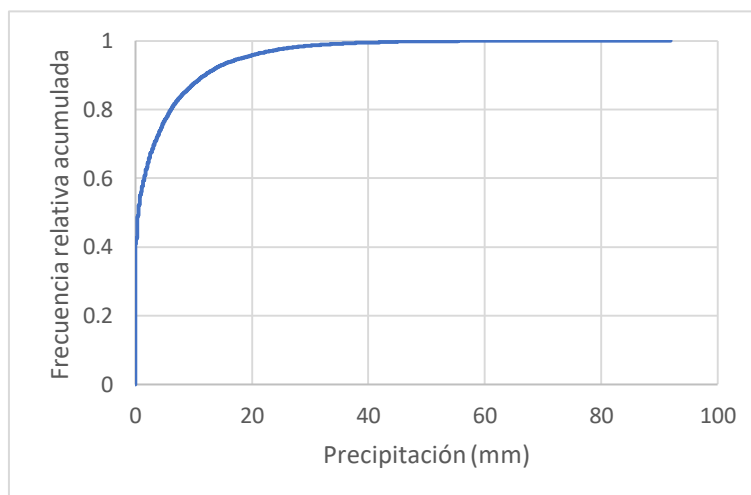


Figura 49 Cuantiles Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)

Asimismo, se desarrolló la serie de tendencia para los registros a escala diaria teniendo en cuenta el intervalo de datos disponibles, en esta se evidenció que el valor promedio de la precipitación aumentó en el año 2007 de 3.02 mm a 4.22 mm (Ver Figura 50).

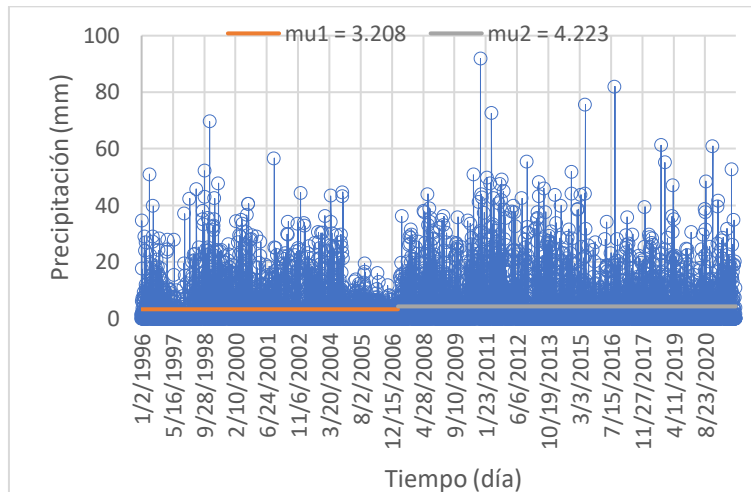


Figura 50 Análisis de tendencia diario Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)

Para la escala mensual se reconoció que el patrón de los registros de lluvias para la estación obedece a un comportamiento bimodal, el cual presenta sus valores máximos en los periodos de marzo a junio y de septiembre a noviembre, mientras que los registros de menor magnitud ocurren en los meses de enero, febrero, marzo, julio, agosto y diciembre. En relación con la variación presentada en el promedio histórico respecto a los registros de los últimos 10 años fue posible identificar que para todos los meses se tiene un aumento, con excepción de junio, julio, octubre y diciembre (Ver Figura 51).

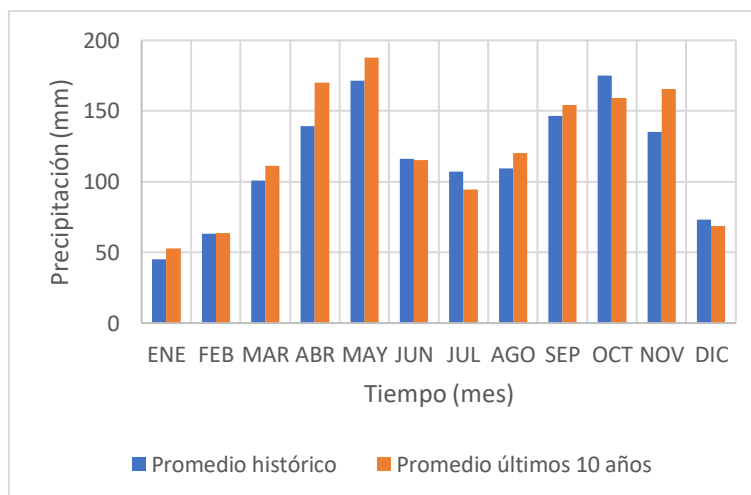


Figura 51 Precipitación mensual Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)

En la temporalidad multianual el promedio es de 1383 mm y no se evidenciaron cambios respecto a su media en el periodo de análisis, tal como se puede observar en la Figura 52.

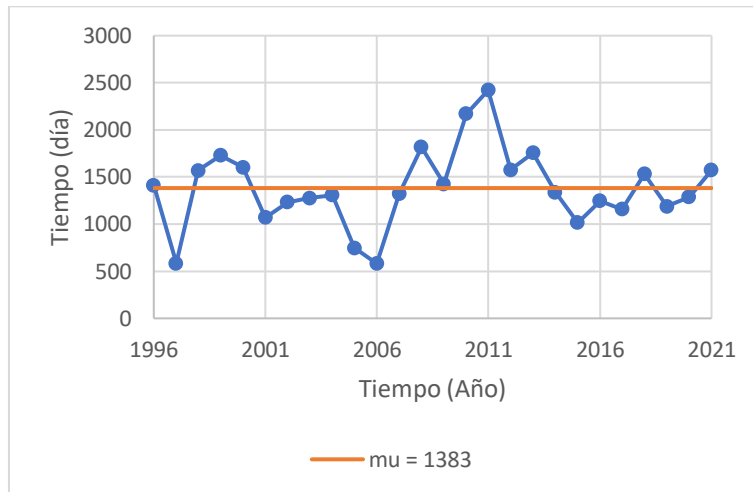


Figura 52 Precipitación anual Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)

Por otro lado, el patrón de la precipitación máxima en 24 horas a escala mensual sugiere que este cuenta con el mismo comportamiento bimodal identificado en el análisis de la precipitación media mensual multianual, así los picos y recesiones ocurren durante los mismos periodos que en este parámetro. El promedio de los registros históricos presenta valores inferiores en comparación a la media de los últimos 10 años, en los únicos meses que no se presentan valores menores son julio, octubre y diciembre (Ver Figura 53).

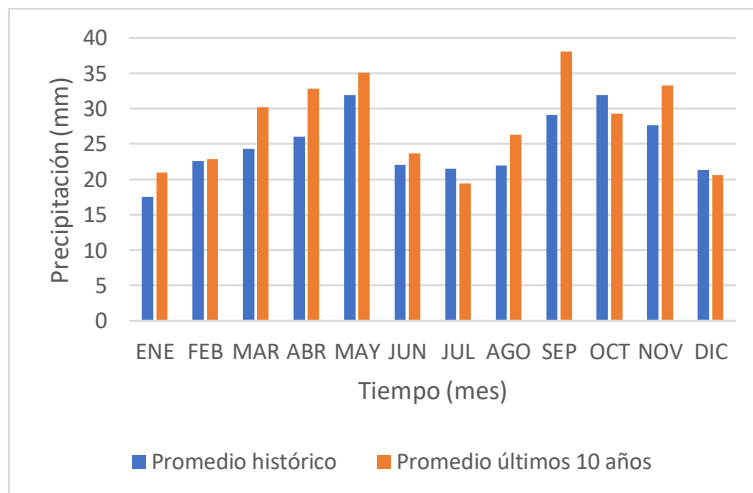


Figura 53 Precipitación máxima en 24 horas mensual Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)

Igualmente, en el caso de la precipitación máxima en 24 horas a escala anual se identificaron aumentos en el promedio de los registros históricos de 41.21 mm a 61.29 mm en el año 2010, lo que refleja que la intensidad de las lluvias se ha incrementado en los últimos años (Ver Figura 54).

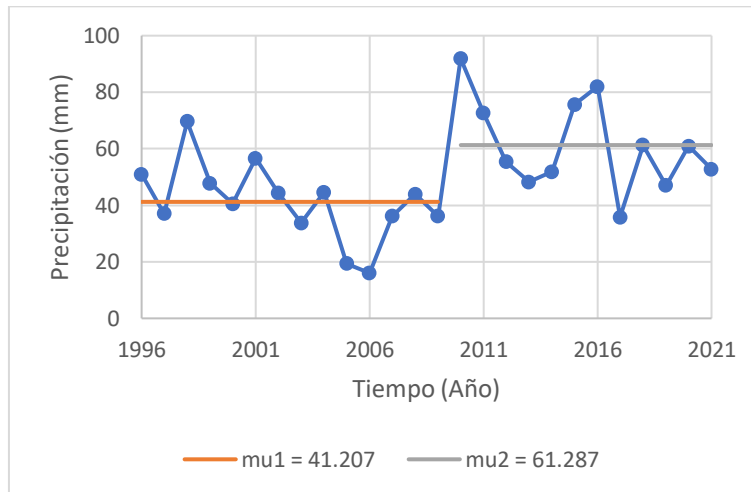


Figura 54 Precipitación máxima en 24 horas anual Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)

Para el parámetro del número de días con lluvia se realizó un análisis comparativo entre los registros históricos y los registros de los últimos 10 años, dicho análisis permitió verificar si se presentaba un aumento en la frecuencia de la precipitación para la estación Pedregal (2701481). No obstante, se determinó que solo para los meses de mayo, agosto y noviembre los registros son superiores respecto a los últimos 10 años, por lo cual fue posible confirmar que en la estación Pedregal (2701481) no se presenta un aumento en la frecuencia de los eventos de precipitación (Ver Figura 55).

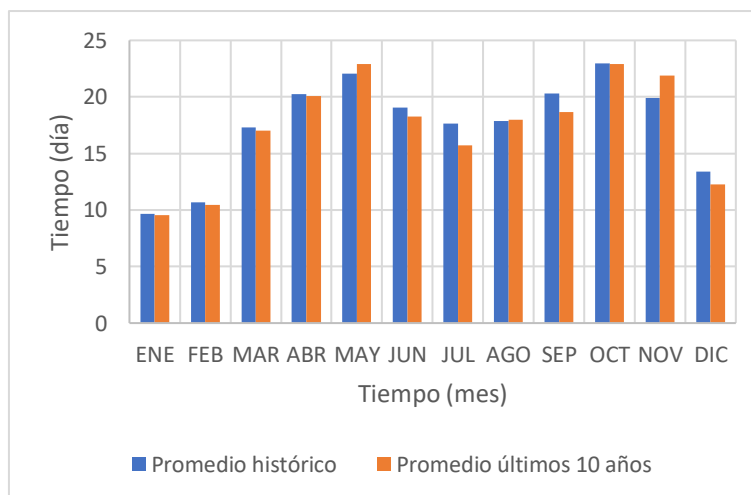


Figura 55 Número de días con lluvia mensual Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)

Asimismo, el análisis realizado a escala anual para estudiar la frecuencia de ocurrencia de eventos de precipitación, lo cual permitió confirmar que la tendencia de los datos no refleja un aumento en la media histórica, así como se presenta en la Figura 56.

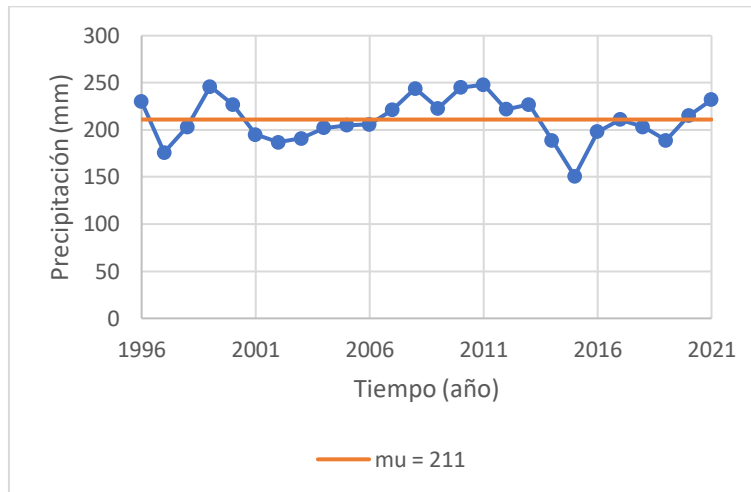


Figura 56 Número de días con lluvia anual Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)

Para complementar en análisis estadístico de los registros de lluvia de la estación Pedregal (2701481), se construyó una curva de precipitación acumulada en la cual se evaluaron dos temporalidades, la primera corresponde a los datos desde la fecha de instalación hasta el 2011 y la segunda a los valores de los últimos 10 años. Los resultados obtenidos sugieren un aumento en la pendiente para el segundo periodo estudiado, el cual pasa de 3.50 a 3.58, tal como se puede observar en la Figura 57.

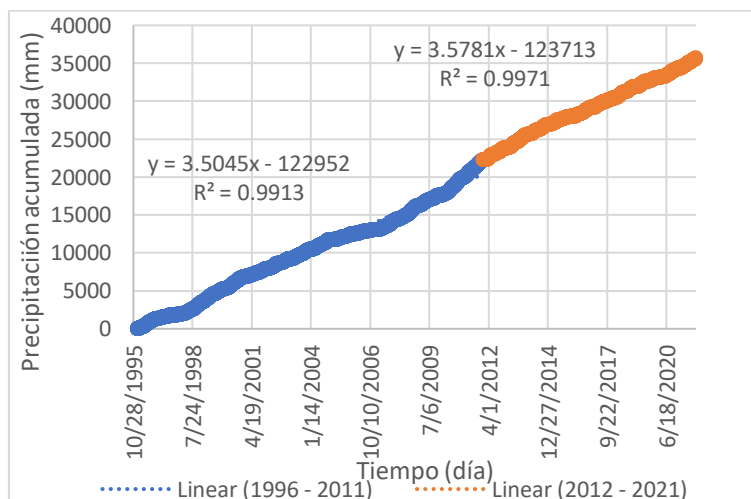


Figura 57 Precipitación acumulada Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)

6.1.3 Cuenca La Doctora

En el caso de estudio de la cuenca pluvial La Doctora se identificaron dos estaciones pluviométricas que inciden cercanas al área de interés, en este caso se reconocieron las estaciones Ayurá (2701093) y San Antonio del Prado (2701038), para las cuales se realizó el tratamiento de datos correspondientes.



6.1.3.1 Ayurá (2701093)

Para el caso de la estación pluviométrica Ayurá (2701093) se definió una serie temporal que abarca los años entre 1973 y 2021, en la cual se contó con 14789 registros a escala diaria, los cuales son suficientes para estudiar la serie, ya que los datos faltantes corresponden al 17.28%.

Luego de esto, se determinó la cantidad de valores anómalos a través de diagramas Box Plot (ver Figura 58), comparación con estaciones vecinas, eventos macroclimáticos y pruebas de puntuación “Z”. De este modo se estableció que 1707 datos se encuentran fuera de la tendencia del Box Plot, de estos 1115 no coinciden con el fenómeno de La Niña. Sin embargo, solo en 89 registros no se encuentran concordancia en comparación con los días con lluvia definidos en la estación San Antonio del Prado (2701038). Finalmente, tras aplicar las pruebas de puntuación “Z” se identificaron solo 3 datos anómalos del total de la serie, los cuales fueron removidos de esta.

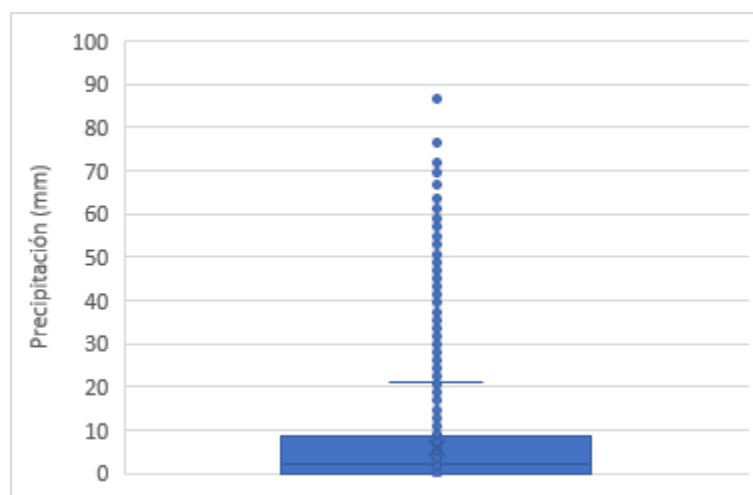


Figura 58 Box Plot Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)

A partir de los datos definidos como insumo para la construcción de la serie definitiva y por medio del programa RStudio usando la librería “Mice” se realizó la imputación de los datos faltantes con el fin de obtener la serie de precipitación completa, asegurando que no se altere el comportamiento del régimen de precipitación por la influencia de los datos generados sintéticamente.

La serie generada para la estación pluviométrica Ayurá (2701093) se representa en la Figura 59, para la cual el promedio de precipitación diaria fue de 5.97 mm.

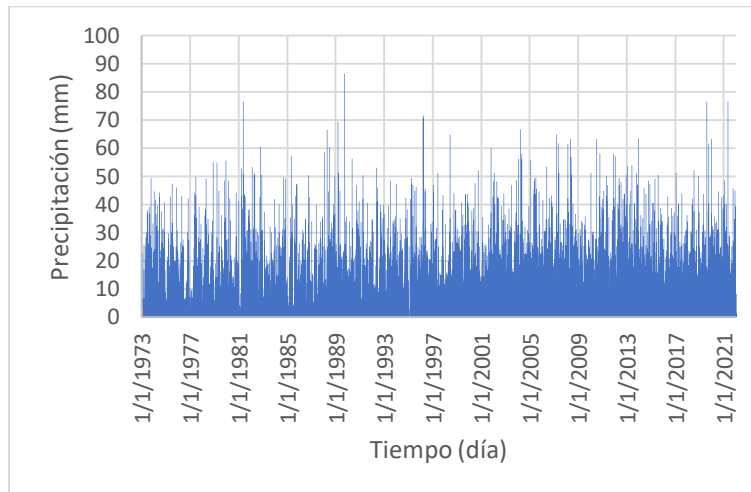


Figura 59 Precipitación diaria Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)

Para obtener detalles de la significancia estadística de la serie de precipitación construida se realizaron análisis de distribución normal y prueba de cuantiles. En el primer caso la distribución normal sugiere que el valor promedio de la estación estudiada corresponde a 5.97 mm y la desviación estándar es de 8.81 mm, esto indica que tan amplio es el rango de los registros de la serie y que tan lejos están estos del valor medio (Ver Figura 60).

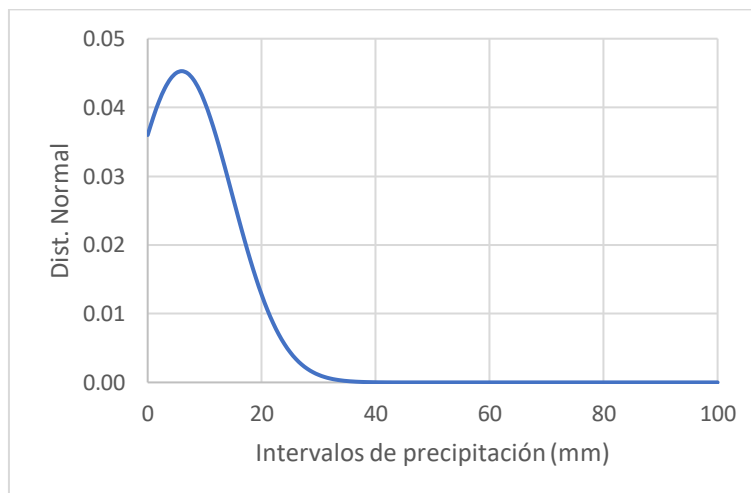


Figura 60 Distribución normal Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)

En cuanto a la prueba de cuantiles se identificó que tan representativos son los valores obtenidos respecto a cada percentil analizado de acuerdo con la serie histórica evaluada (Ver Tabla 8 y Figura 61).

Tabla 8 Cuantiles Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)

Percentil	Valor	Límite inferior (Basado en la distribución Normal)	Límite superior (Basado en la distribución Normal)
Máximo 100%	80.30		



Percentil	Valor	Límite inferior (Basado en la distribución Normal)	Límite superior (Basado en la distribución Normal)
0.99	31.00	29.80	32.40
0.95	15.00	14.40	15.70
0.9	8.60	8.20	9.00
3° Cuartil 75%	1.60	1.50	1.80
Mediana 50%	0.00	0.00	0.00
1° Cuartil 25%	0.00	0.00	0.00
0.1	0.00	0.00	0.00
0.05	0.00	0.00	0.00
0.01	0.00	0.00	0.00
Mínimo 0%	0.00		

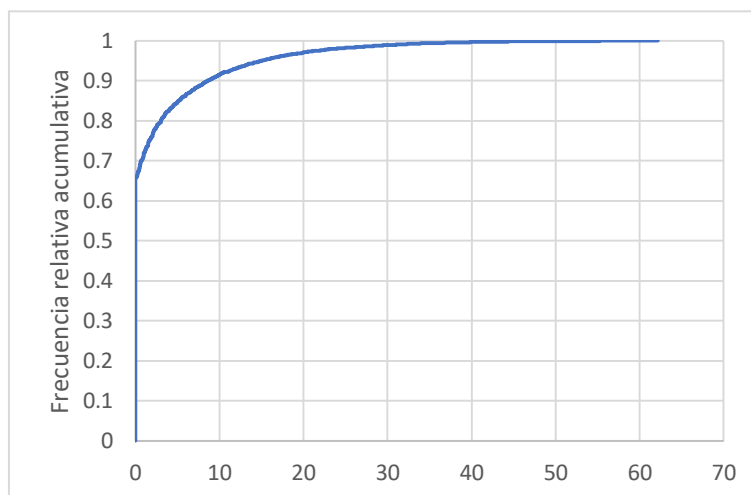


Figura 61 Cuantiles normal Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)

Asimismo, se desarrolló un análisis de tendencia de los valores de la serie definitiva de precipitación, los cuales fueron relacionados en la Figura 59, en donde fue posible reconocer las variaciones en la tendencia de los registros históricos respecto a los últimos años evaluados. Para el caso de la estación pluviométrica Ayurá (2701093) se evidenciaron variaciones en la media de precipitación de 5.032 mm a 7.092 mm a partir de 2 de septiembre de 1999 (Ver Figura 62).

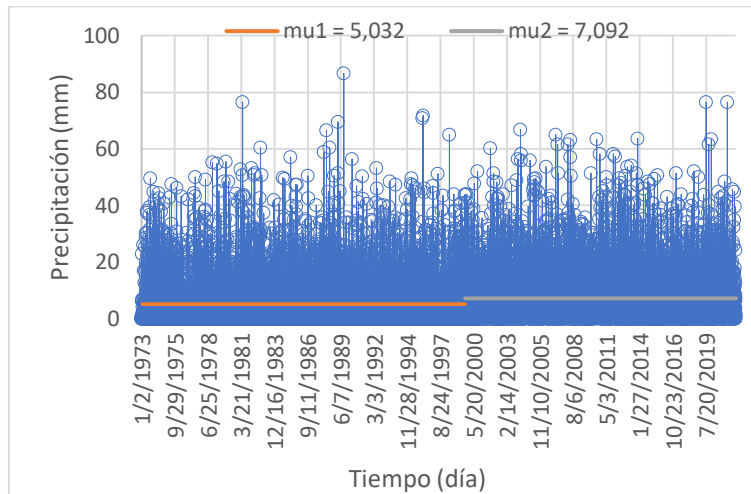


Figura 62 Análisis de tendencia diario Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)

De acuerdo con la información presentada en la Figura 59 se construyó la distribución mensual de la precipitación total para dos intervalos de tiempo, el primero relacionado con el periodo histórico y el segundo únicamente incluyó los últimos 10 años de registros. Los resultados obtenidos permitieron establecer que se presentó un aumento generalizado en la precipitación total mensual en los últimos 10 años en todos los meses, excepto en septiembre y noviembre. Asimismo, se identificó un comportamiento bimodal con picos en los meses de marzo a junio y agosto a noviembre, los meses restantes corresponden a periodos de recesión (Ver Figura 63).

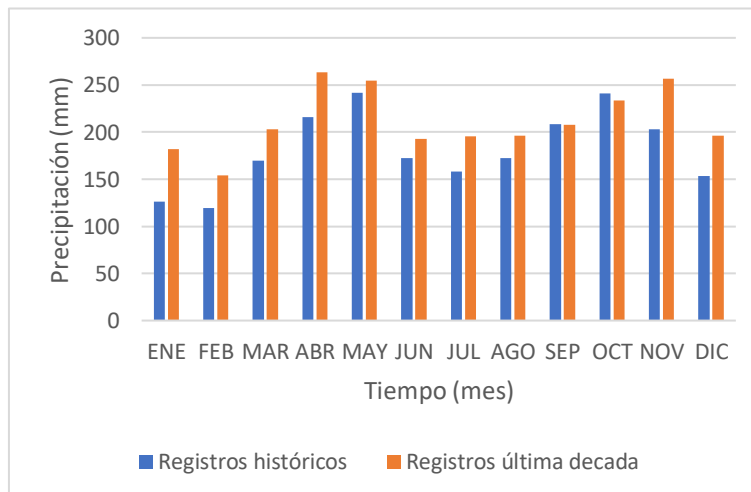


Figura 63 Precipitación mensual Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)

Para la escala anual se realizó un análisis tendencia de modo que se determinó un aumento en la precipitación total desde el año 2002, la variación identificada fue de 1866 mm a 2633 mm (Ver Figura 64).

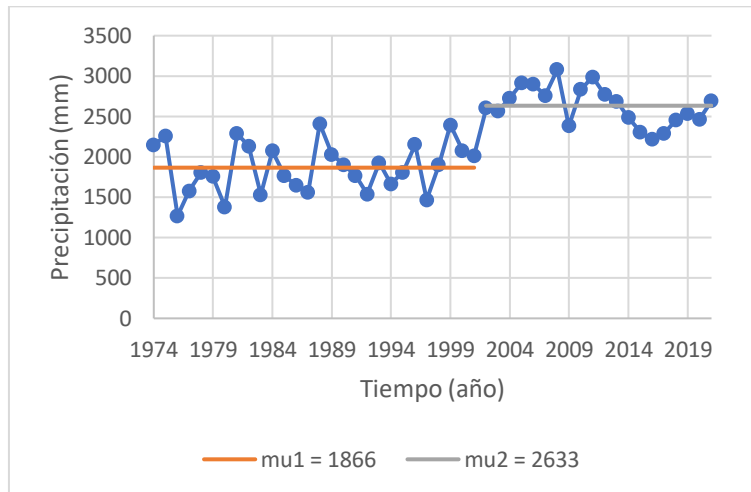


Figura 64 Precipitación anual Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)

El parámetro de precipitación máxima en 24 horas fue estudiado de la misma forma que la precipitación total, se realizó una comparación entre los registros históricos respecto a los 10 años finales de la serie. En la Figura 65 se aprecian los resultados de este análisis, el cual advierte que para los últimos 10 años la intensidad es inferior respecto al periodo histórico para los meses de marzo, junio, y septiembre.

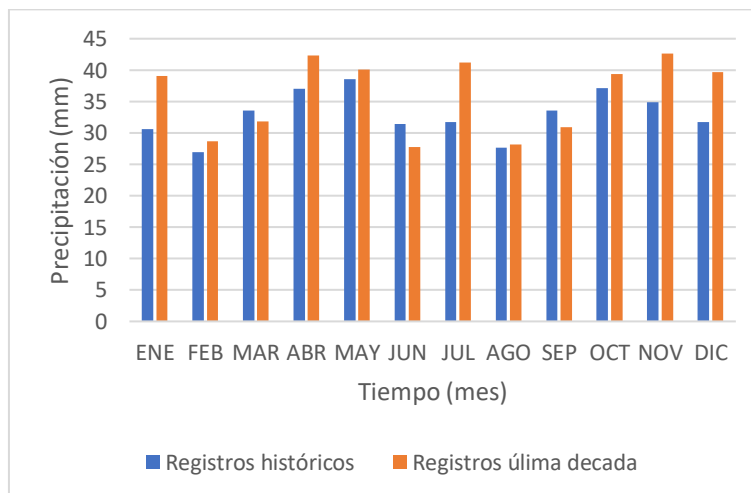


Figura 65 Precipitación máxima en 24 horas mensual Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)

No obstante, para la precipitación máxima en 24 horas en el caso de la escala multianual no se identificaron variaciones a lo largo del periodo evaluado, así el valor promedio corresponde a 55.06 mm entre el periodo de 1973 a 2021 (Ver Figura 66).

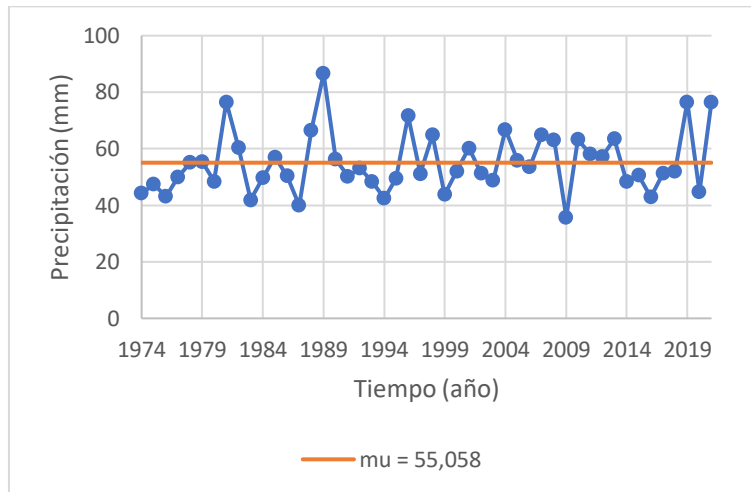


Figura 66 Precipitación máxima en 24 horas anual Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)

Respecto al número de días con lluvia por mes se evidenció que, a partir de la comparación realizada entre los valores históricos de la serie y los últimos 10 años, la frecuencia de las lluvias aumentó para todos los meses del año, es decir, la cantidad de días con lluvia en un mes es mayor en el último tiempo, incluso en varios meses cercano a la totalidad de los días de este (Ver Figura 67).

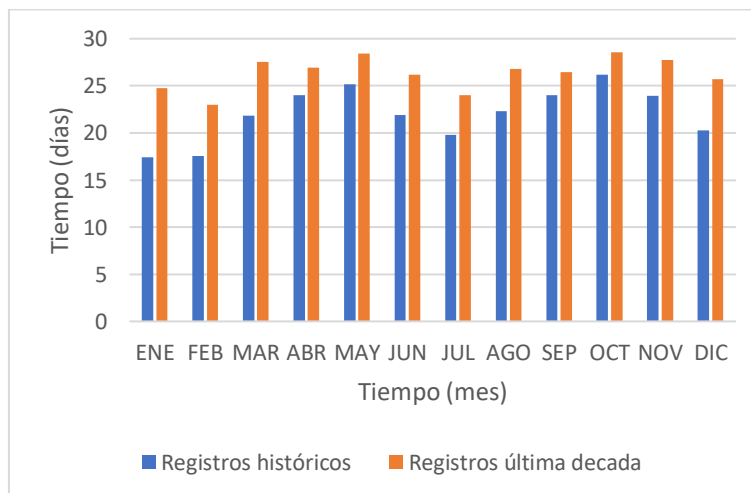


Figura 67 Número de días con lluvia mensual Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)

El análisis realizado en la Figura 67 fue comprobado a partir de lo evidenciado en la Figura 68, en donde se determinó que promedio del número de días con lluvia por año se incrementó de 217 a 317 desde el año 1999.

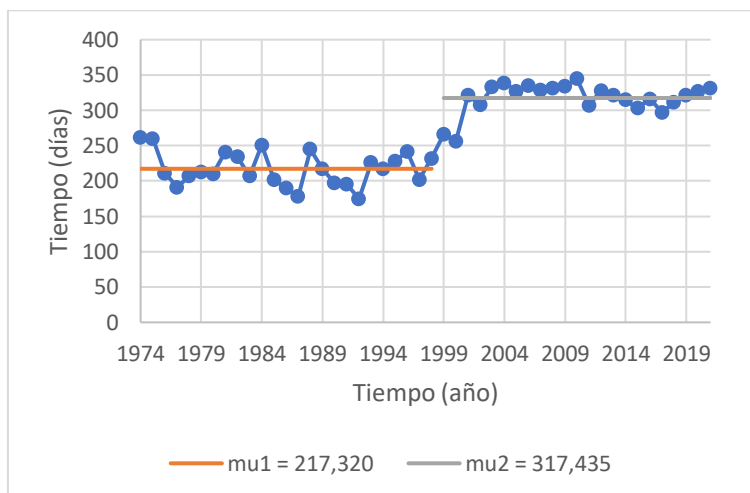


Figura 68 Número de días con lluvia anual Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)

Por último, se identificó un aumento de la pendiente en la precipitación acumulada, el cual paso de ser de 5.51 a 6.65, este análisis también permitió comprobar que para la última década la cantidad de precipitación ha aumentado respecto al periodo histórico para la estación pluviométrica Ayurá (2701093), tal como se presenta en la Figura 69.

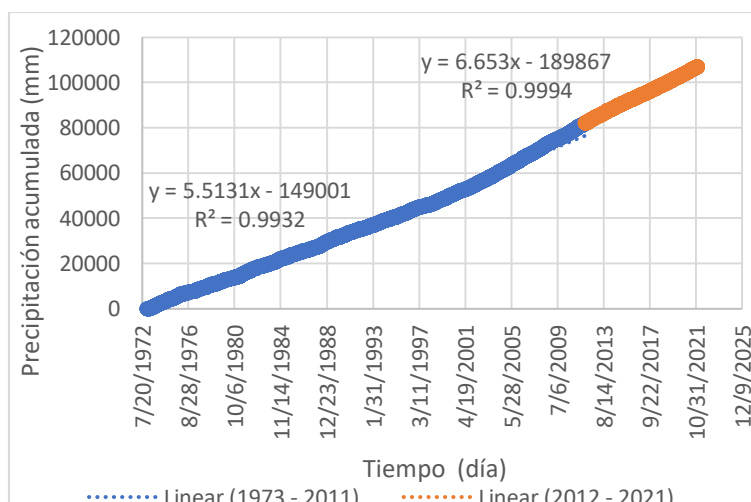


Figura 69 Precipitación acumulada Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)

6.1.3.2 San Antonio del Prado (2701038)

La última estación pluviométrica estudiada es la de San Antonio del Prado (2701038), la cual cuenta con 15226 registros entre el periodo de 1973 a 2021, lo cual permitió establecer que el porcentaje de datos faltantes es del 14.92%, valor aceptable para establecer que los valores son aptos para el desarrollo del análisis de precipitación.

Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito, se procedió a definir los valores anómalos de la serie de precipitación, esto se realizó mediante análisis de tipo Box Plot, tal como se puede observar en la Figura 70. Además, se complementó dicho análisis con la



identificación de eventos ocurridos durante temporalidades macroclimáticas (La Niña), la comparación con los días de precipitación en la estación pluviométrica Ayurá (2701093) y pruebas de puntuación “Z”.

Los resultados obtenidos indican que 1073 datos fueron descartados a partir del análisis Box Plot, de estos 754 no coinciden con periodos en donde se presentó La Niña. Sin embargo, únicamente 3 valores no coinciden con días de precipitación registrados en la estación pluviométrica Ayurá (2701093), de los cuales solo un dato se encuentra fuera del rango $-3 > Z < 3$ para la respectiva prueba de puntuación, este fue removido de la serie.

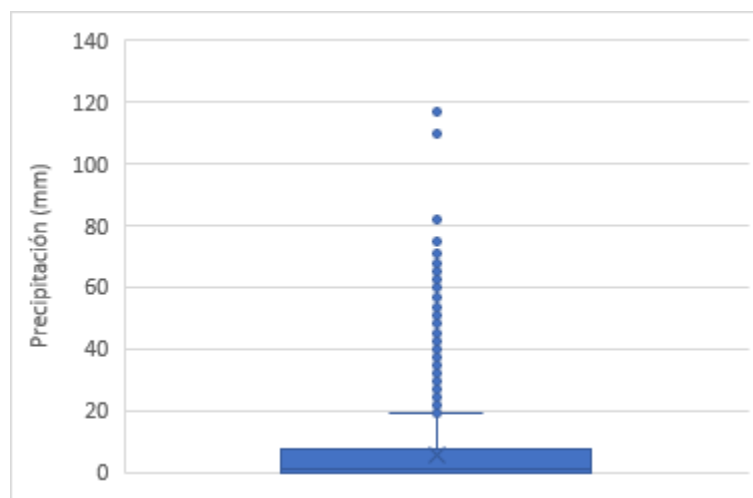


Figura 70 Box Plot San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)

De acuerdo con los valores establecidos para la construcción de la serie de precipitación definitiva para la estación pluviométrica San Antonio del Prado (2701038) se utilizó la librería “Mice” del programa RStudio con el objetivo de contar con la totalidad de los registros para la temporalidad deseada. Esta herramienta permitió complementar los valores faltantes a través del método de la imputación simple.

Así, se construyó la serie definitiva de precipitación de la estación pluviométrica San Antonio del Prado (2701038), en la cual fue posible reconocer que el valor promedio de precipitación diaria es de 6.58 mm (Ver Figura 71).

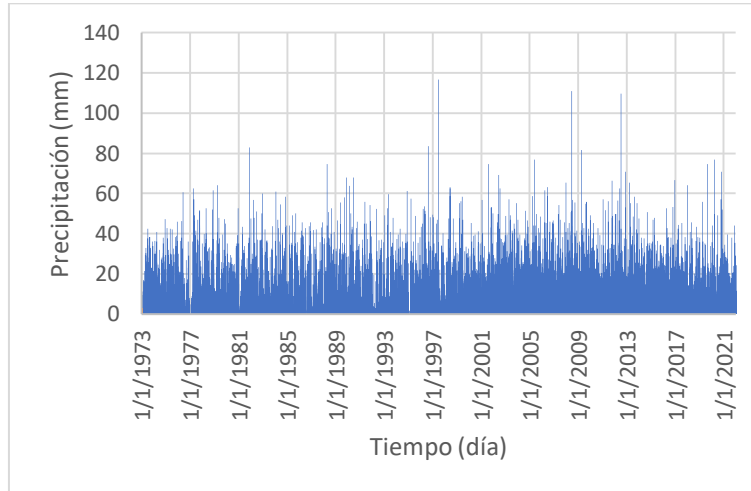


Figura 71 Precipitación diaria San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)

Con el fin de conocer a detalle las características de los datos correspondientes a la serie definitiva de precipitación se realizaron análisis mediante la distribución normal y la prueba de cuantiles. Los resultados obtenidos para la distribución normal permitieron identificar que el valor medio de la serie es de 6.58 mm, mientras que la desviación estándar es de 9.86 mm, lo cual se relaciona con que tanto se alejan los datos de la media a medida que aumenta el valor del registro y como en la misma medida disminuye su probabilidad de ocurrencia (Ver Figura 72).

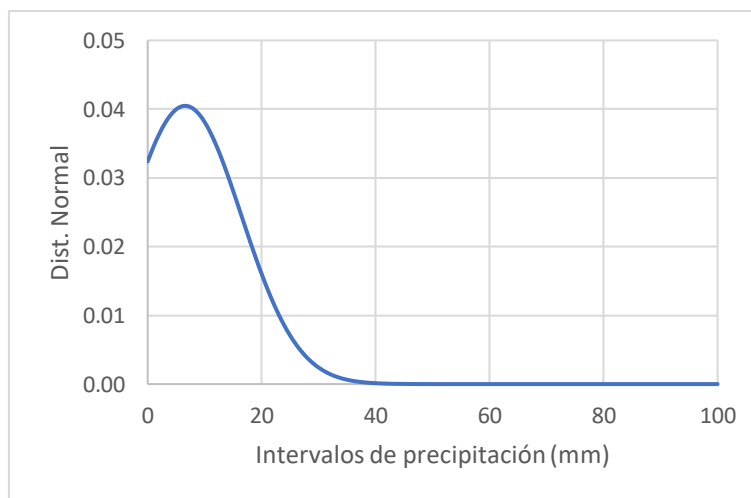


Figura 72 Distribución normal San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)

En la prueba de cuantiles se establecieron los valores de interés para cada percentil representativo de la serie definida. Igualmente, se relacionaron los intervalos de confianza según el percentil (Ver Tabla 9 y Figura 73).



Tabla 9 Cuantiles San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)

Percentil	Valor	Límite inferior (Basado en la distribución Normal)	Límite superior (Basado en la distribución Normal)
Máximo 100%	116.70		
0.99	44.20	37.50	45.80
0.95	27.25	29.00	26.70
0.9	19.56	20.20	19.00
3° Cuartil 75%	9.39	9.60	9.40
Mediana 50%	2.29	2.10	2.40
1° Cuartil 25%	0.00	0.00	0.00
0.1	0.00	0.00	0.00
0.05	0.00	0.00	0.00
0.01	0.00	0.00	0.00
Mínimo 0%	0.00		

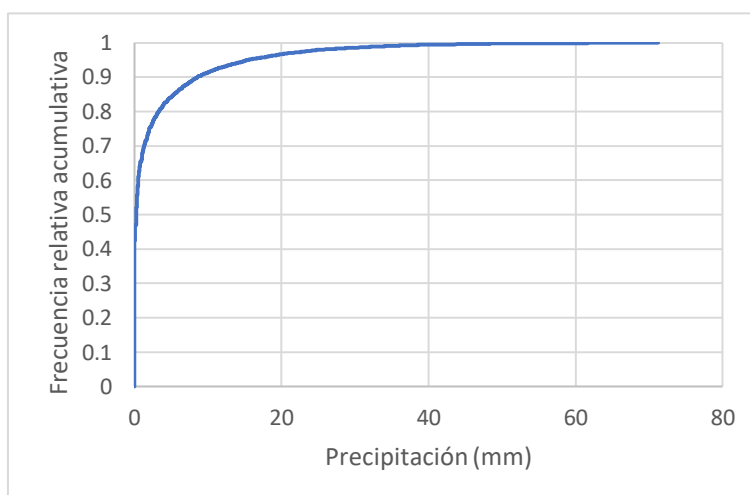


Figura 73 Cuantiles normal San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)

Los resultados obtenidos tras el proceso de imputación simple permitieron construir la serie definitiva para la estación pluviométrica San Antonio del Prado (2701038), a partir de esta se estudió si se presentaban variaciones en la media histórica de precipitación. En la Figura 74 se evidencia un aumento en la precipitación media diaria a partir del 26 de marzo de 1998 de 5.47 mm a 7.75 mm.

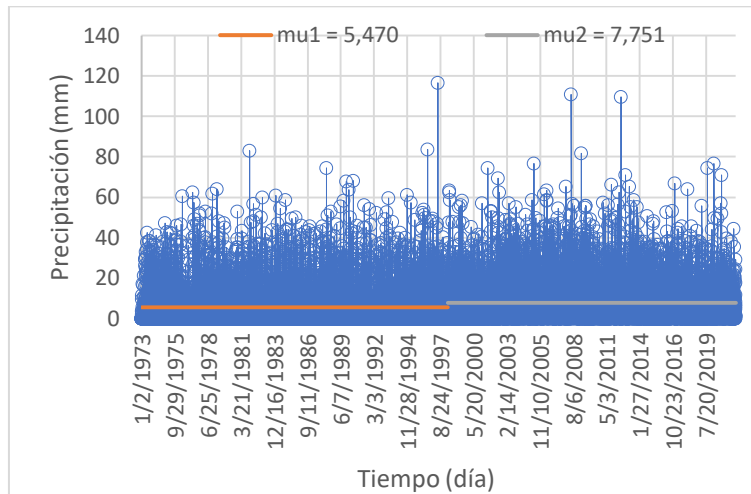


Figura 74 Análisis de tendencia diario San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)

De este modo, en la escala mensual se puede observar que, tras realizar el análisis comparativo entre el periodo histórico y los últimos 10 años de registro, en todos los meses se incrementa la precipitación total. Además, se reconoció la presencia de un régimen bimodal, el cual cuenta con picos en los meses de marzo a junio y agosto a noviembre, los meses de enero, julio y diciembre son periodos de recesión de las lluvias (Ver Figura 75).

