Estudios Básicos de Amenaza por Inundación, Movimiento en Masa y Avenida Torrencial para el municipio de Palmira y Estudios Detallados de Riesgo por Inundación y Socavación Lateral en el Barrio Azul, Corregimiento de Amaime

ESTUDIO 5: ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR INUNDACIÓN ÁREA RURAL DEL MUNICIPIO DE PALMIRA. ESCALA 1:25.000

Alcaldía de Palmira

Universidad del Valle

Convenio Interadministrativo MP968 de 2021

UNIVERSIDAD DEL VALLE; OBSERVATORIO SISMOLÓGICO Y GEOFÍSICO DEL SUROCCIDENTE COLOMBIANO-OSSO

ALCALDÍA DE PALMIRA; DIRECCIÓN DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES-DGRD

ALCALDÍA MUNICIPAL DE PALMIRA

ÓSCAR EDUARDO ESCOBAR GARCÍA
Alcalde

FERNANDO JAVIER LEAL LONDOÑO, Ing.
Director de Gestión del Riesgo de Desastres

CAMILO A. SAAVEDRA ESCOBAR, Adm.
Director 2021 – 2022 DGRD

ADRIANA TERREROS, Ing. Agrónoma
Profesional de Planta DGRD

OMAR A. CHAVES MONCAYO, Ing. Civil
Contratista DGRD

DIANA AREVALO, Ing. Civil
Contratista Oficina de Planeación

OBSERVATORIO SISMOLOGÍCO Y GEOFÍSICO DEL SUROCCIDENTE COLOMBIANO-OSSO
UNIVERSIDAD DEL VALLE

ELKIN DE JESUS SALCEDO HURTADO, Ph.D.
Director de Proyecto Estudios de Amenaza de Palmira - Director OSSO

DIANA M. RIVERA JIMENEZ
Coordinadora Administrativa

JHONATTAN FERNANDEZ C., MSc.
Coordinador Técnico

EQUIPOS TEMÁTICOS

HISTORICIDAD

KAREN A. SÁNCHEZ E., Geógrafa
Líder Equipo

GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

JUAN CARLOS FLORES, Geól.
Líder Equipo

JULIO CESAR GUERRA OSPINO, Geól.
Profesional de Apoyo

MARIA ALEJANDRA VELEZ, Geól.
Profesional de Apoyo

ESTEBAN A. NOREÑA, Geól.
Profesional de Apoyo

SIG Y TOPOGRAFÍA

JHON JAIRO BARONA, Ph.D.
Líder Equipo

PAOLA T. GOMEZ, Geóg.
Profesional de SIG

LINA V. LATORRE, Ing.
Profesional de SIG

JORGE A. DÍAZ, Geóg.
Profesional de SIG

FRANKLIN A. BEDOYA, Ing.
Profesional de Topografía

ALEJANDRO FERNANDEZ, Téc.
Apoyo Topografía

AMENAZA INUNDACIÓN Y AVENIDA TORRENCIAL

CARLOS RAMÍREZ C., MSc.
Líder Equipo

CESAR A. VIVAS, Ing.
Profesional Hidrología e Hidráulica Amenaza por Inundación

RAFAEL CLEMENT, Ing.
Profesional Hidráulica Amenaza por Avenida Torrencial

AMENAZA MOVIMIENTO EN MASA Y SOCAVACIÓN LATERAL

JHONALBERTH PALACIOS SÁNCHEZ, Ing.
Líder Equipo

SEPTIEMBRE DE 2022

TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN 20
2 OBJETIVOS 22
2.1 Objetivo General 22
2.2 Objetivos Específicos 22
2.3 Alcance 22
3 LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO 23
3.1 Río Amaime 24
3.2 Río Nima 24
3.3 Río Guachal 25
3.3.1 Río Bolo 25
3.3.2 Río Frayle 25
3.4 Drenajes zona urbana 26
3.4.1 Río Palmira 26
4 METODOLOGÍA 27
4.1 Modelo Digital de Terreno 27
4.2 Índice Topográfico de Humedad - ITH 27
4.3 Geomorfología 27
4.4 Susceptibilidad a inundación por geomorfología 28
4.5 Reconstrucción histórica de espejos de agua por inundaciones 28
4.6 Análisis hidrológico 29
4.7 Capacidad hidráulica en ríos principales 29
4.8 Mapa de zonificación de amenaza por inundación área rural 29
5 RESULTADOS 30
5.1 Evaluación del Modelo Digital de Terreno (DTM) 30
5.1.1 Método Cuantitativo Para la Evaluación de la Exactitud Posicional 30
5.1.2 Método Cualitativo Para la Evaluación Consistencia lógica 31
5.2 Cálculo del Índice Topográfico de Humedad - ITH 35
5.2.1 Fill sinks 36
5.2.2 Mapa de dirección de flujo 36
5.2.3 Mapa de acumulación de flujo 37
5.2.4 Mapa de pendientes en grados (Slope_gr) 37
5.2.5 Mapa de pendientes en radianes (Slope_rad) 37
5.2.6 Mapa de la tangente de la pendiente (Slope_TAN) 38
5.2.7 Mapa UCA 38
5.2.8 Mapa ITH 38

5.3 Geomorfología 40
5.3.1 Ambiente fluvial (F) 49
5.3.2 Ambiente glacial (G) 62
5.3.3 Ambiente estructural (S) 69
5.3.4 Ambiente denudacional (D) 84
5.3.5 Ambiente antropogénico (A) 101

5.4 Susceptibilidad a inundación por geomorfología 104
5.4.1 Susceptibilidad alta 104
5.4.2 Susceptibilidad media 105
5.4.3 Susceptibilidad baja 106

5.5 Reconstrucción histórica de espejos de agua por inundaciones 107
5.5.1 Corregimiento de La Dolores 107
5.5.2 Corregimiento de Guayabal, sector Callejón de Los Roa, afectaciones por el río Palmira 111
5.5.3 Corregimiento de Aguaclara 118
5.5.4 Los Bolos (Bolo La Italia y Bolo Alizal) 122
5.5.5 Corregimiento de Palmaseca 128
5.5.6 Corregimiento de La Herradura 130
5.5.7 Corregimiento de Caucaseco 133
5.5.8 Historicidad río Cauca 135
5.5.9 Espejos de agua históricos 137

5.6 Análisis Hidrológico 139
5.6.1 Climatología 139
5.6.2 Régimen de caudales 193
5.6.3 Modelación hidrológica 219

5.7 Capacidad hidráulica en ríos principales 246
5.7.1 Generalidades teóricas del modelo 247
5.7.2 Resultados capacidad hidráulica en ríos principales 252

6 ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR INUNDACIÓN ÁREA RURAL ESCALA 1:25000 273

6.1 Zonificación de amenaza por inundación a partir de susceptibilidad a inundación por geomorfología, drenajes e historicidad 273

6.2 Nivel de amenaza por inundación corredor río Cauca 236

6.3 Áreas con amenaza mitigada 239

6.4 Zonificación de amenaza por inundación consolidada 243

7 CONCLUSIONES 245

8 RECOMENDACIONES 248

9 REFERENCIAS 251

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización general municipio de Palmira 23
Figura 2. Análisis Espacial de totalidad. 32
Figura 3. Análisis Espacial Boolean Not. 33
Figura 6. Esquema metodológico para el cálculo del Índice Topográfico de Humedad (ITH). ... 36
Figura 7. Insumos desarrollados para el cálculo del ITH del Municipio de Palmira. 39
Figura 8. Esquema de jerarquización geomorfológica. 41
Figura 9. Patrones de drenaje. 44
Figura 10. Distribución porcentual de los ambientes morfogenéticos del municipio de Palmira. 45
Figura 11. Subunidades geomorfológicas en el área rural del municipio de Palmira (GMF-2). .. 48
Figura 12. Elementos geomorfológicos de ambiente fluvial (F)..... 49
Figura 13. Geoforma de abanico aluvial (Faa) encontrada en el margen derecho del río Nima (estación 251). 50
Figura 14. Geoforma de abanico aluvial antiguo (Faaa). 50
Figura 15. Geoforma de abanico aluvial sub-reciente (Faas)..... 51
Figura 16. Geoforma de abanico actual (Faaac)..... 52
Figura 17. Geoforma de abanicos aluviales coalescentes (Fac). 52
Figura 18. Geoforma de Cauce activo (Fca). a) Cauce del río Cauca. b) Confluencia del río Bolo y río Fraile. c) Río Aguaclara en el centro poblado homónimo. d) río Amaime en Barrio Azul. .. 53
Figura 19. Escarpe de abanico aluvial (Fea). 54
Figura 20. Geoforma de Laguna (Flg) (estación 228). 54
Figura 21. Geoforma de meandro abandonado (Fma)..... 55
Figura 22. Planicie aluvial confinada (Fpac) (estación 114). 56
Figura 23. Geoforma de plano o llanura de inundación (Fpi). 56
Margen derecha del río Cauca, se observa el Jarillón próximo al cauce y a continuación la planicie de inundación (estación 348)..... 56
Figura 24. Geoforma de Planicie y delta lacustre adyacente al Zanjón Zumbaculo (estación 269). 57
Figura 25. Terraza de acumulación (Fta) asociada a la dinámica de la quebrada La Rivera en el corregimiento Combia (estación 102). 58
Figura 26. Terraza de acumulación antigua (Ftan) en zona aledaña a la quebrada Nápoles en el corregimiento de Combia. 59

Figura 27. Terraza de acumulación subreciente (Ftas) asociada a la dinámica subreciente de la quebrada La Rivera en el corregimiento Combia. 59
Figura 28. Escarpe de terraza de acumulación subreciente (Ftaes). 60
Figura 29. Escarpe de terraza de acumulación antigua (Ftes). 61
Figura 30. Escarpe de terraza de acumulación (Ftae). 61
Figura 31. Subunidades geomorfológicas ambiente glacial (G) 62
Figura 32. Artesa glacial (Gag). 63
Figura 33. Circo glacial y de nivación. 63
Figura 34. Cono y lóbulo de gelifracción (Gclg). 64
Figura 35. Espolón estructural glaciado (Gee). 65
Figura 36. Espinazo glaciado (Geg). 65
Figura 37. Flanco de valle glaciar (Gflv). 66
Figura 38. Laguna glaciar (Glg). 67
Figura 39. Planos y conos de sobrelavado glaciar (Gpcs). 67
Figura 40. Plano glaciolacustre (Gpg). 68
Figura 41. Sierra glaciada (Gsg). 69
Figura 42. Subunidades geomorfológicas ambiente estructural (S) 69
Figura 43. Colina estructural (Sces). 70
Figura 44. Espolón facetado bajo de longitud corta (Sefcbc). 71
Figura 45. Espolón facetado bajo de longitud larga (Sefcbl). 72
Figura 46. Espolón facetado moderado de longitud larga (Sefcml). 73
Figura 47. Espolón bajo de longitud larga (Sesbl). 74
Figura 48. Espolón bajo de longitud media (Sesbm). 75
Figura 49. Espolón moderado de longitud larga (Sesml). 76
Figura 50. Faceta triangular (Sft). 77
Figura 51. Gancho de flexión (Sgf). 78
Figura 52. Lomo (Sl). 79
Figura 53. Lomo de falla (Slf). 80
Figura 54. Escarpe de línea de falla (Slfe). 81
Figura 55. Lomo de obturación (Slo). 82
Figura 56. Sierra (Ss). 83
Figura 57. Sierra y lomo de presión (Sslp). 84
Figura 58. Subunidades geomorfológicas ambiente denudacional (D) 85

Figura 59. Cono y lóbulo coluvial y de solifluxión (Dco). 85
Figura 60. Colina remanente (Dcre), corregimiento La Zapata (estación 173). 86
Figura 61. Colina remanente (Dcre), corregimiento La Zapata. 86
Figura 62. Cono de deslizamiento indiferenciado (Ddi)..... 87
Figura 63. Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional (Ddrt). 88
Figura 64. Escarpe de erosión mayor (Deem). 89
Figura 65. Escarpe facetado (Def)..... 90
Figura 66. Loma denudada (Dld). Corregimiento Ayacucho. 91
Figura 67. Lomo denudado (Dlde). a.) Dlde corregimiento Ayacucho, margen izquierda río Nima. b.) Dlde corregimiento Combia, margen izquierda río Toche. 91
Figura 68. Lomo denudado bajo de longitud larga (Dldebl). 92
Figura 69. Lomeríos disectados (Dldi). 93
Figura 70. Cono o lóbulo de deslizamiento Traslacional (Ddtr). 94
Figura 71. Lomeríos muy disectados (Dlmd). a.) Localización lomeríos. b.) Visual Dlmd corregimiento Ayacucho, margen derecha río Aguaclara (estación 167). 95
Figura 72. Lomeríos poco disectados (Dlpd). 96
Figura 73. Montículos y ondulaciones denudacionales (Dmo). 97
Figura 74. Pedimentos de acumulación (Dpa). 98
Figura 75. Sierra denudada (Dsd). 99
Figura 76. Localización geoformas de sierra residual (Dsr) en el municipio de Palmira. 100
Figura 77. Sierra residual (Dsr). 100
Figura 78. Elementos geomorfológicos morfoambiente antropogénico (A). 101
Figura 79. Canteras (Ac). 102
Figura 80. Lago antrópico (Al). 103
Figura 81. Subunidad geomorfológica de Jarillón (Allj). 104
Figura 82. Zonificación de susceptibilidad de inundación por geomorfología..... 103
Figura 83. Distribución porcentual de la susceptibilidad por inundaciones en el área de estudio. 104
Figura 84. Sitio donde rompió el dique el río Cauca año 2011 en la cabecera del corregimiento de La Dolores. 108
Figura 85. Recolección de espejos de agua en el corregimiento de la Dolores 109
a)trabajo con el señor Rosero; la imágenes b,c y d, es el trabajo en casa del señor Leonidas. 109

Figura 86. Espejos de agua corregimiento de La Dolores en el municipio de Palmira (HIS-4). 110
Figura 87. Localización del sector Callejón de Los Roa. 111
Figura 88. Trazo donde antiguamente pasaba el río Palmira en Guayabal. 112
Figura 89. Sector Callejón de Los Roa, corregimiento Guayabal. 112
Figura 90. Zona de descarga del tubo de aguas residuales de la comunidad, localizada dentro del predio de la señora Ingrid Roa. 113
Figura 91. Zanjas de colector sanitario PTAR, predio al lado derecho del Sector de Los Roa. 115
Figura 92. Paso del río Palmira por el sector. 116
Figura 93. Trabajo con comunidad del sector Callejón de Los Roa. 116
Figura 94. Espejos de agua en el corregimiento de Guayabal, municipio de Palmira (HIS-2). 117
Figura 95. Reconstrucción de la inundación del 15 de junio del 2021 en el corregimiento de Aguaclara. 119
Figura 96. Obra no técnica realizada a la margen derecha del río AguaClara. 120
Figura 97. Trabajo de recolección de espejo de agua en el corregimiento de Aguaclara, Palmira. 120
Figura 98. Espejos de agua en el corregimiento de Aguaclara, municipio de Palmira (HIS-3). 121
Figura 99. Inundación del 15 de junio del 2021, Bolo La Italia. 122
Figura 100. Espejos de agua en el corregimiento de Bolo La Italia en el municipio de Palmira (HIS-7). 123
Figura 101. Localización de vivienda y entrevista del 3 de diciembre del 2021, señora Vicky Valencia 124
Figura 102. Inundación por el río Bolo en el corregimiento de Bolo Alizal, 15-06-2021. 125
Figura 103. Visita a la zona afectada por la inundación del 15 de junio del 2021, corregimiento de Bolo Alizal. 126
Figura 104. Espejos de agua en el corregimiento de Bolo Alizal municipio de Palmira (HIS-8). 127
Figura 105. Ruptura del río Guachal en la Hacienda El Once, corregimiento de Palmaseca. 128
Figura 106. Espejos de agua en el corregimiento de Palmaseca en el municipio de Palmira (HIS-5). 129
Figura 107. Visita al Zanjón Mirriñao por parte de la comunidad y DGRD Palmira. 130
Figura 108. Espejos de agua en el corregimiento de La Herradura, en el municipio de Palmira (HIS-6). 132
Figura 109. Evidencias de campo, corregimiento de Caucaseco, municipio de Palmira. 133

Figura 110. Espejos de agua por inundaciones en el corregimiento de Caucaseco del municipio de Palmira (HIS-9).....134
Figura 111. Mapa de registros históricos de áreas inundadas en el corredor del río Cauca 136
Figura 112. Mapa histórico de espejos de agua municipio de Palmira.....138
Fuente: elaboración propia tomado de CVC.....138
Figura 113. Localización de estaciones meteorológicas con influencia en la zona de estudio del municipio de Palmira.....141
Figura 114. Distribución temporal de la precipitación estaciones de referencia. 143
Figura 115. Distribución espacial de la precipitación anual multianual.....144
Figura 116. Distribución temporal de número de días con lluvia. Valores medios mensuales multianuales de días de lluvia en las estaciones de referencia.....146
Figura 117. Área de influencia de las estaciones pluviométricas, respecto a la zona de estudio. Polígonos de Thiessen.....147
Figura 118. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación El Paraíso. Periodo: 1973 – 2021.....151
Figura 119. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Esperanza Paradera. Periodo: 1981 – 2021.....152
Figura 120. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Ingenio Manuelita. Periodo: 1973 – 2014. 153
Figura 121. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación La Zapata. Periodo: 1975 – 2020. 154
Figura 122. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Palmira ICA. Periodo: 1973 – 2021. 155
Figura 123. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Tenerife. Periodo: 1973 – 2021. 156
Figura 124. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Auji. Periodo: 1971 – 2021. 157
Figura 125. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Austria. Periodo: 1969 – 2021. 158
Figura 126. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Bellavista. Periodo: 1970 – 2021. 159
Figura 127. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Chambú. Periodo: 1973 – 2021.....160

Figura 128. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación La Ceja. Periodo: 1971 – 2021. 161
Figura 129. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación La Sirena. Periodo: 1988 – 2021. 162
Figura 130. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación La Soledad. Periodo: 1971 – 2021. 163
Figura 131. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Planta Nima. Periodo: 1970 – 2021. 164
Figura 132. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación San Emigdio. Periodo: 1965 – 2021. 165
Figura 133. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación San Nicolas. Periodo: 1970 – 2020. 166
Figura 134. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Tenjo. Periodo: 1969 – 2021. 167
Figura 135. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación El Paraíso. 168
Figura 136. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación El Paraíso 168
Figura 137. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Esperanza Pradera. 169
Figura 138. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Esperanza Pradera 170
Figura 139. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Ingenio Manuelita. 171
Figura 140. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Ingenio Manuelita..... 171
Figura 141. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación La Zapata. 172
Figura 142. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Zapata 173
Figura 143. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Palmira ICA. 174

Figura 144. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Palmira ICA. 174
Figura 145. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Tenerife. 175
Figura 146. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Tenerife. 176
Figura 147. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Auji. 177
Figura 148. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Auji. ... 177
Figura 149. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Austria. 178
Figura 150. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Austria. 179
Figura 151. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Bellavista. 180
Figura 152. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Bellavista. 180
Figura 153. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Chambú. 181
Figura 154. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Chambú. 182
Figura 155. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación La Ceja. 183
Figura 156. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Ceja. 183
Figura 157. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación La Sirena. 184
Figura 158. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Sirena. 185
Figura 159. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación La Soledad. 186

Figura 160. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Soledad. 186
Figura 161. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Planta Nima. 187
Figura 162. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Planta Nima..... 188
Figura 163. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación San Emigdio. 189
Figura 164. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación San Emigdio. 189
Figura 165. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación San Nicolas. 190
Figura 166. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación San Nicolas. 191
Figura 167. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Tenjo. 192
Figura 168. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Tenjo. 192
Figura 169. Localización de las estaciones hidrométricas en relación con el área de estudio del municipio de Palmira 194
Figura 170. Variación anual de caudales máximos, medios y mínimos anuales en el río Cauca. 195
Estación Cauca - Juanchito. Periodo: 1945 - 2017. 195
Figura 171. Variación de caudales medios mensuales multianuales en el río Cauca. Estación Cauca - Juanchito. Periodo: 1945 - 2017. 196
Figura 172. Curva de duración de caudales medios mensuales en el río Cauca. Estación Cauca - Juanchito..... 197
Periodo: 1945 - 2017. 197
Figura 173. Caudales máximos característicos para diferentes periodos de retorno en el río Cauca 198
Estación Cauca - Juanchito. Periodo: 1945 - 2017. 198
Figura 174. Variación anual de caudales máximos, medios y mínimos anuales en el río Amaime. 199

Estación Amaime. Periodo: 1984 - 2021. 199
Figura 175. Variación de caudales medios mensuales multianuales en el río Amaime. Estación Amaime. 200
Periodo: 1984 - 2021. 200
Figura 176. Curva de duración de caudales diarios en el río Amaime. Estación Amaime. Periodo: 1984 - 2021. 201
Figura 177. Caudales máximos característicos para diferentes periodos de retorno en el río Amaime. 202
Estación Amaime. Periodo: 1984 - 2021. 202
Figura 178. Variación anual de caudales máximos, medios y mínimos anuales en el río Bolo. 203
Estación Bolo Arriba. Periodo: 1960 - 2021. 203
Figura 179. Variación de caudales medios mensuales multianuales en el río Bolo. Estación Bolo Arriba. 204
Periodo: 1960 - 2021. 204
Figura 180. Curva de duración de caudales medios mensuales en el río Bolo. 205
Estación Bolo Arriba. Periodo: 1960 - 2021. 205
Figura 181. Caudales máximos característicos para diferentes periodos de retorno en el río Bolo. 206
Estación Bolo Arriba. Periodo: 1960 - 2021. 206
Fuente: elaboración propia 206
Figura 182. Variación anual de caudales máximos, medios y mínimos anuales en el río Bolo. 207
Estación Bolo - Los Minchos. Periodo: 1992 - 2021. 207
Figura 183. Variación de caudales medios mensuales multianuales en el río Bolo. 208
Estación Bolo - Los Minchos. Periodo: 1992 - 2021. 208
Figura 184. Curva de duración de Caudales medios mensuales en el río Bolo. Estación Bolo - Los Minchos. Periodo: 1992 - 2021. 209
Figura 185. Caudales máximos característicos para diferentes periodos de retorno en el río Bolo. 210
Estación Bolo - Los Minchos. Periodo: 1992 - 2021. 210
Figura 186. Variación anual de caudales máximos, medios y mínimos anuales en el río Fraile. 211
Estación Fraile - Buchitolo. Periodo: 1961 - 2021. 211
Figura 187. Variación de caudales medios mensuales multianuales en el río Fraile. 212

Estación Fraile - Buchitolo. Periodo: 1961 - 2021. 212
Figura 188. Curva de duración de caudales medios mensuales en el río Fraile. 213
Estación Fraile - Buchitolo. Periodo: 1961 - 2021. 213
Figura 189. Caudales máximos característicos para diferentes periodos de retorno en el río Fraile. 214
Estación Fraile - Buchitolo. Periodo: 1961 - 2021. 214
Figura 190. Variación anual de caudales máximos, medios y mínimos anuales en el río Guachal. 215
Estación Guachal - Palmaseca. Periodo: 1977 - 2018. 215
Figura 191. Variación de caudales medios mensuales multianuales en el río Guachal. 216
Estación Guachal- Palmaseca. Periodo: 1977 - 2018. 216
Figura 192. Curva de duración de caudales medios mensuales en el río Guachal. 217
Estación Guachal - Palmaseca. Periodo: 1977 - 2018. 217
Figura 193. Caudales máximos característicos para diferentes periodos de retorno en el río Guachal. 218
Estación Guachal - Palmaseca. Periodo: 1977 - 2018. 218
Figura 194. Esquema de las componentes hidrológicos e hidráulicos que utiliza el modelo HEC-HMS para representar una cuenca hidrográfica. 220
Figura 195. Subcuencas hidrográficas en estudio municipio de Palmira 227
Figura 196. Esquema de las cuencas en estudio en el modelo HEC-HMS 4.9. 229
Figura 197. Suelos de las cuencas hidrográficas en estudio 236
Figura 198. Uso y cobertura del suelo de las cuencas hidrográficas en el área de estudio. 239
Figura 199. Valores de CN cuencas hidrográficas en estudio. 241
Figura 200. Localización secciones transversales para cálculo de capacidad hidráulica 253
Figura 201. Localización, sección transversal y resultados río Amaime 1. 254
Figura 202. Localización, sección transversal y resultados río Amaime 2. 255
Figura 203. Localización, sección transversal y resultados río Amaime 3. 256
Figura 204. Localización, sección transversal y resultados río Nima 1. 257
Figura 205. Localización, sección transversal y resultados río Nima 2. 258
Figura 206. Localización, sección transversal y resultados río Nima 3. 259
Figura 207. Localización, sección transversal y resultados río Guachal 1. 260
Figura 208. Localización, sección transversal y resultados río Guachal 2. 261
Figura 209. Localización, sección transversal y resultados río Guachal 3. 262

Figura 210. Localización, sección transversal y resultados río Guachal 4. 263
Figura 211. Localización, sección transversal y resultados río Bolo 1. 264
Figura 212. Localización, sección transversal y resultados río Bolo 2. 265
Figura 213. Localización, sección transversal y resultados río Aguaclara 1..... 266
Figura 214. Localización, sección transversal y resultados río Aguaclara 2..... 267
Figura 215. Localización, sección transversal y resultados río Fraile 1..... 268
Figura 216. Localización, sección transversal y resultados río Fraile 2..... 269
Figura 217. Localización, sección transversal y resultados río Palmira 1..... 270
Figura 218. Localización, sección transversal y resultados río Palmira 2..... 271
Figura 219. Zonificación de amenaza por inundación área rural municipio de Palmira obtenida a partir de la susceptibilidad de inundación por geomorfología, drenajes e historicidad. 235
Figura 220. Zonificación de amenaza por inundación corredor río Cauca para TR 30 años 237
Figura 221. Zonificación de amenaza por inundación corredor río Cauca para TR 100 años .. 238
Figura 222. Zonificación de amenaza por inundación TR 100 años corredor río Cauca y tributarios con obras de mitigación..... 241
Figura 223. Corredor río Cauca y tributarios con obras de mitigación 242
Figura 224. Zonificación de amenaza por inundación consolidada para el área rural del municipio de Palmira a escala 1:25000 244

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Exactitud vertical según producto DTM.....31
Tabla 2. Espaciado máximo del DTM Grilla/Escala. 31
Tabla 3. Errores posicionales de la vertical en el DTM. 32
Tabla 4.. Tabla de exactitud vertical según el producto. 32
Tabla 6. Rangos de intervalos de altura o relieve relativo.....42
Tabla 7. Rangos de inclinación de la ladera 43
Tabla 8. Rango de longitud de la ladera 43
Tabla 9. Rangos de forma de la ladera.....43
Tabla 10. Formas de cresta y valles 44
Tabla 11. Distribución de ambientes morfogenéticos en el área rural del municipio de Palmira. 45
Tabla 12. Categorización de zonas de susceptibilidad a inundación 104
Tabla 13. Categorización de la susceptibilidad a inundaciones con base en las subunidades geomorfológicas identificadas 105
Tabla 14. Distribución por área y porcentaje de la zonificación de susceptibilidad geomorfológica a inundación en el municipio de Palmira 104
Tabla 15. Estaciones meteorológicas en la zona de estudio 139
Tabla 16. Resumen de promedios mensuales multianuales de precipitación total mensual de las estaciones ubicadas en cercanías al sector en estudio. 142
Tabla 17. Número de días con lluvia en las estaciones con influencia en el sector en estudio 145
Tabla 18. Peso de influencia de las estaciones en las subcuencas en estudio.....148
Tabla 19. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación El Paraíso. Periodo: 1973 – 2021.....152
Tabla 20. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Esperanza Pradera. Periodo: 1981 – 2021. 152
Tabla 21. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Ingenio Manuelita. Periodo: 1973 – 2014. 153
Tabla 22. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación La Zapata. Periodo: 1975 – 2020. 154
Tabla 23. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Palmira ICA. Periodo: 1973 – 2021. 155

Tabla 24. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Tenerife. Periodo: 1973 – 2021. 156
Tabla 25. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Auji. Periodo: 1971 – 2021. 157
Tabla 26. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Austria. Periodo: 1969 – 2021. 158
Tabla 27. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Bellavista. Periodo: 1970 – 2021. 159
Tabla 28. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Chambú. Periodo: 1973 – 2021 160
Tabla 29. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación La Ceja. Periodo: 1971 – 2021. 161
Tabla 30. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación La Sirena. Periodo: 1988 – 2021. 162
Tabla 31. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación La Soledad. Periodo: 1971 – 2021. 163
Tabla 32. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Planta Nima. Periodo: 1970 – 2021. 164
Tabla 33. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación San Emigdio. Periodo: 1965 – 2021. 165
Tabla 34. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación San Nicolas. Periodo: 1970 – 2020. 166
Tabla 35. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Tenjo. Periodo: 1969 – 2021. 167
Tabla 36. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación El Paraíso 169
Tabla 37. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Esperanza Pradera 170
Tabla 38. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Ingenio Manuelita 172

Tabla 39. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Zapata 173
Tabla 40. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Palmira ICA 175
Tabla 41. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Tenerife.176
Tabla 42. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Auji.....178
Tabla 43. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Austria...179
Tabla 44. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Bellavista 181
Tabla 45. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Chambú 182
Tabla 46. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Ceja .184
Tabla 47. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Sirena. 185
Tabla 48. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Soledad 187
Tabla 49. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Planta Nima 188
Tabla 50. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación San Emigdio 190

Tabla 51. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación San Nicolas 191
Tabla 52. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Tenjo 193
Tabla 53. Estaciones hidrológicas con influencia en el área de estudio 193
Tabla 54. Caudales máximos esperados (predicción) asociados a diferentes períodos de retorno. Estación Cauca - Juanchito. Periodo: 1945 - 2017. 198
Tabla 55. Caudales característicos del río Cauca. Estación: Cauca - Juanchito (1945-2017) .. 198
Tabla 56. Caudales máximos esperados (predicción) asociados a diferentes períodos de retorno en el río Amaime. Estación Amaime. Periodo: 1984 - 2021. 202
Tabla 57. Caudales característicos del río Amaime. Estación: Amaime (1984-2021) 202
Tabla 58. Caudales máximos esperados (predicción) asociados a diferentes períodos de retorno. Estación Bolo Arriba. Periodo: 1960 - 2021. 206
Tabla 59. Caudales característicos del río Bolo. Estación: Bolo Arriba (1960-2021) 207
Tabla 60. Caudales máximos esperados (predicción) asociados a diferentes períodos de retorno en el río Bolo. Estación Bolo - Los Minchos. Periodo: 1992 - 2021. 210
Tabla 61. Caudales característicos del río Bolo. Estación: Bolo - Los Minchos (1992-2021) ... 210
Tabla 62. Caudales máximos esperados (predicción) asociados a diferentes períodos de retorno en el río Fraile. Estación Fraile - Buchitolo. Periodo: 1961 - 2021. 214
Tabla 63. Caudales característicos del río Fraile. Estación: Fraile - Buchitolo (1961-2021) 214
Tabla 64. Caudales máximos esperados (predicción) asociados a diferentes períodos de retorno en el río Guachal. Estación Guachal - Palmaseca. Periodo: 1977 - 2018. 218
Tabla 65. Caudales característicos del río Guachal. Estación: Guachal - Palmaseca (1977-2018) 218
Tabla 66. Clasificación de clases de humedad antecedente (AMC) para el método de abstracciones de lluvia del SCS. 223
Tabla 67. Valores de CN para varios tipos de uso del suelo 223
Tabla 68. Características generales y morfométricas de las cuencas de interés 228
Tabla 69. Componentes y características de los suelos presentes en el municipio de Palmira 230
Tabla 70. Cobertura del suelo de la zona de estudio 237
Tabla 71. Valores de CN para las cuencas hidrográficas en estudio 239
Tabla 72. Parámetros hidrológicos de las cuencas hidrográficas en estudio 242

Tabla 73. Caudales máximos (m^3/s) para diferentes periodos de retorno, generados con el modelo hidrológico 243
Tabla 74. Caudales máximos (m^3/s) para diferentes periodos de retorno, generados con el modelo hidrológico para verificación de capacidad hidráulica 246

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1	Datos crudos estaciones hidrometeorológicas
Anexo 2	Cálculos precipitación
Anexo 3	Análisis de frecuencia
Anexo 4	Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia e Hietogramas de precipitación de diseño hidrológico
Anexo 5	Parámetros morfométricos de las cuencas
Anexo 6	Estudio “Levantamiento semidetallado de suelos escala 1:25.000 de las cuencas priorizadas por la CVC”
Anexo 7	Modelo hidrológico

1 INTRODUCCIÓN

Según el IDEAM, las inundaciones son fenómenos hidrológicos recurrentes potencialmente destructivos, que hacen parte de la dinámica de evolución de una corriente. Se producen por lluvias persistentes y generalizadas que generan un aumento progresivo del nivel de las aguas contenidas dentro de un cauce superando la altura de las orillas naturales o artificiales, ocasionando un desbordamiento y dispersión de las aguas sobre las llanuras de inundación y zonas aledañas a los cursos de agua normalmente no sumergidas.

Bajo los fundamentos de la normatividad aplicable vigente, como soporte de las decisiones de ordenamiento de los municipios en Colombia y para el caso particular del municipio de Palmira, se requiere, entre otros, del desarrollo de los estudios básicos para el fenómeno de inundación indicados en el Decreto 1807 de 2014, cuyos resultados deben hacer parte de los proyectos de revisión de los contenidos de mediano y largo plazo de los planes de ordenamiento territorial o la expedición de un nuevo plan. De esta forma el estudio básico de inundaciones para el municipio de Palmira está dirigido al análisis de los ríos Palmira, Amaime, Nima, Aguaclara, Bolo, Frayle y Guachal, en lo que corresponde a los sectores intramontanos con planicies de inundación confinadas de los drenajes que provienen del flanco occidental de la cordillera central, para el caso del río Cauca, se emplearán los resultados del proyecto Corredor de Conservación y Uso Sostenible del Río Cauca, información que fue suministrada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC a la Dirección de Gestión del Riesgo de Desastres - DGRD del municipio de Palmira mediante radicado CVC 0611-966812021 del 07 de marzo de 2022.

El municipio de Palmira se encuentra ubicado en la región Suroriente del departamento del Valle del Cauca; limita al Norte con el municipio de El Cerrito, al Sur con los municipios de Pradera y Candelaria, al Este con el departamento del Tolima y al Oeste con los municipios de Cali, Yumbo y Vijes. El territorio municipal abarca las cuencas de los ríos Nima, Amaime, Aguaclara y Bolo.

Teniendo en cuenta que el sector por donde discurren los cuerpos de agua en estudio se localiza en el área de jurisdicción de la CVC, para el presente estudio se empleó entre otra, información generada por dicha autoridad ambiental, la cual produjo los mapas de datos referenciados espacialmente de forma dinámica a partir de información geográfica, que contienen temáticas asociadas.

Bajo dicho contexto, para la zonificación de amenaza a escala 1:25000, el estudio debe considerar un modelo digital de terreno, los registros históricos de inundaciones, los drenajes existentes, así como las áreas susceptibles a inundarse a partir de las subunidades geomorfológicas, unidades geológicas superficiales y la morfodinámica identificada en el área.

De acuerdo con los alcances y especificaciones técnicas del convenio, lo determinado en el Decreto 1807 de 2014 y la información disponible, la evaluación de la amenaza rural a escala 1:25000 se soporta en el análisis e integración cartográfica de los insumos mencionados, correspondientes a la información de los drenajes existentes (ríos principales y zanjones), la

utilización de los polígonos reconstruidos de los espejos de agua asociados a registros históricos de inundaciones y los resultados de la susceptibilidad a inundación por geomorfología, considerando que en la actualidad no se cuenta en con topografía de cauces que permita el desarrollo de modelaciones hidráulicas.

Adicionalmente, considerando que hay sectores que en la actualidad cuentan con el establecimiento de obras de mitigación de inundaciones y bajo el entendido que con la existencia de dichas estructuras se asumirían como áreas con amenaza mitigada que requieren de comprobación, en el presente estudio se incluye una sección con el desarrollo de la verificación de la capacidad hidráulica y el caudal máximo transportado, en los sectores evaluados de los ríos principales del municipio Palmira con y sin estructuras de mitigación de inundaciones; para lo cual se realizaron modelaciones hidráulicas en secciones transversales, cuyo insumo son los resultados de los análisis hidrológicos realizados a partir de los registros disponibles de las estaciones hidrométricas localizadas sobre los cauces de los ríos que cuentan con instrumentación de caudales, operadas por la CVC.

De acuerdo con lo anterior, el desarrollo del presente estudio incluye la localización del área y el procedimiento metodológico, que inicia con la consulta de la información existente o levantamiento de información primaria, pasando con el desarrollo de cada una de las temáticas empleadas, hasta la zonificación de la amenaza por inundación a escala 1:25000, a ser categorizada en alta, media y baja, lo que se constituirá en una herramienta fundamental para los usuarios finales en los diferentes campos de aplicación, tanto en medidas predictivas (diseño de redes y sistemas de alerta temprana e información hidro-meteorológica), preventivas (diseño de obras, ordenación del territorio, sistemas de aseguramiento, protección civil, educación en el riesgo) y correctivas (planificación de atención de emergencias, implementación de sistemas de ayuda a los damnificados, declaración de zonas de desastre).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Realizar la zonificación de la amenaza por inundación para el área rural del municipio de Palmira en el departamento del Valle del Cauca, a escala 1:25000.

2.2 Objetivos Específicos

- Evaluar el Modelo Digital de Terreno de radar en formato ráster con tamaño de píxel de 2,5 metros suministrado por la CVC.

- Realizar el cálculo del Índice Topográfico de Humedad (ITH) mediante herramientas de sistemas de información geográfica, empleando el Modelo Digital de Terreno de radar en formato ráster con tamaño de píxel de 2,5 metros suministrado por la CVC.

- Identificar las subunidades geomorfológicas, unidades geológicas superficiales y la morfodinámica, generadas a lo largo de un sistema fluvial, como resultado de los procesos erosivos y de acumulación.

- Identificar los espejos de agua zonas inundables producto de eventos o inundaciones históricas que han ocurrido en los principales afluentes en el municipio de Palmira.

- Caracterizar el comportamiento del régimen hidrológico de los principales drenajes que discurren por la zona de estudio, empleando los registros de las estaciones hidrométricas con influencia en el área.

2.3 Alcance

Con el presente estudio se busca generar la zonificación ide la amenaza por inundación del área rural del municipio de Palmira bajo tres categorías: alta, media y baja, teniendo en cuenta los análisis de tipo histórico y geomorfológico, adicional a los análisis hidrológicos, empleando herramientas de sistemas de información geográfica.

Para el caso del río Cauca, se retomarán los resultados del proyecto Corredor de Conservación y Uso Sostenible del Río Cauca, información que fue suministrada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC a la Dirección de Gestión del Riesgo de Desastres - DGRD del municipio de Palmira mediante radicado CVC 0611-966812021 del 07 de marzo de 2022.

3 LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El municipio de Palmira se encuentra ubicado en la región suroriental del departamento del Valle del Cauca alrededor de los 03°31'39" de latitud Norte y 76°18'01" de longitud Oeste del meridiano de Greenwich. Limita al norte con el municipio de El Cerrito, al sur con los municipios de Pradera y Candelaria, al este con el departamento del Tolima y al oeste con los municipios de Cali, Yumbo y Vijes (ver Figura 1).

El municipio cuenta con un área aproximada de 100.000 ha y se divide en dos grandes zonas fisiográficas de Este a Oeste: la zona montañosa y de piedemonte y la zona plana asociada al valle geográfico del río Cauca, sobre la cual se encuentra ubicada la cabecera urbana del municipio.

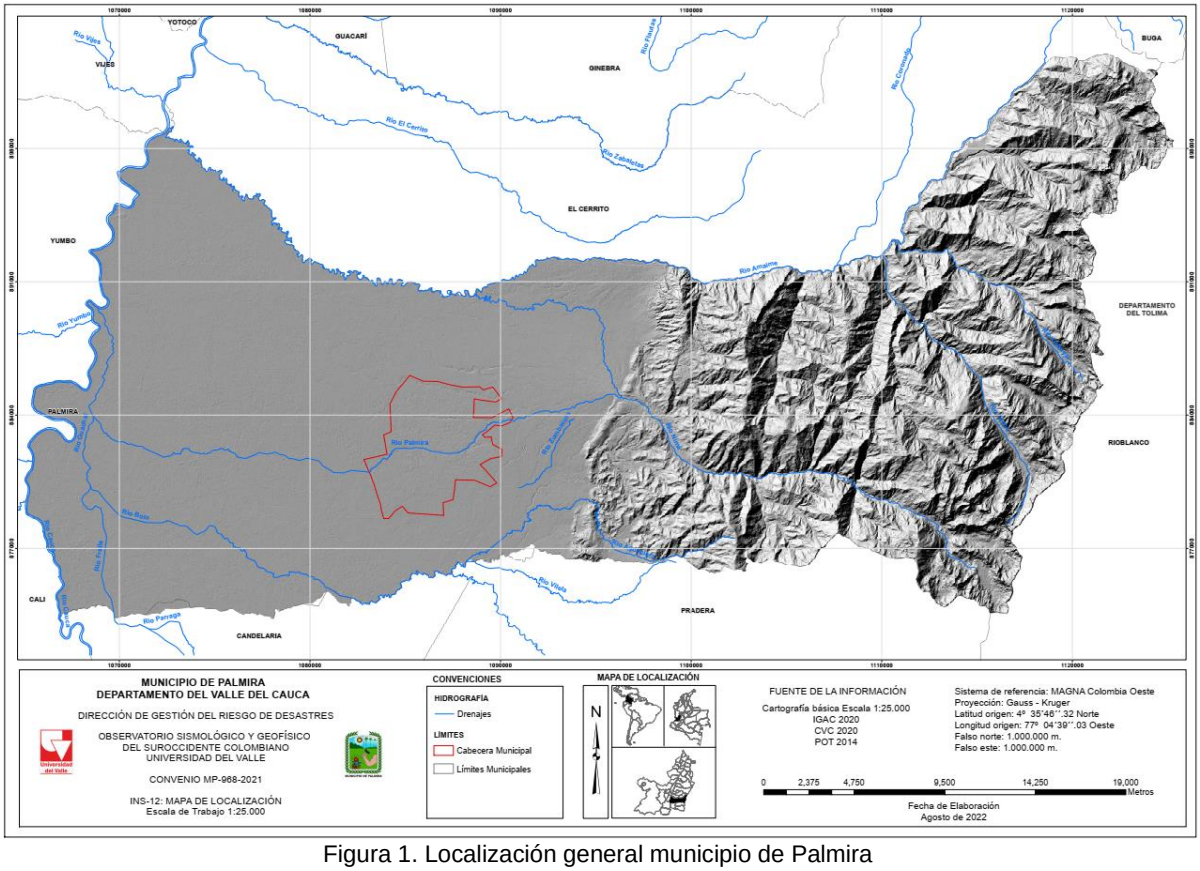


Figura 1. Localización general municipio de Palmira
Fuente: elaboración propia

El estudio básico de inundaciones para el municipio de Palmira a escala 1:25000 está dirigido al análisis de los ríos Palmira, Amaime, Nima, Aguaclara, Bolo, Frayle y Guachal, en lo que corresponde a los sectores intramontanos con planicies de inundación confinadas de los drenajes que provienen del flanco occidental de la cordillera central. Para el caso del río Cauca, se

emplearán los resultados del proyecto Corredor de Conservación y Uso Sostenible del Río Cauca, información que fue suministrada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC a la Dirección de Gestión del Riesgo de Desastres - DGRD del municipio de Palmira mediante radicado CVC 0611-966812021 del 07 de marzo de 2022. La descripción general de los drenajes objeto de estudio se presenta a continuación.

3.1 Río Amaime

El río Amaime desemboca sobre la margen derecha del río Cauca en la abscisa K 185 + 132, aguas abajo de Salvajina. La cuenca del río Amaime está ubicada en la vertiente occidental de la cordillera Central. Geográficamente la cuenca está ubicada aproximadamente entre los 3º 29' y los 3º 47' de latitud Norte y entre los 75º 55' y los 76º 12' de longitud Oeste. La superficie de la cuenca es de 482.15 km^2 hasta la estación Amaime, la longitud del cauce principal es de 44.34 Km y su caudal medio es de 7.8 m^3/s hasta la estación Los Ceibos.

La cuenca presenta un amplio rango de distribución altitudinal que oscila entre la cota 1100 en la carretera Tablones-Palmira y la cota 4100 en el Páramo La Estrella, en la laguna la Negra, sitio de nacimiento del río Amaime. Su complejo relieve incluye muy pocas zonas planas, donde predominan las zonas quebradas y abruptas con pendientes superiores al 50%.

Los afluentes principales del río Amaime en su margen izquierda son las quebradas Cucuana, Teatino y La Tigrera y los ríos Cabuyal, Nima y Toche. Por la margen derecha fluyen al Amaime el río Coronado y las quebradas La Italia, Fuentelapeña, Corazón, La Honda, Platanillal y Naranjales (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - Universidad del Valle, 2000).

3.2 Río Nima

El río Nima nace en la laguna de Santa Teresa a 3800 msnm en el flanco occidental de la cordillera central y desemboca a los 1018 msnm en la margen izquierda del río Amaime en el sector conocido como Barrio Azul del corregimiento de Amaime. La superficie de la cuenca es de 161,48 km^2 hasta la desembocadura del río Amaime y la longitud del cauce principal es de 40,14 km. El río Nima es la principal fuente de abastecimiento de agua del acueducto del municipio de Palmira.

Los afluentes principales del río Nima son la quebrada Casa de teja, Santa Rita, Los Cuervos, Golondrinas, Agua Clara, Los Negros, Las Mirlas, El Cofre, Aguazul. Por su parte, dentro las más importantes derivaciones del río Nima se encuentra el río Palmira, la cual se localiza en su margen izquierda con un caudal de 2,21 m^3/s que es distribuido en las demás subderivaciones de acuerdo con la reglamentación adoptada mediante la Resolución DG 185 de 2000, expedida por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca.

3.3 Río Guachal

El río Guachal desemboca en la margen derecha del río Cauca en la abscisa K 170 + 502, aguas abajo de Salvajina. La cuenca tributaria posee 1270.1 Km^2 y un caudal medio de 11.53 m^3/s hasta el sitio de la estación Puente Metálico. El río Guachal nace en la estribación oeste del Municipio de Palmira en la Cordillera Central, donde sus afluentes más importantes son los ríos Bolo y Frayle.

3.3.1 Río Bolo

El río Bolo nace en la cordillera Central a una altura de 3800 msnm en el páramo de Las Hermosas. Su cuenca hidrográfica posee un área de 310.9 km^2 hasta la estación Arriba y presenta una forma rectangular con un estrechamiento hacia la zona media. La longitud del cauce principal es de 33 km. Su caudal medio es de 4.03 m^3/s en la estación Arriba.

De acuerdo con el área de influencia y al relieve es posible dividir la cuenca en tres sectores:

Alto Bolo: Comprende desde su nacimiento hasta El Retiro a 2000 msnm. En este sector la cuenca se encuentra protegida por bosque naturales con algunas explotaciones de pastos. Entre los principales afluentes en este sector se tienen las quebradas Bolo Blanco, La Esperanza, El Silencio y el Danubio.

Medio Bolo: Comprende desde El Retiro hasta Potrerito a 1500 msnm. Algunos de los afluentes que entregan en este sector son las quebradas Los Negros, EL Nogal, El Muerto y Tamboral.

Bajo Bolo: Comprende desde Potrerito hasta el piedemonte de la cuenca a 1100 msnm. Los afluentes principales en este sector son el río Aguaclara y las quebradas El Tablón y La Leona.

3.3.1.1 Río Aguaclara

La subcuenca del río Aguaclara hace parte de la cuenca hidrográfica del río Bolo; con una extensión de 111,41 km^2 se encuentra ubicada entre los municipios de Palmira, Pradera y Candelaria. El río Aguaclara nace en las estribaciones de la cordillera Central a una altura de 2650 msnm y desemboca en la margen derecha del río Bolo a una cota de 980 msnm. Sus principales tributarios son las quebradas Chontaduro, Cocurro, Aguacatal, Honda y el río Vilela.

3.3.2 Río Frayle

El río Frayle nace en la laguna del Frayle sobre la cota 3800 msmn, Posee una longitud de 33 km y un área de drenaje de 285,4 km^2 hasta la estación Buchitolo con forma rectangular. En la parte media se presentan las pendientes más fuertes.

Tomando como base el área de influencia y el relieve es posible realizar la siguiente sectorización:

Alto Frayle: Comprende desde su nacimiento hasta Granates a la altura de los 2000 msnm. La pendiente de estos suelos varía del 25 al 70% y su fertilidad oscila entre moderada y baja. Entre los afluentes de este sector se destacan las quebradas Colón, San Antonio y Guayabal.

Medio Frayle: Comprende desde Granates hasta El Líbano a 1300 msnm. El principal río tributario es el Santa Bárbara.

Bajo Frayle: Comprende desde El Líbano hasta El Pedregal a 1100 msnm. La principal corriente de agua tributaria la constituye el río Párraga (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - Universidad del Valle, 2000).

3.4 Drenajes zona urbana

Los drenajes que discurren por el área urbana del municipio de Palmira objeto de estudio corresponden a los zanjones Beringo, Beringuito, Mirriñao, Zamorano, Zumbaculo y Romero, las acequias La Rita, San José y Barrancas y el río Palmira.

3.4.1 Río Palmira

El río Palmira nace de una derivación del río Nima localizada en su margen izquierda, cuya reglamentación fue adoptada mediante la Resolución DG 185 de 2000, donde indica que sus caudales son 2,21 m^3/s los cuales son distribuidos en las demás subderivaciones.

El río Palmira nace a una altura de 1200 msmn y su cota aproximada de descarga en el río Cauca es de 940 msnm. Posee una longitud de 32,8 km y un área de drenaje de 4,27km^2 hasta la su confluencia con el zanjón Romero antes de ser subterranizado en el denominado Bosque Municipal de Palmira. Cabe mencionar que el río vuelve a condición a cielo abierto en el barrio La Palmas antes de cruzar la vía vehicular que conduce al municipio de Cali.

4 METODOLOGÍA

4.1 Modelo Digital de Terreno

El proceso de validación del Modelo Digital de Terreno obtenido con la tecnología RADAR en formato TIFF suministrado por la CVC con una resolución de 2,5 metros, el cual abarca toda el municipio de Palmira, se realiza según las especificaciones técnicas (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2020) aplicando los métodos de control de calidad cuantitativos y cualitativos.

Primero se verifica que el modelo cumpla con la especificación técnica de Totalidad, con la cual, se evalúa el cubrimiento del área generada del modelo y su relación con respecto al área del límite municipal de Palmira definido en el PBOT 2014.

El método cuantitativo se ejecuta a partir de los datos tomados en campo de las batimetrías en los cuerpos de agua al interior del casco urbano del municipio de Palmira.

Los cualitativos se desarrollan a través de las evaluaciones gráficas del modelo; se generan líneas de perfiles longitudinales y transversales con el fin de verificar la información de detalles morfológicos.

4.2 Índice Topográfico de Humedad - ITH

A partir del Modelo Digital de Terreno evaluado se procede a realizar a la generación de los insumos correspondientes a dirección de flujo, acumulación de flujo, pendientes en grados, pendientes en radianes, tangente de la pendiente y superficie de contribución de aguas arriba de la zona de estudio, requeridos para la construcción del producto final ITH mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfico.

4.3 Geomorfología

El estudio geomorfológico tiene una primera fase que consiste en la compilación bibliográfica que incluye trabajos de investigación, artículos, publicaciones, libros y páginas web de entidades como la Alcaldía Municipal, el Servicio Geológico Colombiano - SGC, la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC y la Universidad del Valle.

Posteriormente, se procede a la fotointerpretación, que consiste en emplear la plataforma ArcMap, para cargar y desplegar los diferentes elementos de cartografía base (vías, caminos, construcciones, drenajes, cuerpos de agua entre otros), cartografía temática (geología, geomorfología, recursos minerales y pendientes), productos geoespaciales (DTM, mapa de sombras y ortomosaico) y anaglifos; este último analizado por medio de filtros de papel de color azul y rojo que permiten dar un aspecto tridimensional a los objetos que son observados. Una vez son desplegadas las diferentes capas de interés se procede a identificar y digitalizar rasgos

geológicos, geomorfológicos y drenajes que posteriormente son corroborados y ajustados en campo según la escala de trabajo, que para el caso particular de este estudio es de 1:25.000.

Por otro lado, mediante trabajo de campo se realiza el control de las unidades litológicas y de las subunidades geomorfológicas identificadas en la fase de fotointerpretación, mediante el reconocimiento de las Unidades Geológicas de Superficie (UGS) y de las Subunidades Geomorfológicas (SGMF) en estaciones de campo, realizadas en afloramientos naturales y/o antrópicos localizados sobre las márgenes de los ríos Amaime, Nima, Aguaclara, Bolo, Guachal, Palmira y Cauca, vías de acceso a estos y sobre las diferentes superficies de terreno de la zona de influencia de cada una de estas corrientes hídricas. De igual forma, se realiza el levantamiento y descripción geológico-geomorfológico de los procesos morfodinámicos a los que se tiene acceso a través de la infraestructura del municipio (vías y caminos); teniendo en cuenta siempre, la seguridad del personal.

4.4 Susceptibilidad a inundación por geomorfología

La categorización de zonas de susceptibilidad a inundación bajo criterios de clasificación para los niveles baja, media y alta, se realiza a partir de la identificación de las subunidades geomorfológicas, unidades geológicas superficiales y la morfodinámica, generadas a lo largo de un sistema fluvial, como resultado de los procesos erosivos y de acumulación que varían en función de su pendiente, caudal y carga de sedimentos, bajo la premisa de que cada subunidad se identifica según el material del depósito, morfogénesis, pendientes, contrastes morfológicos (rugosidad, curvatura, etc.) y cronología, siendo esta última característica la que permite determinar las áreas susceptibles a inundarse según la temporalidad del proceso: reciente, subreciente o antiguo.

4.5 Reconstrucción histórica de espejos de agua por inundaciones

Con la necesidad de reconstruir los espejos de agua de las inundaciones históricas que han ocurrido por desbordamiento de los principales afluentes en el municipio de Palmira, se realiza un trabajo con el acompañamiento de los funcionarios de la DGRD- Palmira, permitiendo la obtención de los impactos que han generado las inundaciones en su territorio a través de los últimos años.

Después de la recolección de los eventos de inundación en las fuentes de información, se gestiona el trabajo en las zonas donde han ocurrido inundaciones por desbordamiento de los afluentes en estudio, seguido de un trabajo con la comunidad afectada realizando una encuesta donde mide a través de la percepción y memoria del individuo, la profundidad, la duración, velocidad, olor, color del agua y sobre un plano se dibuja el polígono del espejo de agua.

4.6 Análisis hidrológico

Inicialmente se recopilan los registros de las estaciones hidroclimatológicas existentes en el área en estudio operadas por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC y por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. La selección de las estaciones a emplear depende de su ubicación en la zona de influencia del área de estudio y de las que cuentan con periodos de datos más cercanos a la fecha actual.

Con la información de las estaciones pluviométricas se procede a caracterizar el régimen de lluvias en la zona de estudio; para ello se evalúan los parámetros característicos, tales como precipitación promedia mensual total, número de días con lluvia y precipitación mensual máxima en 24 horas.

Por su parte, con los registros de las estaciones hidrológicas seleccionadas se generan las curvas de la variación anual de caudales medios, máximos y mínimos instantáneos, se calculan los caudales máximo, medio y mínimo diario multianual; el caudal máximo instantáneo histórico; caudales máximos para los periodos de retorno 2,33, 5, 10, 25, 50, 100, 500 y 10000 años y se evalúa de la disponibilidad de agua sin regulación mediante la curva de duración de caudales.

4.7 Capacidad hidráulica en ríos principales

Con el fin de verificar la capacidad hidráulica y el caudal máximo transportado en los sectores evaluados de los ríos principales del municipio Palmira con y sin estructuras de mitigación de inundaciones, se realizan modelaciones hidráulicas en secciones transversales.

4.8 Mapa de zonificación de amenaza por inundación área rural

En razón de la escala de trabajo, el proceso metodológico para elaborar el mapa de zonificación de amenaza por inundación en el área rural del municipio de Palmira, se desarrolla a partir del análisis e integración de la información disponible de los drenajes existentes tributarios del río Cauca (ríos principales y zanjones), la utilización de los polígonos reconstruidos de los espejos de agua asociados a registros históricos de inundaciones cruzados a través de herramientas del Sistema de Información Geográfica – SIG con la susceptibilidad a inundación por geomorfología, a manera de ilustración y como un ejercicio adicional se retoman e incluyen las áreas inundadas en el corredor del río Cauca durante los diferentes eventos de precipitación, información que fue consultada y descargada del portal avanzado de datos geográficos de la CVC - GEOCVC.

5 RESULTADOS

5.1 Evaluación del Modelo Digital de Terreno (DTM)

Para la evaluación del producto geoespacial DTM Radar CVC 2015 píxel 2,5 m, según las especificaciones técnicas (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2020) se aplicaron los métodos de control de calidad cuantitativos y cualitativos.

5.1.1 Método Cuantitativo Para la Evaluación de la Exactitud Posicional

A continuación, se realiza el análisis estadístico del DTM para hallar las anomalías que a simple vista no son detectables; por medio del cálculo del error obtenido de los puntos del DTM (altura dato) y los levantados en campo con tecnología GNSS (altura control).

Vale la pena aclarar que este análisis se realizó en el perímetro del casco urbano, área en la que se realizaron actualmente los levantamientos topobatimétricos.

Calcular el **Error** de altitud en un punto x, y se define cómo la diferencia entre la altitud dato y control Ecuación 1.

$$\in = Z_{dato} - Z_{control} \qquad \textbf{Ecu 1.}$$

- **Error Medio** se define cómo el cociente de la sumatoria del error sobre el número total de la muestra Ecuación 2.

$$\in_m = \frac{\sum_{i=1}^{n} \in^2}{N} \qquad \textbf{Ecu 2.}$$

- **Error Medio Cuadrático** se define cómo la raíz cuadrada del error medio Ecuación 3.

$$RMSEz = \sqrt[2]{\in_m} \qquad \textbf{Ecu 3.}$$

- **Error Estándar** se define cómo la raíz del error medio cuadrático Ecuación 4.

$$\in_{Estándar} = \sqrt{RMSE_z} \qquad \textbf{Ecu 4.}$$

Para garantizar en esta medida, un nivel de confianza del 95% se establecen las tolerancias indicadas en la Tabla 1, donde el cálculo del error medio cuadrático debe ser igual o menor al valor reportado de acuerdo con el espaciado de la Grill/Malla. De tal manera, que el conjunto de datos será CONFORME (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2020).

Tabla 1. Exactitud vertical según producto DTM

Producto	Vertical RMSEz (m)	Exactitud Vertical de confianza 95% (m)[2]
MDT1	0,30	0,6
MDT2	**0,60**	**1,2**
MDT5	1,5	3
MDT10	3	6
MDT25	7,5	15

Fuente: (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2016).

5.1.2 Método Cualitativo Para la Evaluación Consistencia lógica

5.1.2.1 Consistencia Topológica: Se evaluó de tres formas:

La posible discontinuidad de los datos mediante el análisis espacial con la unidad de medida Booleana.

Las herramientas de matemáticas Booleanas interpretan las entradas como valores Booleanos, donde los valores distintos de cero se consideran verdaderos y el valor cero se considera falso. Por lo tanto, Si los valores de entrada son verdaderos (distintos de cero), el valor de salida es 0. Si los valores de entrada son falsos (cero), la salida es 1.

También se revisa si el DTM cumple con el espaciado horizontal del mismo para la grilla considerada, de acuerdo con lo establecido por el IGAC 2020, Tabla 2.

Tabla 2. Espaciado máximo del DTM Grilla/Escala.

Producto	Espaciado máximo de Grilla/Malla(m)
MDT1	1
MDT2	2
MDT5	5
MDT10	10
MDT25	25

Fuente: (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2016).

5.1.2.2 Análisis visual

Se construirán perfiles topográficos transversales y longitudinales en el DTM sobre algunos cuerpos hídricos de interés en el presente proyecto. Seguidamente, se analizarán una imagen (Bing) para comprobar si su altitud es consistente con las formas del relieve del área.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, los resultados del proceso se relacionan a continuación:

- **Totalidad**

El DTM cubre el área total de interés del proyecto; este presenta 0% de errores por omisión y/o comisión, por lo tanto, el conjunto de datos es conforme, Figura 2.

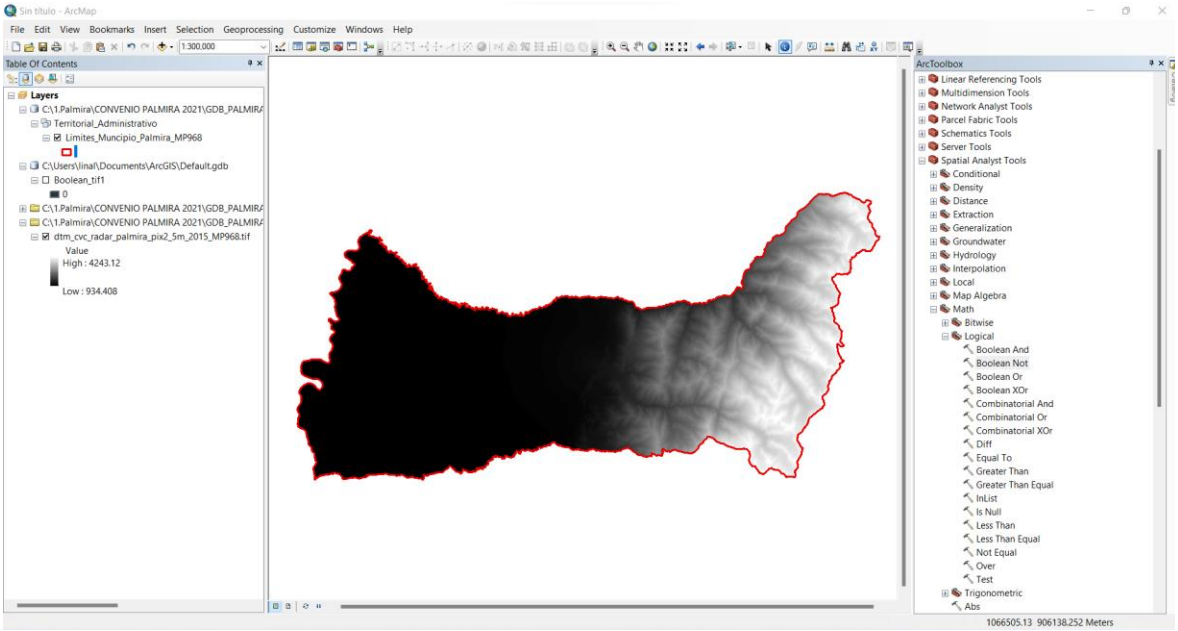


Figura 2. Análisis Espacial de totalidad.
Fuente: elaboración propia.

- **Exactitud Posicional**

El análisis estadístico permitió determinar la precisión de en la estimación del Z en los puntos de muestreo (5.488), correspondientes al área del perímetro urbano del municipio de Palmira.

Se obtuvo como resultado (Tabla 3) un error medio cuadrático (EMC) de 1,12m. Por lo tanto, las alteraciones no son tan significativas en el área analizada del perímetro urbano. Y se encuentran dentro de los parámetros de calidad establecidos por el IGAC (Tabla 4) para DTM con resolución de 2,5m.

Tabla 3. Errores posicionales de la vertical en el DTM.

Error medio	0,27
Error cuadrático	47130237,82
Error Medio cuadrático	1,12
Error Estándar	1,52

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.. Tabla de exactitud vertical según el producto.

Producto	Vertical RMSEz (m)	Exactitud Vertical de confianza 95% (m)^2
MDT1	0,30	0,6
MDT2	**0,60**	**1,2**

Producto	Vertical RMSEz (m)	Exactitud Vertical de confianza 95% (m)[2]
MDT5	1,5	3
MDT10	3	6
MDT25	7,5	15

Fuente: (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2020).

- **Consistencia lógica**

Se encontró como resultado en el DTM de entrada que los valores son verdaderos (distintos de cero), como se puede observar en la Figura 3.

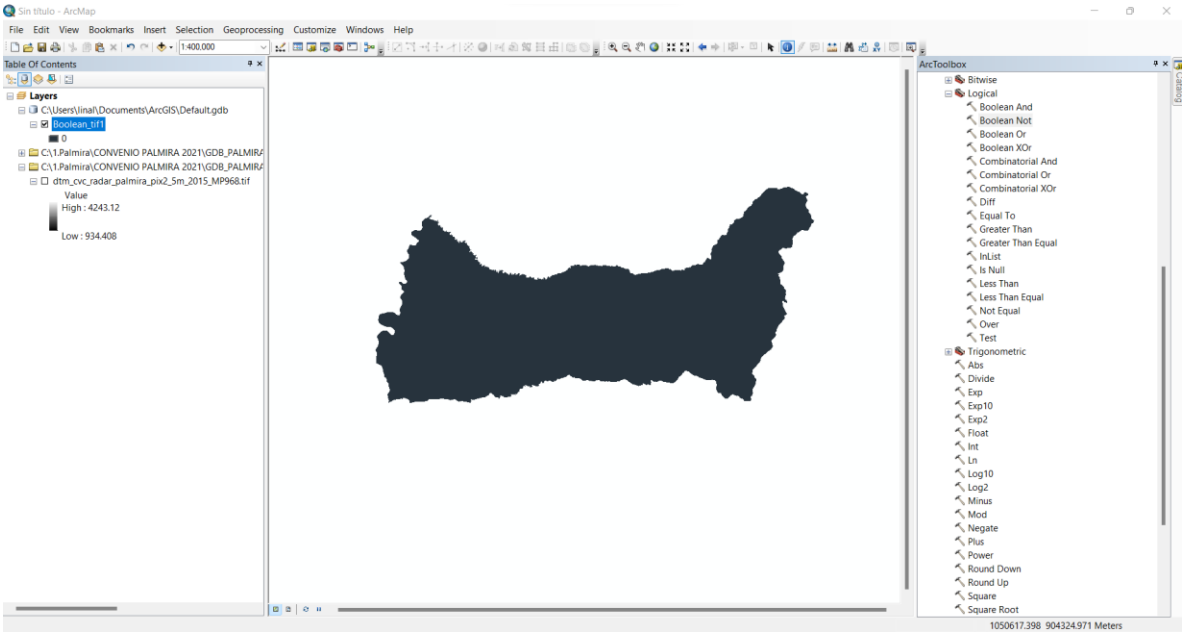


Figura 3. Análisis Espacial Boolean Not.
Fuente: elaboración propia.

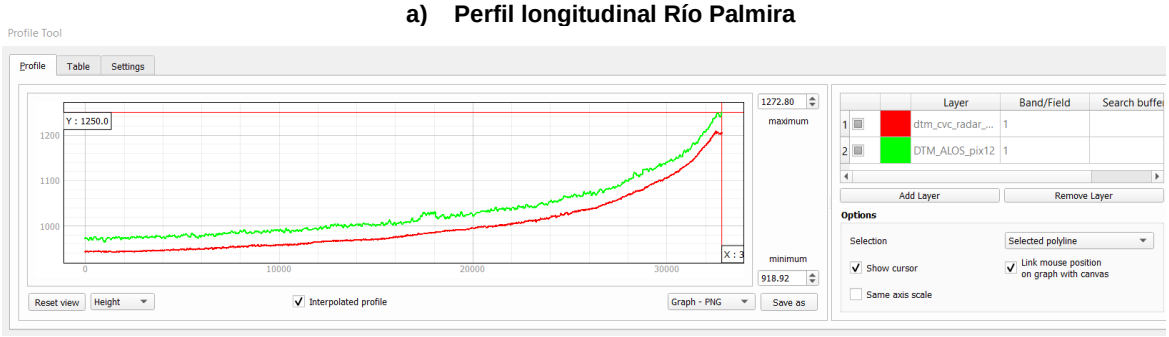
- **Análisis de geoformas a partir de perfiles**

La representación de los perfiles longitudinales y transversales trazados en los ejes de los ríos (Palmira, Nima, Fraile, Guachal, Bolo y Agua Clara). Muestran como respuesta un comportamiento adecuado con respecto a la topografía en las zonas evaluadas.

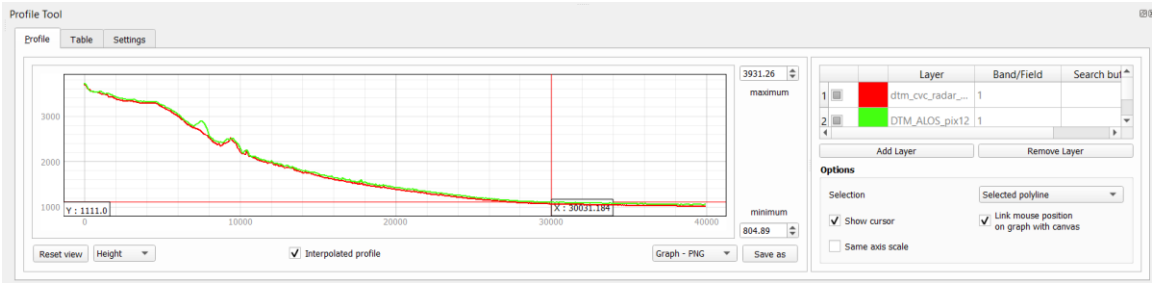
Perfiles Longitudinales

En la Figura 4 se muestran algunos de los perfiles longitudinales (a, b, c, y d) realizados. En ellos se puede observar que presentan comportamiento de crecimiento exponencial, en función al amento de zonas con mayor pendiente; también presenta comportamiento consistente respecto a la distribución geoespacial que presenta la imagen bing en comparación con el DTM de 12,5m ALOS PALSAR y el DTM 2,5m de CVC.

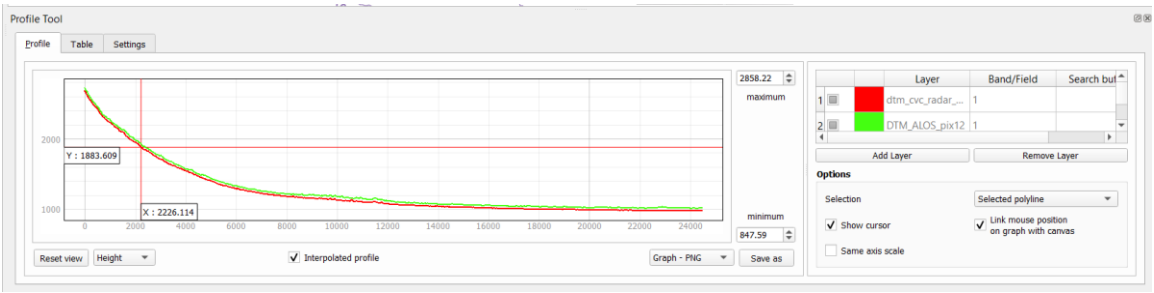
a) Perfil longitudinal Río Palmira



b) Perfil longitudinal Río Nima



c) Perfil longitudinal Río Agua Clara



d) Perfil longitudinal Río Amaime

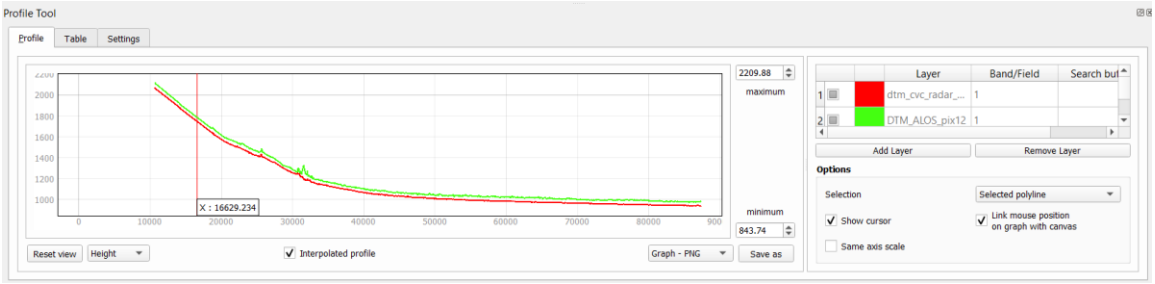
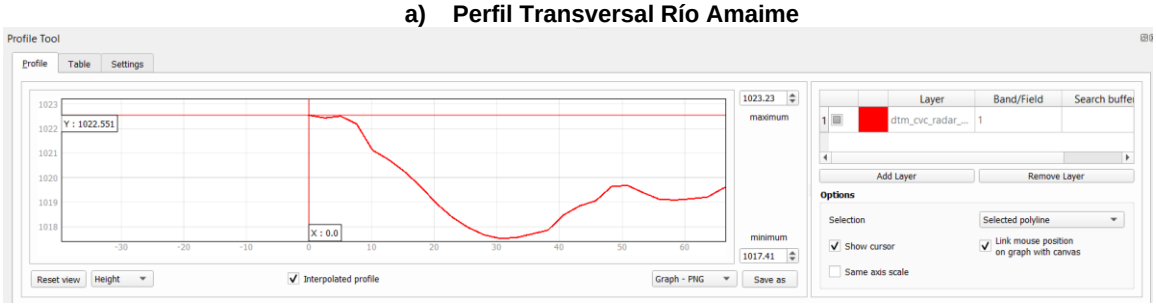


Figura 4. Perfiles longitudinales ríos del municipio de Palmira.
Fuente: elaboración propia.

Perfiles Transversales

La evaluación gráfica de los perfiles transversales (a y b) que se muestra en la Figura 5, para el sector Barrio Azul, zona plana respectivamente. En (a) las elevaciones varían entre 1017 m y 1023 m y para (b), entre 1017 m y 1021 m, se aprecia un nivel de detalle muy contrastante con respecto al relieve de la zona.

a) Perfil Transversal Río Amaime



b) Perfil Transversal Río Nima

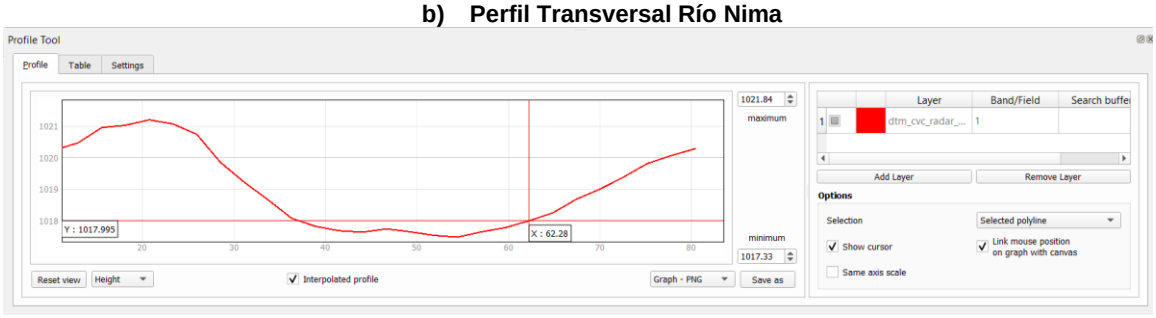


Figura 5. Perfiles longitudinales río Amaime y Nima
Fuente: elaboración propia.

Dados los lineamientos establecidos por el IGAC en la Resolución 529 de 2020, donde se estipula la resolución de los productos para el desarrollo de cartografía a escala 1:25.000, se realiza el remuestreo del MDT CVC con valor del píxel 2,5m a 15m, para llevar a cabo los desarrollos metodológicos.

5.2 Cálculo del Índice Topográfico de Humedad - ITH

Este índice se calcula de la expresión propuesta por (Beven K., 1979) ecuación 5; en la cual, se relaciona la dirección y acumulación de flujo, representadas por el área de captación o área de acumulación, *As* con la pendiente del terreno, β.

$$ITH = Ln\left[\frac{AS_i}{Tan\beta i}\right] \qquad \textbf{Ecu 5}.$$

Siguiendo el orden metodológico que sé que ilustra la Figura 6.

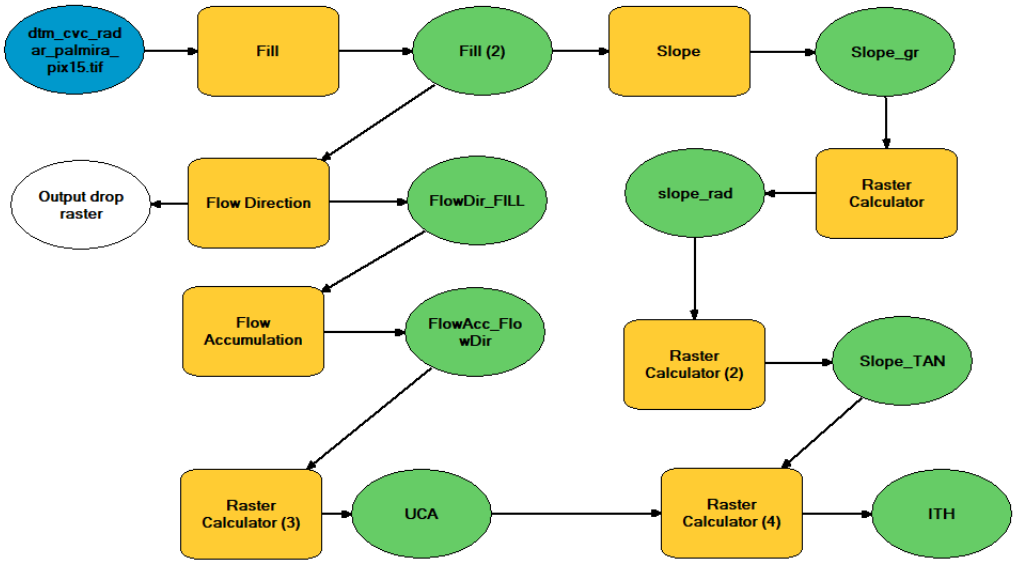


Figura 6. Esquema metodológico para el cálculo del Índice Topográfico de Humedad (ITH).
Fuente: elaboración propia.

5.2.1 Fill sinks

Este proceso se realizó con el objetivo de eliminar los "huecos" o sumideros. Esos puntos son celdas de baja elevación que no drenan al estar rodeadas completamente por celdas del terreno más altas.

Generalmente se toman como "artefactos" que interfieren con la trayectoria del flujo a través del DTM, así que se eliminan aumentando su elevación hasta el punto en que se consiga continuidad en el flujo. Por tanto, antes de cualquier proceso se puede eliminar el efecto de depresiones "rellenándolas" (Deng, 2007), aplicando el algoritmo Fill, presente en ArcGIS.

5.2.2 Mapa de dirección de flujo

Este ráster se calcula a partir de la expresión (Olaya, 2004), descrita en la ecuación 6.

$$di = \frac{(\mathrm{Tan}\,\beta i)^{\gamma}}{\sum_{j=1}^{K}((\mathrm{Tan}\,\beta i)^{\gamma}} \qquad \textbf{Ecu 6.}$$

Donde:

di es la fracción de agua que drena hacia la celda vecina *i* (la sumatoria de los valores *di* de las 8 celdas de la ventana móvil debe ser igual a 1, para conservar la masa).

i, j son las direcciones de flujo (1 a 8)

Tan βi es el gradiente de la pendiente entre la celda central y la celda en dirección i.

$\sum_{j=1}^{K}((\mathbf{Tan}\,\boldsymbol{\beta i})^{\gamma}$ es la sumatoria del valor de la pendiente de todos los vecinos de menor altitud. Las celdas altas tienen un valor de 0 y en una ventana móvil de 3x3 el número de celdas vecinas (*k*) es igual a ocho

$\boldsymbol{\gamma}$ el coeficiente de dispersión.

5.2.3 Mapa de acumulación de flujo

El flujo acumulado se basa en la cantidad de celdas que fluyen hacia cada celda en el ráster de salida. Las celdas de salida con una gran acumulación de flujo son áreas de flujo concentrado y se usó para identificar canales de corriente (ArcGIS Pro, 2022).

Este ráster se calculó por medio de la ecuación 7, descrita a continuación.

$$AS_{\mathrm{i}} = A + \sum_{\mathrm{i}=1}^{K}(A_{di} * d_i) \qquad \textbf{Ecu 7.}$$

Donde:

$\boldsymbol{AS}_{\mathrm{i}}$ es el área de captación acumulada para la celda central *i*.

$\boldsymbol{A}$ es el área de captación de la celda central (proveniente del cálculo de

$\boldsymbol{A_{di}}$ es el área de captación de la celda vecina i ubicada aguas debajo de la celda central

$\boldsymbol{d_i}$ es la fracción de flujo obtenida con la ecuación 5.

5.2.4 Mapa de pendientes en grados (Slope_gr)

Identifica la pendiente como el gradiente o la tasa de cambio máximo en el valor z de cada celda de una superficie ráster. Para grados, el rango de valores de pendiente es de 0 a 90.

5.2.5 Mapa de pendientes en radianes (Slope_rad)

En el cálculo de este mapa se transforman los valores del ráster de la pendiente en grados a valores de radianes por medio de la ecuación 8.

$$\textbf{Slope_rad} = \frac{(\text{Slope_gr} * 1.570796)}{90} \qquad \textbf{Ecu 8.}$$

5.2.6 Mapa de la tangente de la pendiente (Slope_TAN)

El resultado de este ráster es el cálculo de la tangente de la pendiente en radianes, descrito en la ecuación 9.

Slope_TAN = Con (Slope_rad > 0, Tan (Slope_rad), 0.001) **Ecu 9.**

5.2.7 Mapa UCA

El resultado de este mapa es la superficie de contribución de aguas arriba, a través de la ecuación 10.

UCA = $(AS_i + 1) * 12.5$ **Ecu 10.**

Donde:

AS_i es el área de captación acumulada para la celda central *i* o el mapa de acumulación de flujo.

1 es un constante y

12.5 es el tamaño del píxel del ráster de entrada.

5.2.8 Mapa ITH

Finalmente disponemos de los insumos desarrollados para el cálculo del Índice Topográfico de humedad a partir de la ecuación 11. Obtendremos como resultado la distribución de las zonas con mayor potencial de acumulación de humedad en función de la topografía del terreno.

ITH = $Ln \frac{UCA}{\text{Slope_TAN}}$ **Ecu 11.**

En Figura 7 se muestra los resultados de los ráster desarrollados como insumo para el cálculo del ITH.

En el producto final del ITH se identifica en color verde los sitios con “baja” capacidad de acumulación de agua, correspondientes con el relieve de montaña que presenta el municipio en esa zona. Donde, debido a su muy alta pendiente, el escurrimiento es mayor.

En el mismo sentido, las pendientes bajas, presentadas en color rojo y amarillo, corresponderán con un nivel de escurrimiento menor, por lo tanto, son lugares con un alto potencial en la acumulación de agua.

Sin embargo, su distribución no obedece a un a clasificación de áreas susceptibles por inundación. Es decir, al relacionarse las formas del terreno más cercanas a los ríos y de menor altitud como orillas, de las planicies de inundación, el índice toma valores en color amarillo y verde correspondiente a poca posibilidad concentración de agua, por tanto, podrían considerarse poco favorables para almacenar agua. Imposibilitando la delimitación efectivamente de las probables zonas de inundación.

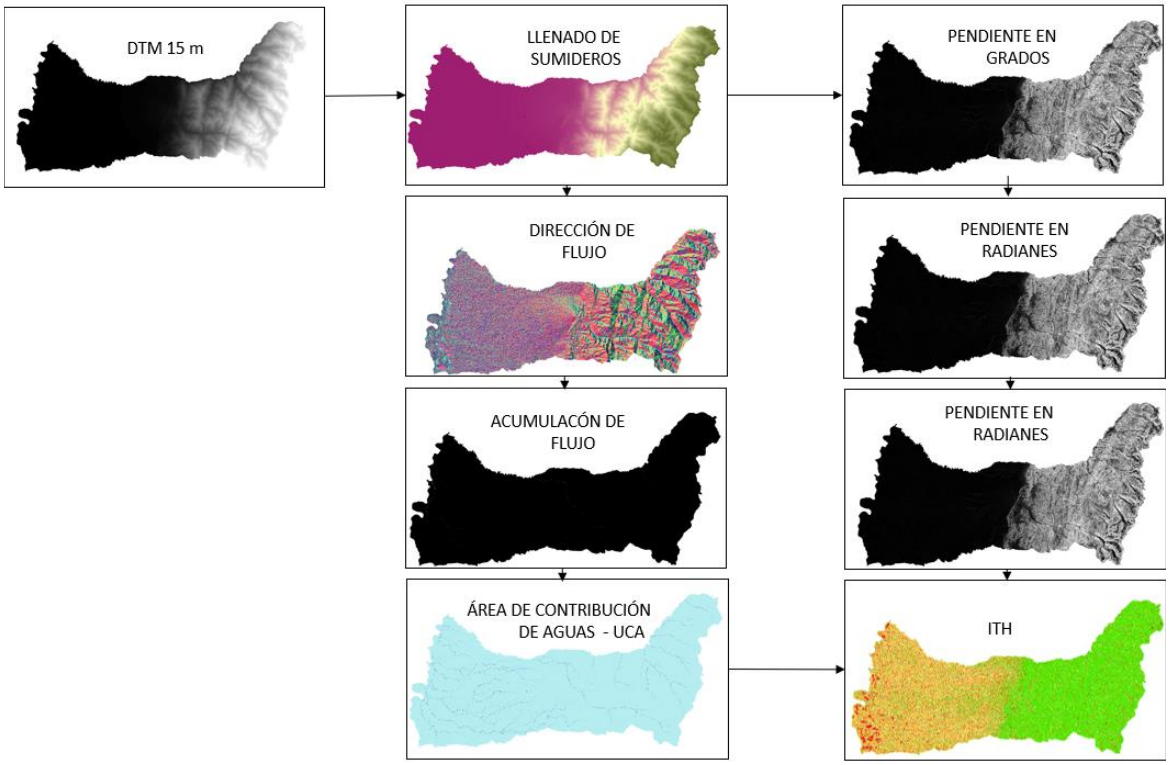


Figura 7. Insumos desarrollados para el cálculo del ITH del Municipio de Palmira.
Fuente: elaboración propia.

Dentro del análisis de evaluación del DTM realizado a partir de los puntos de muestreo (5488), tomados de la topobatimetría en el casco urbano del municipio de Palmira. Se determina que la presión en Z, según el error medio cuadrático (EMC) es de 1,12m. Por lo tanto, las alteraciones no son tan significativas en el área analizada del perímetro urbano y se encuentran dentro de los parámetros de calidad establecidos por el IGAC para DTM con resolución de 2,5m.
En contraste con lo anterior, el análisis visual de perfiles transversales y longitudinales en los cuerpos de agua es consistente. En ellos se identifica el comportamiento de crecimiento exponencial en función al aumento de zonas con mayor pendiente y presentan un comportamiento en relación con la distribución geoespacial que se identifica en la imagen (Bing), en comparación con el DTM de 12,5m ALOS PALSAR y el DTM 2,5m de CVC.

En relación con el producto ráster del ITH y su idoneidad para el cálculo de la susceptibilidad por inundación; se encuentra que su distribución no obedece a una clasificación de áreas

susceptibles por inundación. Es decir, al relacionarse las formas del terreno más cercanas a los ríos y de menor altitud como orillas, de las planicies de inundación, el índice toma valores en color amarillo y verde correspondiente a la poca posibilidad de concentración de agua, por tanto, podrían considerarse poco favorables para almacenar agua; imposibilitando la delimitación efectivamente de las probables zonas de inundación.

5.3 Geomorfología

La cartografía geomorfológica tiene por objeto proporcionar información acerca de la forma del terreno, su origen y, sobre todo, de los procesos antiguos y recientes que conllevan al relieve actual del paisaje. Los cambios topográficos y morfológicos observados en el terreno dan una idea clara de procesos de deformación y fallamiento, cambios en la litología, procesos de meteorización y procesos erosivos. Estos aspectos permiten clasificar el relieve de acuerdo con los diferentes factores que han interactuado en una zona, y a su vez, son la base de la cartografía de Unidades Geológicas Superficiales (UGS).

El elemento o componente geomorfológico corresponde al máximo nivel de detalle de una unidad geomorfológica, definida por los rasgos de relieve, la morfometría detallada del terreno y por los microrelieves asociados a una característica litológica con base en análisis detallados (SGC, 2012), esta definición se basa principalmente en características morfogenéticas y morfométricas.

Los ambientes morfogenéticos hacen alusión a las condiciones físicas, químicas, bióticas y climáticas bajo las cuales se generaron las geoformas. Su determinación se realiza con base en la expresión e interpretación de los procesos morfológicos asentados en el terreno, los cuales impulsaron la formación, evolución y modificación de las geoformas. En la Tabla 5 se presentan las nueve (9) categorías de ambientes morfogenéticos.

Tabla 5. Ambientes Morfogenéticos

Ambiente	Descripción
Estructural (S)	Corresponde a las geoformas generadas por la dinámica interna de la tierra; asociada a plegamientos y fallamientos.
Volcánico (V)	Todas aquellas geoformas generadas por la intrusión o extrusión de materiales fundidos procedentes del interior de la tierra.
Denudacional (D)	Determinado por la actividad de los procesos erosivos hídricos y pluviales y principalmente producto de los procesos de meteorización, erosión y remoción en masa, sobre geoformas pre-existentes.
Fluvial y Lagunar (F)	Corresponde a las geoformas generadas por procesos de erosión y acumulación donde el agente principal son las corrientes de agua tales como ríos, quebradas, arroyos, lagos y lagunas.
Marino y Costero	Corresponde a todas aquellas geoformas construidas por las corrientes y procesos del mar; incluidos los deltas.
Glacial y Periglacial	Geoformas originadas por los glaciares; tanto de los casquetes polares como los de alta montaña.
Eólico	Corresponden a las geoformas erosivas y de acumulación sedimentaria, formadas por la acción de los vientos especialmente en los climas áridos.
Kárstico	Formas del terreno producto de la meteorización y dilución de rocas y materiales propensos a la dilución en ambientes húmedos y cálidos; tales como la caliza y sal.

Tabla 5. Ambientes Morfogenéticos

Ambiente	Descripción
Antropogénico	Corresponde a todas aquellas geoformas producto de la actividad del hombre y que modifican la superficie del terreno.

Fuente: Tomado y modificado (Instituto Colombiano de Geología y Minas, 2011)

Para la elaboración del mapa de elementos geomorfológicos (EGMF) se siguió la Propuesta de Estandarización de la Cartografía Geomorfológica en Colombia a Escala 1:100000 (Instituto Colombiano de Geología y Minas, 2011), donde se sugiere un análisis del terreno desde el punto de vista regional hasta llegar a uno local, siendo el Elemento Geomorfológico, la unidad de cartografía principal (Figura 8).

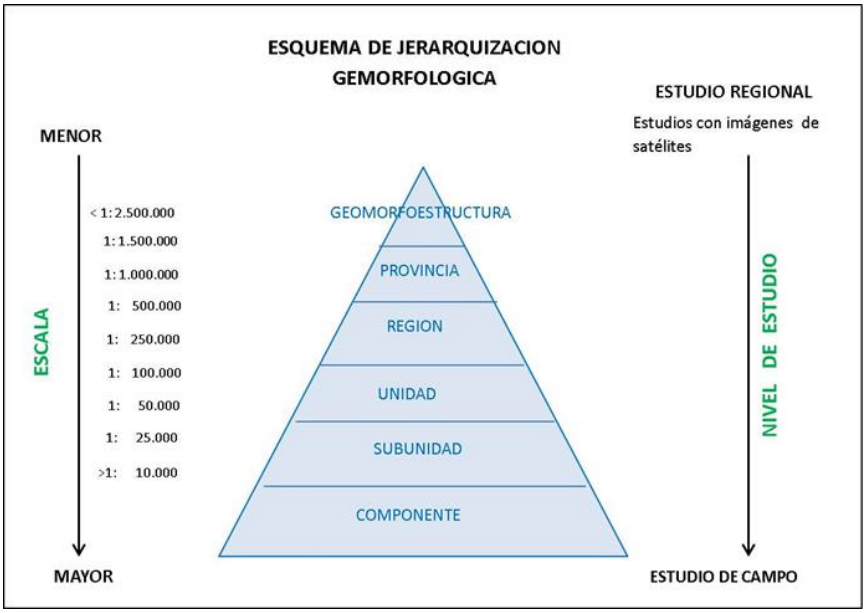


Figura 8. Esquema de jerarquización geomorfológica.
Fuente: (Instituto Colombiano de Geología y Minas, 2011)

Geomorfoestructura: corresponde a áreas geográficas extensas o a amplios espacios continentales o intracontinentales, caracterizados por estructuras y topografías regionales. Su escala de trabajo es < 1:2.500.000 y se encuentra representada por los cratones, escudos, plataformas, cinturones orogénicos y valles en rift.

Provincia: son áreas que agrupan geoformas similares definidas por un macro relieve y una génesis geológica similar. Localmente corresponde a las regiones naturales y los terrenos geológicos de Colombia, demarcados por fallas regionales o continentales definidas o inferidas. Se definen términos como cinturones montañosos, llanuras, peneplanicies, cordilleras y serranías. Su escala de trabajo está entre 1:1.000.000 y 1:500.000.

Región: corresponde a geoformas asociadas a la génesis de los paisajes y definidas dentro de un ambiente morfogenético específico y afectado por procesos dinámicos parecidos. Permite

agrupar áreas equivalentes a vertientes contenidas en una provincia geomorfológica y que representan un ambiente genético particular con condiciones climáticas homogéneas. Su escala de trabajo está entre 1: 250.000 y 1: 500.000.

Unidad: corresponde a una geoforma individual, genéticamente homogénea a partir de un proceso constructivo o destructivo dentro de un ambiente geomorfológico particular. Agrupan los elementos básicos que constituyen un paisaje, definidos con criterios genéticos, morfológicos y geométricos. Su escala de trabajo esté entre 1:100.000 y 1:50.000.

Subunidad: definidas por contrastes morfológicos y morfométricos que relacionan el tipo de material o la disposición estructural de los mismos, expresados por el contraste dado por las formaciones superficiales asociadas a procesos morfodinámicos actuales de meteorización, erosión, transporte y acumulación. Su escala de trabajo está entre 1:25.000 y 1:10.000.

Componente u elemento: corresponde al máximo nivel de detalle de jerarquía y su escala de trabajo es igual o mayor a 1:10.000. Esta categoría está determinada por los rasgos del relieve: escarpes naturales o antrópicos, relieves internos de laderas o flancos, crestas, formas de valle, etc.; definidos en sitios puntuales y determinados por la morfometría detallada del terreno en una Subunidad Geomorfológica.

Adicionalmente se realiza una valoración del relieve a través de atributos cuantificables que permite caracterizar un ambiente geomorfológico, agruparlo en sus similitudes y posteriormente calificarlo en cuanto a la susceptibilidad o predisposición a generar movimientos en masa. A continuación, se describen los parámetros principales evaluados en la estandarización de los elementos componentes del terreno (Servicio Geológico Colombiano, 2012).

Morfología: está relacionado con los aspectos de la geometría e incluye fundamentalmente los gradientes topográficos y las formas relativas.

Morfometría: Trata de aspectos cuantitativos en términos de medidas de longitud, área, forma y pendiente. También se incluye la comparación según la relación geométrica entre las diferentes posiciones espaciales. Los componentes del terreno para su descripción son:

- Contraste de relieve o relieve relativo: Hace referencia a la diferencia de altitud de la geoforma entre la parte más alta y más baja de ésta, independiente de la altura absoluta o el nivel del mar. Es un atributo que indica la energía potencial de un sistema de drenaje y los materiales constitutivos de la geoforma (Tabla 6)

Tabla 6. Rangos de intervalos de altura o relieve relativo

	Descripción del relieve	Resistencia relativa del material
< 50m	Muy bajo.	Materiales muy blandos y erosionables
50 – 250 m	Bajo	Blando erosionable.
250 – 500 m	Moderado	Moderadamente blando y erosión alta
500 – 1000 m	Alto	Resistente y erosión moderada.

	Descripción del relieve	Resistencia relativa del material
1000 – 2500 m	Muy alto	Muy resistente y erosión baja
> 2500 m .	Extremadamente alto	Extremadamente resistente y erosión muy baja

Fuente: (Servicio Geológico Colombiano, 2012)

- Inclinación de la ladera: Es el ángulo que forma una ladera o terreno respecto a un plano horizontal. La inclinación de la ladera está relacionada con el tipo de material que conforma la unidad morfológica y con la susceptibilidad de dicha unidad a la formación de movimientos en masa (Tabla 7)

Tabla 7. Rangos de inclinación de la ladera

Inclinación (Grados)	Descripción	Características del material y comportamiento
< 5	Plana a suavemente inclinada	Muy blanda y muy baja susceptibilidad a movimientos en masa (MM).
6 – 10	Inclinada	Blanda y baja MM
11 - 15	Muy inclinada	Moderadamente blanda y moderada susceptibilidad a MM.
16 - 20	Abrupta	Moderadamente resistente y moderada susceptibilidad a MM.
21 - 30	Muy abrupta	Resistente y alta susceptibilidad a MM
31 - 45	Escarpada	Muy resistente alta susceptibilidad MM
>45	Muy escarpada	Extremadamente resistente, baja susceptibilidad a MM

Fuente: (Servicio Geológico Colombiano, 2012)

- Longitud de la ladera: es un indicador de la homogeneidad del material constitutivo de las geoformas; puede determinar una mayor superficie para el desarrollo de los procesos morfodinámicos (Tabla 8)

Tabla 8. Rango de longitud de la ladera

Longitud (m)	Descripción
< 50m	Muy corta
50 – 250 m	Corta
250 – 500 m	Moderadamente larga
500 – 1000 m	Larga
1000 – 2500 m	Muy larga
> 2500 m	Extremadamente larga

Fuente: (Servicio Geológico Colombiano, 2012)

- Forma de la ladera: Refleja la homogeneidad en la resistencia de los materiales y la presencia o control de estructuras geológicas. También condiciona los tipos de movimientos en masa que pueden desarrollarse en una ladera. Es común relacionar movimientos rotacionales a pendientes cóncavas y convexas y movimientos planares a pendientes rectas controladas estructuralmente o movimientos complejos a pendientes Irregulares (Tabla 9).

Tabla 9. Rangos de forma de la ladera

Clase	Características materiales	Movimientos en masa asociados
Recta	Alta resistencia y disposición estructural a favor de la pendiente	Movimiento traslacional

Clase	Características materiales	Movimientos en masa asociados
Cóncava	Material blando y disposición estructural no diferenciado	Deslizamiento rotacional
Convexa	Materiales blandos y disposición estructural casi horizontal	Predomina meteorización y erosión. Pequeños deslizamientos rotacionales.
Irregular o escalonada	Materiales con resistencia variada. Disposición estructural en contra de la pendiente	Caída de bloques. Erosión diferencial
Compleja	Mezcla de materiales. Disposición estructural no definida	Deslizamientos complejos

Fuente: (Servicio Geológico Colombiano, 2012)

- Patrón de drenaje: Es la distribución de todos los canales de drenajes superficiales en un área que esté ocupada o no por aguas permanentes (Figura 9). El patrón de drenaje está controlado por la inclinación del terreno, tipo y estructura geológica de la roca subyacente, densidad de vegetación y las condiciones climáticas.

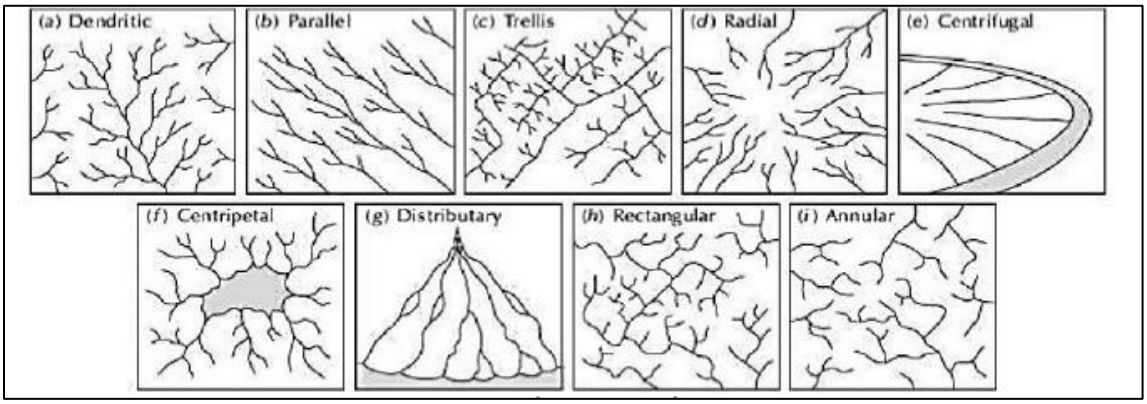


Figura 9. Patrones de drenaje.
Fuente: (Servicio Geológico Colombiano, 2012)

- Forma de crestas y valles: Las divergencias entre las formas características que presenta el relieve se considera como un parámetro de agrupamiento establecido en la apariencia superficial de la geoforma. Crestas agudas de cimas bien definidas con laderas de pendientes abruptas, contrastan con cimas anchas de laderas de pendiente inclinada; conjuntamente la presencia de valles con una forma definida y crestas alineadas que describen una orientación típica, sugieren un tipo de control estructural o de competencia de los materiales que recubren la geoforma. Este parámetro adquiere relevancia en las observaciones realizadas en campo para la caracterización de unidades geomorfológicas a escalas detalladas y escalas medias (Tabla 10).

Tabla 10. Formas de cresta y valles

Forma de la creta	Forma del valle
Aguda	Artesa
Redonda	Forma de V
Convexa amplia	Forma de U
Convexa plana	

Forma de la creta	Forma del valle
Plana	
Plana disectada	

Fuente: (Servicio Geológico Colombiano, 2012)

Teniendo en cuenta los criterios descritos y los ambientes morfogenéticos de la Tabla 5 y la jerarquización geomorfológica (Figura 8); como resultado de la fase de fotointerpretación y el trabajo en la fase de campo para el municipio de Palmira se determinó la existencia de cinco (5) ambientes morfogenéticos; denudacional (D), estructural (S), fluvial (F), glacial (G), y antropogénico (A); lográndose determinar 17 subunidades para el ambiente denudacional (D), 15 para el estructural (S), 18 para el fluvial (F), 10 para el glacial (G) y 3 para el ambiente antropogénico (Figura 10); los cuales se encuentran distribuidos espacialmente como se ilustra en el mapa de EGMF (Figura 11) (GMF-2)).

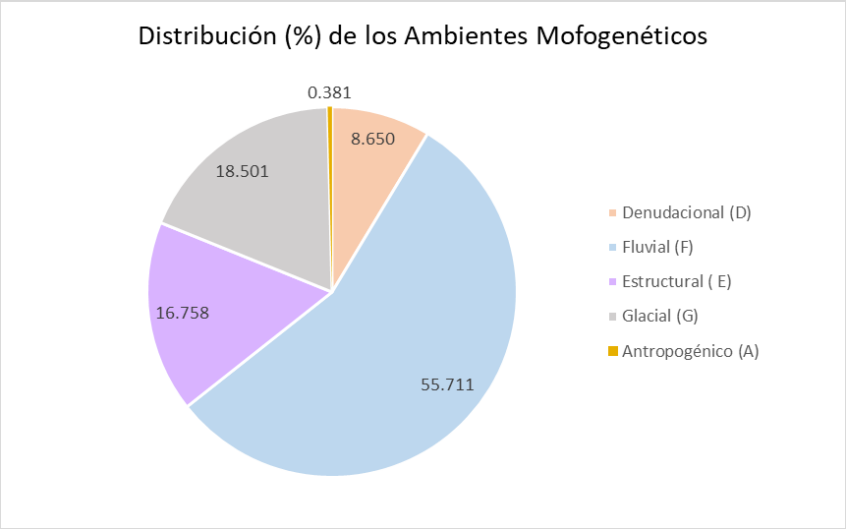


Figura 10. Distribución porcentual de los ambientes morfogenéticos del municipio de Palmira.
Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Distribución de ambientes morfogenéticos en el área rural del municipio de Palmira.

GEO-MORFO-ESTRUCTURA	PROVINCIA	REGIÓN	UNIDAD	SUBUNIDAD	ACRÓNIMO	ÁREA (Ha)	%
Sistema Orogénico Andino	Cordillera Central y Cuenca Cauca Patía	Denudacional (D)	Colina remanente	Colina remanente	Dcre	377,759	0,373
			Cono o lóbulo de deslizamiento	Cono de deslizamiento indiferenciado	Ddi	68,778	0,068
				Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional	Ddrt	67,78	0,067
				Cono o lóbulo de deslizamiento traslacional	Ddtr	37,755	0,037
			Cono y Lóbulo Coluvial y de Solifluxión	Cono y lóbulo coluvial y de solifluxión	Dco	142,018	0,14
			Loma	Loma denudada	Dld	120,766	0,119
			Lomo	Lomo denudado	Dlde	1470,025	1,45
				Lomo denudado bajo de longitud larga	Dldebl	324,811	0,32
			Lomeríos disectados	Lomerios disectados	Dldi	687,73	0,679
				Lomerios muy disectados	Dlmd	1803,025	1,779
				Lomerios poco disectados	Dlpd	218,107	0,215

GEO-MORFO-ESTRUCTURA	PROVINCIA	REGIÓN	UNIDAD	SUBUNIDAD	ACRÓNIMO	ÁREA (Ha)	%
			Monticulos y ondulaciones denudacionales	Monticulos y ondulaciones denudacionales	Dmo	1,913	0,002
			Pedimentos	Pedimentos de acumulación	Dpa	112,846	0,111
			Sierra	Sierra denudada	Dsd	1074,892	1,061
				Sierra residual	Dsr	741,866	0,732
				Escarpe de erosión mayor	Deem	510,181	0,503
				Escarpe faceteado	Def	1006,383	0,993
		Fluvial (F)	Abanico Aluvial	Abanico aluvial	Faa	1957,826	1,932
				Abanico aluvial antiguo	Faaa	4348,603	4,291
				Abanico aluvial actual	Faaac	2319,146	2,288
				Abanico aluvial subreciente	Faas	5446,173	5,373
				Abanico aluvial coalescente	Fac	3577,681	3,53
				Escarpe abanico aluvial	Fea	43,092	0,043
			Terraza de Acumulación	Terraza de acumulación	Fta	46,607	0,046
				Escarpe de terraza de acumulación	Ftae	2,09	0,002
				Terraza de acumulación antigua	Ftan	169,167	0,167
				Escarpe de terraza de acumulación antigua	Ftaean	100,325	0,099
				Terraza de acumulación subreciente	Ftas	223,883	0,221
				Escarpe de terraza de acumulación subreciente	Ftaeas	24,243	0,024
			Planicie o Llanura de Inundación	Planicie de inundación	Fpi	10160,53	10,02
			Cauce activo	Cauce activo	Fca	325,395	0,321
			Meandro abandonado	Meandro abandonado	Fma	86,673	0,086
			Planicie aluvial confinada	Planicie aluvial confinada	Fpac	1003,147	0,99
			Planicie y delta lacustre	Planicie y delta lacustre	Fpla	26626,39	26,27
			Lago	Lago	Flg	3,965	0,004
		Estructural (E)	Colina Estructural	Colina estructural	Sces	1038,165	1,024
			Espolón facetado	Espolón facetado bajo de longitud corta	Sefcbc	8,502	0,008
				Espolón facetado bajo de longitud larga	Sefcbl	96,49	0,095
				Espolón facetado moderado de longitud larga	Sefcml	654,852	0,646
			Espolón Bajo	Espolón bajo de lobgitud larga	Sesbl	466,489	0,46
				Espolón bajo de longitud media	Sesbm	61,512	0,061
			Espolón Moderado	Espolón moderado de longitud larga	Sesml	2551,208	2,517
			Lomos	Lomo	Sl	585,93	0,578
				Lomo de falla	Slf	291,494	0,288
				Lomo de obturación	Slo	82,093	0,081
			Sierra Estructural	Sierra	Ss	8905,768	8,787
				Sierra y lomo de presión	Sslp	504,816	0,498
			Escarpe de linea de Falla	Escarpe de linea de Falla	Slfe	207,329	0,205
			Faceta triangular	Faceta triangular	Sft	239,622	0,236
			Gancho de flexión	Gancho de flexión	Sgf	1289,922	1,273

GEO-MORFO-ESTRUCTURA	PROVINCIA	REGIÓN	UNIDAD	SUBUNIDAD	ACRÓNIMO	ÁREA (Ha)	%
		Glacial (G)	Artesa glacial	Artesa glacial	Gag	415,342	0,41
			Circo glacial y de nivación	Circo glacial y de nivación	Gc	1387,122	1,369
			Cono y lóbulo de gelifracción	Cono y lóbulo de gelifracción	Gclg	126,121	0,124
			Espolón estructural glaciado	Espolón estructural glaciado	Gee	1599,765	1,578
			Espinazo glaciado	Espinazo glaciado	Geg	92,704	0,091
			Flanco de valle glaciar	Flanco de valle glaciar	Gflv	524,647	0,518
			Laguna glaciar	Laguna glaciar	Glg	130,735	0,129
			Planos y conos de sobrelavado glaciar	Planos y conos de sobrelavado glaciar	Gpcs	1888,105	1,863
			Plano glaciolacustre	Plano glaciolacustre	Gpgl	85,54	0,084
			Sierra glaciada	Sierra glaciada	Gsg	12500,71	12,33
		Antropogénico (A)	Cantera	Cantera	Ac	21,72	0,021
			Lago antrópico	Lago antrópico	Al	48,998	0,048
			Jarillon	Jarillon	Allj	315,467	0,311
						101352,7	

Fuente: Elaboración propia.

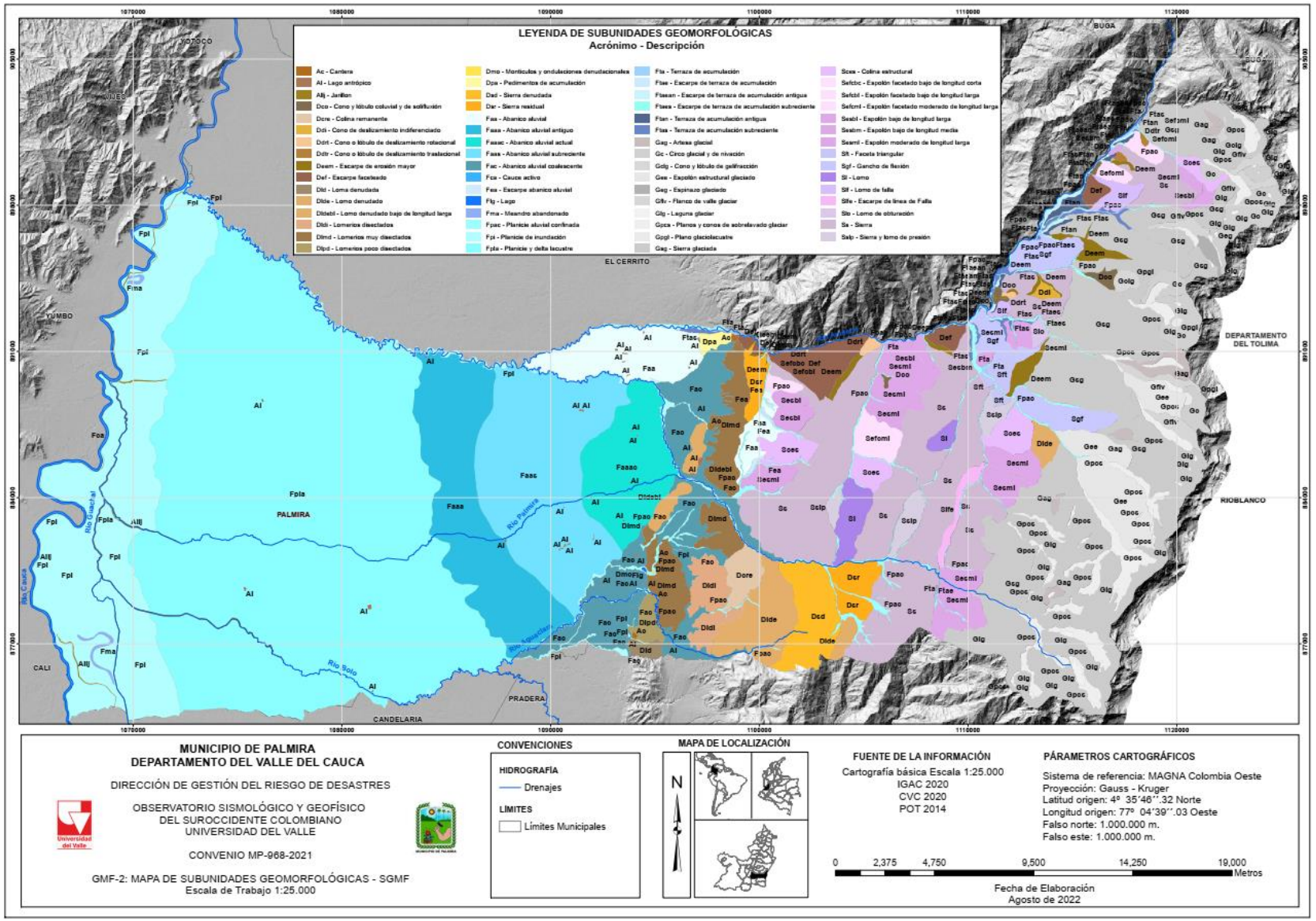


Figura 11. Subunidades geomorfológicas en el área rural del municipio de Palmira (GMF-2).
Fuente: Elaboración propia

5.3.1 Ambiente fluvial (F)

El ambiente fluvial (F) corresponde al 55,71% del área de estudio, con una extensión total de 56464,95 Has. Se logró identificar para este ambiente un total de 18 subunidades; cuyas proporciones dentro del ambiente se representan en la (Figura 12).

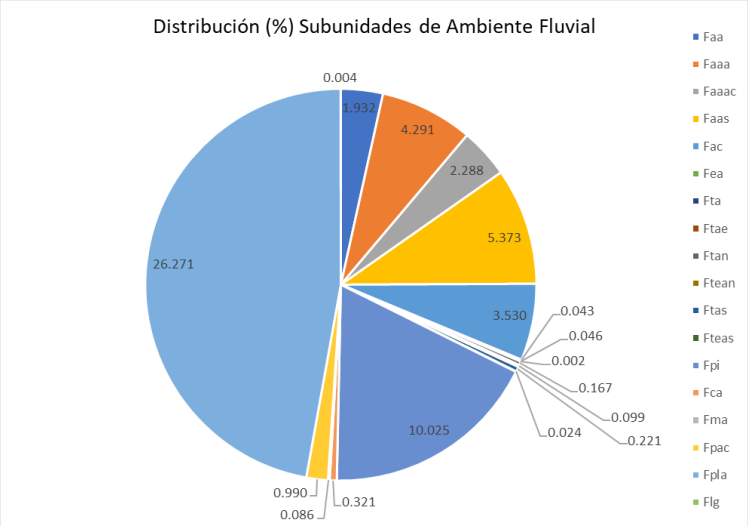


Figura 12. Elementos geomorfológicos de ambiente fluvial (F).
Fuente: elaboración propia.

5.3.1.1 Abanico aluvial (Faa)

Corresponde a una superficie en forma de cono, de laderas cóncavas o convexas y de morfología plana, aterrazada. Su origen está relacionado con la acumulación torrencial y fluvial en forma radial, donde una corriente desemboca en una zona plana. Los depósitos aluviales se acumulan radialmente desde el ápice del abanico localizado en la salida de la corriente de las montañas.

Esta subunidad aflora hacia el noreste de la zona plana, sobre la margen izquierda del río Amaime y la margen derecha del río Nima, cercano a su confluencia, abarcando un área de 1661,55 Ha que corresponde al 3,13 % de la zona plana. Se compone principalmente de depósitos aluviales con débil meteorización sobre los que se modela una ladera de longitud larga, irregular conformando montículos de composición predominantemente fina, con inclinación plana a suave (< 5°) (Figura 13).

Figura 13. Geoforma de abanico aluvial (Faa) encontrada en el margen derecho del río Nima (estación 251).
Fuente: Elaboración propia

5.3.1.2 Abanico aluvial antiguo (Faaa)

Este término se aplica para describir el abanico de mayor edad relativa, cuando se presentan dos o más abanicos juntos y que se puedan separar como unidades geomorfológicas. Generalmente este abanico es el que presenta mayor incisión por parte de la red de drenaje tributaria (Figura 14).

Conforma una franja alargada en dirección norte – sur, limitada al norte por el cauce del río Amaime y al sur por el cauce del río Aguaclara. Se caracteriza por un relieve de montículos con laderas rectilineas de longitud larga, con pendiente plana a suave (< 5°), modelada sobre suelos aluviales transportados conformados por materiales predominantemente matriz-soportados con clastos tamaño arena gruesa a arena media, cuyos drenajes que la disectan conforman un patrón de drenaje paralelo sobre esta parte del abanico que a diferencia del abanico aluvial sub-reciente los drenajes se encuentran más distantes entre sí, representa un índice de relieve muy bajo. Esta subunidad abarca un área de 4348,603 Has que corresponde al 4,291% de la zona plana sobre la que ha tenido lugar el desarrollo de la mayor parte del casco urbano del municipio.

Figura 14. Geoforma de abanico aluvial antiguo (Faaa).
Fuente: Elaboración propia

5.3.1.3 Abanico aluvial subreciente (Faas)

Presenta las mismas características del abanico aluvial, pero este término se aplica para describir una edad relativa intermedia, cuando se presentan dos o más abanicos juntos que se pueden separar como unidades geomorfológicas.

Conforma una franja alargada hacia el oriente de la zona plana, limitada hacia el norte por el cauce del río Nima y hacia el sur por el cauce del río Aguaclara. Se caracteriza por un relieve de montículos con laderas irregulares de longitud larga, con pendiente inclinada (5°-10°), modelada sobre suelos aluviales transportados conformados por materiales que van desde clasto-soportados hasta matriz-soportados con clastos tamaño canto, cuyos drenajes que la disectan conforman un patrón de drenaje paralelo sobre esta parte del abanico, presenta un índice de relieve muy bajo (Figura 15). Esta subunidad abarca un área de 5446,173 Has que corresponde al 5,373% de la zona plana sobre la que ha tenido lugar la región más oriental del casco urbano del municipio.

Figura 15. Geoforma de abanico aluvial sub-reciente (Faas).
Fuente: Elaboración propia

5.3.1.4 Abanico aluvial actual (Faaac)

Este término se aplica para describir el abanico de menor edad relativa, cuando se presentan dos o más abanicos juntos y que se puedan separar como unidades geomorfológicas.

Esta subunidad abarca un área de 2319,146 Has que corresponde al 2,288 % de la zona plana. Corresponde al abanico más cercano a la zona de piedemonte, asociado con los depósitos aluviales producto de la dinámica fluvial del cauce del río Nima, donde se da un cambio abrupto en la pendiente del terreno, siendo predominantes los procesos de sedimentación sobre los procesos de erosión, encontrando en estos principalmente depósitos clasto-soportados con bloques mayores a 300 mm. Se caracteriza por un relieve de montículo con laderas irregulares, de longitud corta, con pendientes muy inclinadas (10°-15°) sobre el que se desarrolla un patrón de drenaje dicotómico, representado principalmente por los cauces de los ríos Aguaclara, Nima y Palmira, (Figura 16). Sobre esta geoforma se localizan los centros poblados de Tres Tusas, Tienda Nueva, La Cascada, La Bolsa y Barrancas.

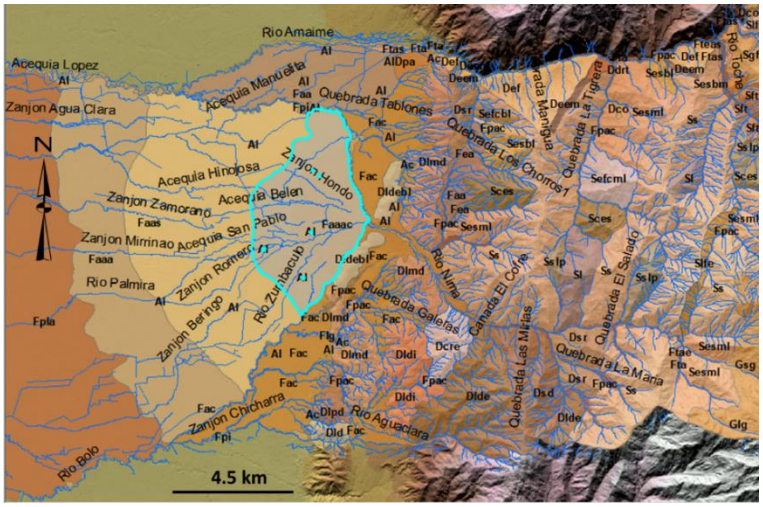


Figura 16. Geoforma de abanico actual (Faaac).
Fuente: Elaboración propia

5.3.1.5 Abanico coalescente (Fac)

Es una superficie ondulada localizada en el frente montañoso y formada por varios abanicos aluviales los cuales no se pueden separar en varias unidades geomorfológicas (Figura 17).

Esta subunidad abarca un área de 3577,681 Has que corresponde al 3,530% de la zona plana. Se localizan en la zona del piedemonte, en la región norte y sur, limitando el abanico actual. Presenta características similares a las del abanico aluvial actual; su origen se relaciona con la depositación de materiales aluviales producto de la dinámica fluvial de los drenajes tributarios del río Nima y Aguaclara respectivamente, caracterizando así el relieve de la margen derecha del río Nima y el relieve de la margen izquierda del río Aguaclara. Están conformados por materiales clasto-soportados con clastos tamaño bloque a cantos, modelando sobre el terreno montículos irregulares de longitud corta con pendiente muy inclinada (10° - 15°) con un índice de relieve bajo.

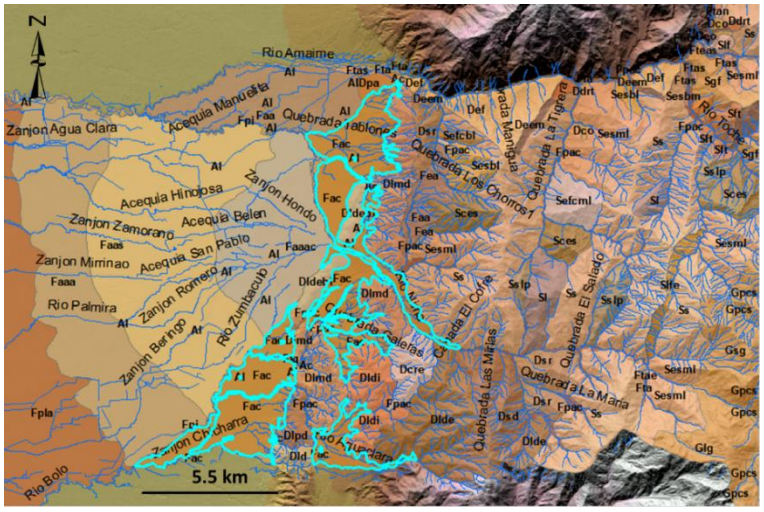


Figura 17. Geoforma de abanicos aluviales coalescentes (Fac).
Fuente: Elaboración propia

5.3.1.6 Cauce activo (Fca)

Es el canal irregular formado por las corrientes perennes o estacionales, dentro de los macizos rocosos y/o sedimentos fluviales.

Para la escala de trabajo este Fca corresponde principalmente a las corrientes perennes del río Cauca en el límite más occidental, río Amaime en el límite norte, (Figura 18). Estas corrientes discurren de este a oeste, limitados por escarpes de diferentes alturas hasta desembocar en el río Cauca, disectando los abanicos que conforman el relieve de la zona plana del municipio de Palmira. Esta subunidad abarca un área de 325,395 Has que corresponde al 0,321% de la zona plana (Figura 18).

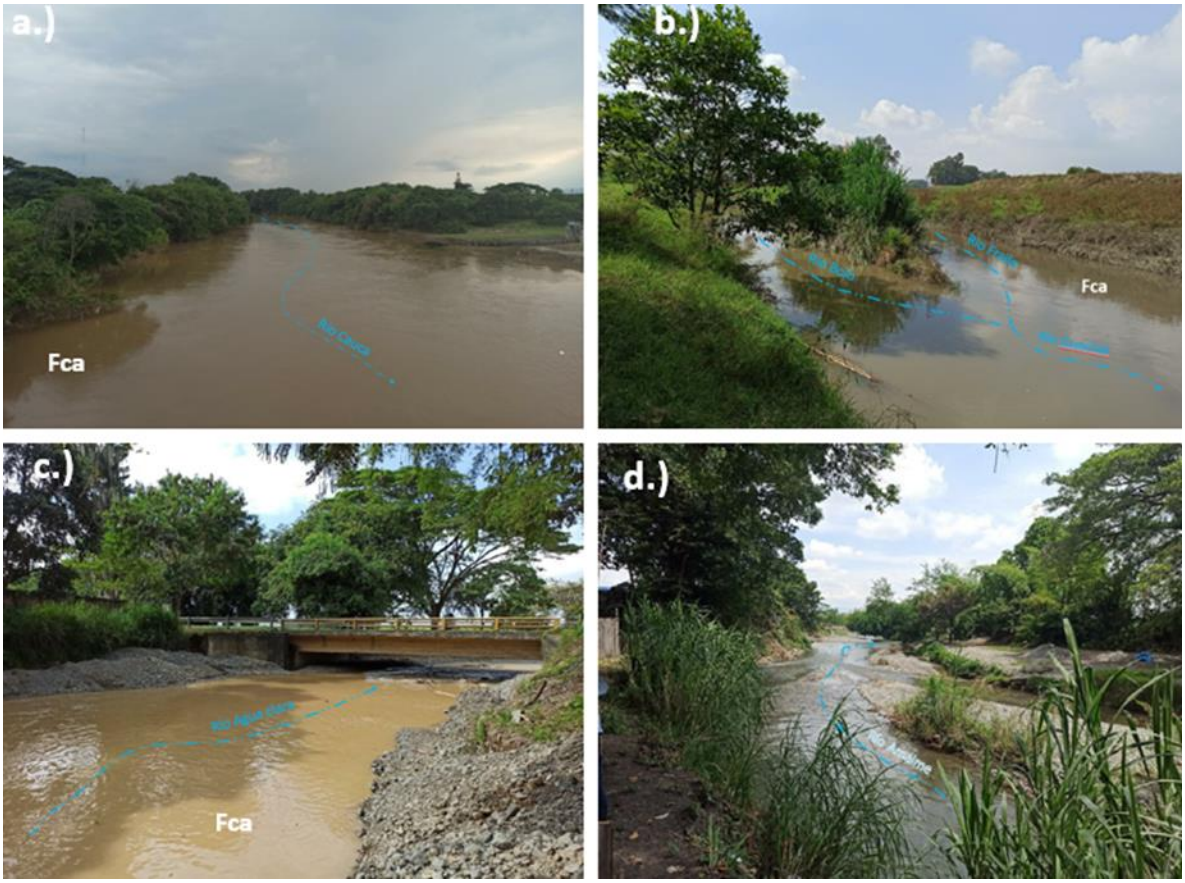


Figura 18. Geoforma de Cauce activo (Fca). a) Cauce del río Cauca. b) Confluencia del río Bolo y río Fraile. c) Río Aguaclara en el centro poblado homónimo. d) río Amaime en Barrio Azul.
Fuente: Elaboración propia

5.3.1.7 Escarpe de abanico aluvial (Fea)

Escarpe de abanico aluvial corresponde al 0.043 % del área total del municipio, con una extensión de 43,092 Has. Esta subunidad se encuentra localizada en la parte baja del flanco occidental de la cordillera Central, limitando ambas márgenes de los drenajes de esta zona. Se encuentra

asociado a suelos transportados de abanico aluvial (Staa). Se generan por procesos de incisión de la red de drenaje tributaria que van modelando un plano subvertical de longitud muy corta a corta, cóncavo o convexo, presente en los bordes de la superficie del abanico, con pendientes abruptas a muy abruptas, en algunos casos revegetalizadas (Figura 19).

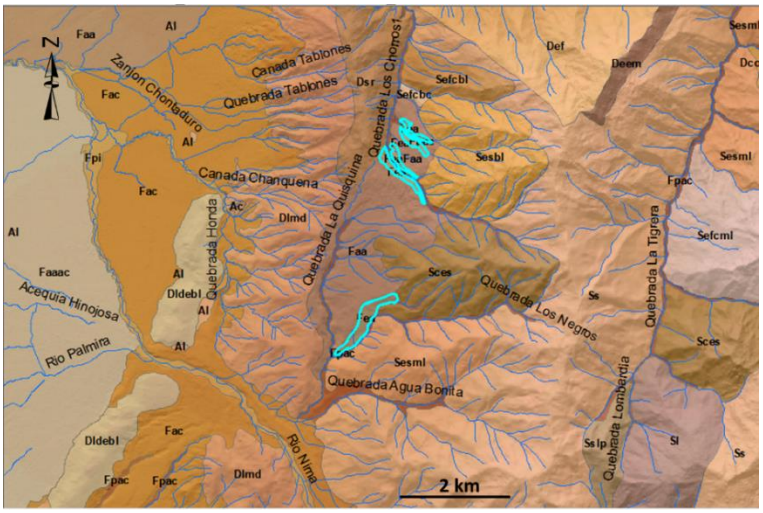


Figura 19. Escarpe de abanico aluvial (Fea).
Fuente: Elaboración propia

5.3.1.8 Laguna (Flg)

Son depósitos naturales de agua de menor proporción de tamaño que un lago tanto en área como en profundidad.

Esta subunidad abarca un área de 3,965 Ha que corresponde al 0,004% de la zona plana. Son de pequeña área y se encuentran distribuidas aleatoriamente en la región de piedemonte, en el sector más oriental de la zona plana, principalmente sobre los depósitos del abanico aluvial actual. Se encuentra asociado a suelos lacustres de grano fino (Figura 20).

Figura 20. Geoforma de Laguna (Flg) (estación 228).
Fuente: Elaboración propia

5.3.1.9 Meandro abandonado (Fma)

Es una sección en forma de medialuna del cauce antiguo de un río y su origen está relacionado a la migración lateral de la corriente, como consecuencia del estrangulamiento de un meandro.

Estas geoformas se asocian especialmente con la dinámica fluvial del río Cauca que ha dejado evidencias de esta subunidad en forma de medialuna sobre su plano o llanura de inundación, las cuales se encuentran parcialmente colmatadas y revegetalizadas. El índice de relieve es muy bajo, con inclinación plana a suave (< 5°), asociado a suelos lacustres compuestos por materiales muy finos. Hacía el sur occidente del municipio de Palmira, el centro poblado Caucaseco se encuentra desarrollado alrededor de esta geoforma (Figura 21). Esta subunidad abarca un área de 86,673 Ha que corresponde al 0,086% de la zona plana.

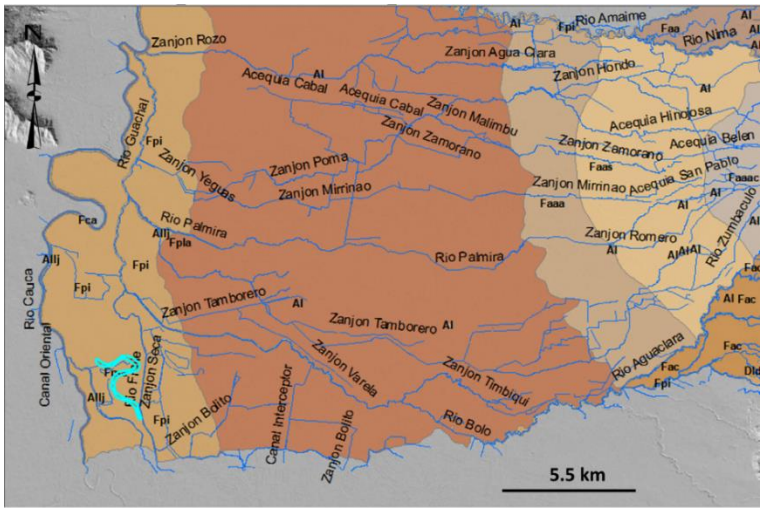


Figura 21. Geoforma de meandro abandonado (Fma).
Fuente: Elaboración propia

5.3.1.10 Planicie aluvial confinada (Fpac)

Planicie aluvial confinada corresponde al 0,990 % del área total del municipio, con una extensión de 1003,147 Has. Esta subunidad se presenta asociada a las corrientes hídricas de la región montañosa en los valles intramontañosos relativamente estrechos y en forma de “V”. Se compone de suelos transportados de planicie aluvial confinada (Stpac). Corresponde a una franja de terreno de morfología plana, muy angosta (>250 m) eventualmente inundable, está limitada por otras geoformas de morfología colinada, alomada o montañosa, por laderas de longitud muy larga y pendiente abrupta a extremadamente abrupta, que bordean los cauces fluviales de la región montañosa (Figura 22).

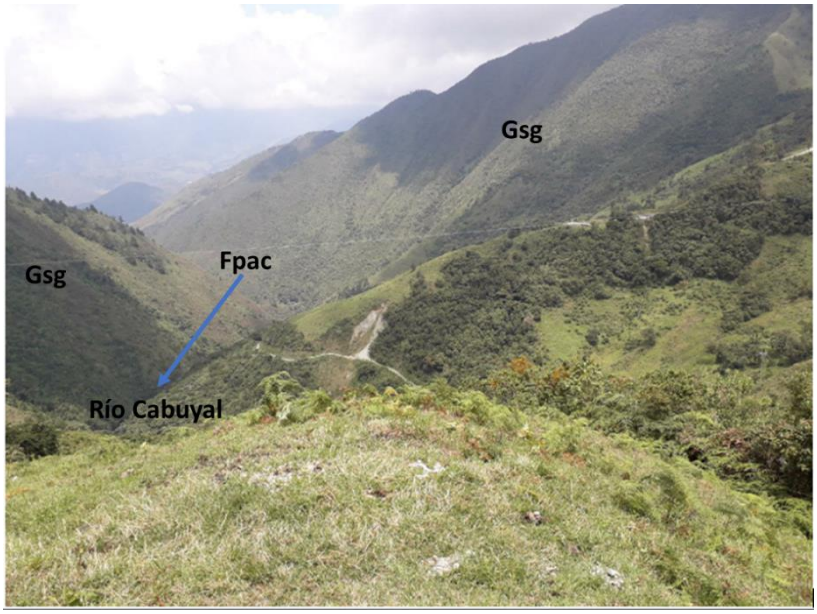


Figura 22. Planicie aluvial confinada (Fpac) (estación 114).
Fuente: Elaboración propia

5.3.1.11 Planicie de inundación (Fpi)

Planicie de inundación corresponde al 10,025 % del área total del municipio, con una extensión de 10160,539 Has. Son superficies de morfología plana, baja a ondulada, eventualmente inundables. Se encuentra asociado a suelos transportados de planicie de inundación (Stpi). Se encuentran bordeando los cauces fluviales y en el municipio de Palmira la principal geoforma de esta subunidad corresponde a la planicie de inundación del río Cauca. Aunque también se presenta con menor extensión paralelo a los cauces de los ríos Amaime, Nima, Bolo, Agua clara y Palmira (Figura 23).

Figura 23. Geoforma de plano o llanura de inundación (Fpi).
Margen derecha del río Cauca, se observa el Jarillón próximo al cauce y a continuación la planicie de inundación (estación 348).
Fuente: Elaboración propia

5.3.1.12 Planicie y delta lacustre (Fpla)

Superficie extensa y de aspecto aterrazado de morfología ondulada y suavemente inclinada y limitada hacia los cauces por escarpes de varios metros de altura. Su origen está relacionado con el desplazamiento lateral del cauce de un río dentro de la llanura aluvial.

Esta subunidad abarca un área de 26626,397 Has que corresponde al 26,271% en la zona plana. Se localiza en la parte centro - occidente de la zona plana del municipio de Palmira, adyacente al plano o llanura de inundación del río Cauca. Limitada al norte por el río Amaime y al sur por el río Bolo; se encuentra disectado por los ríos Palmira, Fraile, Guachal entre otras corrientes hídricas paralelas a estos. Se compone principalmente de depósitos aluviales constituidos por arenas finas y arcillas, asociados a la dinámica fluvial antigua del río Cauca y sus ríos tributarios. Se caracteriza por ser una superficie extensa, extremadamente larga, con una inclinación plana a suave (< 5°), representado por un relieve de montículos con un índice de relieve muy bajo (Figura 24), sobre los que actualmente se encuentran asentados los centros poblados de Guanabanal, La Herradura, La Torre, Matapalo, Obando, Palmaseca, Rozo, La Unión, San Antonio de las Palmas, Bolo la Italia y un pequeño sector de la zona sur del casco urbano del municipio de Palmira.

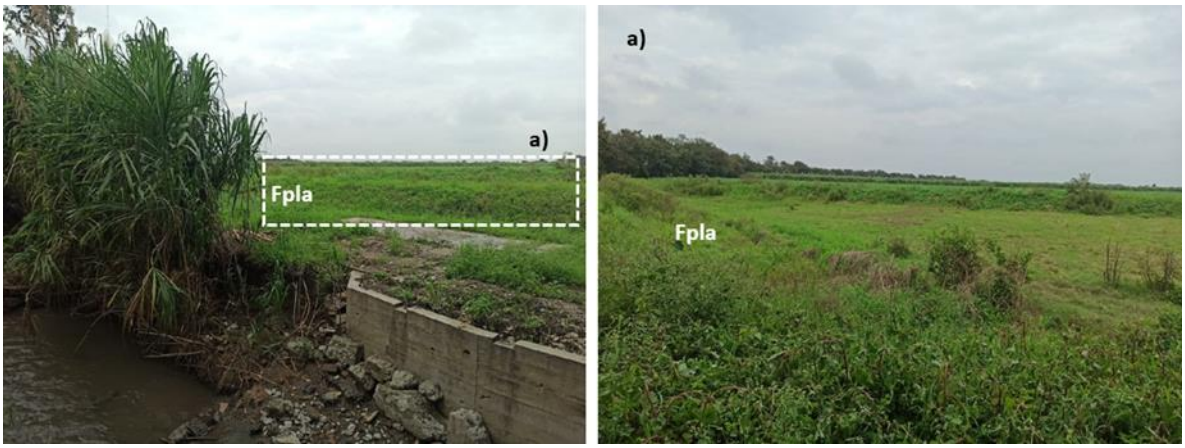


Figura 24. Geoforma de Planicie y delta lacustre adyacente al Zanjón Zumbaculo (estación 269).
Fuente: Elaboración propia

5.3.1.13 Terraza de acumulación (Fta)

Terraza de acumulación (Fta) corresponde al 0,046 % del área total del municipio, con una extensión de 46,607 Has. Se encuentra sobre ambas márgenes de las diferentes corrientes hídricas tributarias de la margen izquierda del río Amaime, cercano a la confluencia donde estas corrientes pierden confinamiento y depositan los materiales, conformando terrenos de gran extensión y baja pendiente que son utilizados principalmente para las actividades agrícolas, ganadería y la ubicación de viviendas de manera dispersa. Se encuentra asociado a suelos transportados de terraza de acumulación (Stta). Su origen se asocia principalmente con los eventos torrenciales más recientes propios de la dinámica fluvial de los drenajes de la zona que

transportan y depositan una alta carga de sedimentos. Eventualmente afectados por las crecientes de los drenajes de la zona (Figura 25).

Figura 25. Terraza de acumulación (Fta) asociada a la dinámica de la quebrada La Rivera en el corregimiento Combia (estación 102).
Fuente: Elaboración propia

5.3.1.14 Terraza de acumulación antigua (Ftan)

Terraza de acumulación antigua (Ftan) corresponde al 0.167% del área total del municipio, con una extensión de 169,167 Has. Se encuentra sobre ambas márgenes de las diferentes corrientes hídricas tributarias de la margen izquierda del río Amaime, cercano a la confluencia donde estas corrientes pierden confinamiento y depositan los materiales, conformando terrenos de gran extensión y baja pendiente; se caracteriza por superficies elevadas por efecto de la erosión y profundización de las corrientes hídricas, de morfología ligeramente ondulada, pendiente suave a inclinada; limitada por escarpes de longitud corta (hasta 50 m) y pendiente abrupta, revegetalizadas. Se encuentra asociado a suelos transportados de terraza de acumulación antigua (Sttan). Su origen se asocia principalmente con los eventos torrenciales antiguos propios de la dinámica fluvial de los drenajes de la zona que transportan y depositan una alta carga de sedimentos (Figura 26).

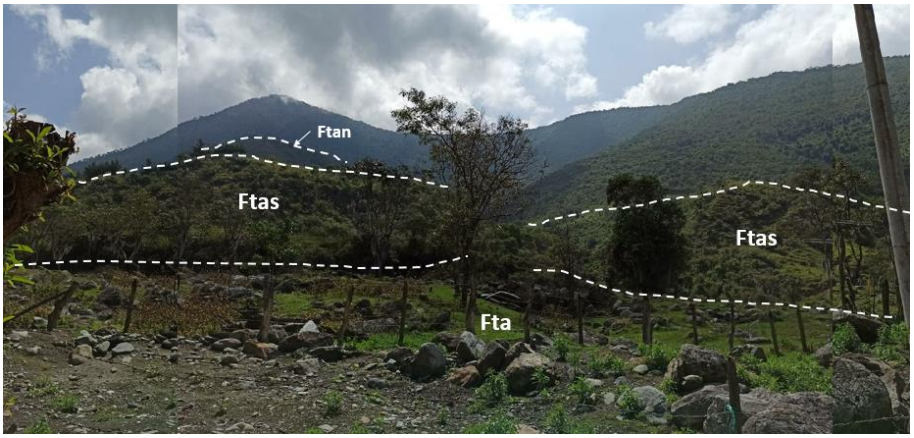


Figura 26. Terraza de acumulación antigua (Ftan) en zona aledaña a la quebrada Nápoles en el corregimiento de Combia.
Corresponde a la terraza topográficamente más alta de morfología ondulada (estación 84)
Fuente: Elaboración propia

5.3.1.15 Terraza de acumulación subreciente (Ftas)

Terraza de acumulación subreciente (Ftas) corresponde al 0,221 % del área total del municipio, con una extensión de 223,883 Has. Se encuentra sobre ambas márgenes de las diferentes corrientes hídricas tributarias de la margen izquierda del río Amaime, cercano a la confluencia donde estas corrientes pierden confinamiento y depositan los materiales, conformando terrenos de gran extensión y baja pendiente que son utilizados eventualmente para las actividades agrícolas y ganadería; se caracteriza por superficies elevadas por efecto de la erosión y profundización de las corrientes, de morfología plana a ligeramente ondulada, pendiente suave a inclinada; limitada por escarpes de longitud muy corta (< 50 m) y pendiente abrupta. Se encuentra asociado a suelos transportados de terraza de acumulación subreciente (Sttas). Su origen se asocia principalmente con los eventos torrenciales sub recientes propios de la dinámica fluvial de los drenajes de la zona que transportan y depositan una alta carga de sedimentos (Figura 27).

Figura 27. Terraza de acumulación subreciente (Ftas) asociada a la dinámica subreciente de la quebrada La Rivera en el corregimiento Combia.
Se observa sobre elevada producto de la erosión e incisión de los drenajes (estación 102).

Fuente: Elaboración propia

5.3.1.16 Escarpe de terraza de acumulación subreciente (Ftaes)

Escarpe de terraza de acumulación subreciente (Ftaes) corresponde al 0.024 % del área total del municipio, con una extensión de 24,243 Has. Se encuentra limitando las superficies de terraza de acumulación subreciente, encontradas sobre ambas márgenes de las diferentes corrientes hídricas tributarias de la margen izquierda del río Amaime, cercano a la confluencia donde estas corrientes pierden confinamiento. Se encuentra asociado a suelos transportados de terraza de acumulación subreciente (Sttas). Se generan por procesos de incisión de la red de drenaje tributaria que van modelando un plano subvertical de longitud muy corta (< 50 m), cóncavo o convexo, presente en los bordes de la superficie la terraza de acumulación subreciente, con pendientes abruptas a muy abruptas, en algunos casos revegetalizadas (Figura 28).

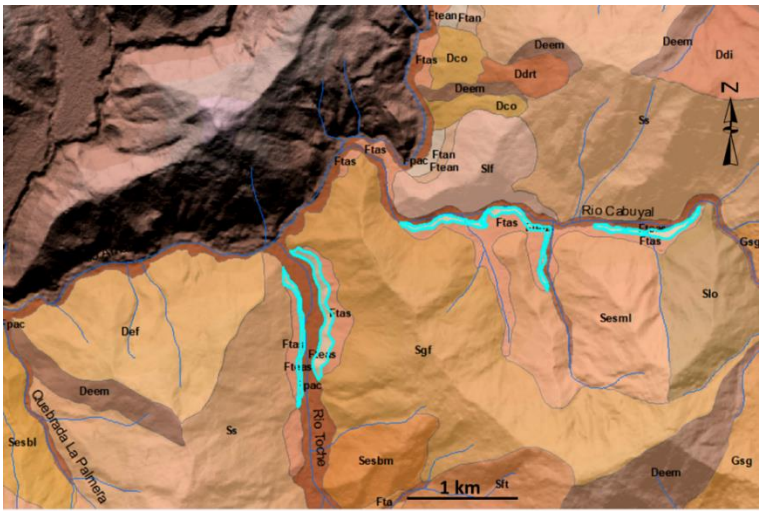


Figura 28. Escarpe de terraza de acumulación subreciente (Ftaes).
Fuente: Elaboración propia

5.3.1.17 Escarpe de terraza de acumulación antigua (Ftaean)

Escarpe de terraza de acumulación antigua (Ftaean) corresponde al 0,099 % del área total del municipio, con una extensión de 100,325 Has. Se encuentra limitando las superficies de terraza de acumulación subreciente, encontradas sobre ambas márgenes de las diferentes corrientes hídricas tributarias de la margen izquierda del río Amaime, cercano a la confluencia donde estas corrientes pierden confinamiento. Se generan por procesos de incisión de la red de drenaje tributaria que van modelando un plano subvertical de longitud corta (hasta 50 m), cóncavo o convexo, presente en los bordes de la superficie la terraza de acumulación antigua, con pendientes abruptas a muy abruptas, revegetalizadas. Se encuentra asociado a suelos transportados de terraza de acumulación antigua (Sttan). Su origen se asocia principalmente con los eventos torrenciales antiguos propios de la dinámica fluvial de los drenajes de la zona que transportan y depositan una alta carga de sedimentos (Figura 29).

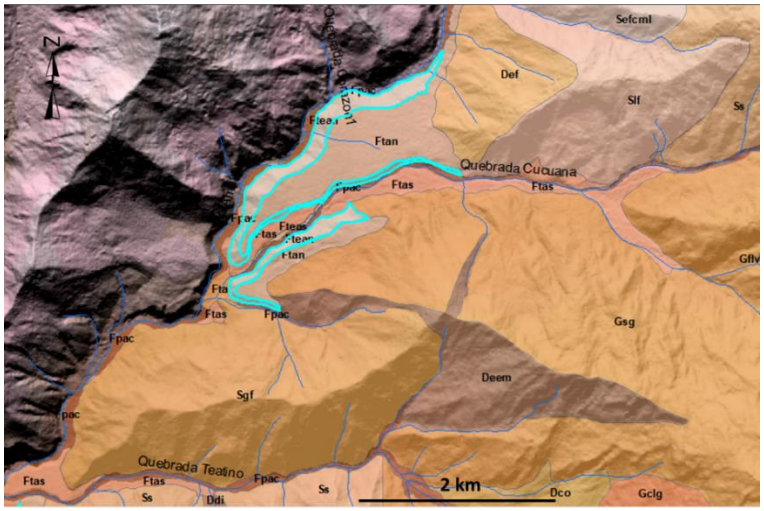


Figura 29. Escarpe de terraza de acumulación antigua (Ftes).
Fuente: Elaboración propia

5.3.1.18 Escarpe de terraza de acumulación (Ftae)

Escarpe de terraza de acumulación (Ftae) corresponde al 0,002% del área total del municipio, con una extensión de 2,090 Has. Se encuentra limitando las superficies de terraza de acumulación, encontradas sobre la quebrada los cuervos. Se generan por procesos de incisión de la red de drenaje tributaria que van modelando un plano subvertical de longitud corta (hasta 50 m), cóncavo o convexo, presente en los bordes de la superficie la terraza de acumulación, con pendientes abruptas a muy abruptas, revegetalizadas. Se encuentra asociado a suelos transportados de terraza de acumulación (Stta). Su origen se asocia principalmente con los eventos torrenciales antiguos propios de la dinámica fluvial de los drenajes de la zona que transportan y depositan una alta carga de sedimentos (Figura 30).