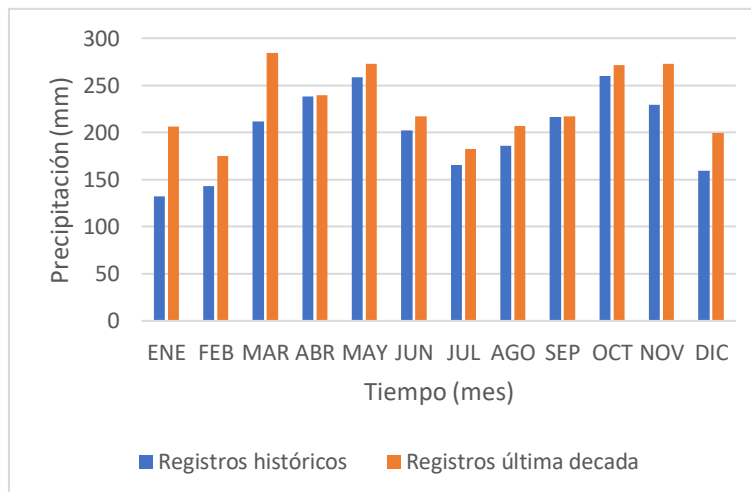


Figura 75 Precipitación mensual San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)

Una vez realizado el análisis a escala mensual se procedió a estimar las posibles variaciones de la precipitación total multianual. En la Figura 76 se puede observar que desde el año 1999 se presentó un aumento en la media de 2013 mm a 2835 mm en la escala anual.

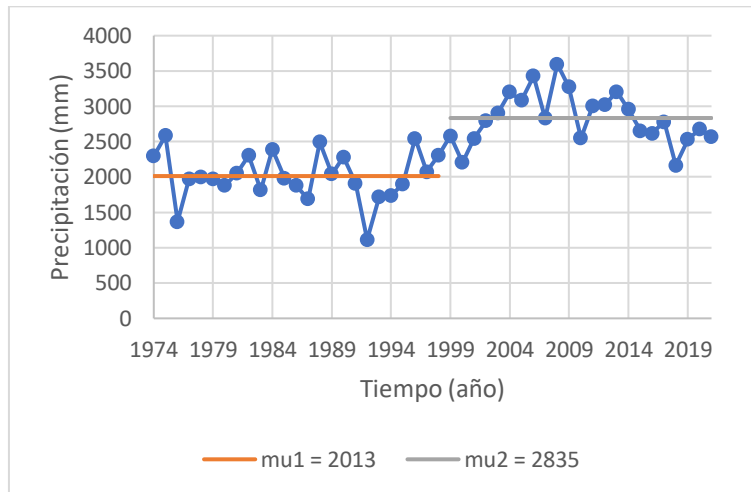


Figura 76 Precipitación anual San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)

En el caso de la precipitación máxima en 24 horas, en la escala mensual se determinó que este parámetro cuenta con un comportamiento similar al de la precipitación total al alcanzar sus picos en los meses de marzo y noviembre. Respecto al análisis comparativo entre el periodo histórico y los últimos 10 años, se determinó que no se evidencia una tendencia clara que defina un aumento en la intensidad de las lluvias para la estación pluviométrica San Antonio del Prado (2701038) (Ver Figura 77).

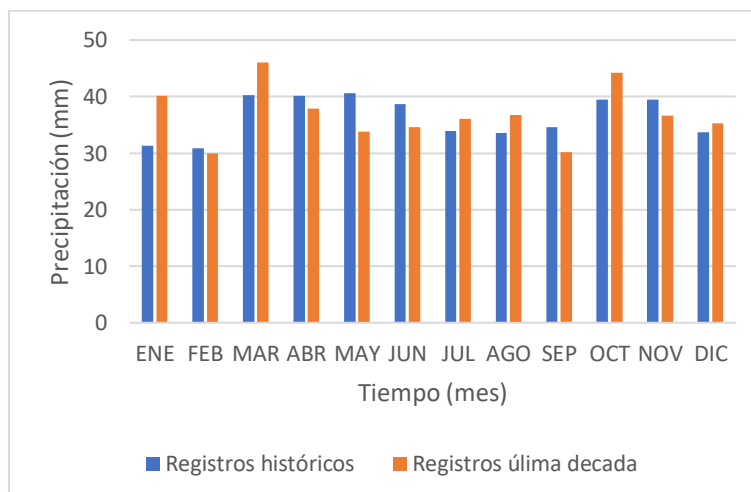


Figura 77 Precipitación máxima en 24 horas mensual San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)

Asimismo, se desarrolló el análisis para la escala anual, en cual el promedio histórico corresponde a 63.63 mm. Además, no se identificó variaciones en este valor promedio para el periodo estudiado (1973 a 2021), por lo cual se puede establecer que no se evidencian aumentos aparentes en la intensidad de las lluvias (Ver Figura 78).

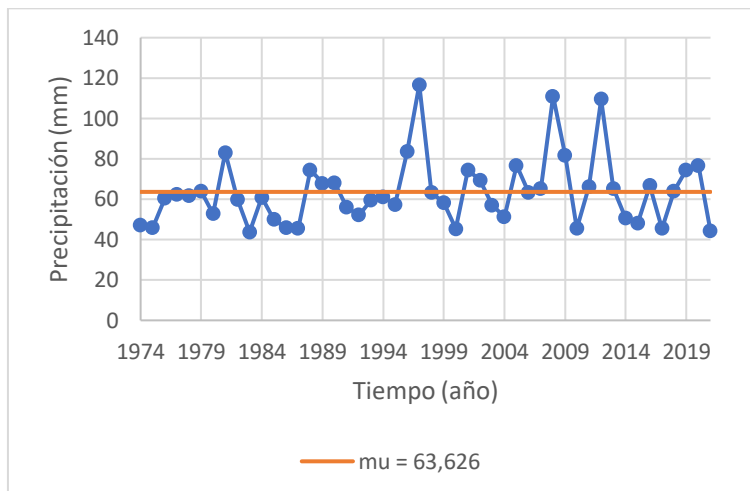


Figura 78 Precipitación máxima en 24 horas anual San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)

Para el número de días con lluvia por mes se estableció que en los últimos 10 años el promedio aumento para todos los meses en comparación con el periodo histórico, de este modo fue posible identificar que la frecuencia de las lluvias para los registros de la estación pluviométrica San Antonio del Prado (2701038) han aumentado (Ver Figura 79).

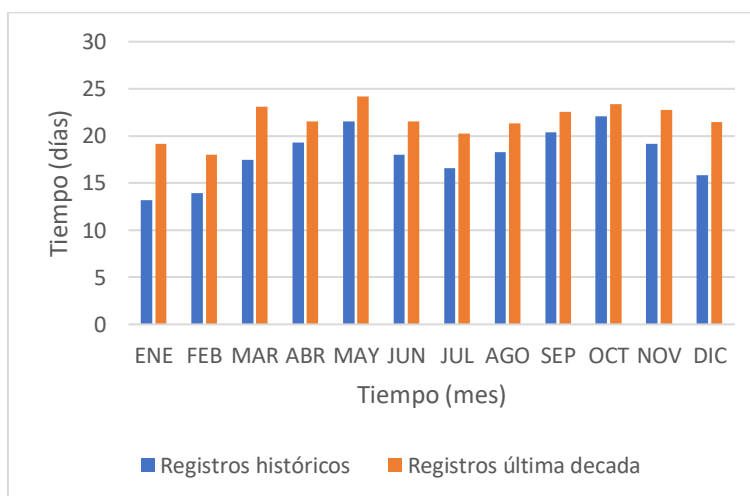


Figura 79 Número de días con lluvia mensual San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)

En la escala multianual para el número de días con lluvia o frecuencia, para el año 2000 se determinó un aumento de 179 a 261 días por año, tal como se puede observar en la Figura 80.

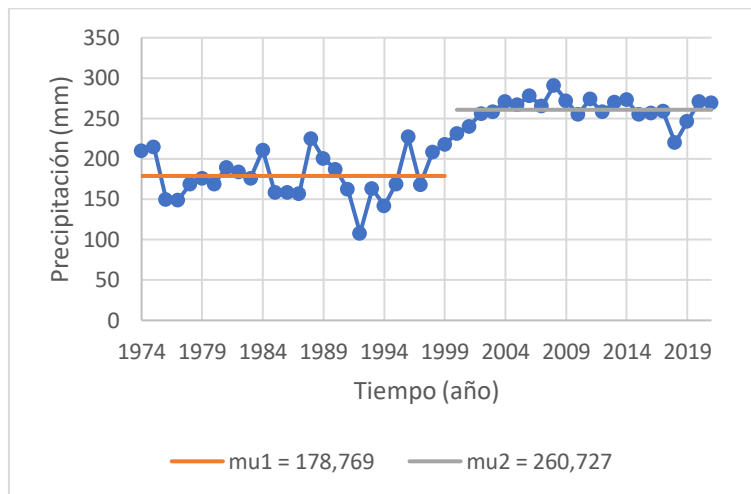


Figura 80 Número de días con lluvia anual San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)

El último análisis realizado corresponde al estudio de la precipitación acumulada, este se realizó con el fin de verificar si se presenta un aumento en la pendiente que determine un incremento en la precipitación total de la última década, de este modo en la Figura 81 se puede observar que para la estación pluviométrica San Antonio del Prado (2701038) la pendiente aumentó de 6.07 a 7.35.

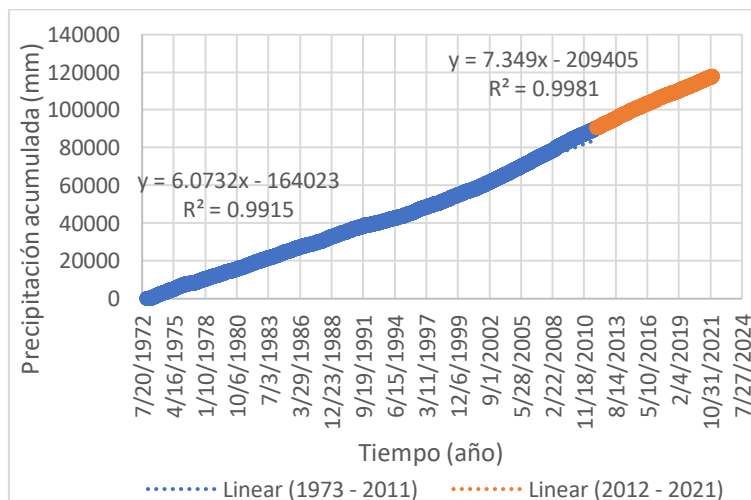


Figura 81 Precipitación acumulada San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)

6.2 Generación de curvas IDF y hietogramas actuales

Para la generación de las curvas IDF actuales se utilizó la información reportada por las distintas entidades con jurisdicción sobre las estaciones meteorológicas estudiadas, por lo cual el apartado actual corresponde a información secundaria compartida directamente por estas entidades (Ver Anexo 2 Curvas IDF).



6.2.1 Cuenca Salitre - Molinos

6.2.1.1 Usaquén – Santa Ana (2120111)

En la estación Usaquén – Santa Ana (2120111) se determinaron las curvas IDF, las cuales son presentadas en la Figura 82 y en la cuales se incluyen los periodos de retorno correspondientes a 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años y duraciones desde los 0 a los 180 minutos.

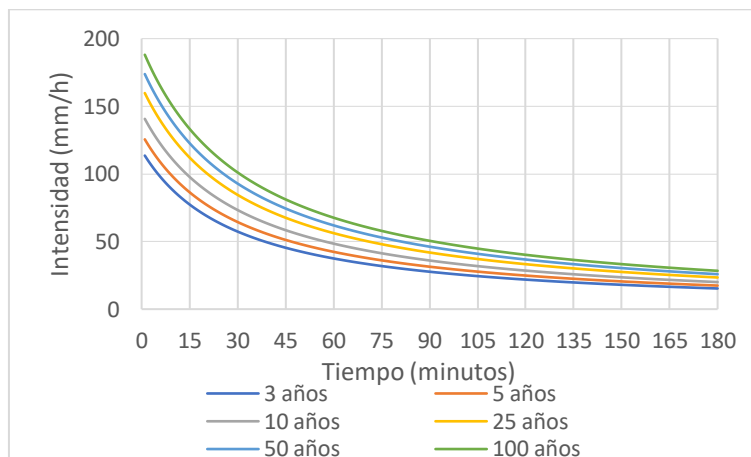


Figura 82 Curvas IDF Usaquén – Santa Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)

Los coeficientes correspondientes al cálculo de la curva IDF de la estación Usaquén – Santa Ana (2120111) están determinados por la Ecuación 6.

$$I = C1 * (D + X_0)^{C2}$$

Ecuación 6

Donde

$C1$, $C2$ y X_0 : coeficientes de las curvas IDF.

D : duración. (min)

A partir de la expresión anteriormente descrita se identificó el valor de los coeficientes de acuerdo con cada periodo de retorno para la estación Usaquén – Santa Ana (2120111), los cuales son presentados en la Tabla 10.

Tabla 10 Coeficientes curvas IDF Usaquén – Santa Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)

Periodo de retorno	C1	X ₀	C2
3 años	4719.53	31.5	-107.069
5 años	5310.59	32.4	-1.06737
10 años	6266.11	33.6	-1.07127
25 años	7272.48	34.6	-1.06885
50 años	8318.7	35.6	-1.07454



Periodo de retorno	C1	Xo	C2
100 años	8974.14	35.9	-1.0712

A partir de la información relacionada en la Figura 82 se construyeron los hietogramas de diseño correspondientes al escenario actual para los periodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años, tal como se puede observar en la Figura 83.

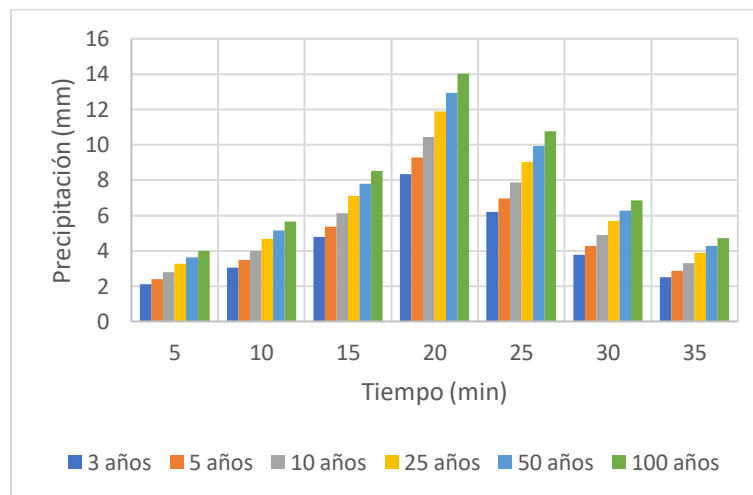


Figura 83 Hietograma Usaquén – Santa Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)

6.2.1.2 Emmanuel D Alzón (2120123)

En la Figura 84 se presentan las curvas IDF para la estación meteorológica Emmanuel D Alzón (2120123), en la cual se incluyen los periodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años para eventos con duraciones entre 0 y 180 minutos.

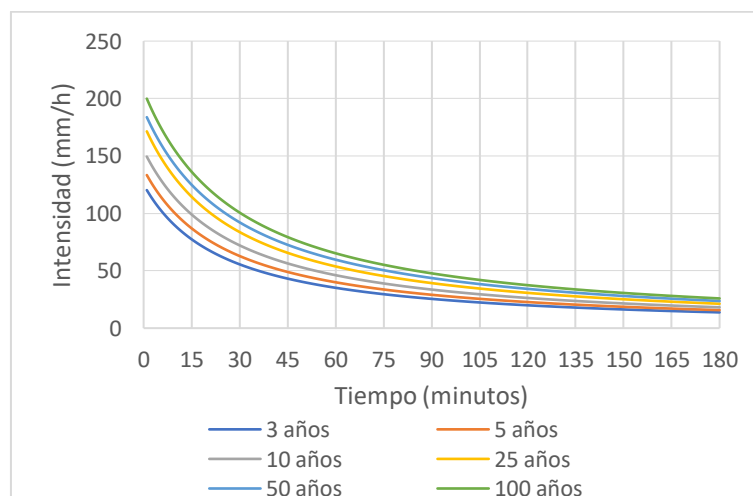


Figura 84 Curvas IDF Emmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)

Los coeficientes con los cuales se construyó la curva IDF de la estación Emmanuel D Alzón (2120123) son los que se encuentran descritos por la Ecuación 6.



En función de la ecuación relacionada anteriormente se establecieron los coeficientes para distintos periodos de retorno para la curva IDF de la estación Enmanuel D Alzón (2120123), los cuales corresponden a la información de la Tabla 11.

Tabla 11 Coeficientes curvas IDF Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)

Periodo de retorno	C1	Xo	C2
3 años	4418.79	26.9	-1.08285
5 años	5162.41	28	-1.08588
10 años	6518.82	29.9	-1.10064
25 años	7673.92	30.6	-1.10095
50 años	9286.39	32.8	-1.11431
100 años	10351.8	33.2	-1.11751

De acuerdo con la información presentada en la Figura 84 se construyó el hietograma de diseño correspondiente, en el cual se incluyen los periodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años (Ver Figura 85).

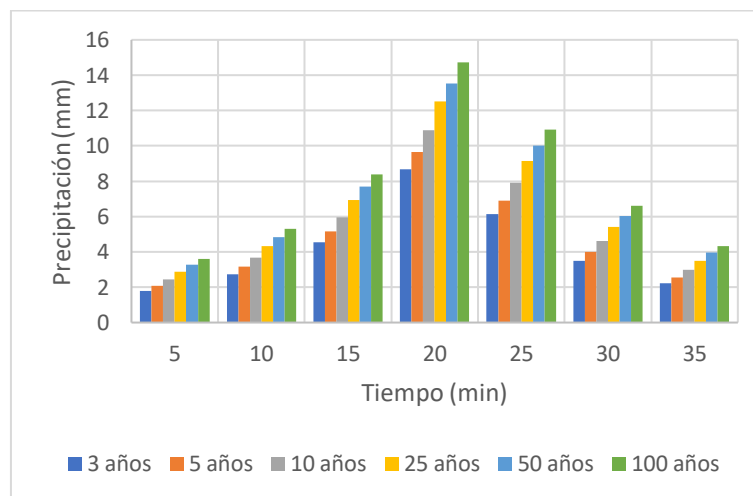


Figura 85 Hietograma Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)

6.2.2 Cuenca La Tinajas

6.2.2.1 Pedregal (2701481)

Para la estación meteorológica Pedregal (2701481) se presentan las curvas IDF en la Figura 86 para los periodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Asimismo, se incluyen duraciones desde los 0 a los 180 minutos.

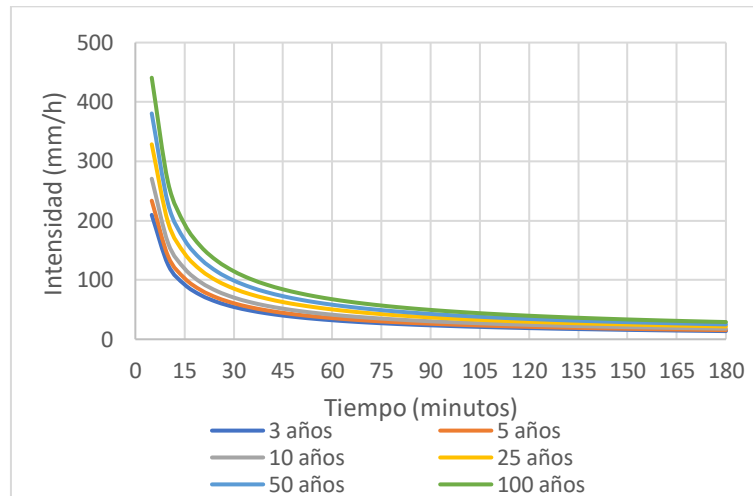


Figura 86 Curvas IDF Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)

En cuanto a los coeficientes de la curva IDF de la estación Pedregal (2701481) corresponden a los que hacen parte de la Ecuación 7.

$$I = \frac{K}{(c \cdot D)^n}$$

Ecuación 7

Donde

K , c y n : coeficientes de las curvas IDF.

D : duración. (min)

De acuerdo con la expresión anterior, los valores correspondientes a los coeficientes para diferentes tiempos de retorno de la estación Pedregal (2701481) son los presentados en la Tabla 12.

Tabla 12 Coeficientes curvas IDF Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)

Periodo de retorno	K	n	c
3 años	637.53	0.76	0.25
5 años	842.31	0.77	0.25
10 años	1009.33	0.77	0.25
25 años	1220.51	0.77	0.25
50 años	1377.26	0.77	0.25
100 años	1532.89	0.77	0.25

En función de lo relacionado en la Figura 86 se calcularon los hietogramas para los periodos de retorno de 3, 5, 10, 25 y 100 años, los cuales se presentan en la Figura 87.

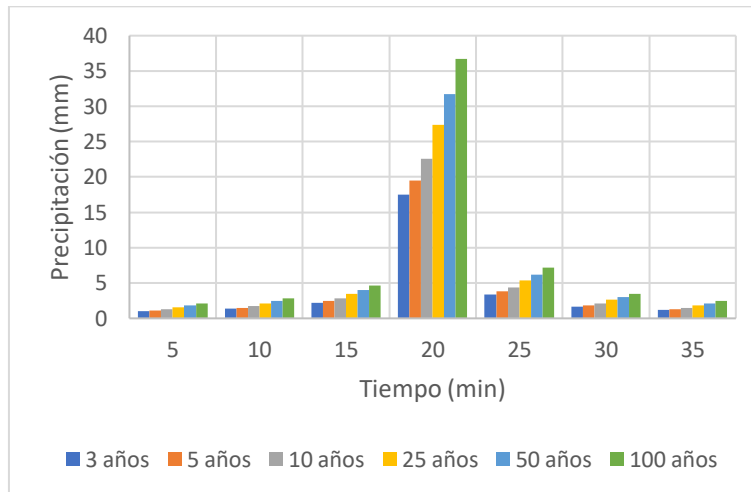


Figura 87 Hietograma Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)

6.2.3 Cuenca La Doctora

En la cuenca pluvial La Doctora se evaluaron las estaciones pluviométricas Ayurá (2701093) y San Antonio del Prado (2701038), en las cuales se establecieron las curvas IDF actuales a partir de la información suministrada por EPM (2022).

6.2.3.1 Ayurá (2701093)

Las curvas IDF asociadas a la estación Ayurá (2701093) corresponden a las relacionadas en la Figura 88, las cuales se encuentran desarrolladas para los periodos de retorno 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años para eventos con duraciones de 0 a 180 minutos

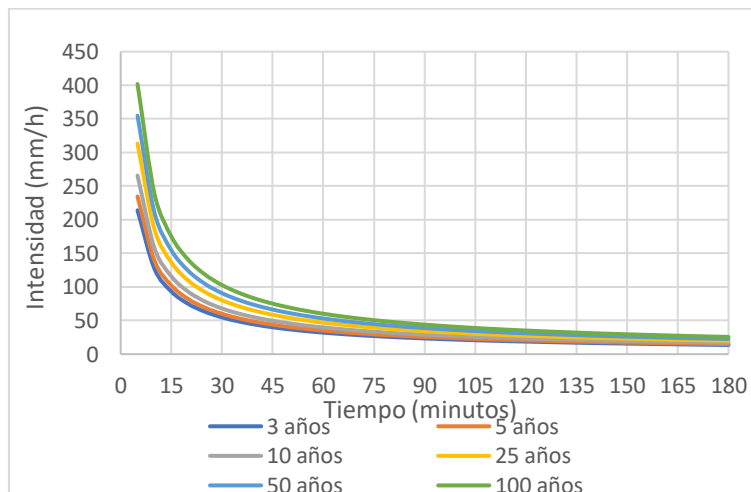


Figura 88 Curvas IDF Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)

Los coeficientes para los periodos de retorno estudiados se presentan en la Tabla 13 y corresponden a los presentados en la Ecuación 7.



Tabla 13 Coeficientes curvas IDF Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)

Periodo de retorno	K	n	c
3 años	623.94	0.75	0.25
5 años	824.1	0.77	0.25
10 años	989.1	0.78	0.25
25 años	1199.22	0.78	0.25
50 años	1355.91	0.79	0.25
100 años	1511.95	0.79	0.25

Asimismo, se desarrollaron los hietogramas de diseño a partir de los datos presentados en la Figura 88 para la estación pluviométrica Ayurá (2701093) (Ver Figura 89).

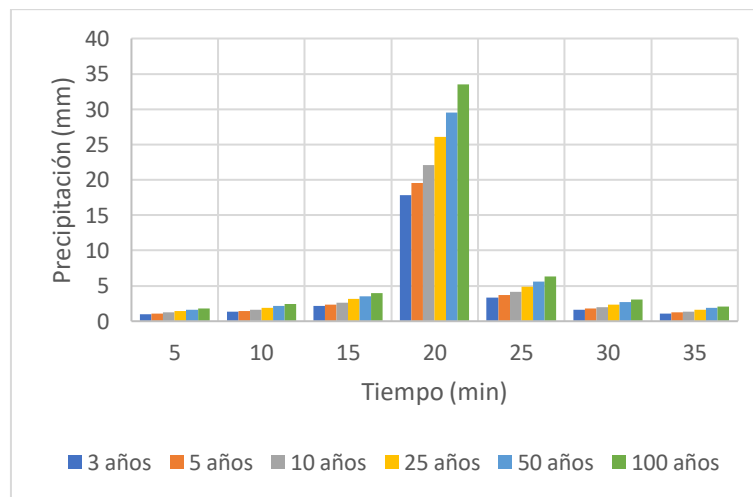


Figura 89 Hietograma Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)

6.2.3.2 San Antonio del Prado (2701038)

Para la estación pluviométrica San Antonio del Prado (2701038) se definieron las curvas IDF para los periodos de retorno 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años para eventos con duraciones de 0 a 180 minutos, tal como se presenta en la Figura 90.

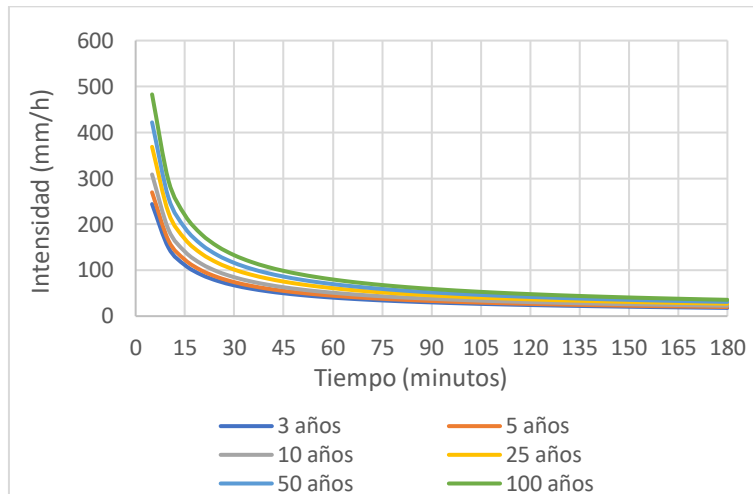


Figura 90 Curvas IDF San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)

En la Tabla 14 se relacionan los coeficientes relacionados con el cálculo de la curva IDF de la estación San Antonio del Prado (2701038), los cuales son insumo de la Ecuación 7.

Tabla 14 Coeficientes curvas IDF San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)

Periodo de retorno	K	n	c
3 años	731.56	0.73	0.25
5 años	927.01	0.74	0.25
10 años	1086.31	0.74	0.25
25 años	1287.67	0.74	0.25
50 años	1437.1	0.74	0.25
100 años	1585.44	0.74	0.25

Del mismo modo, se desarrollaron los hietogramas asociados a las temporalidades de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años para la estación pluviométrica San Antonio del Prado (2701038), tal como se presenta en la Figura 91.

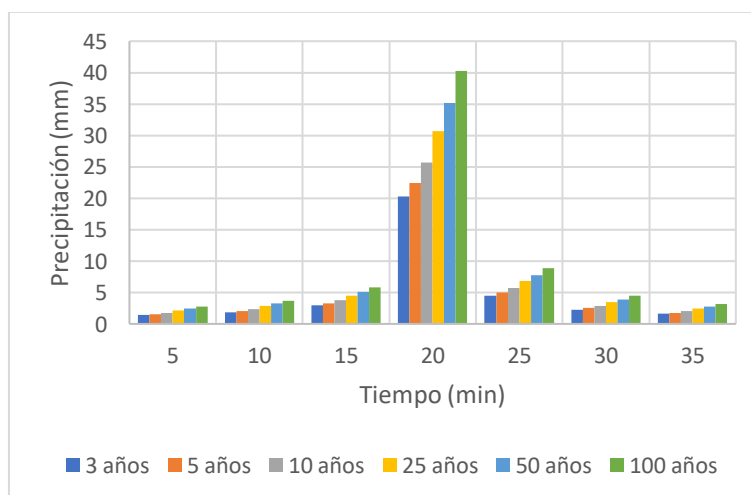




Figura 91 Hietograma San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)

6.3 Pruebas con las metodologías de Pulgarín y CIACUA

Con el fin de verificar la pertinencia de las dos metodologías propuestas (Pulgarín y CIACUA) para la construcción de las curvas IDF afectadas por el Cambio Climático se desarrollaron los análisis correspondientes para cada caso de estudio utilizando los registros históricos de cada estación pluviométrica (Ver Anexo 3 Prueba IDF).

6.3.1 Cuenca Salitre – Molinos

Para la cuenca pluvial Salitre – Molinos se implementaron las metodologías de cálculo de curvas IDF de Pulgarín y CIACUA para los registros históricos de las estaciones pluviométricas Usaquén – Santa Ana (2120111) y Enmanuel D Alzón (2120123) para periodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años y duraciones de 5 a 180 minutos.

De este modo fue posible determinar que para este caso de estudio el método de Pulgarín maximiza las intensidades de la precipitación para duraciones cortas (5 a 10 min), sin embargo, a medida que aumenta la duración de los eventos, las curvas IDF se ajustan de mejor forma a la información de las curvas IDF actuales, tal como puede observarse en la Figura 92 y Figura 93.

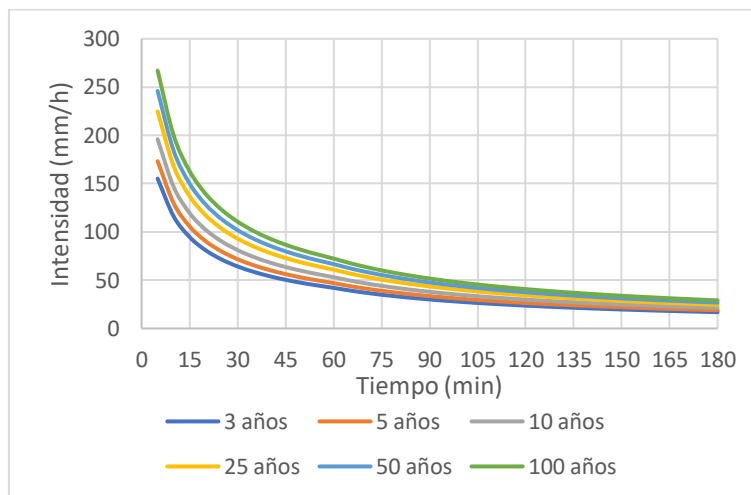


Figura 92 Curvas IDF Pulgarín Usaquén - Santa Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)

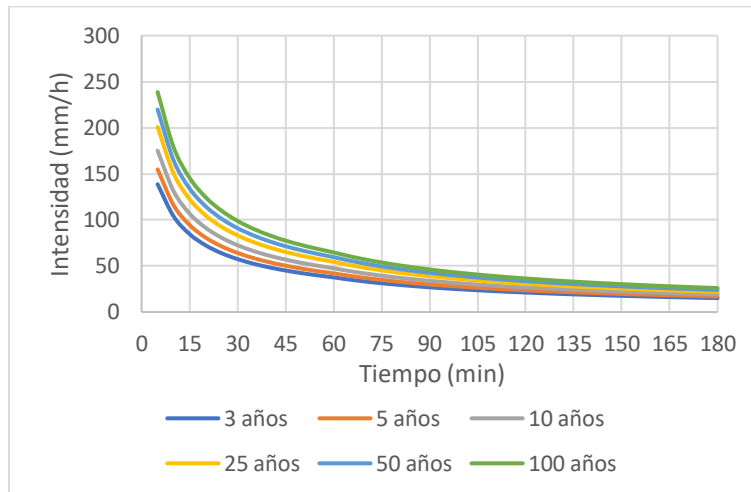


Figura 93 Curvas IDF Pulgarín Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM, (2022)

Asimismo, se desarrolló el mismo ejercicio implementando en esta ocasión la metodología CIACUA, mediante este método se evidenció que para este caso de estudio las curvas IDF son menos cóncavas. No obstante, la intensidad determinada bajo esta metodología es igualmente superior en comparación las generadas por la EAAB e IDEAM (Ver Figura 94 y Figura 95).

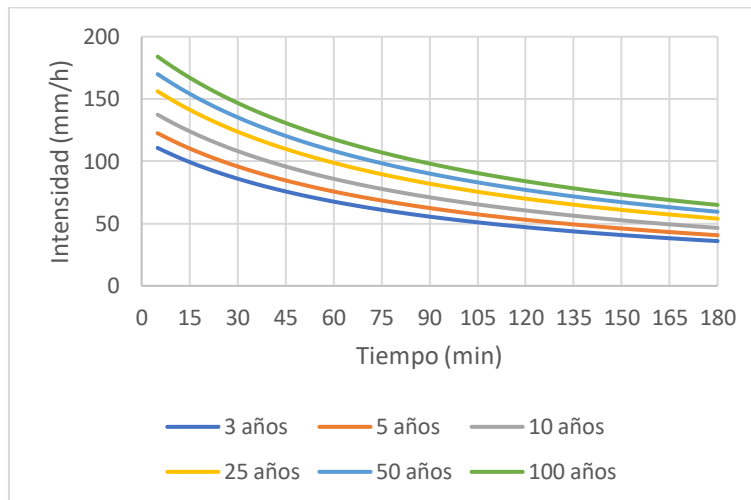


Figura 94 Curvas IDF CIACUA Usaquén - San Ana (2120111). Tomado y modificado de EAAB (2022)

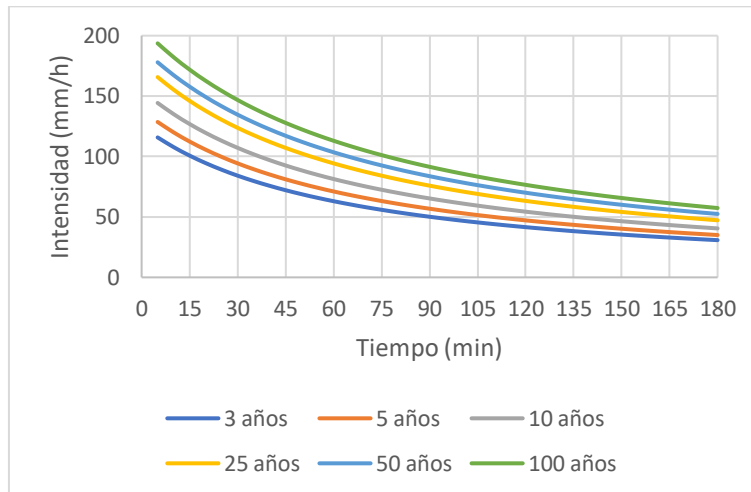


Figura 95 Curvas IDF CIACUA Enmanuel D Alzón (2120123). Tomado y modificado de IDEAM (2022)

6.3.2 Cuenca La Tinajas

En el caso de estudio de la cuenca pluvial La Tinajas también se aplicaron los dos métodos propuestos para la construcción de las curvas IDF. El análisis en mención se desarrolló de acuerdo con los registros históricos de la estación pluviométrica Pedregal (2701481) para los periodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años y duraciones de 5 a 180 minutos.

Para el método de Pulgarín, en la Figura 96 se puede reconocer que las curvas IDF obtenidas son igualmente cóncavas para todos los periodos de retorno en comparación con las construidas por EPM a partir de sus registros históricos. Por otro lado, en este caso de estudio la intensidad para los eventos de precipitación es minimizada para duraciones cortas (5 a 10 minutos), mientras que a medida que aumenta la duración de un evento de precipitación, los valores se asemejan más entre sí.

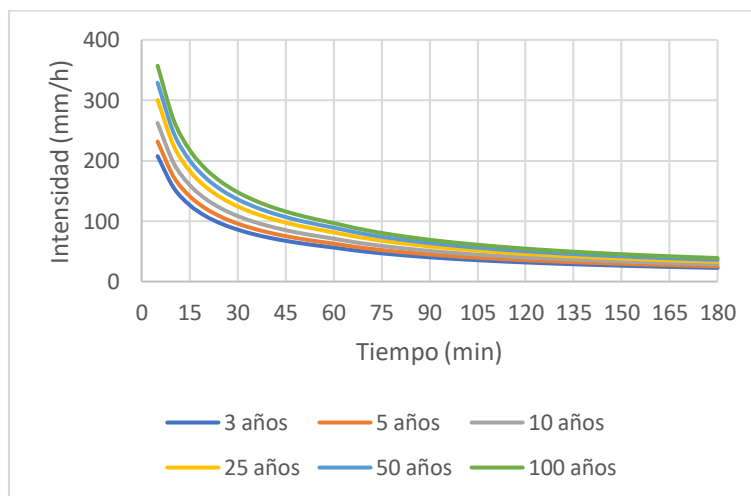


Figura 96 Curvas IDF Pulgarín Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)



Los resultados tras aplicar el método CIACUA permitieron reconocer que las curvas IDF son menos cóncavas respecto a las construidas por EPM. Igualmente, las gráficas desarrolladas a partir de la metodología propuesta por el CIACUA reportan valores ligeramente superiores a los relacionados por EPM, así como se puede observar en la Figura 97.

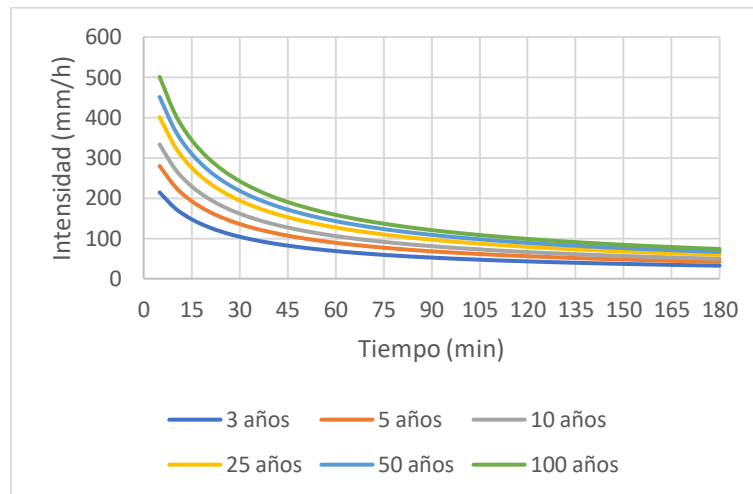


Figura 97 Curvas IDF CIACUA Pedregal (2701481). Tomado y modificado de EPM (2022)

6.3.3 Cuenca La Doctora

De manera similar, para la cuenca pluvial La Doctora se aplicaron las metodologías de Pulgarín y CIACUA para la construcción de curvas IDF, en donde se utilizaron los registros históricos de las estaciones Ayurá (2701093) y San Antonio del Prado (2701038) para realizar dichas gráficas para periodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años y duraciones de 5 a 180 minutos.

Los resultados obtenidos bajo el método de Pulgarín son presentados en la Figura 98 y Figura 99, en donde es posible identificar que las curvas IDF calculadas por este método son un poco menos cóncavas respecto a las desarrolladas por parte de EPM. Además, en este caso de estudio se evidencio que, en general las intensidades son superiores a las registradas por EPM.

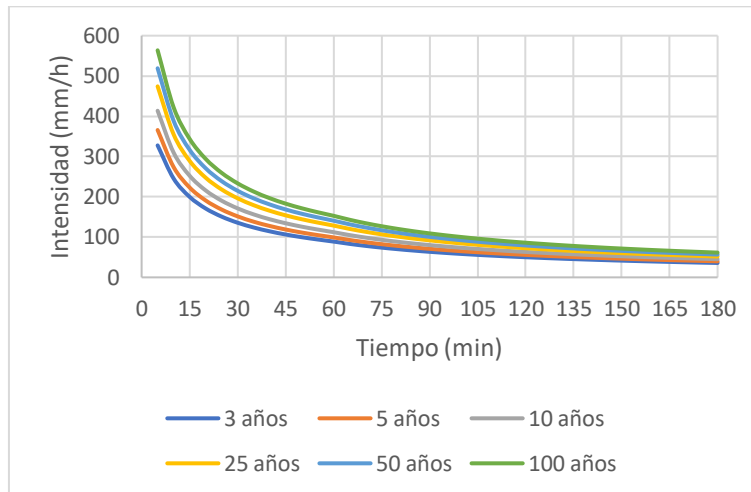


Figura 98 Curvas IDF Pulgarín Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)

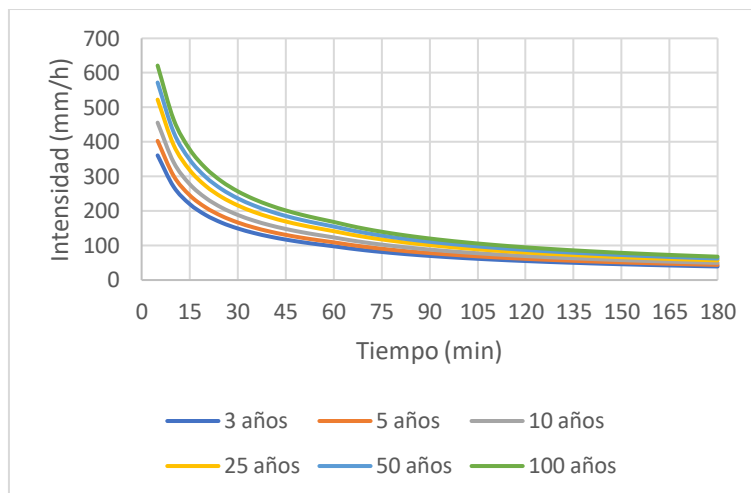


Figura 99 Curvas IDF Pulgarín San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)

Como resultado de la aplicación de la metodología CIACUA, en la Figura 100 y Figura 101 se presentan los análisis desarrollados de acuerdo con los registros históricos de las estaciones pluviométricas estudiadas, de esta forma se determinó que el comportamiento de las curvas IDF calculadas es menos cóncavo en comparación a lo presentado por EPM, en cuanto a los valores de su intensidad, estos son superiores para los eventos de corta duración, mientras que a medida que esta aumenta, las gráficas se asemejan más a lo reportado por EPM.