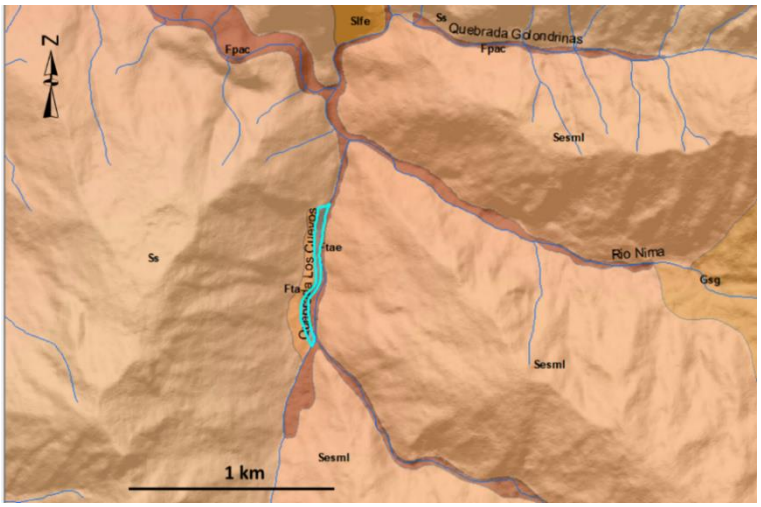


Figura 30. Escarpe de terraza de acumulación (Ftae).
Fuente: Elaboración propia

5.3.2 Ambiente glacial (G)

El ambiente glacial (G) corresponde al 18,50% del área total del municipio, con una extensión de 18750,79 Has. Para este ambiente se logró determinar un total de 10 subunidades cuyas proporciones dentro del ambiente se representan en la Figura 31.

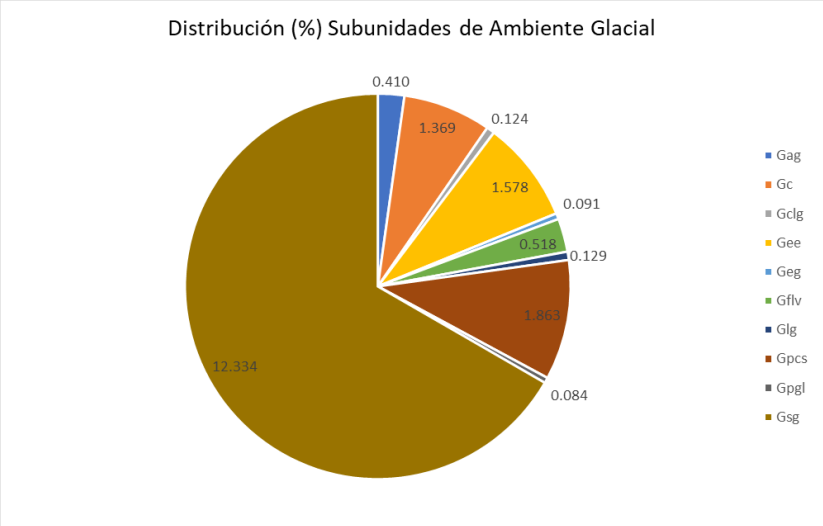


Figura 31. Subunidades geomorfológicas ambiente glacial (G)
Fuente: elaboración propia

5.3.2.1 Artesa glacial (Gag)

Artesa glacial (Gag) corresponde al 0,410% del área total del municipio, con una extensión de 415,342 Has. Las geoformas correspondientes a esta subunidad geomorfológica (SGMF) se encuentran expuestas al oriente del municipio de Palmira en el corregimiento de Toche, asociada a roca de regular calidad de esquistos del Complejo Cajamarca (Rrcecc). Esta geoforma corresponde a zonas en donde circula o ha circulado glaciares, dejando vestigios en forma de U que en algunos casos pueden presentar huellas de abrasión por la fricción que se da entre el hielo con el material que es arrastrado (Figura 43).

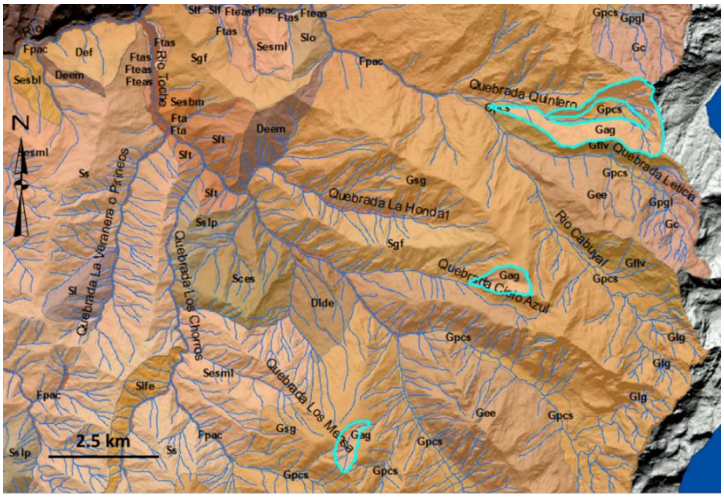


Figura 32. Artesa glacial (Gag).
Fuente: elaboración propia

5.3.2.2 Circo glacial y de nivación (Gc)

Circo glacial y de nivación (Gag) corresponde al 1,369% del área total del municipio, con una extensión de 1387,122 Has. Las geoformas correspondientes a esta subunidad geomorfológica (SGMF) se encuentran expuestas al oriente del municipio de Palmira en la vereda de Tenerife, asociadas a rocas de regular calidad de esquistos del Complejo Cajamarca (Rrcecc). Esta geoforma presenta a paredes cóncavas semicirculares de longitudes cortas, escarpadas de concavidades o depresiones someras formadas por erosión y/o influencia glacial; (Figura 33). Las primeras geoformas están asociadas a excavación rotacional de la masa de hielo y las segundas por congelamiento y deshielo de la masa rocosa que produce depresiones por despegue y extracción de partículas (Plucking), acumuladas ladera abajo por procesos de gelifracción (Figura 33).

Figura 33. Circo glacial y de nivación.
Fuente: elaboración propia

5.3.2.3 Cono y lóbulo de gelifracción (Gclg)

Cono y lóbulo de gelifracción (Gclg) corresponde al 0,124% del área total del municipio, con una extensión de 126,121 Has. Las geoformas correspondientes a esta subunidad geomorfológica (SGMF) se encuentran expuestas al oriente del municipio de Palmira en el corregimiento de Combia, asociadas a rocas de regular calidad de esquistos del Complejo Cajamarca (Rrcecc). Esta geoforma se origina por procesos de gelifracción en terrenos altamente saturados y sometidos a congelamiento y deshielo periódico, se presenta en conos y lóbulos alomados de longitudes moderadamente largas y formas cóncavas y convexas; generalmente se constituyen de material particulado soportado de fragmentos tamaños bloques (Figura 34).

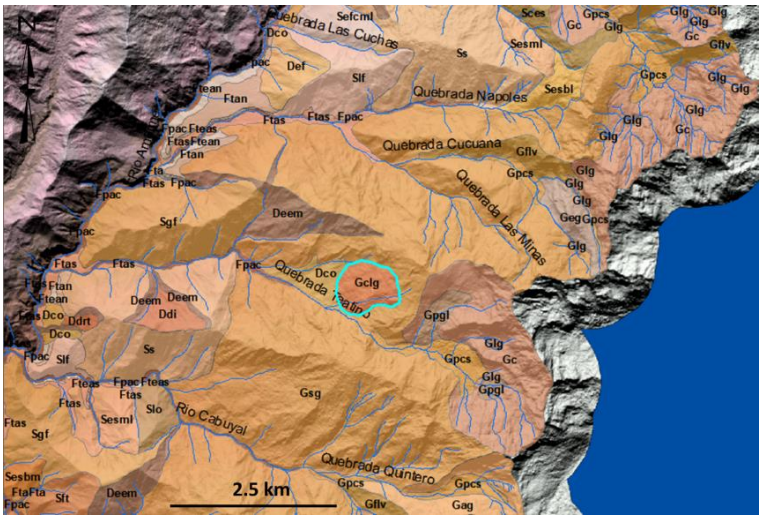


Figura 34. Cono y lóbulo de gelifracción (Gclg).
Fuente: elaboración propia

5.3.2.4 Espolón estructural glaciado (Gee)

Espolón estructural glaciado (Gee) corresponde al 1,578% del área total del municipio, con una extensión de 1599,765 Has. Las geoformas correspondientes a esta subunidad geomorfológica (SGMF) se encuentran expuestas al oriente del municipio de Palmira en el corregimiento de Combia, asociadas a rocas de regular calidad de esquistos del Complejo Cajamarca (Rrcecc). Esta geoforma expone salientes simétricas agudas de morfología alomada y laderas cortas a largas de formas rectas inclinadas abruptas, dispuestas perpendicularmente a una tendencia estructural general de la región; está limitada por valles en forma de “U”, cuyo origen se asocia a procesos de glaciales (Figura 35).

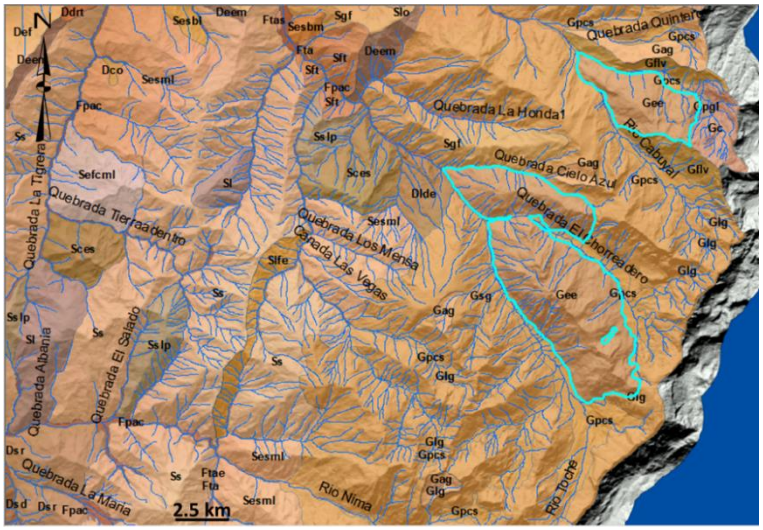


Figura 35. Espolón estructural glaciado (Gee).
Fuente: elaboración propia

5.3.2.5 Espinazo glaciado (Geg)

Espinazo glaciado (Geg) corresponde al 0,091% del área total del municipio, con una extensión de 92,704 Has. Las geoformas correspondientes a esta subunidad geomorfológica (SGMF) se encuentran expuestas al oriente del municipio de Palmira en el corregimiento Combia, asociadas a rocas de regular calidad de esquistos del Complejo Cajamarca (Rrcecc). Esta geoforma expone sierras simétricas o asimétricas, elongadas de cresta aguda a redondeada y sus flancos se encuentran afectados por procesos de origen glacial (Figura 36).

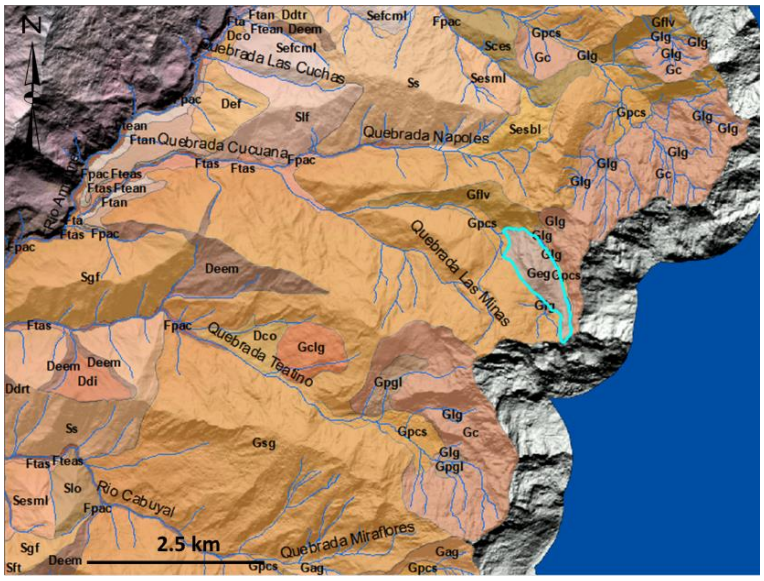


Figura 36. Espinazo glaciado (Geg).
Fuente: elaboración propia

5.3.2.6 Flanco de valle glaciar (Gflv)

Flanco de valle glaciar (Gflv) corresponde al 0,518% del área total del municipio, con una extensión de 524,647 Has. Las geoformas correspondientes a esta subunidad geomorfológica (SGMF) se encuentran expuestas al oriente del municipio de Palmira en los corregimientos Combia y Toche, asociadas a rocas de regular calidad de esquistos del Complejo Cajamarca (Rrcecc). Esta geoforma presenta laderas cóncavas de pendientes abruptas, longitudes cortas a moderadamente largas localmente con facetas truncadas. Su origen está asociado a procesos de presión ejercidas por las masas de hielo lateral sobre los flancos del valle inicial (Figura 37).

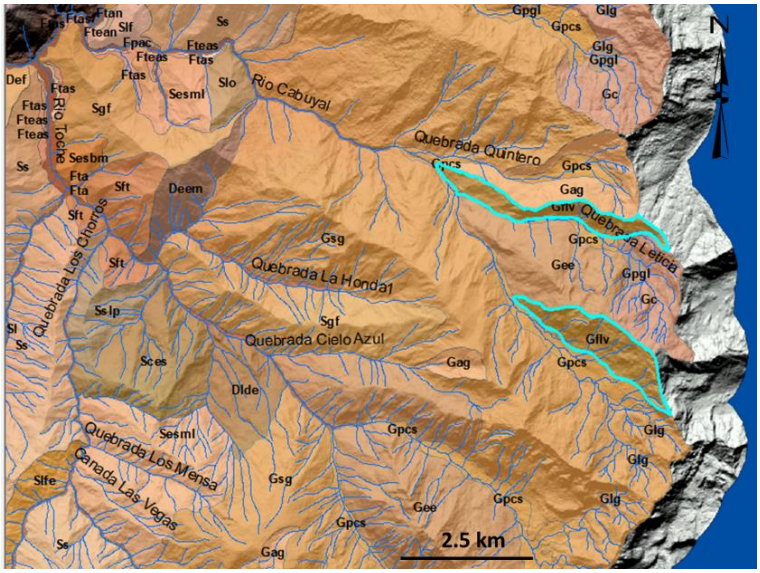


Figura 37. Flanco de valle glaciar (Gflv).
Fuente: elaboración propia

5.3.2.7 Laguna glaciar (Glg)

Laguna glaciar (Glg) corresponde al 0,129% del área total del municipio, con una extensión de 130,735 Has. Las geoformas correspondientes a esta subunidad geomorfológica (SGMF) se encuentran expuestas al oriente del municipio de Palmira en los corregimientos de Combia, Toche y Ayacucho asociadas a rocas de regular calidad de esquistos del Complejo Cajamarca (Rrcecc) y suelos transportados de plano y cono de sobrelavado glaciar (Stpcs). Esta geoforma presenta cuerpos de agua en zonas montañosas glaciadas, principalmente en la base de los circos glaciales; en esta geoforma se incluyen los lagos formados en planicies glacio-lacustrina y los formados en las partes traseras de las morrenas (Figura 38).

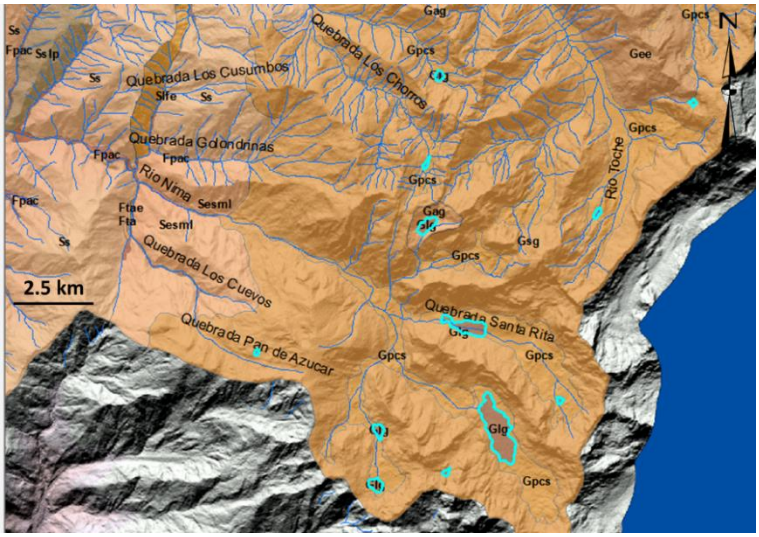


Figura 38. Laguna glaciar (Glg).
Fuente: elaboración propia

5.3.2.8 Planos y conos de sobrelavado glaciar (Gpcs)

Planos y conos de sobrelavado glaciar (Gpcs) corresponde al 1,863% del área total del municipio, con una extensión de 1888,105 Has. Las geoformas correspondientes a esta subunidad geomorfológica (SGMF) se encuentran expuestas al oriente del municipio de Palmira en los corregimientos de Combia, Toche y Ayacucho, asociadas a rocas de regular calidad de esquistos del Complejo Cajamarca (Rrcecc). Esta geoforma presenta planos suavemente inclinados de longitud corta y recta localizados en la zona distal de los márgenes glaciales de las morrenas, generalmente están constituidos por material glacial depositado por corrientes fluviales generadas por deshielo glacial (Figura 39).

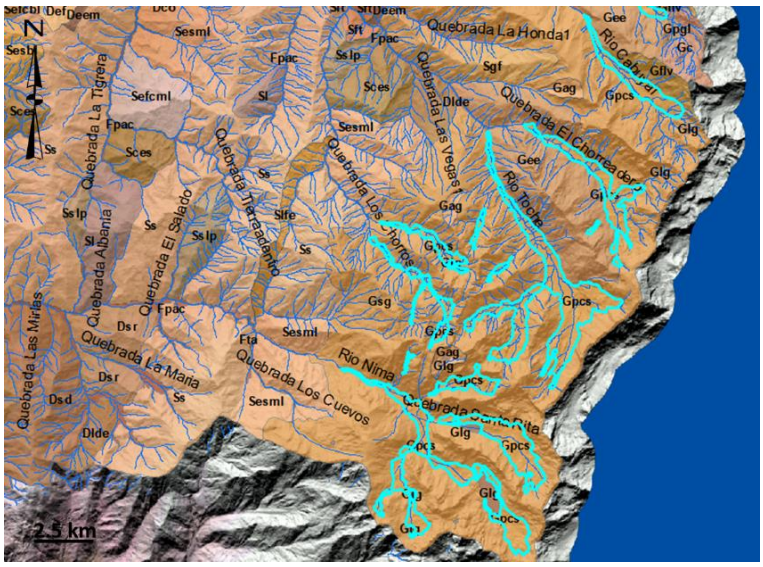


Figura 39. Planos y conos de sobrelavado glaciar (Gpcs).
Fuente: elaboración propia

5.3.2.9 Plano glaciolacustre (Gpg)

Plano glaciolacustre (Gpg) corresponde al 0,084% del área total del municipio, con una extensión de 85,540 Has. Las geoformas correspondientes a esta subunidad geomorfológica (SGMF) se encuentran expuestas al oriente del municipio de Palmira en los corregimientos de Combia y Toche, asociadas a rocas de regular calidad de esquistos del Complejo Cajamarca (Rrcecc). Esta geoforma presenta laderas de suave pendiente formadas por el transporte de sedimentos que son depositados en lagos y zonas marginales del glacial (Figura 40).

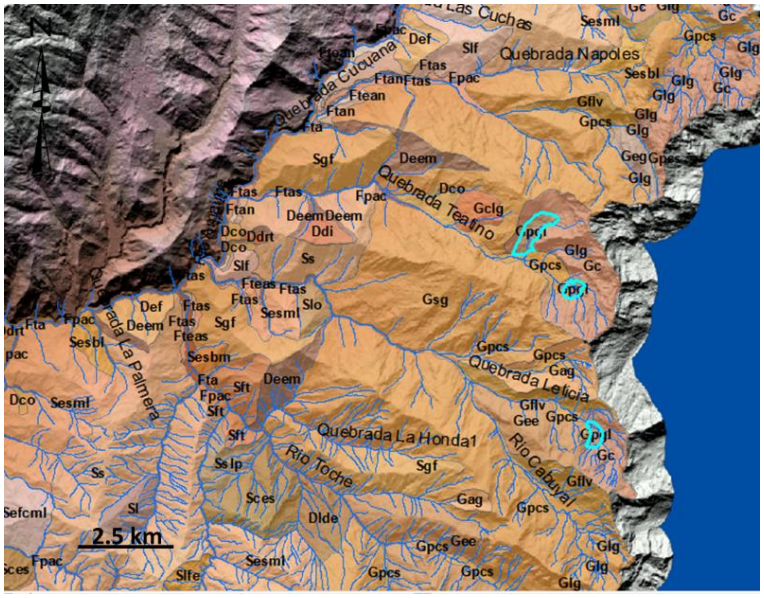


Figura 40. Plano glaciolacustre (Gpg).
Fuente: elaboración propia

5.3.2.10 Sierra glaciada (Gsg)

Sierra Glaciada (Gsg) corresponde al 12,334% del área total del municipio, con una extensión de 12500,714 Has. Las geoformas correspondientes a esta subunidad geomorfológica (SGMF) se encuentran expuestas al oriente del municipio de Palmira en los corregimientos de Combia, Toche y Ayacucho, asociadas a rocas de regular calidad de esquistos del Complejo Cajamarca (Rrcecc). Esta geoforma es la más extensa del ambiente glacial y se caracteriza por presentar una prominencia topográfica de morfología montañosa y elongada de laderas largas a extremadamente largas, cóncavas a convexas con pendientes muy inclinadas a abruptas, donde prevalecen procesos de erosión o de movimientos en masa acentuados; su origen está relacionado a procesos de erosión acentuada en macizos rocosos metamórficos afectados por procesos glaciales (Figura 41).

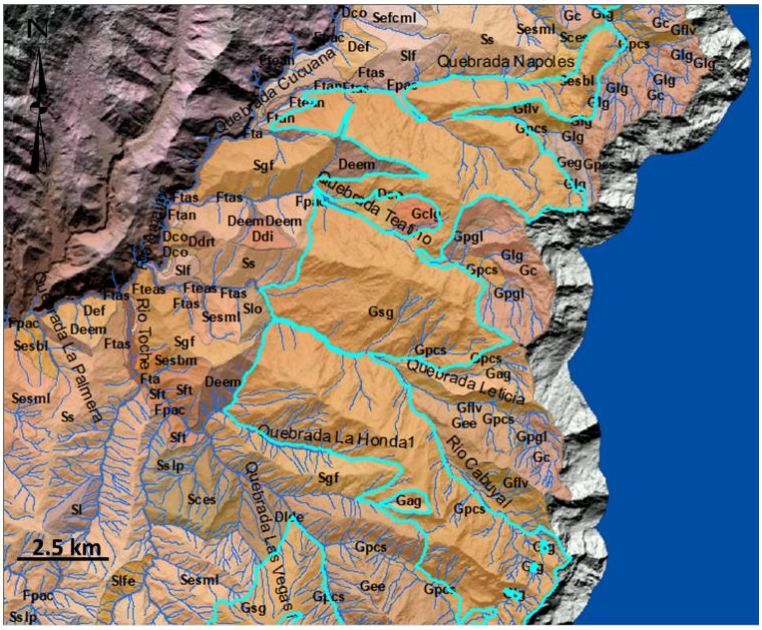


Figura 41. Sierra glaciada (Gsg).
Fuente: elaboración propia

5.3.3 Ambiente estructural (S)

El ambiente estructural (S) corresponde al 16,75% del área total del municipio, con una extensión de 16984,19 Has. Para este ambiente se logró determinar un total de 15 subunidades cuyas proporciones dentro del ambiente se representan en la Figura 42.

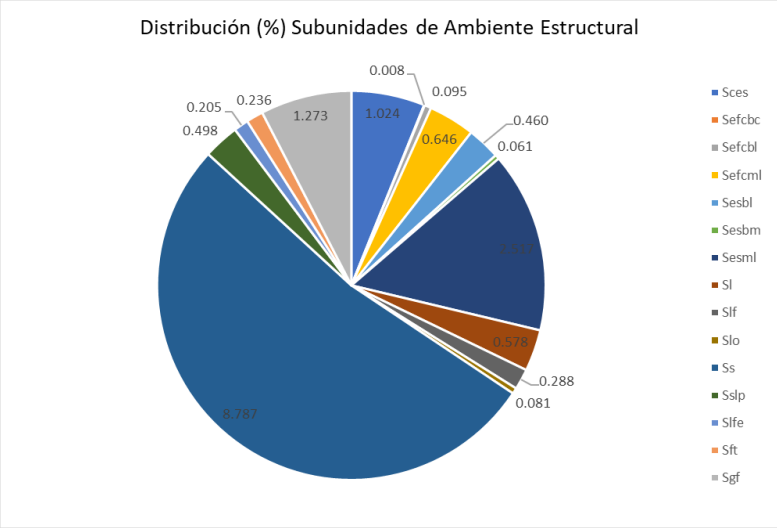


Figura 42. Subunidades geomorfológicas ambiente estructural (S)
Fuente: elaboración propia

5.3.3.1 Colina estructural (Sces)

Colina estructural (Sces) corresponde al 1,024% del área total del municipio, con una extensión de 1038,165 Has. Las geoformas correspondientes a esta subunidad geomorfológica (SGMF) se encuentran localizadas al norte del municipio en los corregimientos de Potrerillo, Toche y Combia; se encuentran asociadas a roca regular calidad de basalto de la Formación Amaime (Rrcbfa), roca mala calidad de esquistos de la unidad de Esquistos Básico de Bugalagrande (Rmceebb) y roca regular calidad de esquistos del Complejo Cajamarca (Rrcecc), respectivamente. Estas geoformas corresponden a unas prominencias topográficas que presenta alturas máximas de 400 m desde su nivel base, con un relieve tipo colina: de laderas moderadas, de formas cóncavas y convexas, con una inclinación abrupta; la forma de la cresta es angular, presenta fuerte disección y los drenajes forman valles en "V". Su origen está relacionado con la acción conjunta de procesos tectónicos, como se puede apreciar por el intenso fallamiento y a procesos denudacionales sobre las rocas ígneas y metamórficas presentes en la zona (Figura 43).

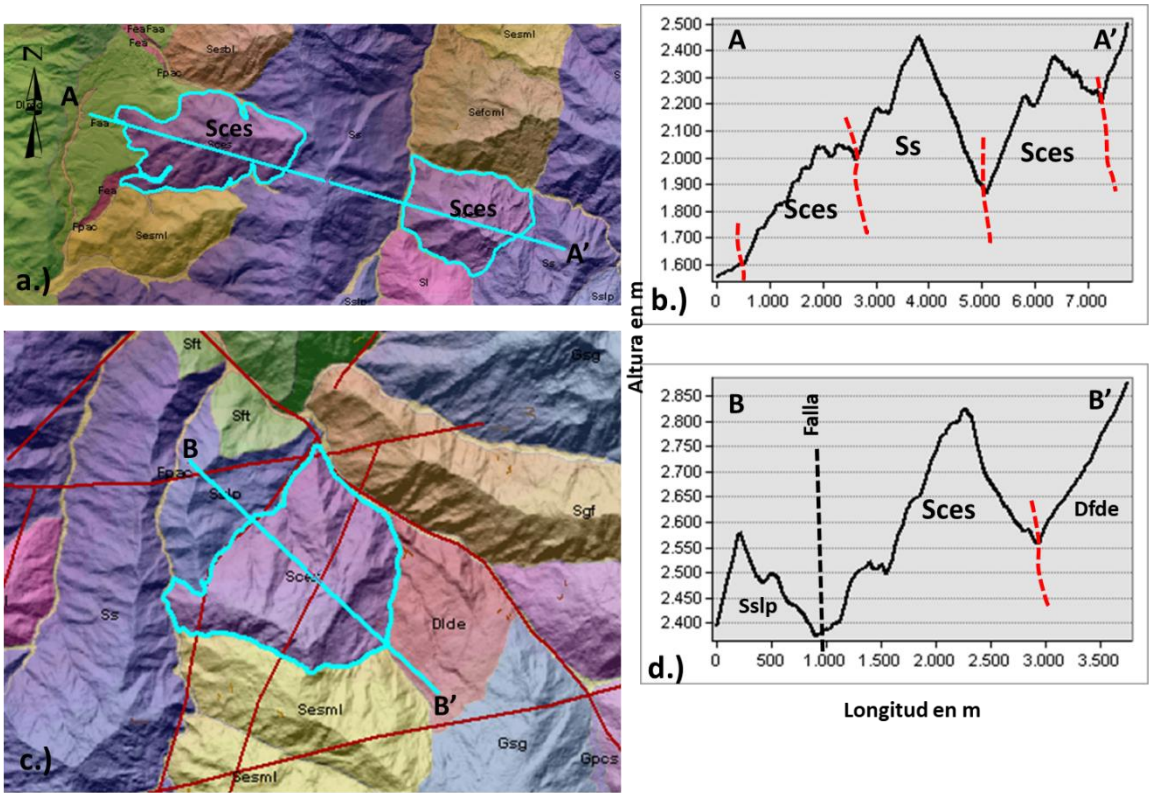


Figura 43. Colina estructural (Sces).

a.) Colinas estructurales presentes en los corregimientos de Potrerillo y Toche, se observa la línea W-E de corte topográfico. b.) Perfil topográfico (A-A'), se observa la inclinación de las laderas y las líneas rojas punteadas marcan el contacto aproximado entre las SGMF. c.) Colina estructural en el corregimiento de Toche, se presenta la línea de corte topográfico NW-SE y las líneas rojas continuas indican la existencia de controles estructurales (fallas) en la zona. d.) Perfil topográfico (B-B'), la línea negra punteada indica la presencia de falla y la roja punteada los contactos aproximados entre SGMF

Fuente: elaboración propia

5.3.3.2 Espolón facetado bajo de longitud corta (Sefcbc)

Espolón facetado bajo de longitud corta (Sefcbc) corresponde al 0,008% del área total del municipio, con una extensión de 8,502 Has. Geoforma localizada en el corregimiento de Tablones, asociada a roca regular calidad de basalto de la Formación Amaime. Se caracteriza por ser una prominencia topográfica que se desprende de una estructura mayor, presenta un relieve tipo loma, de índice de relieve bajo, con alturas de aproximadamente 140 m a 150 m; las laderas son de longitud corta, con una inclinación de abrupta a muy abrupta; con una longitud de aproximadamente 440 m. Su origen se debe al producto de fuertes procesos tectónicos relacionados con fallas, y se caracteriza por presentar en su cara frontal truncamientos a manera de facetas triangulares (Figura 44).

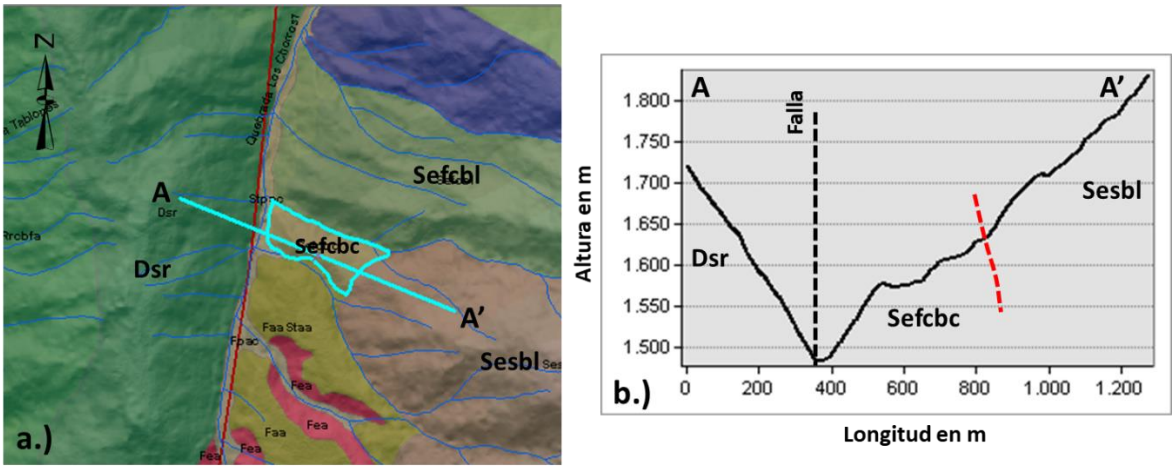


Figura 44. Espolón facetado bajo de longitud corta (Sefcbc).
a.) Localización y forma general del espolón en el corregimiento de Tablones; la línea roja marca la presencia de posible falla, y se presenta una línea de corte topográfico NW-SE. b.) Perfil topográfico A-A', la línea negra punteada marca la presencia de falla y las rojas los contactos aproximados entre SGMF.
Fuente: elaboración propia

5.3.3.3 Espolón facetado bajo de longitud larga (Sefcbl)

Espolón facetado bajo de longitud larga (Sefcbl) corresponde al 0.095% del área total del municipio, con una extensión de 96,490 Has. Geoforma localizada en el corregimiento de Tablones, sobre la margen derecha de la quebrada Los Chorros; se encuentra asociado a roca regular calidad de basalto de la Formación Amiame (Rrcbfa). Se caracteriza por ser una saliente natural que se desprende de una estructura mayor, tiene su origen en procesos intensos de erosión y fallamiento, con truncamiento de la cara frontal a manera de facetas triangular. Presenta una longitud de su eje mayor de aproximadamente 1.800 m y una altura máxima desde su nivel base de 100 m. Con un relieve tipo loma e índice de relieve bajo; las laderas son de longitud corta, de forma convexa y cóncava, con una inclinación abrupta a escarpada; la forma de la cresta es aguda y los drenajes forman valles en V (Figura 45); presenta una cobertura de pastos y bosques.

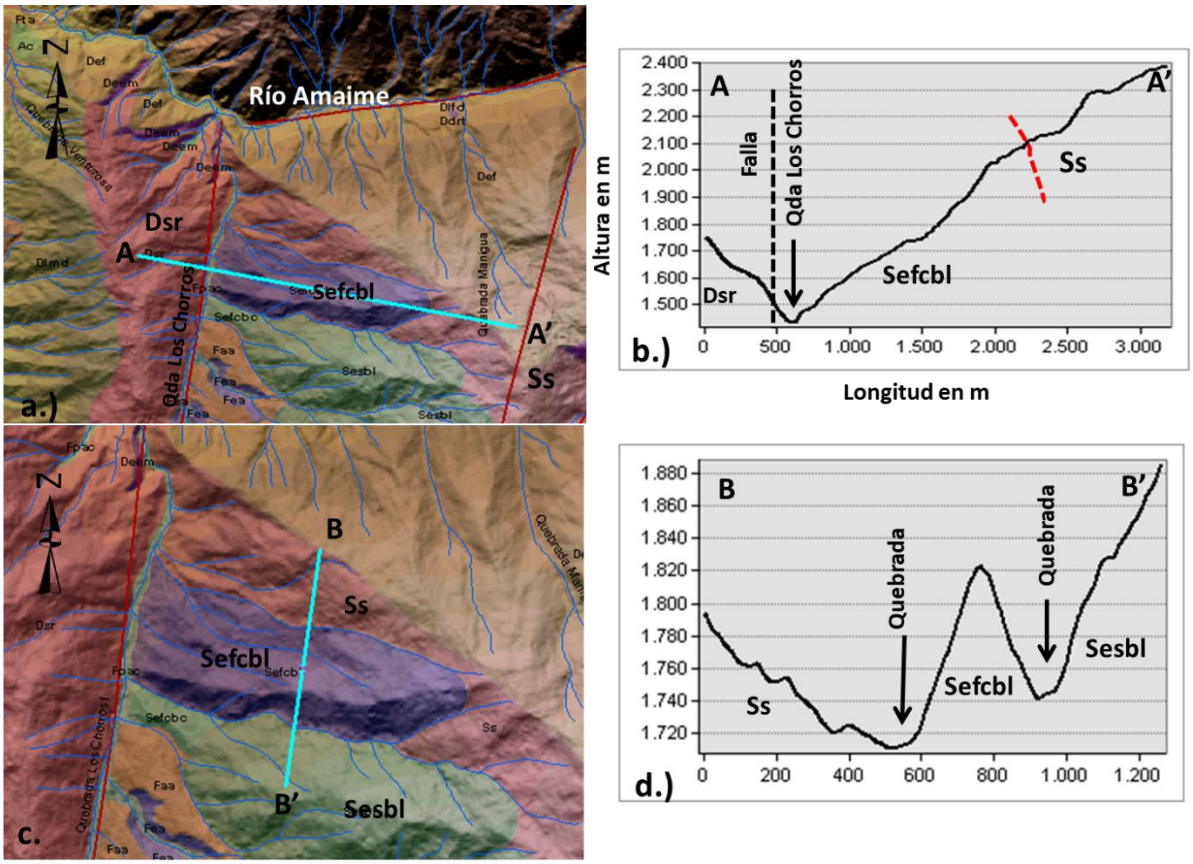


Figura 45. Espolón facetado bajo de longitud larga (Sefcbl).
a.) Localización espolón en el corregimiento de Tablones, se presenta línea de corte topográfico NWW-SEE. b.) Perfil topográfico A-A', la línea punteada negra indica la posición de la Falla que controla el cauce de la quebrada Los Chorros y la línea roja punteada el límite aproximado entre SGMF. c.) Se presenta línea de perfil topográfico N-S. d.) Perfil topográfico B-B' donde se observa un corte transversal al Sefcbl, que permite observar la inclinación de las laderas
Fuente: elaboración propia

5.3.3.4 Espolón facetado moderado de longitud larga (Sefcml)

Espolón facetado moderado de longitud larga (Sefcml) corresponde al 0,646% del área total del municipio, con una extensión de 654,852 Has. Para esta geoforma se logró identificar tres (3) subunidades geomorfológicas; la primera localizada en el corregimiento de Toche, la cual se encuentra asociada a roca mala calidad de esquistos de la unidad de Esquisto Básico de Bugalagrande (Rrceebb), las otras dos se encuentran en el corregimiento de Combia sobre la margen izquierda del río Amaime y se encuentran asociadas a roca regular calidad de esquistos del Complejo Cajamarca (Rrcecc). Corresponden a salientes topográficas con longitudes que varían entre los 1.600 m y los 2.300 m, con alturas máximas desde su nivel base entre 250 y 270 m. Su origen está relacionado con procesos intensos de erosión y fallamiento, con truncamiento de la cara frontal a manera de faceta triangular. Presentan un relieve tipo colina, con un índice de relieve moderado; las laderas son de longitud moderada, de formas cóncavas y convexas, con

inclinación de abruptas a escarpadas; la cima o cresta se caracteriza por ser agudas y los drenajes forman valles en V (Figura 46); presentan coberturas de pastos y rastrojos.

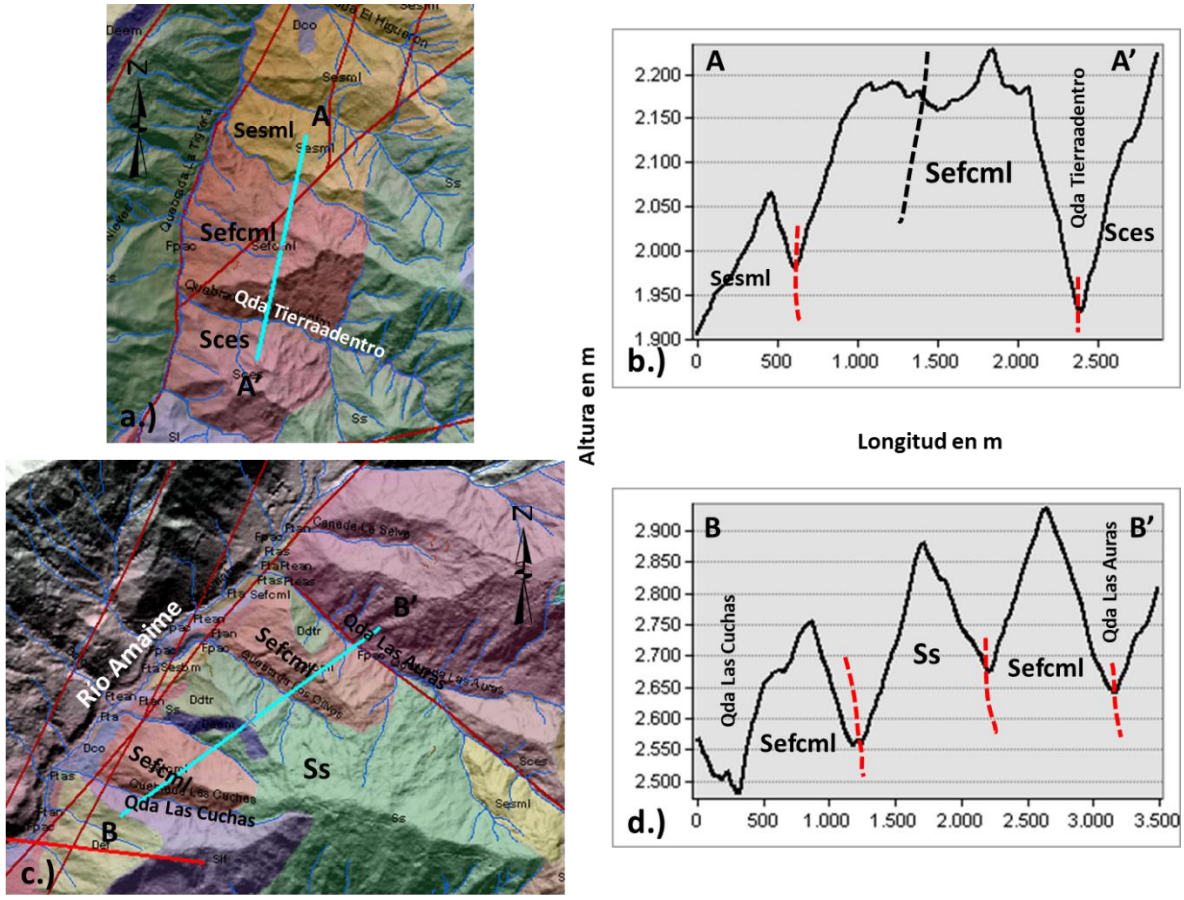


Figura 46. Espolón facetado moderado de longitud larga (Sefcml).
a.) Localización Sefcml en el corregimiento de Toche, se presenta línea de perfil topográfico NE-SW, las líneas rojas indican la presencia de fallas. b.) Perfil topográfico A-A' del Sefcml localizado en el corregimiento de Toche. c.) Sefcml localizados en el corregimiento de Combia, se presenta línea de perfil topográfico SW-NE. d.) Perfil topográfico B-B'. (Las líneas negras punteadas indican la presencia de fallas y las rojas los contactos aproximados entre SGMF)
Fuente: elaboración propia

5.3.3.5 Espolón bajo de longitud larga (Sesbl)

Espolón bajo de longitud larga (Sesbl) corresponde al 0,460 % del área total del municipio, con una extensión de 466,489 Has. Se lograron identificar cuatro (4) de estas geoformas; dos (2) en el corregimiento de Tablones, asociadas a roca regular calidad de basalto de la Formación Amaime (Rrcbfa), una en el corregimiento de Toche asociada a roca mala calidad de esquistos de la unidad de Esquistos Básicos de Bugalagrande (Rmceebb) y a roca regular calidad de anfibolitas de la unidad de Anfibolitas del Rosario (Rrcaar) y la última geoforma en el corregimiento de Combia asociada a roca regular calidad de esquistos del Complejo Cajamarca (Rrcecc). Estas geoformas se caracterizan por presentar una disposición generalmente perpendicular a la tendencia estructural general de la zona con longitudes que varían entre los

1.800 m y los 2.100 m, con el desarrollo de drenajes paralelos a subparalelos; su relieve es de tipo loma, con un índice bajo; las laderas son de longitud corta, deformas cóncavas y convexas, con una inclinación de muy abrupta a escarpada; las cresta o cimas son de agudas a redondeadas; los drenajes son paralelos y forman valles en V (Figura 47).

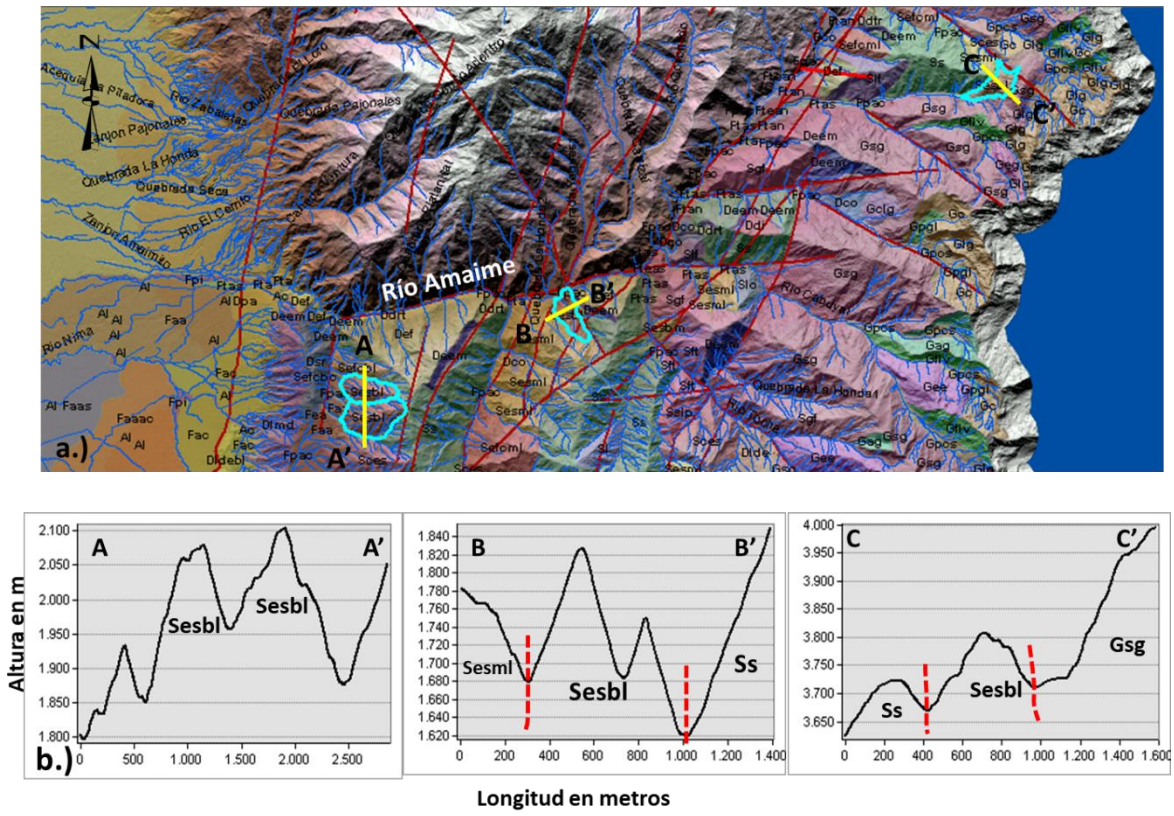


Figura 47. Espolón bajo de longitud larga (Sesbl).
a.) localización de los Sesbl en el municipio de Palmira, se presenta en línea amarilla la localización de cortes topográficos. b.) perfiles topográficos A-A', B-B' y C-C', donde se puede apreciar la longitud de las laderas, su inclinación y la formación de los valles en V

Fuente: elaboración propia

5.3.3.6 Espolón bajo de longitud media (Sesbm)

Espolón bajo de longitud media (Sesbm) corresponde al 0,061% del área total del municipio, con una extensión de 61,512 Has. Para esta subunidad geomorfológica (SGMF) se definieron en el municipio de Palmira dos (2) geoformas; la primera localizada en el corregimiento de Toche, asociada a roca regular calidad de anfibolitas de la unidad Anfibolitas del Rosario (Rrcaar) y la segunda en el corregimiento de Combia, asociada a roca regular calidad de esquisto del Complejo Cajamarca. Se caracterizan por ser dos prominencias topográficas dispuestas perpendicularmente a la tendencia estructural regional de la zona (N-S a N30°E); con longitudes de 1.000 m y 830 m e índice de relieve bajo. Sus laderas son de longitud corta, de formas cóncavas y conexas, de inclinación escarpada; La cresta son agudas a redondeadas; los drenajes son paralelos con formación de valles en V (Figura 48).

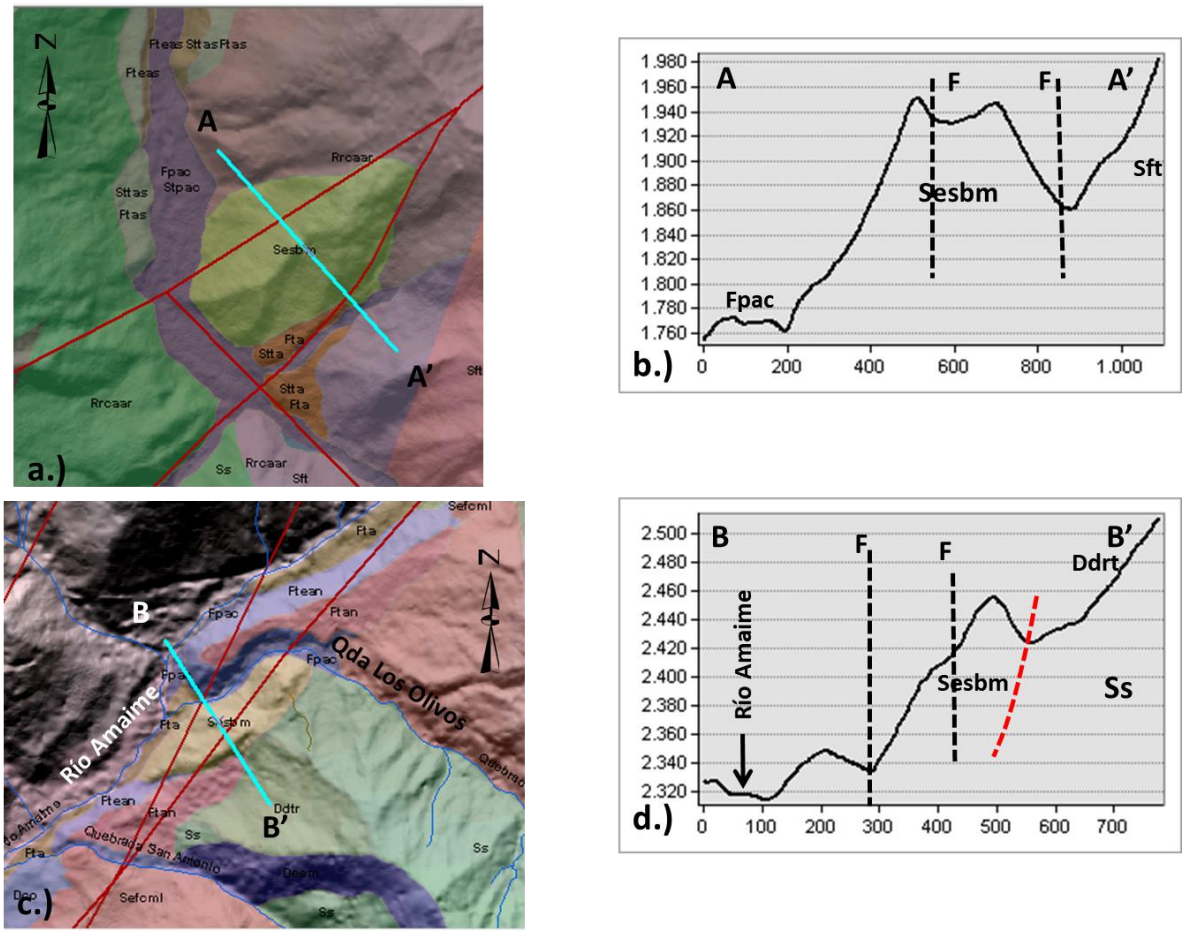


Figura 48. Espolón bajo de longitud media (Sesbm).
a.) Sesbm localizado en el corregimiento de Toche, se observa los trazos de falla (líneas rojas) y la línea de perfil NW-SE (azul). b.) Perfil topográfico A—A', se observa el índice de relieve y la inclinación de las laderas, fallas (línea negra punteada) y contactos entre SGMF (roja punteada). c.) Sesbm localizado en el corregimiento de Combia, se observa los trazos de falla (líneas rojas) y la línea de perfil NW-SE (azul). d.) Perfil topográfico B—B', se observa el índice de relieve y la inclinación de las laderas, fallas (línea negra punteada) y contactos entre SGMF (roja punteada).
Fuente: elaboración propia

5.3.3.7 Espolón moderado de longitud larga (Sesml)

Espolón moderado de longitud larga (Sesml) corresponde al 2,517% del área total del municipio, con una extensión de 2551,208 Has. Para esta subunidad geomorfológica se definieron once (11) geoformas en el municipio de Palmira; en los corregimientos de Ayacucho, Tenjo, Toche y Combia; asociadas a roca regular calidad esquisto del complejo Cajamarca (Rrcecc), roca regular calidad de basalto de la Formación Amaime (Rrcbfa), roca mala calidad de esquisto de la unidad Esquisto Básico de Bugalagrande (Rmceebb) y roca regular calidad de la unidad metagabroides de Bolo Azúl (Rrcmba). Se caracteriza por corresponder a una saliente topográfica, dispuesta de manera perpendicular a la disposición estructural regional (N-S a N 30° E). Presenta un relieve de tipo colina a montañoso e índice de relieve moderado a alto, con longitudes de sus ejes

mayores entre 1.600 m y 3.000 m; las laderas presentan longitudes moderadas a largas, de formas cóncavas a convexas y con una inclinación abrupta a muy abrupta. La cima o cresta presentan formas agudas a redondeadas y los drenajes son paralelos formando valles en V (Figura 49).

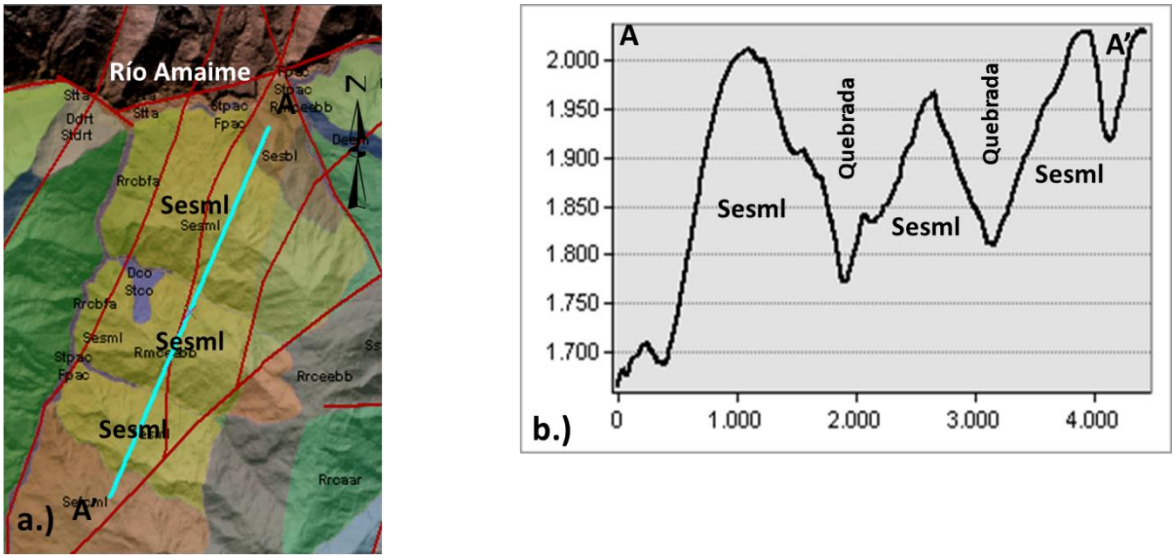


Figura 49. Espolón moderado de longitud larga (Sesml).
a.) Tres Sesml localizados en el corregimiento de Toche, margen izquierda del río Amaime, se presenta en trazo azul la línea de corte topográfico, y las líneas rojas corresponden al sistema de fallas regionales. b.) Perfíl A-A' donde se puede observar las características de las laderas

Fuente: elaboración propia

5.3.3.8 Faceta triangular (Sft)

Faceta triangular (Sft) corresponde al 0,236% del área total del municipio, con una extensión de 239,622 Has. Se determinaron tres (3) geoformas para esta subunidad geomorfológica, localizadas en el corregimiento de Toche, sobre ambas márgenes del rio Toche; asociadas a roca regular calidad de la unidad de metagabroides de Bolo Azul (Rrcmba). Se caracteriza por corresponder a un plano de geometría triangular a rectangular, con la base más ancha que la cima, con longitud de ladera variable entre 300 m y 1.700 m, con una inclinación escarpada. Su origen está relacionado con el truncamiento y desplazamiento de relieves por procesos de fallamiento y posterior erosión diferencial (Figura 50).

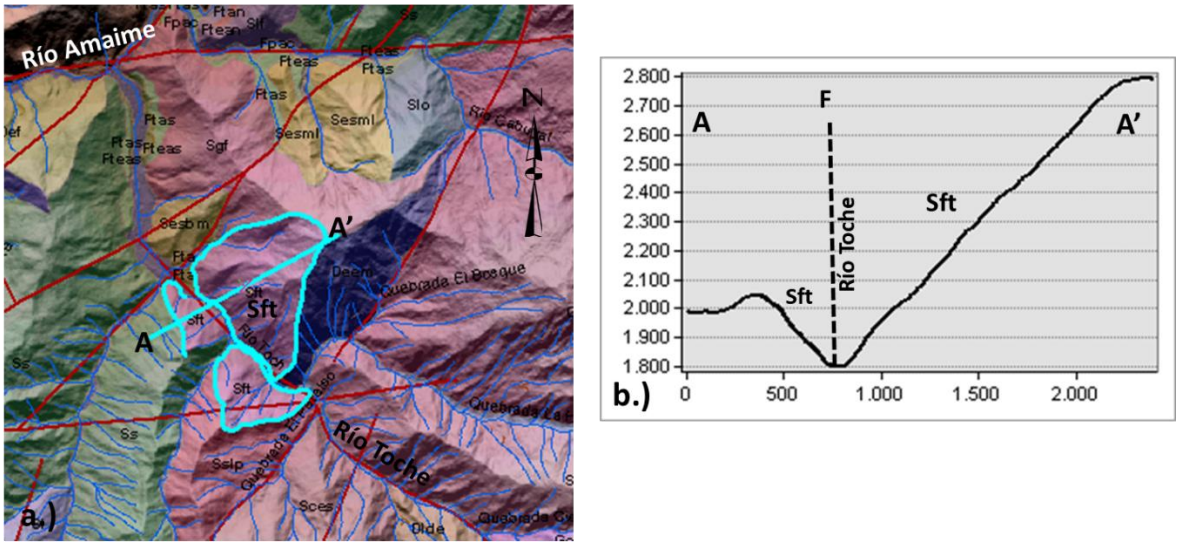


Figura 50. Faceta triangular (Sft).
a.) Facetas triangulares localizadas en el corregimiento de Toche, sobre las márgenes del río Toche, se observa la línea de corte topográfico SW-NE. b.) Perfil topográfico A-A', donde se piede apreciar la forma, longitud e inclinación de la ladera (cara frontal de la Sft)

Fuente: elaboración propia

5.3.3.9 Gancho de flexión (Sgf)

Gancho de flexión (Sgf) corresponde al 1,273% del área total del municipio, con una extensión de 1289,922 Has. Para esta subunidad geomorfológica se identificaron tres (3) geoformas localizadas en los corregimientos de Toche y Combia, asociadas a roca regular calidad de anfibolitas de la unidad anfibolitas del Rosario (Rrcaar), roca regular calidad de la unidad Metagabroides de Bolo azul (Rrcmba) y roca regular calidad esquistos del complejo Cajamarca (Rrcecc). Se caracteriza por ser una clase de espolón, perpendicular a la tendencia estructural regional (N-S a N 30° E), con una geometría en planta en forma de gancho y su origen está asociado al efecto generado por el desplazamiento lateral a lo largo de una falla de rumbo y su posterior incisión erosiva. Presentan longitudes que varían desde los 3.700 m hasta los 5.100 m y alturas 450 m, indicando un índice de relieve moderado; las laderas son de longitud moderada, de formas cóncavas y convexas, de inclinación muy abrupta a escarpada y las crestas o cimas son angulares (Figura 51).

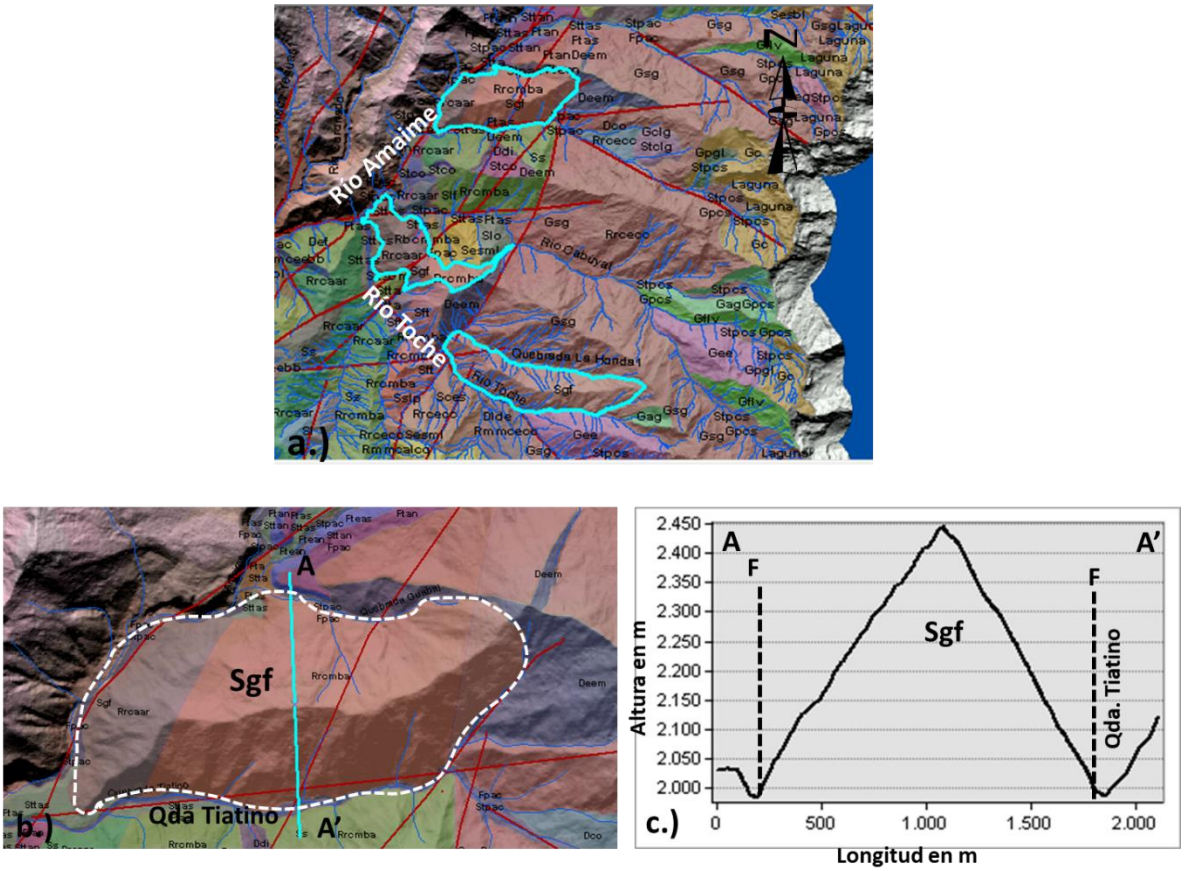


Figura 51. Gancho de flexión (Sgf).
a.) Localización de los Sgf (resaltados por la línea azul) en los corregimientos de Toche y Combia en el municipio de Palmira, las líneas rojas representan el sistema de fallas regionales. b.) Sgf en el corregimiento de Combia, se observa la curvatura de la geoforma y se presenta una línea de perfil topográfico N-S. c.) Perfil topográfico A-A', donde se onserva la forma aguda de la cima, la longitud forma e inclinación de las laderas
Fuente: elaboración propia

5.3.3.10 Lomo (Sl)

Lomo (Sl) corresponde al 0,578% del área total del municipio, con una extensión de 585,930 Has. Para esta subunidad geomorfológica se lograron identificar dos geoformas localizadas en los corregimientos de Tenjo y Toche, entre los ríos Nima al sur y Toche al norte; se encuentran asociadas a roca mala calidad de esquistos de la unidad de esquistos Básicos de Bugalagrande (Rmceebb) y roca regular calidad de anfibolitas de la unidad de anfibolitas del Rosario (Rrcaar), respectivamente. Estos cuerpos se caracterizan por ser prominencias topográficas dispuestas de forma paralela a la disposición estructural principal de la región (N-S a N30°E). Presentan longitudes de 3.980 m y 2.000 m, con alturas 200 m y 300 m que dan un índice de relieve bajo a moderado; las laderas son de longitud corta a moderada, de formas irregulares y con inclinaciones de muy abrupta a escarpada; las cimas o crestas son agudas a redondeadas (Figura 52).

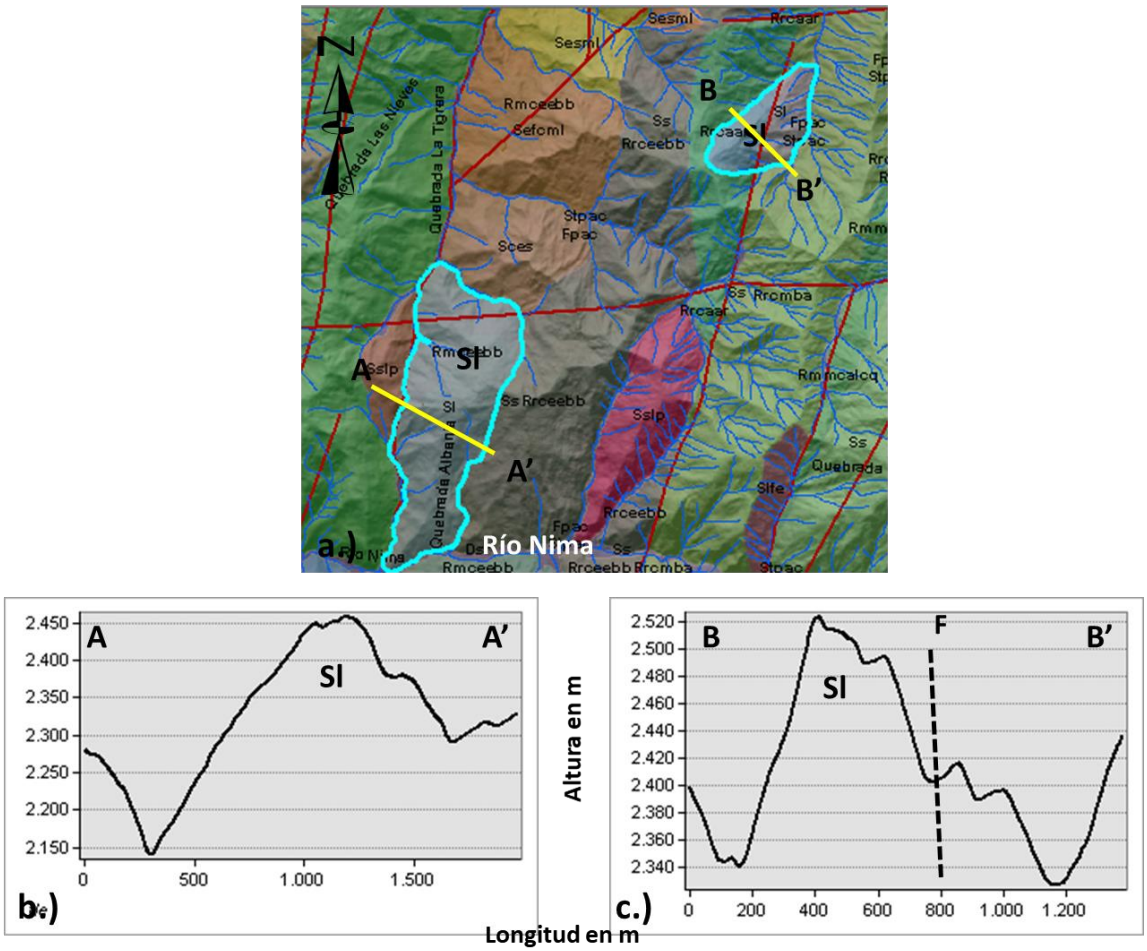


Figura 52. Lomo (Sl).
Localización de los lomos en los corregimientos de Tenjo y Toche, municipio de Palmira, se presentan en líneas rojas las fallas regionales y en línea amarilla los cortes topográficos. b.) y c.) Perfiles topográficos A-A' y B-B', respectivamente; se observa las alturas máximas, la forma, longitud e inclinación de las laderas
Fuente: elaboración propia

5.3.3.11 Lomo de falla (Slf)

Lomo de falla (Slf) corresponde al 0,288% del área total del municipio, con una extensión de 291,494 Has. Para esta subunidad geomorfológica se identificaron dos (2) geoformas localizadas entre los ríos Cabuyal y Amaime en el corregimiento de Combia; se encuentran asociadas a roca regular calidad de anfibolitas de la unidad de Anfibolitas del Rosario (Rrcaar) y a roca regular calidad de esquistos del Complejo Cajamarca (Rrcecc). Corresponden a unas prominencias topográficas cuyos ejes mayores miden 1.200 m y 1.600 m; presentan un relieve de tipo colina, con un índice de relieve de bajo a moderado; las laderas presentan longitudes de cortas a moderadas, con formas irregulares e inclinaciones escarpadas, las crestas presentan formas agudas a subredondeadas y los drenajes forman valles en forma de U (Figura 53). Su origen está

relacionado con el movimiento lateral de una falla de rumbo, que determina su morfología característica.

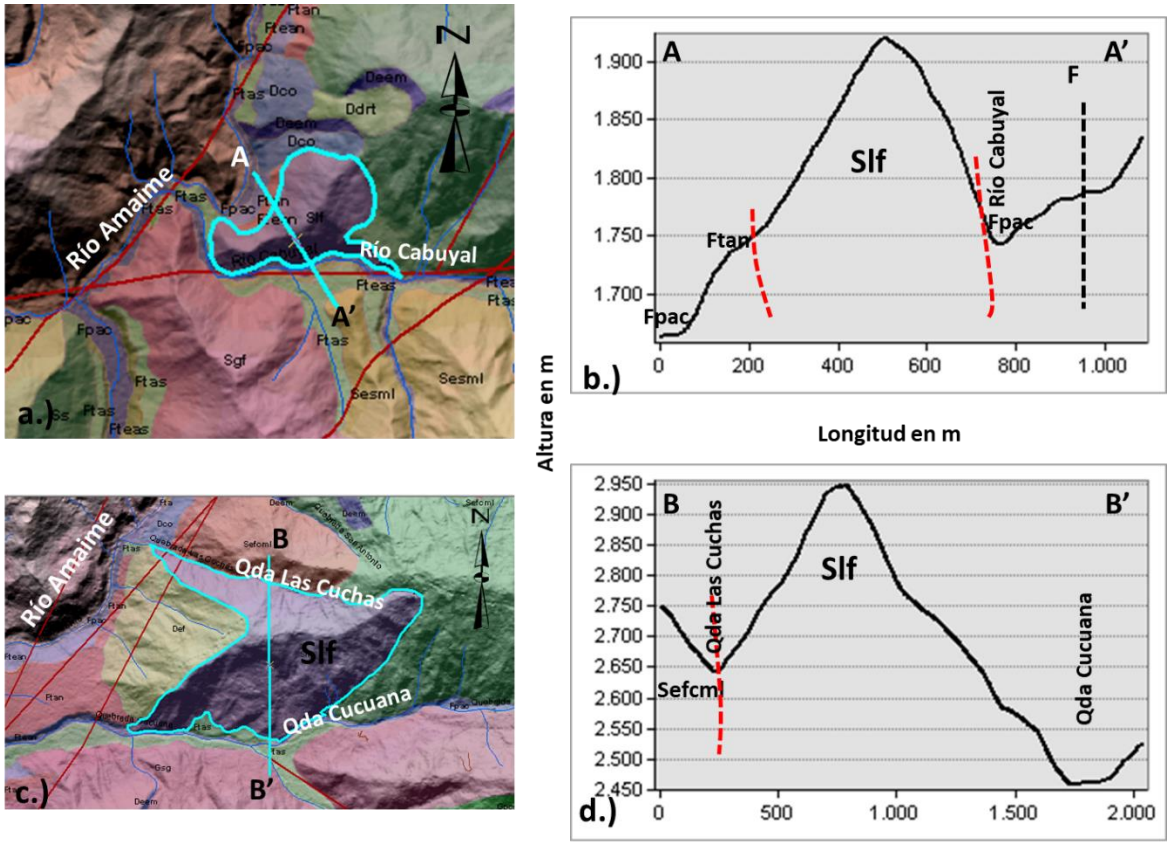


Figura 53. Lomo de falla (Slf).
a.) Lomo localizado sobre la margen derecha del río Cabuyal, las líneas rojas representan las fallas regionales y la azul la línea de perfil topográfico. b.) Perfil A-A', se observa la forma de la cresta, de las laderas y su inclinación; la línea punteada negra indica las fallas (F) y la roja los contactos aproximados entre las SGMF. c.) Lomo de falla entre las quebradas Las Cuchas y La Cucuana, se destaca la forma e inclinación de las laderas
Fuente: elaboración propia

5.3.3.12 Escarpe de línea de falla (Slfe)

Escarpe de línea de falla (Slfe) corresponde al 0,205% del área total del municipio, con una extensión de 207,329 Has. Se encuentra localizado en el corregimiento de Tenjo, sobre la margen derecha del río Nima y se extiende 5.400 m hacia el norte, hasta la desembocadura de la quebrada Los Mensa en la Quebrada Los Chorros. Corresponde a una superficie subvertical cuya longitud varía entre los 200 m y los 730 m, con inclinación de abrupta a muy abrupta, de forma convexa y cóncava. Su origen está relacionado con el sistema de Fallas Norte – Sur a Noreste, donde las superficies topográficas presentan truncamiento y en donde la margen izquierda de la falla se encuentra topográficamente más elevada que la derecha (Figura 54).