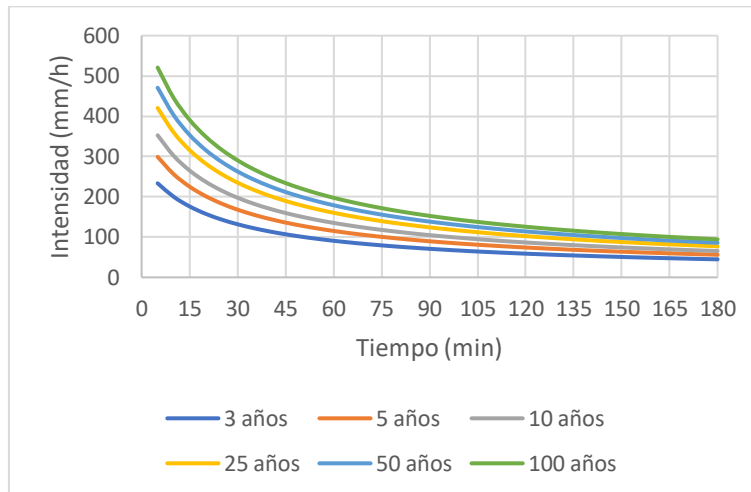


Figura 100 Curvas IDF CIACUA Ayurá (2701093). Tomado y modificado de EPM (2022)

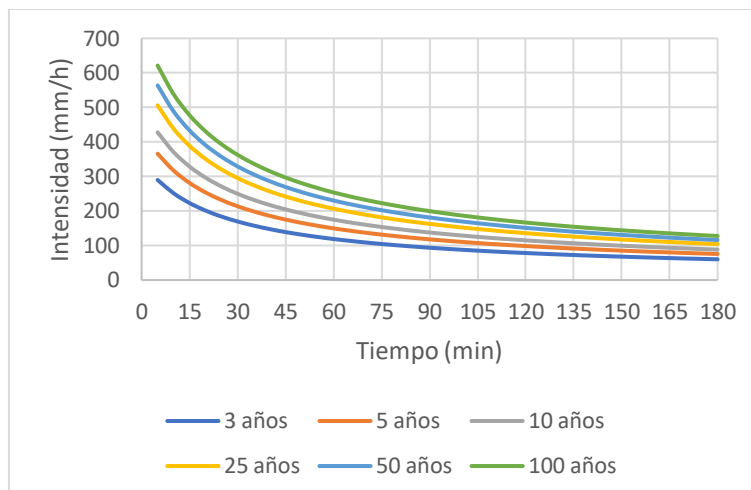


Figura 101 Curvas IDF CIACUA San Antonio del Prado (2701038). Tomado y modificado de EPM (2022)

6.4 Selección de MCG

La selección de los MCG aplicables para cada caso de estudio se realizó según lo especificado en la sección 4.4 Selección de MCG, en donde se aplicaron distintos métodos de calibración, en los cuales se incluyeron el correlación de Pearson, RMSE y BIAS en función de los registros históricos para el periodo que abarcó desde la fecha de instalación de cada estación pluviométrica hasta el año 2014 para las escalas de tiempo mensual y trimestral (Ver Anexo 4 Selección MCG).

En cada caso de estudio se seleccionó la mejor calibración obtenida por cualquiera de los tres métodos, en caso de no identificar mejores resultados de uno respecto a otro, se definieron los MCG a utilizar a partir de una calificación de estos para cada método y una ponderación entre estas calificaciones.



En los casos de estudio que se contaba con más de una estación pluviométrica representativa para una cuenca pluvial se determinó la influencia de cada una de estas sobre el centroide de esta mediante polígonos de Thiessen y así se construyó la serie de precipitación definitiva para estos.

Para comparar las series históricas de cada estación pluviométrica estudiada se descargaron los escenarios base de cada MCG de modo que coincidieran con la temporalidad y localización según el caso de estudio correspondiente. La información fue obtenida a partir de los dispuesto por NASA CENTER FOR CLIMATE SIMULATION (2022).

Una vez definidos lo MCG para cada caso de estudio se procedió a compilar la información para cada caso de estudio en los horizontes de Cambio Climático de SSP 2-4.5 y SSP5-8.5.

6.4.1 Cuenca Salitre – Molinos

Producto del proceso de ponderación los resultados obtenidos para el caso de estudio de la cuenca pluvial Salitre – Molinos para las temporalidades mensual y trimestral, fue posible determinar que los MCG que mejor representan la precipitación base corresponden a GISS-E2-1-G, CMCC-CM2-SR5 y CESM2-WACCM.

6.4.2 Cuenca La Tinajas

En el caso de estudio de la cuenca pluvial La Tinajas en la escala mensual y trimestral el método de calibración que mejor ajusta los resultados obtenidos es el de BIAS, el cual permitió reconocer que los MCG que mejor representan los registros históricos son FGOALS-g3, EC-Earth3, MPI-ESM1-2-HR, KIOST-ESM y TaiESM1.

6.4.3 Cuenca La Doctora

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos para el caso de estudio de la cuenca pluvial La Tinajas y su cercanía a La Doctora se adoptaron los mismos MCG, los cuales incluyen los MCG de FGOALS-g3, EC-Earth3, MPI-ESM1-2-HR, KIOST-ESM y TaiESM1.

6.5 Reducción de escala

De acuerdo con los MCG seleccionados se procedió a realizar el proceso de reducción de escala mediante los métodos relacionados en la sección 4.5 de este informe, en donde se incluyen las propuestas del “Delta Change” y el “Quantile Mapping”, las series utilizadas corresponden a las de los MCG definidos en el numeral anterior según cada caso de estudio y horizonte de Cambio Climático estudiado (SSP2-4.5 y SSP5-8.5) (Ver Anexo 5 Reducción de escala).



Uno de los detalles a considerar es que tras la aplicación del “Quantile Mapping” fue posible determinar que los resultados obtenidos no corresponden a series de precipitación afectadas por el Cambio Climático, en lugar de esto, la información obtenida se ajusta a la tendencia de los datos observados en cada estación pluviométrica estudiada.

6.5.1 Cuenca Salitre – Molinos

Producto de la aplicación del proceso de reducción de escala por el método del “Delta Change” se definieron los factores de cambio para cada MCG a partir de los valores históricos y proyectados de estos, tal como se presenta en la Tabla 15.

Tabla 15 Parámetros para el proceso de reducción de escala “Delta Change” para la Cuenca Salitre – Molinos.

Parámetro	CNRM-ESM2-1	GFDL-CM4-gr2	GISS-E2-1-G
Histórico	2.80	3.20	3.20
Proyectado – SSP2-4.5	4.11	3.77	4.04
Proyectado – SSP5-8.5	4.10	3.52	3.90
FC – SSP2-4.5	1.47	1.18	1.26
FC – SSP5-8.5	1.41	1.10	1.22

Los resultados obtenidos para este método de reducción de escala se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16 Resultados de intensidad media diaria tras el proceso de reducción de escala “Delta Change” para la Cuenca Salitre – Molinos.

Horizonte	CNRM-ESM2-1	GFDL-CM4-gr2	GISS-E2-1-G
SSP2-4.5 - DC	3.95	3.17	3.40
SSP5-8.5 - DC	3.80	2.96	3.28

Por su parte, el método del “Quantile Mapping” como se mencionó anteriormente no reflejó los mejores resultados para la definición de la serie de precipitación afectada por el Cambio Climático, por lo cual para este caso de estudio la metodología propuesta solo incluirá este proceso de reducción de escala hasta esta instancia. En la Tabla 17 se presentan los resultados de tras la aplicación de esta metodología.

Tabla 17 Resultados de intensidad media diaria tras el proceso de reducción de escala “Quantile Mapping” para la Cuenca Salitre – Molinos.

Horizonte	CNRM-ESM2-1	GFDL-CM4-gr2	GISS-E2-1-G
SSP2-4.5 - QM	2.70	2.69	2.69
SSP5-8.5 - QM	2.68	2.70	2.69



6.5.2 Cuenca La Tinajas

Para el método “Delta Change” en el caso de estudio de la cuenca pluvial La Tinajas se establecieron los valores correspondientes al periodo histórico y el proyectado para cada MCG relacionado, con el fin de determinar el valor del factor de cambio para cada uno de estos. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18 Parámetros para el proceso de reducción de escala “Delta Change” para la Cuenca La Tinajas

Parámetro	EC-Earth3	FGOALS-g3	KIOST-ESM	MPI-ESM-1-2-HR	TaiESM1
Histórico	3.87	3.89	3.90	3.87	3.90
Proyectado – SSP2-4.5	8.01	6.60	7.05	6.65	7.25
Proyectado – SSP5-8.5	7.98	6.48	7.11	6.99	7.74
FC – SSP2-4.5	2.07	1.70	1.81	1.72	1.86
FC – SSP5-8.5	2.06	1.66	1.82	1.81	1.98

Una vez definidos los valores del factor de cambio para cada MCG se procedió a determinar el valor de la intensidad media diaria (Ver Tabla 19).

Tabla 19 Resultados de intensidad media diaria tras el proceso de reducción de escala “Delta Change” para la cuenca La Tinajas

Horizonte	EC-Earth3	FGOALS-g3	KIOST-ESM	MPI-ESM-1-2-HR	TaiESM1
SSP2-4.5 - DC	8.03	6.59	7.02	6.67	7.21
SSP5-8.5 - DC	8.00	6.46	7.08	7.01	7.69

Luego de esto, se aplicó la reducción de escala mediante el “Quantile Mapping”, para este caso de estudio tampoco se obtuvieron los resultados esperados debido a que los valores se ajustan a la tendencia de los registros históricos, al igual que en el caso de estudio anterior no se continuó con el cálculo de los hietogramas de diseño desde la información obtenida por esta propuesta. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20 Resultados de intensidad media diaria tras el proceso de reducción de escala “Quantile Mapping” para la Cuenca La Tinajas

Horizonte	EC-Earth3	FGOALS-g3	KIOST-ESM	MPI-ESM-1-2-HR	TaiESM1
SSP2-4.5 - QM	3.88	3.89	3.92	3.89	3.88
SSP5-8.5 - QM	3.88	3.89	3.91	3.89	3.90



6.5.3 Cuenca La Doctora

Para el último caso de estudio, al igual que en los casos anteriores se aplicaron los dos métodos de reducción de escala del “Delta Change” y el “Quantile Mapping” para los MCG anteriormente establecidos. Para la primera propuesta los valores definidos como históricos y proyectas, que permiten calcular el factor de cambio son relacionados en la Tabla 21.

Tabla 21 Parámetros para el proceso de reducción de escala “Delta Change” para la Cuenca La Doctora

Parámetro	EC-Earth3	FGOALS-g3	KIOST-ESM	MPI-ESM-1-2-HR	TaiESM1
Histórico	3.87	3.89	3.90	3.87	3.90
Proyectado – SSP2-4.5	8.01	6.60	7.05	6.65	7.25
Proyectado – SSP5-8.5	7.98	6.48	7.11	6.99	7.74
FC – SSP2-4.5	2.07	1.70	1.81	1.72	1.86
FC – SSP5-8.5	2.06	1.66	1.82	1.81	1.98

A partir de los factores de cambio presentados en la Tabla 21 se calculó el valor de la intensidad media diaria de acuerdo con la metodología del “Delta Change” (Ver Tabla 22).

Tabla 22 Resultados de intensidad media diaria tras el proceso de reducción de escala “Delta Change” para la Cuenca La Doctora

Horizonte	EC-Earth3	FGOALS-g3	KIOST-ESM	MPI-ESM-1-2-HR	TaiESM1
SSP2-4.5 - DC	12.38	10.15	10.82	10.28	11.11
SSP5-8.5 - DC	12.33	9.96	10.92	10.81	11.86

Para este caso de estudio, en la segunda metodología de reducción de escala, al igual que en las dos cuencas pluviales relacionadas anteriormente los valores de intensidad media diaria no corresponden a resultados que permitieran establecer una variación en la precipitación, en lugar de esto, la serie buscó ajustarse a los registros observados en las estaciones pluviométricas estudiadas, por tanto, estos fueron descartados y no se incluyó esta información como parte del análisis (Ver Tabla 23).

Tabla 23 Resultados de intensidad media diaria tras el proceso de reducción de escala “Quantile Mapping” para la Cuenca La Doctora

Horizonte	EC-Earth3	FGOALS-g3	KIOST-ESM	MPI-ESM-1-2-HR	TaiESM1
SSP2-4.5 - QM	5.99	5.99	6.00	5.99	5.99
SSP5-8.5 - QM	5.99	5.98	5.99	5.99	6.01



6.6 Generación de curvas IDF en perspectiva del Cambio Climático

Los resultados de las curvas IDF afectadas por el Cambio Climático corresponden a los análisis realizados para los dos horizontes evaluados, es decir, el SSP2-4.5 y el SSP5-8.5, y bajo las metodologías de construcción de curvas IDF relacionadas en la sección 4.6 Generación de curvas IDF en perspectiva del Cambio Climático, esto se desarrolló para los tres casos de estudio abordados en el presente informe en los periodos de retorno de 3, 5, 10, 25, 50 y 100 años y duraciones entre 5 y 180 minutos (Ver Anexo 6 Generación de curvas IDF Cambio Climático).

Para revisar la magnitud los resultados obtenidos bajo las distintas metodologías aplicadas y para los múltiples MCG estudiados, se definió como punto de comparación las intensidades resultantes el periodo de retorno de 100 años y la duración de 5 minutos debido a que estos corresponden al registro generado con mayor valor en todas las curvas IDF.

6.6.1 Cuenca Salitre – Molinos

A partir de la aplicación de las metodologías de Pulgarín y CIACUA para la construcción de las curvas IDF se determinaron las variaciones en estas, las cuales son producto de los efectos del Cambio Climático. En el caso de estudio de la cuenca pluvial Salitre – Molinos se desarrollaron dos escenarios, correspondientes al SSP2-4.5 y SSP5-8.5.

En consecuencia, en la Figura 102 a Figura 104 se presentan los resultados alcanzados para los MCG CNRM-ESM2-1, GFDL-CM4-gr2, GISS-E2-1-G aplicando el método de Pulgarín. En este caso, para CNRM-ESM2-1 en el escenario SSP2-4.5 se obtuvieron las mayores intensidades, alcanzando valores de hasta 372.84 mm/h para un periodo de retorno de 100 años y una duración de 5 minutos, lo anterior puede deberse a que el valor a escala diaria de este parámetro fue mayor (3.95 mm) en comparación a los otros dos MCG, en donde el valor asociado fue de 3.17 mm y 3.40 mm respectivamente.

Para el método CIACUA, los valores de intensidad son menores en todos los casos para eventos de muy corta duración (5 a 10 minutos), es decir, en comparación con el mismo periodo de retorno, duración y MCG respecto a la propuesta de Pulgarín, llegando a valores de intensidad de 193.38 mm/h para un periodo de retorno de 100 años y una duración de 5 minutos para el MCG CNRM-ESM2-1 en el horizonte del SSP2-4.5. Del mismo modo, las curvas IDF resultantes son menos cóncavas que las relacionadas en la Figura 102 a Figura 104, lo cual también puede asociarse directamente a este método de cálculo (Ver Figura 105 a Figura 107).

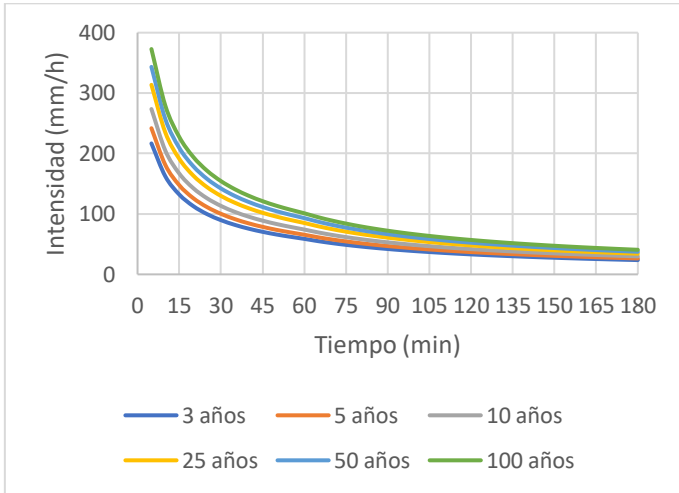


Figura 102 Curvas IDF Pulgarín CNRM-ESM2-1-SSP2-4.5

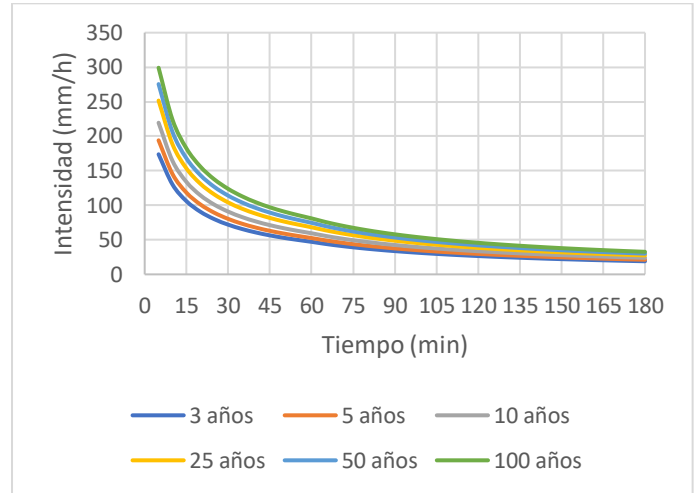


Figura 103 Curvas IDF Pulgarín GFDL-CM4-gr2-SSP2-4.5

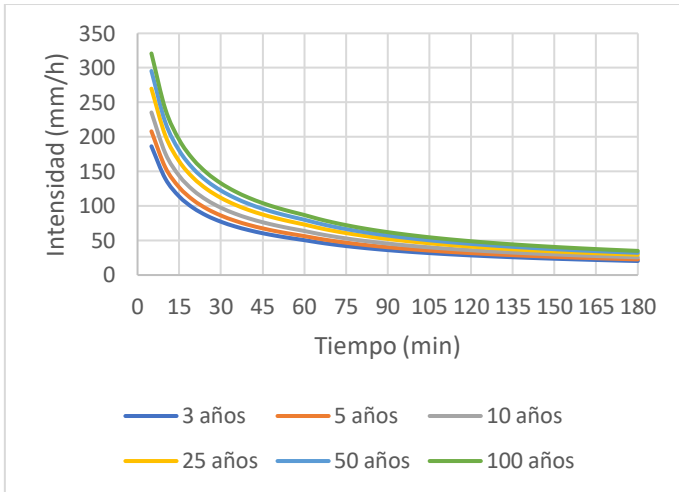


Figura 104 Curvas IDF Pulgarín GISS-E2-1-G-SSP2-4.5

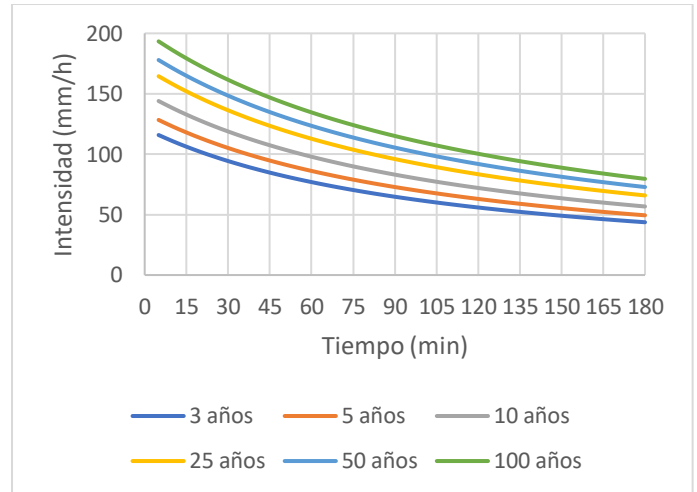


Figura 105 Curvas IDF CIACUA CNRM-ESM2-1-SSP2-4.5

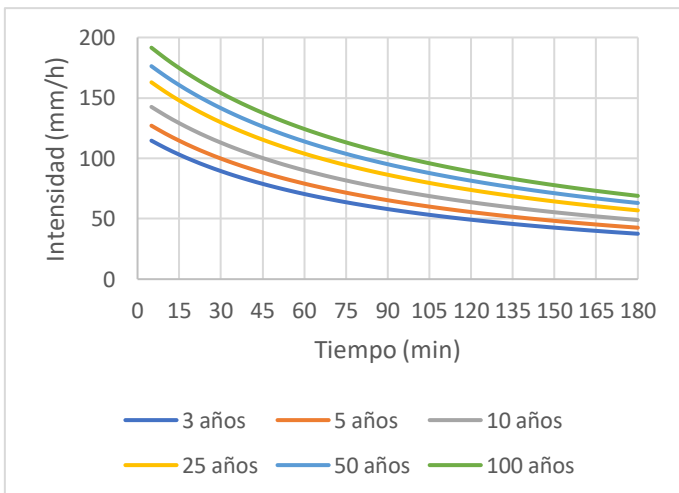


Figura 106 Curvas IDF CIACUA GFDL-CM4-gr2-1-SSP2-4.5

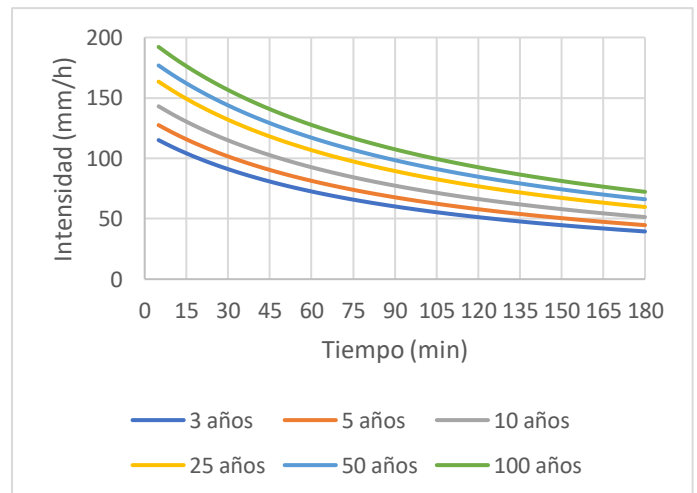


Figura 107 Curvas IDF CIACUA GISS-E2-1-G-SSP2-4.5



Para el SSP5-8.5 se identificó que para todos los MCG los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología de reducción de escala “Delta Change” son menores que en el SSP2-4.5, lo cual es un resultado propio de la proyección desarrollada en cada uno de estos y se traduce en que los valores de las curvas IDF generadas sean inferiores.

En la Figura 108 a Figura 110 se presentan los resultados para el método de Pulgarín, en donde la intensidad máxima alcanzada corresponde a 358.67 mm/h para el periodo de retorno de 100 años y una duración de 5 minutos, para CNRM-ESM2-1, en los otros dos MCG, los resultados obtenidos cuentan con una magnitud inferior debido al valor promedio de la precipitación diaria calculada previamente para cada uno.

En cuanto al método CIACUA, en contraste con el SSP2-4.5 los resultados también son inferiores respecto a la propuesta de Pulgarín para intensidad entre 5 y 10 minutos, mientras que para duraciones mayores todos los valores de intensidad calculada son superiores, lo cual puede encontrarse asociado a la forma de estas curvas (menos cóncavas).

Evaluando las mismas condiciones que se relacionaron previamente (periodo de retorno de 100 años y una duración de 5 minutos) el valor obtenido fue de 193.09 mm/h para el MCG CNRM-ESM2-1. Otra semejanza con el SSP2-4.5 es la forma de las curvas IDF generadas, las cuales son menos cóncavas que las construidas por la metodología de Pulgarín (Ver Figura 111 a Figura 113).

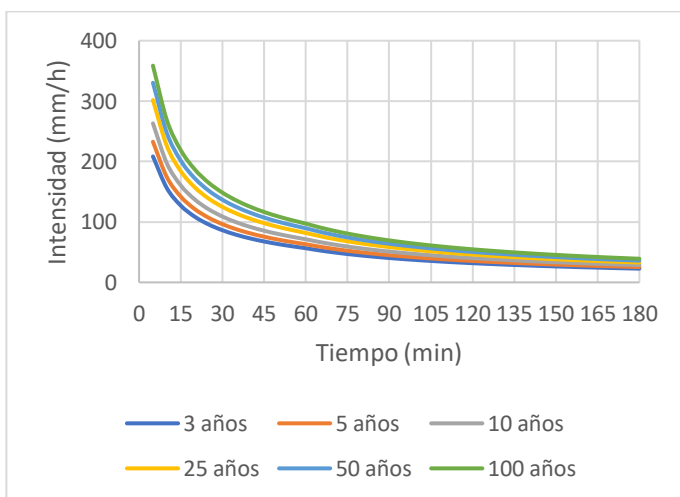


Figura 108 Curvas IDF Pulgarín CNRM-ESM2-1-SSP5-8.5

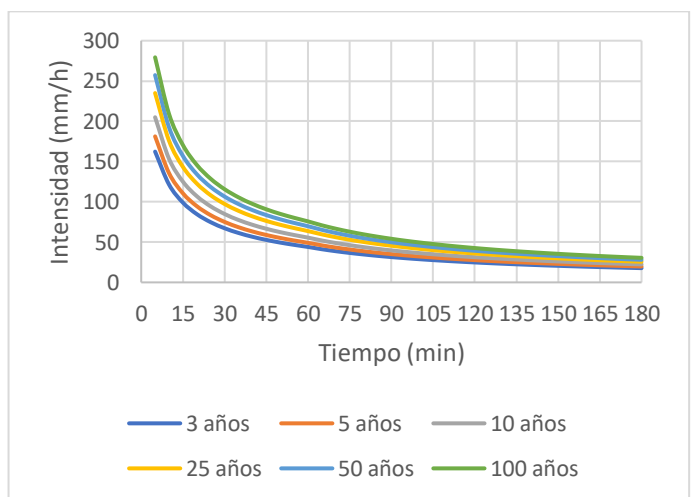


Figura 109 Curvas IDF Pulgarín GFDL-CM4-gr2- SSP5-8.5

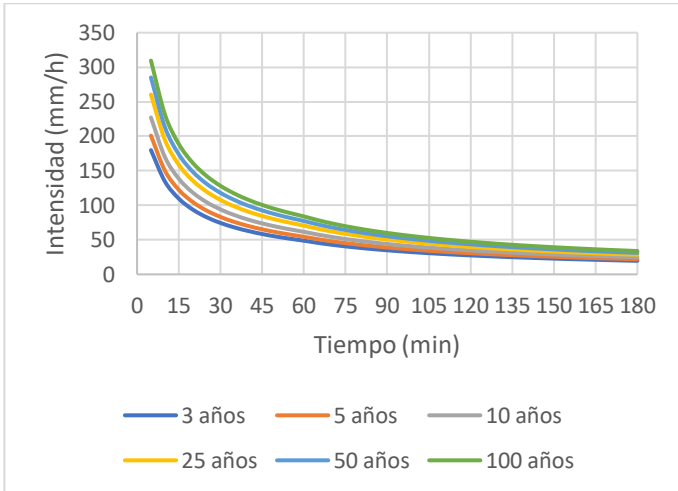


Figura 110 Curvas IDF Pulgarín GISS-E2-1-G-SSP2-4.5

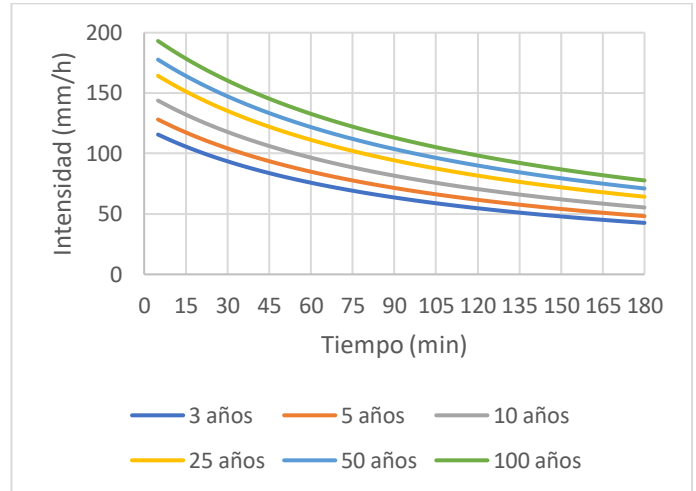


Figura 111 Curvas IDF CIACUA CNRM-ESM2-1 - SSP5-8.5

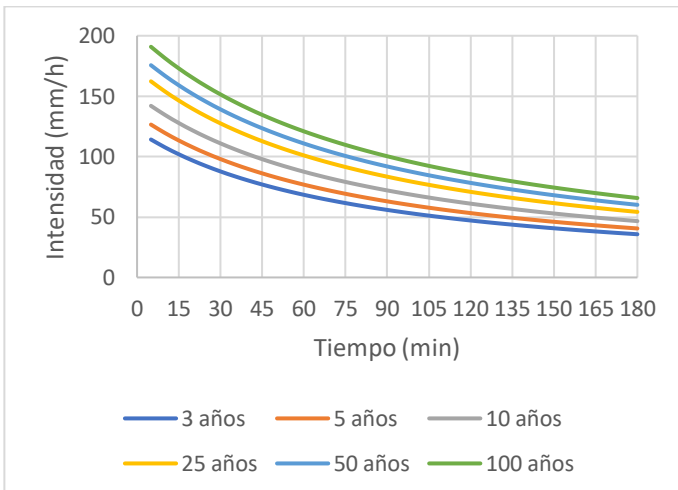


Figura 112 Curvas IDF CIACUA GFDL-CM4-gr2 -1- SSP5-8.5

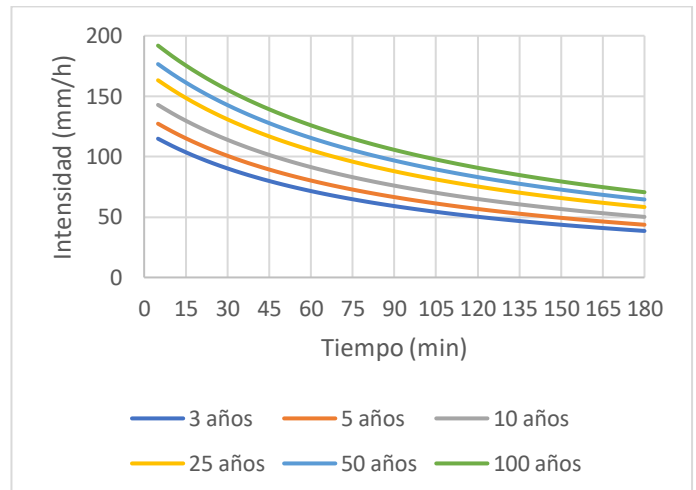


Figura 113 Curvas IDF CIACUA GISS-E2-1-G - SSP5-8.5

6.6.2 Cuenca La Tinajas

En la cuenca pluvial La Tinajas los resultados de las metodologías Pulgarín y CIACUA permitieron identificar variaciones en las curvas IDF en perspectiva del Cambio Climático, para este caso de estudio también se tuvieron en cuenta los escenarios del SSP2-4.5 y el SSP5-8.5.

Los resultados obtenidos para el SSP2-4.5 sugieren que los registros de precipitación media diaria proyectada se encuentran entre 8.03 mm para EC-Earth3 y 6.59 mm para FGOALS-g3, lo cual puede relacionarse con una variación de este parámetro de 1.44 mm entre los cinco modelos estudiados para este caso de estudio.

Como resultado, la intensidad máxima alcanzada en estas curvas IDF para un periodo de retorno de 100 años y una duración de 5 minutos fue de 758.16 mm/h para EC-Earth3 (Ver Figura 114 a Figura 118), mientras que para la metodología CIACUA el valor de la



intensidad para las mismas condiciones fue de 575.89 mm/h para el mismo MCG (Ver Figura 119 a Figura 123).

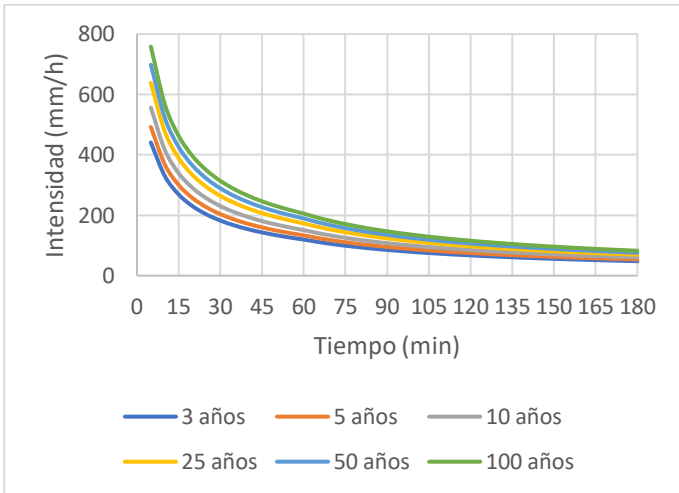


Figura 114 Curvas IDF Pulgarín EC-Earth3-SSP2-4.5

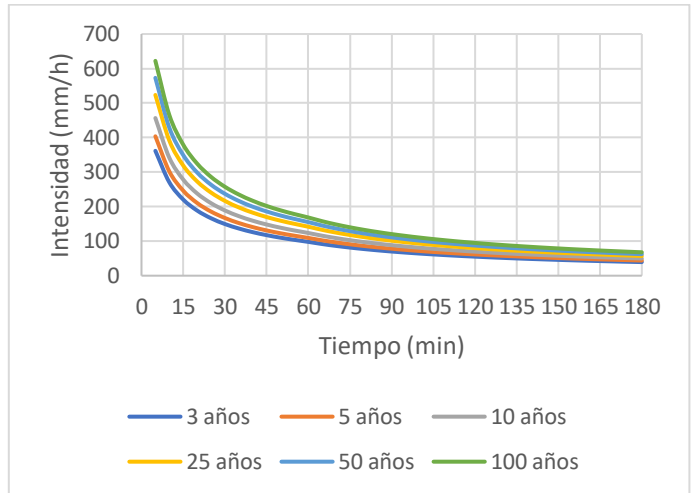


Figura 115 Curvas IDF Pulgarín FGOALS-g3-SSP2-4.5

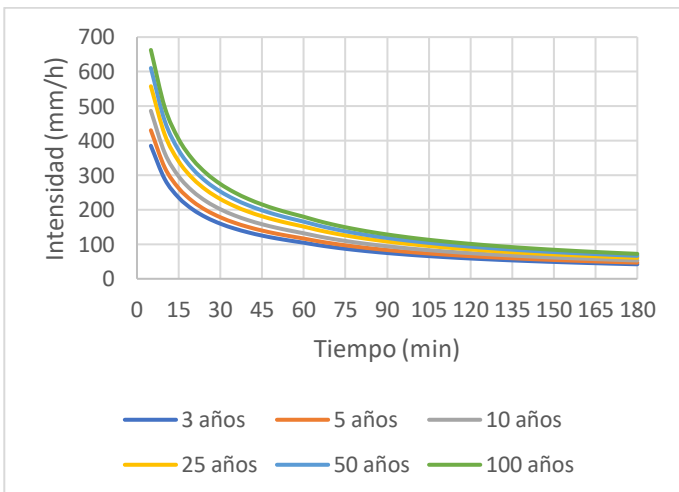


Figura 116 Curvas IDF Pulgarín KIOST-ESM-SSP2-4.5

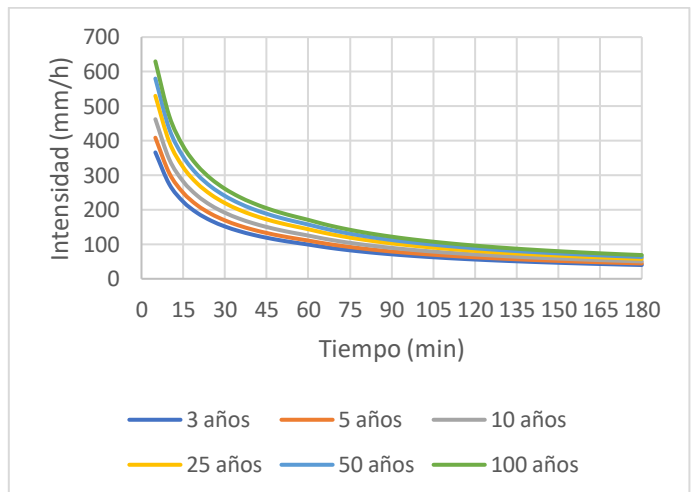


Figura 117 Curvas IDF Pulgarín MPI-ESM-1-2-HR-SSP2-4.5

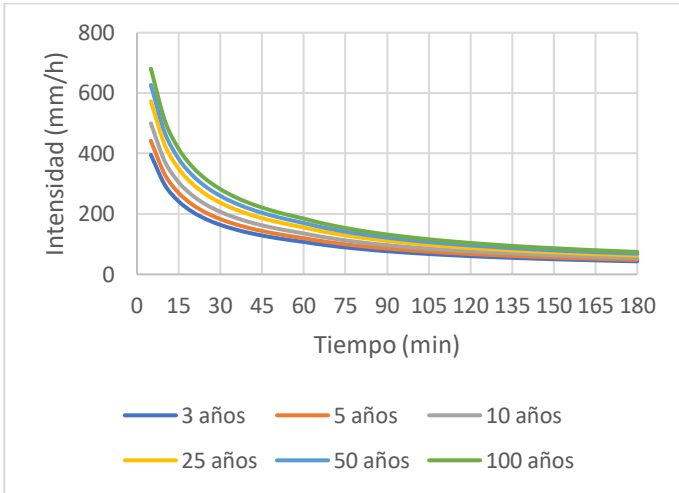


Figura 118 Curvas IDF Pulgarín TaiESM1-SSP2-4.5

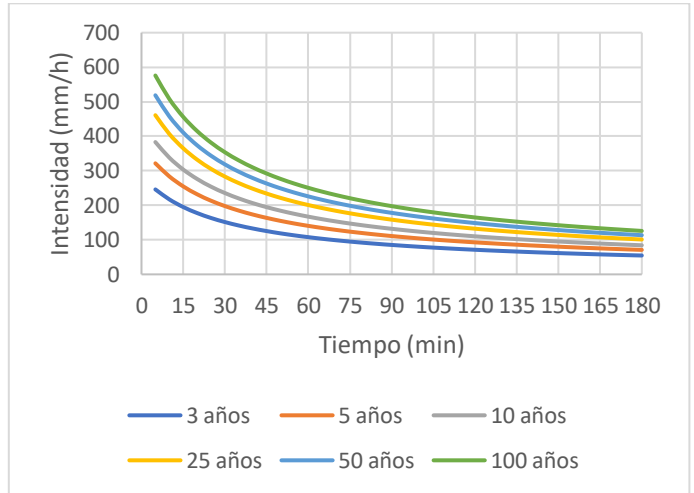


Figura 119 Curvas IDF CIACUA EC-Earth3-SSP2-4.5

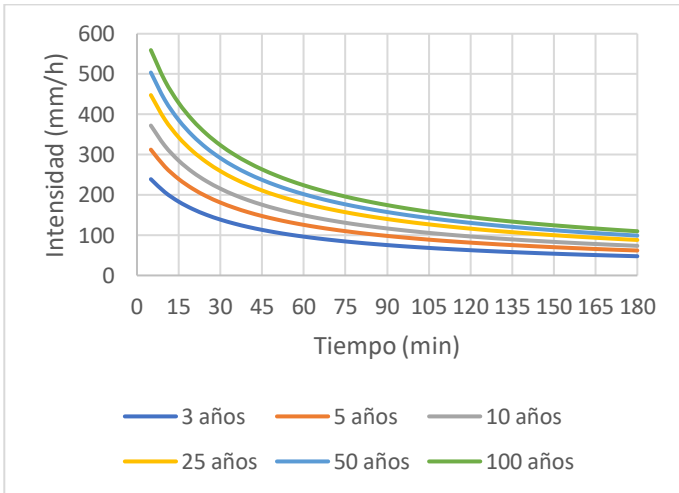


Figura 120 Curvas IDF CIACUA FGOALS-g3-SSP2-4.5

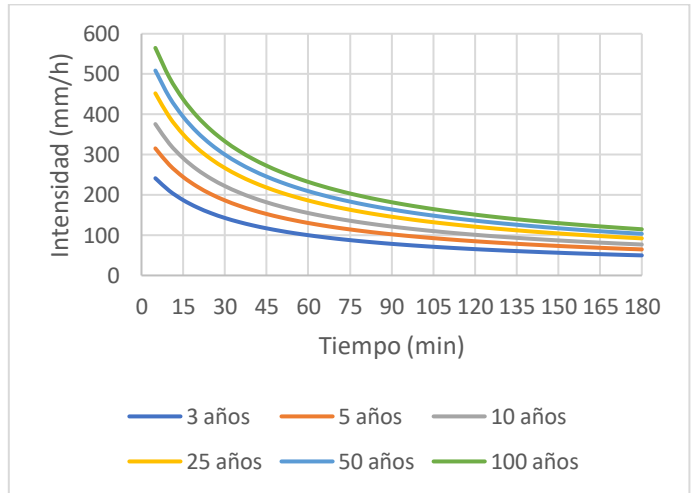


Figura 121 Curvas IDF CIACUA KIOST-ESM-SSP2-4.5

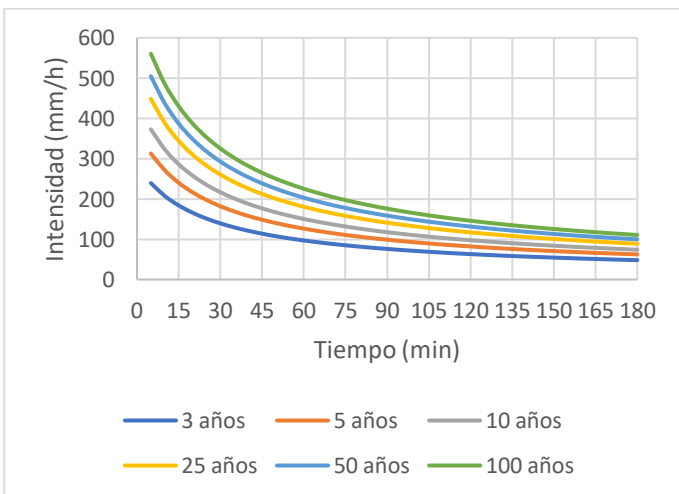


Figura 122 Curvas IDF CIACUA MPI-ESM-1-2-HR-SSP2-4.5

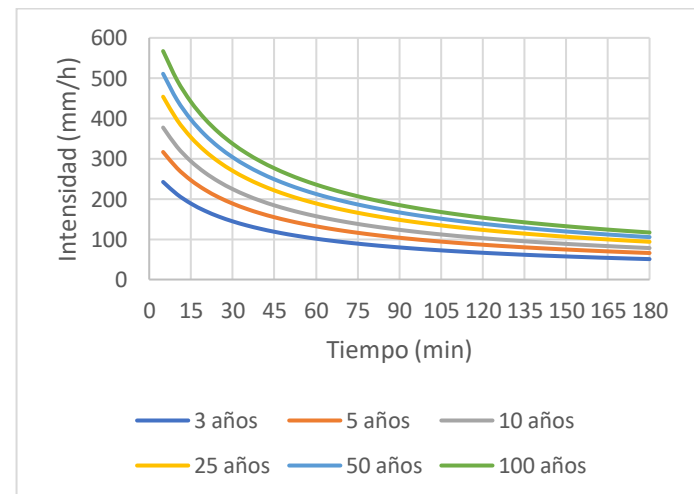


Figura 123 Curvas IDF CIACUA TaiESM1-SSP2-4.5



En el caso del SSP5-8.5 fue posible reconocer que para dos de los cinco MCG considerados para este caso de estudio la precipitación media diaria es menor que en el SSP2-4.5, esto ocurre para EC-Earth3 y FGOALS-g3, mientras que para los MCG restantes el valor de este parámetro aumenta conforme el escenario de Cambio Climático es más pesimista.

En este caso, los resultados de la precipitación media diaria de los MCG están entre 8.00 mm y 6.46 mm, lo cual determina una variación de 1.54 mm entre estos. El MCG que mayor valor de precipitación media diaria y por consiguiente mayores valores en los resultados de las curvas IDF para el SSP5-8.5 en cada periodo de retorno fue el EC-Earth3.

Los resultados para el EC-Earth3 para un periodo de retorno de 100 años y una duración de 5 minutos fue de 755.33 mm/h (Ver Figura 124 a Figura 128). Para la metodología del CIACUA la intensidad obtenida para las mismas características y MCG fue de 575.60 mm/h (Ver Figura 129 a Figura 133).

A partir del análisis de la información resultante a partir de las dos metodologías propuestas, fue posible reconocer que para este caso de estudio las curvas IDF generadas por el método de Pulgarín son más cóncavas respecto a las obtenidas por el método CIACUA. Asimismo, las intensidades para eventos de corta duración son mayores para la propuesta de Pulgarín en comparación con las del CIACUA, sin embargo, a medida que aumenta la duración de estas disminuyen en una proporción mayor a las del CIACUA.

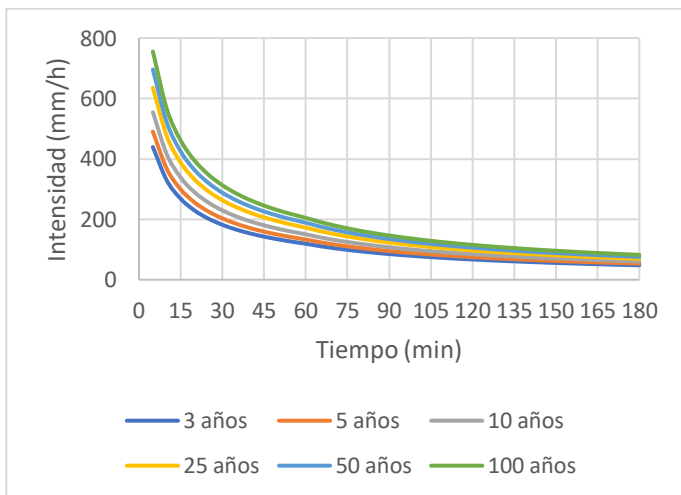


Figura 124 Curvas IDF Pulgarín EC-Earth3-SSP5-8.5

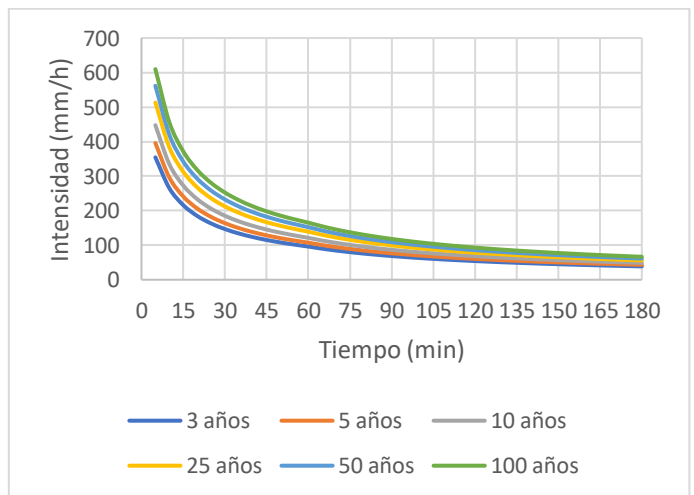


Figura 125 Curvas IDF Pulgarín FGOALS-g3-SSP5-8.5

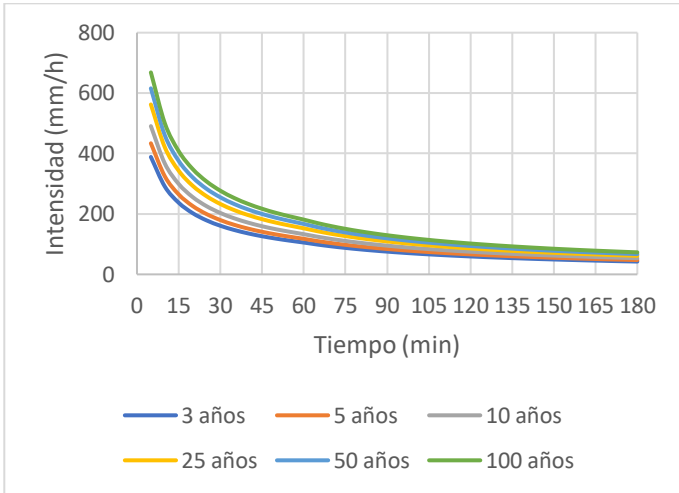


Figura 126 Curvas IDF Pulgarín KIOST-ESM- SSP5-8.5

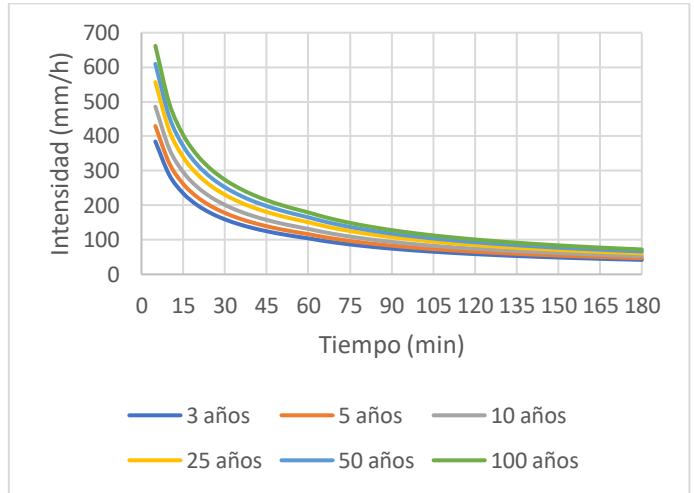


Figura 127 Curvas IDF Pulgarín MPI-ESM-1-2-HR- SSP5-8.5

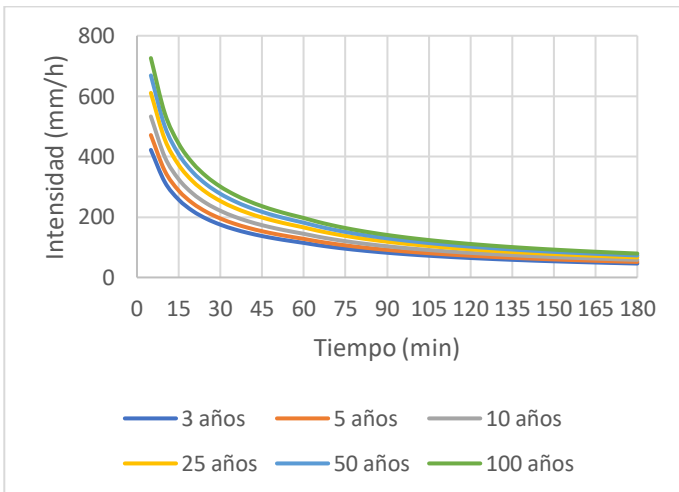


Figura 128 Curvas IDF Pulgarín TaiESM1- SSP5-8.5

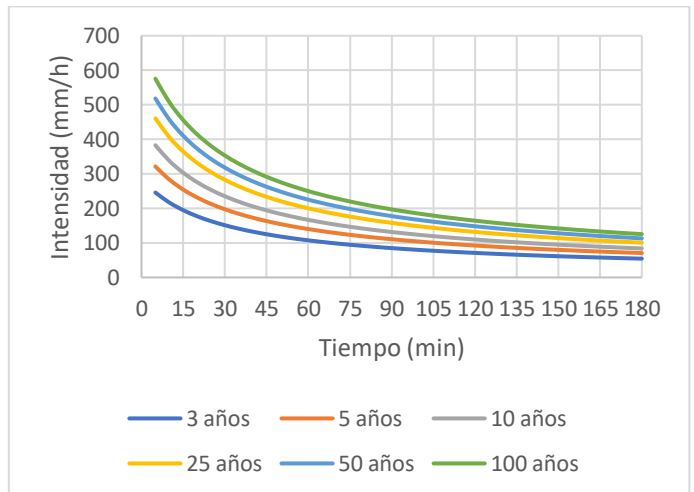


Figura 129 Curvas IDF CIACUA EC-Earth3- SSP5-8.5

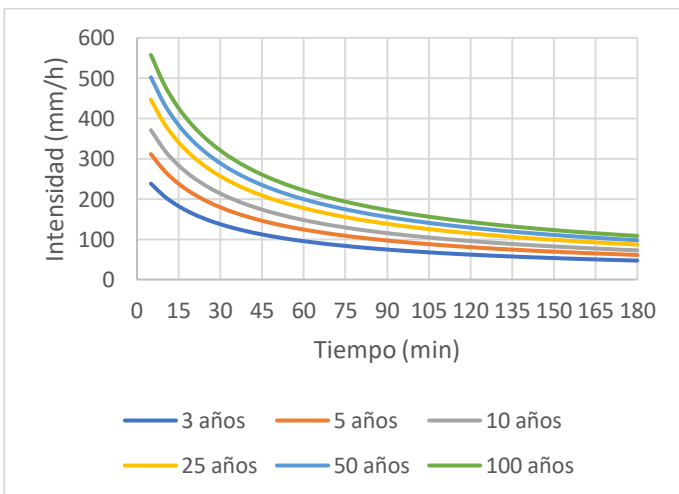


Figura 130 Curvas IDF CIACUA FGOALS-g3- SSP5-8.5

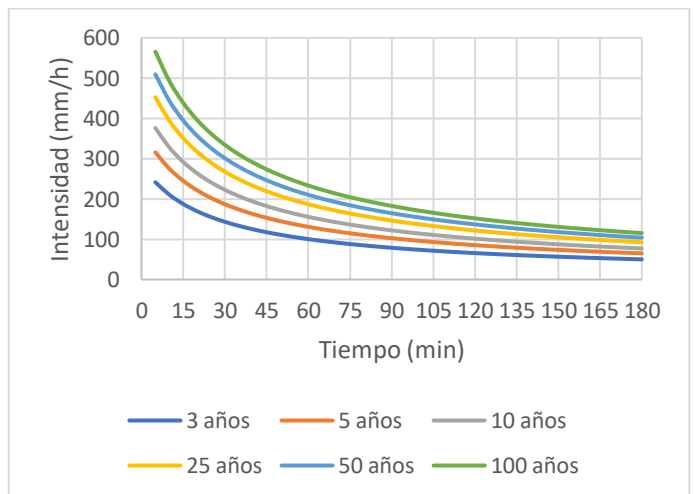


Figura 131 Curvas IDF CIACUA KIOST-ESM- SSP5-8.5

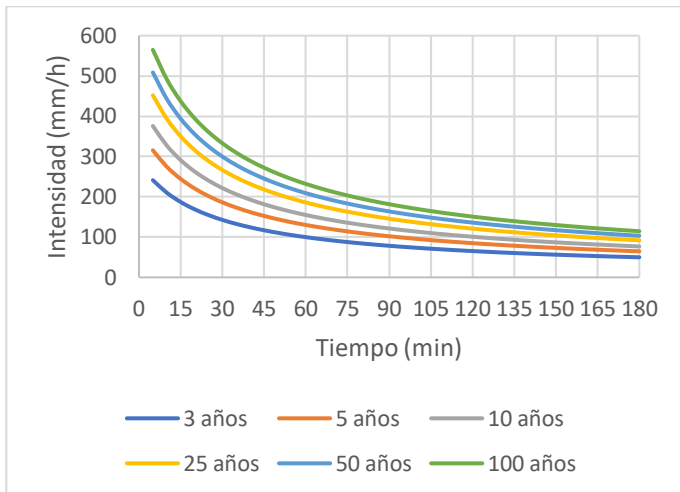


Figura 132 Curvas IDF CIACUA MPI-ESM-1-2-HR- SSP5-8.5

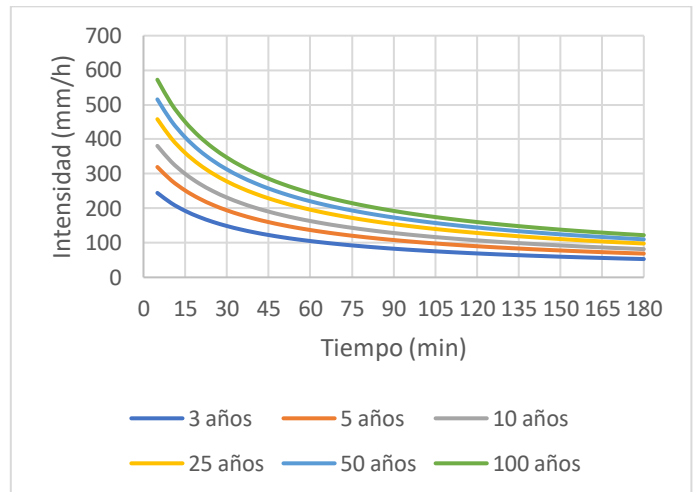


Figura 133 Curvas IDF CIACUA TaiESM1- SSP5-8.5

6.6.3 Cuenca La Doctora

Para los SSP2-4.5 y SSP5-8.5 en la cuenca pluvial La Doctora los resultados de las curvas IDF para los métodos de Pulgarín y CIACUA relacionan las alteraciones proyectadas a partir del estudio de cada MCG. Una de las particularidades de este caso de estudio es que este es el que cuenta con un mayor valor histórico de precipitación media diaria, el cual es de 6.00 mm, razón por la cual al aplicar la reducción de escala del “Delta Change” los valores obtenidos para cada MCG son superiores respecto al caso de estudio de la cuenca pluvial La Tinajas.

Los valores obtenidos sugieren que el MCG que mayor valor de precipitación media diaria registra es el EC-Earth3 con un valor de 12.33 mm, mientras que el que menos corresponde al FGOALS-g3 con 10.15 mm, la diferencia entre estos dos registros corresponde a 2.18 mm.

En la Figura 134 a Figura 138 se presentan las curvas IDF construidas de acuerdo con la propuesta de Pulgarín para el escenario del SPP2-4.5, en donde el resultado de la intensidad para el periodo de retorno de 100 años y duración de 5 minutos registrada para el EC-Earth3 fue de 1168.99 mm/h. En contraste, para el método CIACUA el valor fue de 604.98 mm/h para el mismo MCG y condiciones de tiempo. Las curvas IDF obtenidas por el planteamiento del CIACUA son relacionadas en la Figura 139 a Figura 143.

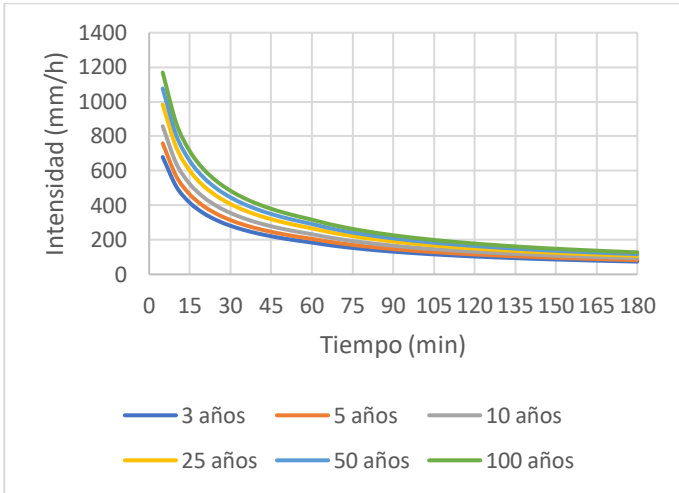


Figura 134 Curvas IDF Pulgarín EC-Earth3-SSP2-4.5

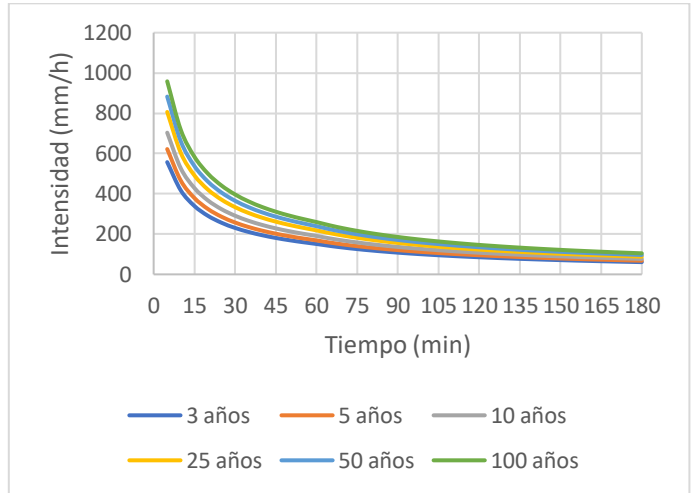


Figura 135 Curvas IDF Pulgarín FGOALS-g3-SSP2-4.5

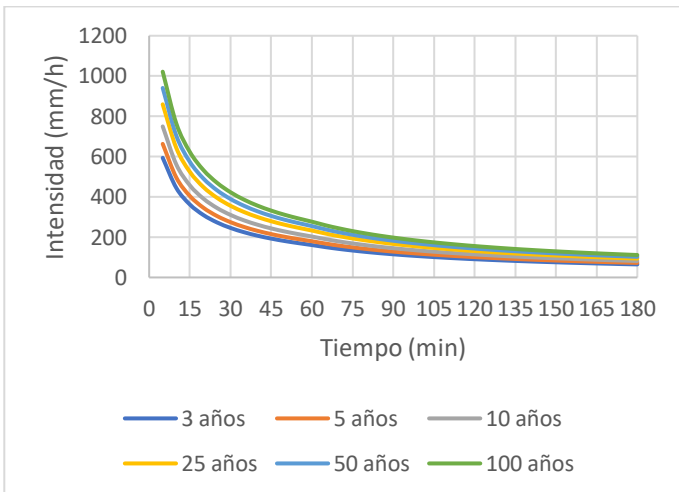


Figura 136 Curvas IDF Pulgarín KIOST-ESM-SSP2-4.5

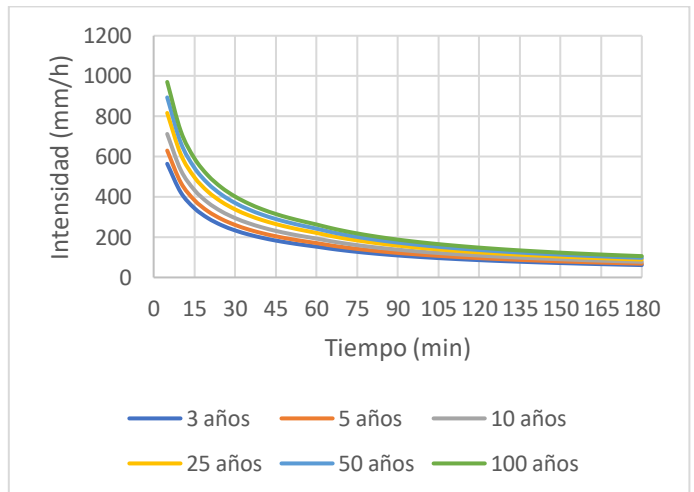


Figura 137 Curvas IDF Pulgarín MPI-ESM-1-2-HR-SSP2-4.5

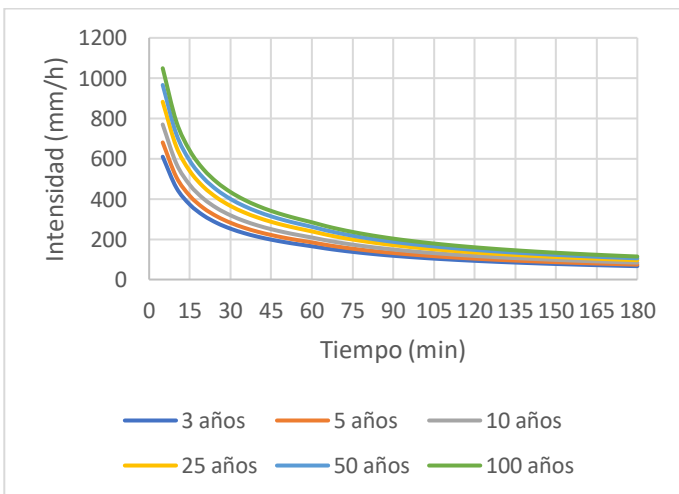


Figura 138 Curvas IDF Pulgarín TaiESM1-SSP2-4.5

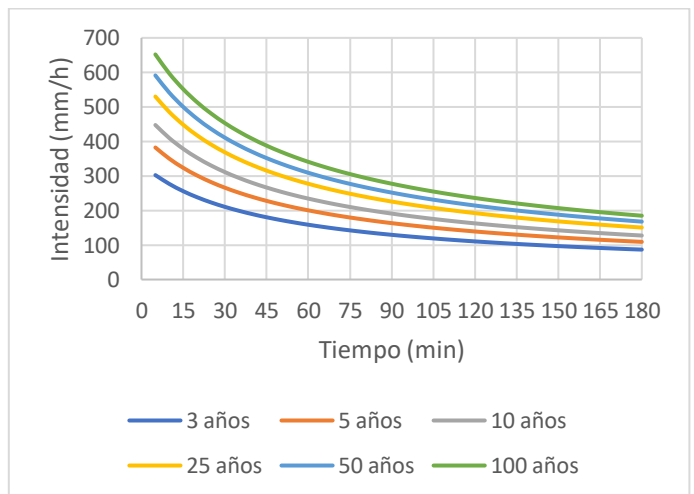


Figura 139 Curvas IDF CIACUA EC-Earth3-SSP2-4.5

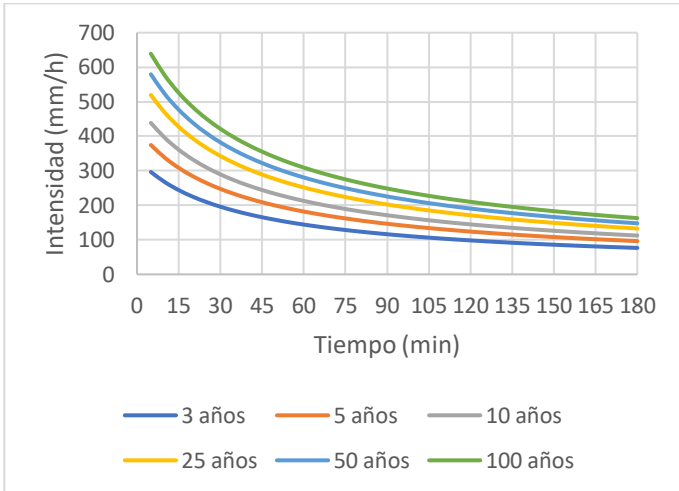


Figura 140 Curvas IDF CIACUA FGOALS-g3-SSP2-4.5

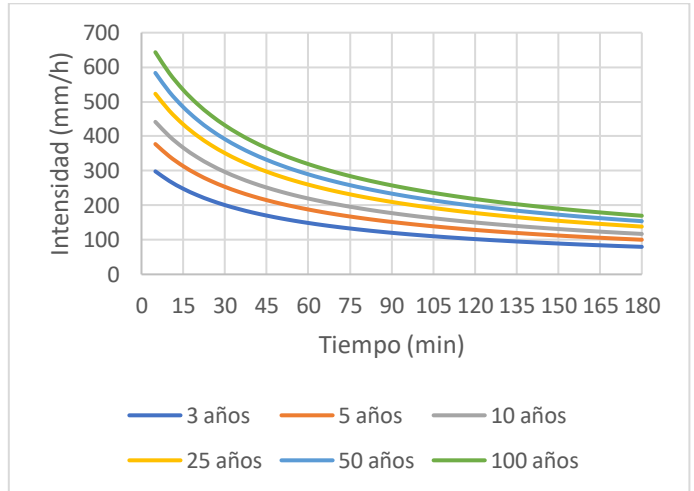


Figura 141 Curvas IDF CIACUA KIOST-ESM-SSP2-4.5

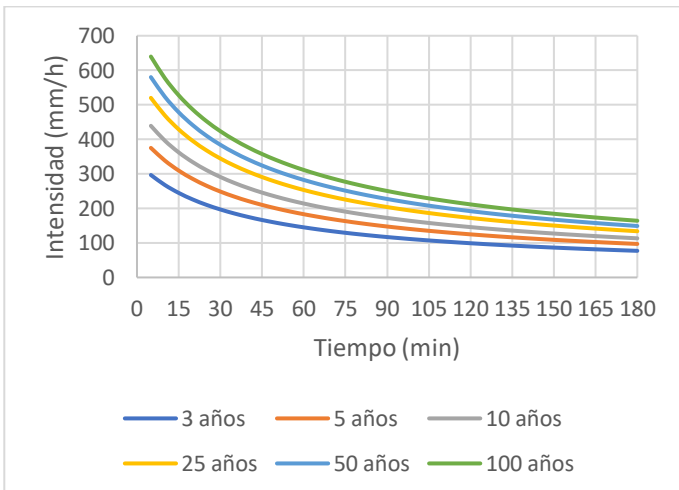


Figura 142 Curvas IDF CIACUA MPI-ESM-1-2-HR-SSP2-4.5

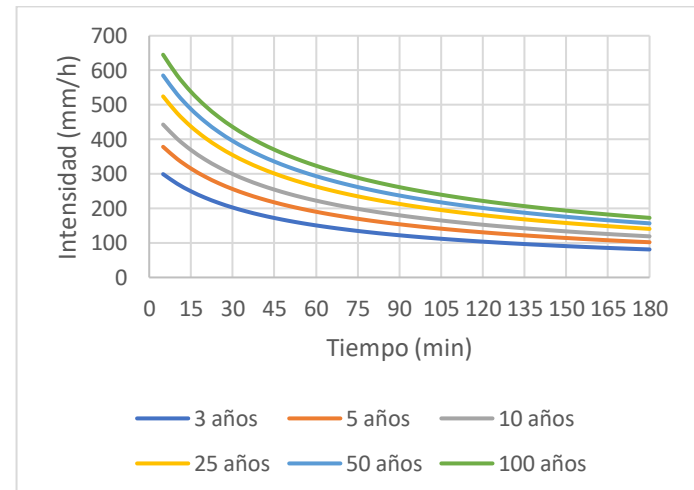


Figura 143 Curvas IDF CIACUA TaiESM1-SSP2-4.5

Por su parte, para el SSP5-8.5 se identificó que los MCG, EC-Earth3 y FGOALS-g3 registran valores inferiores de precipitación media diaria en comparación al SSP2-4, sin embargo, los MCG restantes (KIOST-ESM, MPI-ESM-1-2-HR y TaiESM1) si cuentan con un valor mayor de este parámetro respecto a otro horizonte evaluado.

Para el SSP5-8.5 los valores de precipitación media diaria calculados corresponden a los obtenidos para el modelo EC-Earth3, para el cual se reconoció que el valor de la precipitación media diaria de 12.33 mm, mientras que el MCG con un menor registro para este parámetro fue el FGOALS-g3 con un valor de 9.96 mm.

En el modelo EC-Earth3 se reportó un valor para un periodo de retorno de 100 años y una duración de 5 minutos fue de 1119.88 mm/h (Ver Figura 144 a Figura 148) mediante la aplicación de la propuesta de Pulgarín. En el caso del planteamiento del CIACUA se replicó el ejercicio desarrollado (Ver Figura 154 a Figura 158) y se reconoció que la intensidad registrada bajo las mismas consideraciones corresponde a 604.75 mm/h.



Como consecuencia del análisis de las curvas IDF construidas se determinó que en el método de Pulgarín las intensidades reportadas para eventos de corta duración son superiores respecto al del CIACUA. No obstante, para eventos de mayor duración ocurre lo contrario, los valores correspondientes a este último son mayores en comparación a la metodología de Pulgarín.

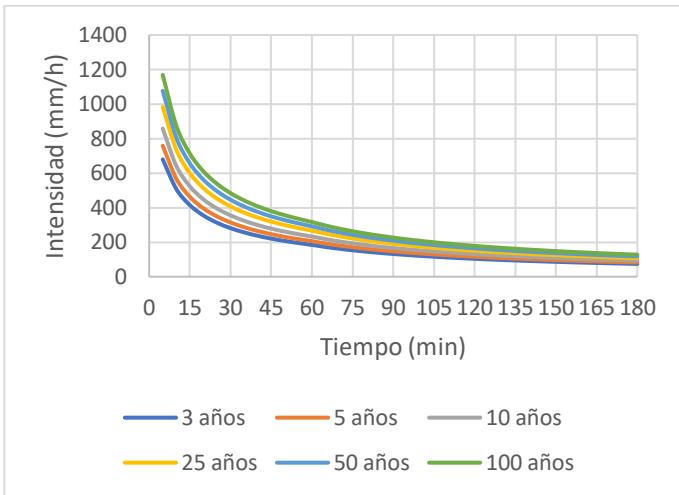


Figura 144 Curvas IDF Pulgarín EC-Earth3-SSP5-8.5

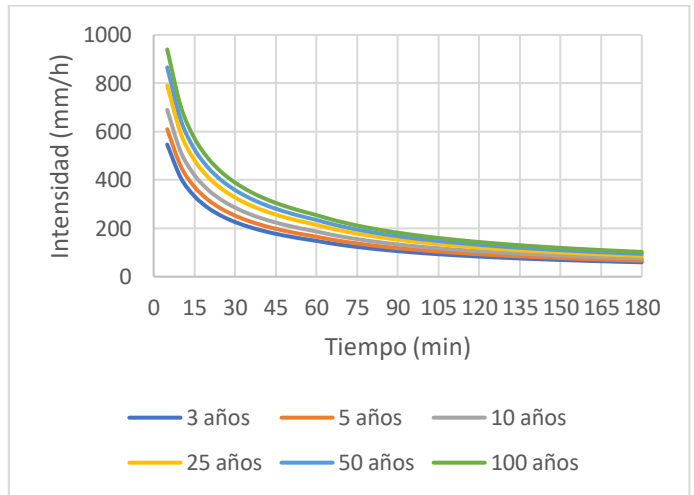


Figura 145 Curvas IDF Pulgarín FGOALS-g3-SSP5-8.5

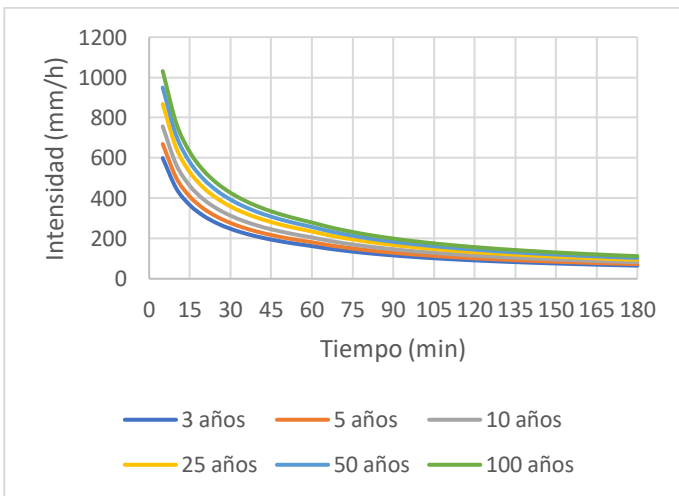


Figura 146 Curvas IDF Pulgarín KIOST-ESM-SSP5-8.5

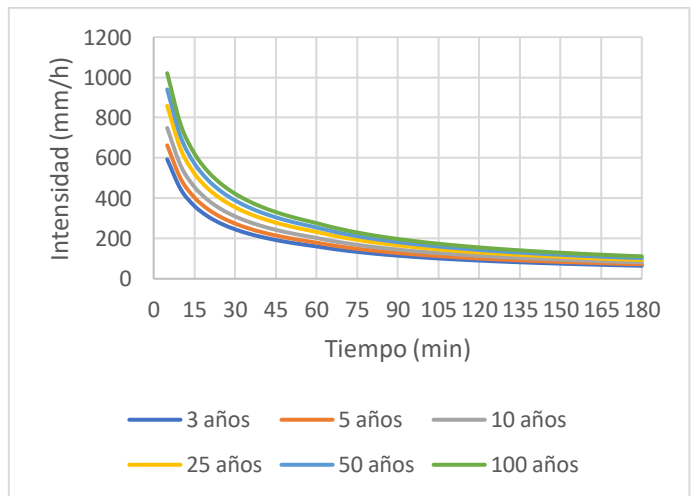


Figura 147 Curvas IDF Pulgarín MPI-ESM-1-2-HR-SSP5-8.5

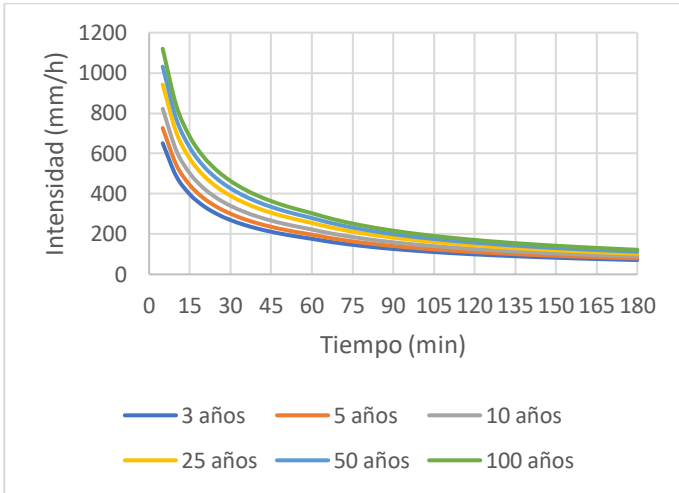


Figura 148 Curvas IDF Pulgarín TaiESM1- SSP5-8.5

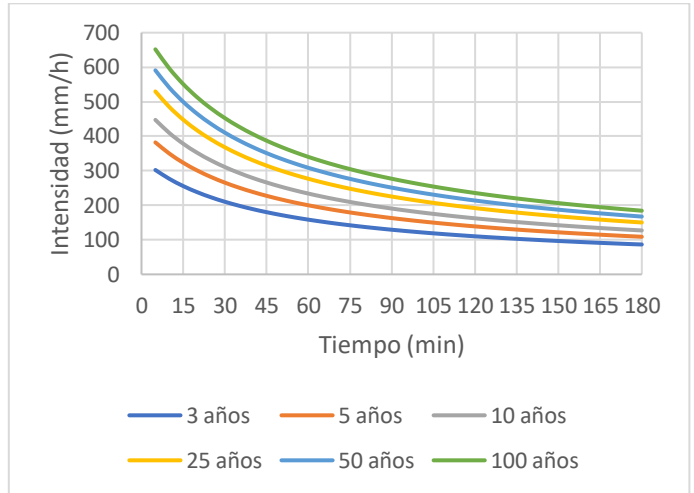


Figura 149 Curvas IDF CIACUA EC-Earth3- SSP5-8.5

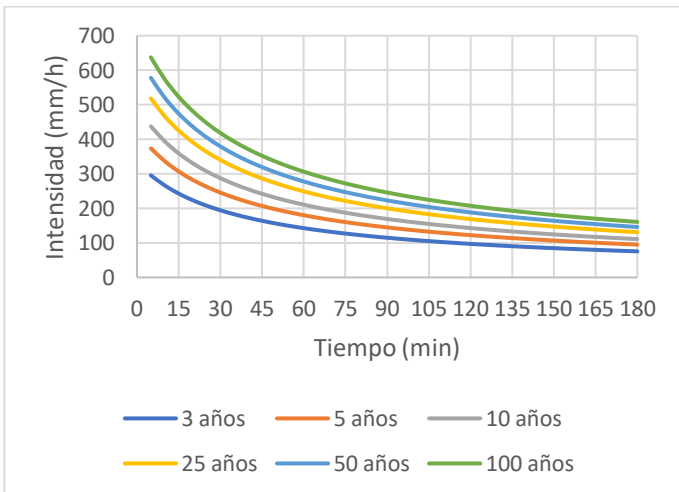


Figura 150 Curvas IDF CIACUA FGOALS-g3- SSP5-8.5

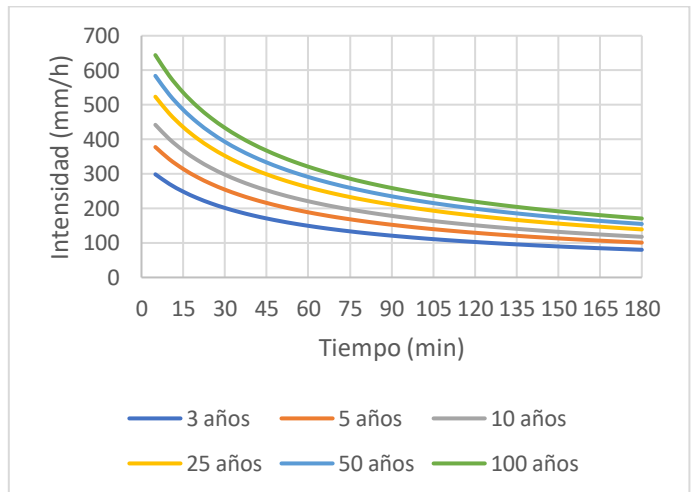


Figura 151 Curvas IDF CIACUA KIOST-ESM- SSP5-8.5

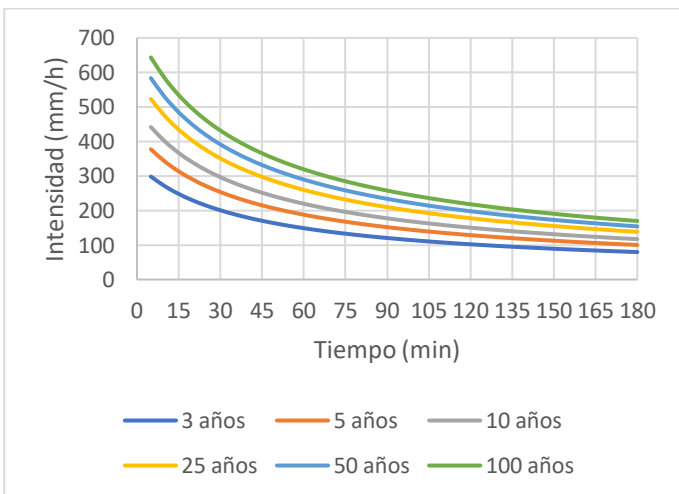


Figura 152 Curvas IDF CIACUA MPI-ESM-1-2-HR- SSP5-8.5

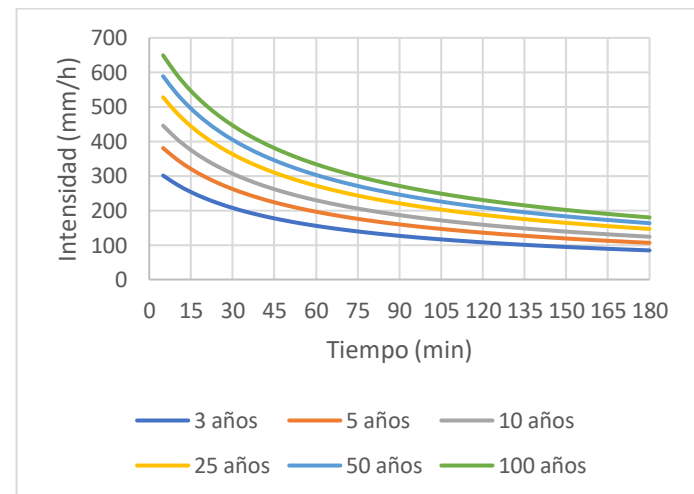


Figura 153 Curvas IDF CIACUA TaiESM1- SSP5-8.5



6.7 Producción de hietogramas de diseño influenciados por el Cambio Climático

A partir de las curvas IDF obtenidas para cada escenario de Cambio Climático se construyeron los hietogramas de diseño desde la metodología de bloque alternos, este ejercicio se realizó para las curvas IDF correspondientes a las propuestas de Pulgarín y CIACUA y para los tres casos de estudio desarrollados (Ver Anexo 7 Hietogramas).

La duración definida para los hietogramas corresponde a 35 minutos, se adoptó este intervalo de tiempo debido a que a partir de los reportes de eventos de lluvia y la observación histórica, es habitual que este sea el periodo de un evento de precipitación típico.

6.7.1 Cuenca Salitre – Molinos

En la Figura 154 a Figura 156 se relacionan los resultados obtenidos de los hietogramas de diseño construidos a partir del método de bloques alternos y originados a partir de las curvas IDF asociadas a la propuesta de Pulgarín para el SSP2-4.5. Los valores obtenidos incluyen el análisis para seis periodos de retorno, de modo que, a medida que se incrementó este intervalo de tiempo también aumentaba el valor de la precipitación en cada duración.

Asimismo, se identificó que los picos alcanzados se encuentran directamente relacionados con los valores de intensidad media diaria reportadas en las curvas IDF, es decir, a medida que es mayor el registro de este parámetro también será mayor el pico del hietograma correspondiente, por esta razón, los MCG con mayor intensidad calculado coinciden con los que mayor volumen de precipitación van a tener en el hietograma asociado.

Este ejercicio fue replicado para las curvas IDF producidas con el método CIACUA, en este caso al haber obtenido intensidades inferiores, la precipitación pico es menor, sin embargo, en el caso de las duraciones restantes, se observa una distribución más uniforme entre todos los intervalos de precipitación. Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 157 a Figura 159.

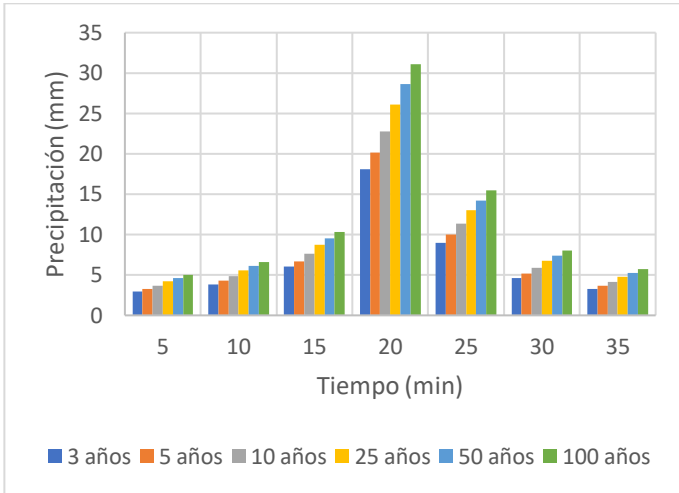


Figura 154 Hietograma Pulgarín CNRM-ESM2-1-SSP2-4.5

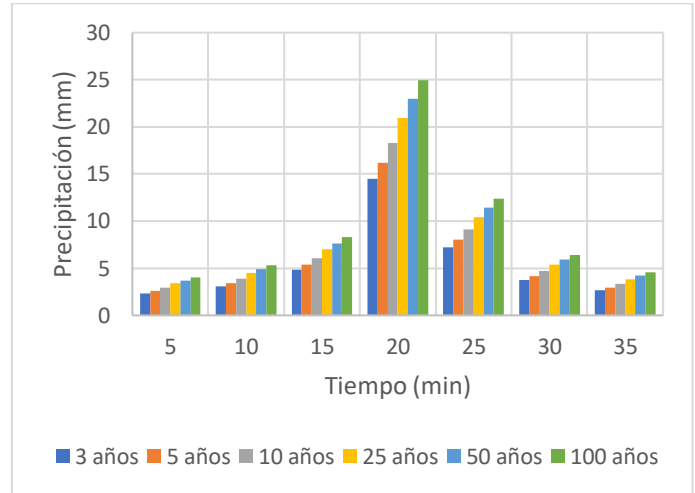


Figura 155 Hietograma Pulgarín GFDL-CM4-gr2-SSP2-4.5

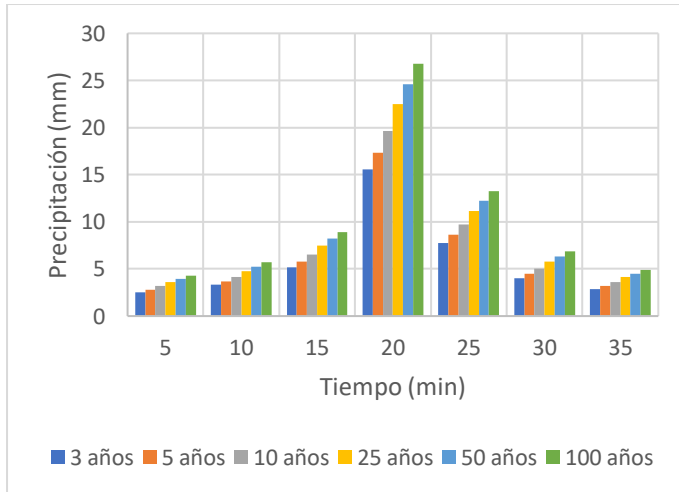


Figura 156 Hietograma Pulgarín GISS-E2-1-G-SSP2-4.5

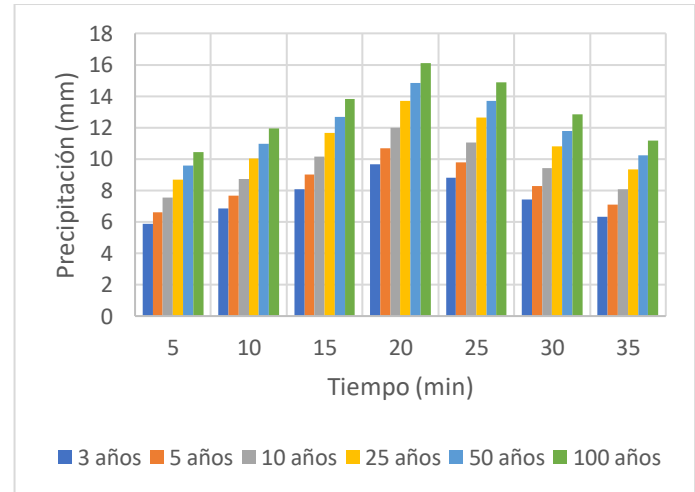


Figura 157 Hietograma CIACUA CNRM-ESM2-1-SSP2-4.5

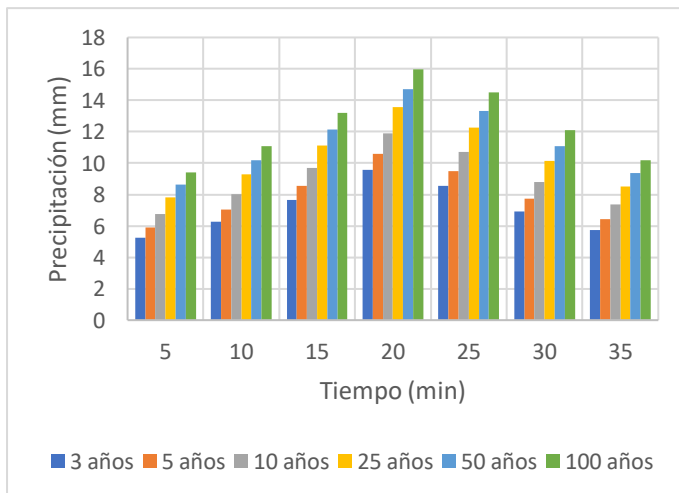


Figura 158 Hietograma CIACUA GFDL-CM4-gr2-1-SSP2-4.5

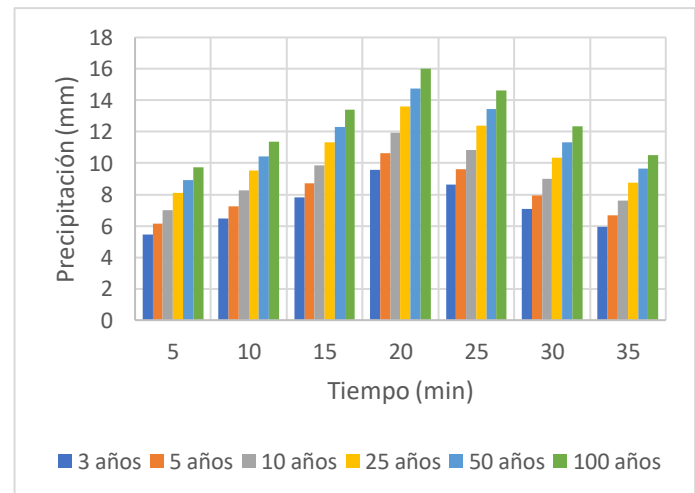


Figura 159 Hietograma CIACUA GISS-E2-1-G-SSP2-4.5



Para el SSP5-8.5 se realizó el mismo ejercicio, en donde para los hietogramas generados a partir de las curvas IDF de Pulgarín al igual que en el SSP2-4.5 responden al valor de precipitación media diaria con el cual se generó cada gráfica, en donde el volumen de lluvia es mayor a medida que se incrementa el periodo de retorno (Ver Figura 160 a Figura 162).