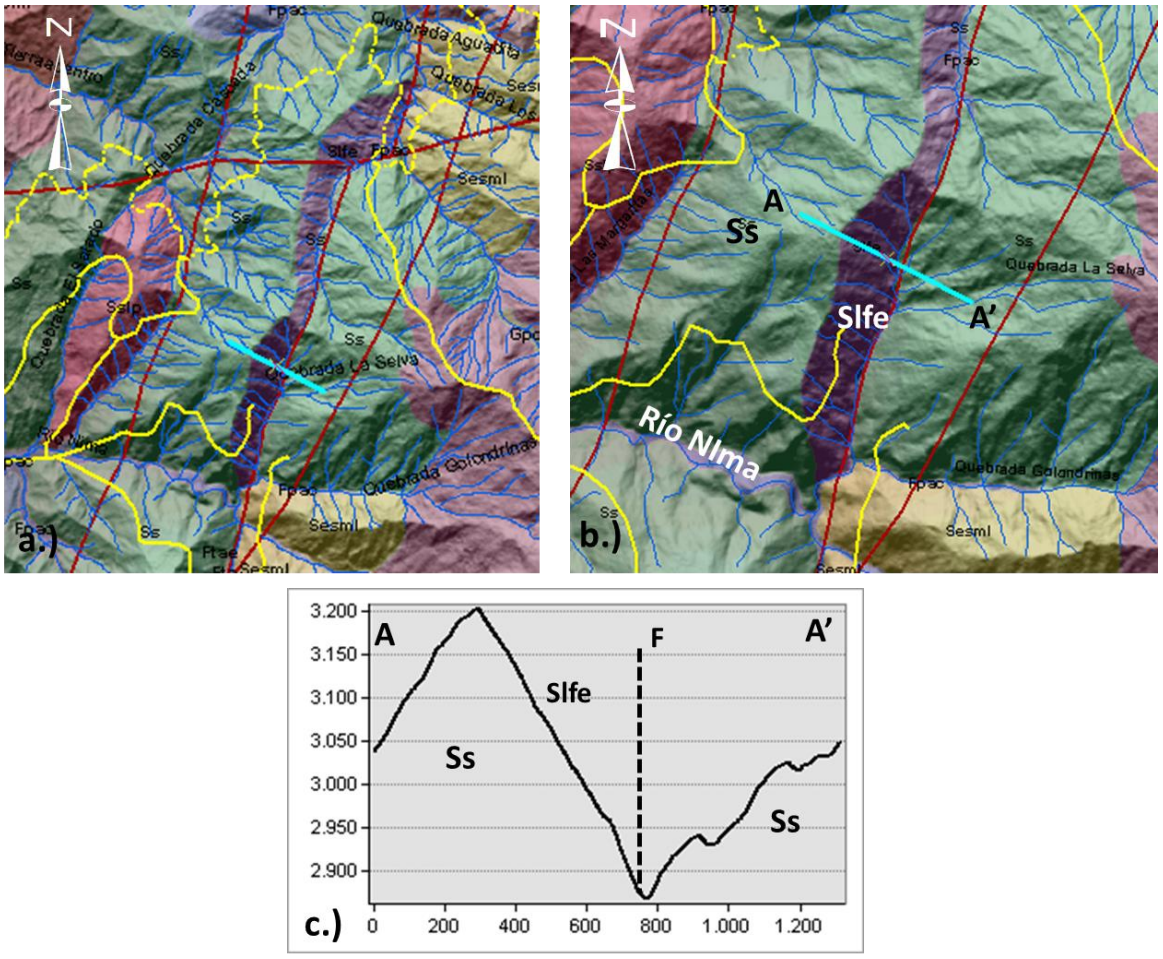


Figura 54. Escarpe de línea de falla (Slfe).
a.) Localización del Slef en el corregimiento de Tenjo. b.) Detalle del escarpe donde se presenta la línea de perfil (azul), las líneas rojas corresponden al sistema de fallas regionales. c.) Perfil topográfico A-A', donde se puede apreciar la longitud de la ladera (Slfe) y su inclinación

Fuente: elaboración propia

5.3.3.13 Lomo de obturación (Slo)

Lomo de obturación (Slo) corresponde al 0,081% del área total del municipio, con una extensión de 82,093 Has. Se identificó esta subunidad geomorfológica el noreste del corregimiento de Toche en límites con el corregimiento de Combia, sobra la margen izquierda del río Cabuyal; se encuentra asociada a roca regular calidad de la unidad de metagabroides de Bolo Azul (Rrcmba). Corresponde a una prominencia topográfica en forma de lomo, con una longitud de 1.600 m paralelo a la dirección de las estructuras regionales; presenta un relieve de tipo colina, con un índice de relieve moderado; las laderas presentan longitudes moderadas, de formas cóncavas y convexas e inclinaciones abruptas a muy abruptas; la cresta presenta forma angular. Por el fuerte

proceso tectónico este lomo ha sufrido desplazamiento, ocasionando el bloqueo parcial del río Cabuyal, obligándolo a modificar su curso (Figura 55).

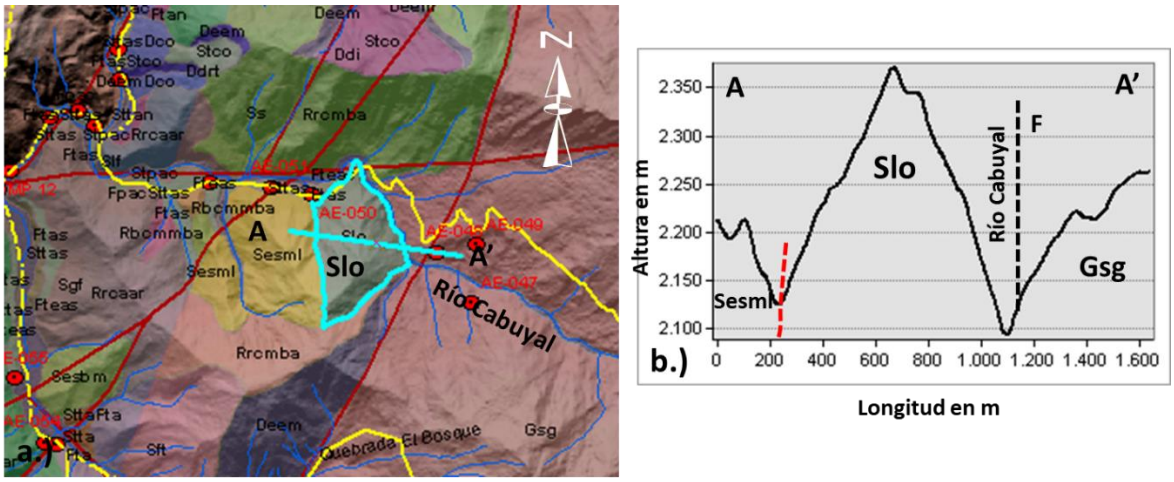


Figura 55. Lomo de obturación (Slo).
a.) Localización del Slo en el municipio de Palmira, se observa el sistema de fallas regionales (Líneas de color rojo), el desplazamiento del río Cabuyal y la línea de perfil topográfico NWW-SEE. b.) Perfil topográfico A-A', se observa la forma e inclinación de las laderas y la falla que controla el cauce del río Cabuyal
Fuente: elaboración propia

5.3.3.14 Sierra (Ss)

Sierra (Ss) corresponde al 8,787% del área total del municipio, con una extensión de 8905,768 Has. Esta geoforma se encuentra localizada en los corregimientos de Ayacucho, Tenjo, Caluce, Toche y Combia; se encuentran asociadas a roca regular calidad de la unidad de metagbroides de Bolo Azul (Rrcmba), roca regular calidad esquistos del Complejo Cajamarca (Rrcecc), roca regular calidad esquistos de la unidad de esquistos Básicos de Bugalagrande (Rrceebb) y roca regular calidad de basalto de la Formación Amaime (Rrcbfa). Corresponden a prominencias topográficas con longitudes variables de sus ejes mayores entre 2 Km y los 11 K, los cuales están dispuestos de forma paralela a la dirección predominante de las estructuras regionales (N-S a N30°E), presentan un relieve de tipo montañoso e índice alto; las laderas varían en sus longitudes desde moderadas a muy largas, con pendientes abruptas a escarpadas; la forma de sus crestas se presentan desde agudas a redondeadas y su origen está relacionado con procesos de fallamiento intenso (Figura 56).

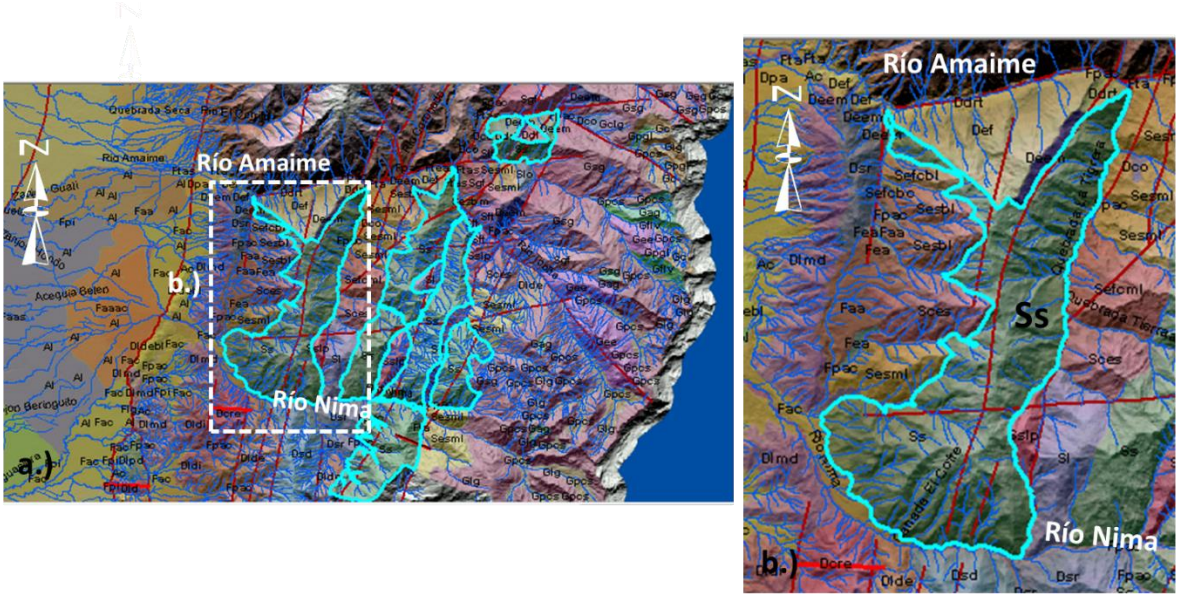


Figura 56. Sierra (Ss).
a.) Localización de las Ss en el municipio de Palmira. b.) Detalle de la Ss que se extiende (11 Km) desde la margen derecha del río Nima en el corregimiento de Caluce hasta el corregimiento de Toche sobre la margen izquierda del río Amaime

Fuente: elaboración propia

5.3.3.15 Sierra y lomo de presión (Sslp)

Sierra y lomo de presión (Sslp) corresponde al 0,498% del área total del municipio, con una extensión de 504,816 Has. Para esta subunidad geomorfológica se identificaron tres (3) geoformas localizadas en los corregimientos de Tenjo y Toche, asociadas a roca regular calidad de basalto de la Formación Amaime (Rrcbfa), roca regular calidad esquistos de la unidad Esquisto Básicos de Bugalagrande (Rrceebb) y roca regular calidad de la unidad de metagabroides de Bolo Azul (Rrcmbb). Su eje mayor se encuentra dispuesto de forma paralela a la dirección de las estructuras mayores (N-S a N30°E) presentan longitudes de 2.100 m, 3.500 m y 1.450 m; con elevaciones máximas de 280 m, lo que indica que estas geoformas presentan un índice de relieve bajo a moderado; las laderas presentan longitudes cortas a moderadas, de formas cóncavas y convexas, con inclinaciones escarpadas; las crestas tienen un predominio agudo y su origen está relacionado al truncamiento y desplazamiento vertical o lateral por procesos de fallamiento intenso (Figura 57).

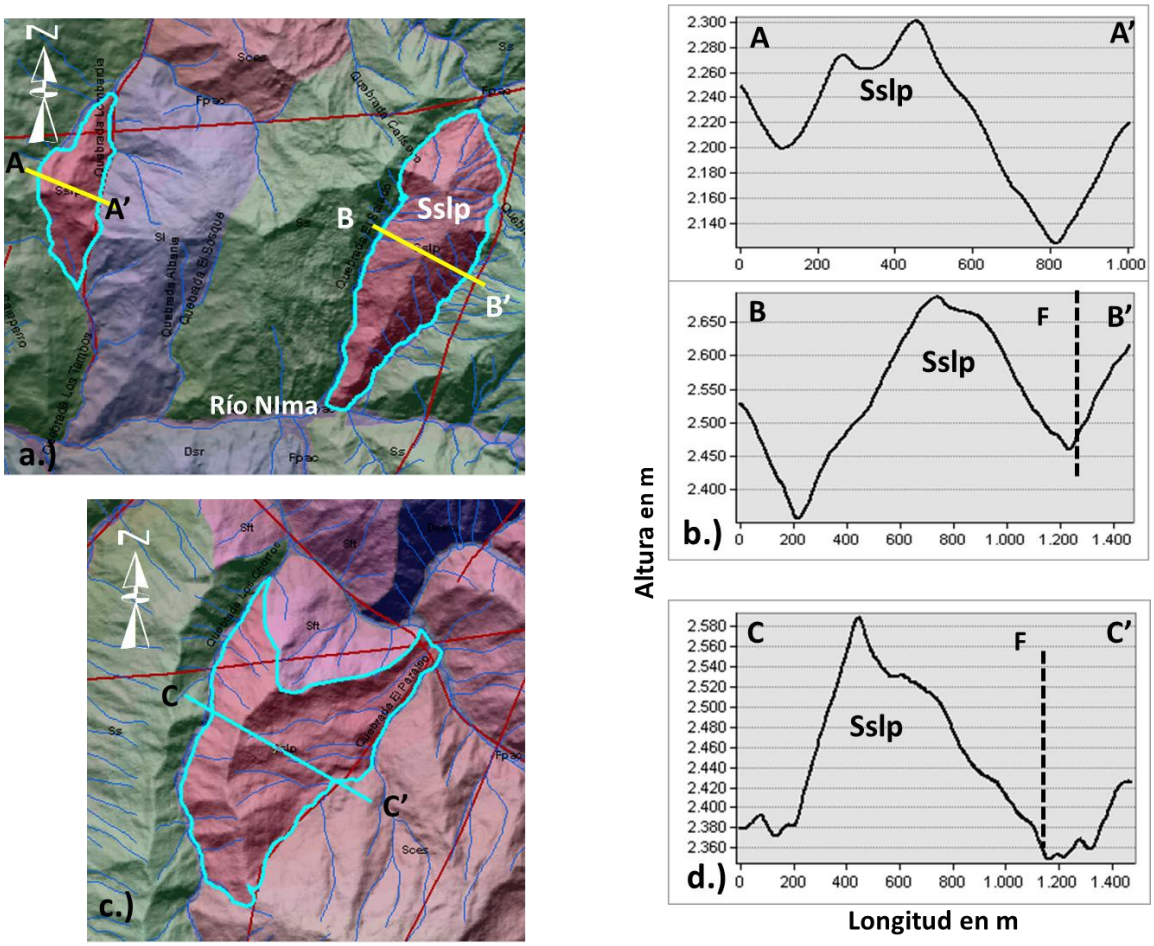


Figura 57. Sierra y lomo de presión (Sslp).
Lomos de presión localizados en el corregimiento de Tenjo, las líneas rojas indican el sistema de fallas regionales y la amarilla la línea de perfil topográfico. b.) Presenta los perfiles A-A' y B-B', donde se resalta la forma de las laderas y su inclinación, la línea punteada negra indica la presencia de falla. c.) Lomo de presión localizado en el corregimiento de Toche, presenta sistema de fallas (líneas rojas) y la línea de perfil topográfico (azul). d.) Perfil topográfico C-C'
Fuente: elaboración propia

5.3.4 Ambiente denudacional (D)

El ambiente denudacional (D) corresponde al 8,65% del área total del municipio, con una extensión de 8766,63 Has. Para este ambiente se logró determinar un total de 17 subunidades cuyas proporciones dentro del ambiente se representan en la Figura 58.

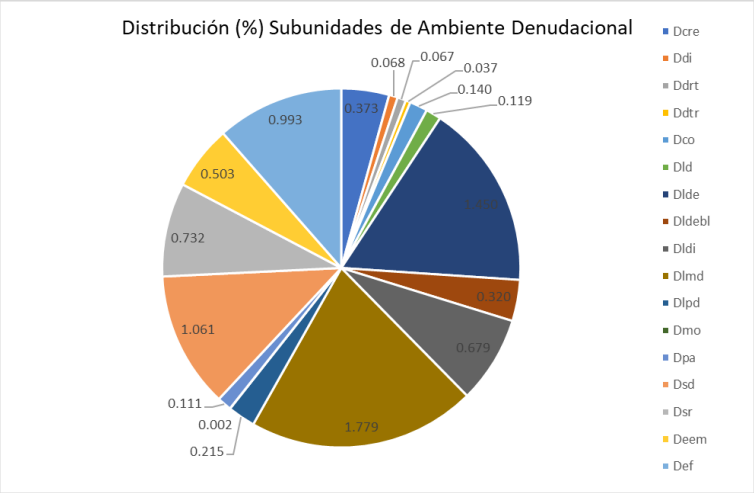


Figura 58. Subunidades geomorfológicas ambiente denudacional (D)
Fuente: elaboración propia

5.3.4.1 Cono y lóbulo coluvial y de solifluxión (Dco)

El cono y lóbulo de solifluxión (Dco) corresponde al 0,140% del área total del municipio, con una extensión de 142,01 Has. Se encuentran localizados hacia la parte alta de la cordillera en los corregimientos de Toche y Combia. Se caracterizan por ser unas subunidades en forma de cono o lóbulo, con laderas convexas de longitudes cortas a largas y pendientes que varían entre inclinadas a abruptas (Figura 59). Su depósito tiene rasgos característicos como albardones o diques longitudinales, canales en forma de U, trenes de bloques rocosos y sectores con bloques individuales de gran dimensión. Están relacionados con suelos de estructura intermedia a matriz soportada (> 50%), con presencia de clastos que varían en tamaño desde gravas medias a bloques, de formas irregulares y con un grado de redondez de angulares a subangulares.

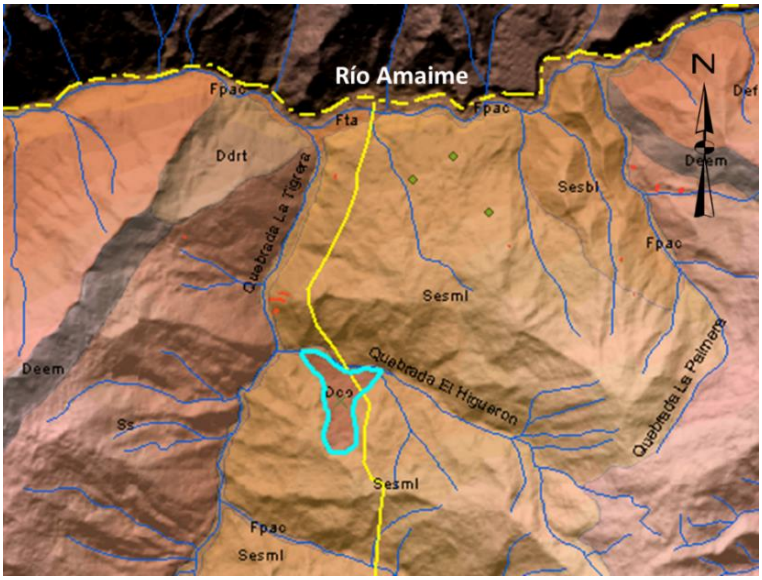


Figura 59. Cono y lóbulo coluvial y de solifluxión (Dco).
Fuente: elaboración propia.

5.3.4.2 Colina remanente (Dcre)

La colina remanente (Dcre) corresponde al 0,373% del área total del municipio, con una extensión de 377,759 Has. Esta subunidad se presenta en el corregimiento de La Zapata, sobre la margen izquierda del río Nima. Se encuentra asociada a roca de regular calidad de basalto de la Formación Amaime. Presenta un relieve tipo colina (200 m – 500 m), con laderas de longitud moderada (200 m – 500m), de formas cóncavas e inclinación de abrupta a muy abrupta, de cima redondeada; con una frecuencia de drenaje de baja a media y un patrón de drenaje radial – paralelo, presenta una cobertura de bosques y pastos (Figura 60 y Figura 61).

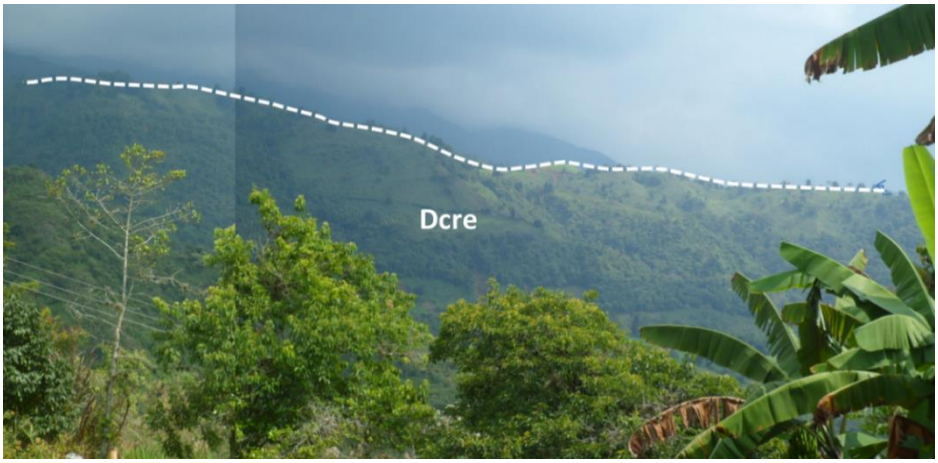


Figura 60. Colina remanente (Dcre), corregimiento La Zapata (estación 173).
Fuente: elaboración propia.

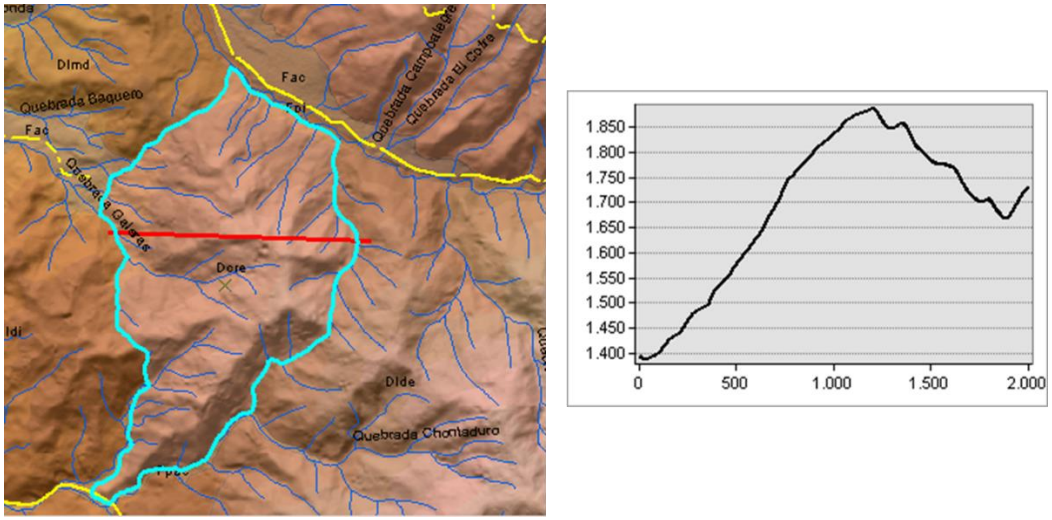


Figura 61. Colina remanente (Dcre), corregimiento La Zapata.
Fuente: elaboración propia.

5.3.4.3 Cono de deslizamiento indiferenciado (Ddi)

El cono de deslizamiento indiferenciado (Ddi) corresponde al 0,068% del área total del municipio, con una extensión de 68,778 Has. Esta subunidad se encuentra localizada sobre la margen izquierda de la quebrada Tiatino en el corregimiento de Combia. Se encuentra asociado a la roca de regular calidad de metagabroides de bolo azul (Rrcmba) y presenta forma de cono o lóbulo de morfología baja, cóncava a convexa, con una pendiente escalonada, nichos semicirculares, bloques inclinados, relieve irregular, formación de grietas y cambios súbitos de la pendiente. Su origen se relaciona con procesos de movimientos en masa de tierra o roca, cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de falla o en zonas con alta deformación cortante (Figura 62).

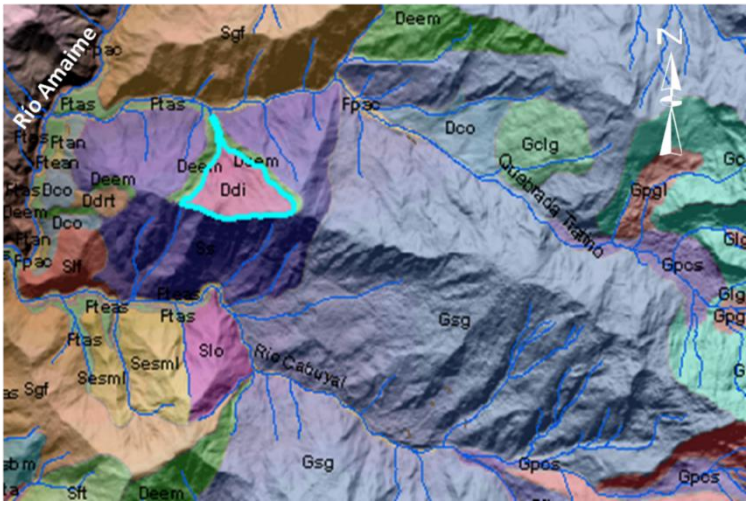


Figura 62. Cono de deslizamiento indiferenciado (Ddi).
Fuente: elaboración propia.

5.3.4.4 Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional (Ddrt)

El cono o lóbulo de deslizamiento rotacional (Ddrt) corresponde al 0,067% del área total del municipio, con una extensión de 67,780 Has. Se encuentran especialmente localizadas en los corregimientos de Toche y Combia, asociadas a rocas de regular calidad de basaltos de la Formación Amaime (Rrcbfa), de esquistos del Complejo Cajamarca (Rrcecc) y de las anfibolitas de la Unidad de Anfibolitas del Rosario (Rrcaar). Presentan formas de cono o lóbulo de morfología alomada baja, de longitudes cortas, localmente escalonados, con pendientes de inclinadas a abruptas. Su origen está asociado a la acumulación de tierra y/o bloques como consecuencia de un movimiento en masa asociado a deslizamiento de tipo rotacional (Figura 63).

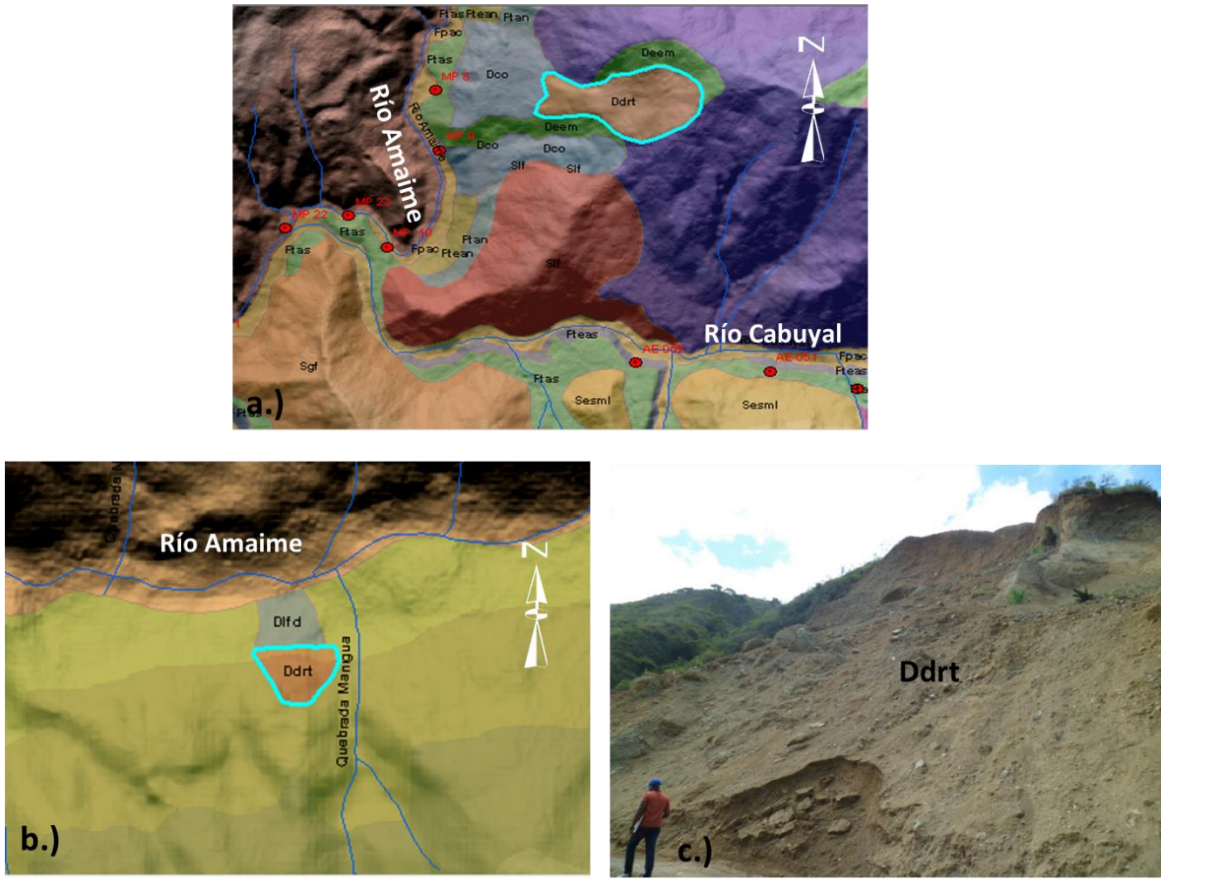


Figura 63. Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional (Ddrt).
a.) Ddrt corregimiento de Combia, margen derecha río Cabuyal. b.) Ddrt verada La Esperanza, corregimiento de Toche.
c.) Ddrt vista lateral cono de deslizamiento, corregimiento La Esperanza, corregimiento de Toche (estación 20).
Fuente: elaboración propia

5.3.4.5 Escarpe de erosión mayor (Deem)

El escarpe de erosión mayor (Deem) corresponde al 0,503% del área total del municipio, con una extensión de 510,181 Has. Esta subunidad geomorfológica se encuentra presente en los corregimientos de Toche y Combia, se encuentra asociada a las rocas de regular calidad de basaltos de la Formación Amaime (Rrcbfa), de esquistos del Complejo Cajamarca (Rrcecc) y de las anfibolitas de la unidad de anfibolitas del Rosario (Rrcaar). Se caracteriza por presentar laderas de pendiente abruptas a muy escarpadas, de longitudes cortas a muy cortas, de formas variables desde cóncavas, rectas a convexas. Su origen está asociado a procesos tectónicos, gravitacionales y glaciales (Figura 64).

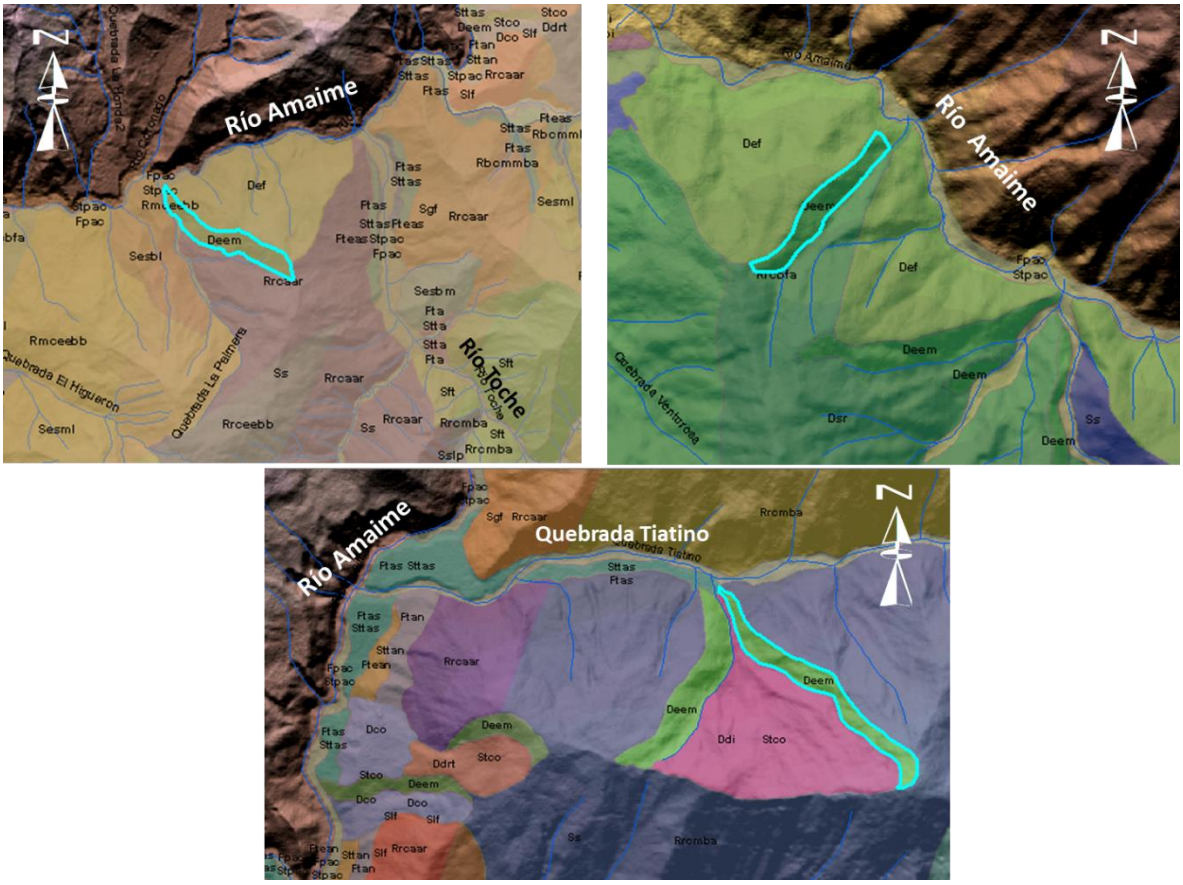


Figura 64. Escarpe de erosión mayor (Deem).
Fuente: elaboración propia

5.3.4.6 Escarpe facetado (Def)

El escarpe facetado (Def) corresponde al 0,993% del área total del municipio, con una extensión de 1006,383 Has. Se encuentra localizado en los corregimientos de Toche y Combia, sobre la margen izquierda del río Amaime. Asociado a las rocas de regular calidad de basalto de la Formación Amaime (Rrcbfa) y de las anfibolitas de la unidad de Anfibolitas del Rosario (Rrcaar). Esta geoforma se caracteriza por presentar una superficie triangular a trapezoidal, con una base amplia y estrecha hacia la cima, la forma de sus laderas puede ser cóncava o convexa, de longitud de ladera modera a muy larga y con una inclinación de escarpada a muy escarpada. Su origen está relacionado con procesos de erosión, incisión y movimientos en masa en las laderas relictas que aparecen en torno a relieves estructurales constituidos por materiales fracturados (Figura 65).

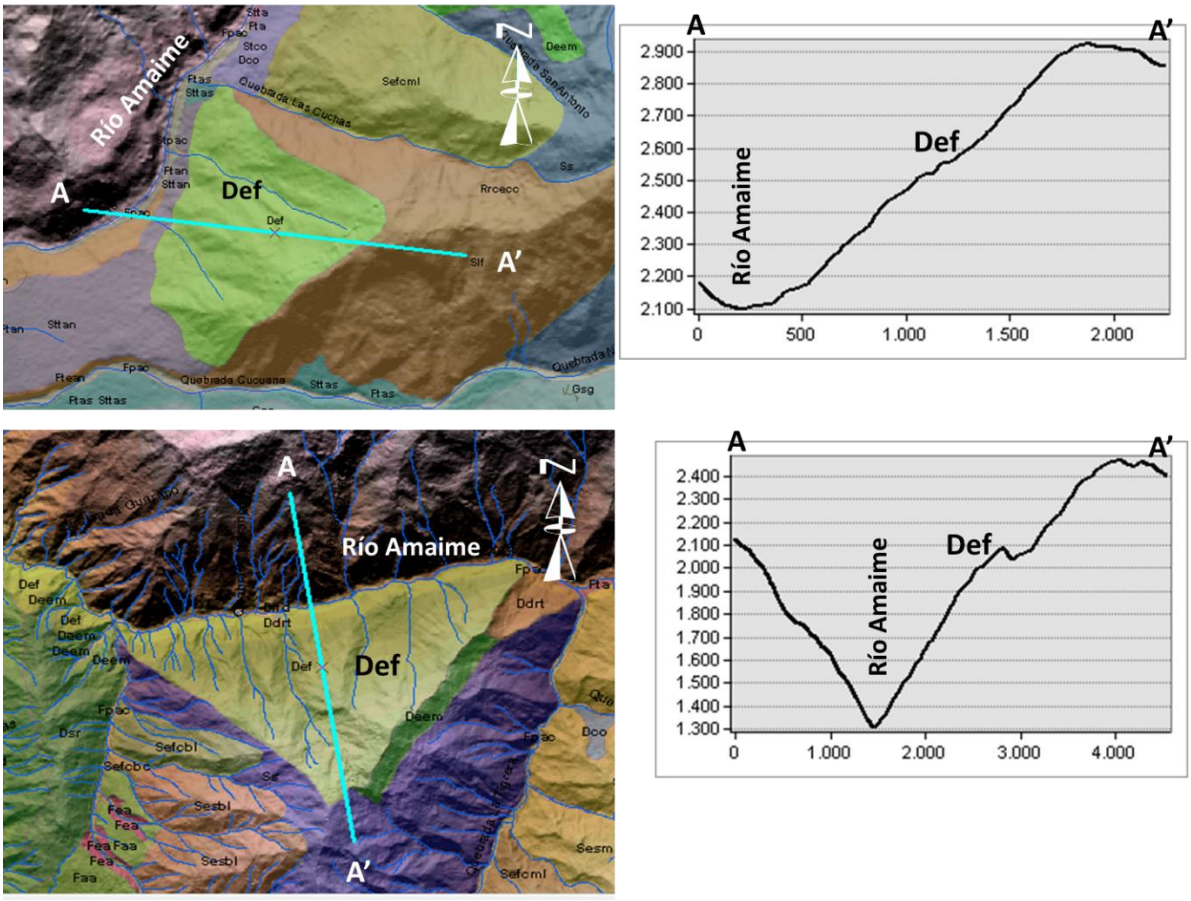


Figura 65. Escarpe facetado (Def).
Localizados sobre la margen izquierda del río Amaime, corregimientos de Toche y Combia
Fuente: elaboración propia

5.3.4.7 Loma denudada (Dld)

La loma denudada (Dld) corresponde al 0,119% del área total del municipio, con una extensión de 120,766 Has. Se encuentra localizada hacia el piedemonte occidental de la cordillera Central en la parte centro sur del municipio de Palmira, corregimiento de Ayacucho. Se encuentra asociada a la roca muy mala calidad conglomerados de la Formación Vilela (Rmmccfv). Se caracteriza por ser una prominencia topográfica con una altura máxima de 220 m desde su nivel base local, con una morfología alomada y elongada (E – W), de laderas cortas a muy cortas y de formas convexas, de pendientes muy abruptas y cima plana a subredoneada. Su origen está relacionado con procesos intensos de meteorización y erosión diferencial (Figura 66).

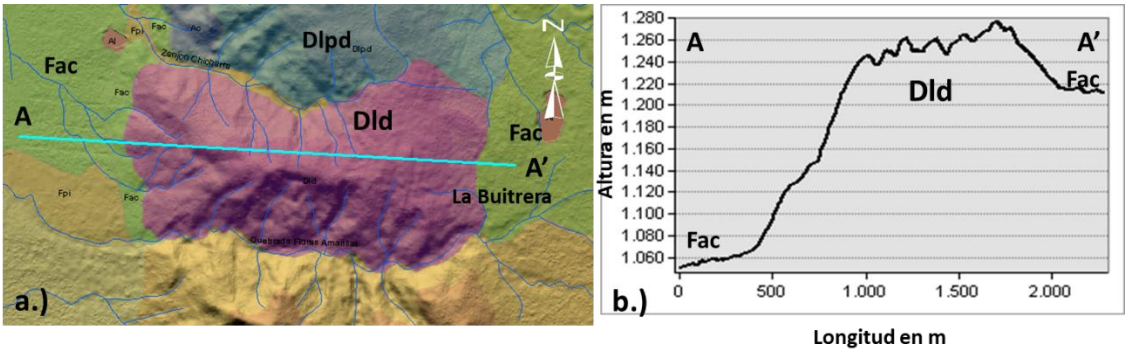


Figura 66. Loma denudada (Dld). Corregimiento Ayacucho.
a.) Vista en planta b.) Perfil Dld (W-E).
Fuente: paint_relief_dtm_radar_cvc_palmira_pix2_5m.tif

5.3.4.8 Lomo denudado (Dlde)

El lomo denudado (Dlde) corresponde al 1,450% del área total del municipio, con una extensión de 1470,025 Has. Para el municipio de Palmira se logró identificar tres subunidades geomorfológicas (SGMF) de lomo denudado (Dlde); dos en el corregimiento de Ayacucho asociadas a roca regular calidad de basalto de la Formación Amaime (Rrcbfa) y a roca mala calidad esquistos de la unidad Esquistos Básico de Bugalagrande (Rmceebb); la otra geoforma se encuentra localizada en el corregimiento de Combia, sobre la margen izquierda del río Toche y se encuentra asociada con roca mala calidad esquistos del Complejo Cajamarca (Rmcecc). Corresponden a geoformas alargadas y perpendiculares a la dirección del drenaje principal; con longitudes de ladera que varían de cortas a moderada, con una inclinación de la ladera entre muy inclinada a abrupta, de cima subredondeada, con un patrón de drenaje de paralelo a subdendrítico y una cobertura de pastos y bosques (Figura 67).

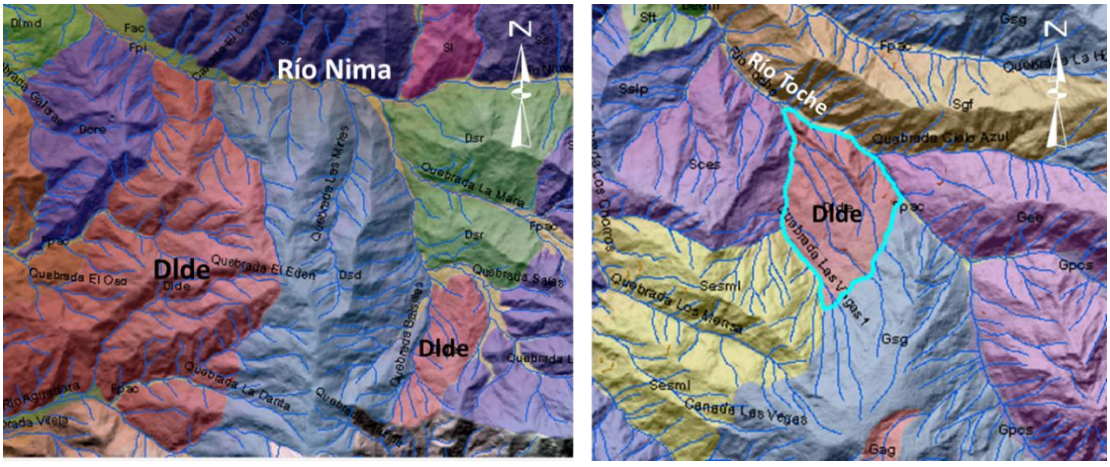


Figura 67. Lomo denudado (Dlde). a.) Dlde corregimiento Ayacucho, margen izquierda río Nima. b.) Dlde corregimiento Combia, margen izquierda río Toche.
Fuente: elaboración propia.

5.3.4.9 Lomo denudado bajo de longitud larga (Dldebl)

El lomo denudado bajo de longitud larga (Dldebl) corresponde al 0,320 % del área total del municipio, con una extensión de 324,811 Has. Son sistemas o conjuntos de lomos o filos ubicados a diferentes alturas; con índice de relieve relativo menor de 250 m y la longitud del eje principal es mayor que 1000 m.

Para el municipio de Palmira, se logró la identificación de dos de estas geoformas; localizadas en los corregimientos de Tablones y Barrancas, sobre ambas márgenes del río Nima. Se encuentran asociados a suelo residual de basalto de la Formación Amaime (Srbfa) y a roca regular calidad de diorita hornbléndica (Rrcdi). Presentan un tipo de relieve tipo colina, de formas alargadas entre 2500 m y 2800 m perpendiculares a la dirección del río Nima en el sector, con laderas de longitud corta y pendiente abrupta; sus cimas son redondeadas y presentan alturas máximas entre 90 m y 100 m (Figura 68). No tiene drenaje y presentan una cobertura de pastos.

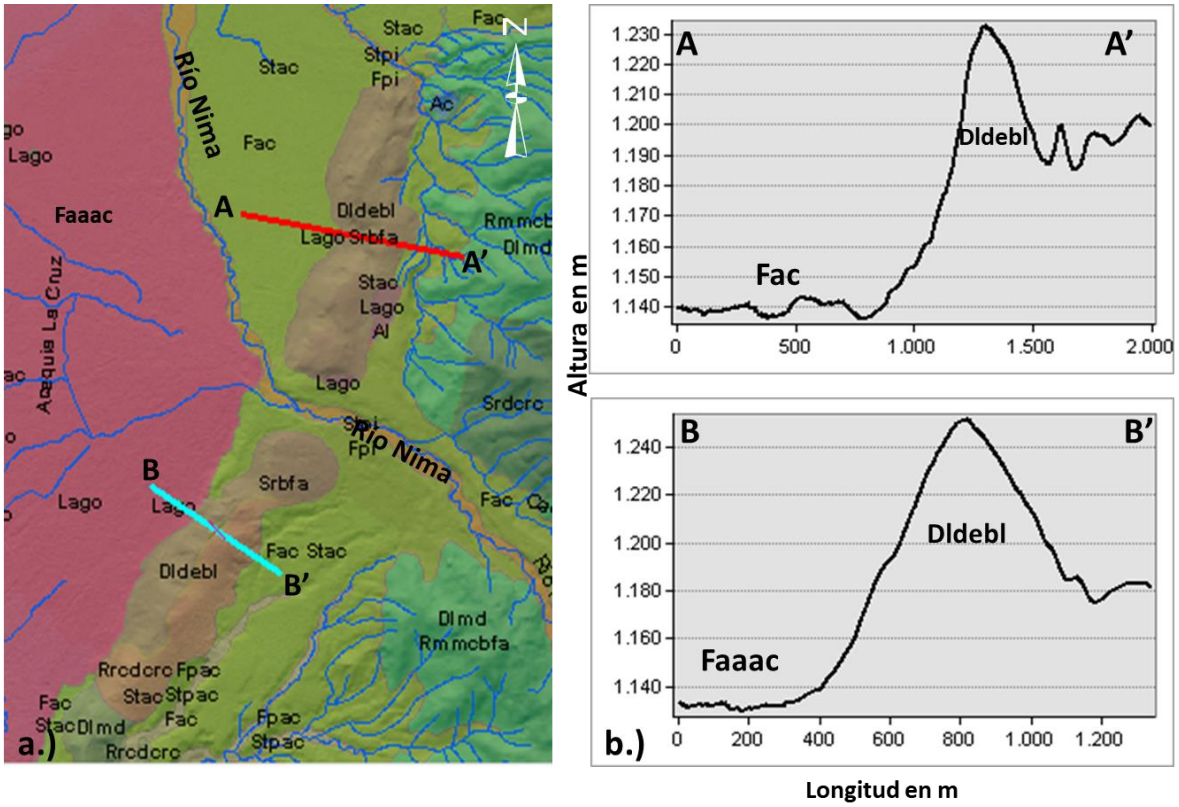


Figura 68. Lomo denudado bajo de longitud larga (Dldebl).
a.) Vista de los lomos localizados en el piedemonte de la cordillera Central (se presenta las líneas corte para el perfil topográfico). b.) Perfiles topográficos A – A' y B – B'.
Fuente: elaboración propia

5.3.4.10 Lomerios disectados (Dldi)

Lomerios disectados (Dldi) corresponde al 0,679% del área total del municipio, con una extensión de 687,730 Has. Estas geoformas se encuentran localizadas en los corregimientos de La Zapata y Ayacucho, separadas por la quebrada el Chontaduro. Se encuentran asociadas a roca mala calidad de basalto de la Formación Amaime (Rmcbfa) y a roca muy mala calidad de basalto de la Formación Amaime (Rmmcbfa). Se caracteriza por ser unas prominencias topográficas de morfología alomada o colinada, de laderas de largas a muy largas, de formas irregulares, con pendientes inclinadas a muy inclinadas y con índice de relieve de bajo a moderado. Se originan por procesos intensos de denudación, presentan un patrón de drenaje de subparalelo a radial, los cuales forman valles en U con fondos redondeados a planos (Figura 69).

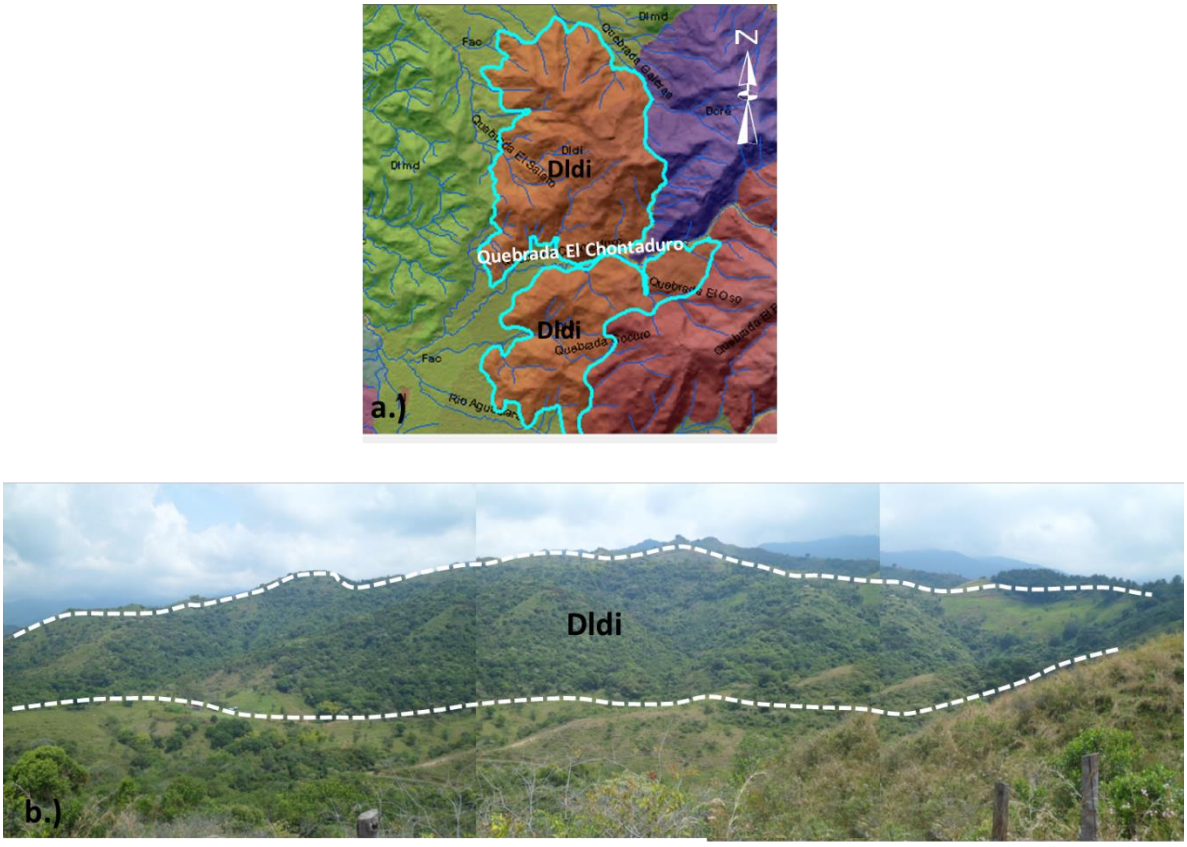


Figura 69. Lomeríos disectados (Dldi).
a.) Vista en planta, localización. b.) Visual desde la estación 171 hacia el oriente, las líneas de color blanco punteadas, muestran los Dldi.

Fuente: elaboración propia

5.3.4.11 Cono o Lóbulo de deslizamiento traslacional (Ddtr)

Cono o Lóbulo de deslizamiento traslacional corresponde al 0,037 % del área total del municipio, con una extensión de 37,755 Has. Esta subunidad se encuentra localizada sobre la margen izquierda de la quebrada La Rivera y sobre la margen derecha de la quebrada San Antonio en el

corregimiento de Combia. Se encuentra asociado a suelos transportados coluviales y presenta forma de cono con morfología muy inclinada (11° - 15°) a escarpada (31° - 45°) de longitud corta a moderadamente larga. Su origen es relacionado al movimiento de rocas y/o tierra a lo largo de una superficie de falla más o menos planar (Figura 70).

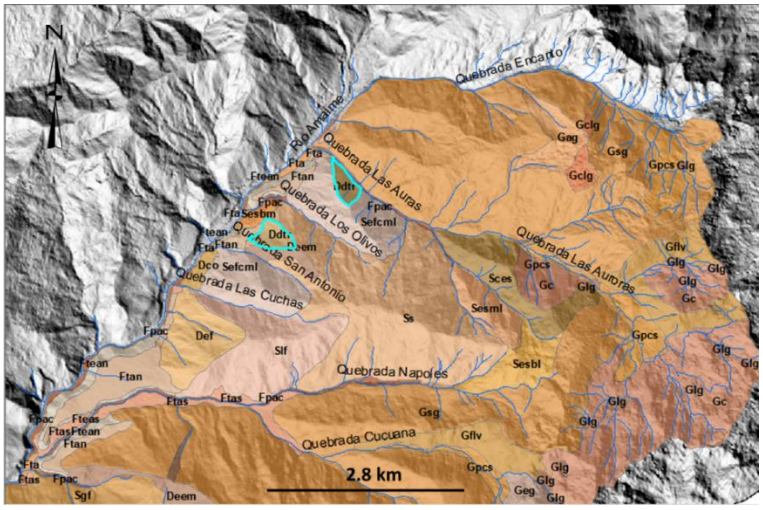


Figura 70. Cono o lóbulo de deslizamiento Traslacional (Ddtr).
Fuente: elaboración propia.

5.3.4.12 Lomeríos muy disectados (Dlmd)

Lomerios muy disectados (Dlmd) corresponde al 1,779% del área total del municipio, con una extensión de 1803,025 Has. Estas geoformas se localizan hacia el piedemonte occidental de la cordillera Central, en los corregimientos de Ayacucho, La Zapata, Potrerillo y Tablones; asociadas a roca regular calidad diorita hornbléndica (Rrcdi), roca muy mala calidad de basalto de la Formación Amaime (Rmmcbfa), suelo residual de diorita hornbléndica (Srdi), roca muy mala calidad y roca mala calidad de basalto de la Formación Amaime (Rmmcbfa) (Rmcbfa), respectivamente.

Los lomeríos muy disectados se caracterizan por ser prominencias topográficas de morfología alomada a colinada, con cimas redondeadas y amplias, sus laderas son cortas a muy cortas, de formas cóncavas y convexas, con pendientes abruptas a muy abruptas, con un índice de relieve bajo; presentan un patrón de drenaje dendrítico que forma valles en U y una cobertura de pastos (Figura 71). Su origen está asociado a procesos de denudación intensos.

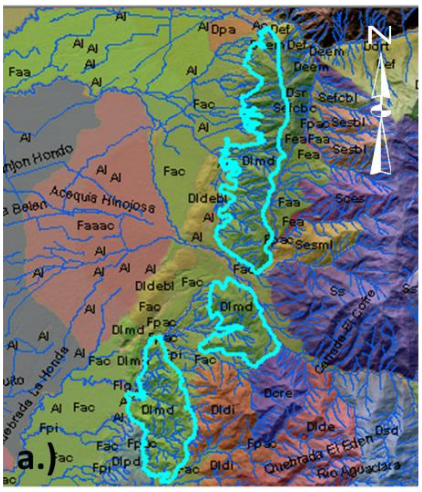


Figura 71. Lomeríos muy disectados (Dlmd). a.) Localización lomeríos. b.) Visual Dlmd corregimiento Ayacucho, margen derecha río Aguaclara (estación 167).
Fuente: elaboración propia

5.3.4.13 Lomeríos poco disectados (Dlpd)

Lomeríos poco disectados (Dlpd) corresponde al 0,215% del área total del municipio, con una extensión de 218,107 Has. Esta geoforma se localiza en el piedemonte occidental de la cordillera Central al sur del río Aguaclara en el corregimiento de Aguaclara; se encuentra asociada a suelo residual de diorita hornblendica (Srdi). Se caracteriza por ser una prominencia topográfica de forma colinada, con longitud de ladera corta a muy corta, con laderas de formas cóncavas y convexas, con un índice de relieve bajo y una pendiente de ladera muy inclinada; la forma de la cresta es redondeada, con un patrón de drenaje paralelo a subdendrítico, con una frecuencia baja a muy baja. Presenta una cobertura de pastos y parcial ocupación antrópica por la construcción de conjuntos residenciales (La Buitrera) (Figura 72).

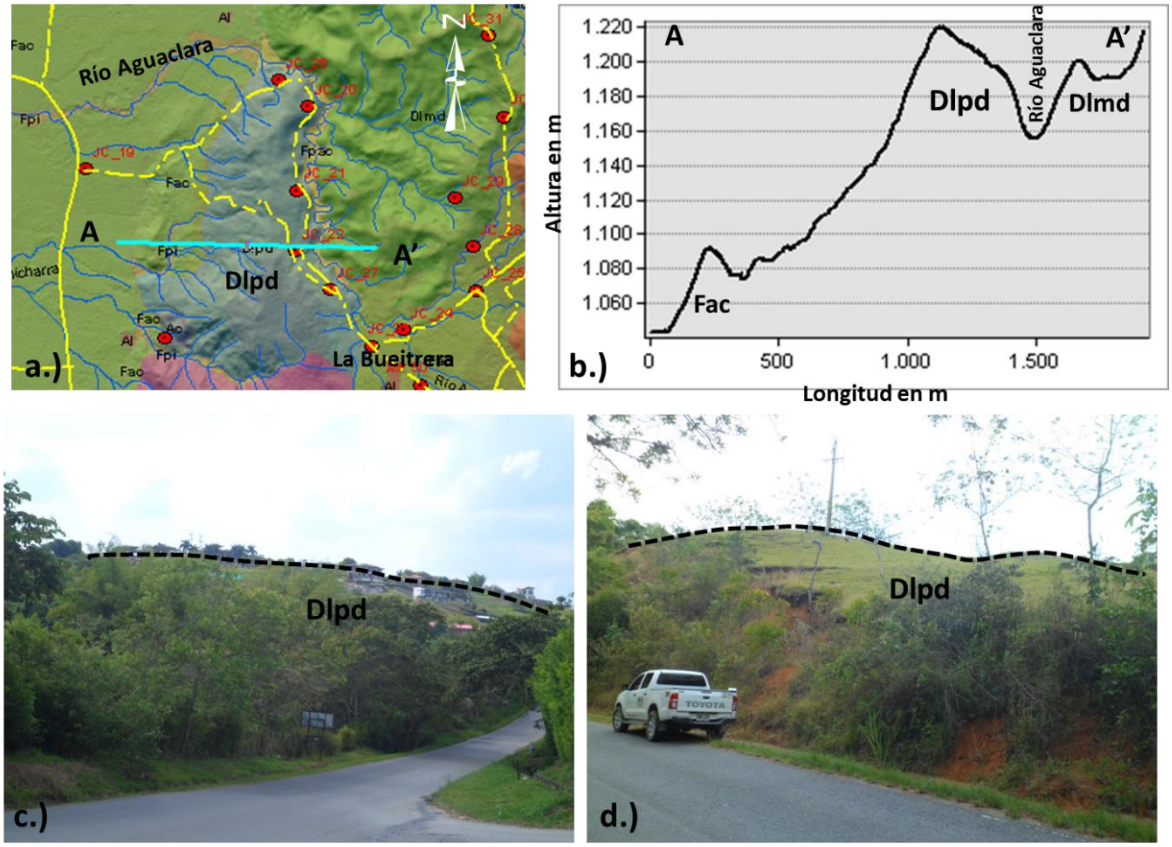


Figura 72. Lomeríos poco disectados (Dlpd).
a.) Localización Dlpd, el corregimiento de Aguaclara, (se observa línea de corte perfil y los puntos rojos representan las estaciones de campo). b.) Perfil topográfico donde se presenta el Dlpd. c.) Visual desde la estación 135 (Restaurante Colinas de La Buiterra) hacia el NWW. d.) Vista parcial del Dlpd sobre la vía que comunica del centro poblado de Aguaclara al corregimiento de Ayacucho, se observa las cimas redondeadas y en el talud de la vía el Srdcrc de color naranja

Fuente: elaboración propia

5.3.4.14 Montículos y ondulaciones denudacionales (Dmo)

Montículos y ondulaciones denudacionales (Dmo) corresponde al 0,002% del área total del municipio, con una extensión de 1,913 Has. Geoforma localizada al oriente de la cabecera municipal, sobre la margen derecha de la quebrada La Honda frente a la desembocadura de la quebrada Garrapatas. Se encuentra asociado a roca regular calidad de diorita hornbléndica (Rrcdi). Se caracteriza por ser una elevación del terreno con una altura menor a 50 m sobre su nivel base local, con un relieve tipo colina, de laderas de forma cóncava y/o convexa, de laderas inclinadas y la forma de la cresta varía de aguda a redondeada. Presenta una cobertura de pastos y rastrojos (Figura 73).

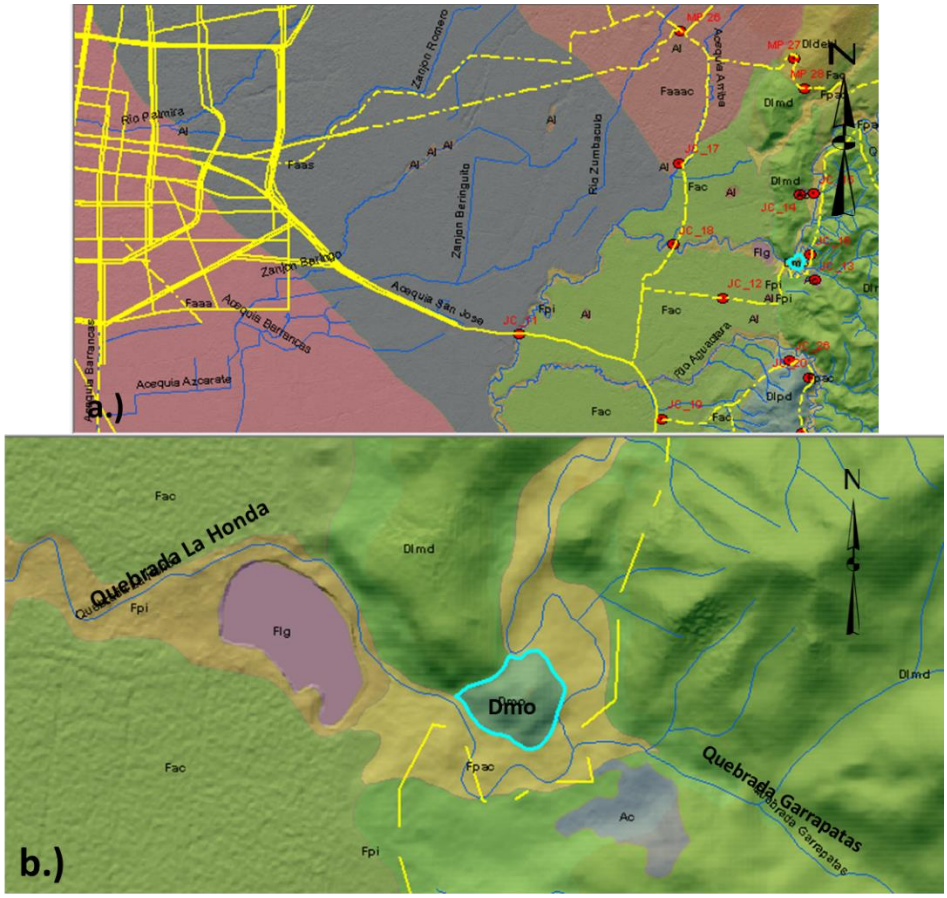


Figura 73. Montículos y ondulaciones denudacionales (Dmo).
a. Localización de la geoforma en el municipio de Palmira (oriente de la cabecera municipal). b.) Detalle geoforma, y localización sobre la margen derecha de la quebrada La Honda
Fuente: elaboración propia

5.3.4.15 Pedimentos de acumulación (Dpa)

Pedimentos de acumulación (Dpa) corresponde al 0,111 % del área total del municipio, con una extensión de 112,846 Has. Esta geoforma se localiza al norte centro del municipio, sobre la margen izquierda del río Amaime, en el corregimiento de Tablones. Se encuentra asociada al suelo transportado de pedimento de acumulación (Stpa), que corresponden a un suelo matriz soportado, con clastos desde gravas a cantos, subangulares a angulares de basalto principalmente en una matriz de fina a arena media. Se caracteriza por presentan una superficie de acumulación de longitud larga, con presencia de montículos localizados especialmente hacia el piedemonte de la cordillera donde se da el cambio de pendiente. La inclinación de la pendiente es plana a suave y su origen está relacionado con la acumulación de material desde fino a cantos, como resultado de la meteorización en las rocas ígneas y metamórficas de la cordillera y que son transportados por acción de la gravedad, viento y en menor proporción del agua (Figura 74).

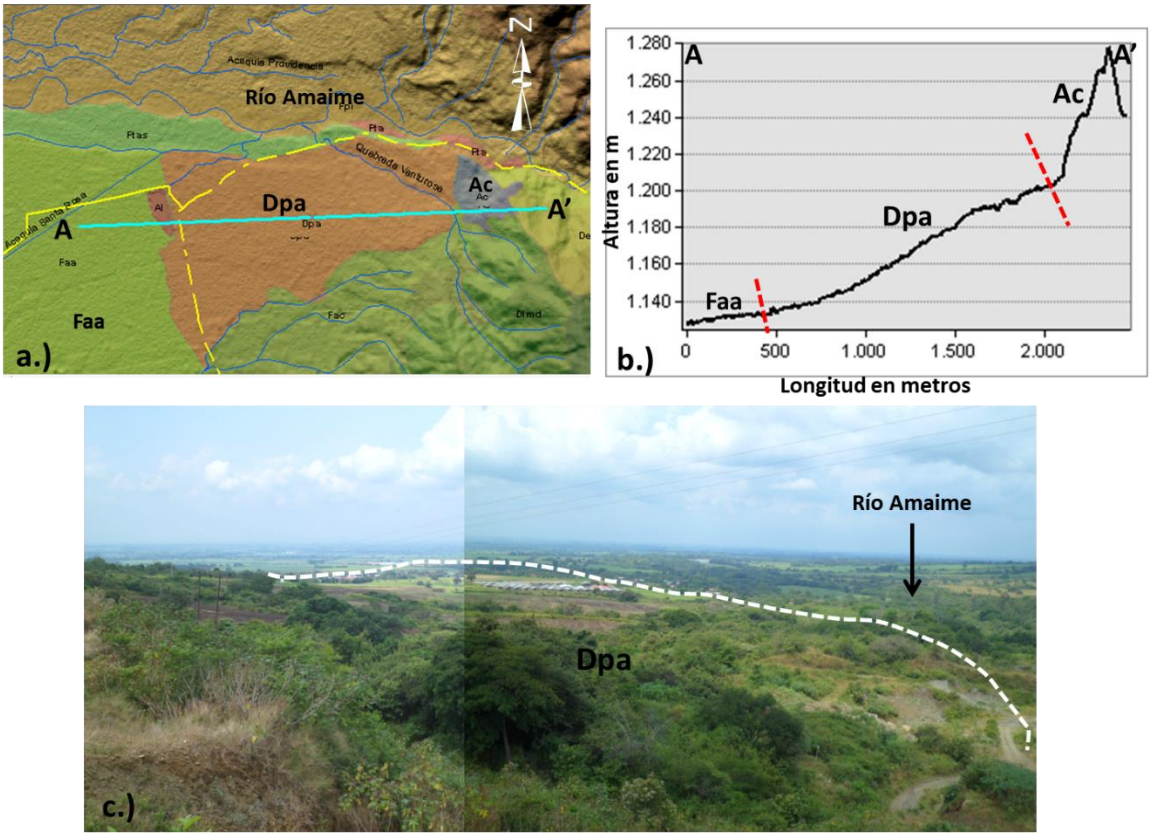


Figura 74. Pedimentos de acumulación (Dpa).
Localización de la geoforma sobre la margen izquierda del río Amaime en el corregimiento de Tablones (la línea azul marque el perfil topográfico). b.) Perfil topográfico, donde se observa la extensión de la geoforma1600m y la pendiente topográfica inferior a 5°. c.) Visual desde la cantera (estación 64) hacia el valle aluvial, la línea punteada marca aproximadamente la superficie de la geoforma

Fuente: elaboración propia

5.3.4.16 Sierra denudada (Dsd)

Sierra denudada (Dsd) corresponde al 1,061% del área total del municipio, con una extensión de 1074,892 Has. Esta geoforma se localiza en los corregimientos de La Zapata y Ayacucho, extendiéndose desde la margen izquierda del río Nima hacia el límite sur del municipio. Se encuentra asociada a roca de buena calidad de basalto de la Formación Amaime (Rbcbfa). Corresponde a una elevación topográfica de con un tipo de relieve de colina a loma, con un índice de relieve de moderado a alto; de laderas largas a muy largas, de formas rectilíneas a convexas y con una inclinación de las laderas que varían desde abrupta a escarpada (Figura 75).

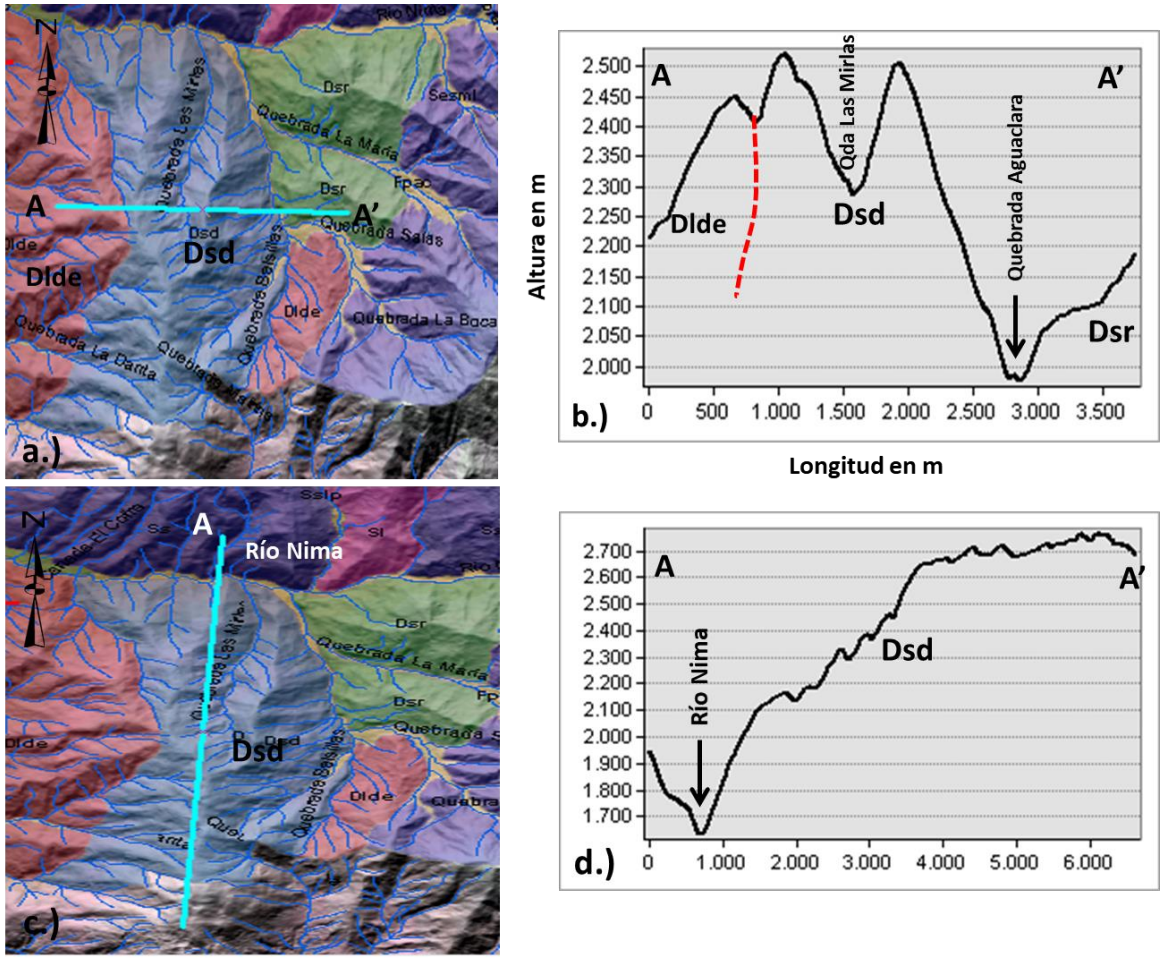


Figura 75. Sierra denudada (Dsd).
a.) Localización de la sierra denudada (línea corte perfil W-E). b.) Perfil W-E donde se observa la inclinación de las laderas (escarpadas a muy escarpadas) y sus contactos con las subunidades Dlde y Dsr. c.) Localización línea perfil N-S.d.) Perfil N-S donde se observa la longitud de la sierra denudada y la inclinación de la pendiente que en este sentido es abrupta.