En contraste, para este caso de estudio los hietogramas que provienen de las curvas IDF del CIACUA la precipitación fue distribuida de forma más uniforme en todos los intervalos de tiempo, es decir, el valor más alto de hietograma se encuentra más cerca a los otros valores de este en comparación al caso de Pulgarín (Ver Figura 163 a Figura 165).

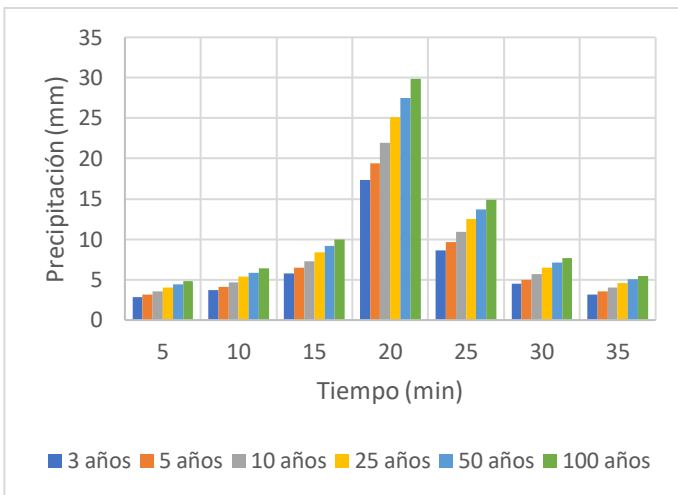


Figura 160 Hietograma Pulgarín CNRM-ESM2-1-SSP5-8.5

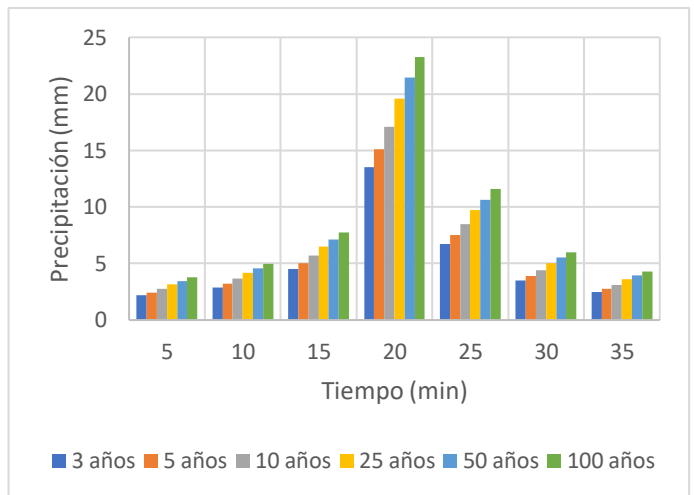


Figura 161 Hietograma Pulgarín GFDL-CM4-gr2-SSP5-8.5

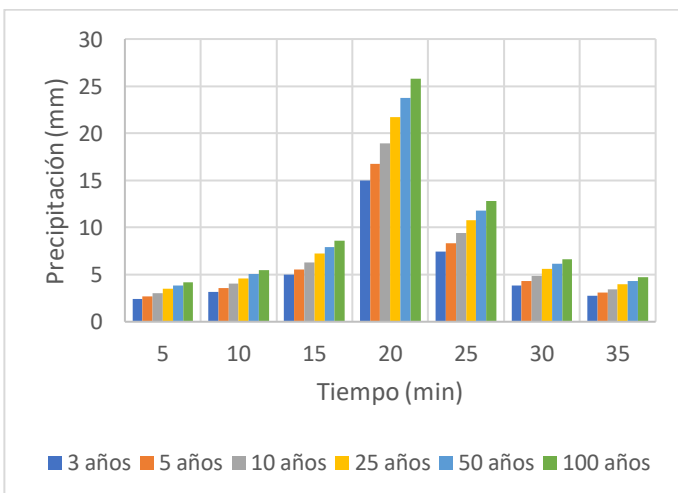


Figura 162 Hietograma Pulgarín GISS-E2-1-G-SSP5-8.5

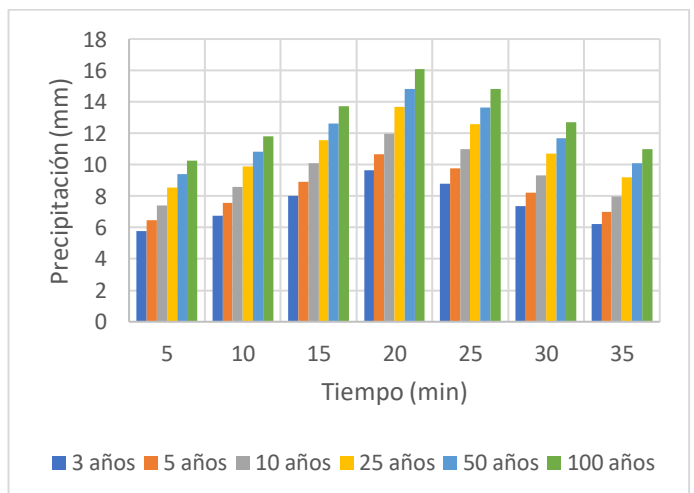


Figura 163 Hietograma CIACUA CNRM-ESM2-1-SSP5-8.5

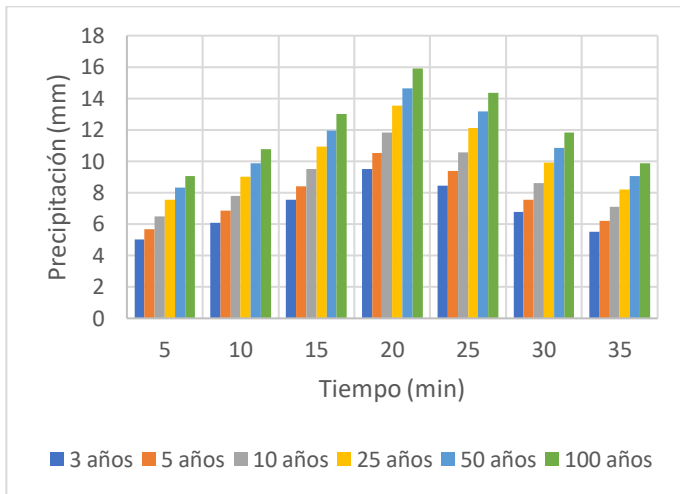


Figura 164 Hietograma CIACUA GFDL-CM4-gr2 -1- SSP5-8.5

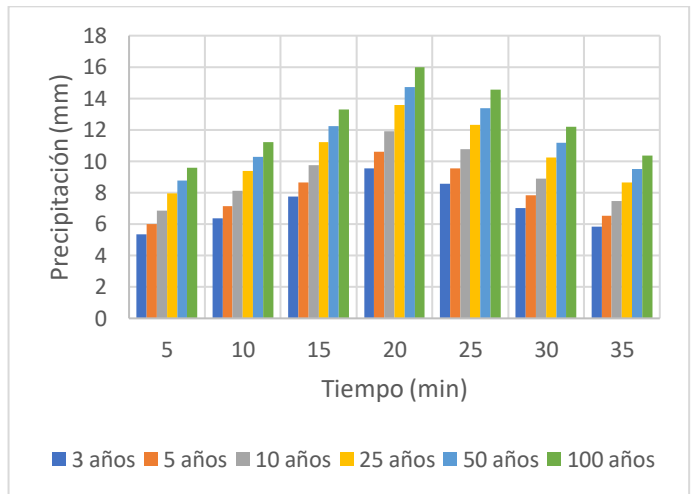


Figura 165 Hietograma CIACUA GISS-E2-1-G - SSP5-8.5

6.7.2 Cuenca La Tinajas

Los resultados obtenidos para el SSP2-4.5 en el caso de estudio de la cuenca pluvial La Tinajas se relacionan en la Figura 166 a Figura 175, estos sugieren que los valores de precipitación de los hietogramas de diseño construidos por el proceso de bloque alternos se relacionan directamente con el valor de precipitación media diaria obtenida para cada MCG, el proceso utilizado para construir las curvas IDF y el periodo de retorno definido, de modo que los desarrollados a partir de la propuesta de Pulgarín cuentan con volúmenes de precipitación superiores a los generados desde la metodología del CIACUA.

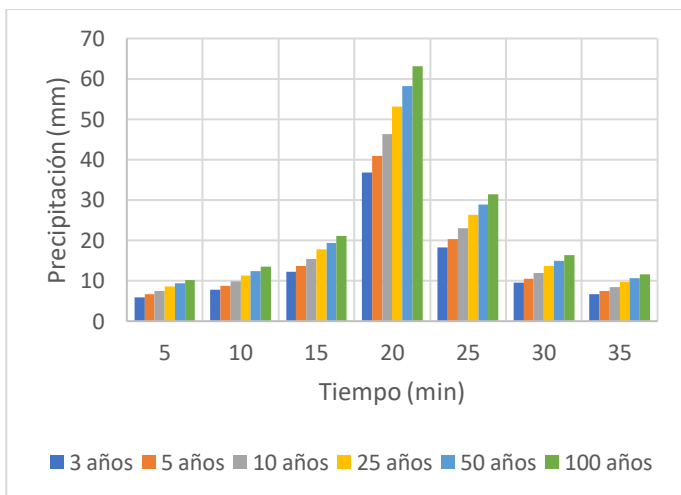


Figura 166 Hietograma Pulgarín EC-Earth3-SSP2-4.5

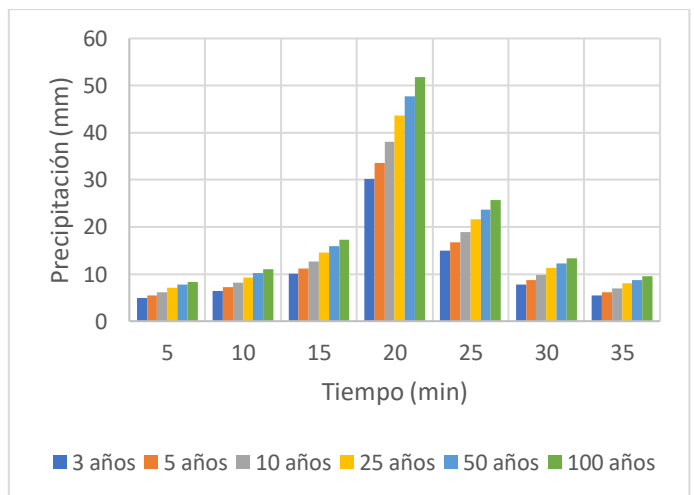


Figura 167 Hietograma Pulgarín FGOALS-g3-SSP2-4.5

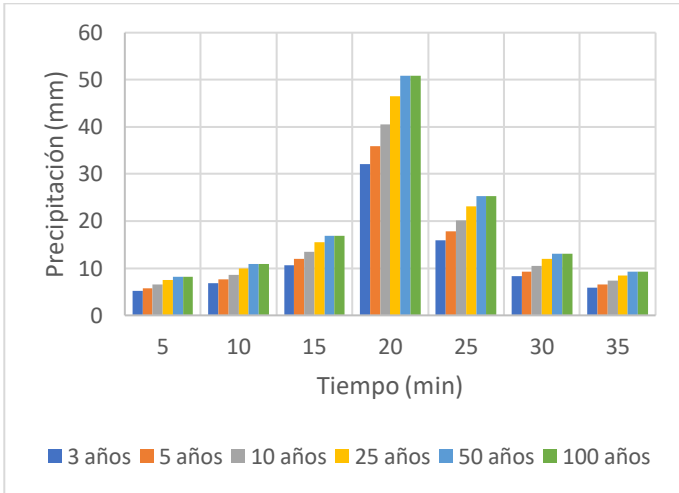


Figura 168 Hietograma Pulgarín KIOST-ESM-SSP2-4.5

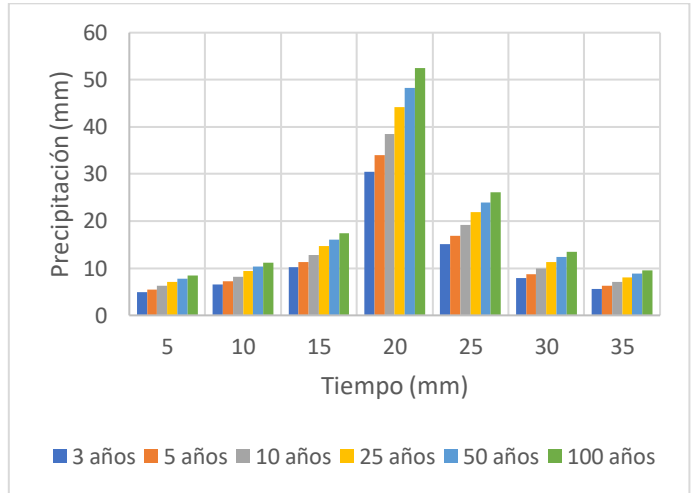


Figura 169 Hietograma Pulgarín MPI-ESM-1-2-HR-SSP2-4.5

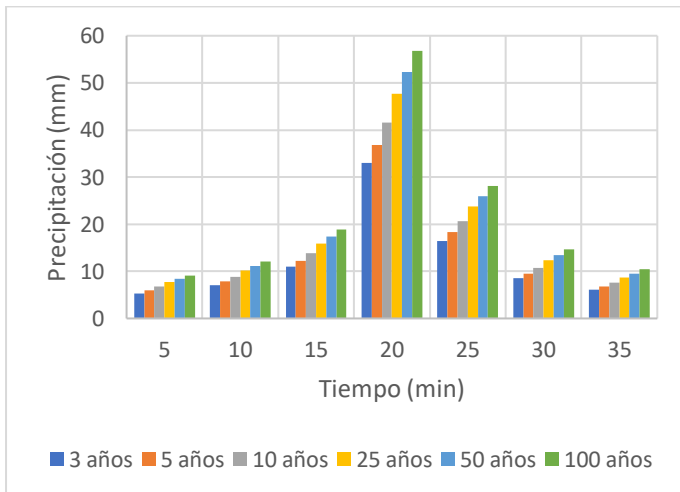


Figura 170 Hietograma Pulgarín TaiESM1-SSP2-4.5

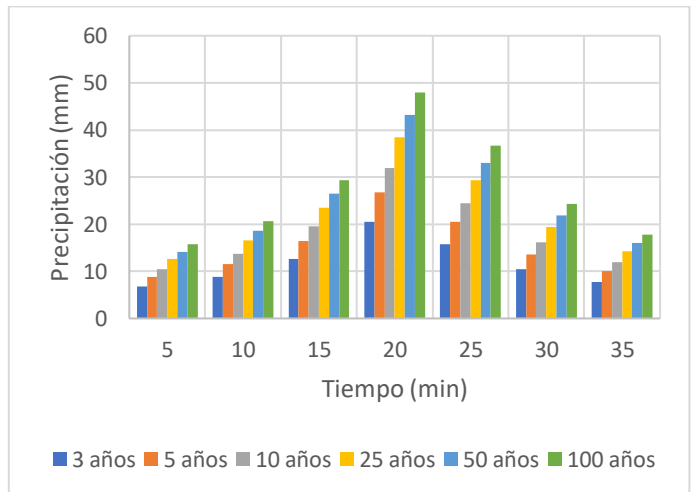


Figura 171 Hietograma CIACUA EC-Earth3-SSP2-4.5

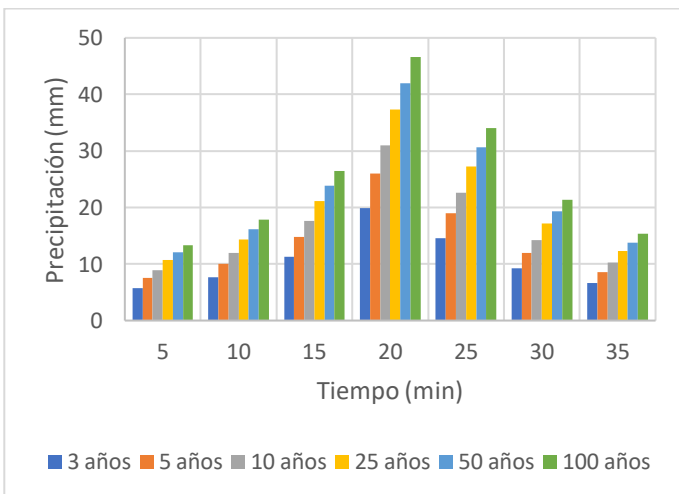


Figura 172 Hietograma CIACUA FGOALS-g3-SSP2-4.5

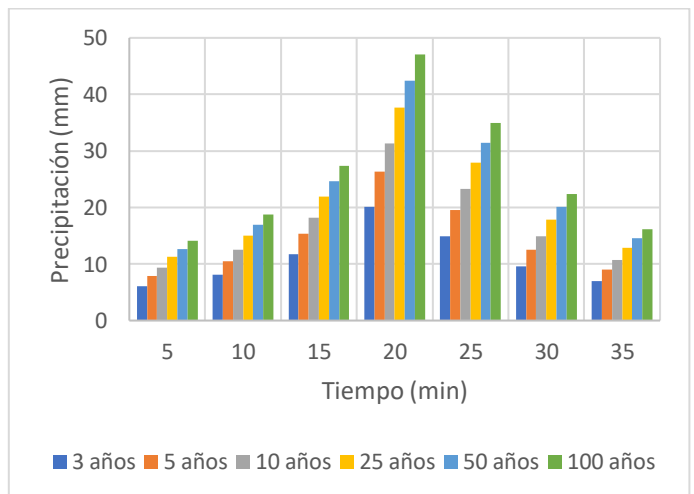


Figura 173 Hietograma CIACUA KIOST-ESM-SSP2-4.5

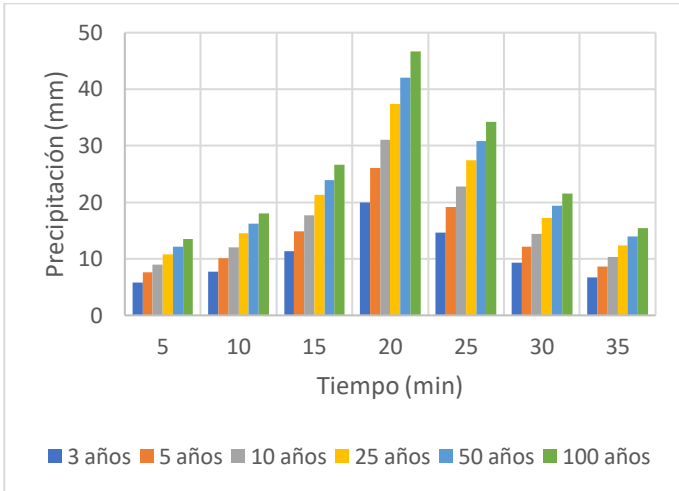


Figura 174 Hietograma CIACUA MPI-ESM-1-2-HR-SSP2-4.5

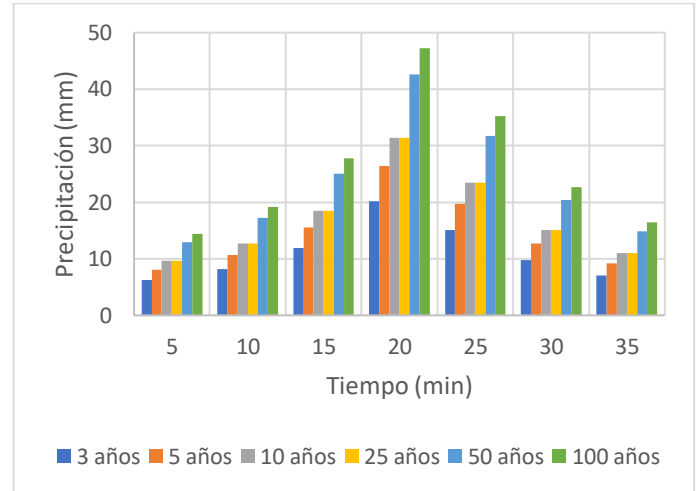


Figura 175 Hietograma CIACUA TaiESM1-SSP2-4.5

En el caso del SSP5-8.5 la metodología implementada fue replicada con el objetivo de establecer los resultados de los hietogramas de diseño para este horizonte de Cambio Climático. Para este escenario, los gráficos resultantes se relacionan en la Figura 176 a Figura 185, en donde se evidencia que igualmente la magnitud del volumen de lluvia total depende del valor de precipitación media diaria obtenida para cada MCG, el proceso utilizado para construir las curvas IDF y el periodo de retorno definido.

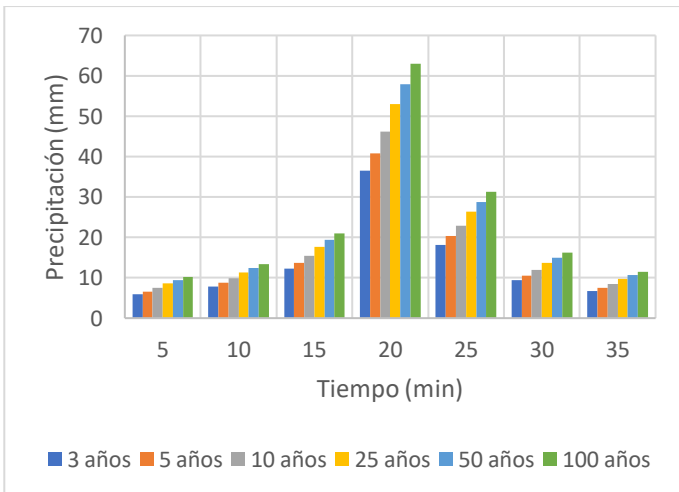


Figura 176 Hietograma Pulgarín EC-Earth3-SSP5-8.5

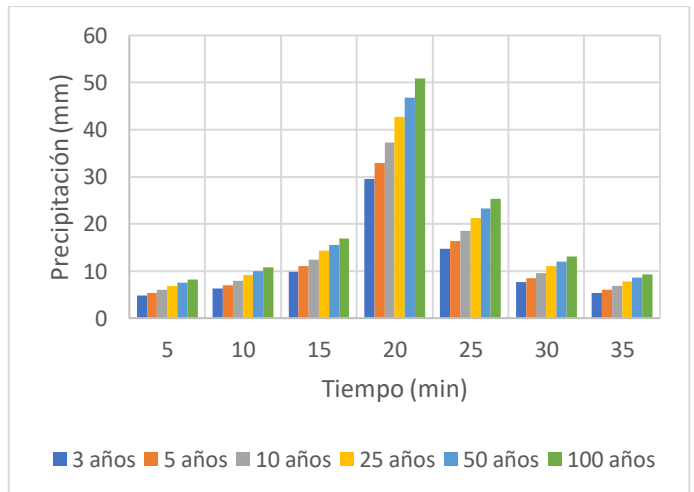


Figura 177 Hietograma Pulgarín FGOALS-g3-SSP5-8.5

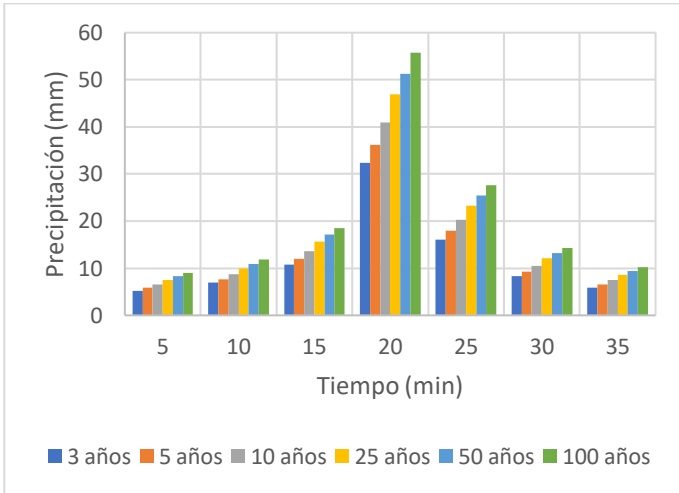


Figura 178 Hietograma Pulgarín KIOST-ESM- SSP5-8.5

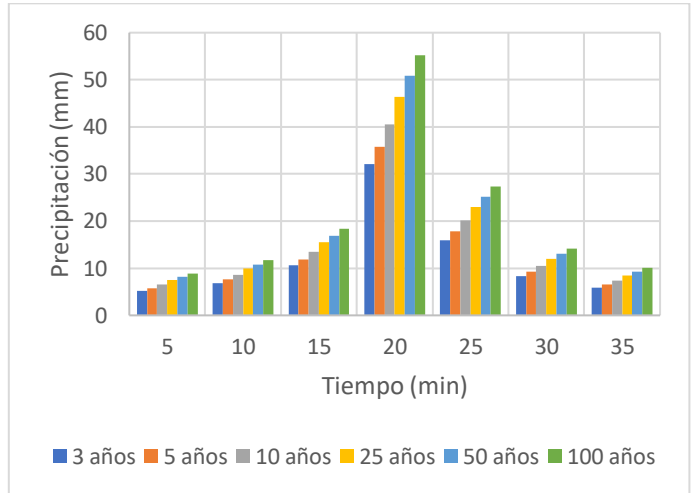


Figura 179 Hietograma Pulgarín MPI-ESM-1-2-HR- SSP5-8.5

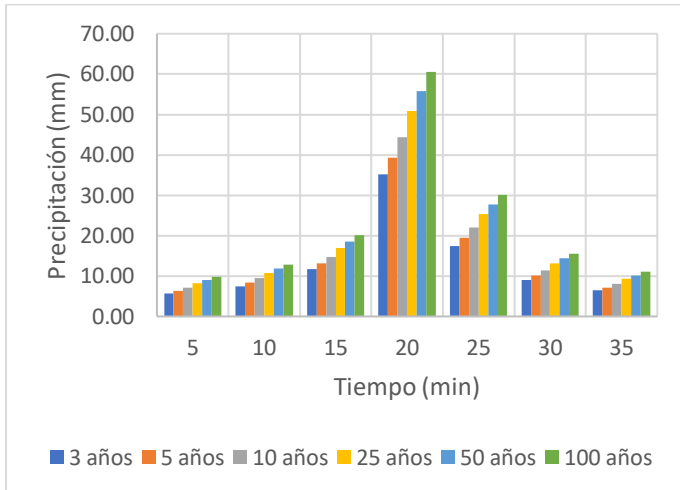


Figura 180 Hietograma Pulgarín TaiESM1- SSP5-8.5

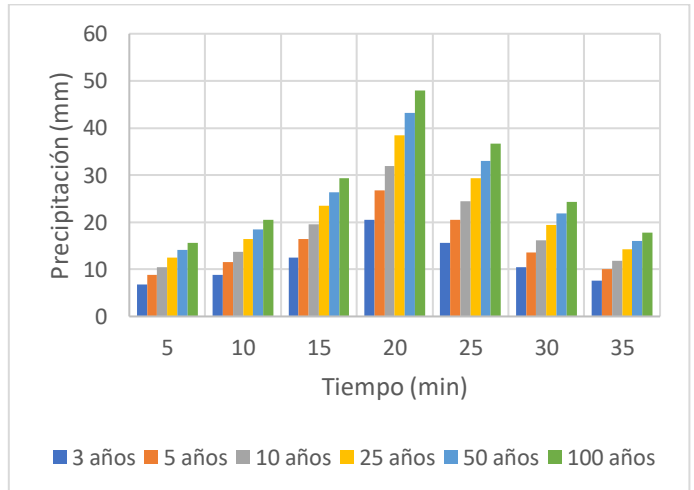


Figura 181 Hietograma CIACUA EC-Earth3- SSP5-8.5

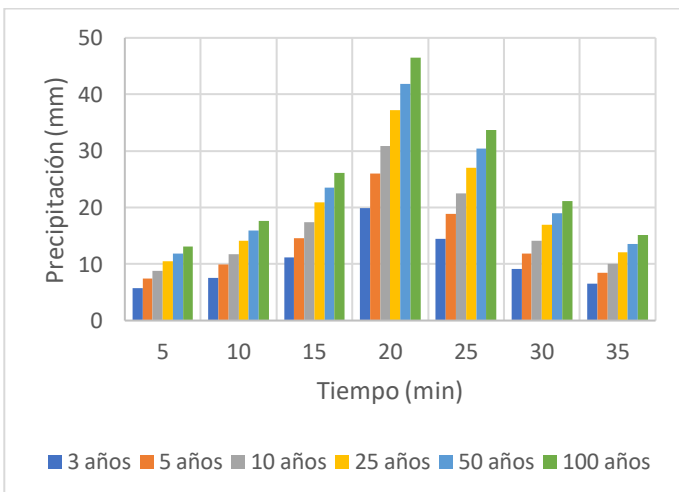


Figura 182 Hietograma CIACUA FGOALS-g3- SSP5-8.5

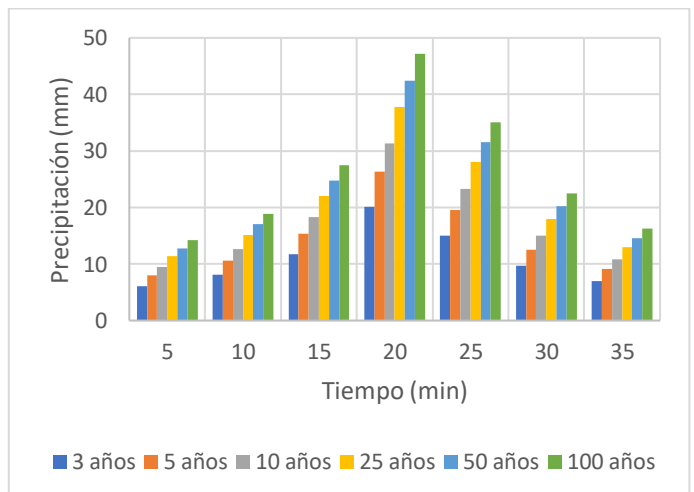


Figura 183 Hietograma CIACUA KIOST-ESM- SSP5-8.5

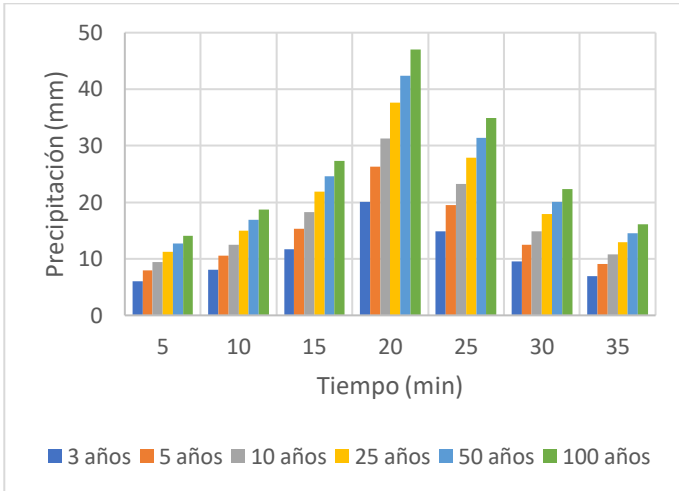


Figura 184 Hietograma CIACUA MPI-ESM-1-2-HR- SSP5-8.5

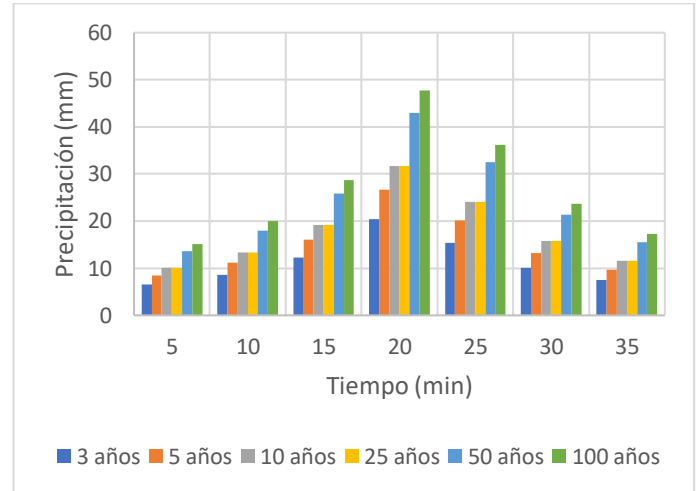


Figura 185 Hietograma CIACUA TaiESM1- SSP5-8.5

6.7.3 Cuenca La Doctora

Para el último caso de estudio desarrollado, los hietogramas de diseño elaborados son relacionados en la Figura 186 a Figura 195, para esta cuenca pluvial se reportaron los valores más altos en comparación con los otros casos de estudio, lo cual puede encontrarse asociado con que los valores de precipitación media diaria son mayores, por tanto, el volumen total de lluvia es superior. A su vez, esto se encuentra determinado por el método de construcción de las curvas IDF, el MCG analizado y el periodo de retorno. En ese sentido, la precipitación total calculada por el método CIACUA es inferior a los reportados por Pulgarín.

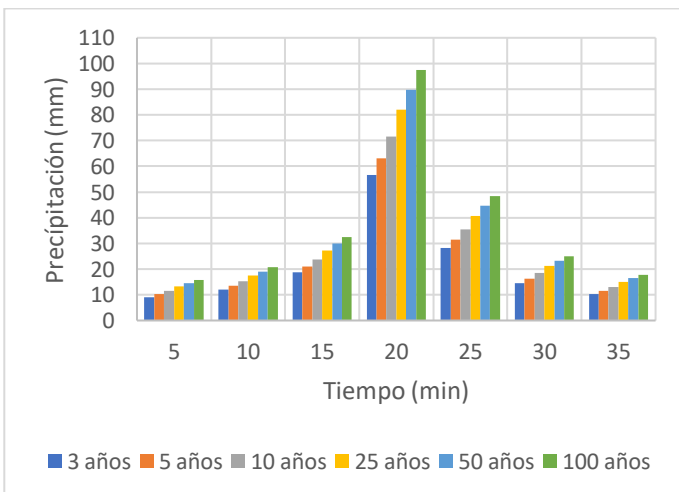


Figura 186 Hietograma Pulgarín EC-Earth3-SSP2-4.5

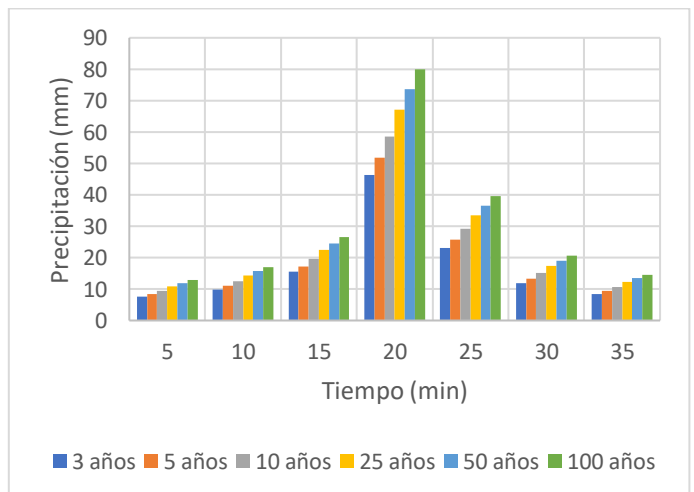


Figura 187 Hietograma Pulgarín FGOALS-g3-SSP2-4.5

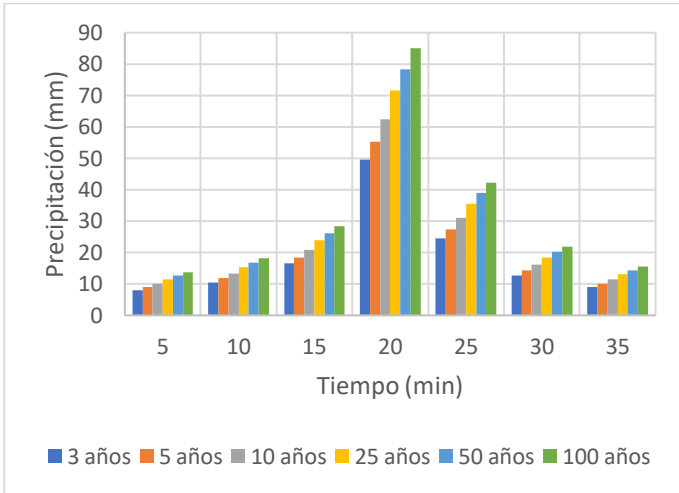


Figura 188 Hietograma Pulgarín KIOST-ESM-SSP2-4.5

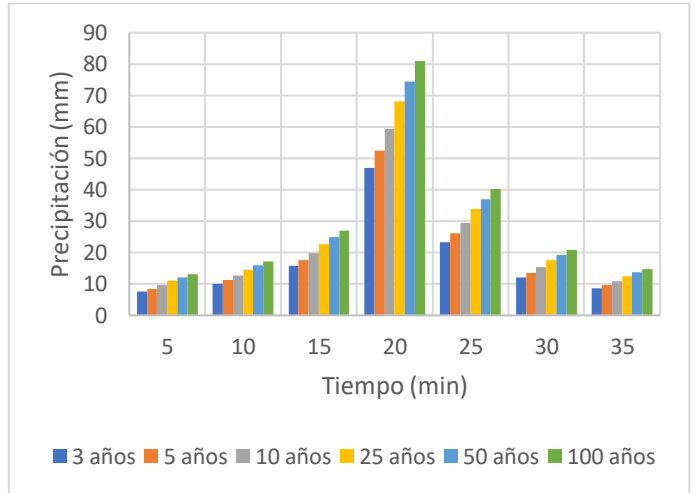


Figura 189 Hietograma Pulgarín MPI-ESM-1-2-HR-SSP2-4.5

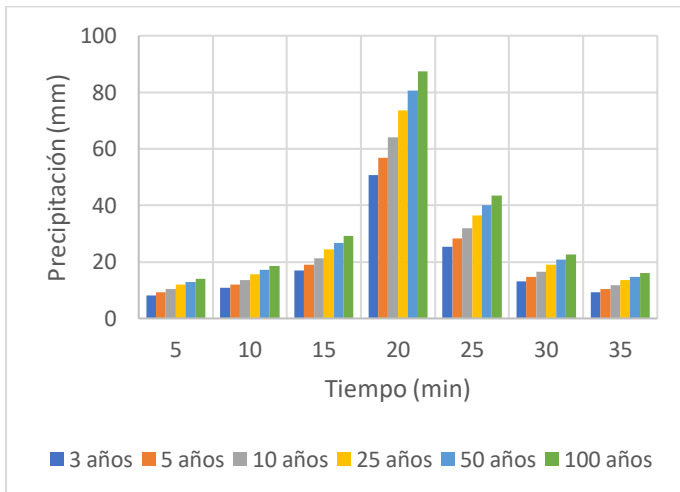


Figura 190 Hietograma Pulgarín TaiESM1-SSP2-4.5

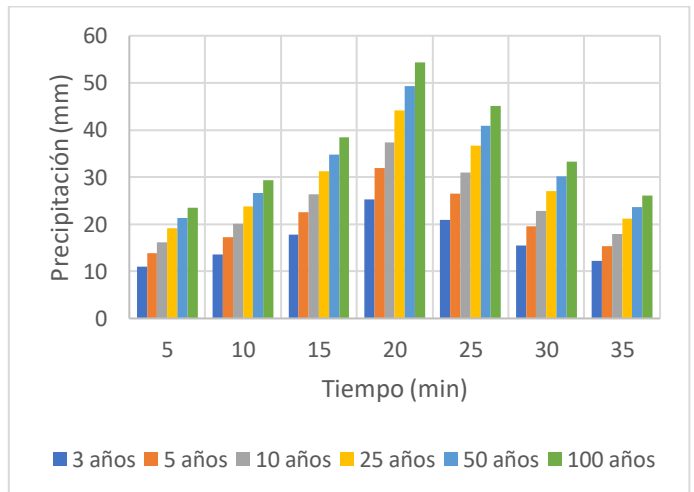


Figura 191 Hietograma CIACUA EC-Earth3-SSP2-4.5

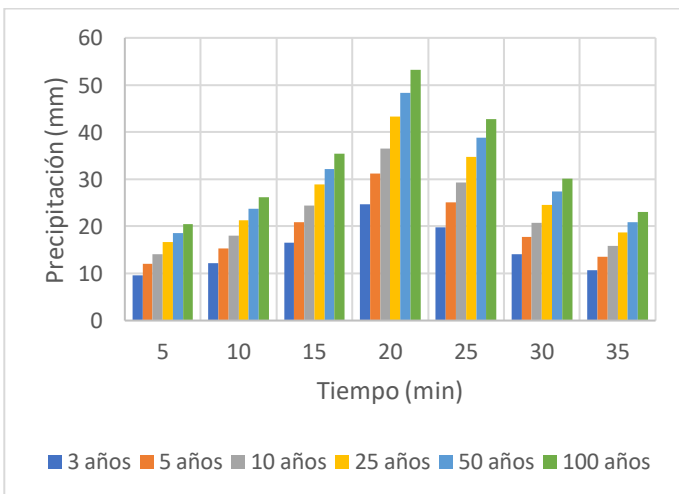


Figura 192 Hietograma CIACUA FGOALS-g3-SSP2-4.5

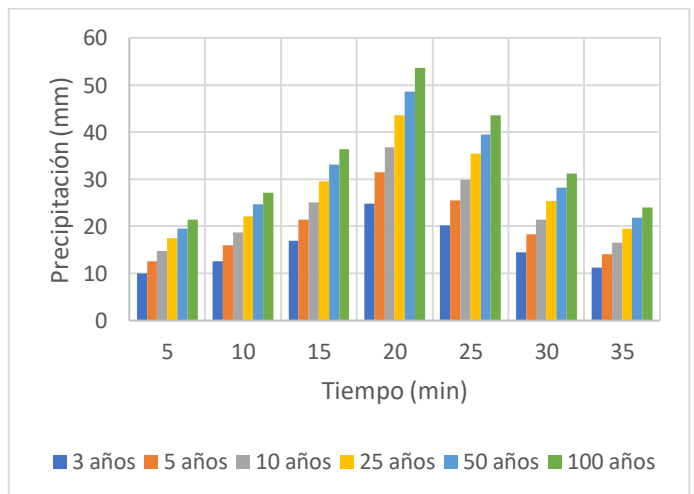


Figura 193 Hietograma CIACUA KIOST-ESM-SSP2-4.5

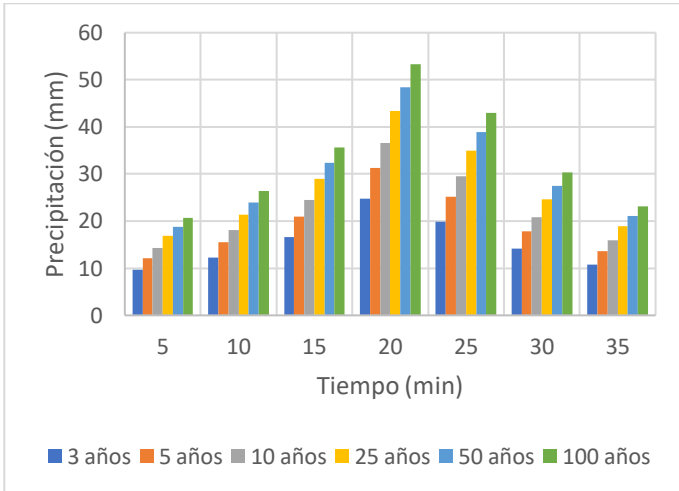


Figura 194 Hietograma CIACUA MPI-ESM-1-2-HR-SSP2-4.5

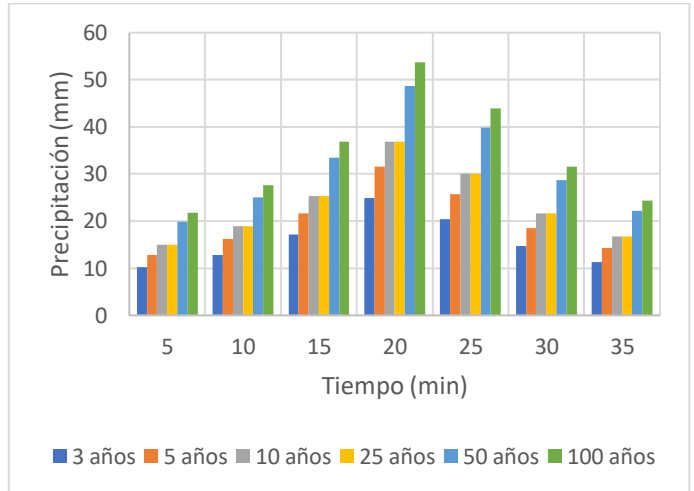


Figura 195 Hietograma CIACUA TaiESM1-SSP2-4.5

Asimismo, en el SSP5-8.5 los hietogramas de diseño elaborados responden al volumen de agua producto de la precipitación en un intervalo de tiempo específico, mediante el ejercicio realizado se determinó que estos son función del periodo de retorno, el MCG para el cual se estimó el valor precipitación media diaria y de la forma o método con el que se construyeron las curvas IDF. Los resultados obtenidos son presentados en la Figura 196 a Figura 205.