Fuente: elaboración propia

5.3.4.17 Sierra residual (Dsr)

Sierra residual (Dsr) corresponde al 0,732% del área total del municipio, con una extensión de 741,866 Has. Se reconocieron para esta subunidad tres (3) geoformas; dos en el corregimiento de Ayacucho sobre la margen izquierda del río Nima y la tercera en el corregimiento de Tablones sobre la margen izquierda del río Amaime (Figura 76). Se encuentran asociadas a la roca de mala calidad de esquistos de la unidad Esquistos Básicos de Bugalagrande (Rmceebb) y roca regular calidad de basalto de la Formación Amaime (Rrcbfa).

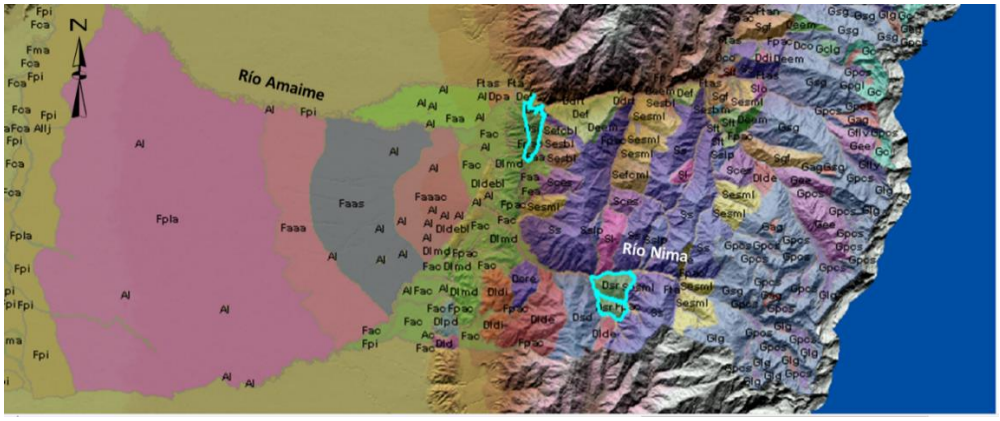


Figura 76. Localización geoformas de sierra residual (Dsr) en el municipio de Palmira.
Fuente: elaboración propia.

Esta subunidad presenta un relieve de tipo colina, con un índice de relieve de bajo a moderado; las laderas son de longitudes cortas a moderadas, de formas rectilíneas a convexas, con inclinaciones de muy abruptas a escarpadas y sus cimas presentan formas agudas a redondeadas (Figura 77). Su origen está relacionado con procesos de meteorización intensa.

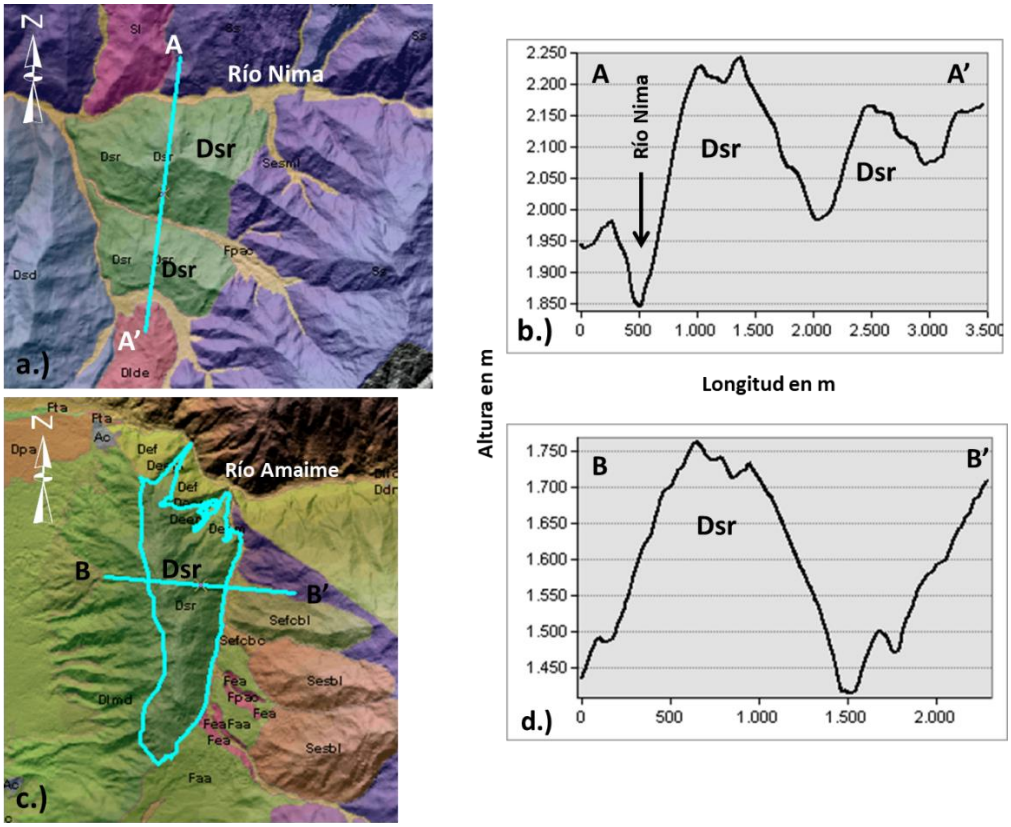


Figura 77. Sierra residual (Dsr).
a. Drs sobre la margen izquierda del río Nima (línea de corte topográfico). b.) Perfil topográfico N-S, donde se observa la inclinación de las laderas. c.) Dsr sobre la margen izquierda del río Nima (línea de corte topográfico). d.) Perfil topográfico W-E

Fuente: elaboración propia

5.3.5 Ambiente antropogénico (A)

El ambiente antropogénico representa el 0,39% del total del área de estudio, con una extensión de 386,18 Has. Se logró identificar un total de 3 subunidades; cuyas proporciones dentro del ambiente se representan en la Figura 78.

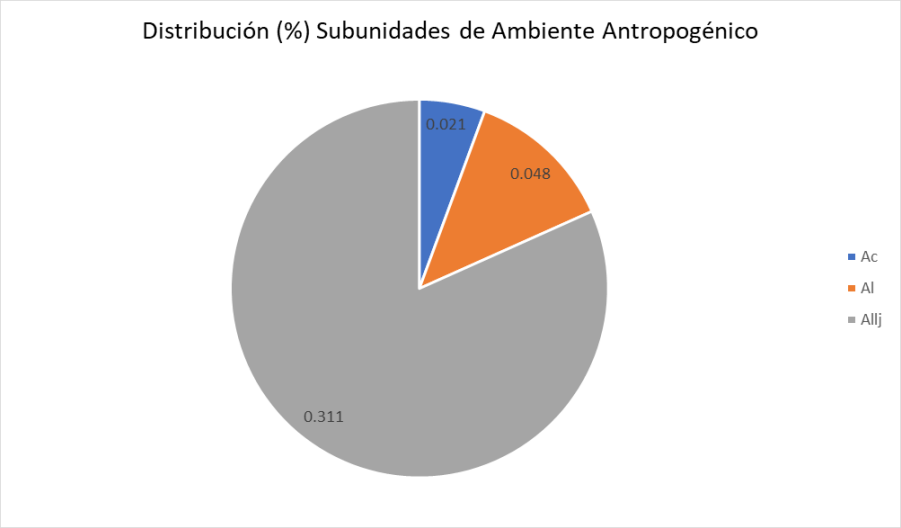


Figura 78. Elementos geomorfológicos morfoambiente antropogénico (A).
Fuente: elaboración propia

5.3.5.1 Cantera (Ac)

Cantera (Ac) corresponde al 0,021% del área total del municipio, con una extensión de 21,720 Has. Estas geoformas se encuentran distribuidas a lo largo del piedemonte occidental de la cordillera Central en los corregimientos de Aguaclara, Ayacucho, La Zapata, Potrerillo y Tablones, asociadas a roca regular calidad de diorita hornbléndica (Rrcdi), roca mala calidad de basalto de la Formación Amaime (Rrcbfa) y suelo transportado de pedimentos de acumulación (Stpa). Corresponde a las excavaciones realizadas por el hombre con el objeto de explotar las rocas y suelos asociados, para ser utilizados como base y sub base en las obras de ingeniería que se desarrollan tanto en el municipio de Palmira, como en su área de influencia. Se caracterizan por conformar taludes de inclinación escarpada a muy escarpada, de hasta 50 m de altura; sus formas son irregulares, algunas sin ningún tipo de diseño ingenieril y otras presentan terraceo o escalonamiento del terreno; que indica un método de explotación con un mayor grado de ingeniería y que contribuye con la estabilización de los taludes de los frentes abandonados (Figura 79).

Figura 79. Canteras (Ac).
a.) Cantera localizada en el corregimiento de Tablones, explota el Stpa (estación 64). b.) Cantera localizada en el corregimiento de Potrerillo, explota Rrcbfa (estación 73). c.) Cantera localizada en el corregimiento de Ayacucho, explota Rrcdcrc (estación 125). d.) Cantera localizada en el corregimiento de Aguaclara, explota Rrcdcrc (estación 175)
Fuente: elaboración propia

5.3.5.2 Lago antrópico (Al)

Lago antrópico (Al) corresponde al 0,048% del área total del municipio, con una extensión de 48,998 Has. Esta geoforma presenta una gran distribución en el municipio de Palmira, estando localizados en el valle aluvial del río Cauca y en algunas zonas de baja pendiente del piedemonte occidental de la cordillera Central. Corresponde cuerpos de agua creados por la acción del hombre para efectos de recreación, paisajismo y/o reservorios de agua para los cultivos de la caña de azúcar, presentan formas y tamaños variados (Figura 80).

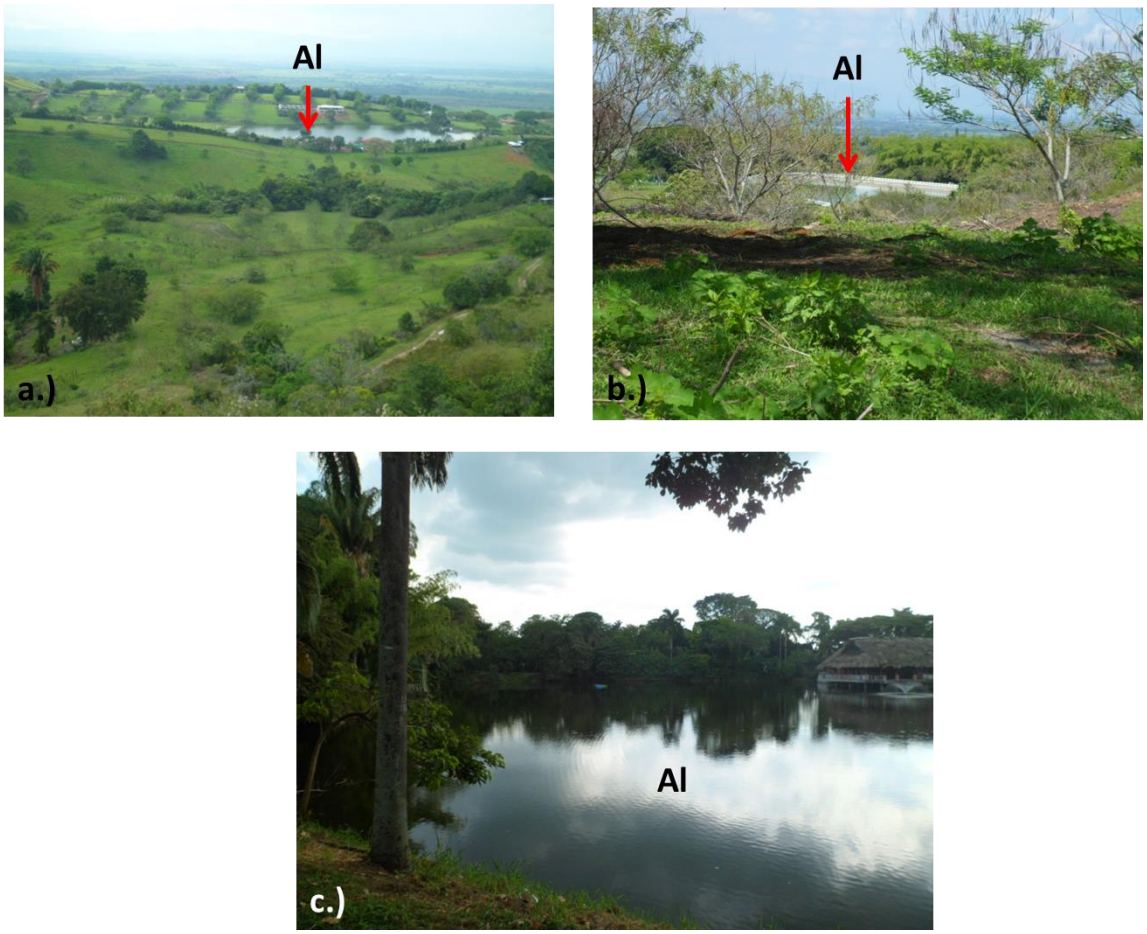


Figura 80. Lago antrópico (Al).
a.) Lago antrópico, sector Lagos de Maracaibo (estación 73). b.) Lago antrópico corregimiento de Barrancas. c.) lago antrópico Parque El Bosque, área urbana del municipio de Palmira.
Fuente: elaboración propia

5.3.5.3 Jarillón (Allj)

Jarillón (Allj) corresponde al 0,311% del área total del municipio, con una extensión de 315,467 Has. Es una barrera antrópica construida de forma paralela y/o transversal al cauce de un río para proteger las regiones de las inundaciones provocadas por el desbordamiento de una corriente hídrica y/o para represar las aguas con un fin determinado.

En la zona plana del municipio de Palmira, se han construido jarillones paralelos a ambas márgenes del cauce de los ríos Fraile, Bolo, Palmira y Guachal cercano a la confluencia de estas corrientes con el río Cauca; también se evidencia la presencia de un Jarillón paralelo a la margen derecha del río Cauca. Conforma un relieve de montículo con laderas rectilíneas de longitud muy corta, muy abruptas (20° - 30°), de variables dimensiones, con índice de relieve bajo, compuesto por suelos antrópicos, tales como, escombros, desechos de construcción, basuras que se encuentran compactadas (Figura 81).

Figura 81. Subunidad geomorfológica de Jarillón (Allj).
a). Jarillón sobre ambas márgenes del río Fraile, luego de la confluencia con el río Bolo (estación 322). b) Jarillón sobre la margen derecha del río Bolo (estación 291).

Fuente: elaboración propia

5.4 Susceptibilidad a inundación por geomorfología

El objetivo de este análisis es el de identificar las subunidades geomorfológicas, unidades geológicas superficiales y la morfodinámica, generadas a lo largo de un sistema fluvial, como resultado de los procesos erosivos y de acumulación que varían en función de su pendiente, caudal y carga de sedimentos. Cada subunidad se identifica según el material del depósito, morfogénesis, pendientes, contrastes morfológicos (rugosidad, curvatura, etc.) y cronología siendo esta última característica la que permite determinar las áreas susceptibles a inundarse según la temporalidad del proceso: reciente, subreciente o antiguo. Para ello se hizo una categorización de zonas de susceptibilidad a inundación siguiendo los criterios de la (Tabla 12).

Tabla 12. Categorización de zonas de susceptibilidad a inundación

Nivel de susceptibilidad	Criterios para su clasificación
Baja	En esta categoría se localizan las geoformas antiguas (terrazas, abanicos, cerros, etc), geoformas asociadas a procesos fluviales abandonados y de origen estructural y denudacional alejados de los cuerpos de agua (distancia y altura)
Media	Aquí se ubican las geoformas subrecientes asociadas a procesos intermitentes fluviales lentos
Alta	Corresponde principalmente a geoformas asociadas a procesos activos, recientes, al canal de movilidad de los cauces activos, llanuras o planicies de inundación, aquí representan procesos naturales, fluviales (lagos, canales, barras, terrazas, etc), antrópicos, denudacionales y estructurales cercanos a cuerpos de agua

Fuente: elaboración propia

En las labores de campo se verificaron y caracterizaron las subunidades geomorfológicas identificadas en la fase de fotointerpretación, con base en esto y a la temporalidad relativa de las mismas se desarrolla una escala cualitativa de calificación de la susceptibilidad (Tabla 13).

Tabla 13. Categorización de la susceptibilidad a inundaciones con base en las subunidades geomorfológicas identificadas

SGMF	Nombre SGMF	Área (m)	Area %	Susceptibilidad
Ac	Cantera	217.204,7934	0,0214	BAJA
Dco	Cono y lóbulo coluvial y de solifluxión	1.420.183,3346	0,1401	BAJA
Dcre	Colina remanente	3.777.587,4669	0,3727	BAJA
Ddi	Cono de deslizamiento indiferenciado	687.782,1862	0,0679	BAJA
Ddrt	Cono o lóbulo de deslizamiento rotacional	677.802,5744	0,0669	BAJA
Ddtr	Cono o lóbulo de deslizamiento traslacional	377.547,1434	0,0373	BAJA
Deem	Escarpe de erosión mayor	5.101.806,3117	0,5034	BAJA
Def	Escarpe faceteado	10.063.834,5712	0,9930	BAJA
Dld	Loma denudada	1.207.655,1847	0,1192	BAJA
Dlde	Lomo denudado	14.700.246,0886	1,4504	BAJA
Dldebl	Lomo denudado bajo de longitud larga	3.248.110,7775	0,3205	BAJA
Dldi	Lomerios disectados	6.877.303,0116	0,6786	BAJA
Dlmd	Lomerios muy disectados	18.030.246,5621	1,7790	BAJA
Dlpd	Lomerios poco disectados	2.181.069,4636	0,2152	BAJA
Dmo	Monticulos y ondulaciones denudacionales	19.129,2640	0,0019	BAJA
Dpa	Pedimentos de acumulación	1.128.456,8358	0,1113	BAJA
Dsd	Sierra denudada	10.748.916,0285	1,0605	BAJA
Dsr	Sierra residual	7.418.663,2885	0,7320	BAJA
Fea	Escarpe abanico aluvial	430.917,4418	0,0425	BAJA
Ftaean	Escarpe de terraza de acumulación antigua	1.003.247,1620	0,0990	BAJA
Ftan	Terraza de acumulación antigua	1.691.673,2802	0,1669	BAJA
Gc	Circo glacial y de nivación	13.871.222,8286	1,3686	BAJA
Gclg	Cono y lóbulo de gelifracción	1.261.212,9252	0,1244	BAJA
Gee	Espolón estructural glaciado	15.997.652,2581	1,5784	BAJA
Geg	Espinazo glaciado	927.035,2128	0,0915	BAJA
Gflv	Flanco de valle glaciar	5.246.470,9197	0,5176	BAJA
Gsg	Sierra glaciada	125.007.144,0853	12,3339	BAJA
Sces	Colina estructural	10.381.648,8520	1,0243	BAJA
Sefcbc	Espolón facetado bajo de longitud corta	85.015,5938	0,0084	BAJA
Sefcbl	Espolón facetado bajo de longitud larga	964.899,7830	0,0952	BAJA
Sefcml	Espolón facetado moderado de longitud larga	6.548.517,1592	0,6461	BAJA
Sesbl	Espolón bajo de longitud larga	4.664.892,7553	0,4603	BAJA
Sesbm	Espolón bajo de longitud media	615.123,0566	0,0607	BAJA
Sesml	Espolón moderado de longitud larga	25.512.076,4332	2,5172	BAJA
Sft	Faceta triangular	2.396.217,4895	0,2364	BAJA
Sgf	Gancho de flexión	12.899.221,4558	1,2727	BAJA
Sl	Lomo	5.859.295,2693	0,5781	BAJA
Slf	Lomo de falla	2.914.940,1272	0,2876	BAJA

SGMF	Nombre SGMF	Área (m)	Area %	Susceptibilidad
Slfe	Escarpe de línea de Falla	2.073.287,8450	0,2046	BAJA
Slo	Lomo de obturación	820.931,5852	0,0810	BAJA
Ss	Sierra	89.057.677,3394	8,7869	BAJA
Sslp	Sierra y lomo de presión	5.048.160,4050	0,4981	BAJA
Allj	Jarillón	3.154.668,3300	0,3113	MEDIA
Faa	Abanico aluvial	19.578.261,7514	1,9317	MEDIA
Faaa	Abanico aluvial antiguo	43.486.031,9852	4,2906	MEDIA
Faaac	Abanico aluvial actual	23.191.463,4763	2,2882	MEDIA
Faas	Abanico aluvial subreciente	54.461.734,4566	5,3735	MEDIA
Fac	Abanico aluvial coalescente	35.776.813,3999	3,5299	MEDIA
Fpla	Planicie y delta lacustre	266.263.970,8520	26,2710	MEDIA
Fta	Terraza de acumulación	466.066,6451	0,0460	MEDIA
Ftae	Escarpe de terraza de acumulación	20.898,3106	0,0021	MEDIA
Ftaes	Escarpe de terraza de acumulación subreciente	242.426,0333	0,0239	MEDIA
Ftas	Terraza de acumulación subreciente	2.238.831,5163	0,2209	MEDIA
Gag	Artesa glacial	4.153.424,1185	0,4098	MEDIA
Gpcs	Planos y conos de sobrelavado glaciar	18.881.053,5236	1,8629	MEDIA
Gpgl	Plano glaciolacustre	855.395,6229	0,0844	MEDIA
Al	Lago antrópico	489.984,4014	0,0483	ALTA
Fca	Cauce activo	3.253.951,8661	0,3211	ALTA
Flg	Lago	39.652,2934	0,0039	ALTA
Fma	Meandro abandonado	866.733,5601	0,0855	ALTA
Fpac	Planicie aluvial confinada	10.031.471,5641	0,9898	ALTA
Fpi	Planicie de inundación	101.605.394,3341	10,0249	ALTA
Glg	Laguna glaciar	1.307.346,2522	0,1290	ALTA

Fuente: elaboración propia

Con en análisis obtenido de la tabla anterior (Tabla 13) más el criterio experto se obtiene el mapa de Zonificación de Susceptibilidad a Inundaciones a escala 1:25000 (Figura 82). Para la elaboración del mapa de zonificación de susceptibilidad a inundación por geomorfología, se realizó un filtro para redefinir la clasificación de la susceptibilidad, teniendo en cuenta la edad relativa de la geoforma, la distribución espacial y la distancia de las unidades geomorfológicas respecto a los cauces y otros criterios obtenidos en campo.

La delimitación de la llanura o planicie de inundación del río Cauca (Fpi) la cual se encuentra de forma paralela al río Cauca, se definió teniendo en cuenta la envolvente de los periodos de inundación del río Cauca desde el año 1950 al 2011 consultados y descargado del portal avanzado de datos geográficos de la CVC - GEOCVC.

Las zonas de llanura o planicie de inundación se encuentran dentro de las zonas con susceptibilidad a inundación por geomorfología alta, por lo tanto, se representa en el mapa de con color rojo.

Por su parte, es importante mencionar que para el sector correspondiente al corredor del río Cauca, se emplearon los resultados de la zonificación de amenaza por inundación del proyecto Corredor de Conservación y Uso Sostenible del Río Cauca, información que fue suministrada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC a la Dirección de Gestión del Riesgo de Desastres - DGRD del municipio de Palmira mediante radicado CVC 0611-966812021 del 07 de marzo de 2022.

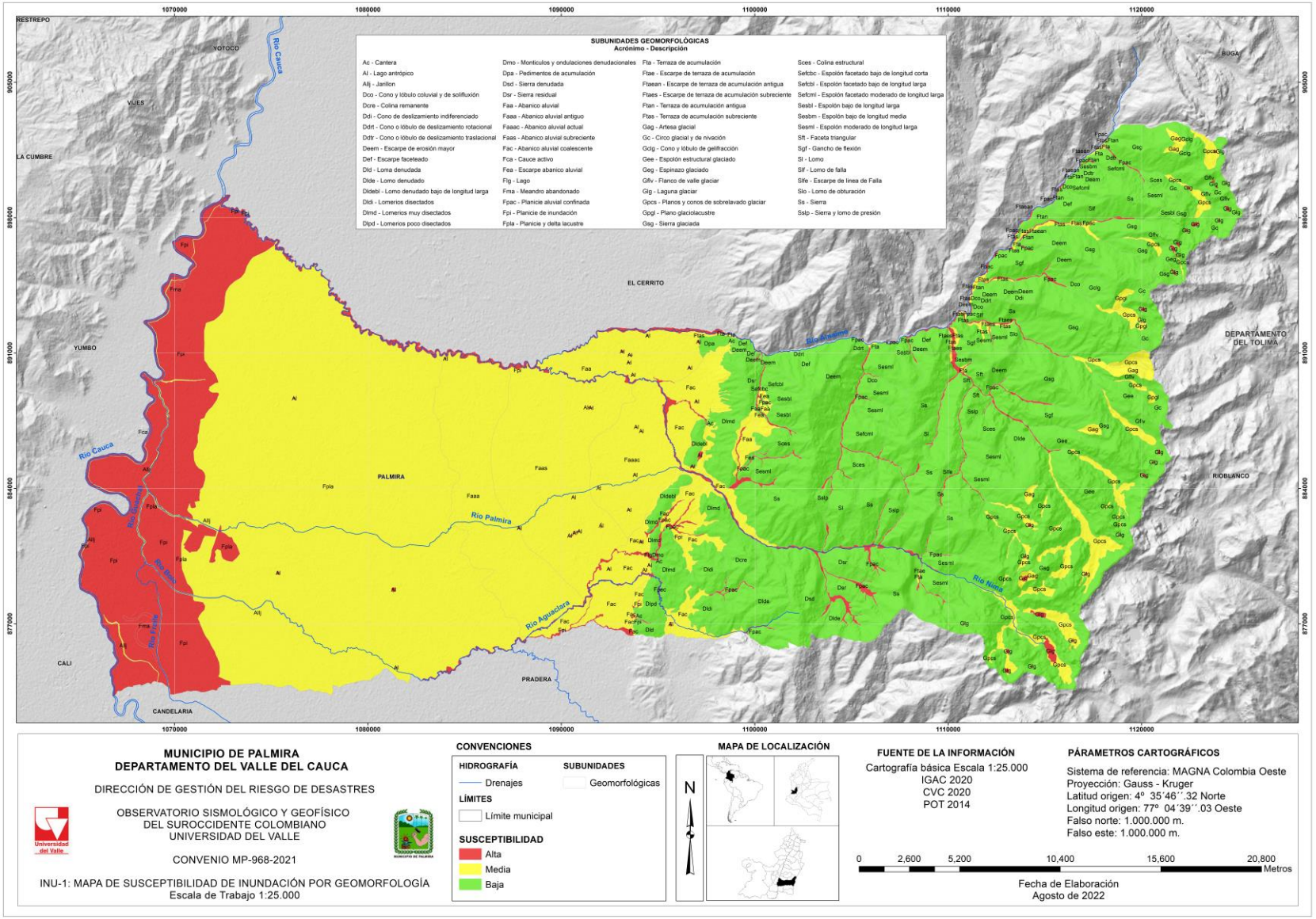


Figura 82. Zonificación de susceptibilidad de inundación por geomorfología
Fuente: elaboración propia.

El área total de estudio corresponde a 101.352,7600 ha de los cuales 11.759,4534 ha presentan una susceptibilidad alta, mientras que 47.277,1040 ha una susceptibilidad media y finalmente, 42316,2026 ha una susceptibilidad Baja (Tabla 14) (Figura 83).

Tabla 14. Distribución por área y porcentaje de la zonificación de susceptibilidad geomorfológica a inundación en el municipio de Palmira

Susceptibilidad	Área %	Área (Has)
ALTA	11,6025	11.759,4534
MEDIA	46,6461	47.277,1040
BAJA	41,7514	42.316,2026
TOTAL	100,0000	101.352,7600

Fuente: elaboración propia

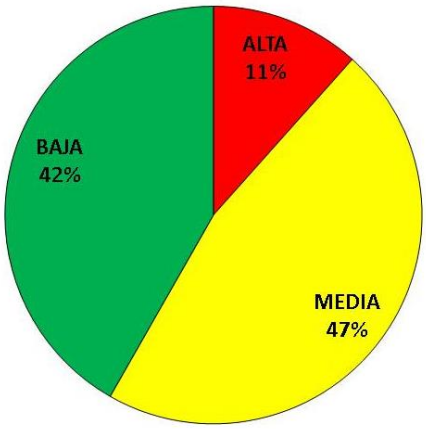


Figura 83. Distribución porcentual de la susceptibilidad por inundaciones en el área de estudio.
Fuente: elaboración propia

5.4.1 Susceptibilidad alta

Las zonas de susceptibilidad alta están representadas en color rojo ocupando un 11,6025 % del área total de estudio y se encuentra distribuida por todo el municipio, relacionada principalmente con los diferentes cuerpos de agua (lagos), ríos y quebradas. Dentro de la zonificación de susceptibilidad se identificó geoformas de tres (3) ambientes morfogenéticos: antrópico (A) y fluvial (F) y glacial (G).

Para el caso de los ambientes antrópicos está asociada a los lagos antrópicos (Al), que han sido construidos como reservorios de agua para los cultivos de caña de azúcar o para actividades recreativas y que normalmente son alimentados por corrientes naturales o canales artificiales construidos para conducir el agua hacia dichos cuerpos de agua.

Las geoformas relacionadas con el ambiente fluvial (F) corresponden a: las llanuras de inundación (Fpi); destacándose la del río Cauca localizada al occidente del municipio, la cual se presenta como una franja alargada de dirección sur-norte y con extensiones cercanas a los 5 Km hacia el oriente del río, donde se encuentran los meandros abandonados (Fma). Le siguen en importancia

las llanuras aluviales de los ríos Amaime, Nima, Aguaclara, Bolo y Frayle. Otras geoformas asociadas a la zonificación de susceptibilidad alta son los lagos naturales (Flg) y las lagunas glaciares (Glg) por ser cuerpos con presencia permanente de agua, cuyos niveles pueden variar. A nivel intramontano se encuentran las planicies de inundación confinadas (Fplac), las cuales corresponden a superficies planas a levemente inclinadas, estrechas que corresponden a los valles aluviales de las diferentes corrientes hídricas que conforman el municipio y que dadas sus características topográficas son superficies susceptibles a inundación por desborde de la corriente hídrica.

La categoría de susceptibilidad alta corresponde en gran parte a unidades geológicas superficiales de suelos transportados de llanura de inundación (Stpi); los cuales son depósitos de origen aluvial localizados en las llanuras de inundación de los drenajes, su mayor extensión se encuentra en la llanura aluvial del Río Cauca, cuyos suelos están conformados por intercalaciones de arenas cuarzosas con óxidos de hierro y laminación plana, arcillas y lentes de gravas, en espesores de entre 3,00 y 5,00 m.

5.4.2 Susceptibilidad media

Las zonas con susceptibilidad media están representadas con color amarillo y cubren el 46,6461% del total del área del municipio de Palmira. Dentro de la zonificación de susceptibilidad media a inundación se encuentran geoformas de tres ambientes morfogenéticos: antrópico (A), fluvial (F) y glacial (G).

Para el ambiente antrópico (A) se relaciona los jarillones (Allj); que corresponden a las geoformas diseñadas por el hombre mediante la acumulación de material seleccionado (arena, arcilla, grava y bloques), dispuesto de manera paralela a algunos de los cauces de los ríos principales: Cauca, Bolo, Frayle y Palmira; de formas trapezoidales, alcanzando los 10 m a la base, 6 m de altura y 5 m en la parte superior. Estas geoformas dispuestas sobre las llanuras de inundación pueden ser prácticamente cubiertas por el agua y en ocasionalmente ser desbordadas, dependiendo de la intensidad de las lluvias y de las crecientes de las corrientes hídricas.

Para el ambiente fluvial (F) se identificaron todas las geoformas relacionadas con los abanicos aluviales: Faa, Fac, Faaa, Faaac, Faas; por corresponder a geoformas planas a levemente inclinadas, íntimamente relacionadas con los procesos de divagación de los cauces que las cortan. Al occidente del piedemonte oriental de la cordillera Central, se presenta la mayor concentración de abanicos aluviales, cuyas edades relativas se incrementan hacia el occidente y su pendiente disminuye, incrementando las superficies susceptibles a inundarse, si se tiene en cuenta la gran cantidad de corrientes hídricas naturales y antrópicas que las atraviesan y a la fuerte intervención antrópica a la que han sido sometidos.

Se reconoce además las terrazas aluviales (Fta) y terrazas de acumulación subrecientes (Ftas), por encontrarse próximas a las planicies de inundación y/o planicies aluviales confinadas;

caracterizadas por su poca diferencia de cota con estas, lo que las hacen susceptibles de inundarse durante una creciente de la corriente hídrica adyacente.

Finalmente, dentro del ambiente fluvial (F) se destaca la planicie y delta lacustre (Fpla) como una de las zonas más extensas dentro de la zonificación de susceptibilidad media. Corresponde a una superficie localizada entre el abanico aluvial antiguo (Faaa) y la planicie de inundación (Fpi) del río Cauca, presenta una inclinación de ladera plana (0°- 5°); con formas de la ladera irregulares, favoreciendo la conformación de superficies levemente más altas (cóncavas) y otras más bajas (convexas) facilitando la generación de zonas pantanosas por la acumulación de aguas lluvias o donde se represa el agua que se desborda de las corrientes hídricas próximas.

Con relación al ambiente glaciar (G), se dé la categoría de susceptibilidad media a las artesas (Gag), Planos y conos de sobrelavado glaciar (Gpcs) y los planos glaciolacustres (Gpgl); por ser superficies planas a inclinadas, por donde circulan corrientes hídricas que generalmente son alimentadas por las lagunas glaciares (Glg) y que en épocas invernales pueden llegar a inundar estas superficies.

Las zonas con categoría de susceptibilidad media están conformadas por unidades geológicas de superficie (UGS) representadas por intercalaciones de material de tamaño de grano arcilla a limo, interestratificado con capas de arena que varían en su tamaño de grano desde fino a grava e incluso bloques, de baja compactación y con presencia de basalto, esquisto, cuarcitas, gabros, migmatitas y cuarzodioritas que hacen parte del suelo transportado de abanico aluvial (Staa), de suelo transportado de terraza de acumulación (Stta) y suelo transportado de planicie y delta lacustre (Stpla).

5.4.3 Susceptibilidad baja

Las zonas con susceptibilidad baja están representadas con color verde y cubren el 41,7514 % del total del área del municipio de Palmira. Dentro de la zonificación de susceptibilidad media a inundación se encuentran geoformas relacionadas con los ambientes antrópico (A), fluvial (F), denudacional (D), estructural (S) y glacial (S).

Para el ambiente antrópico (A), de identifica la cantera (Ac) por corresponder a una geoforma desarrollada en la zona de montaña, lejana a las corrientes hídricas y con formación de taludes muy inclinados a muy escarpados.

En el ambiente fluvial (F), se encuentran la terraza de acumulación antigua (Ftan), el escarpe de terraza de acumulación antigua (Ftaean) y el escarpe de abanico aluvial (Fea). Son geoformas que topográficamente más altas, relativamente alejadas de las corrientes hídricas y por lo tanto presentan una baja susceptibilidad a inundación.

En cuanto a las geoformas de los ambientes denudacional (D), estructural (S) y glaciar (G), se encuentran localizadas entre el piedemonte oriental de la cordillera Central y su cima localizada

hacia el límite oriental del municipio. Son geoformas cuyo relieve varía desde loma (50 – 200 m) hasta montañoso (> 500 m), con crestas de formas redondeadas a agudas, las laderas son desde rectas a irregulares y con pendientes desde muy inclinadas (10° - 15°) hasta muy abruptas (> 45°); lo que las hace poco susceptibles a inundarse.

Las zonas con categoría de susceptibilidad baja están conformadas por unidades geológicas de superficie (UGS) representadas por suelos transportados de terraza de acumulación antigua (Sttan), hasta roca de buena a mala calidad de basalto de la Formación Amaime, las rocas metamórficas (esquistos, anfibolita, metagabro) que conforman los Esquistos de Bugalagrande, las Anfibolitas de Rosario, los Metagabroides de Bolo Azul y los esquistos del Grupo Cajamarca y las rocas ígneas de cuerpos intrusivos (cuarzodioritas).

5.5 Reconstrucción histórica de espejos de agua por inundaciones

A continuación, se muestra el trabajo de campo realizado en el municipio de Palmira, en conjunto con líderes de la zona y personal de DGRD. Los anexos del Estudio de Historicidad permiten ver las encuestas realizadas.

5.5.1 Corregimiento de La Dolores

El corregimiento de La Dolores, está localizado sobre la margen derecha del río Cauca, separado del mismo por un jarillón al cauce, con la intención de mitigar las inundaciones asociadas a la dinámica propia del río. Es colindante a la doble calzada del Cali- Palmira.

Es uno de los corregimientos que mayormente se vio afectado por la temporada invernal 2010-2011, sobre todo en su zona rural, según los entrevistados, re afirmando la información obtenida en el presente estudio.

El trabajo se pudo hacer tanto en la cabecera corregimental con el señor Rosero y la vereda Piles, con el líder Leónidas Murillo. Para la zona de la cabecera, el líder Rosero comentó que se presentan encharcamientos por lluvias, por no tener un adecuado sistema de alcantarillado y por el pésimo estado de las vías. El señor acota, que recuerda las temporadas invernales del año 1999 y el período 2010-2011, que afectaron toda la zona rural del corregimiento, pero hace énfasis en la temporada invernal del 2010-211, fue la que más temió; para el año 2011, no recuerda día y mes exacto, pero el río Cauca fisuró el dique y el agua empezó a ingresar por los cañaduzales en comunidad trabajaron noche y día, para que con sacos de arena taponaran dicha fisura y evitar que ingresara por la vía (Figura 84).

Figura 84. Sitio donde rompió el dique el río Cauca año 2011 en la cabecera del corregimiento de La Dolores.
Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, en la vereda Piles, la entrevista al señor Leónidas permitió entender un poco lo sucedido en la zona rural del corregimiento de La Dolores. Él fue enfático en que su mayor recuerdo de espejos de agua, que duraron meses para volver a labrar la tierra y transitar, fueron producto de la temporada invernal 2010-2011. Tiene presente dos fechas importantes de ese periodo, el 16 de diciembre del 2010 y 21 de abril del 2011.

La inundación del 2010 que afectó a la vereda, realmente inició el 11 de diciembre, en palabras del señor Leónidas: “manos ajenas a la comunidad, dinamitaron el dique a la altura del río Fraile”, creando un boquete donde el agua salía a una gran velocidad, inundando los cañaduzales en menos de 4 días y a las 3:00 am del día 16 de diciembre el agua entró a la vereda Piles, de a las 9:00 a.m. el agua ya alcanzaba, los 2.54 metros de altura, de color turbio turbia y acompañada de hojarasca, animales rastreros y anfibios. Para salir de la zona usaron canoas y se localizaron en partes mientras que la inundación del 21 de abril del 2011, el dique se fisuró por la presión del agua que venía ejerciendo el río a la altura de Cachiporras, indicó el líder Leónidas, hizo estragos, y el agua demoró en secar en su predio más de 25 días.

El resultado del trabajo con los líderes anteriormente mencionados quedó plasmado en las Figura 85 donde se evidencia el trabajo cartográfico social en ambas zonas.

En la Figura 86 (HIS-4), se muestra el resultado del trabajo realizado con los señores Rosero y Leónidas. Se tiene un polígono achurado rosa corresponde a las inundaciones del periodo

invernal 2010-2011, que afectó gran porcentaje de la zona rural, incluyendo su zona veredal Piles, los cuadros amarillos corresponden a los diques de sacos de arena que hizo la comunidad para evitar el ingreso del agua a la cabecera, el triángulo café corresponde a la fisura que hizo el río Cauca sobre el dique y el rectángulo de color rojo, es el punto que nos indicaron del punto donde se dinamitó el dique.

Figura 85. Recolección de espejos de agua en el corregimiento de la Dolores
a)trabajo con el señor Rosero; la imágenes b,c y d, es el trabajo en casa del señor Leonidas.
Fuente: elaboración propia.

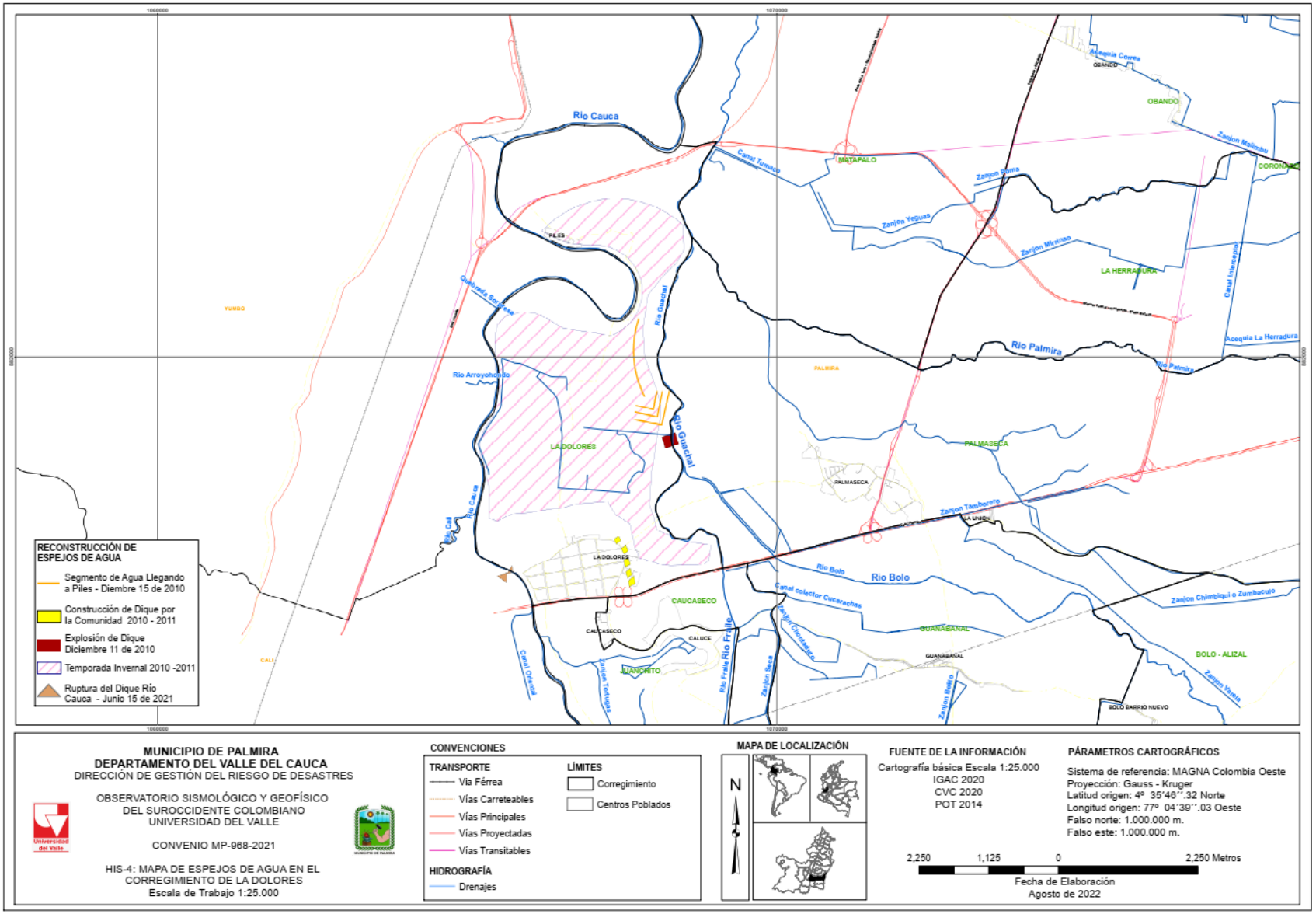


Figura 86. Espejos de agua corregimiento de La Dolores en el municipio de Palmira (HIS-4).
Fuente: elaboración propia.

5.5.2 Corregimiento de Guayabal, sector Callejón de Los Roa, afectaciones por el río Palmira

El corregimiento de Guayabal está localizado al centro dirección oriente del municipio. El sector Callejón de Los Roa, queda a orillas del río Palmira, su ingreso es en dirección derecha del Colegio Bilingüe San José Campestre. Dicho sector, se ha visto afectado varias veces por inundaciones por desbordamiento del río Palmira y por reflujo de la tubería de aguas residuales del sector que desemboca al rio. En la Figura 87 se muestra la localización del Callejón Los Roa.

Figura 87. Localización del sector Callejón de Los Roa.
Fuente: Google Maps, 2021.

En el Callejón Los Roa, todos son de alguna manera familia, se asentaron en el sector producto de una herencia familiar. Según lo manifestado por los entrevistados, el río años atrás tenía otro trazado (Figura 88), y con el ánimo de ganarle terreno al río, rellenaron con residuos de materiales de construcción, cambiando el movimiento natural hacia la izquierda, para ellos construir a la margen derecha hasta el borde del río, ignorando la magnitud del problema que les acarrearía ocupar la franja forestal protectora y el área de desborde propio del río.

Figura 88. Trazo donde antiguamente pasaba el río Palmira en Guayabal.
Fuente: elaboración propia.

La Figura 89 muestra imágenes del sector utilizando una imagen de Google Maps y una obtenida en campo por el grupo técnico de la DGRD del sector, donde se resalta el cambio del sector durante estos últimos años. Lo que se ha pudo evidenciar en la zona, la margen derecha del río, donde ellos se localizan está siendo socavada por el río, se ven afectadas las viviendas de la parte baja que además presentan inundaciones cada que aumenta el nivel del río ante cualquier lluvia de más de 1 hora seguida, dicho por una de las habitantes.

Las viviendas del sector se ven afectadas por reflujo de las aguas en sus sistemas sanitarios, cada lluvia fuerte. Debido a que no poseen un alcantarillado adecuado y el que poseen fue hecho por ellos y no cuenta con las medidas técnicas necesarias, además la boca de desagüe está dentro del predio de la señora Ingrid, donde habitan tres familias con menores de edad y un adulto mayor (Figura 90).

Figura 89. Sector Callejón de Los Roa, corregimiento Guayabal.
A. Imagen del 2013, Callejón de Los Roa. Margen derecha del río sin vegetación, al fondo cultivo de caño
B. Imagen tomada desde la margen izquierda del río Palmira, el 4-10-2021. Se puede observar plantas semabradas por la comunidad, escombros y un paso improvisado
Fuente: Google Maps, 2013 y DGRD Palmira, 2021.

Figura 90. Zona de descarga del tubo de aguas residuales de la comunidad, localizada dentro del predio de la señora Ingrid Roa.
Fuente: elaboración propia.

Los habitantes entrevistados recuerdan que cada temporada de lluvias, se ven afectados por inundaciones lentas[1] generadas por el río Palmira. Pero se tienen dos fechas importantes por inundaciones donde se han visto gravemente involucrados. La primera inundación fue para el año 2004, no tienen fecha exacta, donde la inundación los tomó por la madrugada, llegaba a la altura de la puerta de las casas parte baja del sector, el agua entró a una alta velocidad con olor fétido debido a la mezcla de aguas residuales del mismo barrio y tenía una tonalidad de color tierra; dejando perdida de enseres y basura de los cañales a su paso. Seguido de la inundación del 2017, quien una de las afectadas, la señora Ingrid, dice que el agua entró con mayor velocidad, se llevó un árbol frondoso que tenían al inicio del corredor vegetal sembrado por ellos, parte de la pared de la vivienda, pérdida total de enseres en las casas[2] que están al borde de la berma.

El 15 de junio del presente año también desbordó producto de las fuertes lluvias que tuvieron lugar desde la noche del 14 de junio, el agua subió a la altura de la base del lavadero de la casa de la señora Ingrid Roa, también la inundación llegó a la zona de atrás del barrio, donde se ubicará un colector de agua residual que conectará a la PTAR, dejando a su paso barro y material de los cañaduzales.

Ahondan en algo importante para ellos que les ha causado los últimos meses graves afectaciones y es la realización del colector de aguas residuales de la PTAR en el predio del al lado, dado que

[1] Teniendo en cuenta el mapa A6c- áreas de afectación por inundación y deslizamientos asociados al fenómeno de la niña 2010-2011" del (POT, 2014), se pudo observar que el corregimiento de Guayabal ha sido afectado por inundaciones lentas, confirmando lo relatado por la comunidad.

[2] La vivienda de la señora Ingrid, la cual se encuentra más cercana al rio, fue construida hace aproximadamente tres meses en material de barro, ladrillos y guaduas debido a que no cuentan con recursos económicos para vivir en otro lugar, y su madre le dio ese lugar para que viviera.

enfatizan que han modificado su trazado inicial, en zigzag y cada vez más cerca al borde del río, agravando su situación de riesgo, sumado a ellos la tubería que han utilizado en algunos de los puntos principales, no es la adecuada, se puede evidenciar en la imágenes (Figura 91) que las zanjas de excavación siempre tienen agua debido al nivel freático, es un criaderos de moscos y además el suelo se está fracturando, ellos rellenan pero a los días aparecen de nuevo las grietas.

La comunidad se ha unido, y no dejarán que se hagan más zanjas para el colector sanitario de la PTAR, piden que se haga una evaluación por las autoridades pertinentes, porque está cerca al borde del rio y su trazado no es adecuada, porque donde sea realice infraestructura quedaría expuesta a inundación y socavación causadas por crecientes del río Palmira.

En la Figura 92, se detalla imágenes del paso del río Palmira en el sector, además la evidencia de procesos erosivos en la bancada.

Por otro lado, el polígono de espejo de agua se da en esta zona cerca al Orlidia, a la margen derecha del río Palmira, en esta zona no hay viviendas expuestas, solo patios, informó la comunidad (Figura 94) (HIS-2).

Figura 91. Zanjas de colector sanitario PTAR, predio al lado derecho del Sector de Los Roa.
Las imágenes A y C, son en la actualidad las franjas del colector sanitario para la PTAR. La imagen B, corresponde a una de las zanjas de las tuberías tomadas por un funcionario de la DGRD en la visita del 4 de octubre del 2021.
Fuente: elaboración propia.

Figura 92. Paso del río Palmira por el sector.
Fuente: elaboración propia.

Figura 93. Trabajo con comunidad del sector Callejón de Los Roa.
Fuente: elaboración propia.

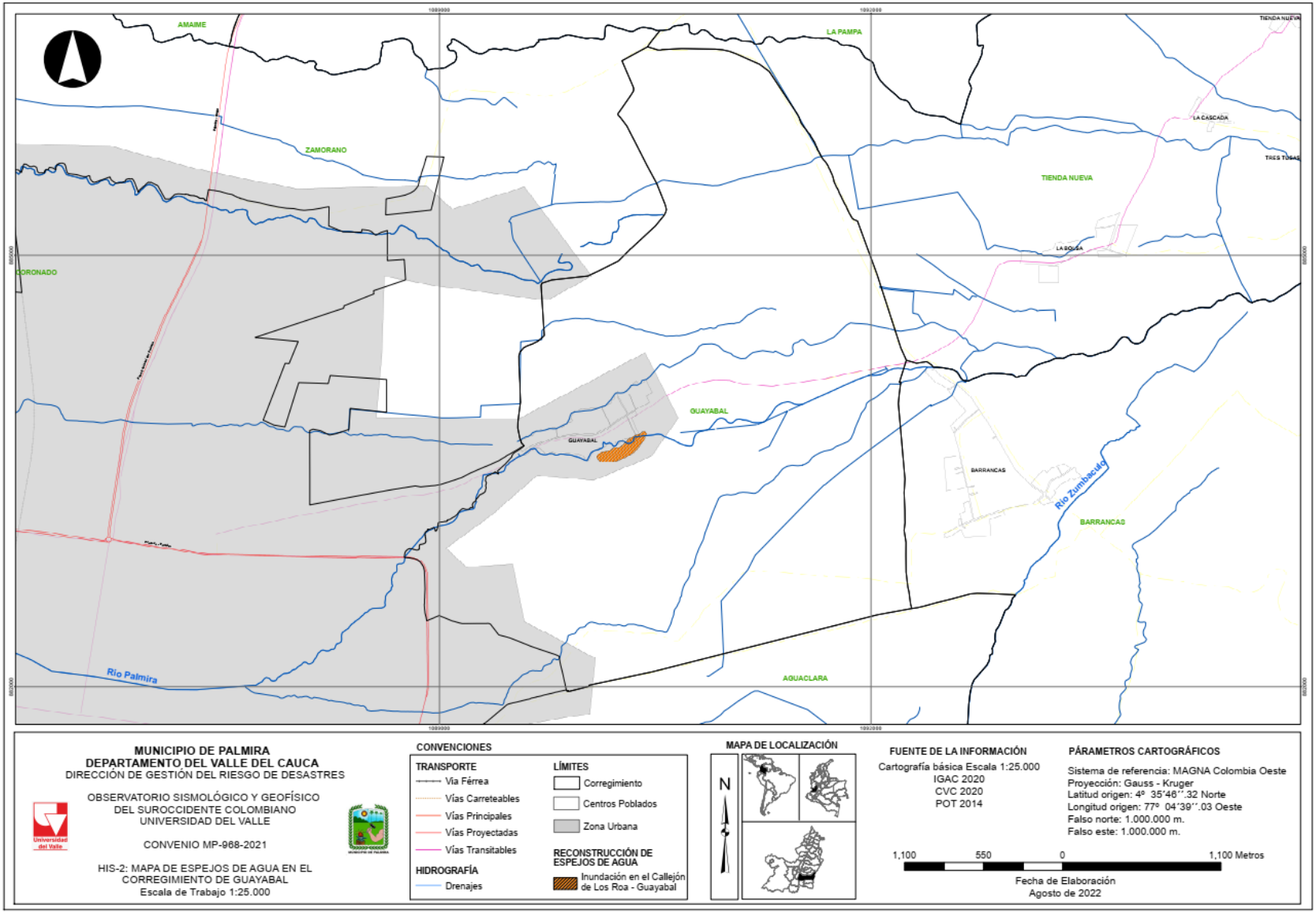


Figura 94. Espejos de agua en el corregimiento de Guayabal, municipio de Palmira (HIS-2).
Fuente: elaboración propia.

5.5.3 Corregimiento de Aguaclara

El corregimiento de Aguaclara se encuentra localizado al suroriente de la cabecera municipal de Palmira, sobre la vía que de este municipio conduce al vecino municipio de Pradera.

En el corregimiento de AguaClara, estuvimos junto a la comunidad que se ha visto afectada por el río Agua Clara en repetidas ocasiones. Pero según relatos de los entrevistados, en su memoria tienen la inundación del 20 de enero de 1997 que afectó los locales comerciales de la zona, como El Estadero Los Cines, y los balnearios a la orilla del río, además la vía quedo intransitable por lo que no hubo paso para el municipio de Pradera por más de tres días. También recuerdan bien la reciente inundación que fue el 15 de junio del 2021, que entró con furia a las casas que están cerca al río, se llevó animales y productos de pan coger (Figura 95).

Los entrevistados comentaron que el río crece pero que no alcanzaba los niveles ni la velocidad de desbordamiento de los últimos años, y le adjudican el problema a la alta sedimentación del río sumado a la obra hidráulica privada que le han hecho al río después del puente vial, la consideran su mayor amenaza para el rio, porque no le permite su flujo normal. Aunque hay que recalcar el trabajo que ha realizado la DGRD-Palmira en descolmatar el río, evito una mayor afectación en la inundación del 15-06-2021, pero que si no se hace un proceso continuo de degrado y el retoro de la obra sobre el río Aguaclara, pues las afectaciones por inundación en cabecera pueden aumentar con el paso del tiempo (Figura 96).

Las Figura 97 y Figura 98 muestran el trabajo con la comunidad y el resultado de los polígonos de espejos que a su percepción quedan después del desborde del río Aguaclara (HIS-3).

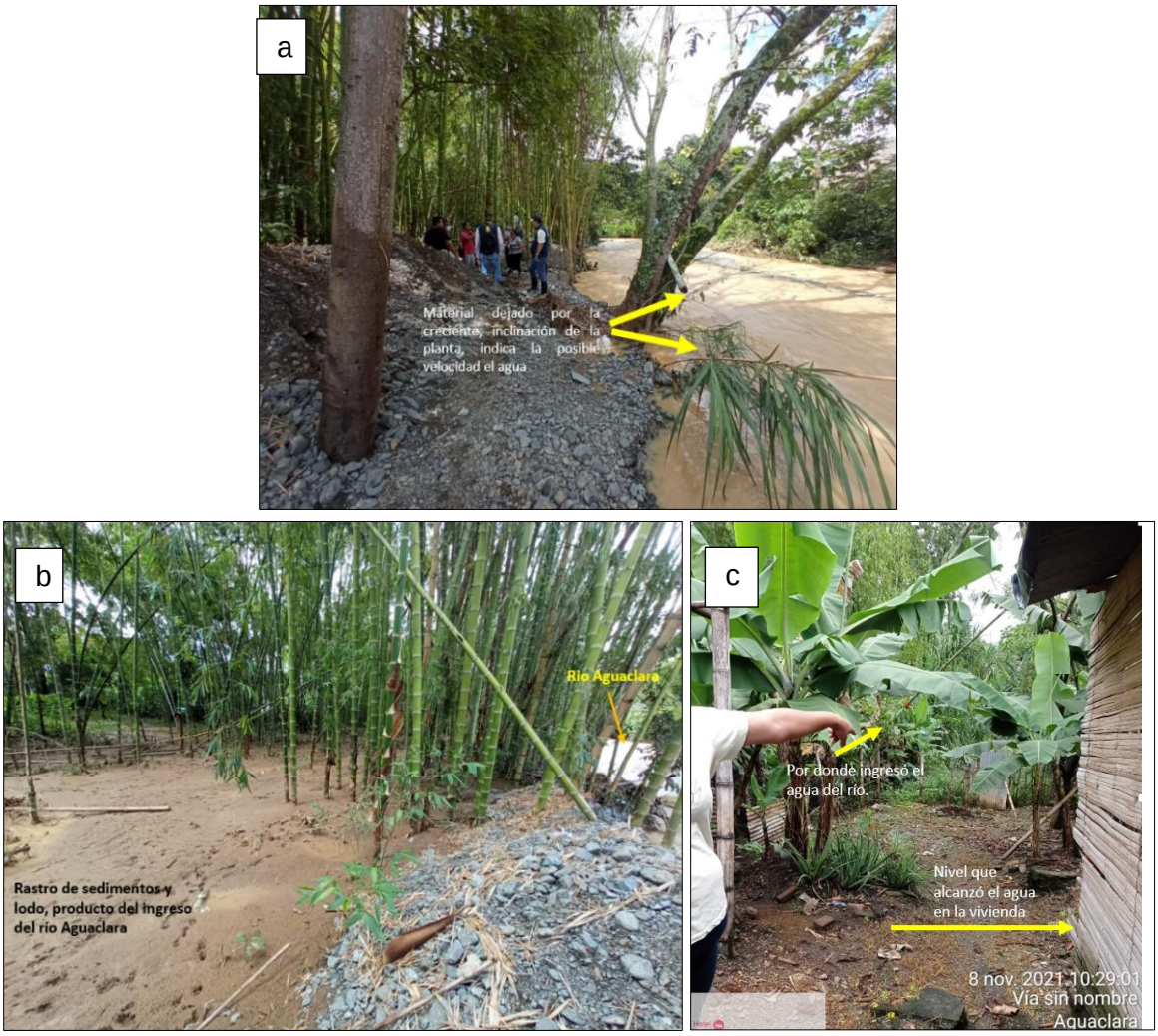


Figura 95. Reconstrucción de la inundación del 15 de junio del 2021 en el corregimiento de Aguaclara. a) Fotografía después del evento, reconocimiento en campo del equipo de DGRD; b) rastros de sedimentos y lodo que dejó el evento y c) corresponde a la altura que alcanzó el agua en la vivienda afectada de la comunidad de Aguaclara, margen derecha del río.

Fuente: elaboración propia con imágenes de visita técnicas de DGRD- Palmira, 2021 y trabajo de campo 8 de noviembre equipo técnico.

Figura 96. Obra no técnica realizada a la margen derecha del río AguaClara.
Fuente: elaboración propia.

Figura 97. Trabajo de recolección de espejo de agua en el corregimiento de Aguaclara, Palmira. Las imágenes a y d, corresponden al recorrido que nos hizo la señora Consuelo por las nuevas playas de sedimentos del río Aguaclara. Mientras que las fotos b y c, son el trabajo de las indicaciones dadas por la comunidad sobre los espejos de agua.
Fuente: elaboración propia.

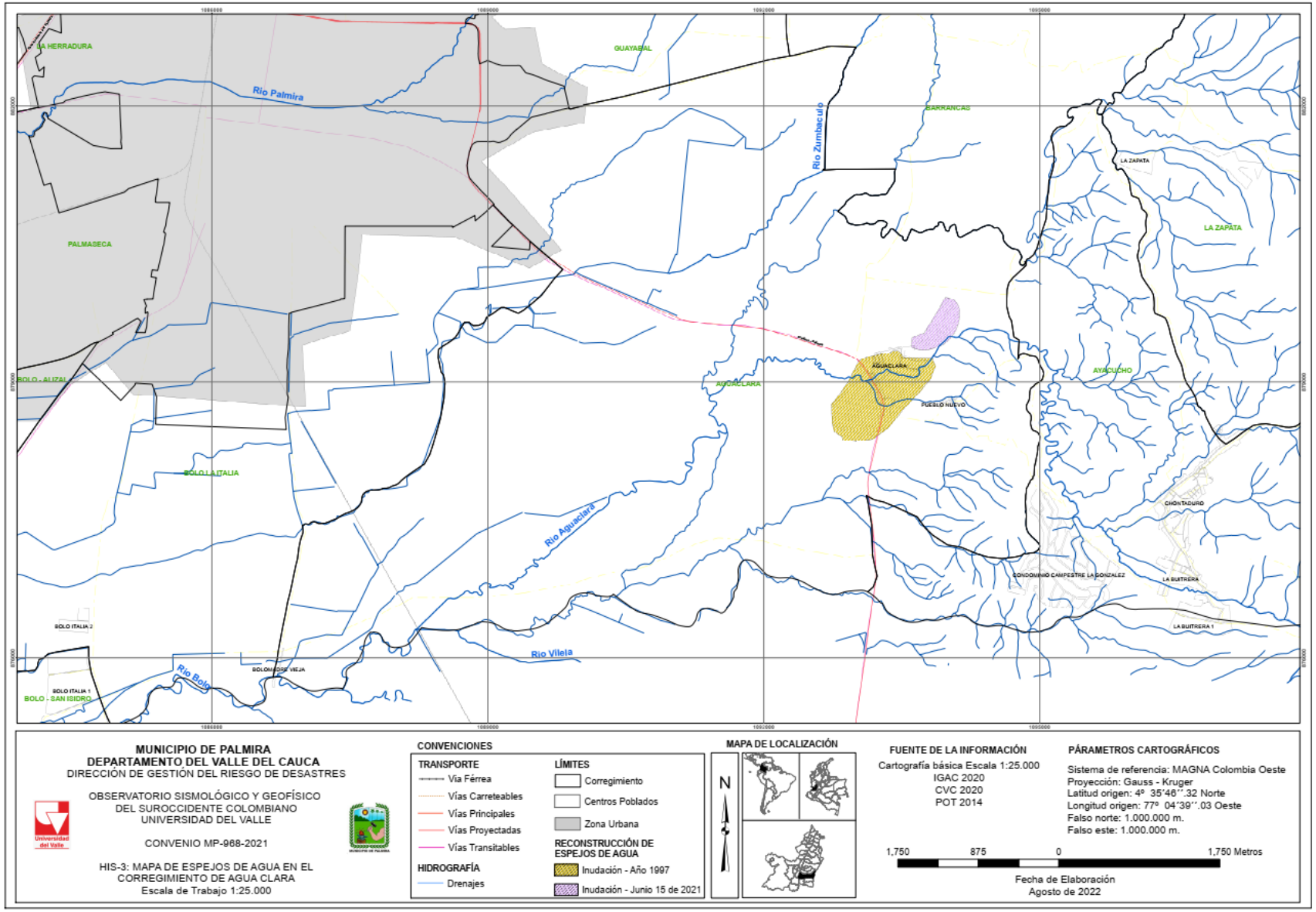


Figura 98. Espejos de agua en el corregimiento de Aguaclara, municipio de Palmira (HIS-3).
Fuente: elaboración propia.

5.5.4 Los Bolos (Bolo La Italia y Bolo Alizal)

Los bolos son reconocidos en Palmira, como la unión de los corregimientos de Bolo Alizal, y La Italia. A continuación, el análisis de afectaciones según corregimiento.

- **Bolo La Italia**

En este corregimiento sus afectaciones, según la señora Albanelly Bejarano, son producto del desbordamiento en temporadas de lluvias a causa del Zanjón Zumbaculo, afirma que éste tiene obras que disminuyen un poco la cantidad de agua que puede desbordar, dado que anteriormente solía salir gran cantidad de agua y permanecer días en los patios traseros de sus casas.

Teniendo en cuenta los resultados de la entrevista realizada a la señora Bejarano, la última afectación fue producto de las lluvias durante el 14 y 15 de junio del presente año. El Zanjón desbordó, corrió por los cañaduzales y por la vía principal afectando la movilidad, los antejardines de algunas casas frente a la vía (Figura 99).

Figura 99. Inundación del 15 de junio del 2021, Bolo La Italia.
Fuente: Imágenes entregadas por DGRD-Palmira, 2021

En la Figura 100 se muestra la espacialización del espejo de agua, según la entrevista, causó el desbordamiento del Zanjón Zumbaculo el 15 de junio del 2021. Cuyo polígono recorre principalmente la vía y las primeras casas de la cabecera corregimental.

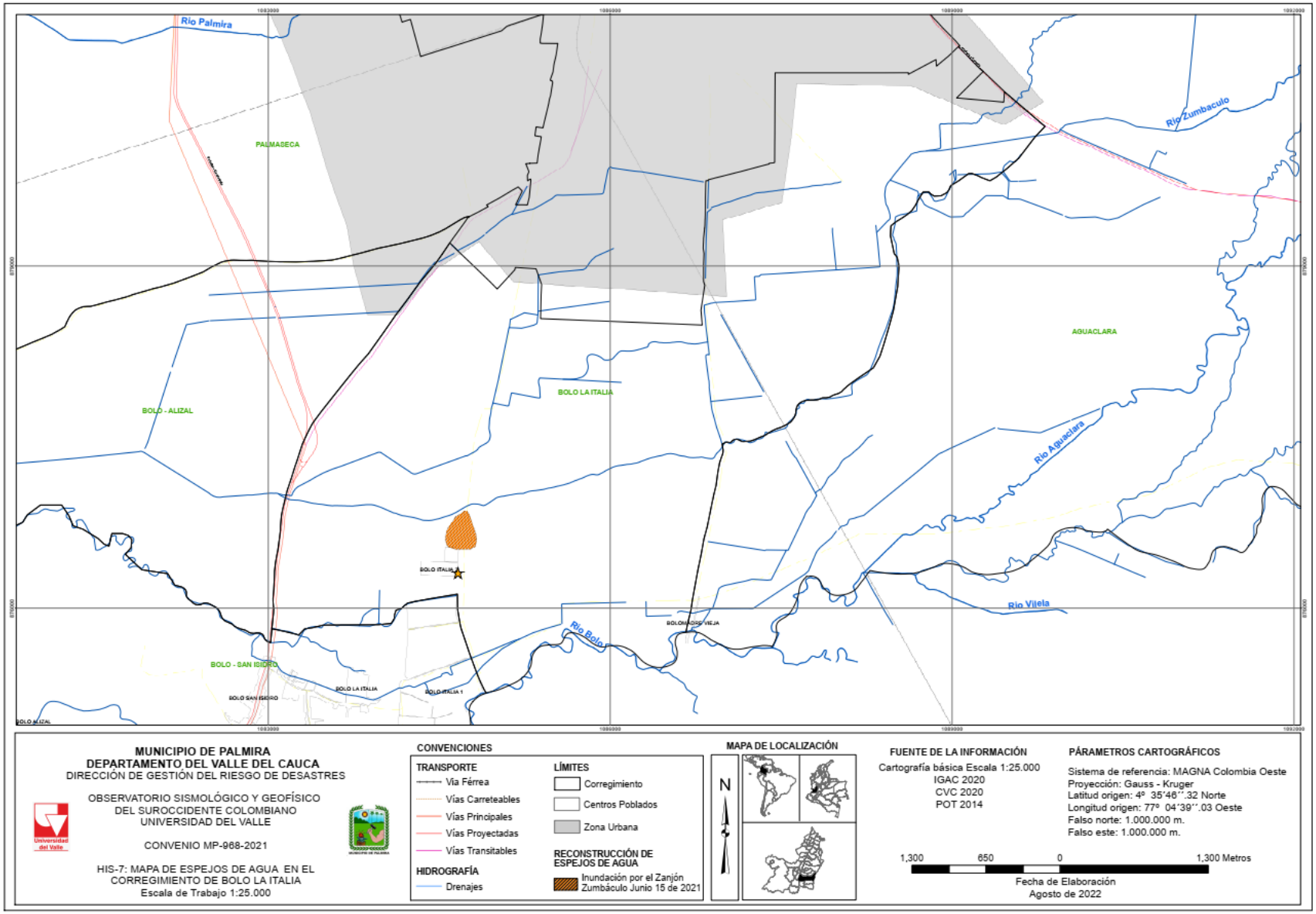


Figura 100. Espejos de agua en el corregimiento de Bolo La Italia en el municipio de Palmira (HIS-7).
Fuente: elaboración propia.

- **Bolo La Alizal**

La entrevista para recolectar las afectaciones por el río Bolo en el corregimiento fue realizada a la señora Vicky Valencia, quien reside en la Hacienda Puerta Roja, es una de las más afectadas de la zona por las inundaciones del río Bolo, porqué su casa está frente a la vía , el agua viene en dirección norte sur sobre la vía que conduce al corregimiento de Bolo San Isidro, siendo los primeros en verse afectados cada vez que ocurre una inundación (Figura 101).

Figura 101. Localización de vivienda y entrevista del 3 de diciembre del 2021, señora Vicky Valencia
Fuente: elaboración con datos de Google Earth (2021) e imagen tomada en trabajo de campo, 2021

Relata la señora Valencia, dos grandes inundaciones desde que vive en dicho lugar, una el 1 de diciembre del 2016 y la otra que el 15 de junio del año presente. La inundación del 2016, perdió sus enseres, trajo consigo animales rastreros y buscaron refugio en la construcción del lado; el agua llegó a un 1 ½m de altura, el agua les duró más de 2 días, recibieron ayuda de parte los hacendados cercanos. Mientras que la inundación del 15 de junio, el río hizo ruptura por tres puntos del dique margen izquierda, a eso de las 9:00 a.m., generando un gran espejo de agua en su recorrido por las vías, afectando cultivos de las Haciendas El Palmar, Tafur y Los Ríos y viviendas en Barrio Nuevo. Alcanzado alturas en ciertos sitios que superaban los 55 cm (Figura 102 y Figura 103).

Figura 102. Inundación por el río Bolo en el corregimiento de Bolo Alizal, 15-06-2021.
Fuente: DGRD-Palmira, 2021

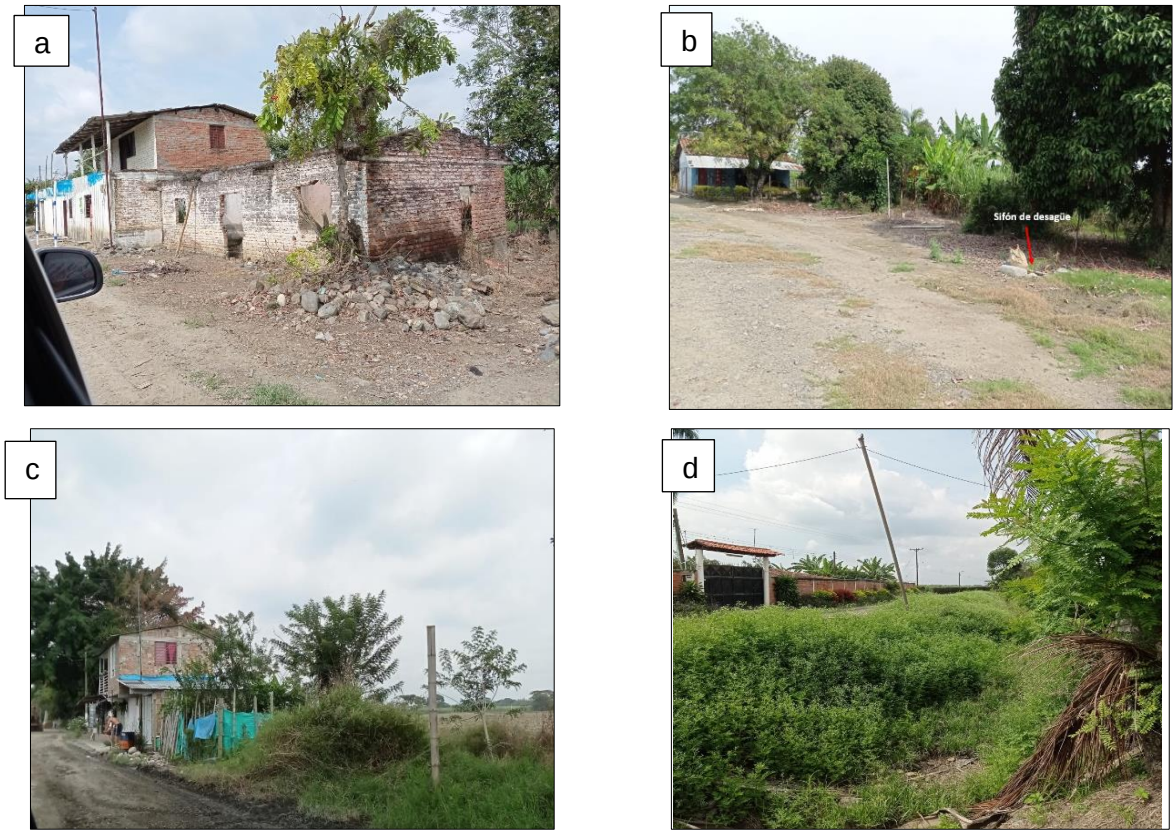


Figura 103. Visita a la zona afectada por la inundación del 15 de junio del 2021, corregimiento de Bolo Alizal.
a) Casa afectada en la curva de la vía que conduce a Barrio Nuevo; b) Vivienda afectada de Hacienda Puerta Roja, la familia tiene un sifón de desagüe que realizaron después de la inundación del 1-12-2016; c) de dos pisos afectada por la inundación del 15-06-21 y d) Canal de drenaje sobre la vía margen derecha.
Fuente: elaboración propia.

En la Figura 104 se muestra la espacialización de los espejos que han afectado al corregimiento de Bolo Alizal. Los dos polígonos corresponden a las inundaciones anteriormente mencionadas. Diferenciándose por color, el polígono de relleno color rosa corresponde a la inundación del 1-12-2016, sugerido por la entrevistada, mientras que el polígono de reborde fucsia corresponde a la inundación del 15-06-2021, donde su límite llegó a las primeras casas del Barrio Nuevo.

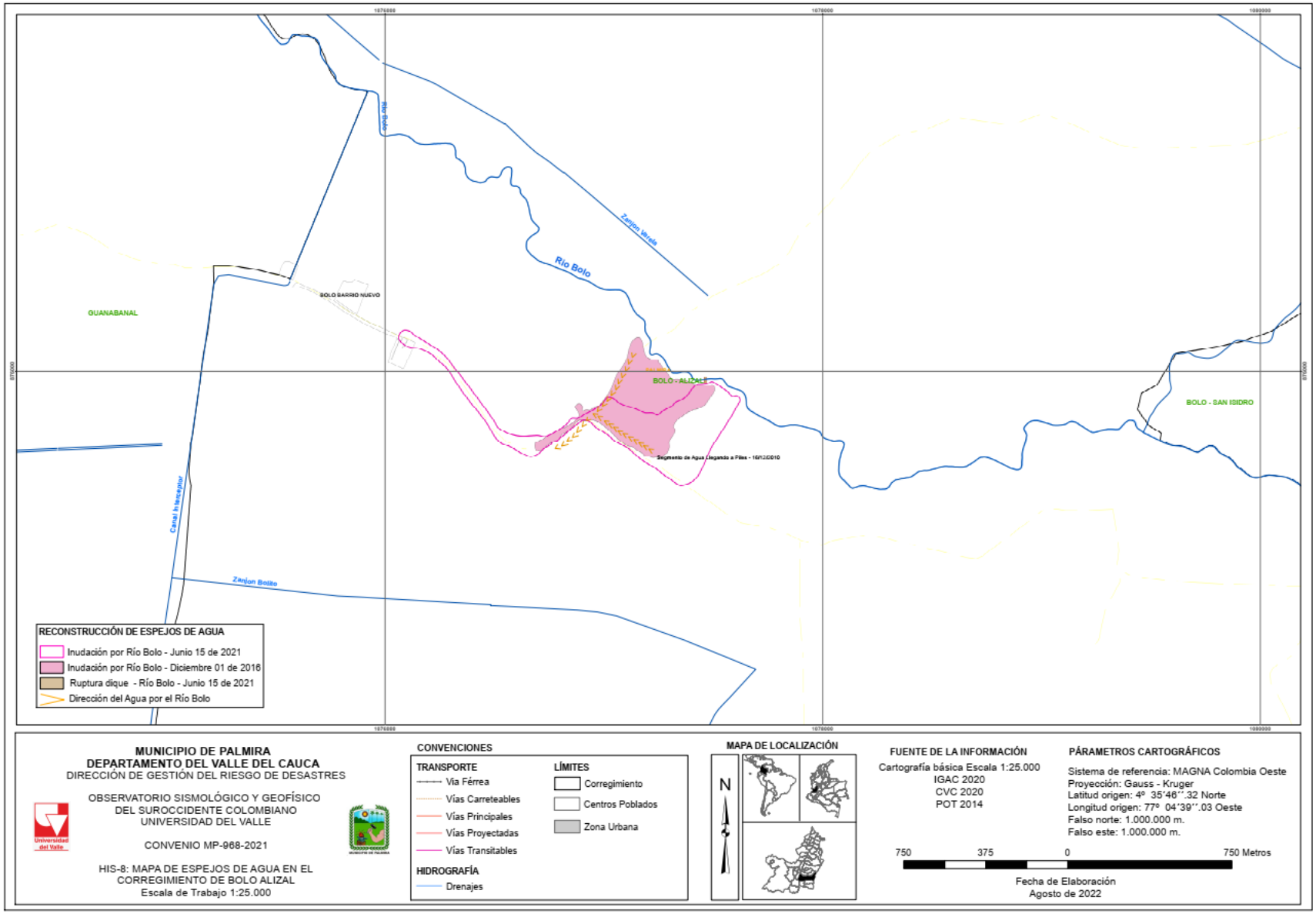


Figura 104. Espejos de agua en el corregimiento de Bolo Alizal municipio de Palmira (HIS-8).
Fuente: elaboración propia.

5.5.5 Corregimiento de Palmaseca

En el corregimiento de Palmaseca, los resultados obtenidos son producto del trabajo en la Hacienda El Once, con el señor Hayavry Jaramillo, quien se ha visto afectado por inundaciones en el periodo invernal 2010-2011 y la última inundación del 15 de junio del 2021 (Figura 105), en la que se presentaron los eventos por rotura de los diques en algunos puntos de la canalización río Guachal y rio Palmira, afectando haciendas como El Llanito, El Once y Escocia.

El señor Jaramillo, explicó que más de 48 hectáreas se inundaron, en conjunto con los trabajadores de la hacienda contuvieron la inundación para que no llegara a la cabecera del corregimiento. El espejo de agua duró por más de 10 días en sus terrenos, pero solo hasta el mes de septiembre pudieron volver a sembrar, afirman que a la mayoría de los diques del río Palmira y Guachal las autoridades ambientales no les hacen mantenimiento, que ellos hacen lo posible por mantenerlos y cuidarlos pero que no se pueden encargar de todos los trayectos antes de que inicie sus terrenos.

Figura 105. Ruptura del río Guachal en la Hacienda El Once, corregimiento de Palmaseca.
Fuente: vídeo proporcionado por la DGRD Palmira, 2021.

La Figura 106 muestra el polígono de agua que causó la inundación del 15 de junio del 2021 en predios de la Hacienda El Once, también en el mapa se puede encontrar la localización de los quiebres de los diques en la Hacienda El 11 y La Escocia. El rectángulo verde claro corresponde a las hectáreas que afectó el desbordamiento del río Bolo en la hacienda El Once, los cuadros amarillos son los puntos donde se fisuraron los diques.

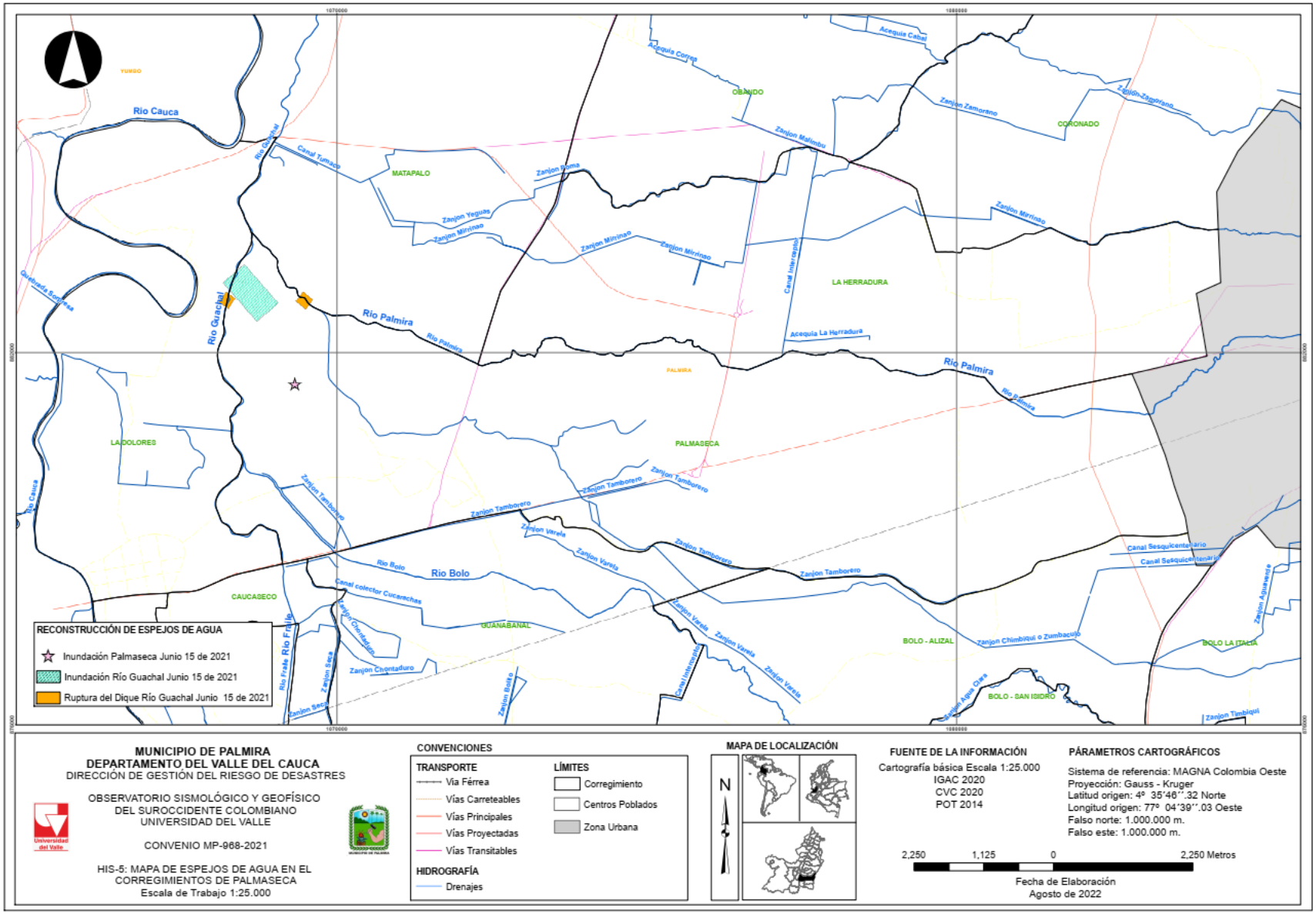


Figura 106. Espejos de agua en el corregimiento de Palmaseca en el municipio de Palmira (HIS-5).
Fuente: elaboración propia.

5.5.6 Corregimiento de La Herradura

El corregimiento de La Herradura está localizado al nor-occdiente del municipio de Palmira, los resultados que se muestran a continuación son producto de la entrevista realizada a la señora Marianela González.

Se reportó la última inundación que ocurrió el 15 de junio del 2021, a las 3:30 a.m., debido a las fuertes lluvias y al manejo inadecuado de las compuertas del sistema de captación del agua que está sobre el zanjón Mirriñao, según información de la entrevistada, dicho manejo está en manos de la Compañía Agrícola Caucana S.A-Hacienda Malimbú que utilizan las aguas para el riego de los cultivos de caña, dejaron cerradas las compuertas el zanjón se represó y desbordó sus aguas afectando a 33 familias de La Herradura[3].

El equipo de la Dirección de Gestión del Riesgo por Desastres, acompañó a la comunidad después del evento e hizo un recorrido del zanjón. Donde se evidencia trabajo de limpieza de parte de la comunidad y las compuertas abiertas después del evento.

Figura 107. Visita al Zanjón Mirriñao por parte de la comunidad y DGRD Palmira.
Fuente: DGRD Palmira, 2021.

[3] Las familias están en el proceso de indemnización por parte de la empresa cañera involucrada en el nulo manejo y cuidado de la obra que ellos realizaron sobre el zanjón Mirriñao.

La espacialización del espejo de agua producto de la inundación por el Zanjón Mirriñao del 15 de junio del 2021, se muestra el círculo achurado de color naranja en la Figura 108. Cabe resaltar, que la entrevistada sabe de otros eventos de inundación, pero es residente de hace muy poco tiempo en la zona.

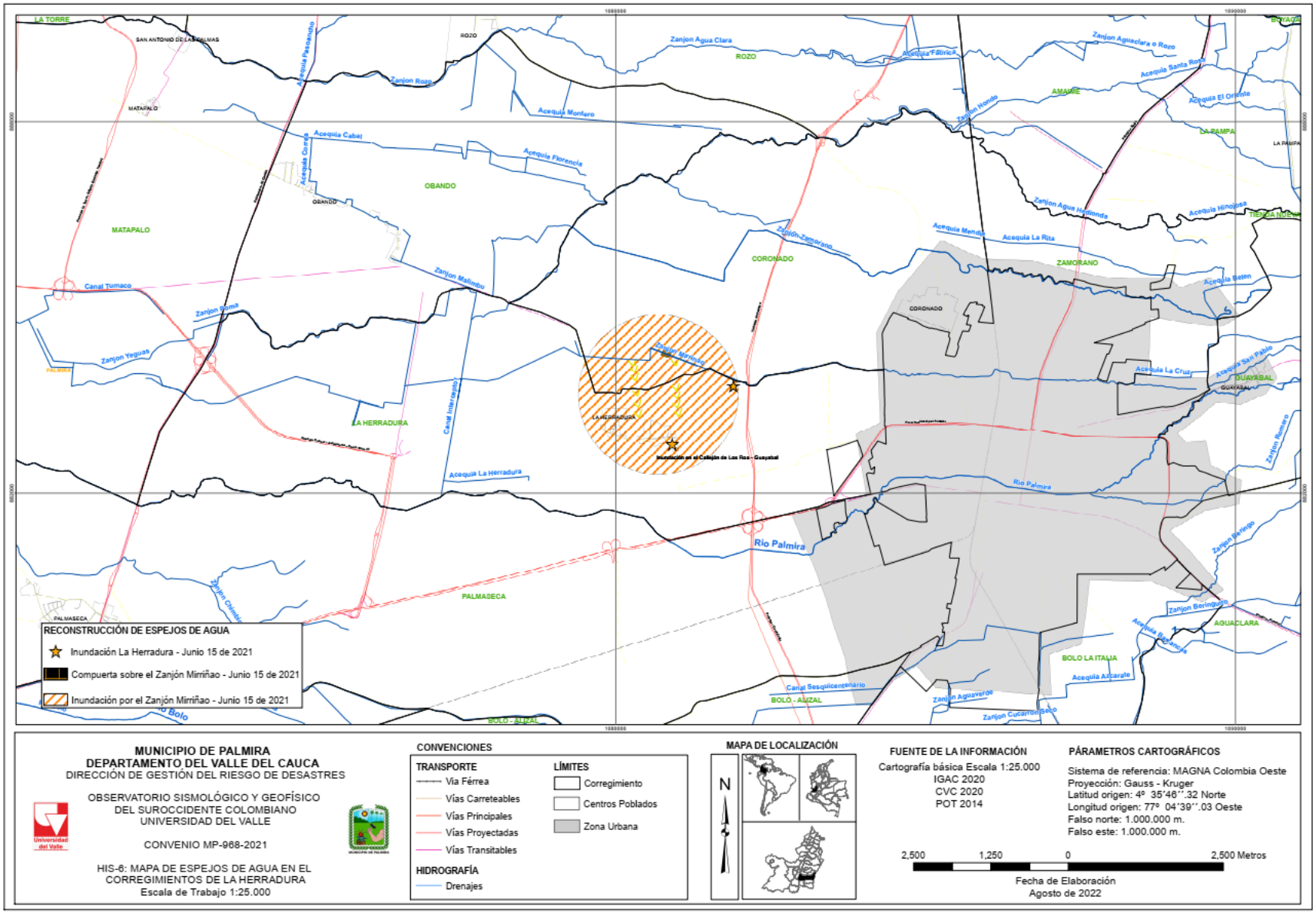


Figura 108. Espejos de agua en el corregimiento de La Herradura, en el municipio de Palmira (HIS-6).
Fuente: elaboración propia.

5.5.7 Corregimiento de Caucaseco

Al sur occidente del municipio queda el corregimiento de Caucaseco. En este la última inundación que dejó espejo, según las dos personas entrevistadas, fue a causa del río Cauca, que rompió dique por Juanchito, discoteca Changó, paso por Agapito, inundó los cultivos de caña, rebosó el Zanjon Tortugas y afectó las pocas viviendas que están después de la carrilera del tren (Km 5) y de la cabecera corregimental.

Según las entrevistadas, Patricia Muñoz y Flor Cantillo, el agua cubrió hasta el techo sus viviendas, dejando animales rastreros a su paso y el agua les duro por más de 2 meses, indicaron que el agua demoró en secar por más de 1 mes y medio, y buscaron refugio en otros lugares más altos del sector. Advierten que no se vieron afectados por el río Fraile en ninguna ocasión, porque el dique en ese sector le hace mantenimiento y es alto con respecto a otras zonas (Figura 109).

La Figura 110 muestra la espacialización del espejo de agua generado por la inundación del 2011.

Figura 109. Evidencias de campo, corregimiento de Caucaseco, municipio de Palmira.
A, corresponde a entrevista a Flor Cantillo, quien, comenta que su casa (imagen C) se vio afectada hasta el techo y es inhabitable desde la temporada invernal 2010-2011; imagen D, es la vista desde la carrilera del tren, toda el área verde fue inundada (2010-2011).
Fuente: elaboración propia.

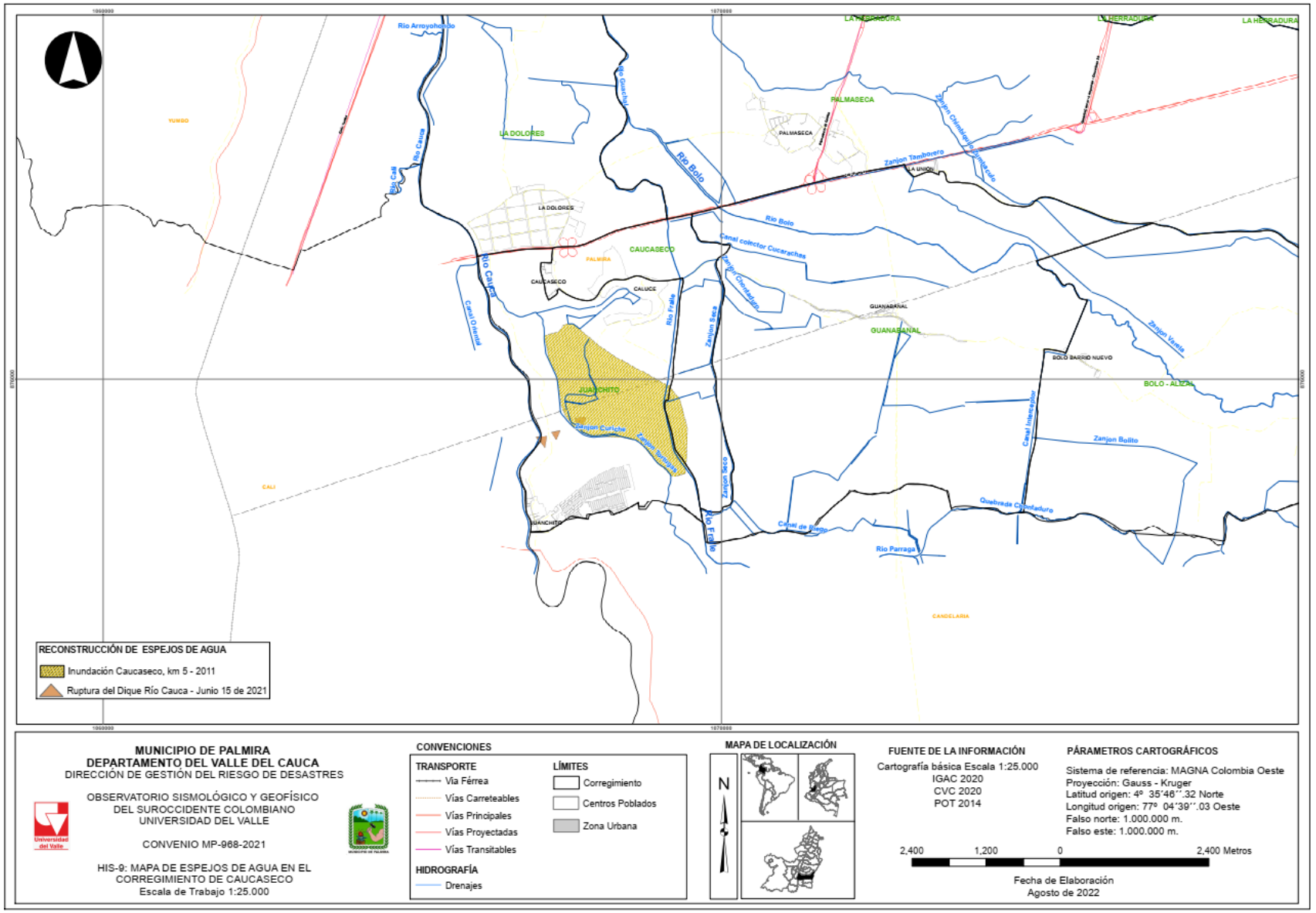


Figura 110. Espejos de agua por inundaciones en el corregimiento de Caucaseco del municipio de Palmira (HIS-9).
Fuente: elaboración propia.

5.5.8 Historicidad río Cauca

Adicionalmente, como parte de la información de eventos históricos en el área de estudio, se emplearon los registros precedentes de las áreas inundadas en el corredor del río Cauca durante los diferentes eventos de precipitación (ver Figura 111), lo cual fue consultado y descargado del portal avanzado de datos geográficos de la CVC - GEOCVC.

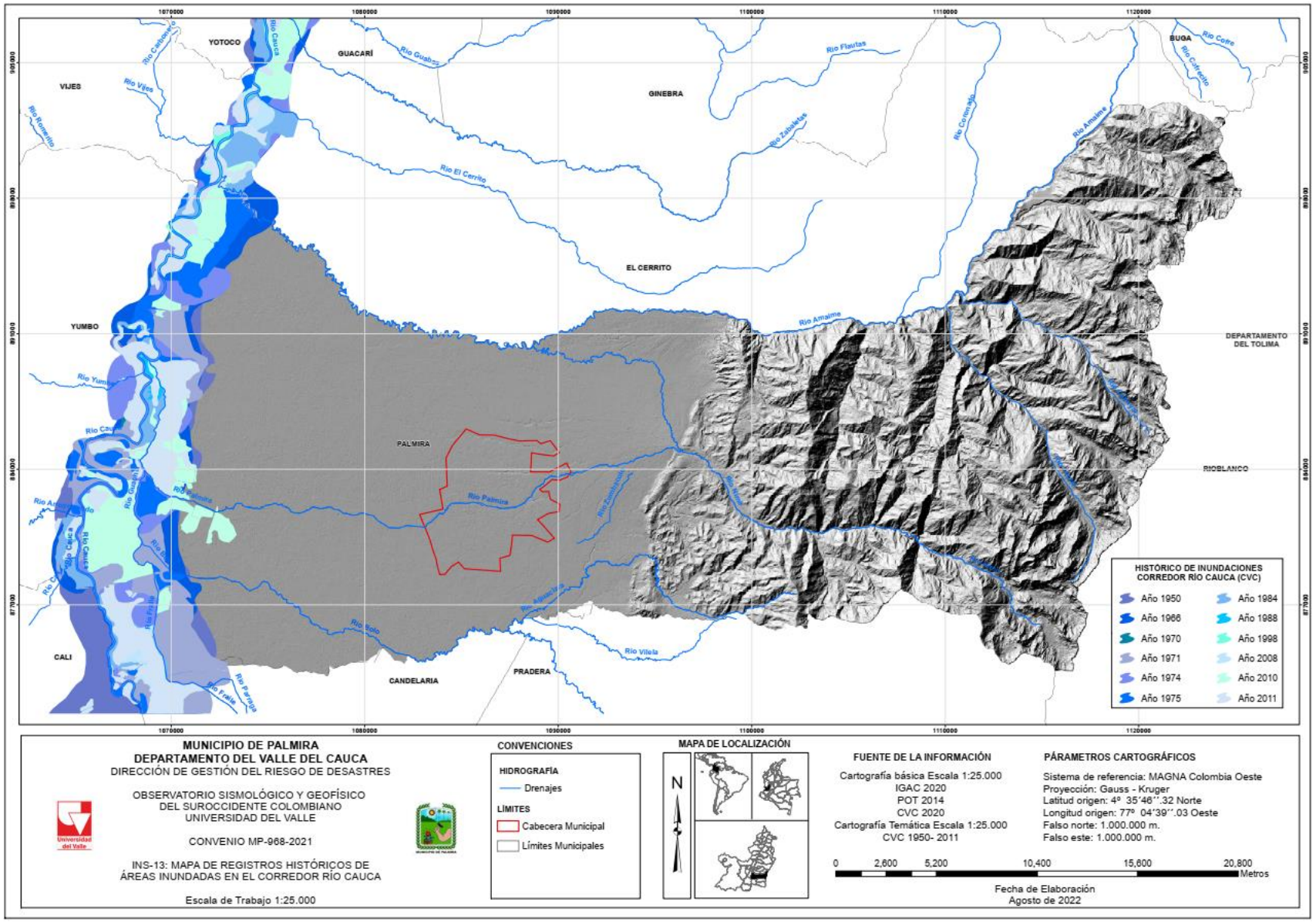


Figura 111. Mapa de registros históricos de áreas inundadas en el corredor del río Cauca
Fuente: elaboración propia tomado de CVC

5.5.9 Espejos de agua históricos

A continuación en la Figura 112, se presenta el mapa resultante del cruce de los polígonos reconstruidos de los espejos de agua asociados a registros históricos (generados en el marco del presente Convenio MP968 de 2021), con las áreas inundadas en el corredor del río Cauca durante los diferentes eventos de precipitación (información tomada del portal avanzado de datos geográficos de la CVC – GEOCVC), empleando herramientas del Sistema de Información Geográfica – SIG.

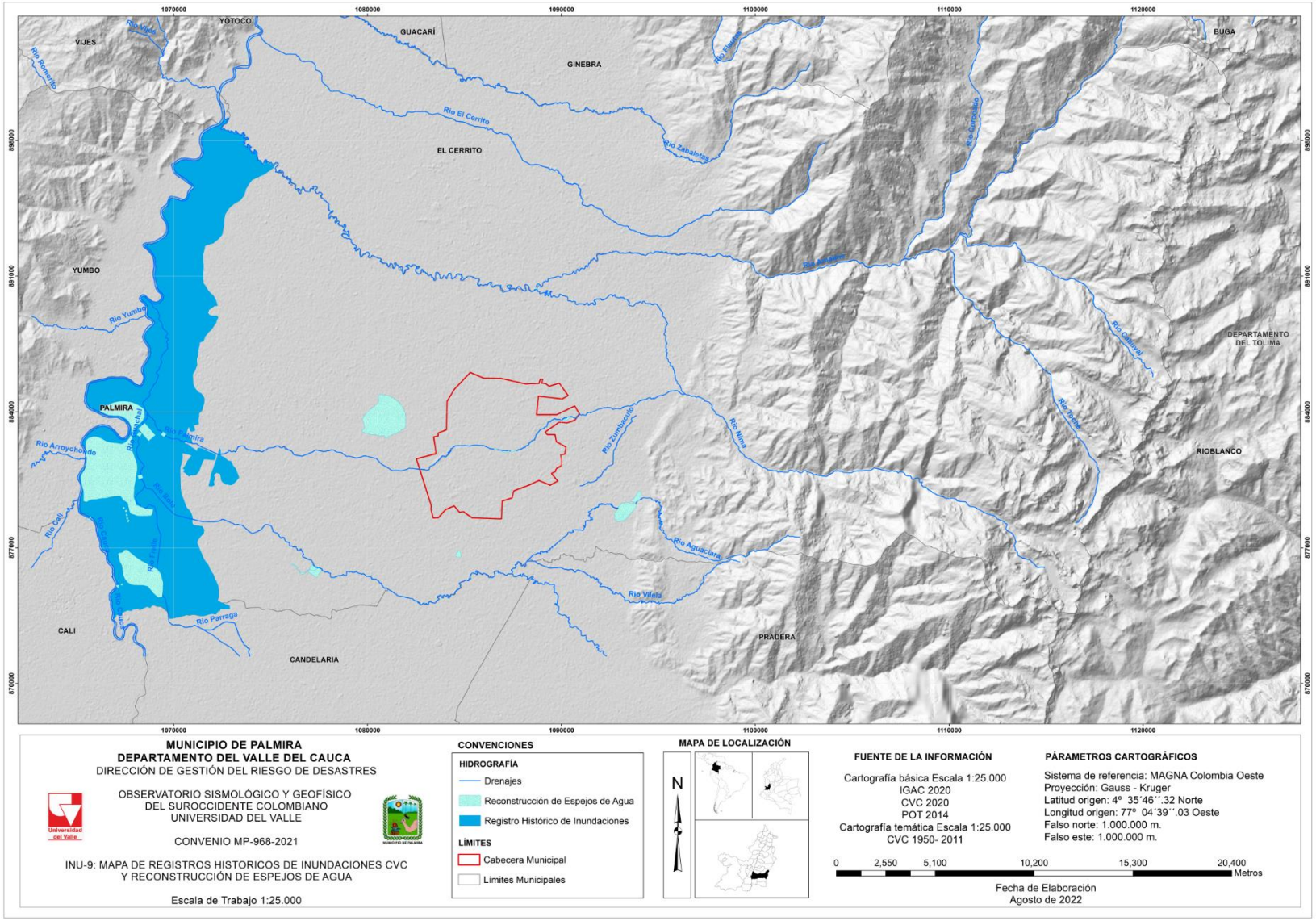


Figura 112. Mapa histórico de espejos de agua municipio de Palmira.
Fuente: elaboración propia tomado de CVC.

5.6 Análisis Hidrológico

El clima es el conjunto fluctuante de las condiciones atmosféricas, caracterizado por los estados y evoluciones del tiempo, durante un periodo de tiempo y en un lugar o región dada, y controlado por los denominados factores forzantes, factores determinantes y por la interacción entre los diferentes componentes del sistema climático.

Debido a que el clima se relaciona generalmente con las condiciones predominantes en la atmósfera (uno de los componentes del sistema), éste se describe a partir de variables atmosféricas como la precipitación; sin embargo, se podría identificar también con las variables de otros de los componentes del sistema climático.

El clima de Colombia es muy variado, tanto a lo largo y ancho de su territorio como a través del tiempo. Esta diversidad climática está determinada en gran medida por la ubicación geográfica y por las características fisiográficas del territorio colombiano. La diversidad climática colombiana es un recurso importante del país, y las variaciones del clima juegan un papel importante en las diferentes formas de actividad humana en él.

En el presente estudio se identifican, zonifican y describen las condiciones climáticas del área, con base en la información de las estaciones hidrometeorológicas existentes aledañas a la zona en estudio; de igual manera, se analizan las fuentes hídricas más cercanas, identificando el régimen hidrológico y los caudales característicos de las principales corrientes.

5.6.1 Climatología

5.6.1.1 Red de estaciones meteorológicas

Para el análisis del clima, como factor de gran incidencia en los procesos que se presentan en el medio natural, se realizó inicialmente una selección de las en las estaciones que conforman la red de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca y del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y que se localizan en el área de influencia del municipio de Palmira (Anexo 1); es así que se identificaron catorce (14) pluviométricas, tres (3) pluviográfica, dos (2) agrometeorológica, cuatro (4) climatológicas ordinarias y tres (3) evaporimétrica. La información general de las estaciones se presenta en la Tabla 15 y se muestra su ubicación respecto a la zona de estudio en la Figura 113.

Tabla 15. Estaciones meteorológicas en la zona de estudio

Estación	Entidad	Código	Municipio	Latitud	Longitud	Altura	Categoría	Año Inicio
CAJONES	IDEAM	26060200	Miranda	1104113.69153	848577.90752	2472	PM	1975
FLORIDA	IDEAM	26070760	Florida	1093173.82024	859777.87653	1059	PM	1954
CENICANA	IDEAM	26075080	Florida	1086437.48250	863381.84102	128	AG	1981
CALI SEDE IDEAM	IDEAM	26080310	Cali	1061612.61193	876143.45288	983	PG	1997
PALMIRA ICA	IDEAM	26075010	Palmira	1084738.36090	880306.62881	1018	AG	1973
LA ZAPATA	IDEAM	26070110	Palmira	1096299.90598	881834.26024	1119	PM	1975

Tabla 15. Estaciones meteorológicas en la zona de estudio

Estación	Entidad	Código	Municipio	Latitud	Longitud	Altura	Categoría	Año Inicio
ESPERANZA PRADERA	IDEAM	26070170	Palmira	1091923.31056	874377.74314	1055	PM	1981
INGENIO MANUELITA	IDEAM	26075050	Palmira	1088853.35324	887009.93997	1059	CO	1973
EL PARAISO	IDEAM	26090460	El Cerrito	1097521.61019	895385.95864	1305	PM	1973
TENERIFE	IDEAM	26095080	El Cerrito	1111394.21329	904275.77401	2628	CO	1973
AEROPUERTO PALMASECA	IDEAM	26075040	Palmira	1076763.55486	882867.88126	970	PM	1973
AUJI	CVC	2612800104	El Cerrito	1107755.93500	892328.45400	1555	PM	1971
AUSTRIA	CVC	2612810112	Palmira	1100499.35800	887540.60100	1750	PM	1969
BELLAVISTA	CVC	2612800103	Palmira	1120098.70000	893281.90000	2875	PM	1970
CHAMBÚ	CVC	2612720301	Palmira	1096593.36700	876762.47100	1350	EV	1973
LA CEJA	CVC	2612800106	El cerrito	1118650.54100	903532.38600	3052	PM	1971
LA DIANA	CVC	2612710301	Florida	1099758.61300	860081.71000	1960	EV	1971
LA SIRENA	CVC	2612810203	Palmira	1107148.32300	880364.48000	2605	CO	1988
LA SOLEDAD	CVC	2612710105	Florida	1109013.84400	867463.57000	2160	PM	1971
LOS MINCHOS	CVC	2612720105	Pradera	1099442.70100	870099.85900	1370	PG	1994
PLANTA NIMA 1	CVC	2612810122	Palmira	1095534.06700	884090.28300	1170	PM	1970
PLANTA RIO CAUCA	CVC	2620000103	Cali	1064958.79100	872964.48500	956	PG	1960
SAN EMIGDIO	CVC	2612810201	Palmira	1097392.12800	884203.01500	1272	CO	1964
SAN NICOLAS	CVC	2612810109	Palmira	1101590.00000	882202.10000	2100	PM	1970
TENJO	CVC	2612810108	Palmira	1100743.62700	881112.62400	1500	PM	1969
VIJES	CVC	2622900301	Vijes	1071963.00000	900761.00000	990	EV	1955

PG (Pluviográfica), PM (Pluviométrica), EV (Evaporimétrica), CO (Climatológica Ordinaria) AG (Agromeorológica)

Fuente: elaboración propia

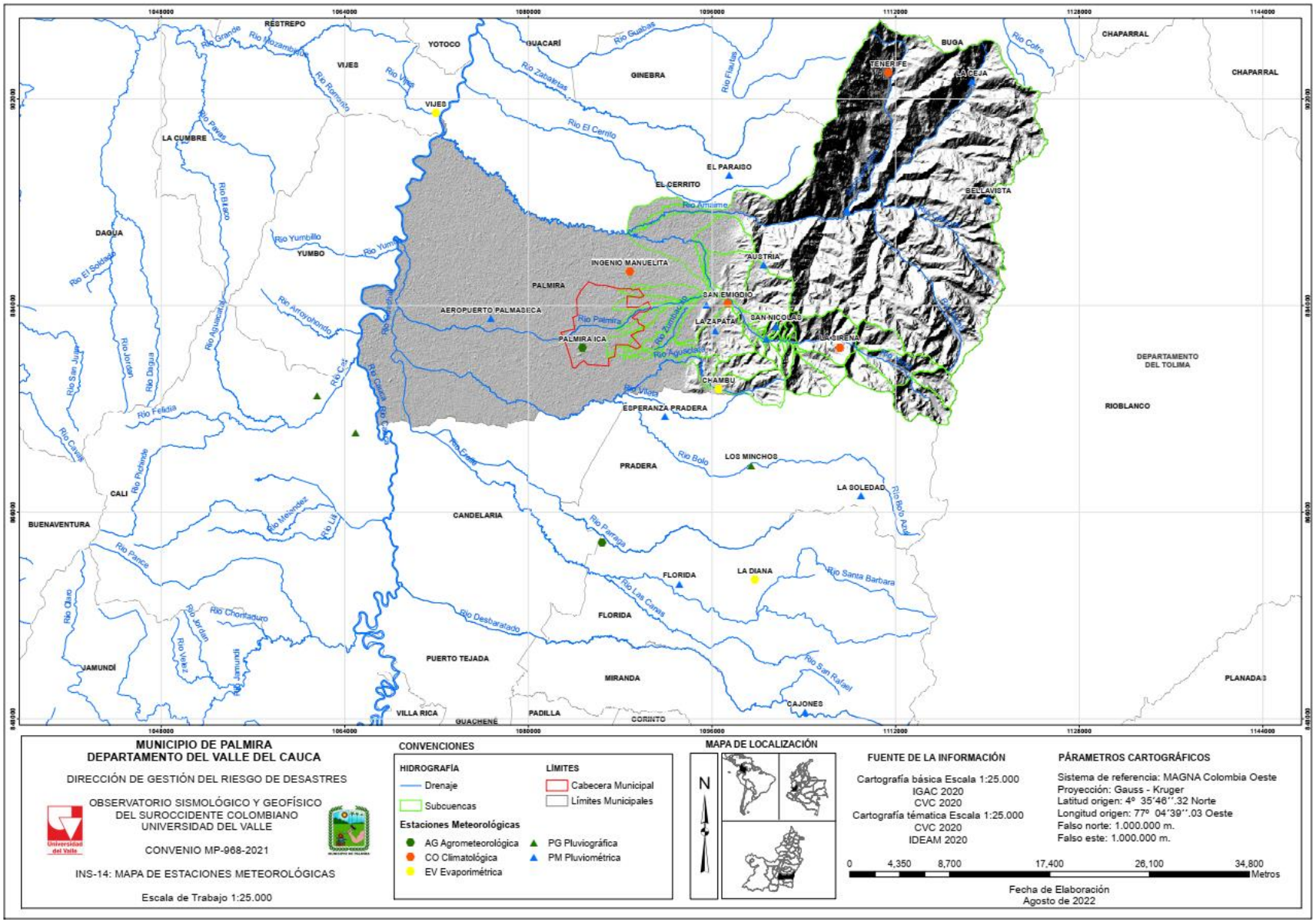


Figura 113. Localización de estaciones meteorológicas con influencia en la zona de estudio del municipio de Palmira
Fuente: elaboración propia

A continuación, se realiza un análisis de la precipitación de las estaciones con información pluviométrica, para lo cual se emplearon los registros mensuales multianuales.

5.6.1.2 Precipitación

Para la determinación de la precipitación en el municipio de Palmira se construyó una base de datos con la información de la precipitación mensual de 26 estaciones con registros de lluvia operadas por la CVC y el IDEAM, localizadas en la zona de influencia del sector en estudio.

5.6.1.2.1 Distribución temporal de las precipitaciones

De acuerdo con los datos de precipitación media mensual multianual obtenidos de las estaciones de mayor influencia del sector evaluado, se observa que la distribución temporal de la lluvia para todos los casos presenta dos periodos de alta pluviosidad y dos de baja pluviosidad, con tendencia a un régimen de tipo bimodal; las mayores lluvias se presentan en los periodos marzo-mayo y octubre-noviembre, mientras que los periodos de menor pluviosidad se presentan en los meses de enero a febrero incluyendo diciembre y de junio a septiembre (Anexo 2). En la Tabla 16 se relaciona el resumen promedio de la precipitación total mensual multianual de las estaciones de referencia.

Tabla 16. Resumen de promedios mensuales multianuales de precipitación total mensual de las estaciones ubicadas en cercanías al sector en estudio.

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
APTO. PALMASECA	48,2	56,1	92,2	130,8	100,0	53,4	32,5	36,7	64,7	105,7	98,5	66,4	857,8
CAJONES	125,1	114,5	146,8	144,3	119,0	67,5	58,8	50,0	69,1	178,1	218,3	146,2	1372,1
CENICAÑA	82,1	87,3	125,3	159,2	109,4	53,8	26,5	33,5	90,3	142,1	142,3	87,1	1066,0
EL PARAISO	109,2	127,0	187,5	187,9	131,2	61,5	36,2	47,1	113,6	227,9	234,4	163,3	1593,9
ESPERANZA PRADERA	95,6	101,2	136,9	172,8	101,9	48,8	28,4	35,6	73,3	143,9	151,7	100,7	1100,8
FLORIDA	103,3	115,3	150,2	203,9	142,5	58,1	43,5	40,0	105,7	205,6	204,6	132,5	1492,7
ING. MANUELITA	65,0	72,9	116,4	149,8	110,2	71,3	46,8	45,4	80,3	129,2	126,8	90,2	1036,8
LA ZAPATA	101,0	128,5	166,7	211,8	134,8	69,1	45,5	48,5	113,8	201,3	205,8	144,9	1412,7
PALMIRA ICA	59,9	76,9	110,6	153,4	119,9	57,9	36,7	41,4	75,8	123,9	130,5	90,2	1049,3
IDEAM CALI	77,2	71,4	108,6	179,1	144,1	81,7	51,1	40,9	80,4	116,8	123,8	105,4	1180,4
TENERIFE	87,1	90,6	122,9	132,4	107,7	55,8	36,2	44,9	73,1	160,2	163,5	127,1	1064,9
AUJI	72,8	78,1	91,0	108,7	81,1	38,8	25,8	25,3	52,3	125,8	127,0	86,0	902,8
AUSTRIA	145,6	156,3	208,0	232,2	175,4	81,8	46,9	71,8	133,3	282,2	271,9	181,1	1908,3
BELLAVISTA	116,7	116,4	163,6	157,4	129,1	67,1	60,2	55,6	70,4	171,6	182,6	134,3	1398,5
CHAMBÚ	114,8	138,5	188,2	202,3	124,1	61,3	42,4	46,0	107,1	210,4	223,0	155,0	1579,7
LA CEJA	83,2	87,2	122,4	122,1	101,2	59,2	52,0	51,6	70,9	139,1	158,0	110,4	1102,0
LA DIANA	123,9	113,4	149,2	167,5	112,1	41,3	29,9	31,8	81,5	194,8	213,7	138,3	1388,3
LA SIRENA	106,8	107,8	123,2	123,9	105,2	78,2	63,1	45,0	64,7	177,6	199,4	130,6	1293,4
LA SOLEDAD	173,4	168,2	219,9	194,1	156,3	73,9	53,4	41,1	98,2	266,6	302,8	208,9	1902,7
LOS MINCHOS	108,3	112,0	143,3	140,1	111,7	55,3	27,4	29,7	58,4	178,8	196,4	118,2	1268,6
PLANTA NIMA 1	92,8	117,2	166,2	211,4	151,8	66,9	49,0	57,3	109,6	213,6	190,9	128,0	1506,2
PTA. RIO CAUCA	59,2	72,1	107,4	149,3	123,7	69,5	40,4	47,7	65,4	115,4	101,7	86,9	992,0
SAN EMIGDIO	97,7	130,2	166,6	211,8	149,2	71,8	42,2	61,4	119,9	232,8	213,5	143,7	1586,8
SAN NICOLAS	162,3	178,3	209,3	207,4	161,3	67,6	52,8	56,0	112,5	276,2	290,2	200,7	1865,7
TENJO	153,5	171,2	210,4	225,4	160,2	58,1	40,4	43,8	123,5	271,4	279,6	183,2	1872,6
VIJES	42,9	57,2	92,9	129,5	94,8	59,1	38,3	38,8	71,7	124,7	98,3	63,9	891,1

Fuente: elaboración propia

En la zona de influencia del sector en estudio se destacan julio y agosto como los meses más secos registrados en todas las estaciones, siendo el valor más bajo el de la estación Auji con 25,3 en el mes de agosto. Por su parte, los meses más lluviosos para la mayoría de las estaciones corresponde a octubre y noviembre, siendo el registro más alto el tomado por la estación La Soledad con 302,8 mm en el mes de noviembre. En la Figura 114 se observa la distribución temporal de la precipitación en el área de estudio.

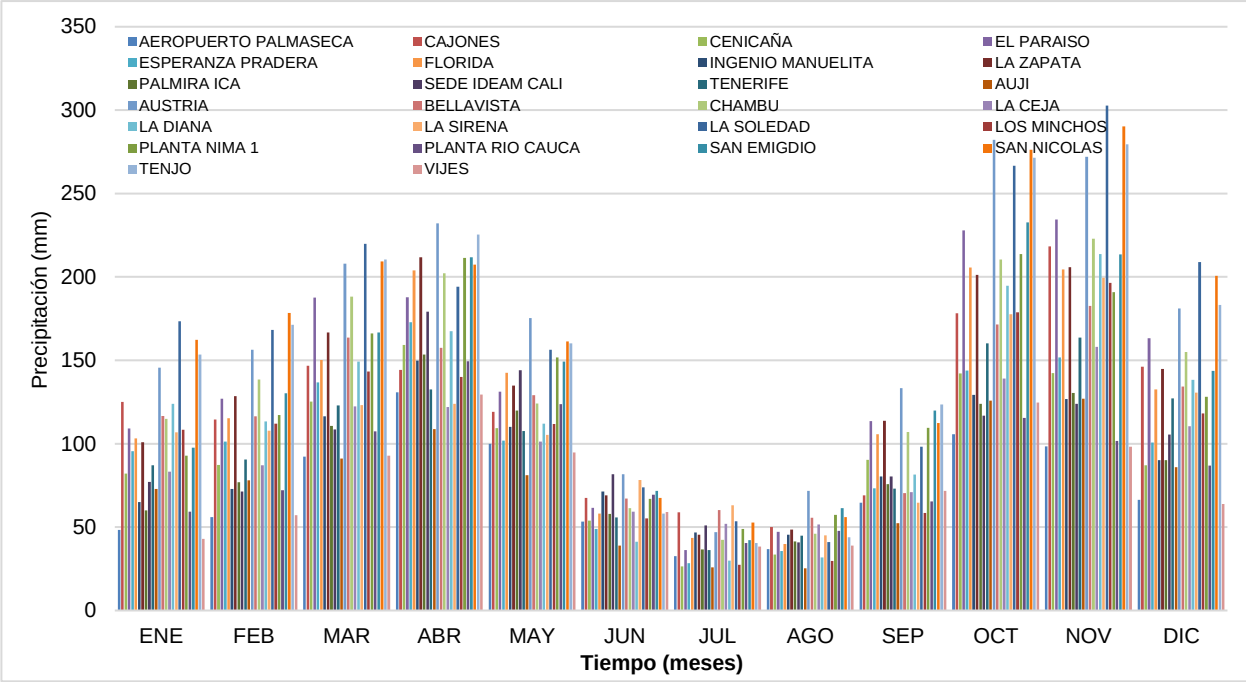


Figura 114. Distribución temporal de la precipitación estaciones de referencia.
Fuente: elaboración propia

5.6.1.2.2 Distribución espacial de la precipitación

Para conocer la distribución espacial de las precipitaciones de las unidades hidrográficas asociadas al área de estudio en el municipio de Palmira Valle del Cauca se empleó el método de curvas isoyetas, que consiste en trazar curvas de igual precipitación para un periodo elegido.

Las isolíneas de igual precipitación calculadas mediante la herramienta del programa QGIS de interpolación de superficie ráster IDW (distancia inversa ponderada) muestran que el promedio de lluvias anual sobre la zona de estudio oscila entre 1163 mm a 1850 mm (ver Figura 115) Así mismo, es posible evidenciar cómo la distribución presenta las mayores precipitaciones en el flanco oriental de la cordillera Occidental, lo cual se debe a su cercanía con la región Pacífico.

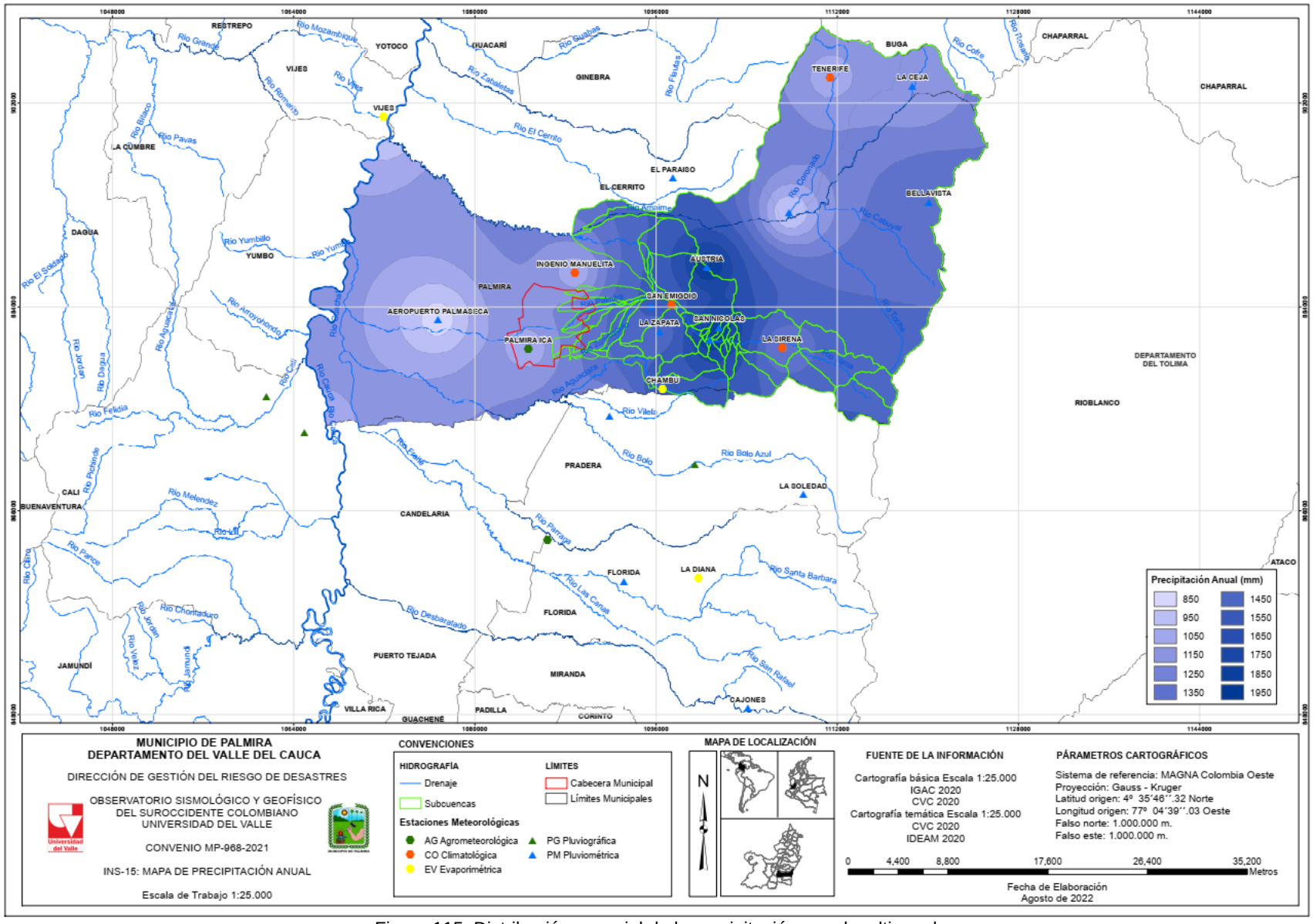


Figura 115. Distribución espacial de la precipitación anual multianual
Fuente: elaboración propia

5.6.1.2.3 Número de días con lluvia

El número de días con lluvia es un parámetro climatológico de gran importancia para la planificación de proyectos pues de este dependen los diseños de los sistemas de drenaje relacionados directamente con las frecuencias, tiempos, periodos o meses de adecuación y construcción de los mismos, principalmente cuando se trata de obras con intervención de fuentes hídricas para asociarse con los periodos de niveles mínimos de flujo y días sin lluvia anuales. En la Tabla 17 y en la Figura 116 se presenta el número de días con lluvia en las estaciones de referencia.

Tabla 17. Número de días con lluvia en las estaciones con influencia en el sector en estudio

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
AEROPUERTO PALMASECA	10	10	13	16	16	11	9	8	11	17	15	12	142
CAJONES	11	11	14	16	17	15	15	12	11	18	18	14	164
CENICAÑA	10	10	14	16	14	10	7	7	11	16	16	11	131
EL PARAISO	8	9	11	12	10	6	4	5	7	13	13	11	107
ESPERANZA PRADERA	6	5	8	9	7	4	3	4	5	9	8	6	65
FLORIDA	9	9	11	13	12	8	6	6	9	14	14	11	121
INGENIO MANUELITA	9	10	13	16	15	11	9	9	11	17	16	12	139
LA ZAPATA	7	8	10	12	10	7	5	5	8	12	12	9	91
PALMIRA ICA	9	10	14	16	16	11	8	8	11	16	16	12	143
SEDE IDEAM CALI	10	11	15	17	15	11	8	8	11	16	16	12	152
TENERIFE	13	14	18	20	19	15	14	12	14	20	22	18	175
AUJI	7	8	10	11	10	7	5	5	7	13	14	10	103
AUSTRIA	10	10	12	14	14	9	7	7	10	15	16	12	129
BELLAVISTA	11	11	14	15	15	11	10	9	9	16	17	14	148
CHAMBÚ	9	10	13	15	14	9	7	8	10	16	16	12	135
LA CEJA	10	11	15	15	16	14	12	11	11	16	19	14	154
LA DIANA	10	10	12	14	13	8	7	7	9	15	16	12	132
LA SIRENA	12	12	16	17	17	16	15	13	11	17	19	15	176
LA SOLEDAD	11	12	15	17	17	13	10	9	11	19	20	15	165
LOS MINCHOS	10	10	14	15	14	11	8	7	10	16	17	12	141
PLANTA NIMA 1	8	9	11	13	12	7	6	6	8	13	13	10	112
PLANTA RIO CAUCA	8	8	10	14	12	8	6	6	8	13	11	9	107
SAN EMIGDIO	9	10	12	15	13	9	7	7	10	15	15	12	128
SAN NICOLAS	10	11	13	15	15	10	8	7	11	17	17	13	138
TENJO	9	9	12	13	12	7	6	6	9	14	14	11	118
VIJES	6	6	9	12	11	7	5	5	7	13	12	8	99

Fuente: elaboración propia

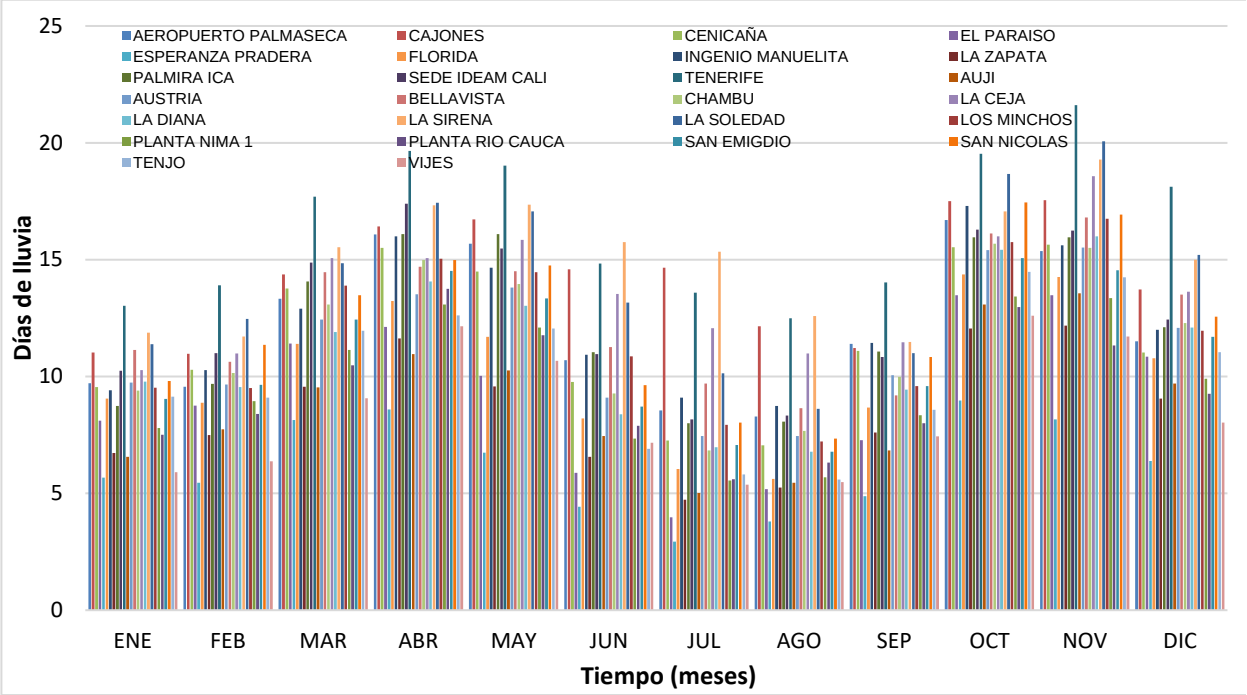


Figura 116. Distribución temporal de número de días con lluvia. Valores medios mensuales multianuales de días de lluvia en las estaciones de referencia.
Fuente: elaboración propia

Las estaciones aledañas al tramo de estudio presentan valores promedio mensual de número de días con lluvia que varían entre 8 y 15, donde los mayores valores se observan en los meses de abril, mayo, octubre y noviembre, mientras los registros más bajos se encuentran en los periodos enero-febrero, julio-agosto para la mayoría de las estaciones. La estación Esperanza Pradera presenta el menor valor de días con lluvia (3 días para julio), mientras que la estación Tenerife exhibe el valor más alto, siendo noviembre el mes con mayor número de días (22) con lluvia.

5.6.1.2.4 Polígonos de Thiessen

La metodología de los polígonos de Thiessen es empleada, en este caso, para conocer el área de influencia y peso que tiene cada una de las estaciones identificadas (ver Figura 117 y Tabla 18) sobre la zona de estudio.

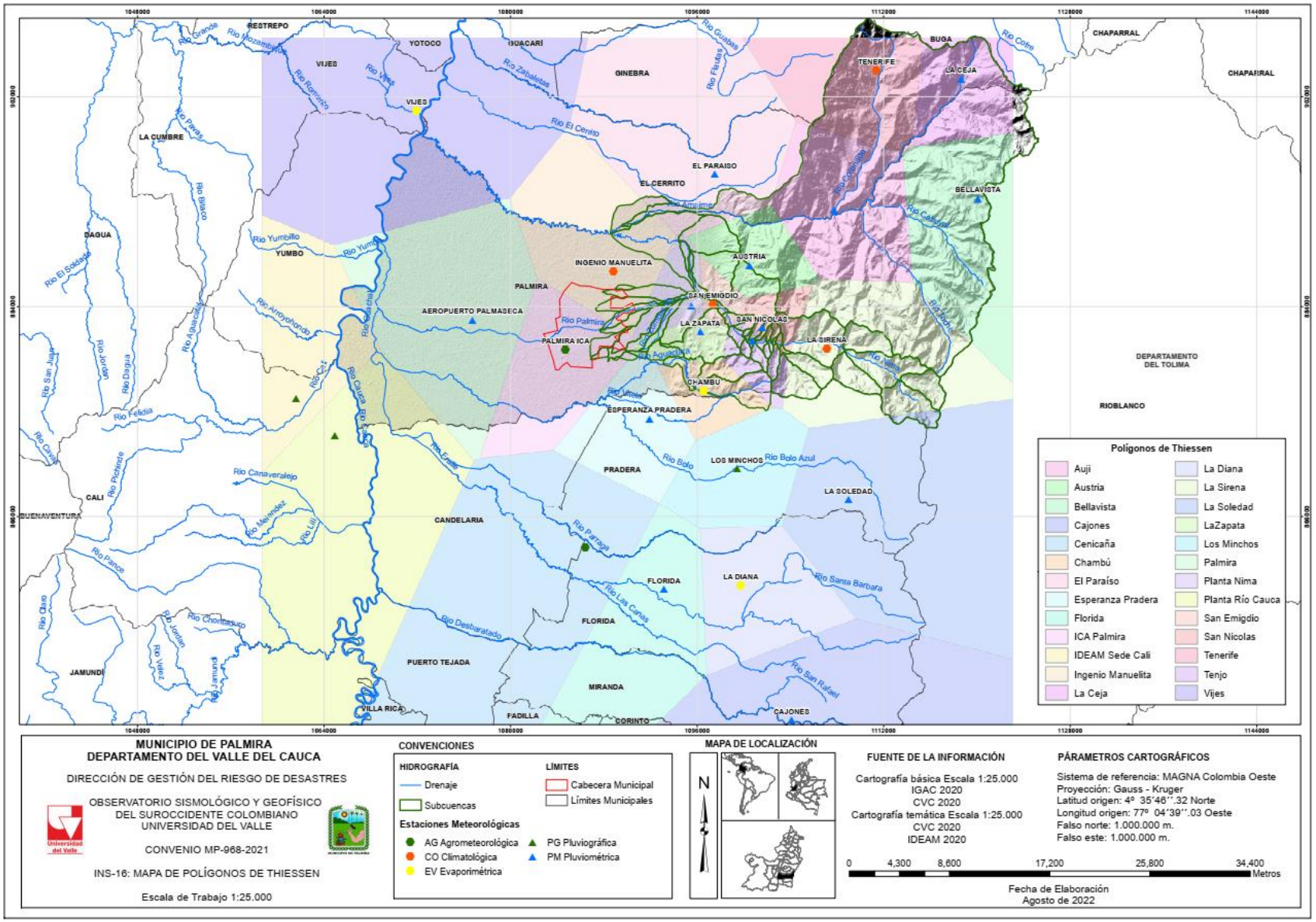


Figura 117. Área de influencia de las estaciones pluviométricas, respecto a la zona de estudio. Polígonos de Thiessen
Fuente: elaboración propia

Tabla 18. Peso de influencia de las estaciones en las subcuencas en estudio

ID Subcuenca	Estación	Área (ha)	Área (%)
A01	Auji	11750,95	25,3
	Austria	3035,48	6,5
	Bellavista	10794,73	23,2
	El Paraíso	1166,56	2,5
	Ingenio Manuelita	145,42	0,3
	La Ceja	6289,13	13,5
	La Sirena	5904,71	12,7
	San Nicolas	603,17	1,3
	Tenerife	6824,83	14,7
A02	El Paraíso	141,57	23,7
	Ingenio Manuelita	455,09	76,3
N01	La Sirena	675,87	99,9
	La Soledad	0,81	0,1
N02	La Sirena	920,25	72,9
	La Soledad	341,43	27,1
N03	La Sirena	1235,77	100,0
N04	La Sirena	802,66	100,0
N05	La Sirena	805,74	100,0
N06	La Sirena	1508,39	78,2
	San Nicolas	421,10	21,8
N07	San Nicolas	54,57	100,0
N08	San Nicolas	15,14	6,6
	Tenjo	214,17	93,4
N09	San Nicolas	17,74	100,0
N10	San Nicolas	92,66	100,0
N11	San Nicolas	10,70	32,4
	Tenjo	22,29	67,6
N12	Tenjo	61,41	100,0
N13	San Nicolas	56,27	98,8
	Tenjo	0,67	1,2
N14	San Nicolas	9,62	13,2
	Tenjo	63,11	86,8
N15	Tenjo	194,43	100,0
N16	San Nicolas	75,99	80,5
	Tenjo	18,40	19,5
N17	Tenjo	30,83	100,0
N18	San Nicolas	113,72	76,5
	Tenjo	34,88	23,5
N19	Tenjo	105,08	100,0

Tabla 18. Peso de influencia de las estaciones en las subcuencas en estudio

ID Subcuenca	Estación	Área (ha)	Área (%)
N20	Tenjo	25,17	100,0
N21	San Nicolas	1,14	3,6
	Tenjo	30,17	96,4
N22	San Nicolas	88,79	61,4
	Tenjo	55,78	38,6
N23	Tenjo	151,43	100,0
N24	San Emigdio	96,11	55,6
	San Nicolas	40,04	23,2
	Tenjo	36,66	21,2
N25	San Emigdio	68,81	100,0
N26	Austria	797,47	47,7
	San Emigdio	356,49	21,3
	San Nicolas	516,39	30,9
N27	Planta Nima	0,37	1,0
	San Emigdio	35,59	99,0
N28	Planta Nima	134,81	83,0
	San Emigdio	27,62	17,0
N29	Austria	508,04	42,6
	Planta Nima	172,35	14,5
	San Emigdio	510,93	42,9
N30	Planta Nima	117,27	100,0
N31	Austria	806,82	67,6
	El Paraíso	313,68	26,3
	Planta Nima	73,16	6,1
N32	El Paraíso	466,25	22,2
	Ingenio Manuelita	1234,46	58,7
	Planta Nima	401,87	19,1
QAC1	La Sirena	648,28	68,1
	San Nicolas	1,03	0,1
	Tenjo	302,97	31,8
QAC2	La Sirena	565,55	97,8
	San Nicolas	10,60	1,8
	Tenjo	2,15	0,4
QAC3	La Sirena	1,76	4,4
	San Nicolas	33,50	84,2
	Tenjo	4,53	11,4
QH1	Chambú	15,30	1,0
	La Zapata	1192,34	76,9
	San Emigdio	162,82	10,5

Tabla 18. Peso de influencia de las estaciones en las subcuencas en estudio

ID Subcuenca	Estación	Área (ha)	Área (%)
	Tenjo	180,09	11,6
QH2	La Zapata	328,15	35,2
	Planta Nima	497,88	53,4
	San Emigdio	105,86	11,4
QH3	La Zapata	331,19	100,0
RAC1	Chambú	869,77	67,5
	Tenjo	419,16	32,5
RAC2	Chambú	418,40	50,5
	La Zapata	16,09	1,9
	Tenjo	393,88	47,5
RAC3	Chambú	319,22	69,5
	La Zapata	140,36	30,5
RP1	ICA Palmira	39,83	9,3
	Ingenio Manuelita	221,97	52,0
	Planta Nima	164,58	38,5
	San Emigdio	0,82	0,2
ZN1	Ingenio Manuelita	50,91	100,0
ZN2	Ingenio Manuelita	277,17	48,0
	Planta Nima	300,78	52,0
ZN3	Ingenio Manuelita	361,11	88,6
	Planta Nima	46,44	11,4
ZS1	ICA Palmira	68,82	25,1
	Ingenio Manuelita	176,29	64,4
	Planta Nima	28,56	10,4
ZS2	ICA Palmira	173,45	29,9
	Ingenio Manuelita	42,86	7,4
	La Zapata	6,59	1,1
	Planta Nima	356,41	61,5
ZS3	ICA Palmira	85,05	100,0
ZS4	ICA Palmira	46,42	15,6
	La Zapata	109,73	36,8
	Planta Nima	142,09	47,6
ZS5	La Zapata	132,57	44,8
	Planta Nima	163,32	55,2
ZS6	Esperanza Pradera	20,83	33,5
	ICA Palmira	10,42	16,7
	La Zapata	30,99	49,8
ZS7	ICA Palmira	257,80	94,6
	Ingenio Manuelita	14,84	5,4

Tabla 18. Peso de influencia de las estaciones en las subcuencas en estudio

ID Subcuenca	Estación	Área (ha)	Área (%)
ZS8	ICA Palmira	86,75	100,0
ZS9	Esperanza Pradera	25,33	30,8
	ICA Palmira	56,87	69,2

Fuente: elaboración propia

5.6.1.3 Análisis de frecuencias y periodos de retorno de la precipitación

Se realizó un análisis de la información hidrológica con el fin de relacionar la magnitud de las precipitaciones máximas con su frecuencia de ocurrencia, mediante el uso de distribuciones de probabilidad (Anexo 3). Con base en las series de precipitaciones máximas anuales se calcularon las precipitaciones máximas para períodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 100, 300 y 500 años, aplicando un análisis de frecuencia, empleando como factor las distribuciones Normal, Gumbel, Pearson, Log Pearson y Log Normal para cada una de las estaciones (ver desde la Figura 118 hasta la Figura 134).

Como verificación de ajuste de las distribuciones de probabilidad al conjunto de las series históricas de las 17 estaciones con registros de lluvia operadas por la CVC y el IDEAM con influencia en el área de estudio y que fueron seleccionadas mediante los polígonos de Thiessen, (ver desde la Tabla 19 hasta la Tabla 35) se empleó la prueba de bondad de Chi cuadrado.

En la Figura 118 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación El Paraíso. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Gumbel (ver resultados en la Tabla 19).

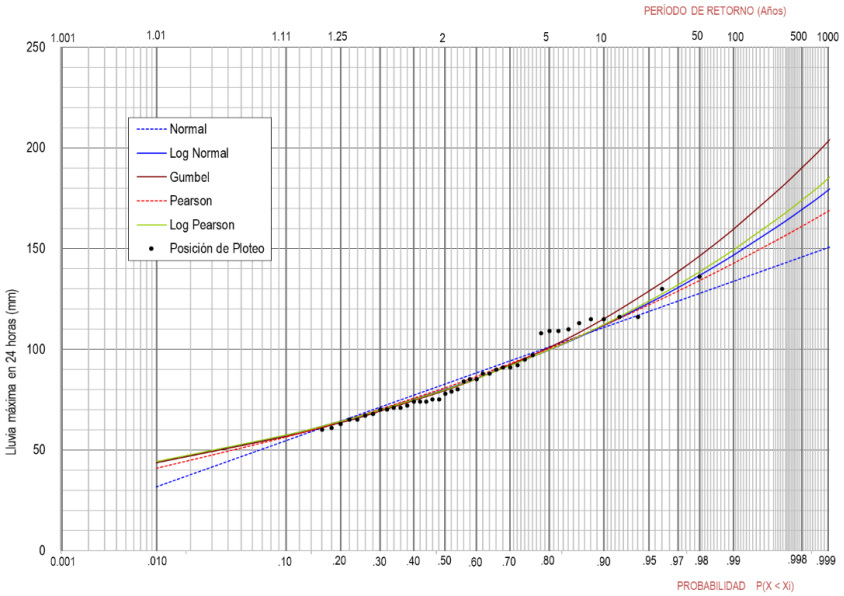


Figura 118. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación El Paraíso. Periodo: 1973 – 2021.
Fuente: elaboración propia

Tabla 19. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación El Paraíso. Periodo: 1973 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG- PEAR	LOG-NOR
2,33	86,7	83,4	84,7	83,6	83,8
5	101,2	100,8	100,4	99,7	99,6
10	110,9	115,0	111,8	112,2	111,7
25	121,2	132,9	125,0	127,4	126,2
50	127,8	146,2	134,1	138,4	136,6
100	133,8	159,4	142,6	149,3	146,6
300	142,2	180,2	155,3	166,2	162,1
500	145,9	189,9	161,0	174,1	169,2
chi 2	11,77	4,70	5,32	5,02	5,26

Fuente: elaboración propia

En la Figura 119 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación Esperanza Pradera. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Gumbel (ver resultados en la Tabla 20).