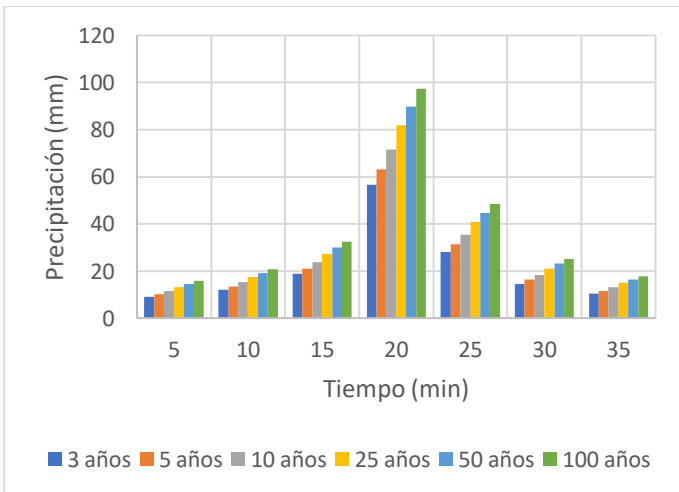


Figura 196 Hietograma Pulgarín EC-Earth3-SSP5-8.5

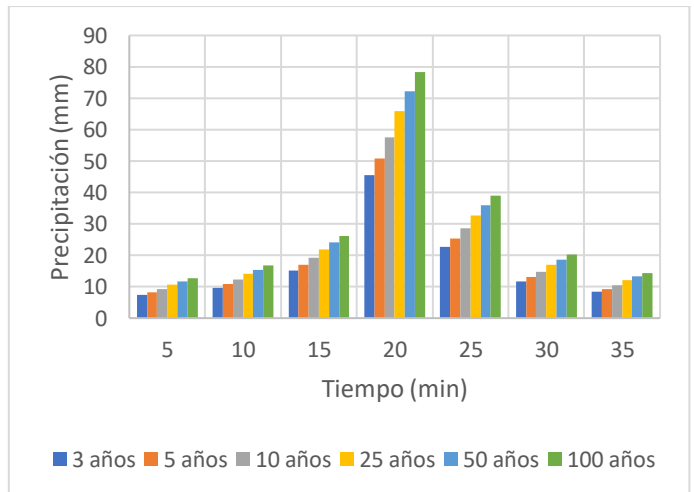


Figura 197 Hietograma Pulgarín FGOALS-g3-SSP5-8.5

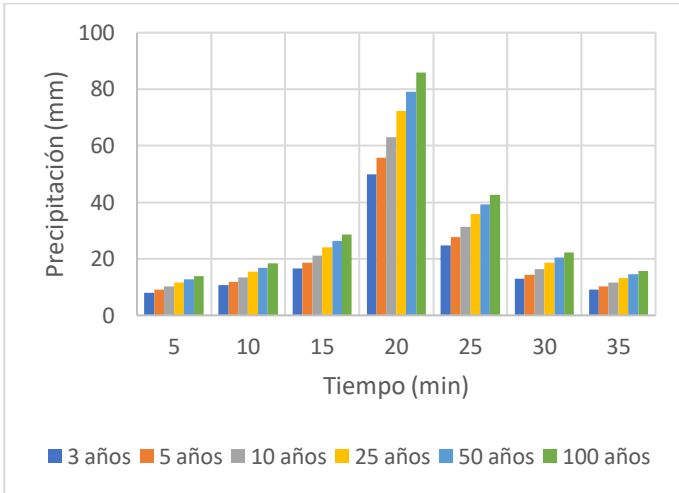


Figura 198 Hietograma Pulgarín KIOST-ESM- SSP5-8.5

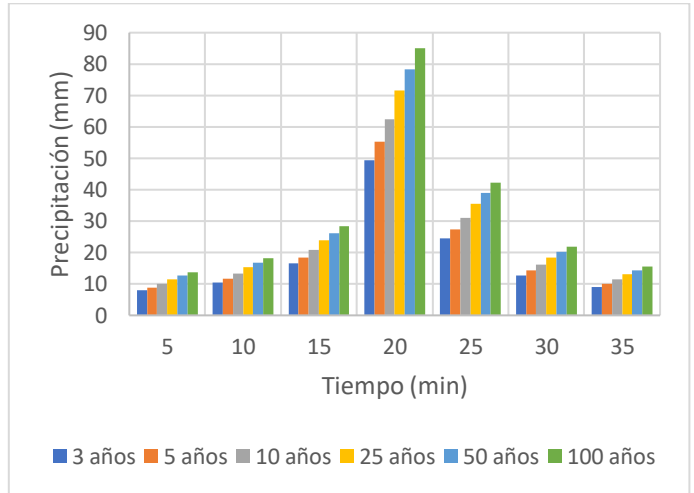


Figura 199 Hietograma Pulgarín MPI-ESM-1-2-HR- SSP5-8.5

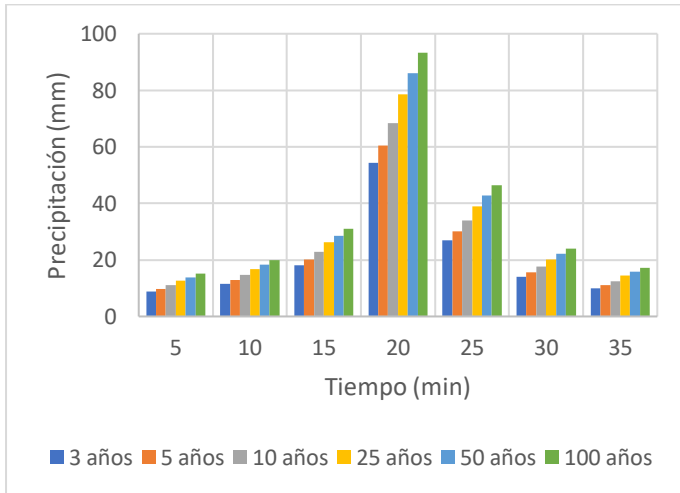


Figura 200 Hietograma Pulgarín TaiESM1- SSP5-8.5

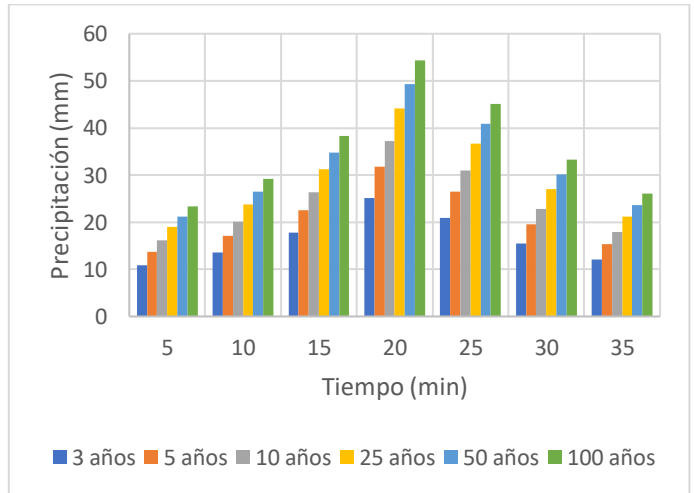


Figura 201 Hietograma CIACUA EC-Earth3- SSP5-8.5

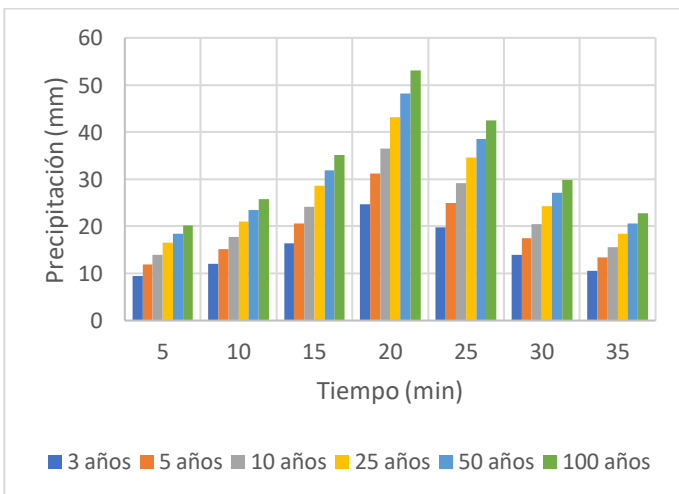


Figura 202 Hietograma CIACUA FGOALS-g3- SSP5-8.5

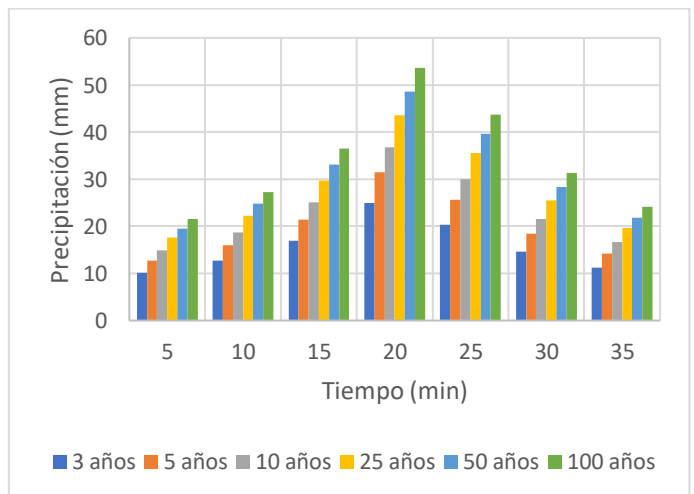


Figura 203 Hietograma CIACUA KIOST-ESM- SSP5-8.5

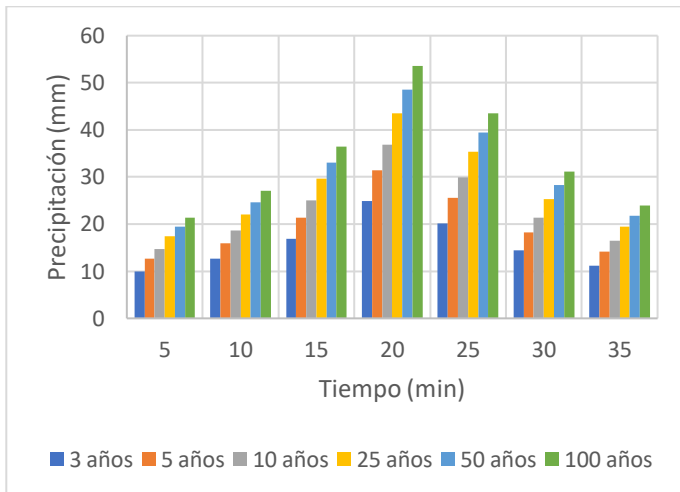


Figura 204 Hietograma CIACUA MPI-ESM-1-2-HR- SSP5-8.5

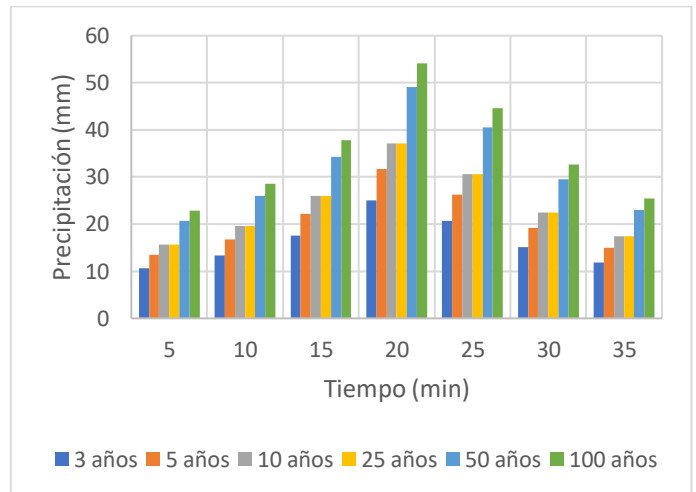


Figura 205 Hietograma CIACUA TaiESM1- SSP5-8.5

6.8 Comparación de curvas IDF y hietogramas en perspectiva del Cambio Climático

Como resultado de la aplicación de la propuesta metodológica de este documento se obtuvieron hietogramas de diseño para dos horizontes de Cambio Climático, por dos métodos de cálculo de curvas IDF, para tres casos de estudio. En consecuencia, es importante evaluar las variaciones obtenidas en perspectiva del Cambio Climático respecto al escenario actual, por esta razón a continuación, se relaciona la comparación realizada para los periodos de retorno de 5, 25 y 100 años para cada caso de estudio (Ver Anexo 8 Comparación de resultados).

6.8.1 Cuenca Salitre - Molinos

Como ejercicio comparativo para el escenario de Cambio Climático SSP2-4.5 se graficaron los registros calculados en las estaciones pluviométricas Usaqué – Santa Ana (2120111) y Enmanuel D Alzón (2120123) y los valores obtenidos para la intensidad de los MCG definidos para el caso de estudio Salitre – Molinos. En la Figura 206 a Figura 211 se presentan los resultados obtenidos para los periodos de retorno de 5, 25 y 100 años para los métodos de cálculo de Pulgarín y CIACUA.

Los valores obtenidos sugieren un aumento en la intensidad para las proyecciones de precipitación por los dos métodos de cálculo respecto a los registros observados, el cual es más evidente para eventos de precipitación de corta duración y va disminuyendo a medida que aumenta el valor del intervalo del tiempo. Asimismo, se reconoció que para la segunda propuesta de cálculo de curvas IDF es mayor la diferencia en contraste con el escenario actual de las dos estaciones pluviométricas analizadas.

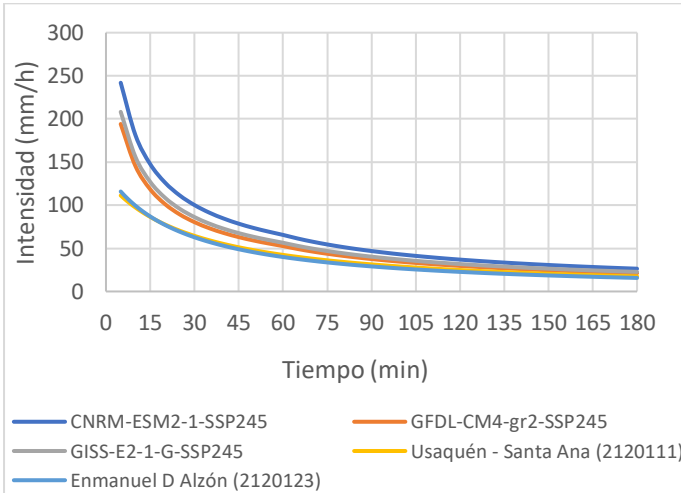


Figura 206 Comparación curvas IDF Pulgarín 5 años SSP2-4.5

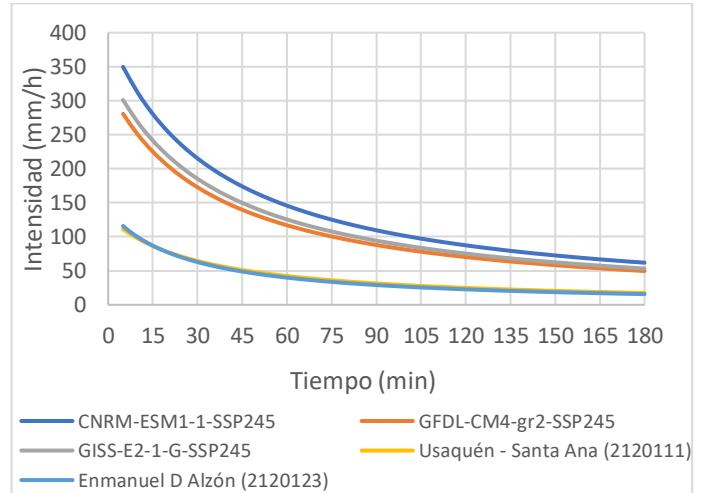


Figura 207 Comparación curvas IDF CIACUA 5 años SSP2-4.5

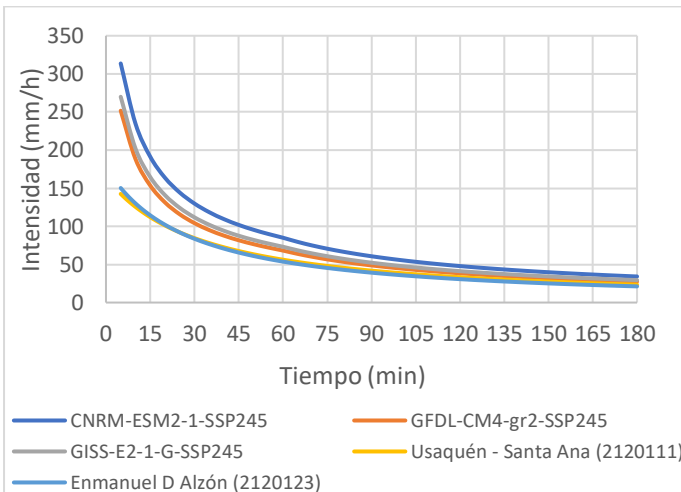


Figura 208 Comparación curvas IDF Pulgarín 25 años SSP2-4.5

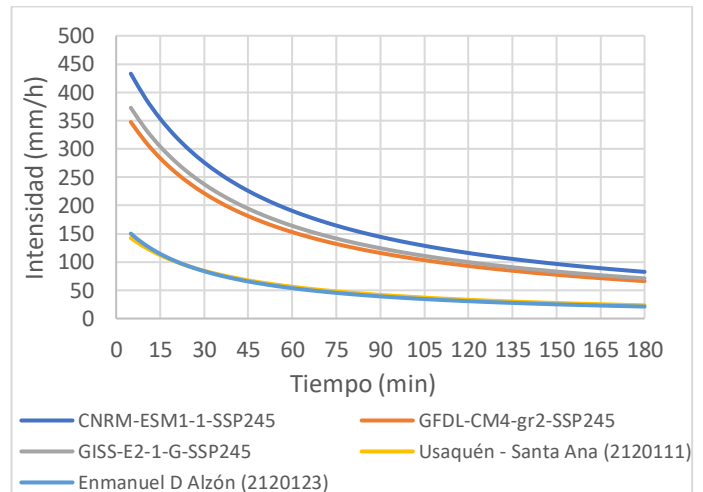


Figura 209 Comparación curvas IDF CIACUA 25 años SSP2-4.5

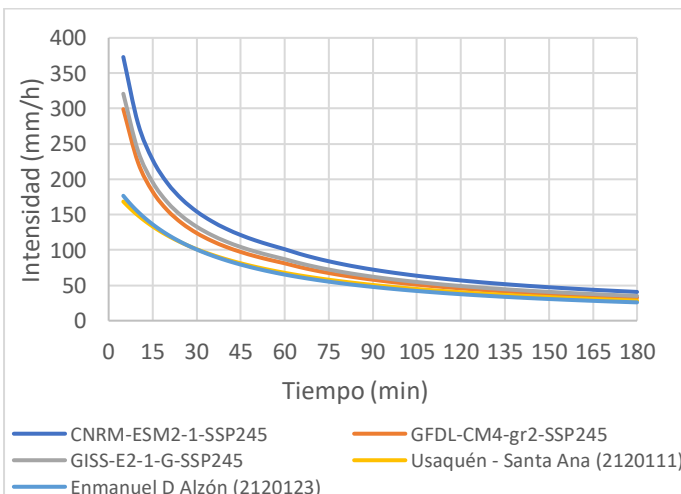


Figura 210 Comparación curvas IDF Pulgarín 100 años SSP2-4.5

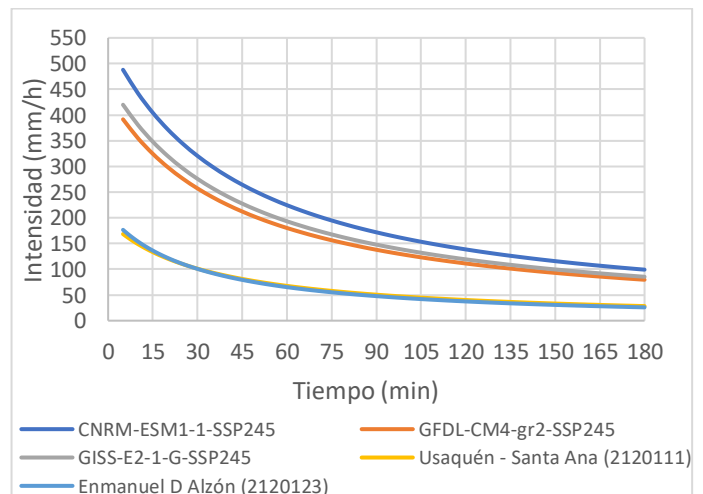


Figura 211 Comparación curvas IDF CIACUA 100 años SSP2-4.5



Por su parte, como resultado de la aplicación de estas propuestas para el SSP2-4.5 en comparación con el escenario actual, la respuesta de los MCG: CNRM-ESM2-1, GFDL-CM4-gr2 y GISS-E2-1-G respecto a los registros observados en las estaciones pluviométricas Usaquéen – Santa Ana (2120111) y Enmanuel D Alzón (2120123), sugieren un aumento en el volumen total de los eventos de precipitación, para el SSP2-4.5 dichos incrementos se relacionan en la Tabla 24 y Tabla 25.

Para este caso de estudio se identificó que el hietograma construido desde el modelo CNRM-ESM2-1 en el SSP2-4.5 generado el método CIACUA corresponde al que mayores valores de precipitación reportó para los tres periodos de retorno estudiados.

Tabla 24 Precipitación total hietogramas para el SSP2-4.5 Pulgarín

Periodo de retorno (años)	Usaquén – Santa Ana (2120111) (mm)	Enmanuel D Alzón (2120123) (mm)	CNRM-ESM2-1 (mm)	GFDL-CM4-gr2 (mm)	GISS-E2-1-G (mm)
5 años	34.61	33.49	53.33	42.79	45.90
25 años	45.51	44.73	69.14	55.48	59.51
100 años	54.51	53.91	82.19	65.95	70.74

Tabla 25 Precipitación total hietogramas para el SSP2-4.5 CIACUA

Periodo de retorno (años)	Usaquén – Santa Ana (2120111) (mm)	Enmanuel D Alzón (2120123) (mm)	CNRM-ESM2-1 (mm)	GFDL-CM4-gr2 (mm)	GISS-E2-1-G (mm)
5 años	34.61	33.49	59.17	55.78	56.90
25 años	45.51	44.73	76.88	72.68	74.07
100 años	54.51	53.91	91.23	86.43	88.02

La comparación entre los hietogramas obtenidos para el SSP2-4.5 y MCG establecidos previamente, los cuales fueron desarrollados desde las curvas IDF construidas con las metodologías de Pulgarín y CIACUA se presentan en la Figura 212 a Figura 217, en estos se puede observar que el modelo CNRM-ESM2-1 es el que mayor precipitación pico reporta para los tres periodos de retorno estudiados.

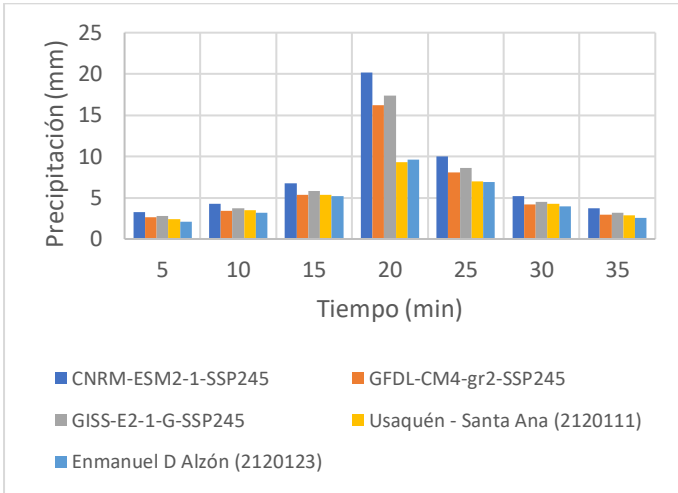


Figura 212 Comparación hietogramas 5 años Pulgarín SSP2-4.5

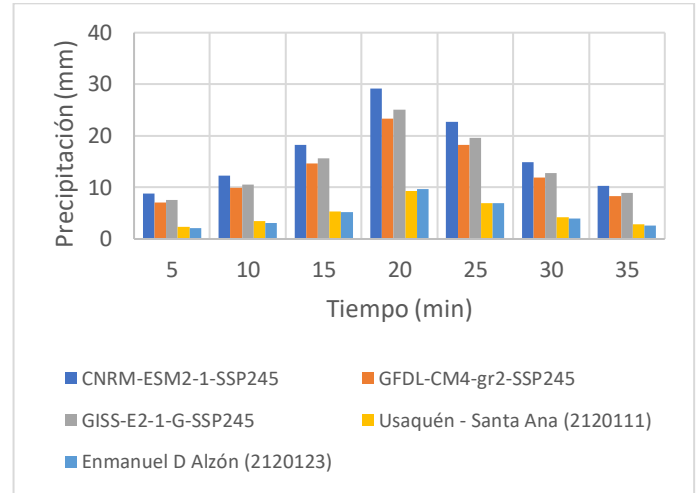


Figura 213 Comparación hietogramas 5 años CIACUA SSP2-4.5

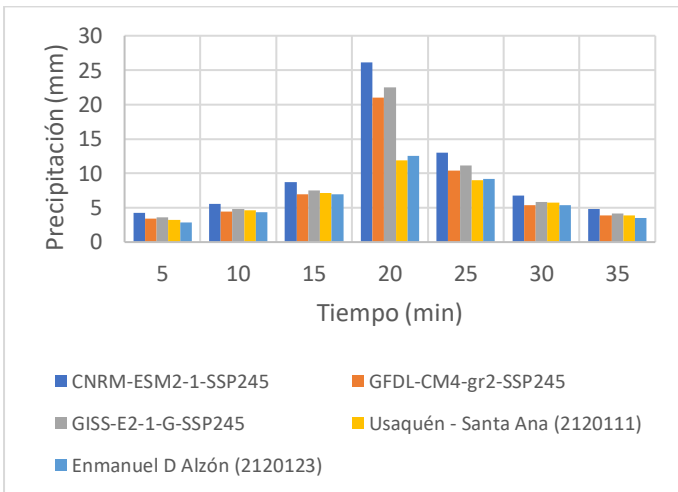


Figura 214 Comparación hietogramas 25 años Pulgarín SSP2-4.5

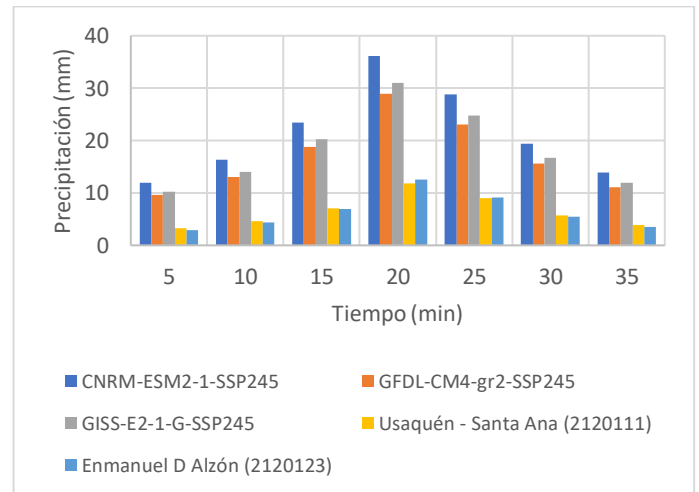


Figura 215 Comparación hietogramas 25 años CIACUA SSP2-4.5

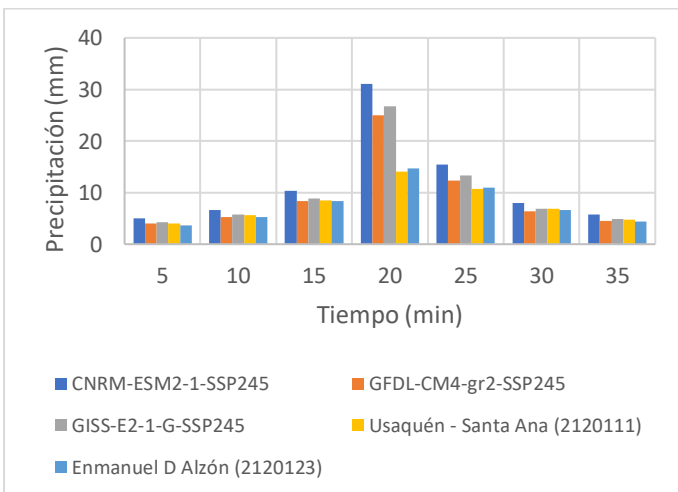


Figura 216 Comparación hietogramas 100 años Pulgarín SSP2-4.5

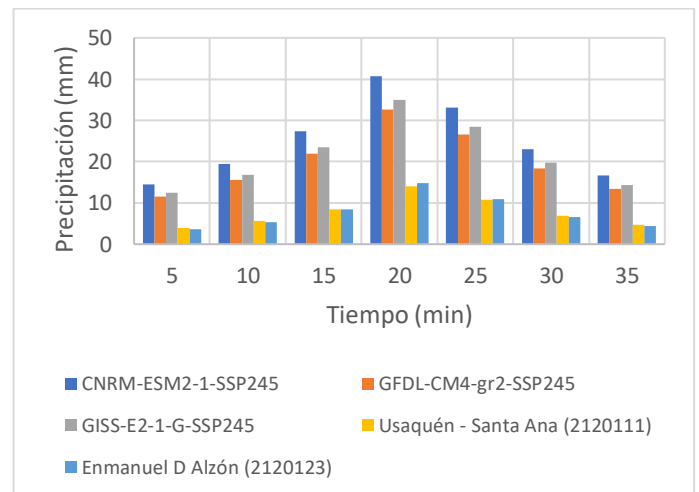


Figura 217 Comparación hietogramas 100 años CIACUA SSP2-4.5



En el caso del SSP5-8.5 se determinó que igualmente que, en el escenario de Cambio Climático anterior, en comparación con las estaciones pluviométricas Usaquéen – Santa Ana (2120111) y Enmanuel D Alzón (2120123), los valores reportados de intensidad para las curvas IDF de los MCG definidos para este caso de estudio en los periodos de retorno de 5, 25 y 100 años son superiores luego de la aplicación de los dos planteamientos de curvas IDF utilizados.

Los resultados obtenidos son presentados en la Figura 218 a Figura 223, en donde se puede evidenciar que para el caso de las curvas calculadas por el método de Pulgarín las diferencias entre los valores proyectados y actuales son menores respecto a la propuesta del CIACUA, a pesar de contar con intensidades iniciales más altas.

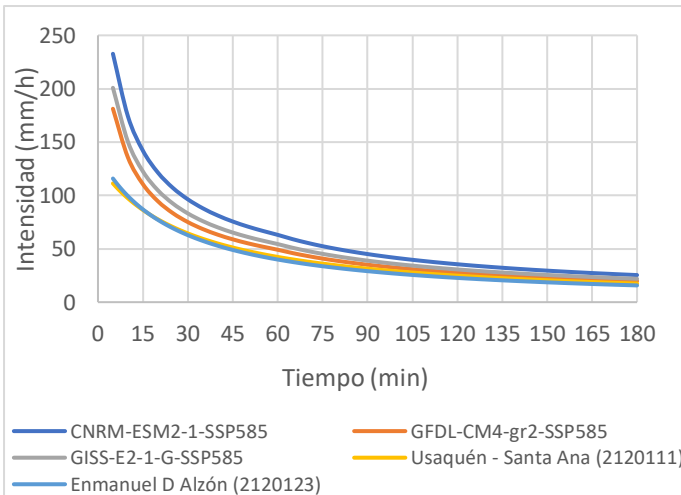


Figura 218 Comparación curvas IDF Pulgarín 5 años SSP5-8.5

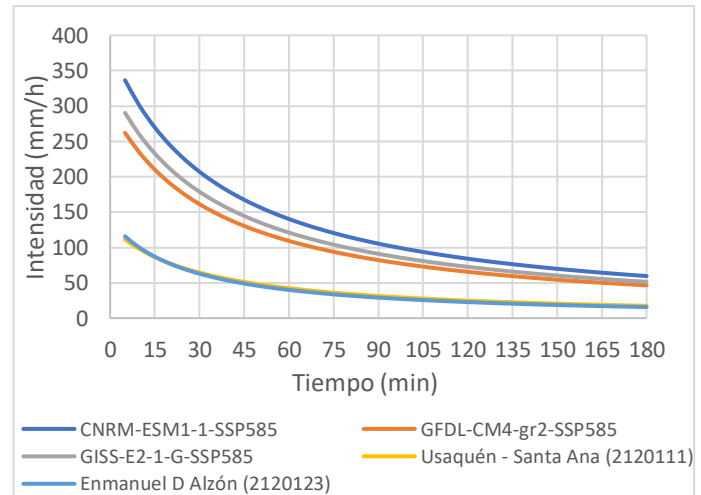


Figura 219 Comparación curvas IDF CIACUA 5 años SSP5-8.5

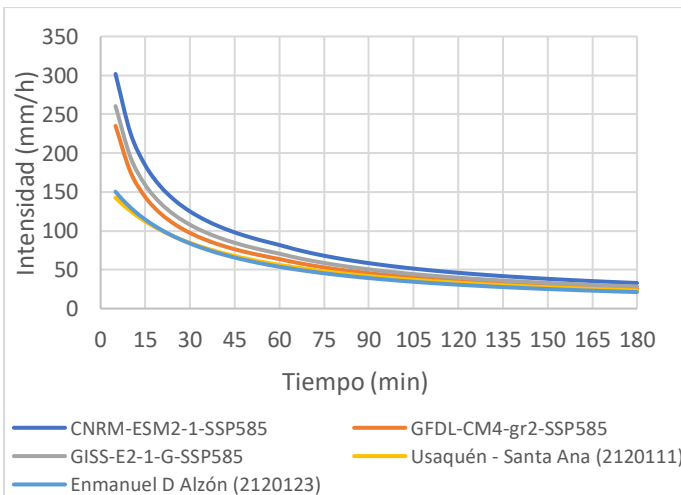


Figura 220 Comparación curvas IDF Pulgarín 25 años SSP5-8.5

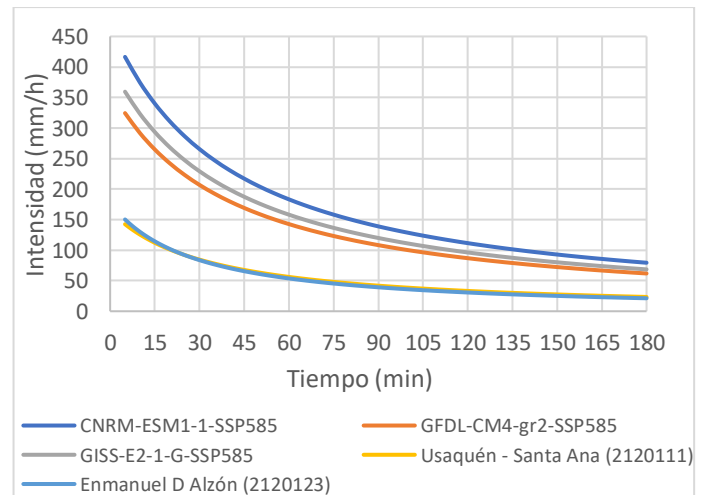


Figura 221 Comparación curvas IDF CIACUA 25 años SSP5-8.5

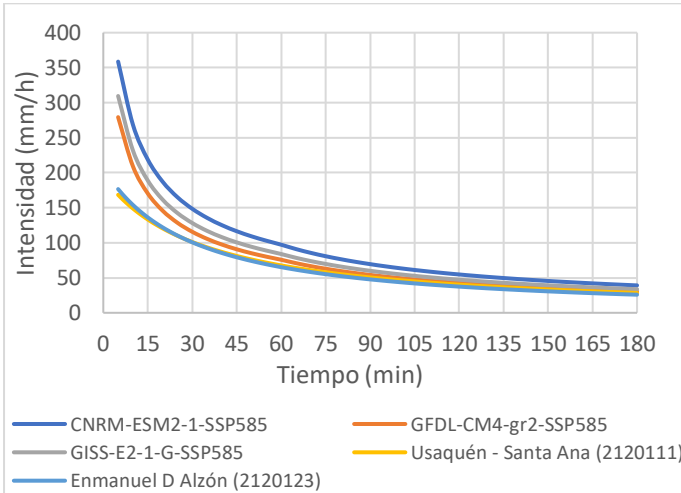


Figura 222 Comparación curvas IDF Pulgarín 100 años SSP5-8.5

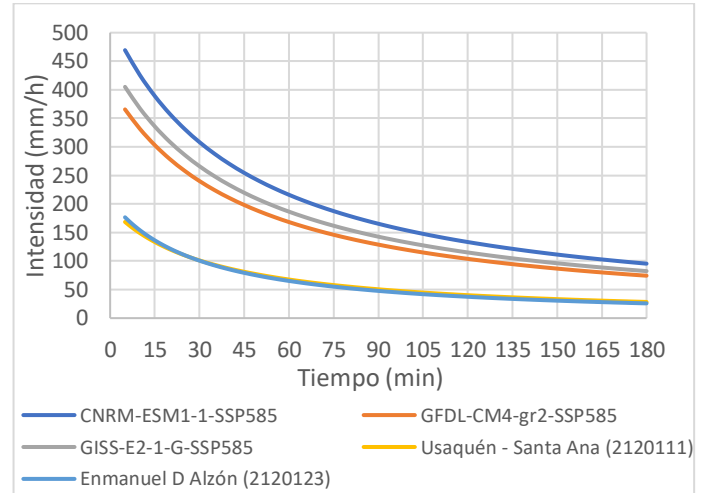


Figura 223 Comparación curvas IDF CIACUA 100 años SSP5-8.5

Para el SSP5-8.5 el resultado de los MCG utilizados en comparación con las estaciones pluviométricas Usaquéen – Santa Ana (2120111) y Enmanuel D Alzón (2120123) reflejaron que al igual que en el caso del SSP2-4.5 un aumento en el volumen total de precipitación para los tres periodos de retorno evaluados y los dos métodos de cálculo de las curvas IDF respecto al periodo actual, la comparación entre los hietogramas obtenidos es presentada en la Figura 224 a Figura 229, los valores mencionados se relacionan en la Tabla 26 y Tabla 27.

Tabla 26 Precipitación total hietogramas para el SSP5-8.5 Pulgarín

Periodo de retorno (años)	Usaquén – Santa Ana (2120111) (mm)	Enmanuel D Alzón (2120123) (mm)	CNRM-ESM2-1 (mm)	GFDL-CM4-gr2 (mm)	GISS-E2-1-G (mm)
5 años	34.61	33.49	51.30	39.95	44.28
25 años	45.51	44.73	66.52	51.80	57.41
100 años	54.51	53.91	79.07	61.58	68.24

Tabla 27 Precipitación total hietogramas para el SSP5-8.5 CIACUA

Periodo de retorno (años)	Usaquén – Santa Ana (2120111) (mm)	Enmanuel D Alzón (2120123) (mm)	CNRM-ESM2-1 (mm)	GFDL-CM4-gr2 (mm)	GISS-E2-1-G (mm)
5 años	34.61	33.49	58.60	54.65	56.33
25 años	45.51	44.73	76.16	71.28	73.36
100 años	54.51	53.91	90.42	84.82	87.21



En el SSP5-8.5 se identificaron volúmenes totales inferiores a los del SSP2-4.5, lo cual se encuentra relacionado con que para estos escenarios el valor de la precipitación media diaria obtenida a partir de los MCG fue menor en todos los casos. Además, el CNRM-ESM2-1 también produjo el mayor valor de precipitación para el intervalo evaluado en los tres periodos de retorno analizados.