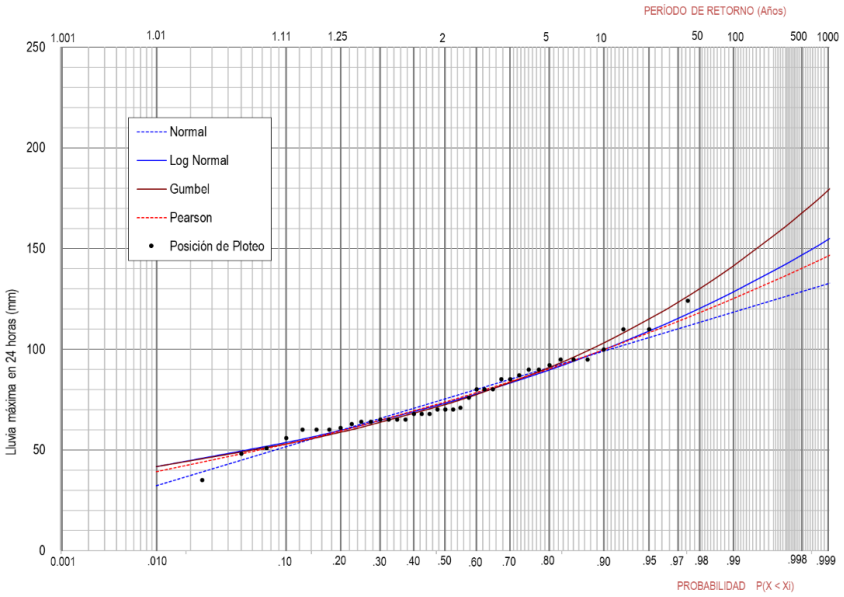


Figura 119. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Esperanza Paradera. Periodo: 1981 – 2021.
Fuente: elaboración propia

Tabla 20. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Esperanza Pradera. Periodo: 1981 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-NOR
2,33	78,7	76,0	77,2	76,5
5	91,0	90,9	90,3	89,8
10	99,1	103,1	99,9	99,8
25	107,8	118,5	110,8	111,8
50	113,4	129,9	118,2	120,3
100	118,4	141,3	125,2	128,5
300	125,6	159,2	135,6	141,1
500	128,6	167,5	140,2	146,8
chi 2	7,64	5,56	5,84	5,90

Fuente: elaboración propia

En la Figura 120 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación Ingenio Manuelita. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Pearson (ver resultados en la Tabla 21).

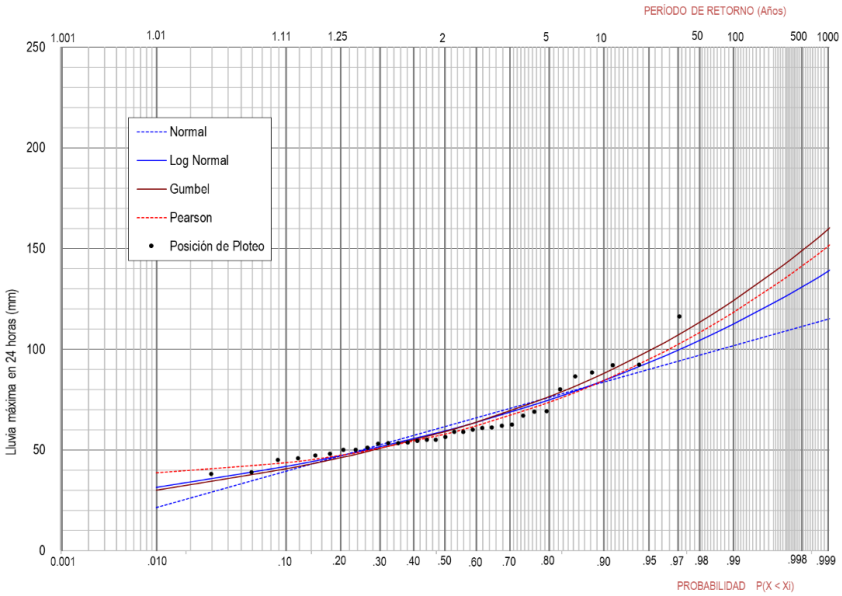


Figura 120. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Ingenio Manuelita. Periodo: 1973 – 2014.
Fuente: elaboración propia

Tabla 21. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Ingenio Manuelita. Periodo: 1973 – 2014.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-NOR
2,33	64,7	62,3	60,7	62,4
5	76,2	76,4	73,7	74,8
10	83,8	87,9	84,5	84,4
25	91,8	102,5	98,2	96,0
50	97,1	113,3	108,3	104,3
100	101,8	124,0	118,2	112,4
300	108,4	140,9	133,9	125,0
500	111,3	148,8	141,2	130,8
chi 2	19,69	7,85	5,96	8,84

Fuente: elaboración propia

En la Figura 121 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación La Zapata. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Normal (ver resultados en la Tabla 22).

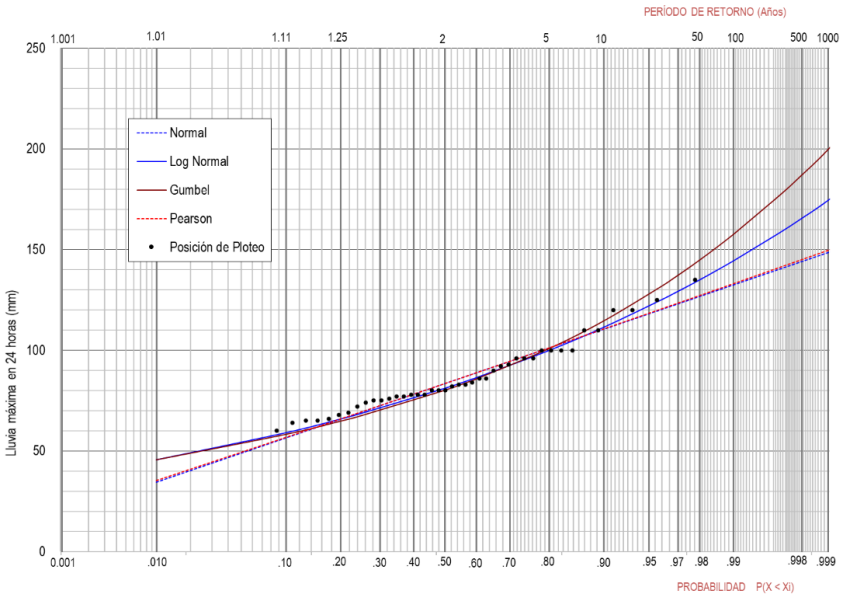


Figura 121. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación La Zapata. Periodo: 1975 – 2020.
Fuente: elaboración propia

Tabla 22. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación La Zapata. Periodo: 1975 – 2020.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-NOR
2,33	87,3	84,2	87,2	84,7
5	101,3	101,0	101,2	99,8
10	110,5	114,7	110,6	111,3
25	120,4	132,0	120,6	125,0
50	126,7	144,8	127,2	134,8
100	132,5	157,5	133,1	144,2
300	140,6	177,7	141,4	158,7
500	144,1	187,0	145,0	165,3
chi 2	12,46	19,25	12,56	17,36

Fuente: elaboración propia

En la Figura 122 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación Palmira ICA. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Pearson (ver resultados en la Tabla 23).

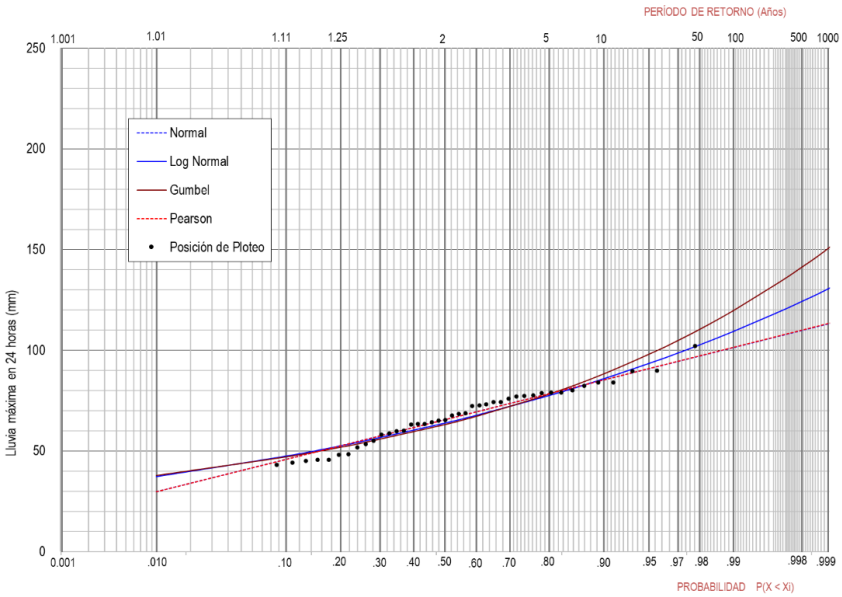


Figura 122. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Palmira ICA. Periodo: 1973 – 2021.
Fuente: elaboración propia

Tabla 23. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Palmira ICA. Periodo: 1973 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-NOR
2,33	68,3	66,0	68,3	66,5
5	78,5	78,3	78,5	77,6
10	85,3	88,3	85,3	85,9
25	92,5	101,0	92,5	95,7
50	97,1	110,3	97,2	102,7
100	101,3	119,7	101,4	109,3
300	107,3	134,4	107,4	119,6
500	109,8	141,2	109,9	124,2
chi 2	4,22	9,21	4,22	6,99

Fuente: elaboración propia

En la Figura 123 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación Tenerife. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Gumbel (ver resultados en la Tabla 24).

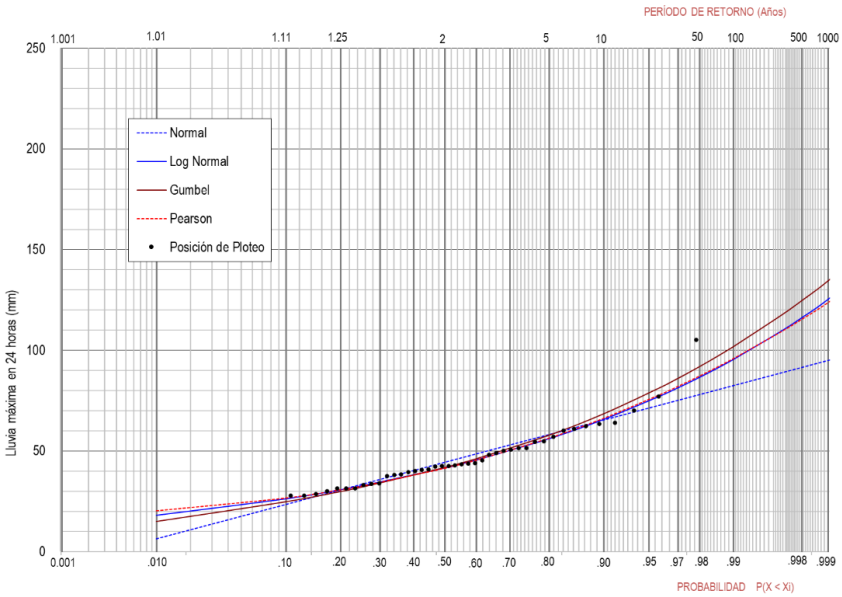


Figura 123. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Tenerife. Periodo: 1973 – 2021.
Fuente: elaboración propia

Tabla 24. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Tenerife. Periodo: 1973 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-NOR
2,33	47,3	44,9	44,1	44,4
5	58,2	57,9	56,4	56,3
10	65,4	68,5	66,2	65,8
25	73,0	82,0	78,3	77,8
50	78,0	91,9	87,2	86,6
100	82,4	101,8	95,8	95,5
300	88,7	117,4	109,1	109,6
500	91,4	124,7	115,3	116,2
chi 2	18,65	8,73	11,02	9,82

Fuente: elaboración propia

En la Figura 124 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación Auji. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Log Pearson (ver resultados en la Tabla 25).

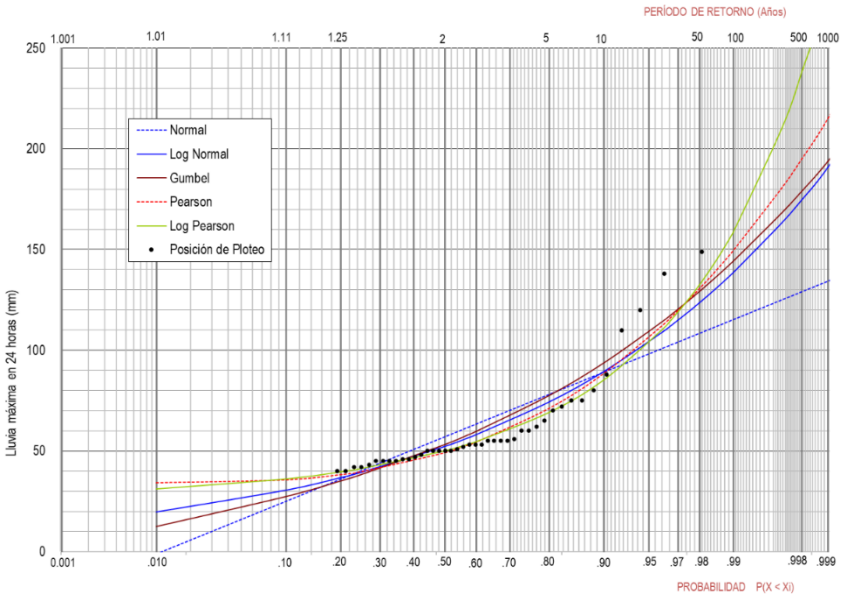


Figura 124. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Auji. Periodo: 1971 – 2021.
Fuente: elaboración propia

Tabla 25. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Auji. Periodo: 1971 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEARSON	LOG-NOR
2,33	61,5	57,7	52,7	53,1	56,3
5	78,1	77,5	71,2	69,1	74,3
10	89,1	93,6	88,5	85,2	89,4
25	100,8	114,0	112,1	110,1	108,8
50	108,4	129,1	130,6	132,4	123,5
100	115,2	144,1	149,4	158,5	138,5
300	124,8	167,8	180,2	209,4	162,8
500	129,0	178,8	194,9	237,8	174,5
chi 2	237,71	77,05	23,08	20,60	46,11

Fuente: elaboración propia

En la Figura 125 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación Austria. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Log Pearson (ver resultados en la Tabla 26).

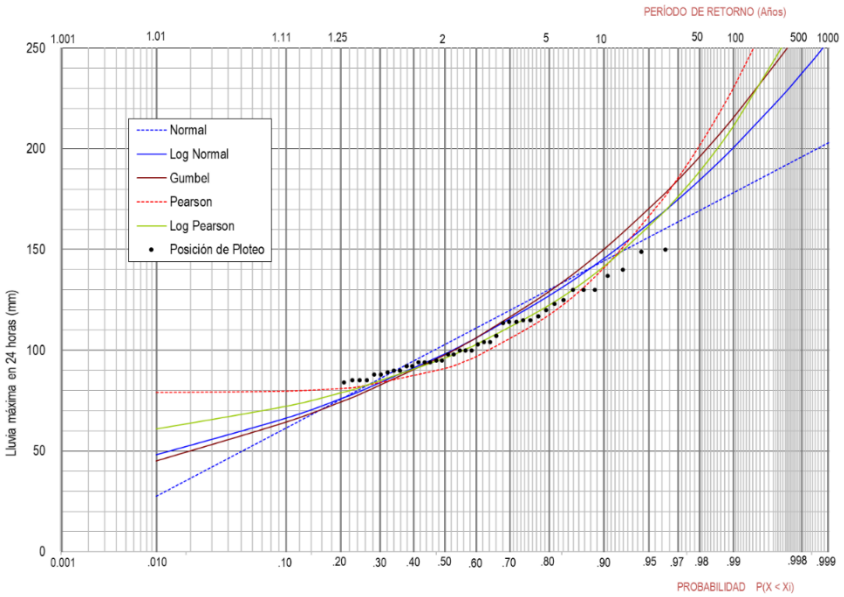


Figura 125. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Austria. Periodo: 1969 – 2021.
Fuente: elaboración propia

Tabla 26. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Austria. Periodo: 1969 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEARSON	LOG-NOR
2,33	108,7	103,7	94,9	100,8	103,7
5	130,1	129,3	117,5	122,4	127,1
10	144,4	150,2	140,8	141,5	145,5
25	159,5	176,5	174,3	167,6	168,0
50	169,3	196,1	201,5	188,7	184,4
100	178,1	215,5	229,9	211,0	200,5
300	190,6	246,1	277,4	249,9	225,7
500	196,0	260,3	300,4	269,6	237,4
chi 2	102,58	57,50	58,94	43,28	55,87

Fuente: elaboración propia

En la Figura 126 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación Bellavista. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Gumbel (ver resultados en la Tabla 27).

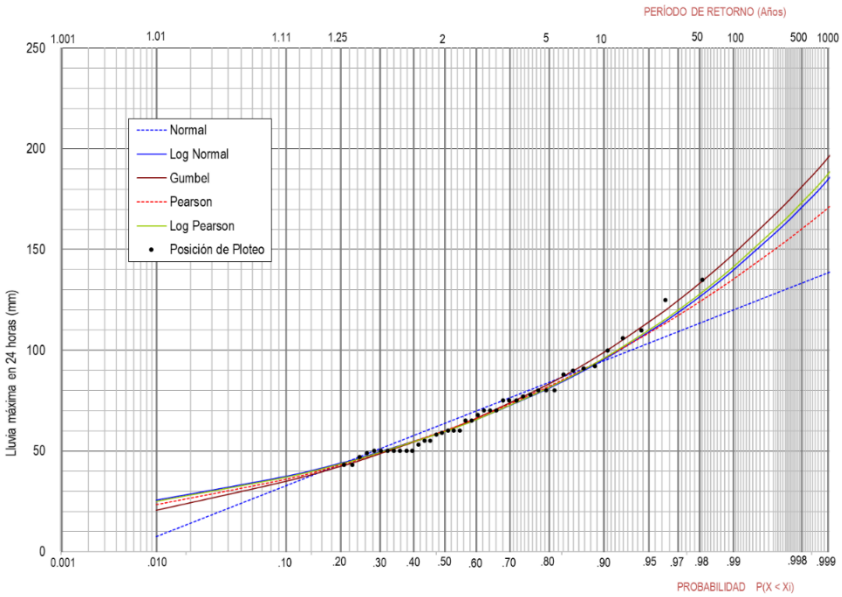


Figura 126. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Bellavista. Periodo: 1970 – 2021.
Fuente: elaboración propia

Tabla 27. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Bellavista. Periodo: 1970 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEARSON	LOG-NOR
2,33	2,33	68,1	64,4	64,5	63,7
5	5	84,1	83,5	82,2	81,5
10	10	94,7	99,0	96,0	96,0
25	25	106,0	118,7	112,4	114,2
50	50	113,3	133,3	124,1	127,8
100	100	119,9	147,7	135,3	141,4
300	300	129,2	170,6	152,5	163,1
500	500	133,2	181,2	160,2	173,3
chi 2	**chi 2**	32,88	3,18	4,76	4,06

Fuente: elaboración propia

En la Figura 127 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación Chambú. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Log Pearson (ver resultados en la Tabla 28).

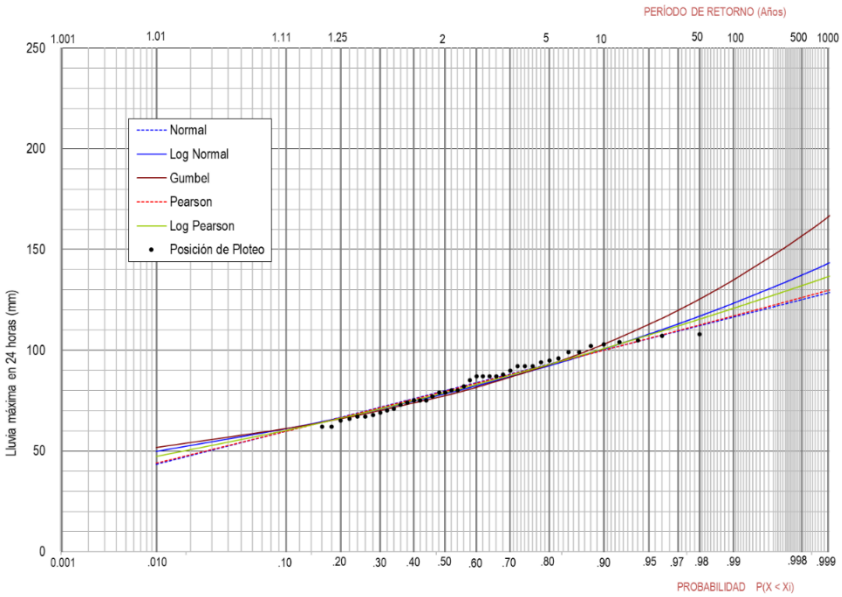


Figura 127. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Chambú. Periodo: 1973 – 2021.
Fuente: elaboración propia

Tabla 28. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Chambú. Periodo: 1973 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEARSON	LOG-NOR
2,33	82,6	80,2	82,5	81,8	81,1
5	93,0	92,7	93,0	92,9	92,3
10	100,0	102,9	100,1	100,8	100,5
25	107,3	115,7	107,7	109,5	110,2
50	112,1	125,3	112,6	115,4	116,9
100	116,4	134,7	117,1	120,8	123,2
300	122,4	149,7	123,5	128,6	132,9
500	125,0	156,6	126,2	132,0	137,2
chi 2	2,90	6,86	2,81	2,76	4,08

Fuente: elaboración propia

En la Figura 128 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación La Ceja. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Log Pearson (ver resultados en la Tabla 29).

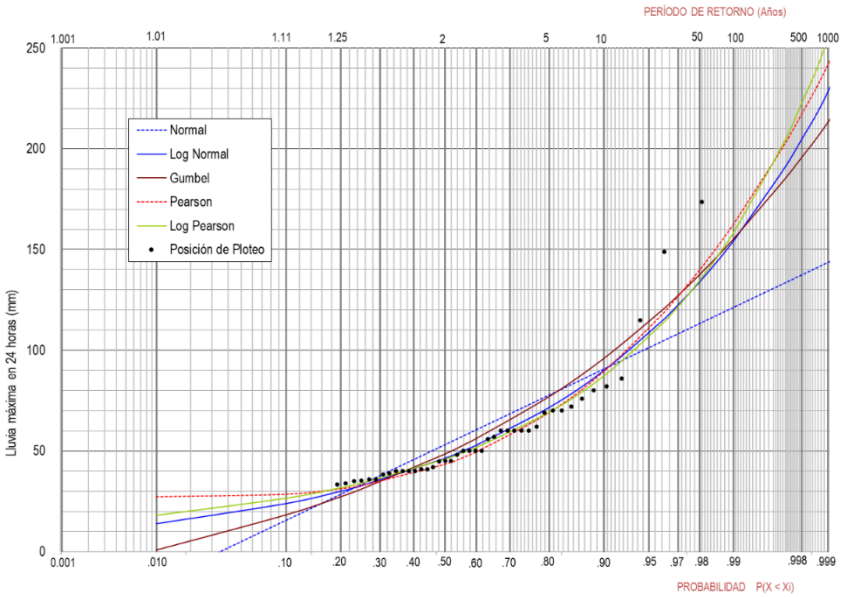


Figura 128. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación La Ceja. Periodo: 1971 – 2021.
Fuente: elaboración propia

Tabla 29. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación La Ceja. Periodo: 1971 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEARSON	LOG-NOR
2,33	58,3	53,8	47,7	50,1	51,0
5	77,7	77,0	69,1	69,4	71,7
10	90,6	95,9	89,6	87,3	89,9
25	104,3	119,8	117,7	113,0	114,5
50	113,2	137,5	139,7	134,5	133,9
100	121,1	155,0	162,4	158,1	154,0
300	132,4	182,8	199,5	200,5	188,0
500	137,3	195,6	217,2	222,6	204,6
chi 2	383,11	112,29	32,42	29,15	35,43

Fuente: elaboración propia

En la Figura 129 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación La Sirena. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Pearson (ver resultados en la Tabla 30).

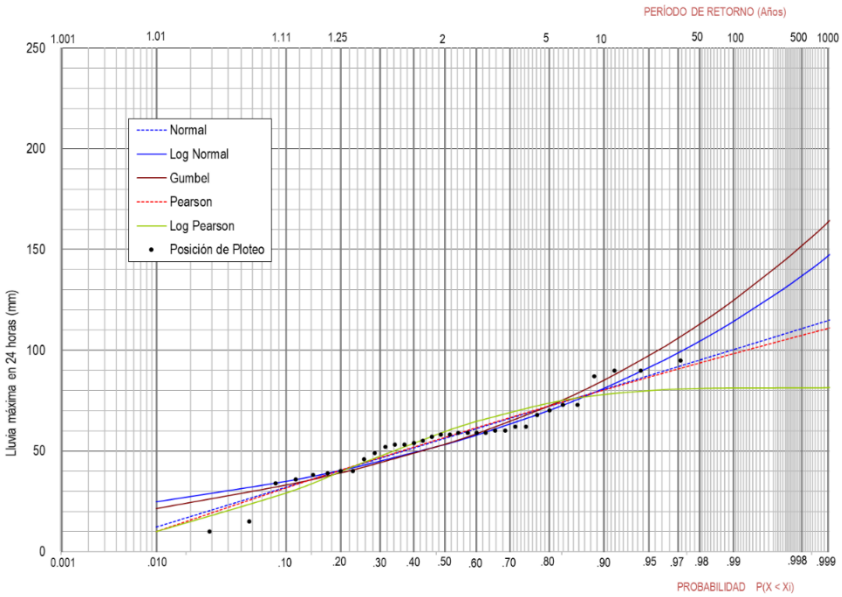


Figura 129. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación La Sirena. Periodo: 1988 – 2021.
Fuente: elaboración propia

Tabla 30. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación La Sirena. Periodo: 1988 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEARSON	LOG-NOR
2,33	59,6	56,9	60,1	63,3	56,5
5	72,2	72,4	72,3	73,8	70,3
10	80,6	85,1	80,2	78,0	81,2
25	89,4	101,0	88,4	80,4	94,7
50	95,2	112,9	93,6	81,1	104,5
100	100,4	124,6	98,2	81,3	114,3
300	107,7	143,2	104,7	81,3	129,8
500	110,8	151,8	107,4	81,4	137,0
chi 2	16,93	27,47	15,89	22,02	28,83

Fuente: elaboración propia

En la Figura 130 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación La Soledad. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Log Normal (ver resultados en la Tabla 31).

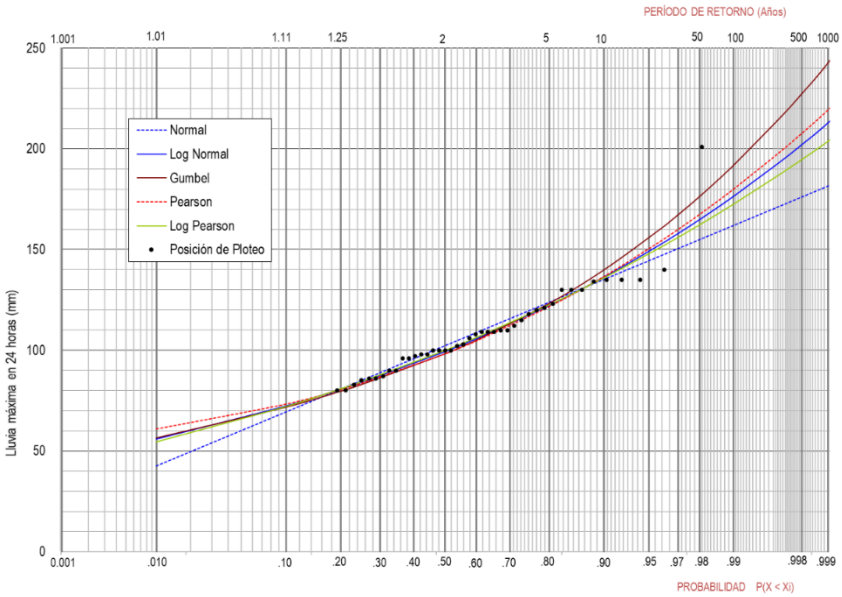


Figura 130. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación La Soledad. Periodo: 1971 – 2021.
Fuente: elaboración propia

Tabla 31. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación La Soledad. Periodo: 1971 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEARSON	LOG-NOR
2,33	106,9	103,0	102,7	104,4	103,8
5	123,9	123,3	121,7	122,5	122,2
10	135,2	139,9	136,6	135,9	136,2
25	147,3	160,8	154,6	151,4	152,9
50	155,0	176,3	167,4	162,2	164,8
100	162,0	191,7	179,8	172,4	176,3
300	171,9	216,0	198,9	187,7	193,9
500	176,2	227,3	207,6	194,6	201,9
chi 2	18,26	13,62	15,34	13,90	13,57

Fuente: elaboración propia

En la Figura 131 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación Planta Nima. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Log Pearson (ver resultados en la Tabla 32).

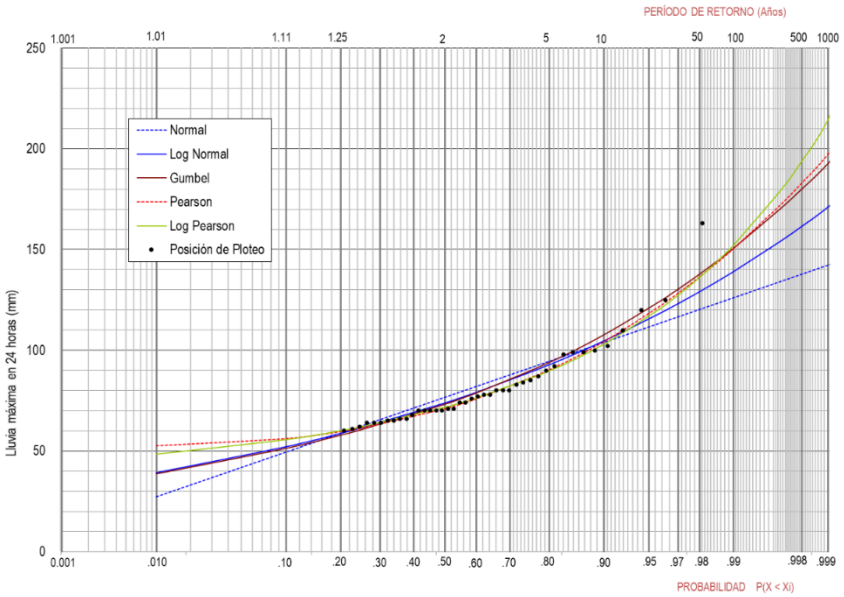


Figura 131. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Planta Nima. Periodo: 1970 – 2021.
Fuente: elaboración propia

Tabla 32. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Planta Nima. Periodo: 1970 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEARSON	LOG-NOR
2,33	80,4	77,1	74,3	75,0	77,5
5	94,5	93,9	90,3	89,8	92,8
10	103,8	107,6	104,3	103,1	104,6
25	113,8	124,9	122,6	121,4	118,8
50	120,2	137,7	136,4	136,2	129,0
100	126,0	150,5	150,3	152,0	139,0
300	134,2	170,5	172,6	179,7	154,4
500	137,7	179,9	183,0	193,9	161,4
chi 2	42,09	12,37	6,83	6,21	15,20

Fuente: elaboración propia

En la Figura 132 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación San Emigdio. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Log Pearson (ver resultados en la Tabla 33).

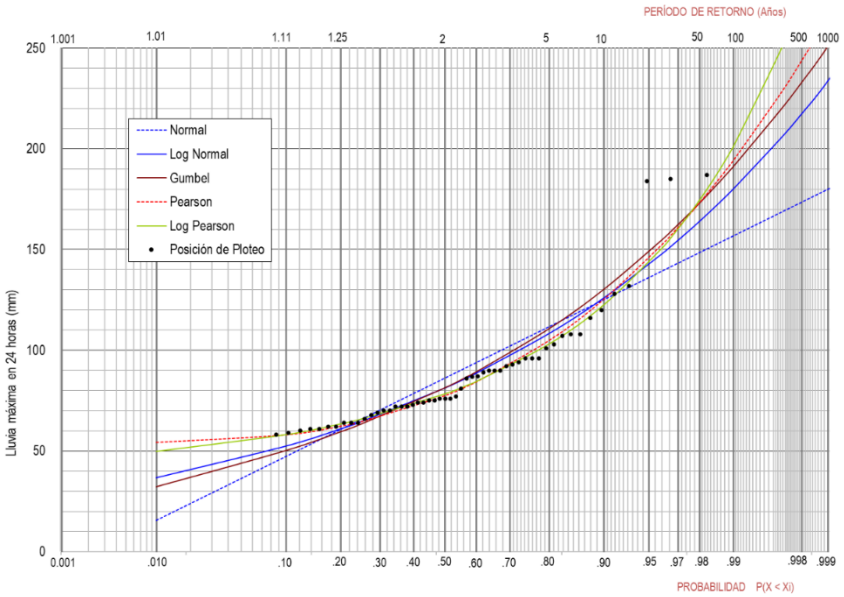


Figura 132. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación San Emigdio. Periodo: 1965 – 2021.
Fuente: elaboración propia

Tabla 33. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación San Emigdio. Periodo: 1965 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEARSON	LOG-NOR
2,33	91,6	86,8	82,2	82,7	86,4
5	111,7	110,7	104,9	103,2	108,3
10	125,0	130,2	125,3	122,6	125,9
25	139,3	154,7	152,4	150,7	147,8
50	148,4	173,0	173,1	174,5	164,0
100	156,7	191,1	194,0	201,0	180,0
300	168,4	219,6	227,8	249,6	205,5
500	173,5	232,9	243,7	275,3	217,4
chi 2	134,64	47,86	21,11	20,39	40,77

Fuente: elaboración propia

En la Figura 133 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación San Nicolas. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Log Normal (ver resultados en la Tabla 34).

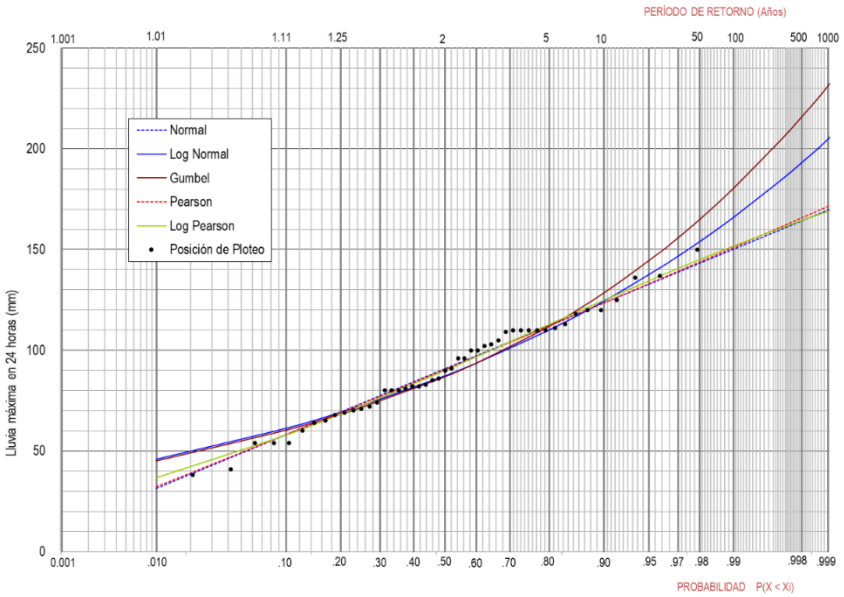


Figura 133. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación San Nicolas. Periodo: 1970 – 2020.
Fuente: elaboración propia

Tabla 34. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación San Nicolas. Periodo: 1970 – 2020.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEARSON	LOG-NOR
2,33	95,3	91,4	95,1	94,8	91,8
5	112,2	111,8	112,1	112,9	110,2
10	123,4	128,3	123,6	124,9	124,4
25	135,4	149,2	135,8	137,3	141,6
50	143,1	164,8	143,8	145,1	153,9
100	150,1	180,2	151,1	151,8	165,9
300	159,9	204,5	161,4	160,8	184,6
500	164,1	215,8	165,8	164,5	193,2
chi 2	4,57	15,42	4,63	4,73	14,16

Fuente: elaboración propia

En la Figura 134 se presentan los resultados obtenidos para las diferentes distribuciones empleadas en la estación Tenjo. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Log Pearson (ver resultados en la Tabla 35).

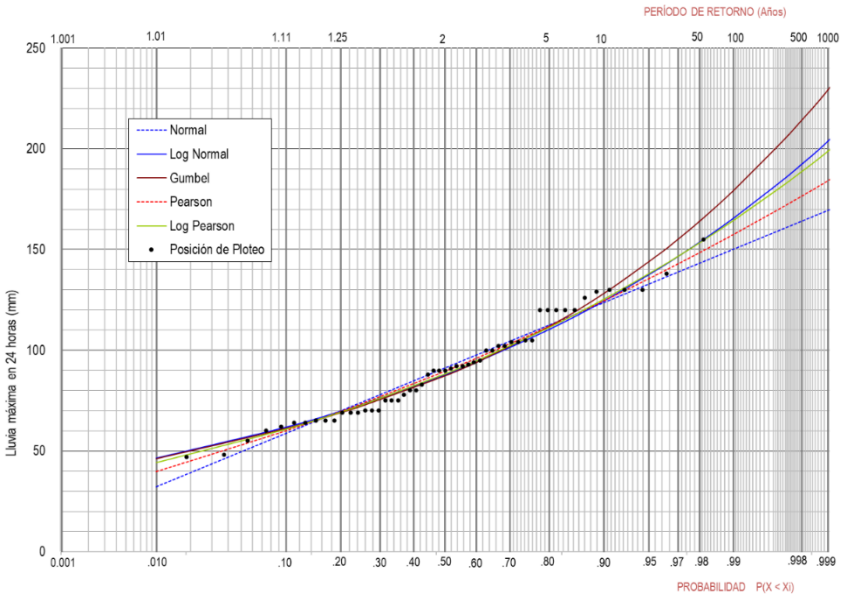


Figura 134. Precipitaciones máximas características para diferentes periodos de retorno. Estación Tenjo. Periodo: 1969 – 2021.
Fuente: elaboración propia

Tabla 35. Resumen precipitaciones máximas esperadas (predicción) asociadas a diferentes períodos de retorno. Estación Tenjo. Periodo: 1969 – 2021.

Tr. Años	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-PEARSON	LOG-NOR
2,33	95,7	91,8	94,0	92,8	92,2
5	112,5	111,8	111,8	111,4	110,5
10	123,6	128,1	124,5	125,4	124,6
25	135,5	148,7	138,8	141,8	141,6
50	143,2	164,0	148,4	153,4	153,7
100	150,1	179,2	157,4	164,4	165,6
300	159,8	203,1	170,7	181,2	184,0
500	164,0	214,2	176,5	188,8	192,4
chi 2	12,18	8,64	7,25	6,78	8,43

Fuente: elaboración propia

5.6.1.4 Hietogramas de diseño

Para definir la lluvia de diseño se recurre a las Curvas IDF de las estaciones El Paraíso, Esperanza Pradera, Ingenio Manuelita, La Zapata, ICA Palmira, Tenerife, Auji, Austria, Bellavista, Chambú, La Ceja, La Sirena, La Soledad, Planta Nima, San Emigdio, San Nicolas y Tenjo con influencia en el área de estudio (Anexo 4).

Dichas curvas IDF fueron obtenidas mediante la metodología de “Curvas Sintéticas Regionalizadas de Intensidad – Duración – Frecuencia para Colombia” (Díaz-Granados, 2011), esto con el objetivo de determinar o generar los hietogramas de diseño, empleando el método de bloque alterno (Chow, 1994), la cual se basa en la intensidad de la precipitación para diferentes tiempos de duración. El hietograma es la representación de la distribución temporal de la intensidad de las precipitaciones, para el caso de estudio se supone una lluvia de 180 minutos

de duración, de acuerdo con lo indicado en el manual de drenajes para carreteras (Ministerio de Transporte- Instituto Nacional de Vías, 2009), a una intensidad asociada a tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200 300, 400 y 500 años (ver desde la Figura 135 hasta la Figura 168 y desde Tabla 36 hasta la Tabla 52).

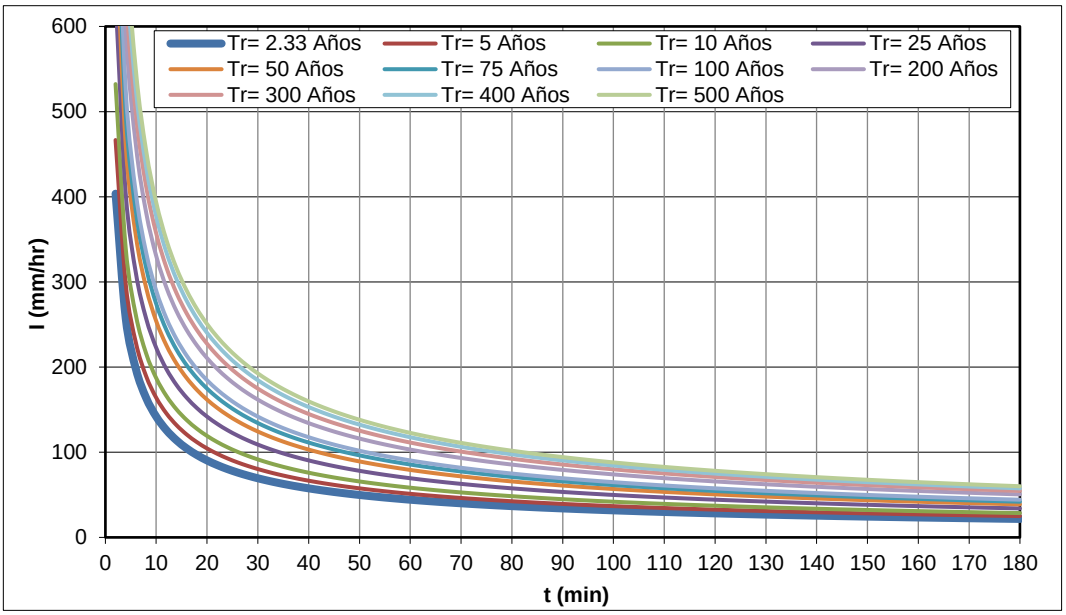


Figura 135. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación El Paraíso.
Fuente: elaboración propia

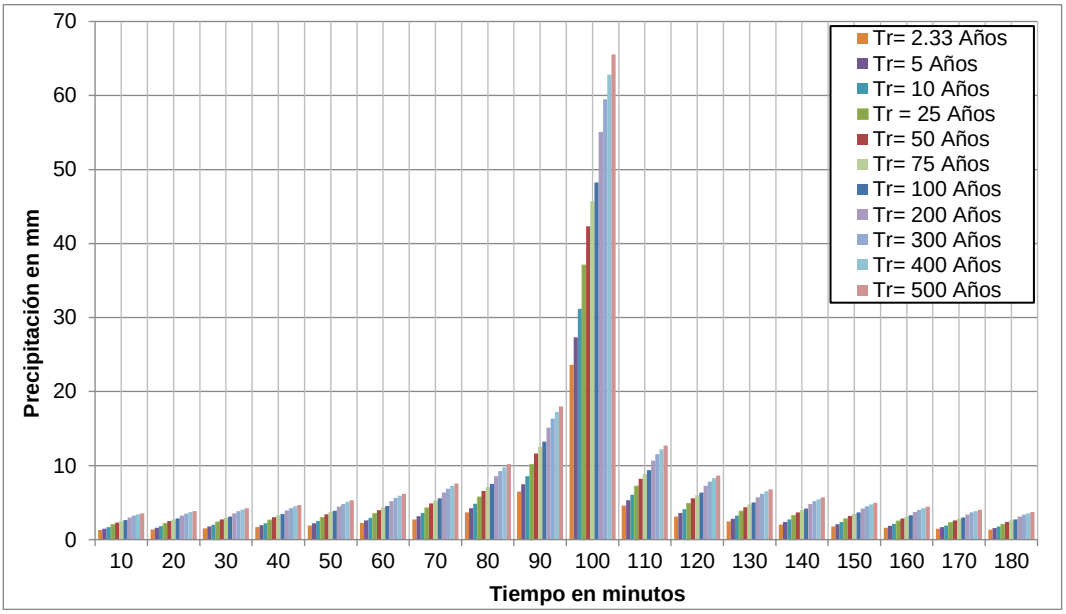


Figura 136. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación El Paraíso
Fuente: elaboración propia

Tabla 36. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación El Paraíso

Duración	Precipitación (mm)										
(min)	Tr=2,33	Tr = 5	Tr= 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,5	2,6	3,0	3,2	3,4	3,6
20	1,4	1,6	1,8	2,2	2,5	2,7	2,8	3,2	3,5	3,7	3,9
30	1,5	1,8	2,0	2,4	2,7	2,9	3,1	3,6	3,8	4,1	4,2
40	1,7	2,0	2,2	2,7	3,0	3,3	3,5	3,9	4,3	4,5	4,7
50	1,9	2,2	2,5	3,0	3,4	3,7	3,9	4,5	4,8	5,1	5,3
60	2,2	2,6	2,9	3,5	4,0	4,3	4,6	5,2	5,6	5,9	6,2
70	2,7	3,2	3,6	4,3	4,9	5,3	5,6	6,4	6,9	7,3	7,6
80	3,7	4,3	4,8	5,8	6,6	7,1	7,5	8,6	9,3	9,8	10,2
90	6,5	7,5	8,6	10,2	11,6	12,5	13,3	15,1	16,3	17,2	18,0
100	23,6	27,3	31,2	37,1	42,3	45,7	48,3	55,1	59,5	62,8	65,5
110	4,6	5,3	6,1	7,2	8,2	8,9	9,4	10,7	11,6	12,2	12,7
120	3,1	3,6	4,1	4,9	5,6	6,0	6,4	7,3	7,8	8,3	8,6
130	2,5	2,8	3,2	3,8	4,4	4,7	5,0	5,7	6,2	6,5	6,8
140	2,1	2,4	2,7	3,2	3,7	4,0	4,2	4,8	5,2	5,5	5,7
150	1,8	2,1	2,4	2,8	3,2	3,5	3,7	4,2	4,5	4,8	5,0
160	1,6	1,9	2,1	2,5	2,9	3,1	3,3	3,7	4,0	4,3	4,4
170	1,5	1,7	1,9	2,3	2,6	2,8	3,0	3,4	3,7	3,9	4,0
180	1,3	1,5	1,8	2,1	2,4	2,6	2,7	3,1	3,4	3,6	3,7

Fuente: elaboración propia

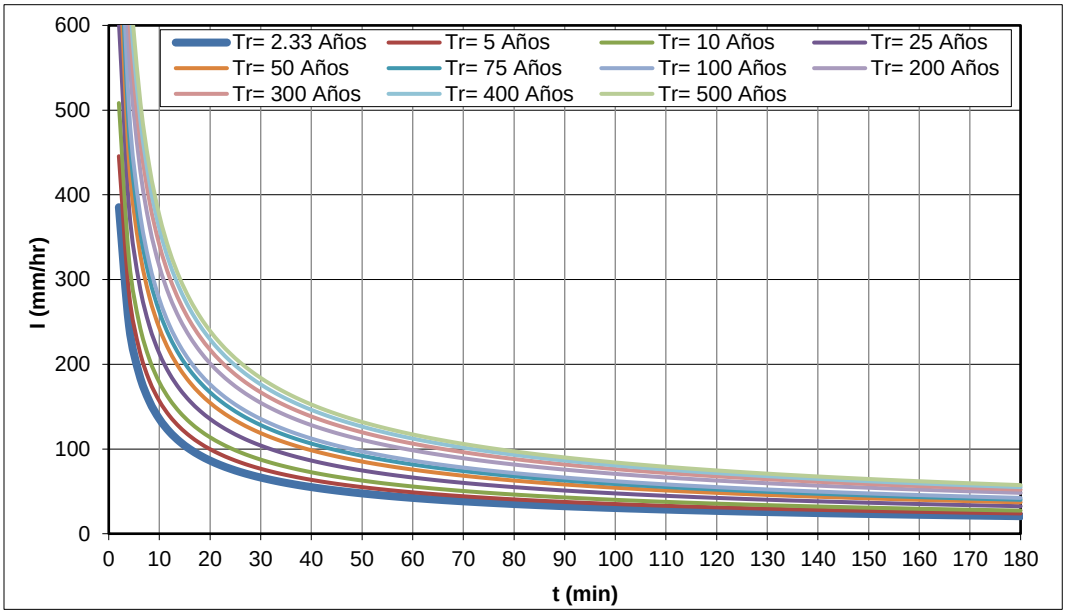


Figura 137. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Esperanza Pradera.
Fuente: elaboración propia

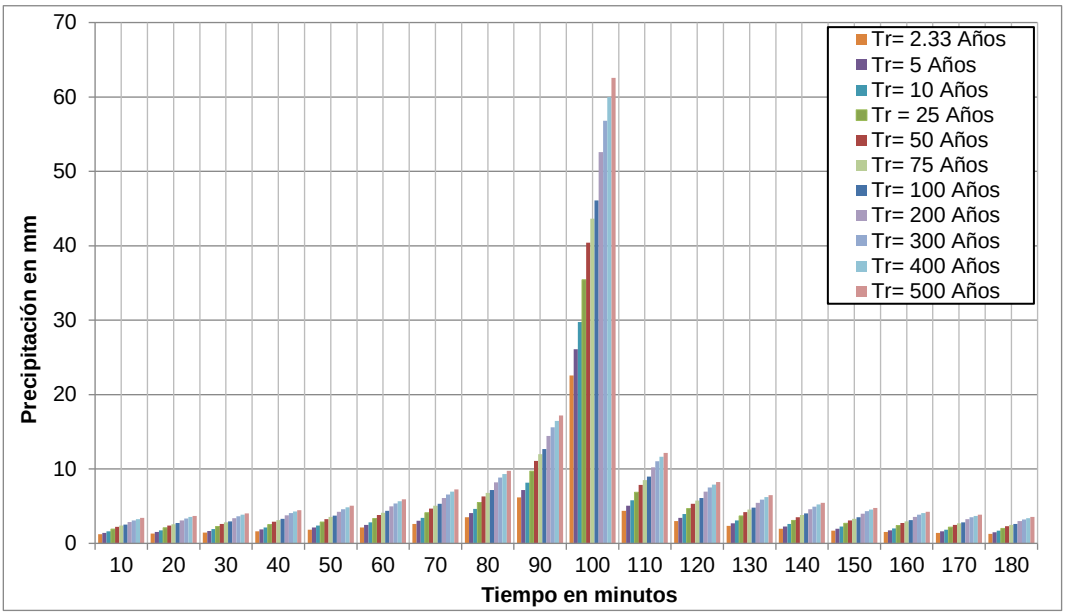


Figura 138. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Esperanza Pradera
Fuente: elaboración propia

Tabla 37. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Esperanza Pradera

Duración	Precipitación (mm)										
(min)	Tr=2,33	Tr = 5	Tr= 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	1,2	1,4	1,6	1,9	2,2	2,4	2,5	2,9	3,1	3,3	3,4
20	1,3	1,5	1,8	2,1	2,4	2,6	2,7	3,1	3,3	3,5	3,7
30	1,5	1,7	1,9	2,3	2,6	2,8	3,0	3,4	3,7	3,9	4,0
40	1,6	1,9	2,1	2,5	2,9	3,1	3,3	3,8	4,1	4,3	4,5
50	1,8	2,1	2,4	2,9	3,3	3,5	3,7	4,3	4,6	4,9	5,1
60	2,1	2,5	2,8	3,3	3,8	4,1	4,4	5,0	5,4	5,7	5,9
70	2,6	3,0	3,4	4,1	4,7	5,1	5,3	6,1	6,6	6,9	7,2
80	3,5	4,1	4,6	5,5	6,3	6,8	7,2	8,2	8,8	9,3	9,7
90	6,2	7,2	8,2	9,7	11,1	12,0	12,7	14,4	15,6	16,5	17,2
100	22,6	26,1	29,8	35,4	40,4	43,6	46,1	52,6	56,8	60,0	62,6
110	4,4	5,1	5,8	6,9	7,9	8,5	9,0	10,2	11,0	11,7	12,2
120	3,0	3,4	3,9	4,7	5,3	5,8	6,1	6,9	7,5	7,9	8,3
130	2,3	2,7	3,1	3,7	4,2	4,5	4,8	5,5	5,9	6,2	6,5
140	2,0	2,3	2,6	3,1	3,5	3,8	4,0	4,6	4,9	5,2	5,5
150	1,7	2,0	2,3	2,7	3,1	3,3	3,5	4,0	4,3	4,6	4,8
160	1,5	1,8	2,0	2,4	2,7	3,0	3,1	3,6	3,9	4,1	4,2
170	1,4	1,6	1,8	2,2	2,5	2,7	2,8	3,2	3,5	3,7	3,9
180	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,5	2,6	3,0	3,2	3,4	3,5

Fuente: elaboración propia

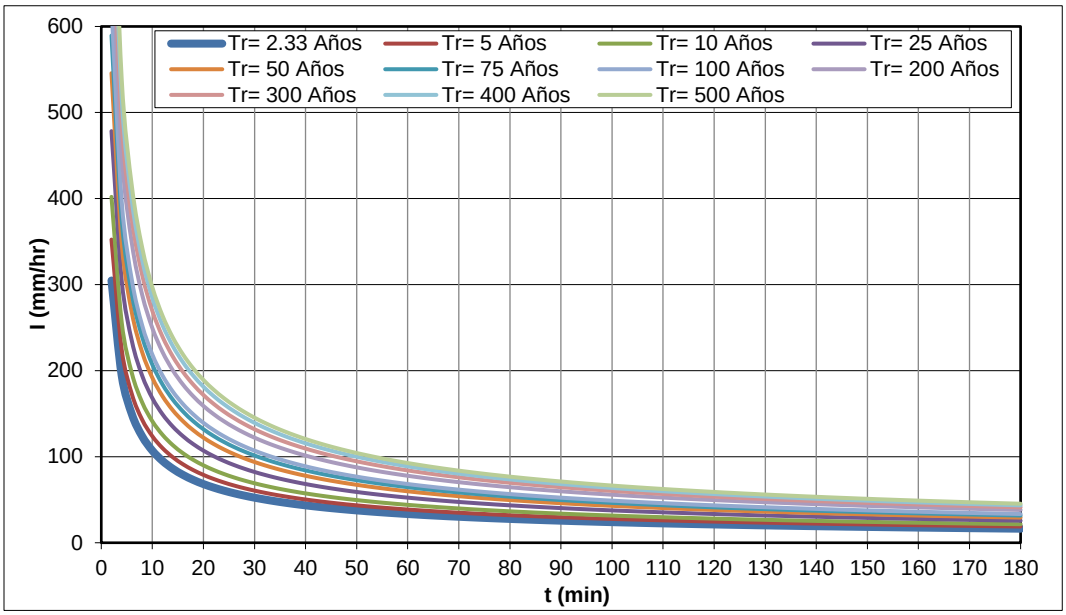


Figura 139. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Ingenio Manuelita.
Fuente: elaboración propia

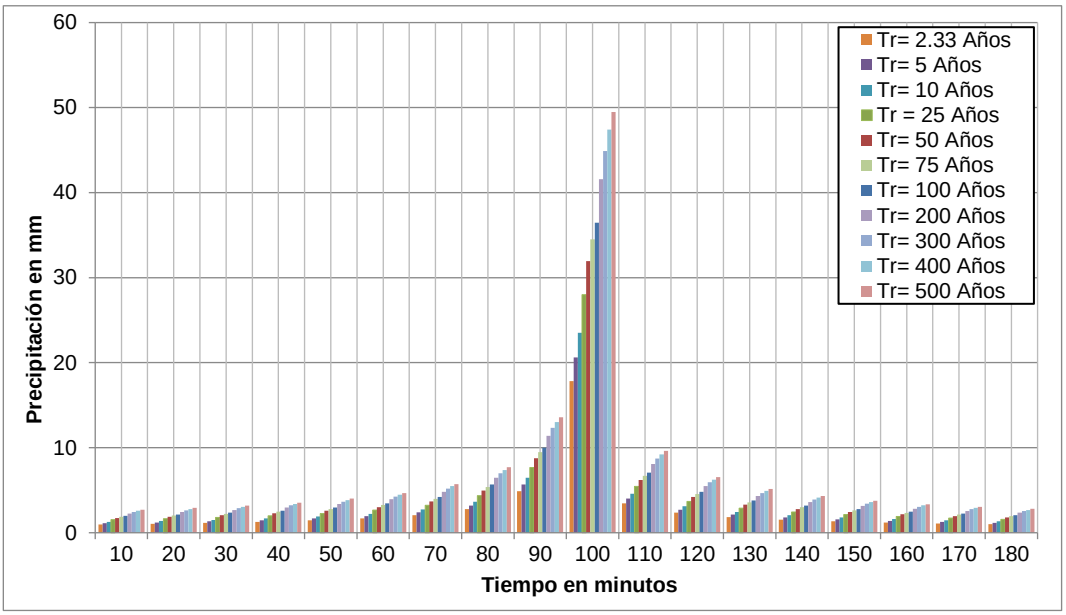


Figura 140. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Ingenio Manuelita
Fuente: elaboración propia

Tabla 38. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Ingenio Manuelita

Duración	Precipitación (mm)										
(min)	Tr=2,33	Tr = 5	Tr= 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	1,0	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,0	2,3	2,4	2,6	2,7
20	1,1	1,2	1,4	1,7	1,9	2,0	2,1	2,5	2,6	2,8	2,9
30	1,2	1,3	1,5	1,8	2,1	2,2	2,4	2,7	2,9	3,1	3,2
40	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,5	2,6	3,0	3,2	3,4	3,5
50	1,4	1,7	1,9	2,3	2,6	2,8	3,0	3,4	3,6	3,8	4,0
60	1,7	2,0	2,2	2,6	3,0	3,3	3,4	3,9	4,2	4,5	4,7
70	2,1	2,4	2,7	3,2	3,7	4,0	4,2	4,8	5,2	5,5	5,7
80	2,8	3,2	3,7	4,4	5,0	5,4	5,7	6,5	7,0	7,4	7,7
90	4,9	5,7	6,5	7,7	8,8	9,5	10,0	11,4	12,3	13,0	13,6
100	17,8	20,6	23,5	28,0	32,0	34,5	36,4	41,6	44,9	47,4	49,5
110	3,5	4,0	4,6	5,4	6,2	6,7	7,1	8,1	8,7	9,2	9,6
120	2,4	2,7	3,1	3,7	4,2	4,6	4,8	5,5	5,9	6,3	6,5
130	1,9	2,1	2,4	2,9	3,3	3,6	3,8	4,3	4,7	4,9	5,1
140	1,6	1,8	2,1	2,4	2,8	3,0	3,2	3,6	3,9	4,1	4,3
150	1,4	1,6	1,8	2,1	2,4	2,6	2,8	3,2	3,4	3,6	3,8
160	1,2	1,4	1,6	1,9	2,2	2,3	2,5	2,8	3,0	3,2	3,4
170	1,1	1,3	1,4	1,7	2,0	2,1	2,2	2,6	2,8	2,9	3,0
180	1,0	1,2	1,3	1,6	1,8	2,0	2,1	2,4	2,5	2,7	2,8

Fuente: elaboración propia

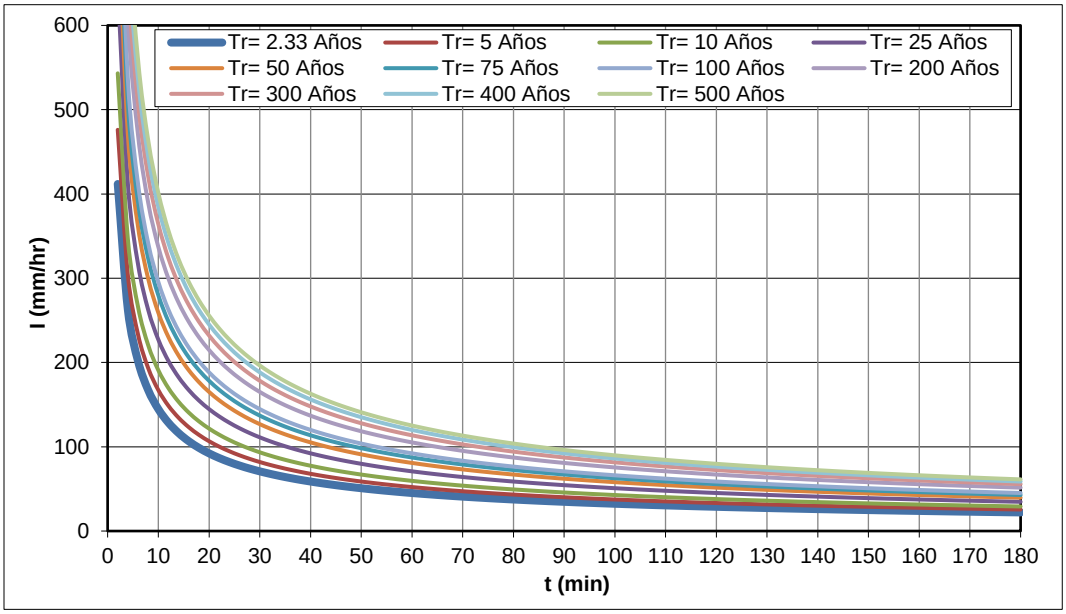


Figura 141. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación La Zapata.
Fuente: elaboración propia

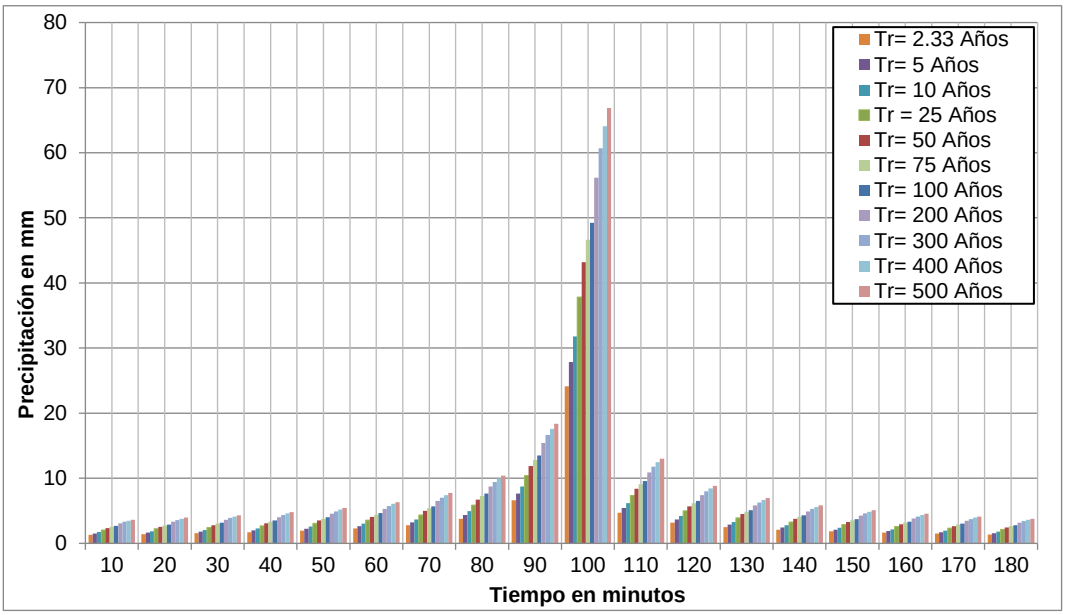


Figura 142. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Zapata
Fuente: elaboración propia

Tabla 39. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Zapata

Duración	Precipitación (mm)										
(min)	Tr=2,33	Tr = 5	Tr= 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	1,3	1,5	1,7	2,1	2,4	2,5	2,7	3,1	3,3	3,5	3,6
20	1,4	1,6	1,9	2,2	2,5	2,7	2,9	3,3	3,6	3,8	3,9
30	1,6	1,8	2,1	2,4	2,8	3,0	3,2	3,6	3,9	4,1	4,3
40	1,7	2,0	2,3	2,7	3,1	3,3	3,5	4,0	4,3	4,6	4,8
50	2,0	2,3	2,6	3,1	3,5	3,8	4,0	4,6	4,9	5,2	5,4
60	2,3	2,6	3,0	3,6	4,1	4,4	4,7	5,3	5,7	6,1	6,3
70	2,8	3,2	3,7	4,4	5,0	5,4	5,7	6,5	7,0	7,4	7,7
80	3,8	4,3	4,9	5,9	6,7	7,3	7,7	8,7	9,4	10,0	10,4
90	6,6	7,7	8,7	10,4	11,9	12,8	13,5	15,4	16,7	17,6	18,4
100	24,1	27,9	31,8	37,8	43,2	46,6	49,3	56,2	60,7	64,1	66,9
110	4,7	5,4	6,2	7,4	8,4	9,1	9,6	10,9	11,8	12,5	13,0
120	3,2	3,7	4,2	5,0	5,7	6,2	6,5	7,4	8,0	8,5	8,8
130	2,5	2,9	3,3	3,9	4,5	4,8	5,1	5,8	6,3	6,7	6,9
140	2,1	2,4	2,8	3,3	3,8	4,1	4,3	4,9	5,3	5,6	5,8
150	1,8	2,1	2,4	2,9	3,3	3,5	3,7	4,3	4,6	4,9	5,1
160	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,3	3,8	4,1	4,3	4,5
170	1,5	1,7	2,0	2,3	2,7	2,9	3,0	3,5	3,7	3,9	4,1
180	1,4	1,6	1,8	2,1	2,4	2,6	2,8	3,2	3,4	3,6	3,8

Fuente: elaboración propia

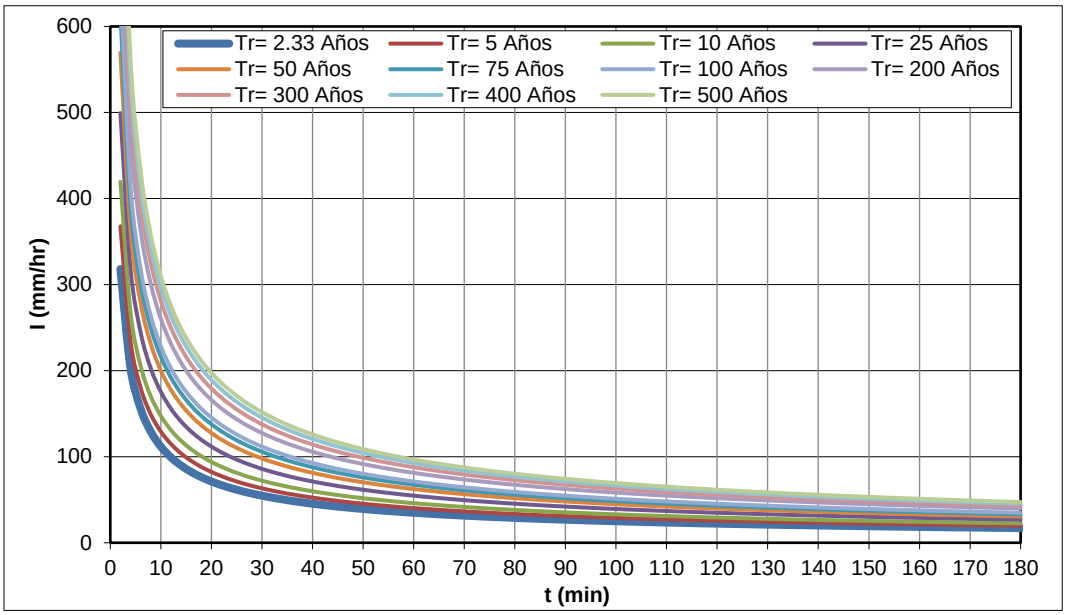


Figura 143. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Palmira ICA.
Fuente: elaboración propia

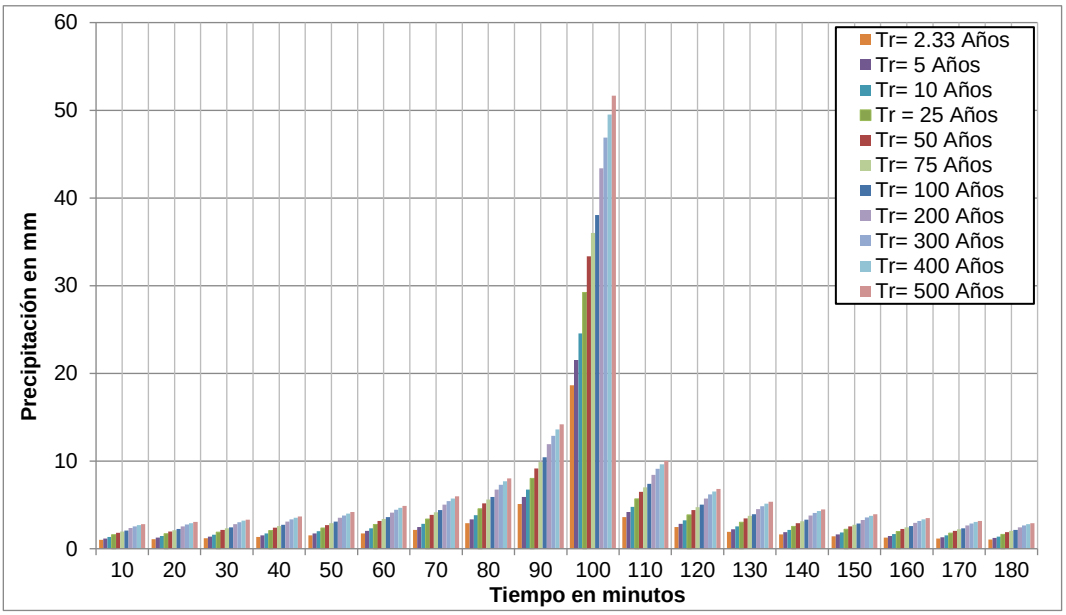


Figura 144. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Palmira ICA.
Fuente: elaboración propia

Tabla 40. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Palmira ICA

Duración	Precipitación (mm)										
(min)	Tr=2,33	Tr = 5	Tr= 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	1,0	1,2	1,3	1,6	1,8	2,0	2,1	2,4	2,6	2,7	2,8
20	1,1	1,3	1,4	1,7	2,0	2,1	2,2	2,6	2,8	2,9	3,0
30	1,2	1,4	1,6	1,9	2,2	2,3	2,5	2,8	3,0	3,2	3,3
40	1,3	1,5	1,8	2,1	2,4	2,6	2,7	3,1	3,4	3,5	3,7
50	1,5	1,7	2,0	2,4	2,7	2,9	3,1	3,5	3,8	4,0	4,2
60	1,8	2,0	2,3	2,8	3,2	3,4	3,6	4,1	4,4	4,7	4,9
70	2,2	2,5	2,8	3,4	3,9	4,2	4,4	5,0	5,4	5,7	6,0
80	2,9	3,4	3,8	4,5	5,2	5,6	5,9	6,8	7,3	7,7	8,0
90	5,1	5,9	6,7	8,0	9,2	9,9	10,4	11,9	12,9	13,6	14,2
100	18,6	21,5	24,6	29,2	33,3	36,0	38,0	43,4	46,9	49,5	51,6
110	3,6	4,2	4,8	5,7	6,5	7,0	7,4	8,4	9,1	9,6	10,0
120	2,5	2,8	3,2	3,9	4,4	4,8	5,0	5,7	6,2	6,5	6,8
130	1,9	2,2	2,5	3,0	3,5	3,7	3,9	4,5	4,9	5,1	5,4
140	1,6	1,9	2,1	2,5	2,9	3,1	3,3	3,8	4,1	4,3	4,5
150	1,4	1,6	1,9	2,2	2,5	2,7	2,9	3,3	3,6	3,8	3,9
160	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,4	2,6	2,9	3,2	3,4	3,5
170	1,1	1,3	1,5	1,8	2,1	2,2	2,3	2,7	2,9	3,0	3,2
180	1,1	1,2	1,4	1,7	1,9	2,0	2,2	2,5	2,7	2,8	2,9

Fuente: elaboración propia

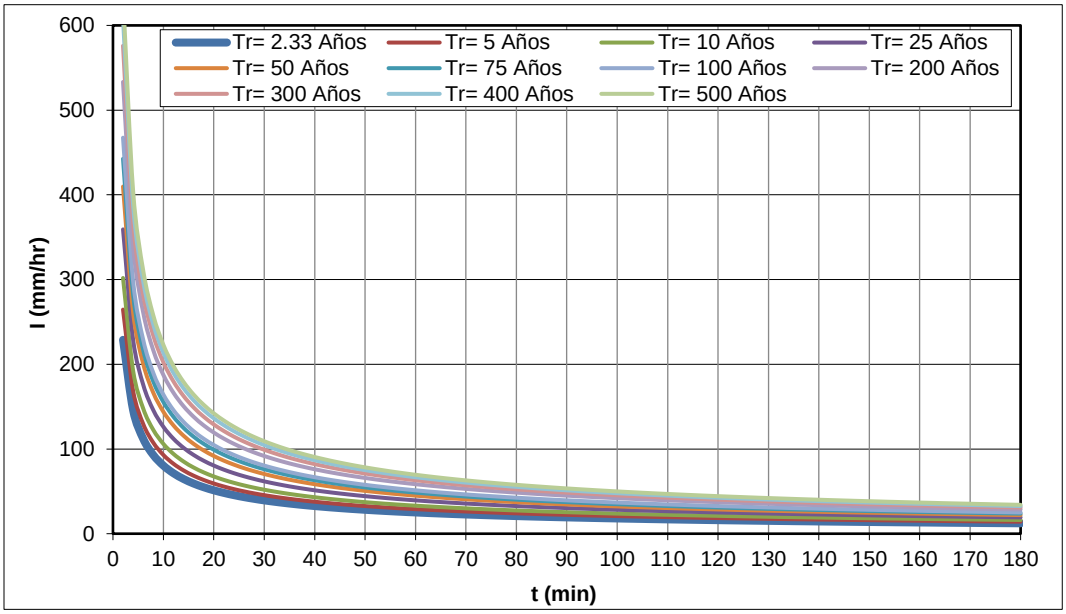


Figura 145. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Tenerife.
Fuente: elaboración propia