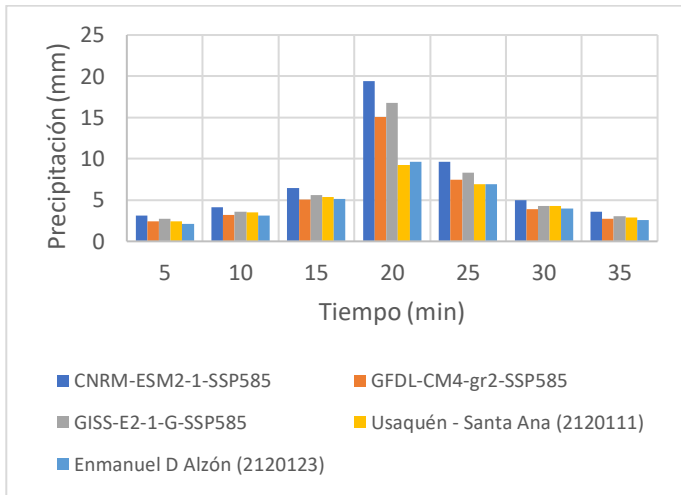


Figura 224 Comparación hietogramas 5 años Pulgarín SSP5-8.5

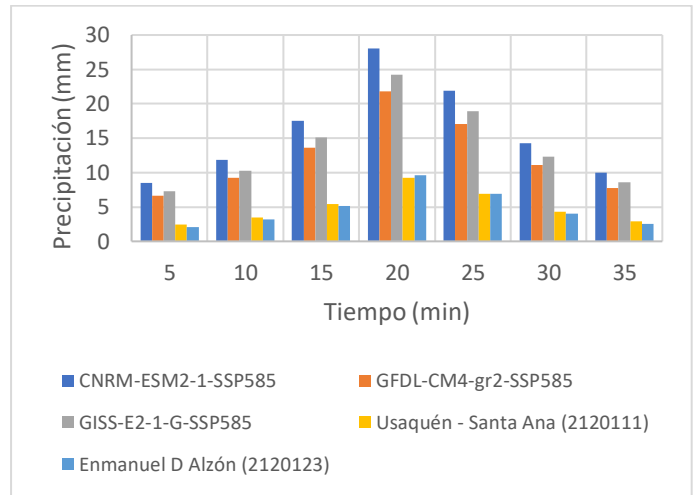


Figura 225 Comparación hietogramas 5 años CIACUA SSP5-8.5

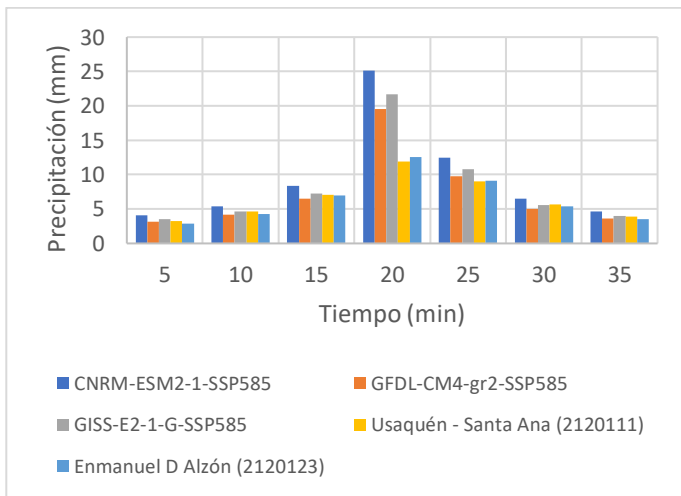


Figura 226 Comparación hietogramas 25 años Pulgarín SSP5-8.5

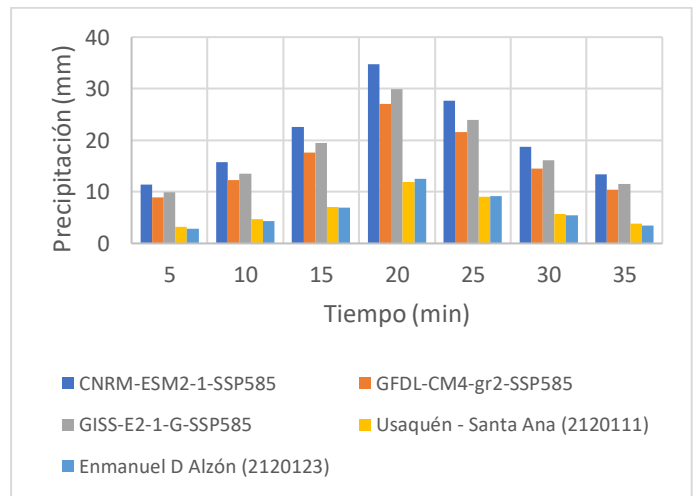


Figura 227 Comparación hietogramas 25 años CIACUA SSP5-8.5

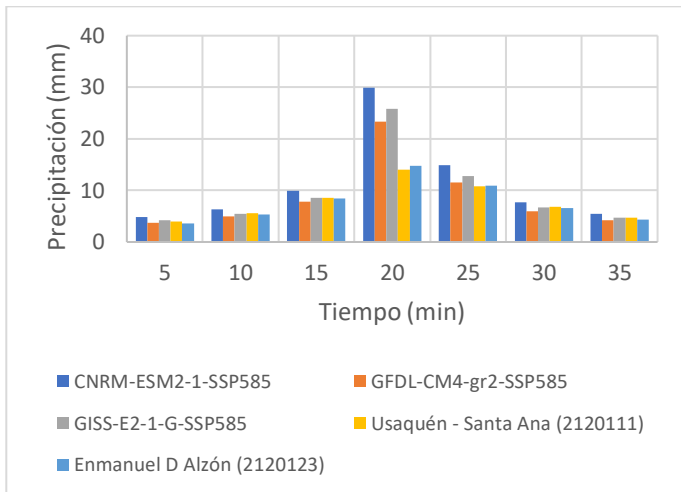


Figura 228 Comparación hietogramas 100 años Pulgarín SSP5-8.5

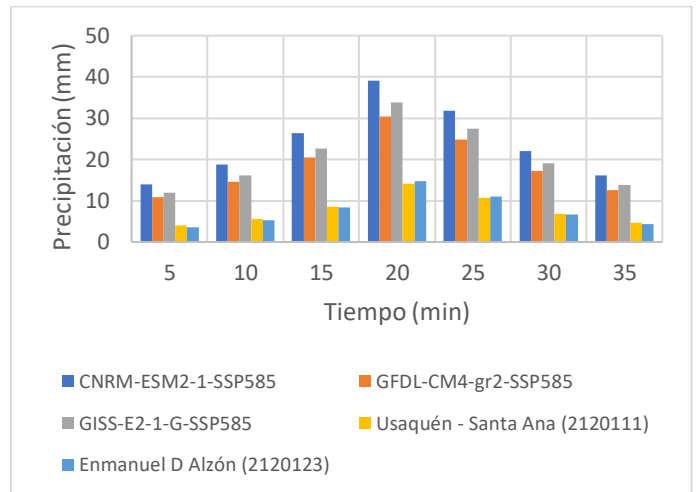


Figura 229 Comparación hietogramas 100 años CIACUA SSP5-8.5

6.8.2 Cuenca La Tinajas

Para la cuenca pluvial La Tinajas se realizó la comparación entre la información actual correspondiente a la estación pluviométrica Pedregal (2701481) respecto a los resultados de los MCG establecidos previamente para los dos escenarios de Cambio Climático (SSP2-4.5 y SSP5-8.5), teniendo en cuenta las dos metodologías de cálculo para las curvas IDF para la información proyectada en los periodos de retorno de 5, 25 y 100 años.

De este modo, fue posible reconocer el incremento de la intensidad para todos los casos, en donde para el método de Pulgarín se reportó una forma de las curvas más similar a las actuales que el planteamiento del CIACUA, es decir, estas son más cóncavas por el primero. En contraste, para el segundo se determinaron menores intensidades iniciales (Ver Figura 230 a Figura 235).

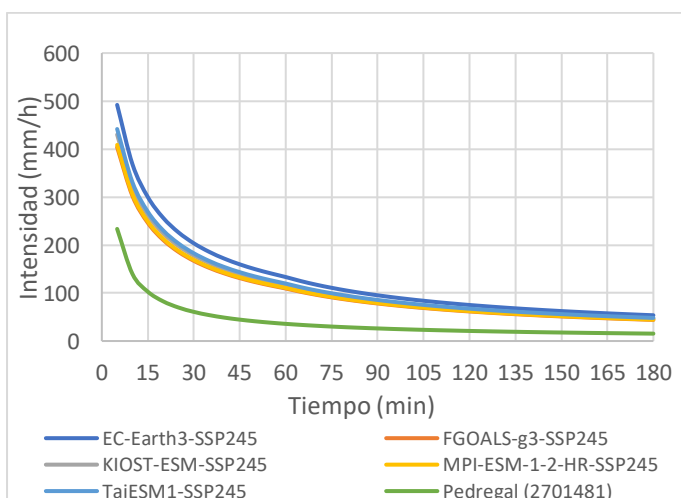


Figura 230 Comparación curvas IDF Pulgarín 5 años SSP2-4.5

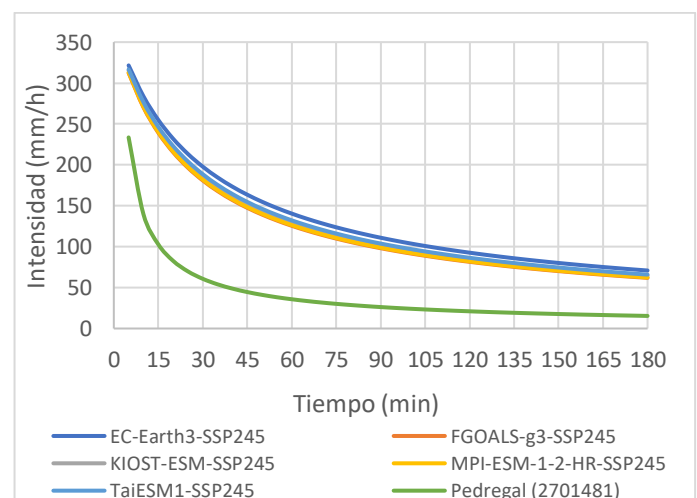


Figura 231 Comparación curvas IDF CIACUA 5 años SSP2-4.5

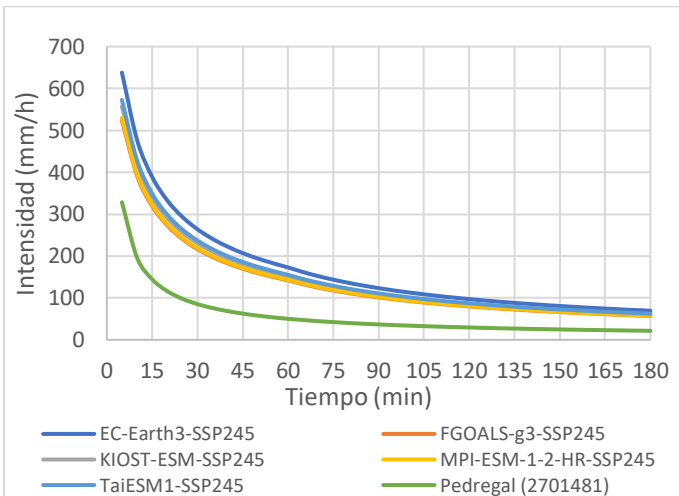


Figura 232 Comparación curvas IDF Pulgarín 25 años SSP2-4.5

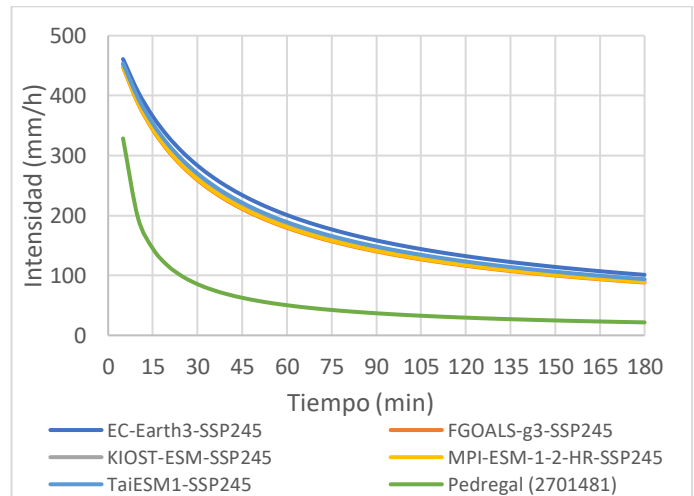


Figura 233 Comparación curvas IDF CIACUA 25 años SSP2-4.5

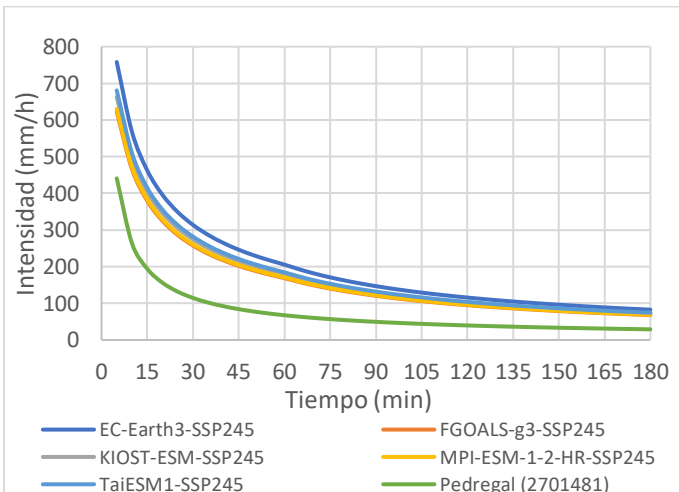


Figura 234 Comparación curvas IDF Pulgarín 100 años SSP2-4.5

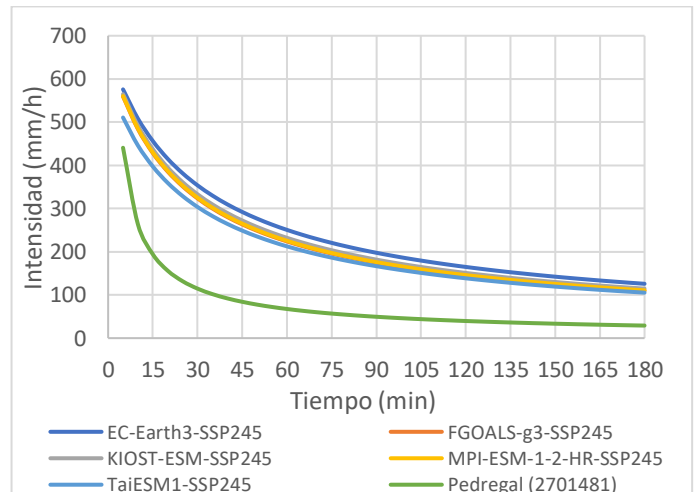


Figura 235 Comparación curvas IDF CIACUA 100 años SSP2-4.5

Para la cuenca pluvial La Tinajas la comparación para el SSP2-4.5 entre los MCG: EC-Earth3, FGOALS-g3, KIOST-ESM, MPI-ESM-1-2-HR y TaiESM1 y la estación pluviométrica Pedregal (2701481) permitió establecer los aumentos en el volumen total de precipitación de acuerdo con los hietogramas de diseño elaborados, los cuales son presentados en la Tabla 28 y Tabla 29.

Para el periodo de retorno de 5 años se identificó que el MCG a través del cual se definió un mayor valor de volumen de precipitación fue el EC-Earth3 en combinación con las curvas IDF producidas por el método de Pulgarín. No obstante, para los otros dos tiempos de retorno, el mismo modelo genero mayores valores de precipitación total bajo el planteamiento del CIACUA.



Tabla 28 Precipitación total hietogramas para el SSP2-4.5 Pulgarín

Periodo de retorno (años)	Pedregal (2701481) (mm)	EC-Earth3 (mm)	FGOALS-g3 (mm)	KIOST-ESM (mm)	MPI-ESM-1-2-HR (mm)	TaiESM1 (mm)
5 años	31.50	108.46	89.00	94.81	90.08	97.38
25 años	44.30	140.61	115.39	122.92	116.79	126.25
100 años	59.44	167.14	137.16	146.11	138.82	150.07

Tabla 29 Precipitación total hietogramas para el SSP2-4.5 CIACUA

Periodo de retorno (años)	Pedregal (2701481) (mm)	EC-Earth3 (mm)	FGOALS-g3 (mm)	KIOST-ESM (mm)	MPI-ESM-1-2-HR (mm)	TaiESM1 (mm)
5 años	31.50	107.71	98.00	101.08	98.58	102.39
25 años	44.30	154.17	140.21	144.65	141.06	146.53
100 años	59.44	192.51	175.05	180.59	176.10	182.95

En complemento, en la Figura 236 a Figura 241 se identifican los hietogramas construidos para los MCG definidos en este caso de estudio en las tres temporalidades seleccionadas para las metodologías de Pulgarín y CIACUA, a partir de estos fue posible reconocer que para la todas las duraciones a excepción la correspondiente al valor más alto de precipitación, los registros de precipitación son muchos menores en la estación pluviométrica Pedregal (2701481) respecto a los MCG, lo cual puede estar relacionado con la forma cóncava de las curvas IDF actuales.

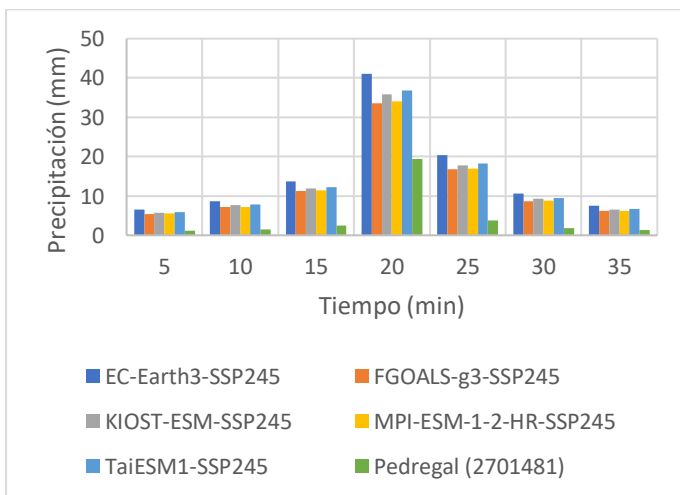


Figura 236 Comparación hietogramas 5 años Pulgarín SSP2-4.5

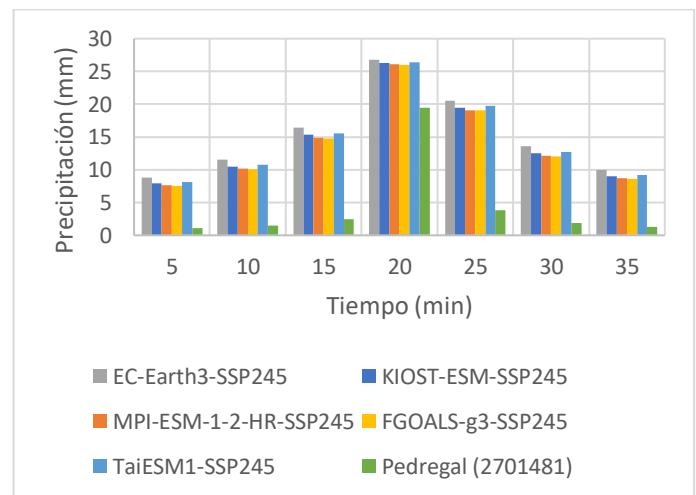


Figura 237 Comparación hietogramas 5 años CIACUA SSP2-4.5

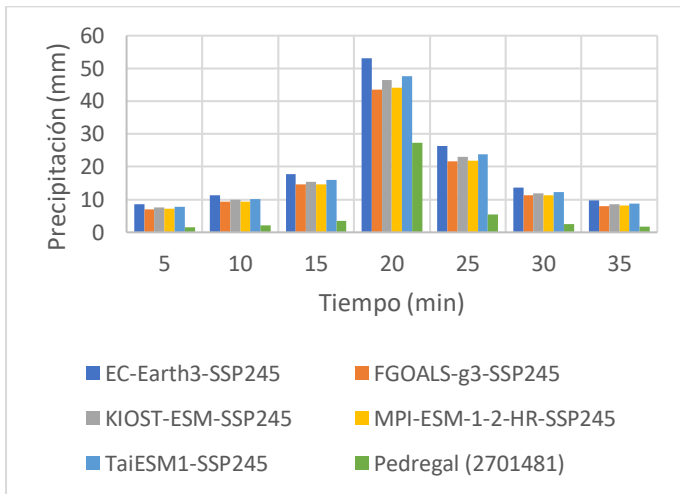


Figura 238 Comparación hietogramas 25 años Pulgarín SSP2-4.5

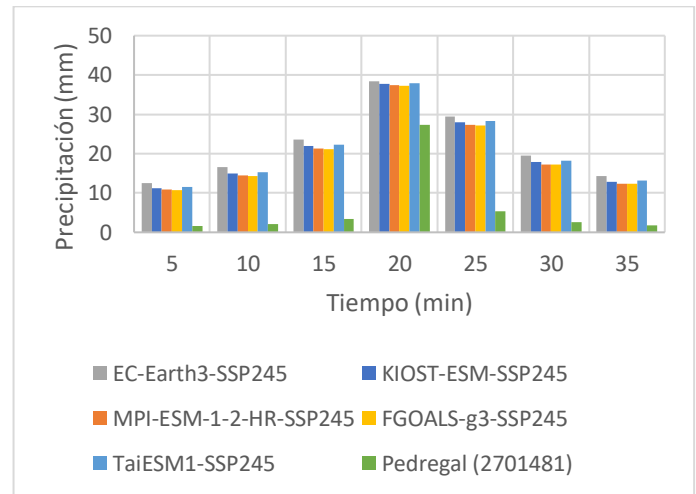


Figura 239 Comparación hietogramas 25 años CIACUA SSP2-4.5

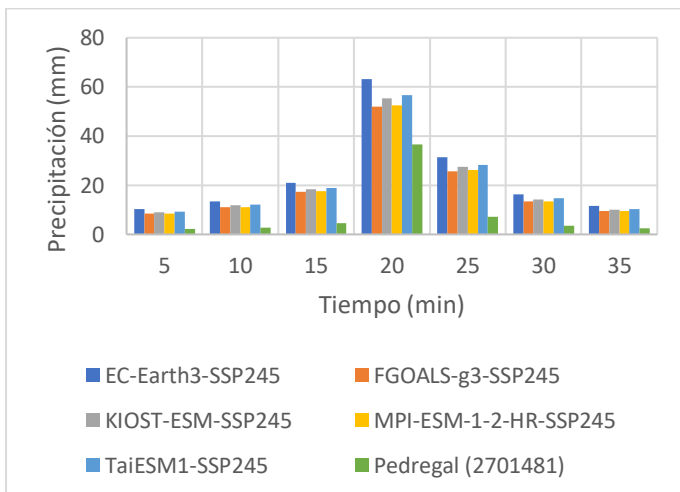


Figura 240 Comparación hietogramas 100 años Pulgarín SSP2-4.5

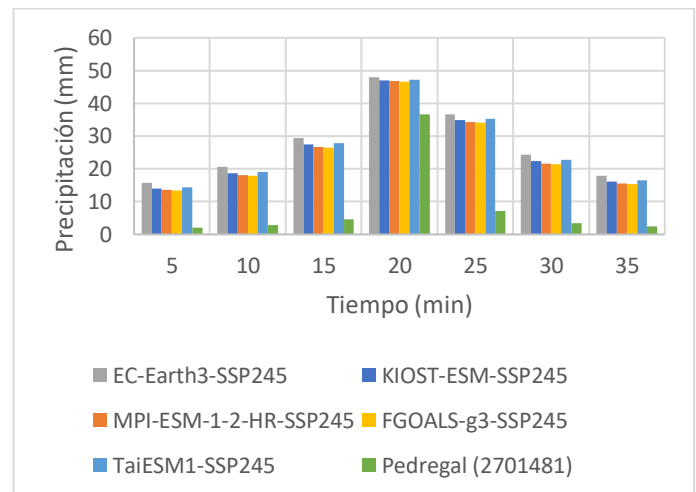


Figura 241 Comparación hietogramas 100 años CIACUA SSP2-4.5

Para el SSP5-8.5 se identificó la misma tendencia de la comparación de las curvas IDF que en el escenario de Cambio Climático anterior, en este se evaluaron igualmente los métodos de construcción de estas por las dos propuestas abordadas en esta investigación y los periodos de retorno de 5, 25 y 100 años.

Como resultado se obtuvo que las intensidades calculadas por estas dos propuestas son superiores en todos los casos respecto al escenario actual de la estación pluviométrica Pedregal (2701481), lo cual se traduce en un aumento general de la cantidad de lluvia para distintas duraciones de precipitación. Igualmente, para el caso del método de Pulgarín se reconoció mayor concavidad en las curvas IDF, así como registros superiores de intensidad para eventos de corta duración (5 a 15 minutos), mientras que por el CIACUA se determinó menor concavidad de las curvas e intensidades iniciales inferiores (Ver Figura 242 a Figura 247).

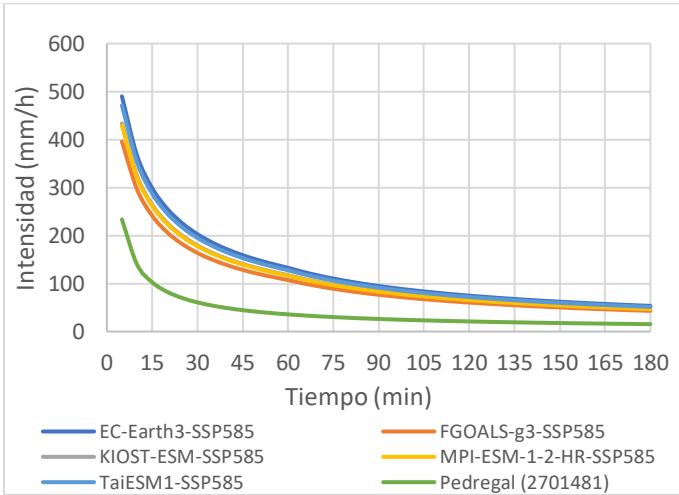


Figura 242 Comparación curvas IDF Pulgarín 5 años SSP5-8.5

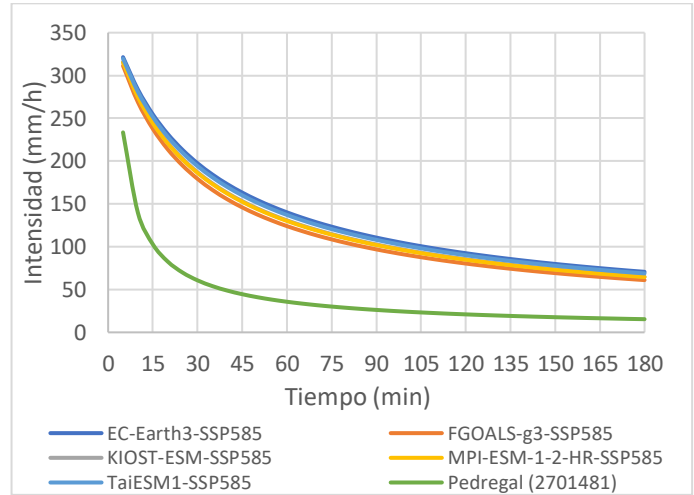


Figura 243 Comparación curvas IDF CIACUA 5 años SSP5-8.5

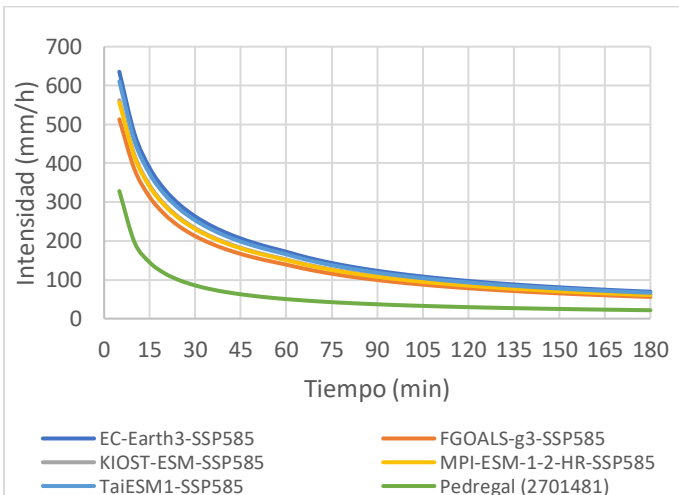


Figura 244 Comparación curvas IDF Pulgarín 25 años SSP5-8.5

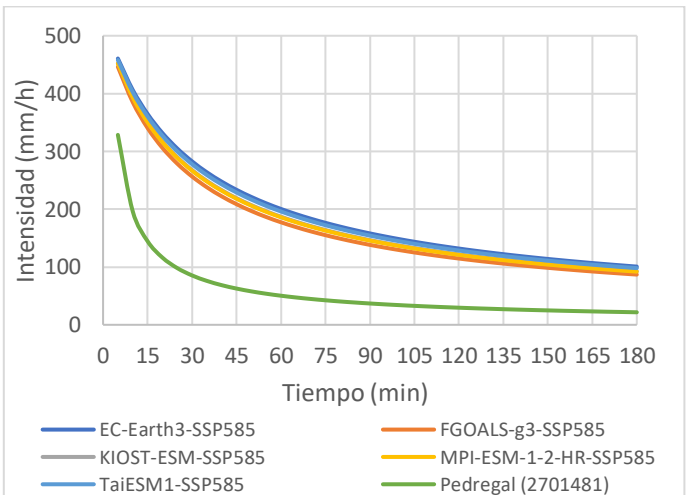


Figura 245 Comparación curvas IDF CIACUA 25 años SSP5-8.5

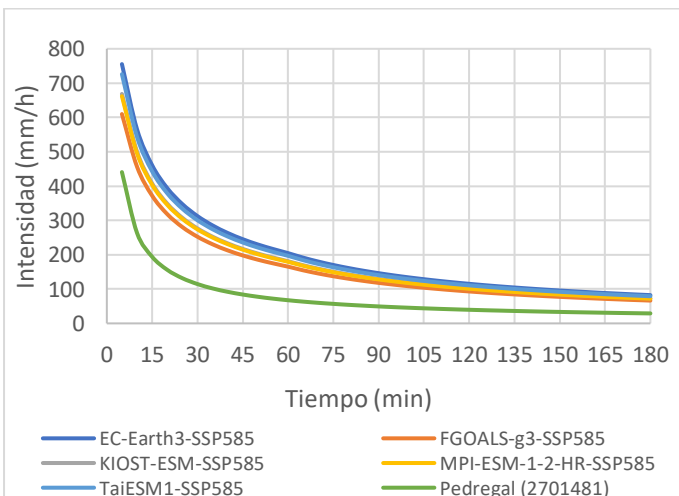


Figura 246 Comparación curvas IDF Pulgarín 100 años SSP5-8.5

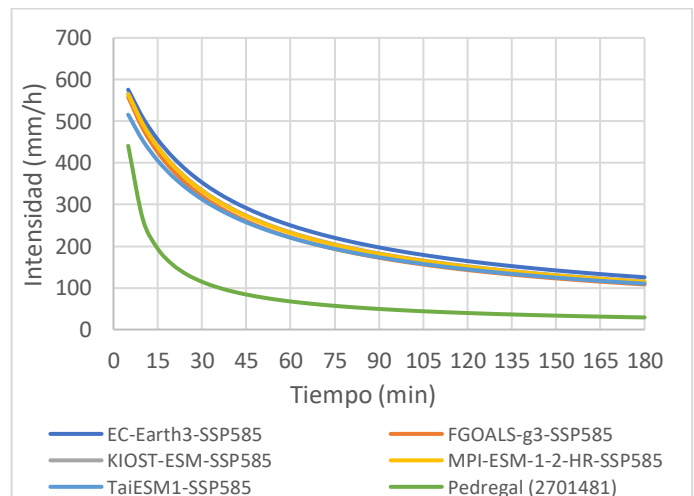


Figura 247 Comparación curvas IDF CIACUA 100 años SSP5-8.5



Para el SSP5-8.5 también se realizó una comparación entre los MCG y la estación pluviométrica Pedregal (2701481) en el sentido de establecer el volumen total reportado por los hietogramas de diseño para este escenario (Ver Tabla 30 y Tabla 31). De acuerdo con lo relacionado en la Figura 248 a Figura 253 se evidenció un aumento en este valor para todos los MCG analizados en los periodos de retorno definidos y los dos métodos de cálculo de las curvas IDF.

Tal como ocurrió para el SSP2-4.5 para el periodo de retorno de 5 años, EC-Earth3 fue el modelo que mayor precipitación total generó, este fue construido a partir de las curvas IDF del método de Pulgarín. Sin embargo, para este modelo en los otros dos tiempos de retorno se identificó un valor más alto en los hietogramas producidos desde la propuesta del CIACUA.

Tabla 30 Precipitación total hietogramas para el SSP5-8.5 Pulgarín

Periodo de retorno (años)	Pedregal (2701481) (mm)	EC-Earth3 (mm)	FGOALS-g3 (mm)	KIOST-ESM (mm)	MPI-ESM-1-2-HR (mm)	TaiESM1 (mm)
5 años	31.50	108.06	87.25	95.62	94.68	103.87
25 años	44.30	140.09	113.11	123.97	122.74	134.66
100 años	59.44	166.52	134.45	147.36	145.90	160.06

Tabla 31 Precipitación total hietogramas para el SSP5-8.5 CIACUA

Periodo de retorno (años)	Pedregal (2701481) (mm)	EC-Earth3 (mm)	FGOALS-g3 (mm)	KIOST-ESM (mm)	MPI-ESM-1-2-HR (mm)	TaiESM1 (mm)
5 años	31.50	107.53	97.03	101.50	101.01	105.57
25 años	44.30	153.91	138.82	145.25	144.55	151.10
100 años	59.44	192.18	173.31	181.34	180.47	188.66

Al igual que en el escenario anterior, los resultados obtenidos reflejan el aumento en la precipitación en perspectiva del Cambio Climático, de modo que en todos los casos los MCG reportaron mayores cantidades de precipitación. Otro detalle para considerar se relaciona con la magnitud del volumen correspondiente al periodo actual, el cual es considerablemente más bajo para todas las duraciones exceptuando el intervalo en el cual se presenta el valor pico.

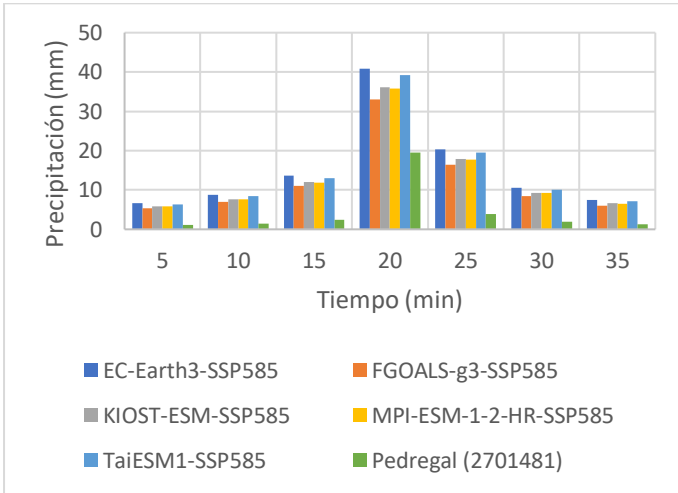


Figura 248 Comparación hietogramas 5 años Pulgarín SSP5-8.5

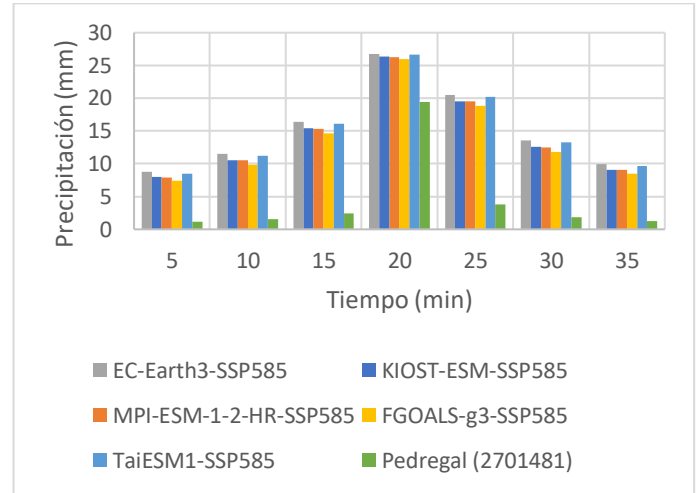


Figura 249 Comparación hietogramas 5 años CIACUA SSP5-8.5

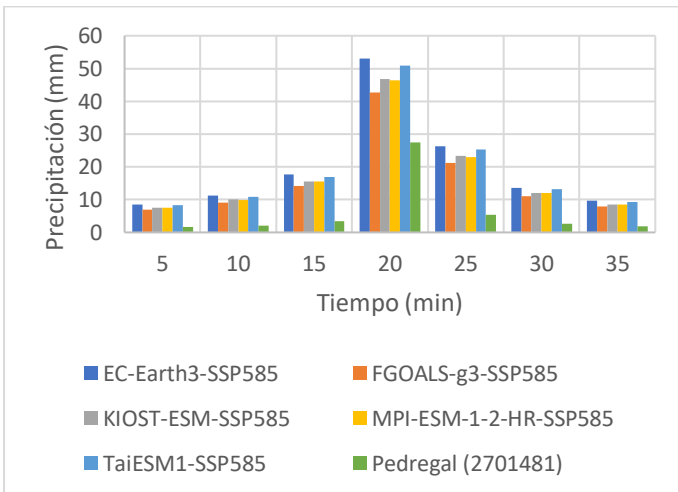


Figura 250 Comparación hietogramas 25 años Pulgarín SSP5-8.5

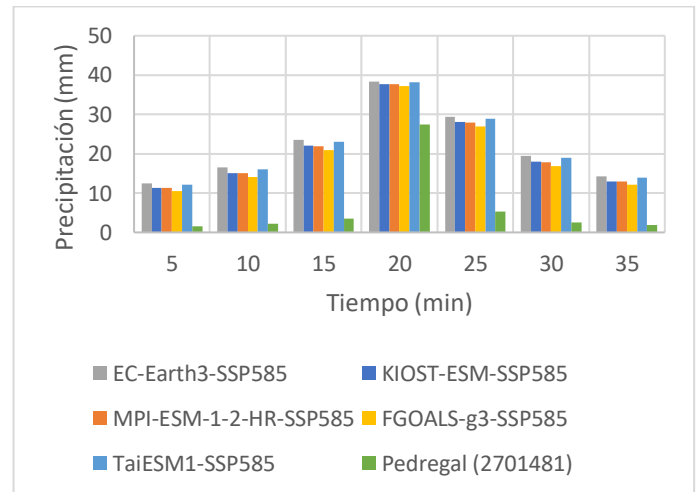


Figura 251 Comparación hietogramas 25 años CIACUA SSP5-8.5

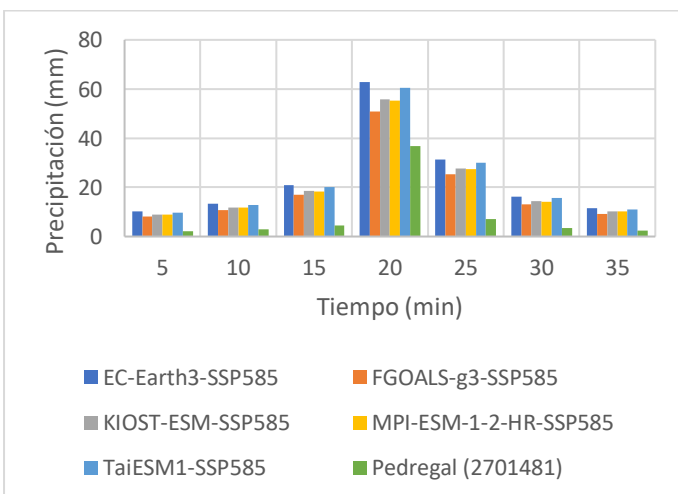


Figura 252 Comparación hietogramas 100 años Pulgarín SSP5-8.5

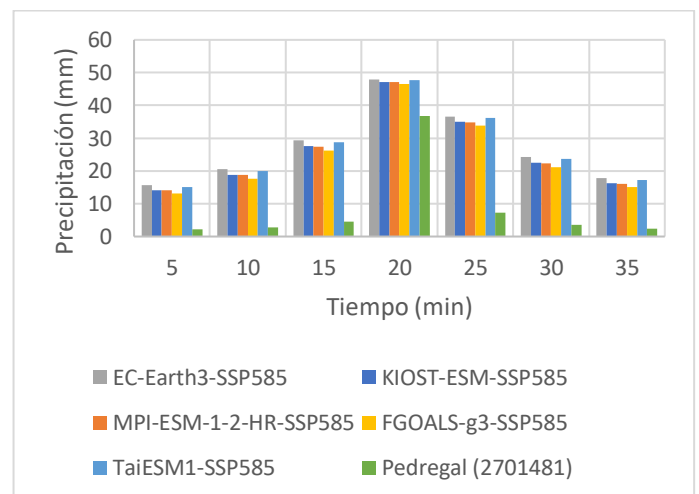


Figura 253 Comparación hietogramas 100 años CIACUA SSP5-8.5



6.8.3 Cuenca La Doctora

Para las curvas IDF de los periodos de retorno de 5, 25 y 100 años en el caso de estudio de la cuenca pluvial La Doctora también se realizó la comparación entre el escenario actual a partir de las estaciones pluviométricas Ayurá (2701093) y San Antonio del Prado (2701038) y las proyecciones de Cambio Climático para cada horizonte evaluado (SSP2-4.5 y SSP5-8.5) para los dos métodos de cálculo de curvas IDF planteados.

Las intensidades obtenidas para las proyecciones construidas para los diferentes periodos de retorno siempre fueron superiores a los valores actuales reportados por EPM, algunos aspectos a tener en cuenta incluyen que al igual que en el caso de estudio anterior, las curvas IDF definidas por la metodología del CIACUA son menos cóncavas respecto a las establecidas para el periodo actual, mientras que en el método de Pulgarín su forma describe mayor similitud entre estas, aunque las intensidades iniciales en este son significativamente superiores a los valores actuales (Ver Figura 254 a Figura 259).

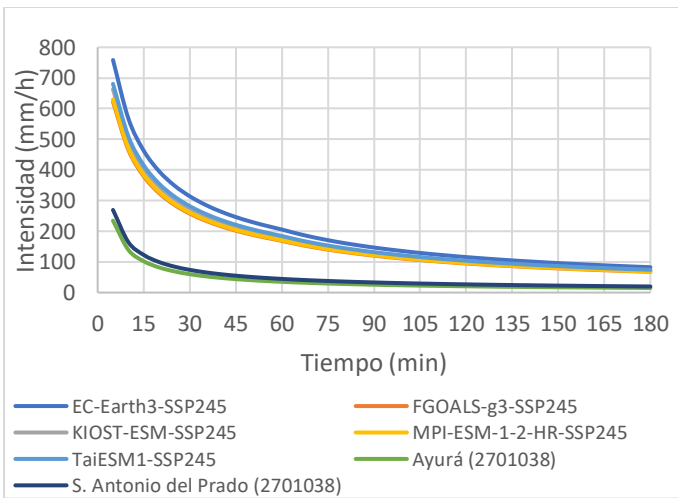


Figura 254 Comparación curvas IDF Pulgarín 5 años SSP2-4.5

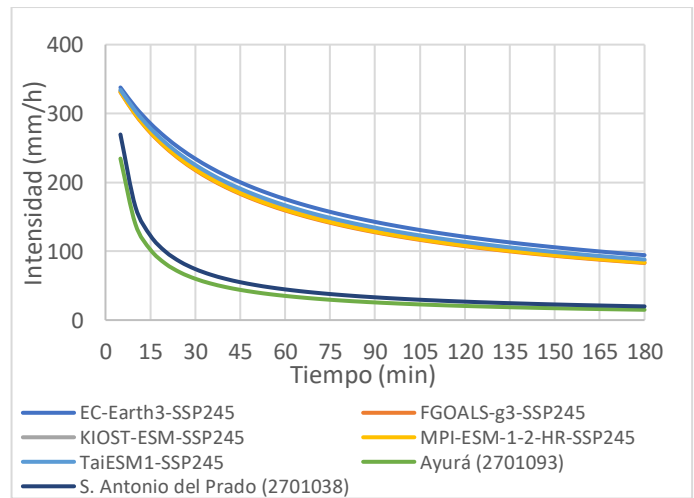


Figura 255 Comparación curvas IDF CIACUA 5 años SSP2-4.5

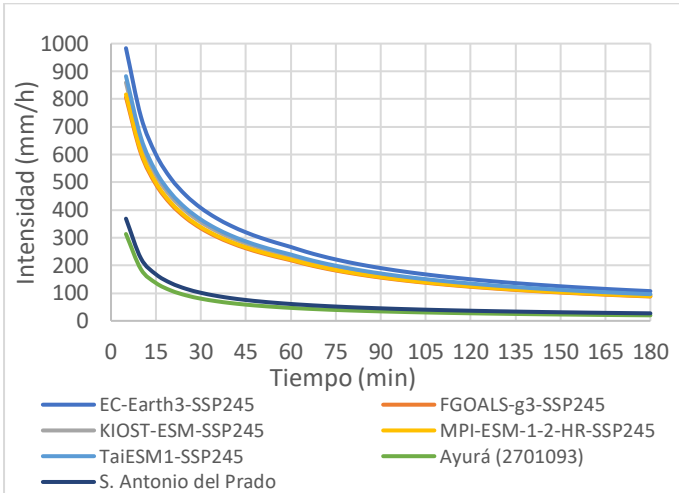


Figura 256 Comparación curvas IDF Pulgarín 25 años SSP2-4.5

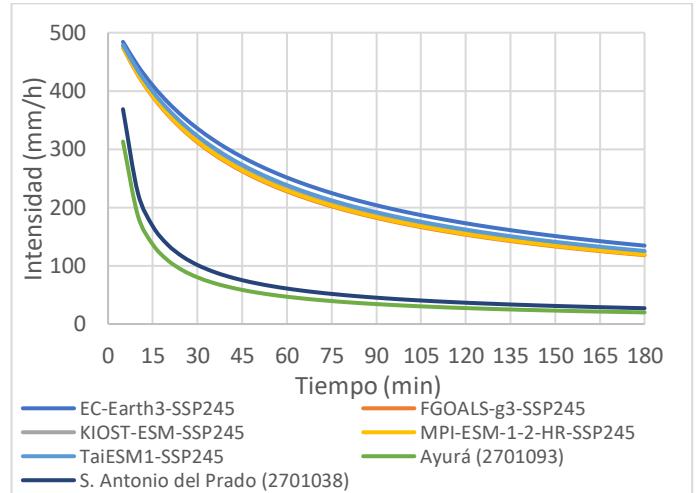


Figura 257 Comparación curvas IDF CIACUA 25 años SSP2-4.5

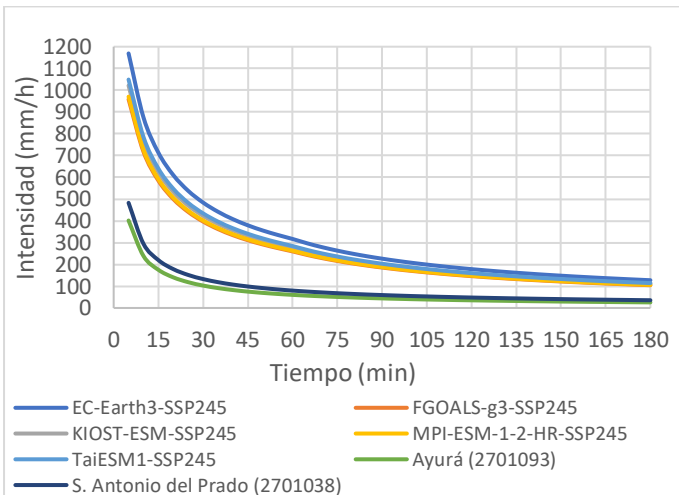


Figura 258 Comparación curvas IDF Pulgarín 100 años SSP2-4.5

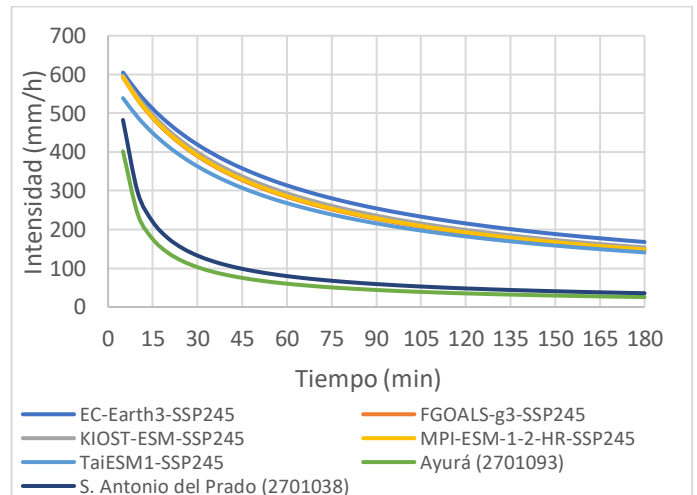


Figura 259 Comparación curvas IDF CIACUA 100 años SSP2-4.5

En la cuenca pluvial La Doctora para el escenario SSP2-4.5 los resultados obtenidos para los MCG: EC-Earth3, FGOALS-g3, KIOST-ESM, MPI-ESM-1-2-HR y TaiESM1 respecto a las estaciones pluviométricas Ayurá (2701093) y San Antonio del Prado (2701038) representan un aumento en el volumen de la precipitación de los hietogramas equivalente a lo reportado en la Tabla 32 y Tabla 33, para cada periodo de retorno y proceso de cálculo de las curvas IDF correspondientes.

En este caso, para todos los resultados de los MCG y tiempos de retorno desde la metodología de Pulgarín para la construcción de curvas IDF se obtuvieron valores más considerables respecto al otro método.



Tabla 32 Precipitación total hietogramas para el SSP2-4.5 Pulgarín

Periodo de retorno (años)	Ayurá (2701093) (mm)	San Antonio del Prado (2701038) (mm)	EC-Earth3 (mm)	FGOALS-g3 (mm)	KIOST-ESM (mm)	MPI-ESM-1-2-HR (mm)	TaiESM1 (mm)
5 años	31.07	38.59	167.24	137.11	146.16	138.86	150.08
25 años	41.50	52.78	216.81	177.75	189.48	180.02	194.56
100 años	53.24	69.12	257.71	211.28	225.23	213.98	231.27

Tabla 33 Precipitación total hietogramas para el SSP2-4.5 CIACUA

Periodo de retorno (años)	Ayurá (2701093) (mm)	San Antonio del Prado (2701038) (mm)	EC-Earth3 (mm)	FGOALS-g3 (mm)	KIOST-ESM (mm)	MPI-ESM-1-2-HR (mm)	TaiESM1 (mm)
5 años	31.07	38.59	129.18	119.37	122.55	120.01	123.86
25 años	41.50	52.78	185.02	170.93	175.49	171.84	177.37
100 años	53.24	69.12	231.10	213.47	219.17	214.61	221.53

En el mismo sentido, la Figura 260 a Figura 265 representan de forma gráfica los volúmenes de precipitación para cada intervalo de tiempo, así como para cada MCG y las estaciones pluviométricas Ayurá (2701093) y San Antonio del Prado (2701038), de este modo fue posible identificar que posiblemente por la forma cóncava de las curvas IDF actuales, los resultados para todas las duraciones a excepción del valor más alto de precipitación son mucho menores que los establecidos a través de los MCG.

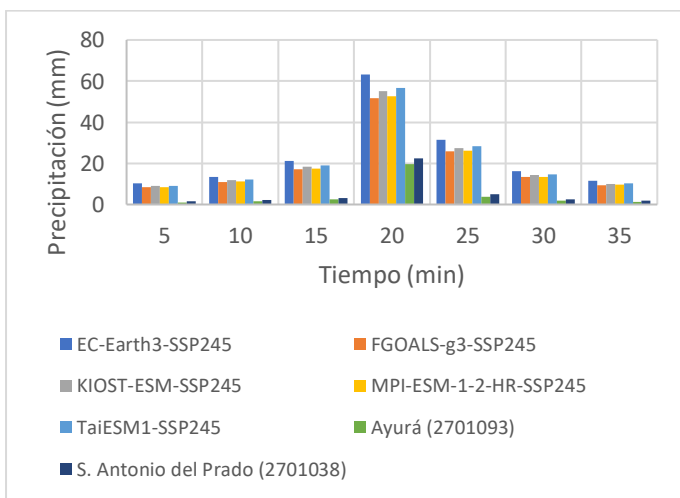


Figura 260 Comparación hietogramas 5 años Pulgarín SSP2-4.5

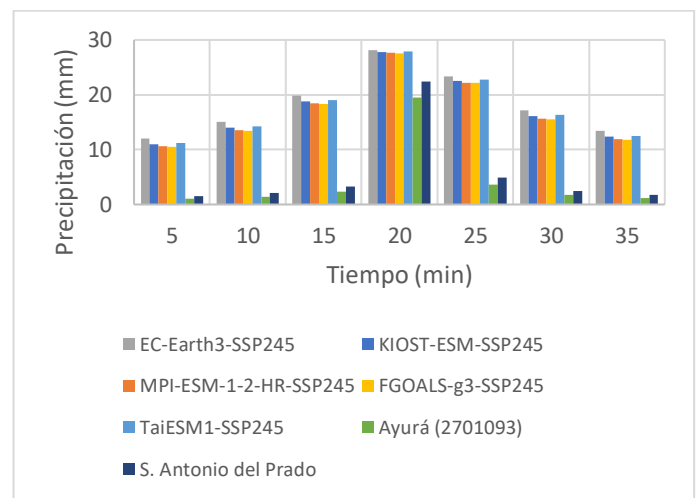


Figura 261 Comparación hietogramas 5 años CIACUA SSP2-4.5

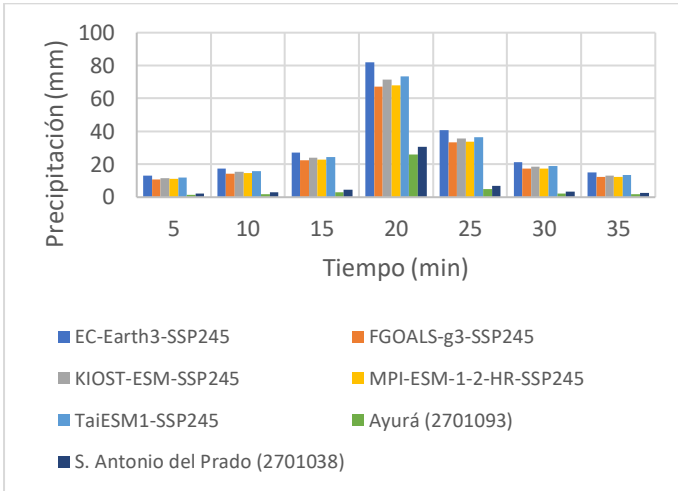


Figura 262 Comparación hietogramas 25 años Pulgarín SSP2-4.5

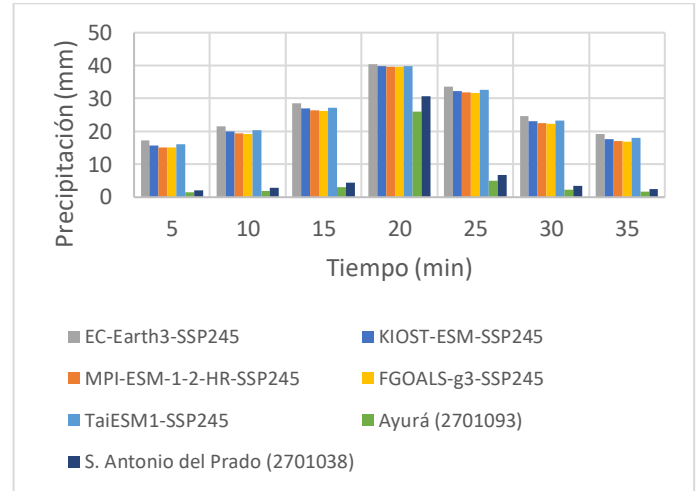


Figura 263 Comparación hietogramas 25 años CIACUA SSP2-4.5

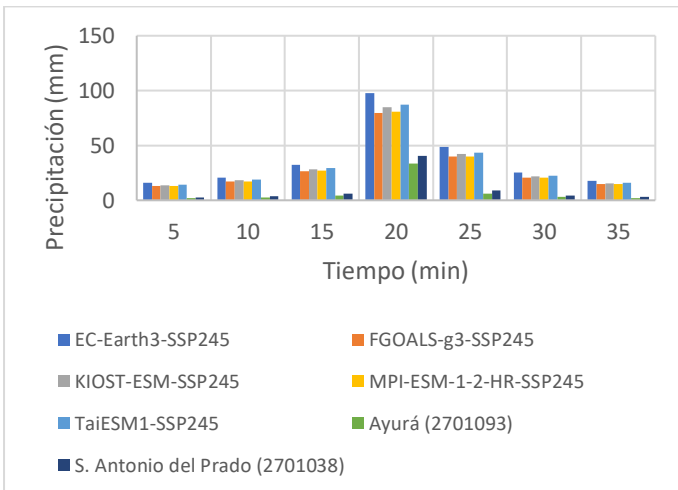


Figura 264 Comparación hietogramas 100 años Pulgarín SSP2-4.5

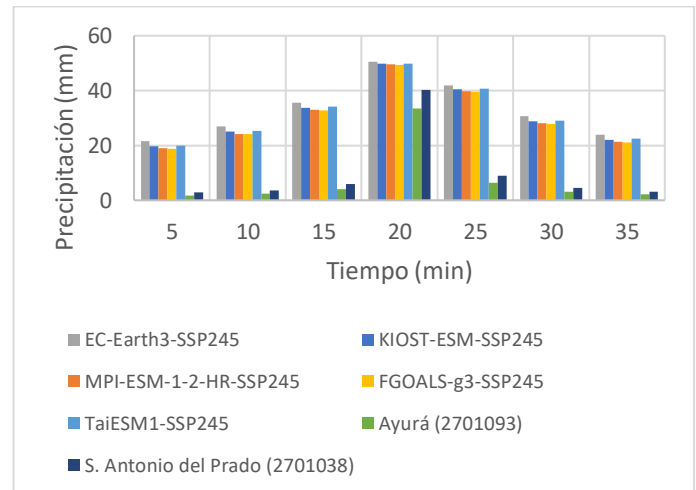


Figura 265 Comparación hietogramas 100 años CIACUA SSP2-4.5

Por su parte, para el SSP5-8.5 se desarrolló el mismo análisis que en el escenario de Cambio Climático anterior evidenciando un incremento en todas las curvas IDF correspondientes a los periodos de retorno de 5, 25 y 100 años y construidas bajo los planteamientos de Pulgarín y CIACUA, para todos los MCG, en comparación con la información actual de las estaciones pluviométricas Ayurá (2701093) y San Antonio del Prado (2701038), tal como puede observarse en la Figura 266 a Figura 271.

El incremento en la intensidad reconocido para todas las duraciones se encuentra relacionado con que para la propuesta de Pulgarín y CIACUA estas fueron afectadas por el Cambio Climático, así se logró identificar que, en el primer planteamiento estas cuentan con intensidades muy superiores para eventos cortos de precipitación (5 a 15 minutos), mientras que el segundo describe curvas menos cóncavas en comparación con las establecidas para el periodo actual.

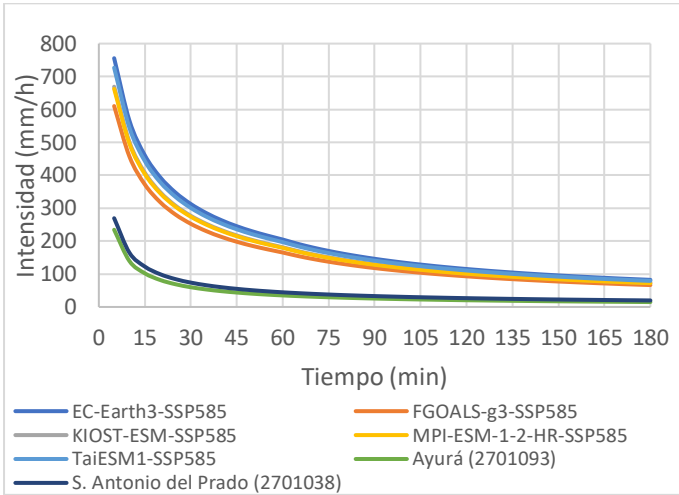


Figura 266 Comparación curvas IDF Pulgarín 5 años SSP5-8.5

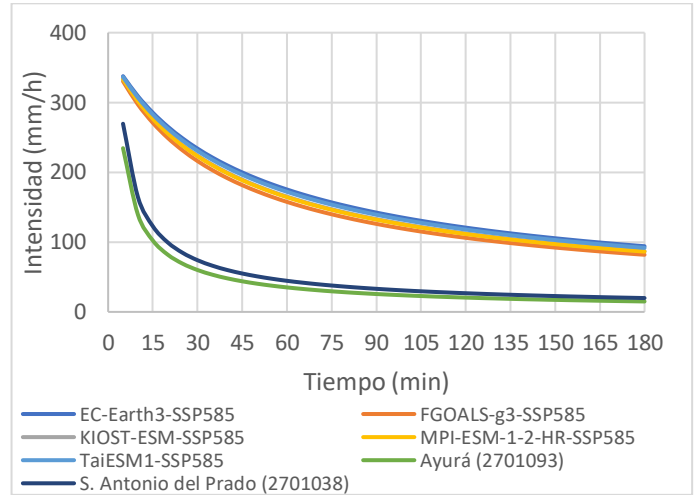


Figura 267 Comparación curvas IDF CIACUA 5 años SSP5-8.5

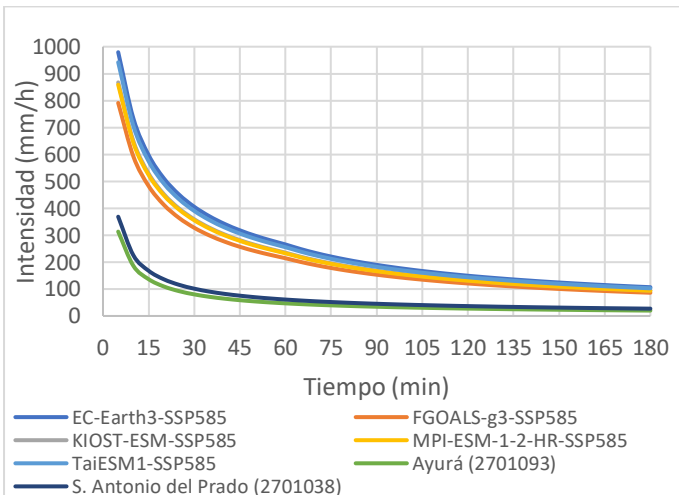


Figura 268 Comparación curvas IDF Pulgarín 25 años SSP5-8.5

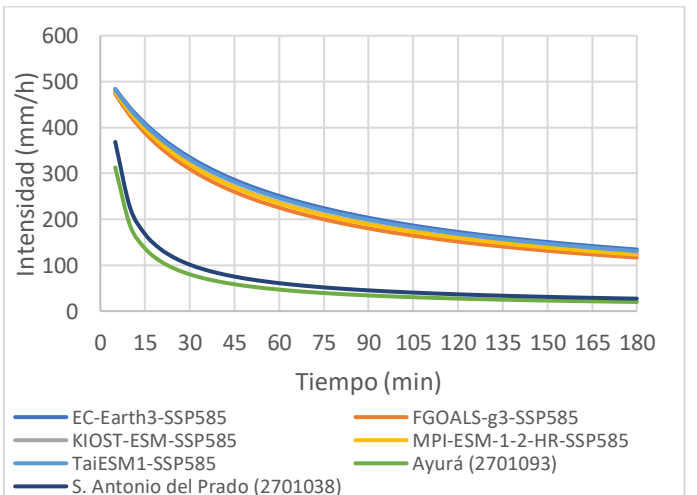


Figura 269 Comparación curvas IDF CIACUA 25 años SSP5-8.5

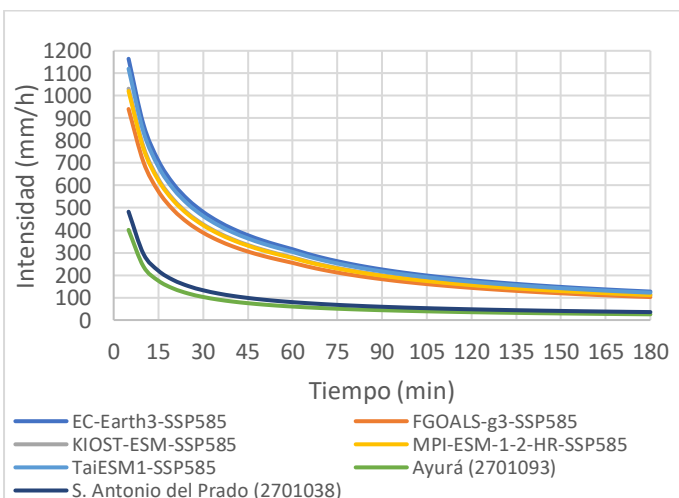


Figura 270 Comparación curvas IDF Pulgarín 100 años SSP5-8.5

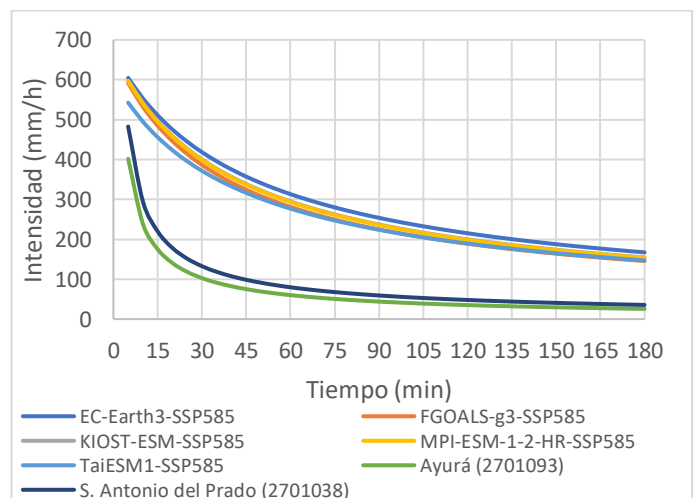


Figura 271 Comparación curvas IDF CIACUA 100 años SSP5-8.5



Para el SSP5-8.5 los resultados obtenidos en los hietogramas de diseño (Ver Figura 272 a Figura 277) determinaron que al igual que en el SSP2-4.5 el volumen total reportado por los hietogramas de diseño para todos los MCG en los tres periodos de retorno evaluados y los dos métodos de cálculo de las curvas IDF es superior en comparación con el escenario actual, tal como se evidencia en la Tabla 34 y Tabla 35.

Tabla 34 Precipitación total hietogramas para el SSP5-8.5 Pulgarín

Periodo de retorno (años)	Ayurá (2701093) (mm)	San Antonio del Prado (2701038) (mm)	EC-Earth3 (mm)	FGOALS-g3 (mm)	KIOST-ESM (mm)	MPI-ESM-1-2-HR (mm)	TaiESM1 (mm)
5 años	31.07	38.59	166.56	134.54	147.51	146.03	160.21
25 años	41.50	52.78	215.93	174.42	191.23	189.31	207.70
100 años	53.24	69.12	256.67	207.32	227.31	225.02	246.88

Tabla 35 Precipitación total hietogramas para el SSP5-8.5 CIACUA

Periodo de retorno (años)	Ayurá (2701093) (mm)	San Antonio del Prado (2701038) (mm)	EC-Earth3 (mm)	FGOALS-g3 (mm)	KIOST-ESM (mm)	MPI-ESM-1-2-HR (mm)	TaiESM1 (mm)
5 años	31.07	38.59	128.99	118.43	123.00	122.50	127.08
25 años	41.50	52.78	184.74	169.58	176.14	175.42	182.00
100 años	53.24	69.12	230.74	211.78	219.99	219.09	227.32

Finalmente, tras realizar la comparación para este escenario de Cambio Climático se evidenció un incremento en la cantidad de lluvia para los tres periodos de retorno estudiados en comparación con los registros actuales para todos los MCG, en donde el mayor aumento fue reportado por el MCG EC-Earth3 en el caso de las curvas IDF originadas con el método de Pulgarín.

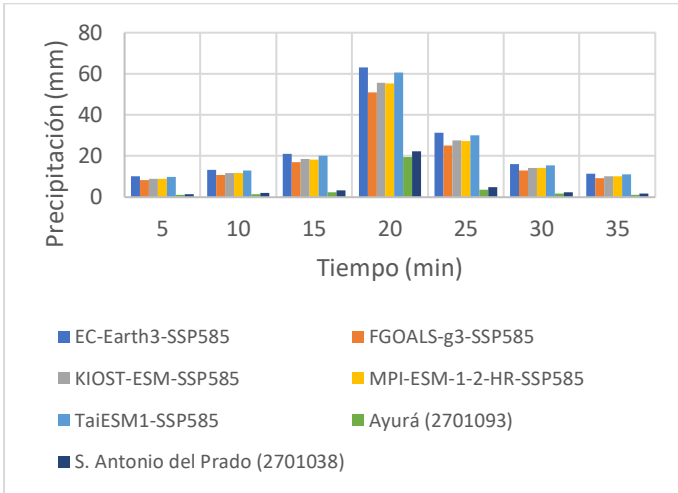


Figura 272 Comparación hietogramas 5 años Pulgarín SSP5-8.5

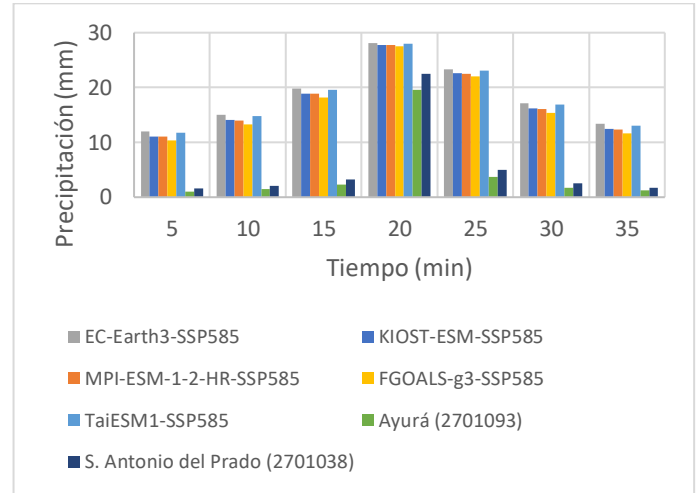


Figura 273 Comparación hietogramas 5 años CIACUA SSP5-8.5

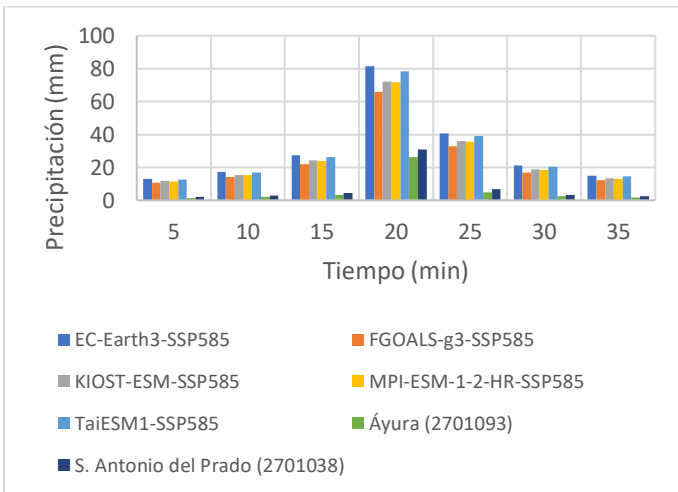


Figura 274 Comparación hietogramas 25 años Pulgarín SSP5-8.5

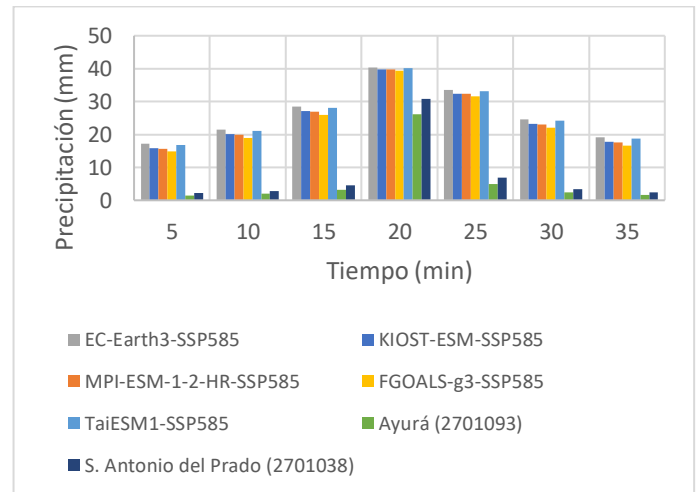


Figura 275 Comparación hietogramas 25 años CIACUA SSP5-8.5

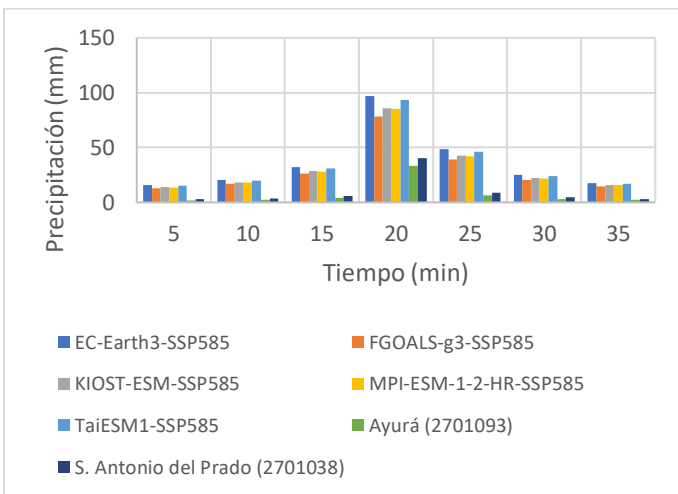


Figura 276 Comparación hietogramas 100 años Pulgarín SSP5-8.5

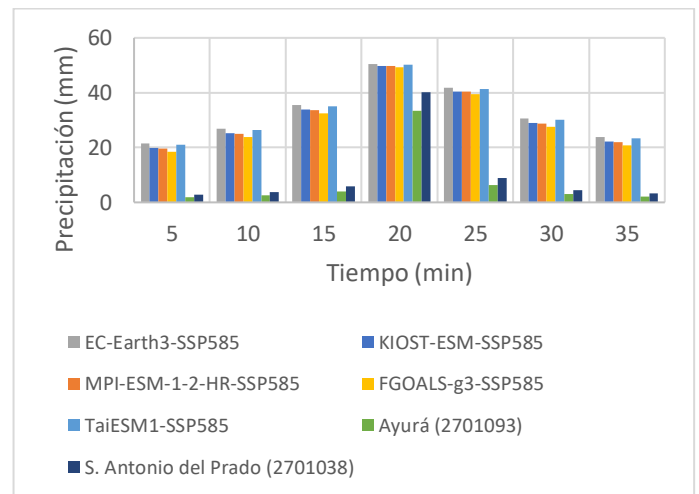


Figura 277 Comparación hietogramas 100 años CIACUA SSP5-8.5



7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

Los métodos para la construcción de curvas IDF correspondientes a Pulgarín y CIACUA constituyen una herramienta aceptable para el cálculo y la representación gráfica de dichas curvas. Adicionalmente, es fundamental prestar especial atención en los eventos de corta duración debido a que para los tres casos de estudio la precipitación se caracteriza por ocurrir en estos intervalos de tiempo, coincidiendo con lo registrado para zonas tropicales.

Los métodos de reducción de escala permiten precisar los resultados de los MCG a escalas locales, para el presente estudio se determinó que, tras la aplicación de estos, el “Quantile Mapping” no se ajusta a las características climáticas de los casos de estudio desarrollados, lo cual puede encontrarse relacionado con que no se reconocieron los picos de precipitación y a que la serie generada describe la misma tendencia de los valores observados. En contraste, el “Delta Change” si logra alcanzar los resultados esperados determinando un aumento en todos los casos de la precipitación media diaria respecto a los valores históricos observados de cada estación pluviométrica.

A partir del análisis de las curvas IDF construidas bajo la influencia del Cambio Climático fue posible identificar un aumento generalizado en los valores de precipitación media e intensidad para todos los MCG en los tres casos de estudio, tanto para el SSP2-4.5 como para el SSP5-8.5. Es de anotar que cuando el escenario más pesimista obtuvo menores valores para estos parámetros, esto pudo deberse a que estos son producto de los valores propios proyectados por el MCG correspondiente. Igualmente, es necesario tener en cuenta que las series fueron proyectadas hasta el año 2100.

Los hietogramas de diseño calculados por la metodología de bloques alternos responden a la influencia del Cambio Climático, el cual fue relacionado en función de cada MCG analizado para cada caso de estudio. Asimismo, se identificó que los valores de estos dependen directamente del método de cálculo de las curvas IDF con el que fueron generados y el periodo de retorno asociado en cada caso.

En general, los volúmenes de precipitación total obtenidos para los hietogramas de diseño afectados por el Cambio Climático desarrollados a partir de las curvas IDF de las metodologías de Pulgarín y CIACUA son muy similares en cada caso de estudio, en el caso de la primera, se obtienen intensidades altas para eventos de muy corta duración (5 a 10 minutos), sin embargo, esto es compensado por la concavidad de las curvas, lo cual se relaciona con que la intensidad disminuya rápidamente. En contraste, para el método CIACUA la intensidad para duraciones muy cortas es menor, no obstante, debido a que



las curvas IDF son menos cóncavas que en el caso de Pulgarín los valores asociados son superiores para las siguientes duraciones.

Como resultado de la aplicación de estas propuestas de curvas IDF y hietogramas de diseño en comparación con el escenario actual, es evidente el aumento la precipitación que puede llegar a tener por la influencia del Cambio Climático sobre todo en eventos de alta precipitación y corta duración. Igualmente, las diferencias encontradas en la tendencia de las curvas IDF pueden encontrarse relacionadas con la localización del caso de estudio y los métodos de cálculo de las curvas IDF propios de las entidades que construyeron dichas curvas para el periodo actual.

7.2 Recomendaciones para trabajos futuros

Algunas recomendaciones para trabajos futuros incluyen estudiar otros métodos de cálculo y construcción de curvas IDF y hietogramas de diseño con el fin de contrastar los resultados obtenidos en comparación con los desarrollados en el presente informe, especialmente para eventos de corta duración.

Asimismo, para los métodos de reducción de escala se sugiere incluir algunos adicionales que permitan establecer una comparación entre el “Delta Change” y estos. Es importante tener en cuenta que en medida de lo posible estos deben ajustarse a las características climatológicas de países tropicales como Colombia.

Con el fin de verificar la pertinencia de los MCG seleccionados en este informe para otras áreas de estudio sobre las ciudades estudiadas se recomienda evaluar otras estaciones pluviométricas y llevar a cabo los procesos de calibración correspondientes.

Otra de las sugerencias para trabajos futuros se relaciona con integrar el parámetro de temperatura el cual representa en gran medida las alteraciones producidas por el Cambio Climático, por tanto, en el momento incorporar los MCG es posible proyectar este parámetro, así este puede también ser un insumo para construir los modelos hidrológicos posteriores.

Por último, teniendo en cuenta que todas las proyecciones se realizaron para el año 2100 se recomienda evaluar otras temporalidades con el fin de conocer el comportamiento de los hietogramas de diseño a medida que va transcurriendo el tiempo.

8. REFERENCIAS

Alejandro Ocampo. (2019). *Evaluación de no estacionaridad de series de tiempo hidroclimatológicas en Colombia: Caso aplicado al Eje Cafetero*. Universidad de Los Andes.



- Arango-Aramburo, S., Turner, S. W. D., Daenzer, K., Ríos-Ocampo, J. P., Hejazi, M. I., Kober, T., Álvarez-Espinosa, A. C., Romero-Otalora, G. D., & van der Zwaan, B. (2019). Climate impacts on hydropower in Colombia: A multi-model assessment of power sector adaptation pathways. *Energy Policy*, 128, 179–188. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.057>
- ASF. (2022). *Earth Data*. <https://Search.Asf.Alaska.Edu/#/?Dataset=ALOS>.
- Castro, M. (2014). *IMPUTACIÓN DE DATOS FALTANTES EN UN MODELO DE TIEMPO DE FALLO ACELERADO*.
- Cerrón, J., del Castillo, J., Bonnesoeur, V., Peralvo, M., & Mathez-Stiefel, S.-L. (2019). *Relación entre árboles, cobertura y uso de la tierra y servicios hidrológicos en los Andes Tropicales: Una síntesis del conocimiento*.
- Chou, S. C., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., Bustamante, J., Tavares, P., Silva, A., Rodrigues, D., Campos, D., Chagas, D., Sueiro, G., Siqueira, G., & Marengo, J. (2014). Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. *American Journal of Climate Change*, 03(05), 512–527. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.35043>
- Chow, V. te, Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Applied Hydrology*. Mc Graw Hill.
- Colón-González, F. J., Harris, I., Osborn, T. J., Bernardo, C. S. S., Peres, C. A., Hunter, P. R., & Lake, I. R. (2018). Limiting global-mean temperature increase to 1.5-2 °C could reduce the incidence and spatial spread of dengue fever in Latin America. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(24), 6243–6248. <https://doi.org/10.1073/pnas.1718945115>
- Enríquez, L., Pulgarín, L., Garzón, J. A., Velásquez, D., & Saldarriaga, J. (2022). Comparación de metodologías de localización óptima de tanques de tormenta considerando Cambio Climático. Casos de estudio: Bogotá y Medellín, Colombia. *Ingeniería Del Agua*, 26(3), 139–155. <https://doi.org/10.4995/ia.2022.17360>
- Environment and Climate Change Canada. (2023). *CMIP6 and Shared Socio-economic Pathways overview*. <https://Climate-Scenarios.Canada.ca/?Page=cmip6-Overview-Notes>.
- EPM. (2022). *Empresas Públicas de Medellín*. Cu.Epm.Com.Co.
- Feron, S., Cordero, R. R., Damiani, A., Llanillo, P. J., Jorquera, J., Sepulveda, E., Asencio, V., Laroze, D., Labbe, F., Carrasco, J., & Torres, G. (2019). Observations and Projections of Heat Waves in South America. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44614-4>



- Garzón, A. (2019). *MODELACIÓN DINÁMICA DE INUNDACIONES URBANAS EN ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO*. Universidad de Los Andes.
- GFED. (2019). *Fire Season Updates, Global Fire Emissions Database*. Fire Season Updates, Global Fire Emissions Database.
- Guanuchi, C. (2015). *ANÁLISIS COMPARATIVO DE DOWNSCALING ESTADÍSTICO Y DINÁMICO EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS PAUTE Y JUBONES*.
- Gudmundsson, L., Zurich, E., Bremnes, J. B., Gudmundsson, L., Bremnes, J. B., Haugen, J. E., & Skaugen, T. E. (2012). The response of the hydrological system in India to climate change-INDICE View project Regional Climate Development Under Global Warming-RegClim View project Quantile mapping Hydrology and Earth System Sciences Discussions Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using quantile mapping-a comparison of methods Quantile mapping. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*, 9, 6185–6201. <https://doi.org/10.5194/hessd-9-6185-2012>
- IDEAM. (2018). *DOCUMENTO METODOLÓGICO ESTADÍSTICAS VARIABLES METEOROLÓGICAS METODOLOGÍA DE LA OPERACIÓN ESTADÍSTICA VARIABLES METEOROLÓGICAS INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES-IDEAM Subdirección de Meteorología*.
- IDEAM. (2019). *GUIA PARA EL CONTROL DE CALIDAD DE LA INFORMACIÓN METEOROLÓGICA EN LAS ETAPAS DE OBTENCIÓN, EVALUACIÓN, VERIFICACIÓN, CÁLCULO Y PROCESAMIENTO*.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA. (2015). *Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011- 2100 Herramientas Científicas para la Toma de Decisiones – Enfoque Nacional – Departamental: Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*.
- IPCC. (2022a). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- IPCC. (2022b). *IPCC WGI Interactive Atlas*. <https://Interactive-Atlas.Ipcc.Ch/>.
- Maintainer, G., & Gudmundsson, L. (2022). *Package “qmap” Title Statistical Transformations for Post-Processing Climate Model Output*. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3383>



- McGregor, G. R., Bessemoulin, P., Ebi, K. L., Menne, B. (Bettina), World Meteorological Organization, & World Health Organization. (n.d.). *Heatwaves and health: guidance on warning-system development*.
- McMartin, D. W., Hernani Merino, B. H., Bonsal, B., Hurlbert, M., Villalba, R., Ocampo, O. L., Upegui, J. J. V., Poveda, G., & Sauchyn, D. J. (2018). Limitations of Water Resources Infrastructure for Reducing Community Vulnerabilities to Extremes and Uncertainty of Flood and Drought. *Environmental Management*, 62(6), 1038–1047. <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1104-8>
- Molina, O., Luong, T. T., & Bernhofer, C. (2020). Projected changes in the water budget for Eastern Colombia due to climate change. *Water (Switzerland)*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/w12010065>
- Nagy, G. J., Leal Filho, W., Azeiteiro, U. M., Heimfarth, J., Verocai, J. E., & Li, C. (2018). An assessment of the relationships between extreme weather events, vulnerability, and the impacts on human wellbeing in Latin America. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(9). <https://doi.org/10.3390/ijerph15091802>
- NASA CENTER FOR CLIMATE SIMULATION. (2022). *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP-CMIP6)*. <https://doi.org/10.7917/OFSG3345>
- Pettitt, A. (1979). A nonparametric approach to the change point detection. *Applied Statistics*, 28, 126–135.
- Pulgarín, E. (2009). *Fórmulas regionales para la estimación de curvas intensidad-frecuencia duración basadas en las propiedades de escala de la lluvia (Región Andina Colombiana)*. Universidad Nacional de Colombia.
- Quintero-Herrera, L. L., Ramírez-Jaramillo, V., Bernal-Gutiérrez, S., Cárdenas-Giraldo, E. v., Guerrero-Matituy, E. A., Molina-Delgado, A. H., Montoya-Arias, C. P., Rico-Gallego, J. A., Herrera-Giraldo, A. C., Botero-Franco, S., & Rodríguez-Morales, A. J. (2015). Potential impact of climatic variability on the epidemiology of dengue in Risaralda, Colombia, 2010–2011. *Journal of Infection and Public Health*, 8(3), 291–297. <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2014.11.005>
- Restrepo, J. D., & Escobar, H. A. (2018). Sediment load trends in the Magdalena River basin (1980–2010): Anthropogenic and climate-induced causes. *Geomorphology*, 302, 76–91. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.12.013>
- Ruiter, A. (2012). *Delta-change approach for CMIP5 GCMs*.



- Seymour, F., & Harris, N. L. (2019). Reducing tropical deforestation. In *Science* (Vol. 365, Issue 6455, pp. 756–757). American Association for the Advancement of Science. <https://doi.org/10.1126/science.aax8546>
- Siraj, A., Santos-Vega, M., Bouma, M. J., Yadeta, D., Ruiz-Carrascal, D., & Pascual, M. (2014). Altitudinal changes in malaria incidence in highlands of Ethiopia and Colombia. *Science*, 343.
- Soldevila, R. (2018). *ANÁLISIS COMPARATIVO DE METODOLOGÍAS DE CÁLCULO DE TORMENTAS DE DISEÑO PARA SU APLICACIÓN EN HIDROLOGÍA URBANA*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Torres-Vitolas, C. A., Harvey, C. A., Cruz-García, G. S., Vanegas-Cubillos, M., & Schreckenber, K. (2019). The Socio-Ecological Dynamics of Food Insecurity among Subsistence-Oriented Indigenous Communities in Amazonia: a Qualitative Examination of Coping Strategies among Riverine Communities along the Caquetá River, Colombia. *Human Ecology*, 47(3), 355–368. <https://doi.org/10.1007/s10745-019-0074-7>
- Tovar-Restrepo, M., & Irazábal, C. (2014). Indigenous women and violence in Colombia: Agency, autonomy, and territoriality. *Latin American Perspectives*, 41(1), 39–58. <https://doi.org/10.1177/0094582X13492134>
- Universidad de Los Andes, & Mexichem. (2016). *DRENAJE URBANO Y CAMBIO CLIMÁTICO: HACIA LOS SISTEMAS DE ALCANTARILLADO DEL FUTURO: INFORME FINAL FASE II*.

9. ANEXOS

Anexo 1 Procesamiento de información

Anexo 2 Curvas IDF

Anexo 3 Prueba IDF

Anexo 4 Selección MCG

Anexo 5 Reducción de escala

Anexo 6 Generación de curvas IDF Cambio Climático

Anexo 7 Hietogramas



Anexo 8 Comparación de resultados