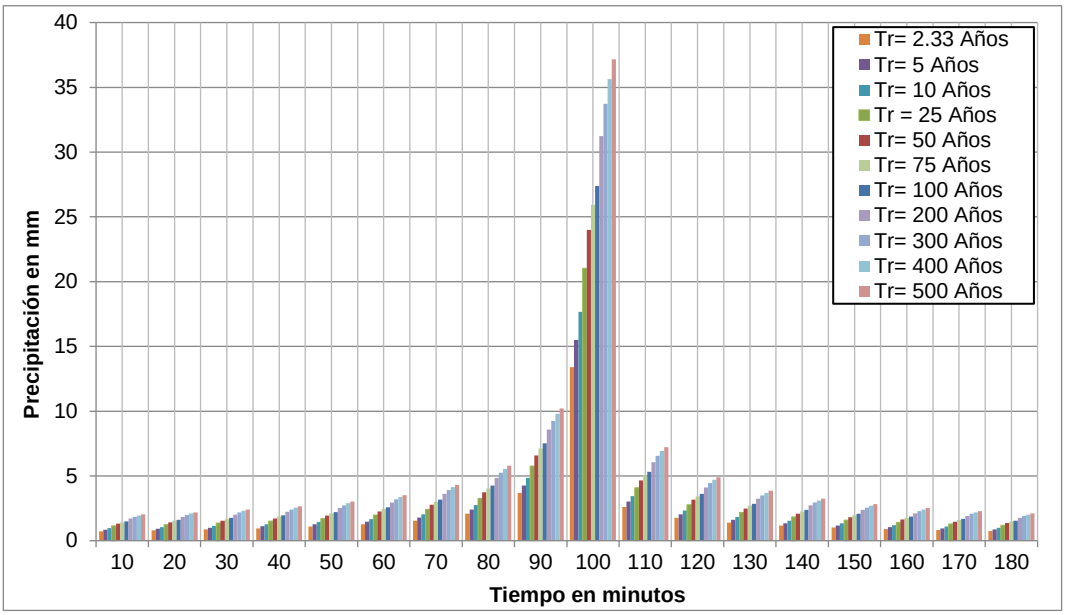


Figura 146. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Tenerife.
Fuente: elaboración propia

Tabla 41. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Tenerife

Duración	Precipitación (mm)										
(min)	Tr=2,33	Tr = 5	Tr= 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	0,7	0,8	1,0	1,1	1,3	1,4	1,5	1,7	1,8	1,9	2,0
20	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,1	2,2
30	0,9	1,0	1,1	1,4	1,5	1,7	1,8	2,0	2,2	2,3	2,4
40	1,0	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,0	2,2	2,4	2,5	2,7
50	1,1	1,3	1,4	1,7	1,9	2,1	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0
60	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,5	2,6	3,0	3,2	3,4	3,5
70	1,6	1,8	2,0	2,4	2,8	3,0	3,2	3,6	3,9	4,1	4,3
80	2,1	2,4	2,7	3,3	3,7	4,0	4,3	4,9	5,2	5,5	5,8
90	3,7	4,3	4,9	5,8	6,6	7,1	7,5	8,6	9,3	9,8	10,2
100	13,4	15,5	17,7	21,0	24,0	25,9	27,4	31,2	33,7	35,6	37,2
110	2,6	3,0	3,4	4,1	4,7	5,0	5,3	6,1	6,6	6,9	7,2
120	1,8	2,0	2,3	2,8	3,2	3,4	3,6	4,1	4,5	4,7	4,9
130	1,4	1,6	1,8	2,2	2,5	2,7	2,8	3,2	3,5	3,7	3,9
140	1,2	1,3	1,5	1,8	2,1	2,3	2,4	2,7	2,9	3,1	3,2
150	1,0	1,2	1,3	1,6	1,8	2,0	2,1	2,4	2,6	2,7	2,8
160	0,9	1,1	1,2	1,4	1,6	1,8	1,9	2,1	2,3	2,4	2,5
170	0,8	1,0	1,1	1,3	1,5	1,6	1,7	1,9	2,1	2,2	2,3
180	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,5	1,5	1,8	1,9	2,0	2,1

Fuente: elaboración propia

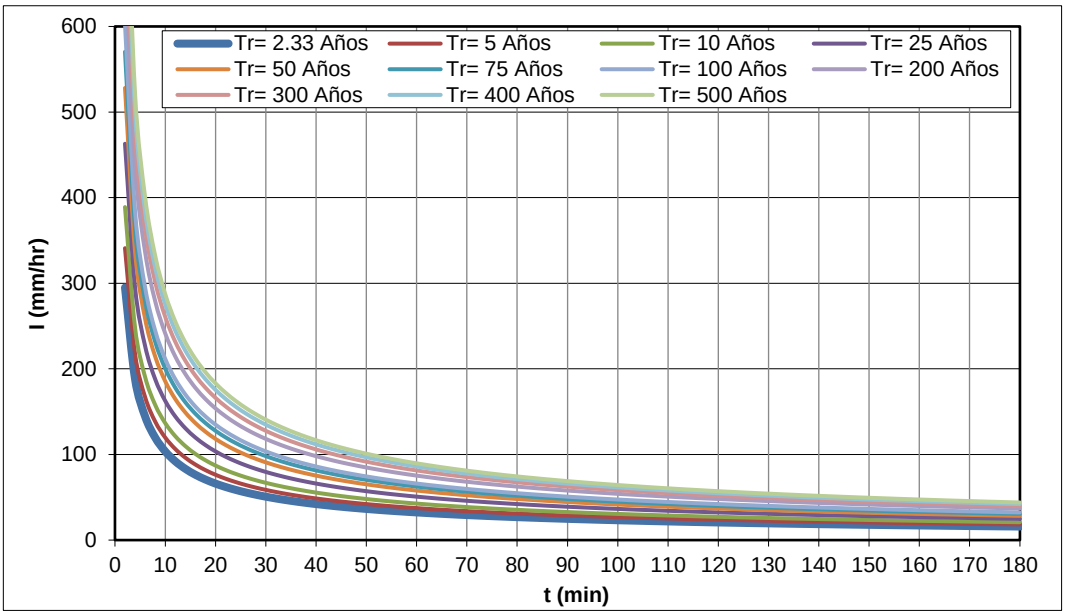


Figura 147. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Auji.
Fuente: elaboración propia

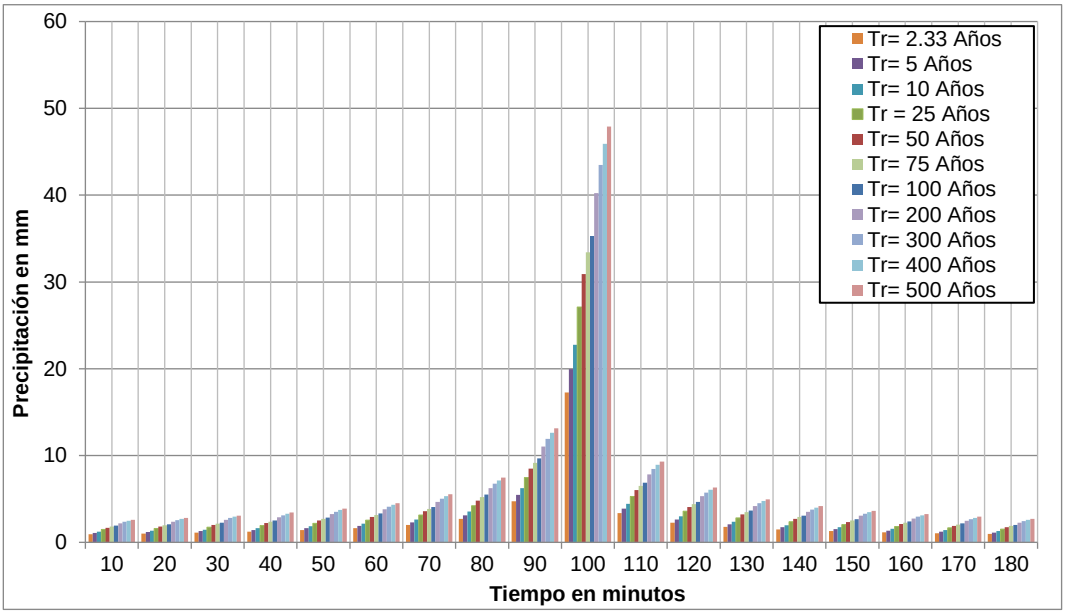


Figura 148. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Auji.
Fuente: elaboración propia

Tabla 42. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Auji

Duración	Precipitación (mm)										
(min)	Tr=2,33	Tr = 5	Tr= 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	0,9	1,1	1,2	1,5	1,7	1,8	1,9	2,2	2,4	2,5	2,6
20	1,0	1,2	1,3	1,6	1,8	2,0	2,1	2,4	2,6	2,7	2,8
30	1,1	1,3	1,5	1,7	2,0	2,2	2,3	2,6	2,8	3,0	3,1
40	1,2	1,4	1,6	1,9	2,2	2,4	2,5	2,9	3,1	3,3	3,4
50	1,4	1,6	1,8	2,2	2,5	2,7	2,9	3,3	3,5	3,7	3,9
60	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,3	3,8	4,1	4,3	4,5
70	2,0	2,3	2,6	3,1	3,6	3,9	4,1	4,7	5,0	5,3	5,5
80	2,7	3,1	3,5	4,2	4,8	5,2	5,5	6,3	6,8	7,1	7,5
90	4,7	5,5	6,3	7,4	8,5	9,2	9,7	11,0	11,9	12,6	13,2
100	17,3	20,0	22,8	27,1	30,9	33,4	35,3	40,2	43,5	45,9	47,9
110	3,4	3,9	4,4	5,3	6,0	6,5	6,9	7,8	8,4	8,9	9,3
120	2,3	2,6	3,0	3,6	4,1	4,4	4,7	5,3	5,7	6,1	6,3
130	1,8	2,1	2,4	2,8	3,2	3,5	3,7	4,2	4,5	4,8	5,0
140	1,5	1,7	2,0	2,4	2,7	2,9	3,1	3,5	3,8	4,0	4,2
150	1,3	1,5	1,7	2,1	2,3	2,5	2,7	3,1	3,3	3,5	3,6
160	1,2	1,4	1,5	1,8	2,1	2,3	2,4	2,7	2,9	3,1	3,2
170	1,1	1,2	1,4	1,7	1,9	2,1	2,2	2,5	2,7	2,8	2,9
180	1,0	1,1	1,3	1,5	1,8	1,9	2,0	2,3	2,5	2,6	2,7

Fuente: elaboración propia

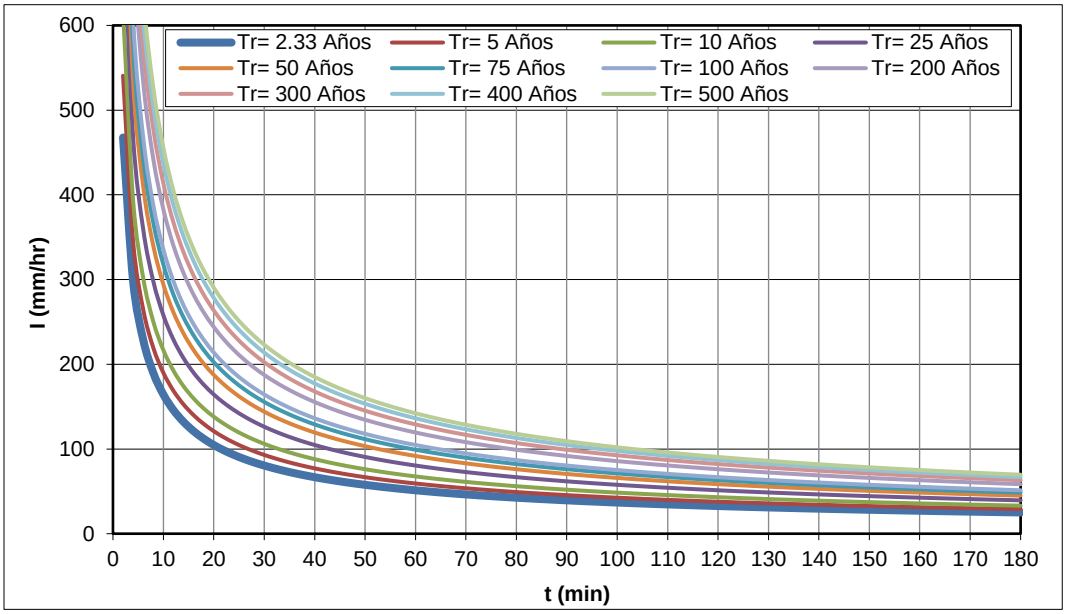


Figura 149. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Austria.
Fuente: elaboración propia

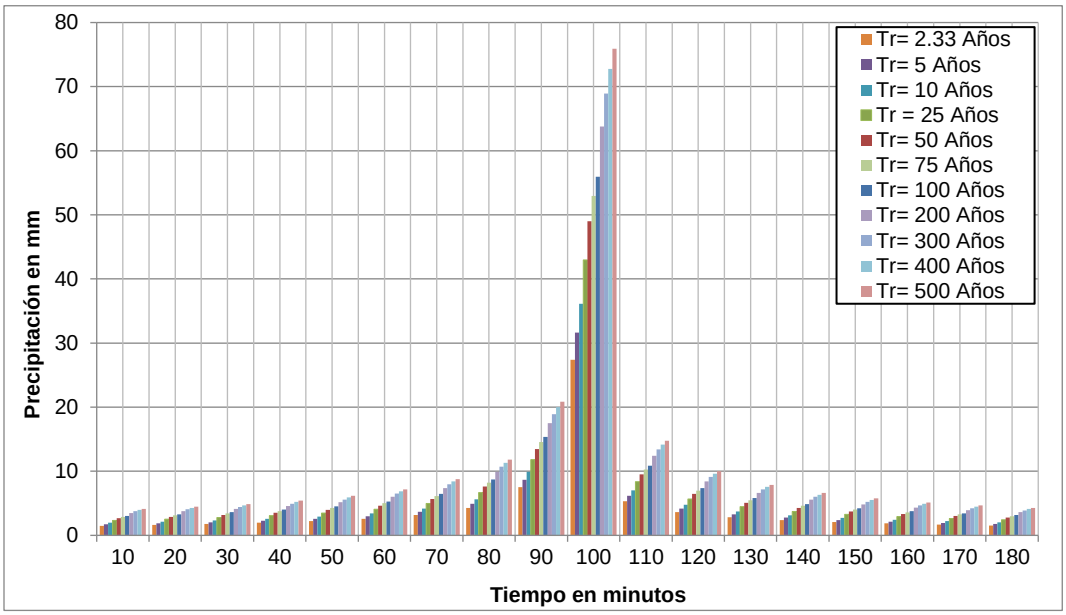


Figura 150. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Austria.
Fuente: elaboración propia

Tabla 43. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Austria

Duración	Precipitación (mm)										
(min)	Tr=2,33	Tr = 5	Tr= 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	1,5	1,7	2,0	2,3	2,7	2,9	3,0	3,5	3,8	4,0	4,1
20	1,6	1,9	2,1	2,5	2,9	3,1	3,3	3,8	4,1	4,3	4,5
30	1,8	2,0	2,3	2,8	3,2	3,4	3,6	4,1	4,4	4,7	4,9
40	2,0	2,3	2,6	3,1	3,5	3,8	4,0	4,6	4,9	5,2	5,4
50	2,2	2,6	2,9	3,5	4,0	4,3	4,5	5,2	5,6	5,9	6,2
60	2,6	3,0	3,4	4,1	4,6	5,0	5,3	6,0	6,5	6,9	7,2
70	3,2	3,7	4,2	5,0	5,7	6,1	6,5	7,4	8,0	8,4	8,8
80	4,3	4,9	5,6	6,7	7,6	8,2	8,7	9,9	10,7	11,3	11,8
90	7,5	8,7	9,9	11,8	13,5	14,5	15,4	17,5	18,9	20,0	20,8
100	27,4	31,7	36,1	43,0	49,0	53,0	55,9	63,8	68,9	72,8	75,9
110	5,3	6,2	7,0	8,4	9,5	10,3	10,9	12,4	13,4	14,1	14,8
120	3,6	4,2	4,8	5,7	6,5	7,0	7,4	8,4	9,1	9,6	10,0
130	2,8	3,3	3,7	4,5	5,1	5,5	5,8	6,6	7,2	7,6	7,9
140	2,4	2,8	3,1	3,7	4,3	4,6	4,9	5,6	6,0	6,3	6,6
150	2,1	2,4	2,7	3,3	3,7	4,0	4,2	4,8	5,2	5,5	5,8
160	1,9	2,1	2,4	2,9	3,3	3,6	3,8	4,3	4,7	4,9	5,1
170	1,7	1,9	2,2	2,6	3,0	3,3	3,4	3,9	4,2	4,5	4,7
180	1,5	1,8	2,0	2,4	2,8	3,0	3,2	3,6	3,9	4,1	4,3

Fuente: elaboración propia

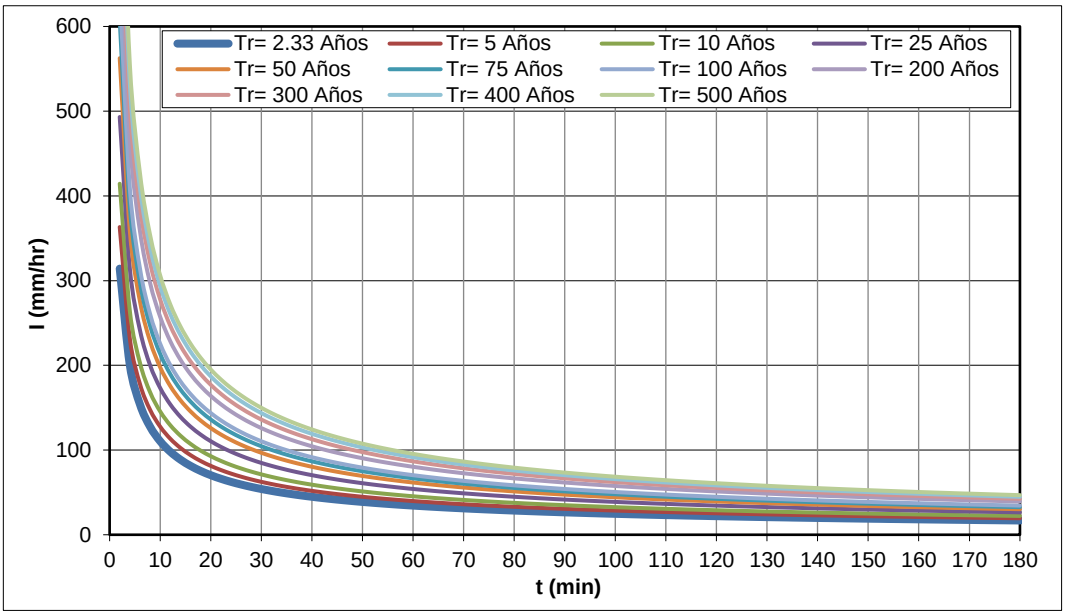


Figura 151. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Bellavista.
Fuente: elaboración propia

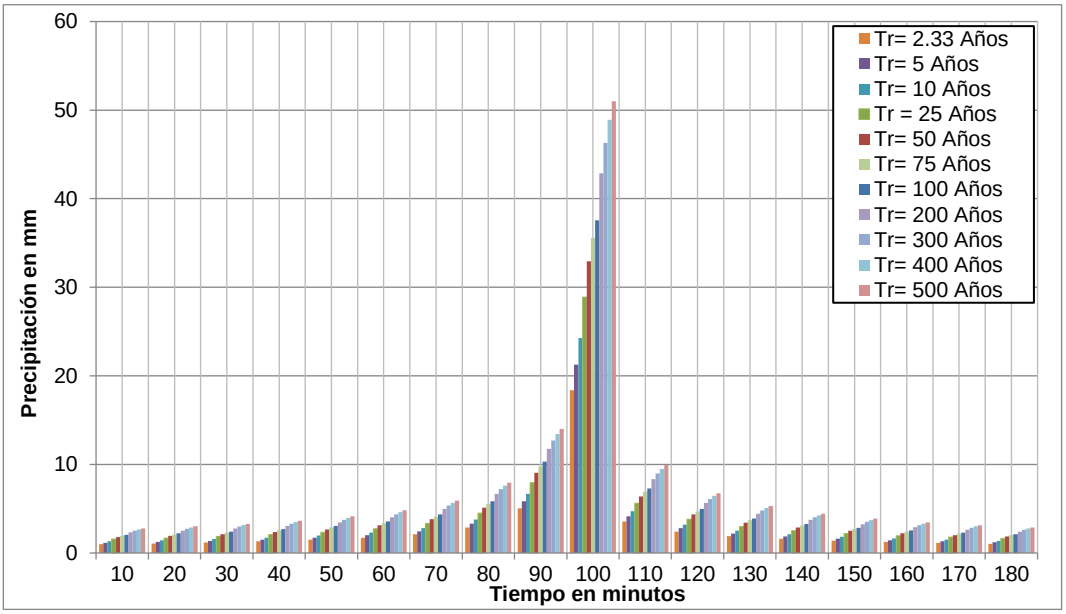


Figura 152. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Bellavista.
Fuente: elaboración propia

Tabla 44. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Bellavista

Duración	Precipitación (mm)										
(min)	Tr=2,33	Tr = 5	Tr= 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	1,0	1,2	1,3	1,6	1,8	1,9	2,0	2,3	2,5	2,7	2,8
20	1,1	1,3	1,4	1,7	1,9	2,1	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0
30	1,2	1,4	1,6	1,9	2,1	2,3	2,4	2,8	3,0	3,2	3,3
40	1,3	1,5	1,7	2,1	2,4	2,5	2,7	3,1	3,3	3,5	3,7
50	1,5	1,7	2,0	2,3	2,7	2,9	3,0	3,5	3,8	4,0	4,1
60	1,7	2,0	2,3	2,7	3,1	3,4	3,6	4,1	4,4	4,6	4,8
70	2,1	2,5	2,8	3,3	3,8	4,1	4,3	5,0	5,4	5,7	5,9
80	2,9	3,3	3,8	4,5	5,1	5,5	5,8	6,7	7,2	7,6	7,9
90	5,1	5,8	6,7	7,9	9,0	9,8	10,3	11,8	12,7	13,4	14,0
100	18,4	21,3	24,3	28,9	32,9	35,6	37,6	42,9	46,3	48,9	51,0
110	3,6	4,1	4,7	5,6	6,4	6,9	7,3	8,3	9,0	9,5	9,9
120	2,4	2,8	3,2	3,8	4,3	4,7	5,0	5,7	6,1	6,5	6,7
130	1,9	2,2	2,5	3,0	3,4	3,7	3,9	4,4	4,8	5,1	5,3
140	1,6	1,9	2,1	2,5	2,9	3,1	3,3	3,7	4,0	4,3	4,4
150	1,4	1,6	1,8	2,2	2,5	2,7	2,9	3,3	3,5	3,7	3,9
160	1,2	1,4	1,6	2,0	2,2	2,4	2,5	2,9	3,1	3,3	3,5
170	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,3	2,6	2,8	3,0	3,1
180	1,0	1,2	1,4	1,6	1,9	2,0	2,1	2,4	2,6	2,8	2,9

Fuente: elaboración propia

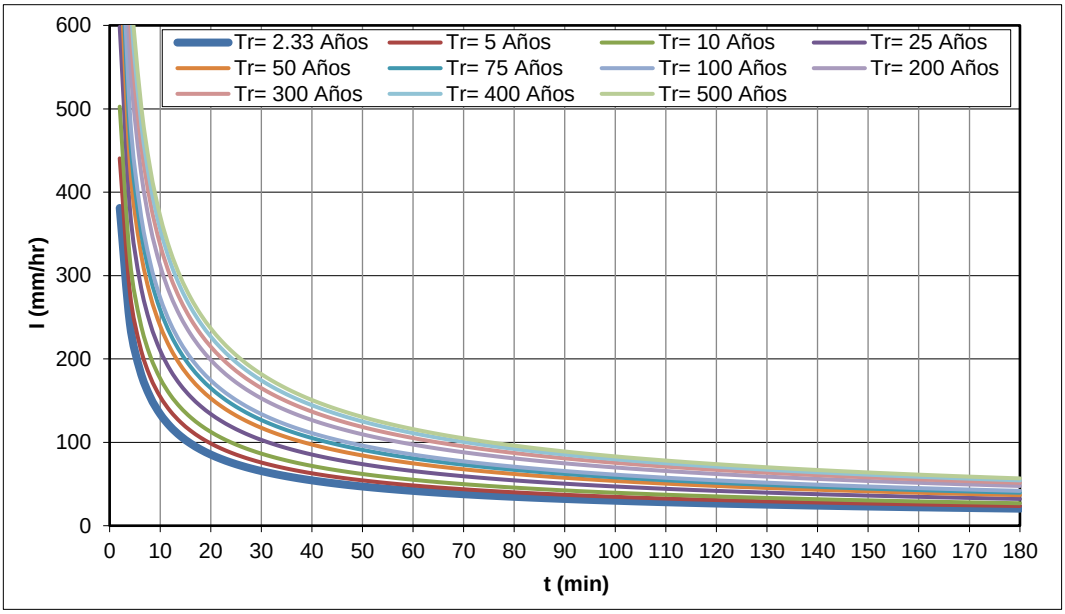


Figura 153. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Chambú.
Fuente: elaboración propia

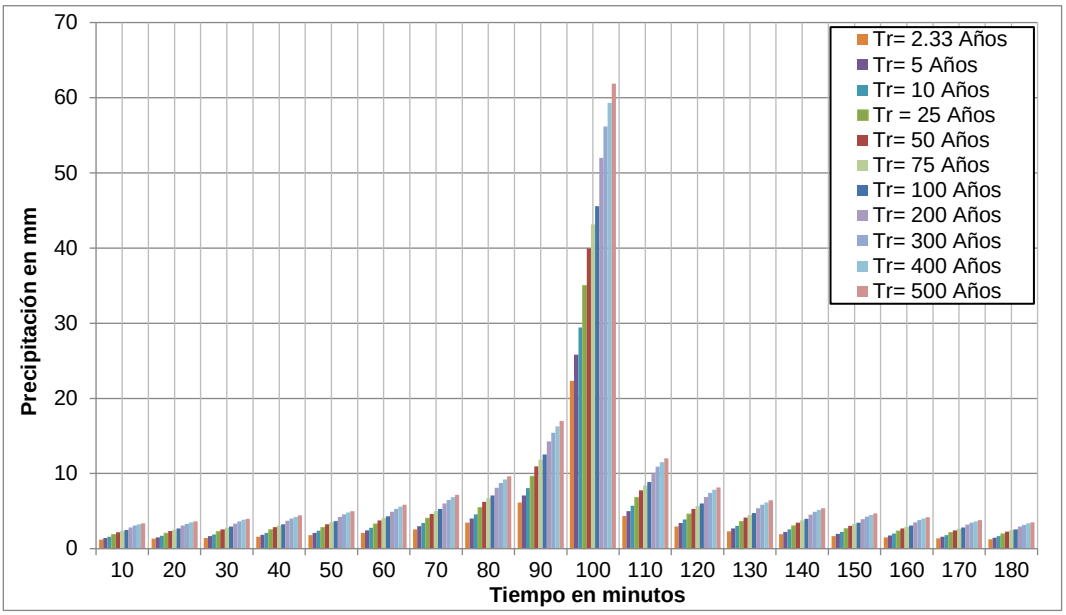


Figura 154. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Chambú.
Fuente: elaboración propia

Tabla 45. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Chambú

Duración	Precipitación (mm)										
(min)	Tr=2,33	Tr = 5	Tr= 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	1,2	1,4	1,6	1,9	2,2	2,4	2,5	2,8	3,1	3,2	3,4
20	1,3	1,5	1,7	2,1	2,4	2,5	2,7	3,1	3,3	3,5	3,6
30	1,4	1,7	1,9	2,3	2,6	2,8	2,9	3,4	3,6	3,8	4,0
40	1,6	1,8	2,1	2,5	2,9	3,1	3,3	3,7	4,0	4,2	4,4
50	1,8	2,1	2,4	2,8	3,2	3,5	3,7	4,2	4,6	4,8	5,0
60	2,1	2,4	2,8	3,3	3,8	4,1	4,3	4,9	5,3	5,6	5,8
70	2,6	3,0	3,4	4,1	4,6	5,0	5,3	6,0	6,5	6,9	7,2
80	3,5	4,0	4,6	5,4	6,2	6,7	7,1	8,1	8,7	9,2	9,6
90	6,1	7,1	8,1	9,6	11,0	11,8	12,5	14,3	15,4	16,3	17,0
100	22,3	25,8	29,4	35,0	40,0	43,1	45,6	52,0	56,2	59,3	61,9
110	4,3	5,0	5,7	6,8	7,8	8,4	8,9	10,1	10,9	11,5	12,0
120	2,9	3,4	3,9	4,6	5,3	5,7	6,0	6,9	7,4	7,8	8,2
130	2,3	2,7	3,1	3,6	4,1	4,5	4,7	5,4	5,8	6,2	6,4
140	1,9	2,2	2,6	3,1	3,5	3,8	4,0	4,5	4,9	5,2	5,4
150	1,7	2,0	2,2	2,7	3,0	3,3	3,5	3,9	4,3	4,5	4,7
160	1,5	1,7	2,0	2,4	2,7	2,9	3,1	3,5	3,8	4,0	4,2
170	1,4	1,6	1,8	2,2	2,5	2,7	2,8	3,2	3,5	3,7	3,8
180	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,4	2,6	2,9	3,2	3,4	3,5

Fuente: elaboración propia

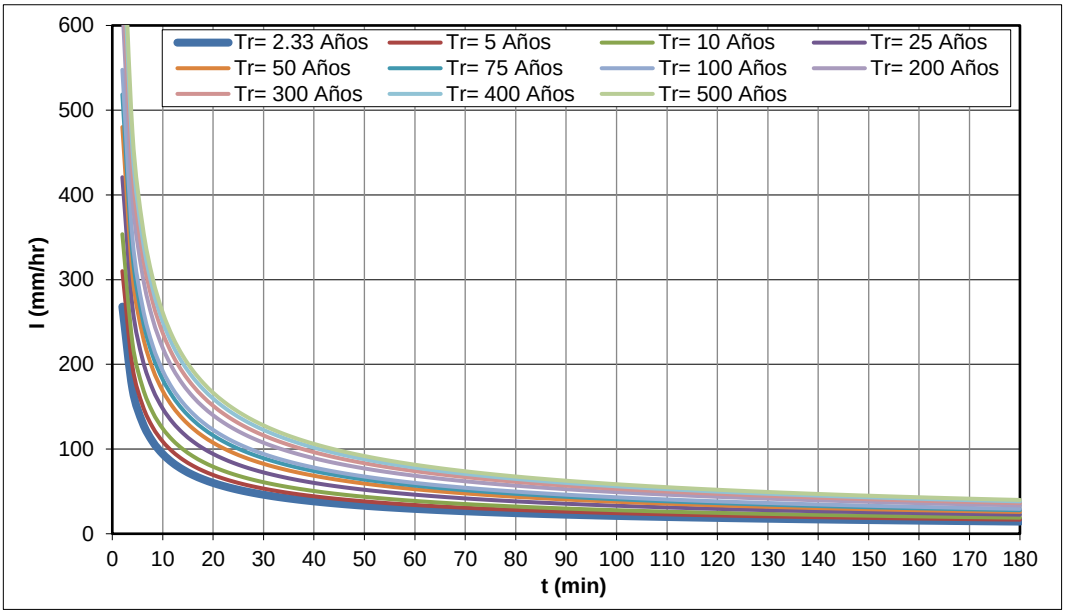


Figura 155. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación La Ceja.
Fuente: elaboración propia

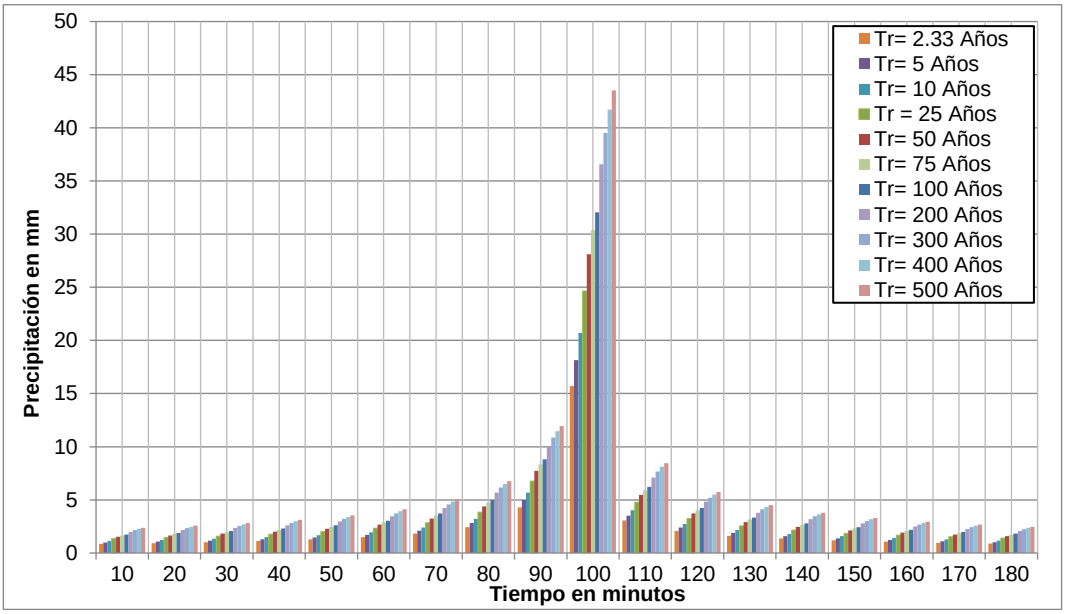


Figura 156. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Ceja.
Fuente: elaboración propia

Tabla 46. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Ceja

Duración	Precipitación (mm)										
(min)	Tr=2,33	Tr = 5	Tr= 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	0,9	1,0	1,1	1,3	1,5	1,7	1,7	2,0	2,2	2,3	2,4
20	0,9	1,1	1,2	1,5	1,7	1,8	1,9	2,2	2,3	2,5	2,6
30	1,0	1,2	1,3	1,6	1,8	2,0	2,1	2,4	2,5	2,7	2,8
40	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,3	2,6	2,8	3,0	3,1
50	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,5	2,6	3,0	3,2	3,4	3,5
60	1,5	1,7	2,0	2,3	2,7	2,9	3,0	3,5	3,7	3,9	4,1
70	1,8	2,1	2,4	2,9	3,3	3,5	3,7	4,2	4,6	4,8	5,0
80	2,4	2,8	3,2	3,8	4,4	4,7	5,0	5,7	6,1	6,5	6,8
90	4,3	5,0	5,7	6,8	7,7	8,3	8,8	10,0	10,8	11,5	12,0
100	15,7	18,1	20,7	24,6	28,1	30,4	32,1	36,6	39,5	41,7	43,5
110	3,1	3,5	4,0	4,8	5,5	5,9	6,2	7,1	7,7	8,1	8,5
120	2,1	2,4	2,7	3,3	3,7	4,0	4,2	4,8	5,2	5,5	5,7
130	1,6	1,9	2,1	2,6	2,9	3,2	3,3	3,8	4,1	4,3	4,5
140	1,4	1,6	1,8	2,1	2,4	2,6	2,8	3,2	3,4	3,6	3,8
150	1,2	1,4	1,6	1,9	2,1	2,3	2,4	2,8	3,0	3,2	3,3
160	1,1	1,2	1,4	1,7	1,9	2,1	2,2	2,5	2,7	2,8	3,0
170	1,0	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,0	2,3	2,4	2,6	2,7
180	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,7	1,8	2,1	2,2	2,4	2,5

Fuente: elaboración propia

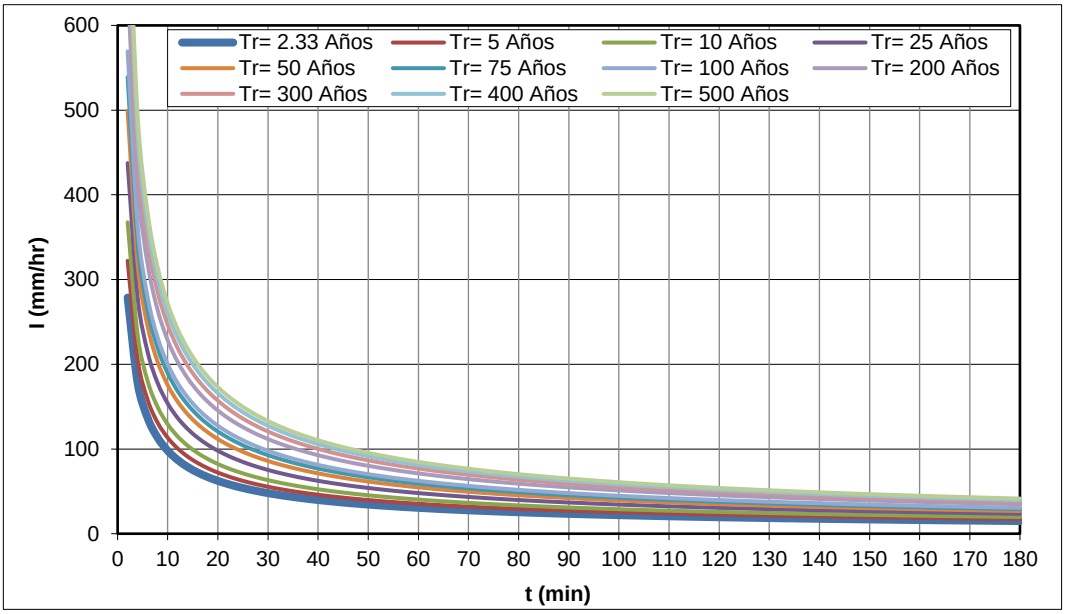


Figura 157. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación La Sirena.
Fuente: elaboración propia

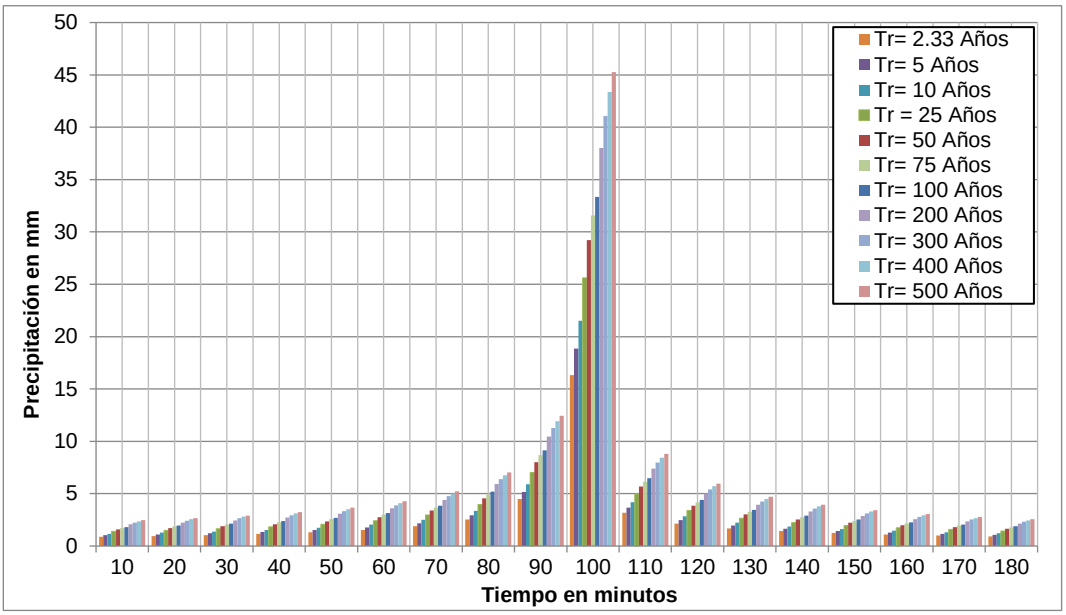


Figura 158. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Sirena.
Fuente: elaboración propia

Tabla 47. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Sirena.

Duración	Precipitación (mm)										
(min)	Tr=2,33	Tr = 5	Tr= 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,7	1,8	2,1	2,2	2,4	2,5
20	1,0	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,0	2,2	2,4	2,6	2,7
30	1,1	1,2	1,4	1,7	1,9	2,0	2,1	2,5	2,6	2,8	2,9
40	1,2	1,4	1,5	1,8	2,1	2,3	2,4	2,7	2,9	3,1	3,2
50	1,3	1,5	1,7	2,1	2,4	2,6	2,7	3,1	3,3	3,5	3,7
60	1,5	1,8	2,0	2,4	2,8	3,0	3,2	3,6	3,9	4,1	4,3
70	1,9	2,2	2,5	3,0	3,4	3,7	3,9	4,4	4,8	5,0	5,2
80	2,5	2,9	3,3	4,0	4,5	4,9	5,2	5,9	6,4	6,7	7,0
90	4,5	5,2	5,9	7,0	8,0	8,7	9,2	10,4	11,3	11,9	12,4
100	16,3	18,9	21,5	25,6	29,2	31,6	33,3	38,0	41,1	43,4	45,3
110	3,2	3,7	4,2	5,0	5,7	6,1	6,5	7,4	8,0	8,4	8,8
120	2,2	2,5	2,8	3,4	3,9	4,2	4,4	5,0	5,4	5,7	6,0
130	1,7	2,0	2,2	2,7	3,0	3,3	3,5	3,9	4,3	4,5	4,7
140	1,4	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	2,9	3,3	3,6	3,8	3,9
150	1,2	1,4	1,6	1,9	2,2	2,4	2,5	2,9	3,1	3,3	3,4
160	1,1	1,3	1,5	1,7	2,0	2,1	2,3	2,6	2,8	2,9	3,1
170	1,0	1,2	1,3	1,6	1,8	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,8
180	0,9	1,1	1,2	1,4	1,7	1,8	1,9	2,2	2,3	2,5	2,6

Fuente: elaboración propia

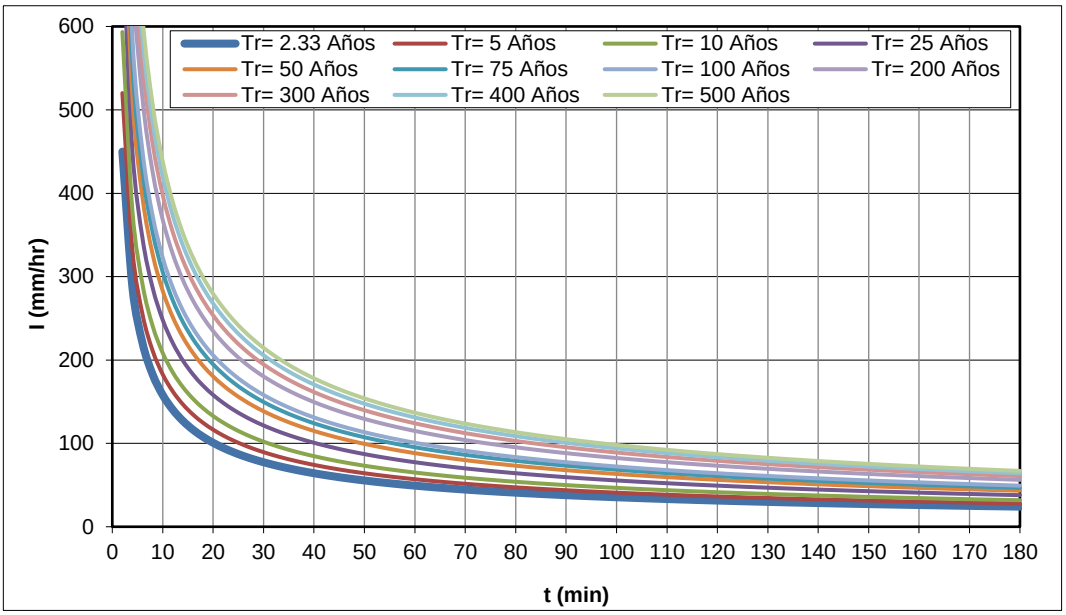


Figura 159. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación La Soledad.
Fuente: elaboración propia

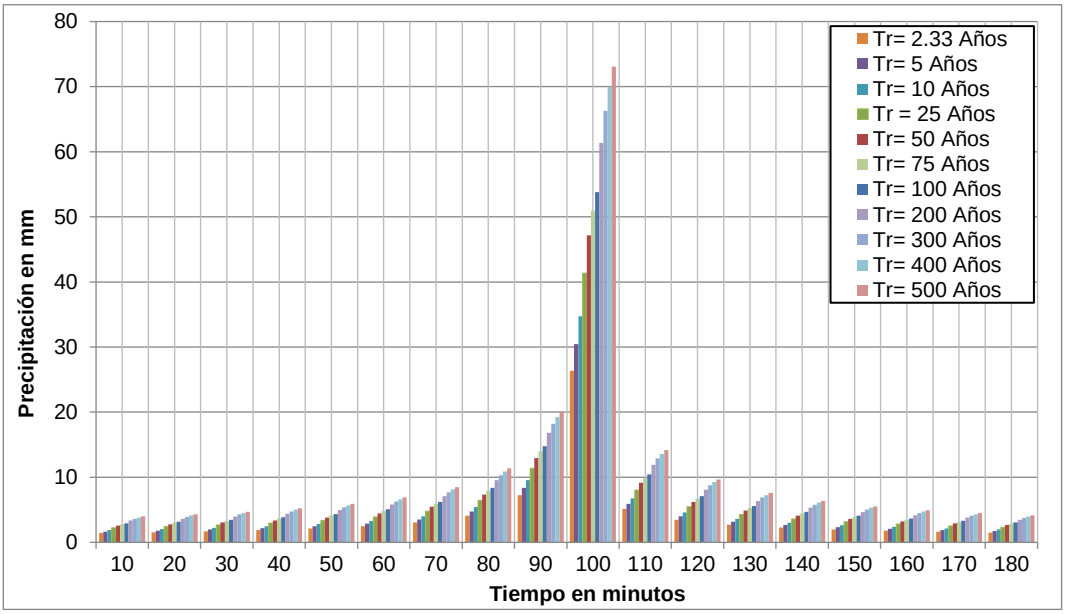


Figura 160. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Soledad.
Fuente: elaboración propia

Tabla 48. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación La Soledad

Duración	Precipitación (mm)										
(min)	Tr=2,33	Tr = 5	Tr= 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	1,4	1,7	1,9	2,3	2,6	2,8	2,9	3,3	3,6	3,8	4,0
20	1,6	1,8	2,0	2,4	2,8	3,0	3,2	3,6	3,9	4,1	4,3
30	1,7	2,0	2,2	2,7	3,0	3,3	3,5	4,0	4,3	4,5	4,7
40	1,9	2,2	2,5	3,0	3,4	3,6	3,9	4,4	4,7	5,0	5,2
50	2,1	2,5	2,8	3,4	3,8	4,1	4,4	5,0	5,4	5,7	5,9
60	2,5	2,9	3,3	3,9	4,5	4,8	5,1	5,8	6,3	6,6	6,9
70	3,0	3,5	4,0	4,8	5,5	5,9	6,2	7,1	7,7	8,1	8,5
80	4,1	4,7	5,4	6,4	7,3	7,9	8,4	9,6	10,3	10,9	11,4
90	7,2	8,4	9,5	11,4	12,9	14,0	14,8	16,9	18,2	19,2	20,1
100	26,3	30,5	34,7	41,3	47,2	50,9	53,8	61,4	66,3	70,0	73,1
110	5,1	5,9	6,8	8,0	9,2	9,9	10,5	11,9	12,9	13,6	14,2
120	3,5	4,0	4,6	5,5	6,2	6,7	7,1	8,1	8,7	9,2	9,6
130	2,7	3,2	3,6	4,3	4,9	5,3	5,6	6,4	6,9	7,3	7,6
140	2,3	2,7	3,0	3,6	4,1	4,4	4,7	5,3	5,8	6,1	6,4
150	2,0	2,3	2,6	3,1	3,6	3,9	4,1	4,7	5,0	5,3	5,5
160	1,8	2,1	2,4	2,8	3,2	3,5	3,6	4,2	4,5	4,7	5,0
170	1,6	1,9	2,1	2,5	2,9	3,1	3,3	3,8	4,1	4,3	4,5
180	1,5	1,7	2,0	2,3	2,7	2,9	3,0	3,5	3,8	4,0	4,1

Fuente: elaboración propia

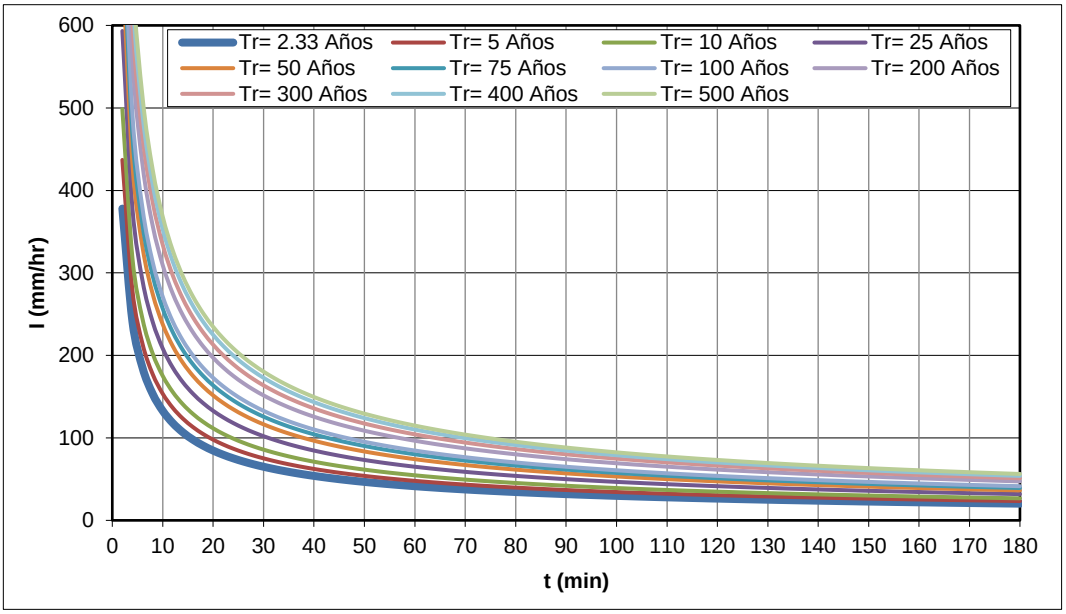


Figura 161. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Planta Nima.
Fuente: elaboración propia

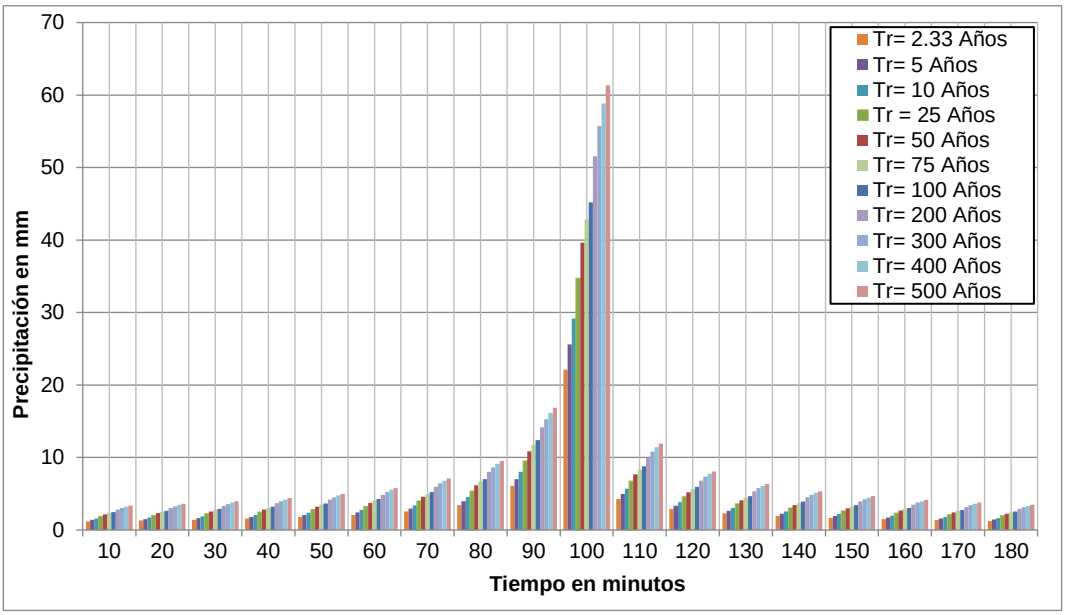


Figura 162. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Planta Nima.
Fuente: elaboración propia

Tabla 49. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Planta Nima

Duración	Precipitación (mm)										
(min)	Tr=2,33	Tr = 5	Tr= 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	1,2	1,4	1,6	1,9	2,2	2,3	2,5	2,8	3,0	3,2	3,3
20	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,5	2,7	3,0	3,3	3,5	3,6
30	1,4	1,6	1,9	2,2	2,6	2,8	2,9	3,3	3,6	3,8	4,0
40	1,6	1,8	2,1	2,5	2,8	3,1	3,2	3,7	4,0	4,2	4,4
50	1,8	2,1	2,4	2,8	3,2	3,5	3,7	4,2	4,5	4,8	5,0
60	2,1	2,4	2,8	3,3	3,7	4,0	4,3	4,9	5,3	5,6	5,8
70	2,6	3,0	3,4	4,0	4,6	5,0	5,2	6,0	6,4	6,8	7,1
80	3,4	4,0	4,5	5,4	6,2	6,7	7,0	8,0	8,7	9,2	9,5
90	6,1	7,0	8,0	9,5	10,9	11,8	12,4	14,2	15,3	16,2	16,8
100	22,1	25,6	29,2	34,7	39,6	42,8	45,2	51,6	55,7	58,8	61,4
110	4,3	5,0	5,7	6,8	7,7	8,3	8,8	10,0	10,8	11,4	11,9
120	2,9	3,4	3,9	4,6	5,2	5,6	6,0	6,8	7,3	7,8	8,1
130	2,3	2,7	3,0	3,6	4,1	4,4	4,7	5,4	5,8	6,1	6,4
140	1,9	2,2	2,5	3,0	3,5	3,7	3,9	4,5	4,9	5,1	5,3
150	1,7	1,9	2,2	2,6	3,0	3,2	3,4	3,9	4,2	4,5	4,7
160	1,5	1,7	2,0	2,4	2,7	2,9	3,1	3,5	3,8	4,0	4,2
170	1,4	1,6	1,8	2,1	2,4	2,6	2,8	3,2	3,4	3,6	3,8
180	1,3	1,4	1,7	2,0	2,2	2,4	2,6	2,9	3,2	3,3	3,5

Fuente: elaboración propia

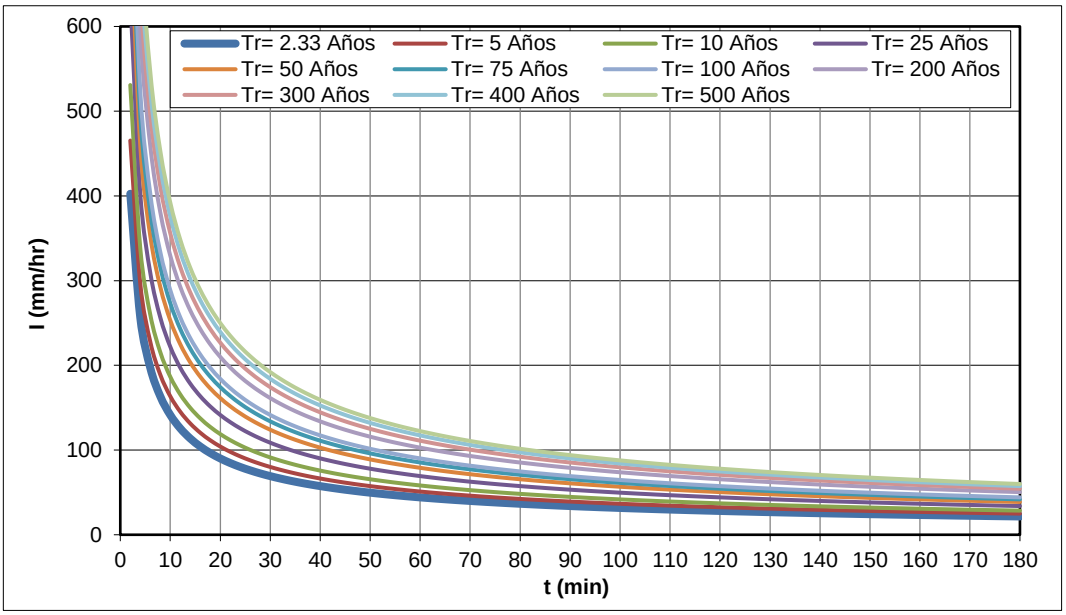


Figura 163. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación San Emigdio.
Fuente: elaboración propia

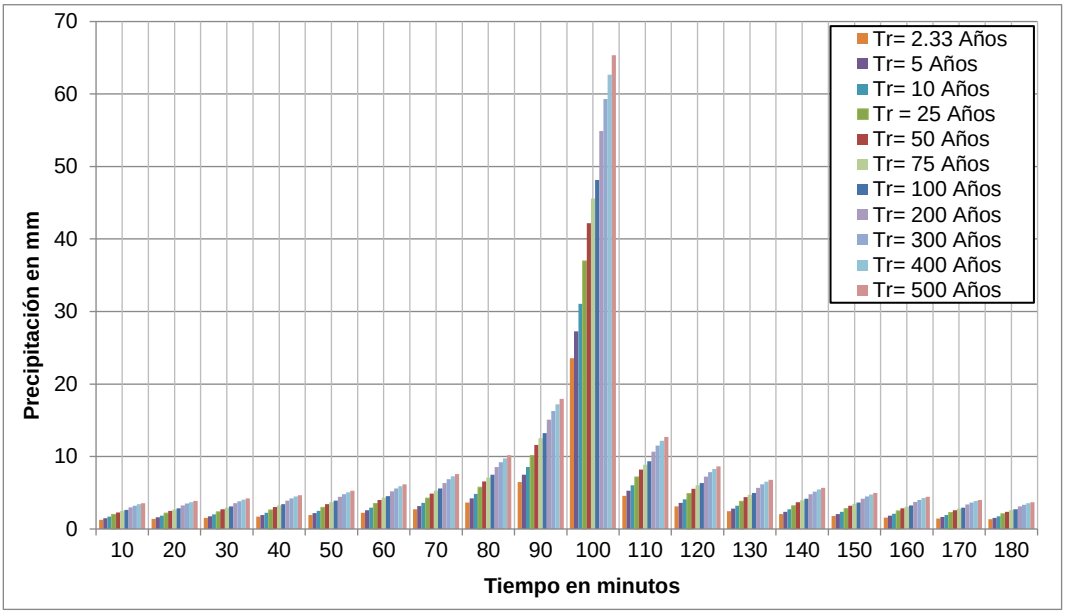


Figura 164. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación San Emigdio.
Fuente: elaboración propia

Tabla 50. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación San Emigdio

Duración	Precipitación (mm)										
(min)	Tr=2,33	Tr = 5	Tr= 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	1,3	1,5	1,7	2,0	2,3	2,5	2,6	3,0	3,2	3,4	3,6
20	1,4	1,6	1,8	2,2	2,5	2,7	2,8	3,2	3,5	3,7	3,9
30	1,5	1,8	2,0	2,4	2,7	2,9	3,1	3,5	3,8	4,0	4,2
40	1,7	2,0	2,2	2,6	3,0	3,3	3,4	3,9	4,2	4,5	4,7
50	1,9	2,2	2,5	3,0	3,4	3,7	3,9	4,5	4,8	5,1	5,3
60	2,2	2,6	2,9	3,5	4,0	4,3	4,6	5,2	5,6	5,9	6,2
70	2,7	3,2	3,6	4,3	4,9	5,3	5,6	6,4	6,9	7,3	7,6
80	3,7	4,2	4,8	5,8	6,6	7,1	7,5	8,5	9,2	9,7	10,2
90	6,5	7,5	8,5	10,2	11,6	12,5	13,2	15,1	16,3	17,2	17,9
100	23,6	27,2	31,1	37,0	42,2	45,6	48,1	54,9	59,3	62,6	65,4
110	4,6	5,3	6,0	7,2	8,2	8,9	9,4	10,7	11,5	12,2	12,7
120	3,1	3,6	4,1	4,9	5,6	6,0	6,4	7,2	7,8	8,3	8,6
130	2,4	2,8	3,2	3,8	4,4	4,7	5,0	5,7	6,2	6,5	6,8
140	2,1	2,4	2,7	3,2	3,7	4,0	4,2	4,8	5,2	5,5	5,7
150	1,8	2,1	2,4	2,8	3,2	3,5	3,7	4,2	4,5	4,8	5,0
160	1,6	1,8	2,1	2,5	2,9	3,1	3,3	3,7	4,0	4,2	4,4
170	1,5	1,7	1,9	2,3	2,6	2,8	3,0	3,4	3,7	3,9	4,0
180	1,3	1,5	1,8	2,1	2,4	2,6	2,7	3,1	3,4	3,5	3,7

Fuente: elaboración propia

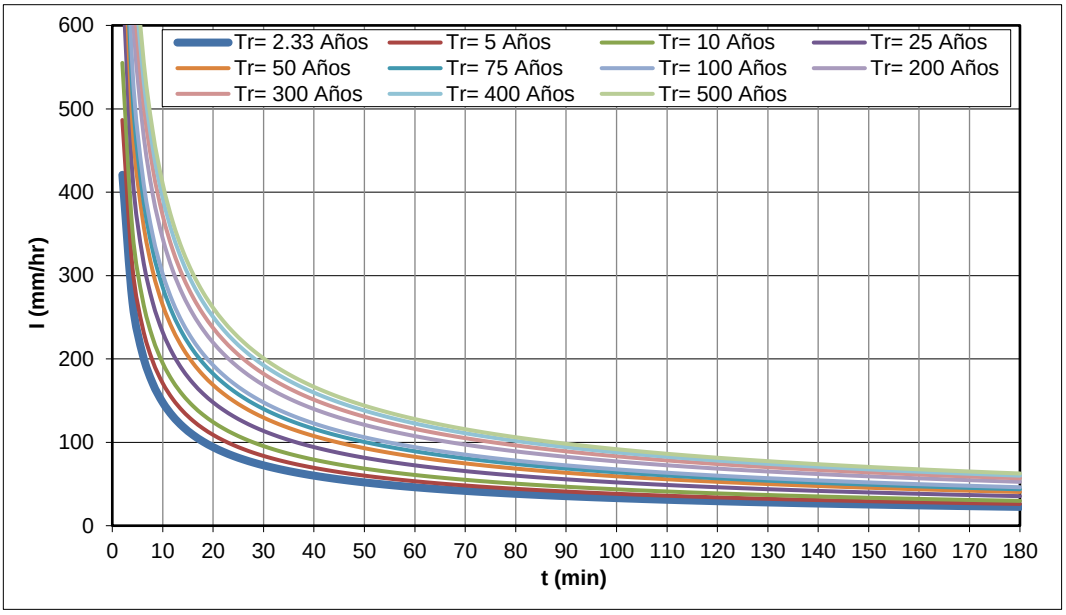


Figura 165. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación San Nicolas.
Fuente: elaboración propia

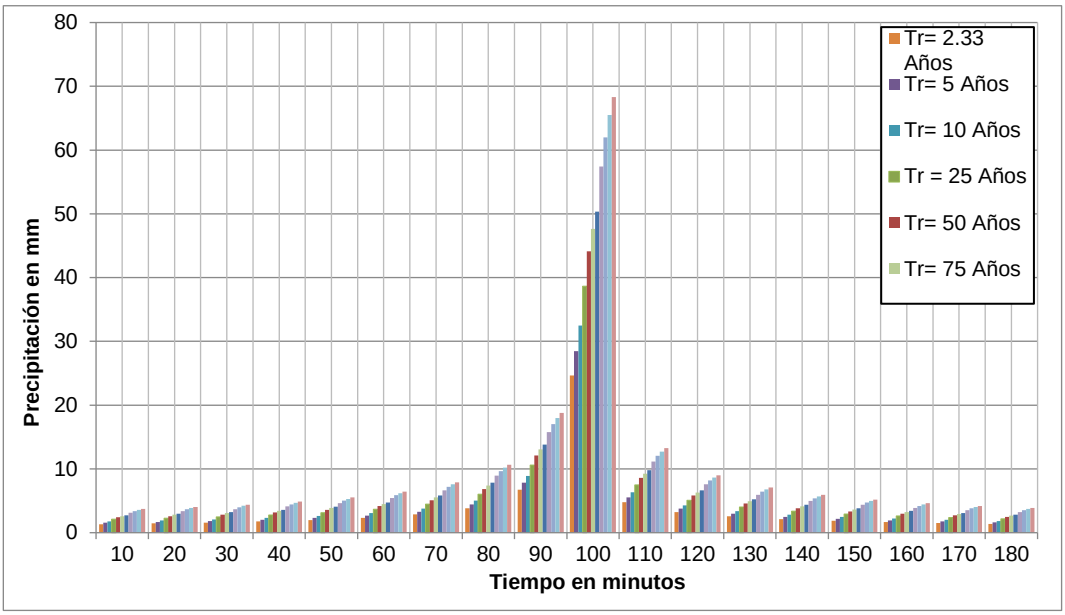


Figura 166. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación San Nicolas.
Fuente: elaboración propia

Tabla 51. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación San Nicolas

Duración	Precipitación (mm)										
(min)	Tr=2,33	Tr = 5	Tr= 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	1,3	1,6	1,8	2,1	2,4	2,6	2,7	3,1	3,4	3,6	3,7
20	1,5	1,7	1,9	2,3	2,6	2,8	3,0	3,4	3,7	3,9	4,0
30	1,6	1,8	2,1	2,5	2,8	3,1	3,2	3,7	4,0	4,2	4,4
40	1,8	2,0	2,3	2,8	3,2	3,4	3,6	4,1	4,4	4,7	4,9
50	2,0	2,3	2,6	3,1	3,6	3,9	4,1	4,7	5,0	5,3	5,5
60	2,3	2,7	3,1	3,7	4,2	4,5	4,8	5,4	5,9	6,2	6,5
70	2,9	3,3	3,8	4,5	5,1	5,5	5,8	6,6	7,2	7,6	7,9
80	3,8	4,4	5,1	6,0	6,9	7,4	7,8	8,9	9,6	10,2	10,6
90	6,8	7,8	8,9	10,6	12,1	13,1	13,8	15,8	17,0	18,0	18,8
100	24,6	28,5	32,5	38,7	44,1	47,7	50,3	57,4	62,0	65,5	68,3
110	4,8	5,5	6,3	7,5	8,6	9,3	9,8	11,2	12,1	12,7	13,3
120	3,3	3,8	4,3	5,1	5,8	6,3	6,6	7,6	8,2	8,6	9,0
130	2,6	3,0	3,4	4,0	4,6	4,9	5,2	6,0	6,4	6,8	7,1
140	2,1	2,5	2,8	3,4	3,8	4,2	4,4	5,0	5,4	5,7	6,0
150	1,9	2,2	2,5	2,9	3,4	3,6	3,8	4,4	4,7	5,0	5,2
160	1,7	1,9	2,2	2,6	3,0	3,2	3,4	3,9	4,2	4,4	4,6
170	1,5	1,8	2,0	2,4	2,7	2,9	3,1	3,5	3,8	4,0	4,2
180	1,4	1,6	1,8	2,2	2,5	2,7	2,8	3,2	3,5	3,7	3,9

Fuente: elaboración propia

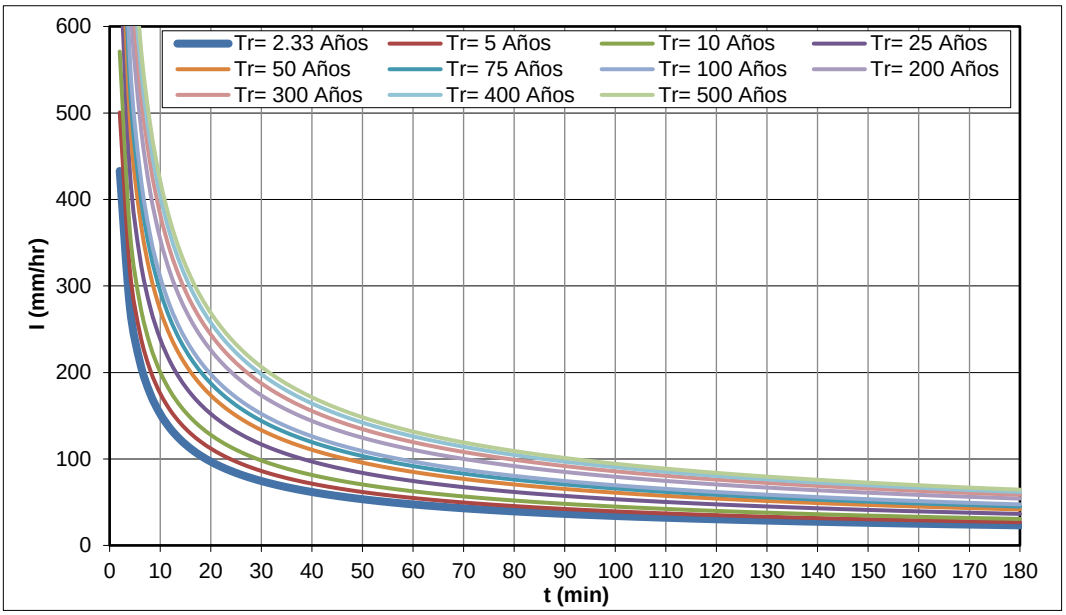


Figura 167. Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia. Estación Tenjo.
Fuente: elaboración propia

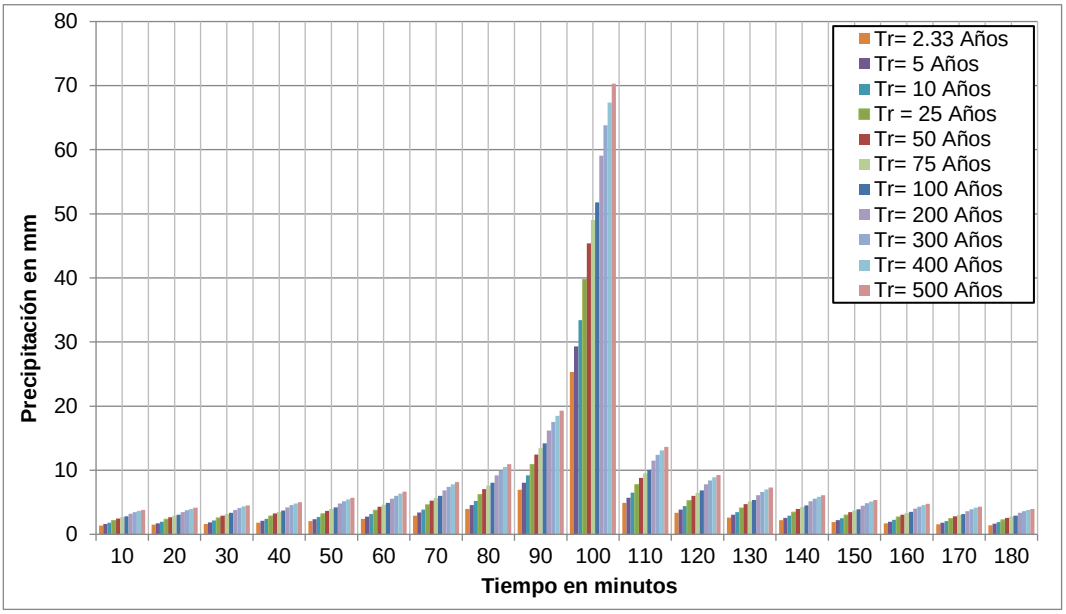


Figura 168. Hietograma de precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Tenjo.
Fuente: elaboración propia

Tabla 52. Valores de la precipitación de diseño hidrológico para tiempos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años y una duración de 180 min. Estación Tenjo

Duración	Precipitación (mm)										
(min)	Tr=2,33	Tr = 5	Tr= 10	Tr = 25	Tr = 50	Tr = 75	Tr = 100	Tr = 200	Tr = 300	Tr = 400	Tr = 500
10	1,4	1,6	1,8	2,2	2,5	2,7	2,8	3,2	3,5	3,7	3,8
20	1,5	1,7	2,0	2,3	2,7	2,9	3,1	3,5	3,8	4,0	4,1
30	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,3	3,8	4,1	4,3	4,5
40	1,8	2,1	2,4	2,8	3,2	3,5	3,7	4,2	4,6	4,8	5,0
50	2,1	2,4	2,7	3,2	3,7	4,0	4,2	4,8	5,2	5,5	5,7
60	2,4	2,8	3,2	3,8	4,3	4,6	4,9	5,6	6,0	6,4	6,6
70	2,9	3,4	3,9	4,6	5,3	5,7	6,0	6,8	7,4	7,8	8,1
80	3,9	4,6	5,2	6,2	7,1	7,6	8,1	9,2	9,9	10,5	10,9
90	7,0	8,0	9,2	10,9	12,5	13,5	14,2	16,2	17,5	18,5	19,3
100	25,3	29,3	33,4	39,8	45,4	49,0	51,8	59,1	63,8	67,4	70,3
110	4,9	5,7	6,5	7,7	8,8	9,5	10,1	11,5	12,4	13,1	13,7
120	3,3	3,9	4,4	5,3	6,0	6,5	6,8	7,8	8,4	8,9	9,3
130	2,6	3,0	3,5	4,1	4,7	5,1	5,4	6,1	6,6	7,0	7,3
140	2,2	2,6	2,9	3,5	4,0	4,3	4,5	5,1	5,6	5,9	6,1
150	1,9	2,2	2,5	3,0	3,4	3,7	3,9	4,5	4,8	5,1	5,3
160	1,7	2,0	2,3	2,7	3,1	3,3	3,5	4,0	4,3	4,6	4,8
170	1,6	1,8	2,1	2,4	2,8	3,0	3,2	3,6	3,9	4,1	4,3
180	1,4	1,7	1,9	2,3	2,6	2,8	2,9	3,3	3,6	3,8	4,0

Fuente: elaboración propia

5.6.2 Régimen de caudales

5.6.2.1 Caracterización de caudales en las corrientes hídricas

En la zona de estudio y su área de influencia se identificaron cuatro (4) estaciones limnimétricas y dos (2) limnigráficas (Tabla 53) operadas por la CVC. La selección de las estaciones hidrométricas a emplear se realizó a partir de su ubicación sobre los cauces de los drenajes en estudio y las que cuentan con periodos de datos más cercanos a la fecha actual.

Tabla 53. Estaciones hidrológicas con influencia en el área de estudio

Estación	Entidad	Código	Municipio	Latitud	Longitud	Altura	Categoría	Año Inicio
JUANCHITO	CVC	2610000401	Palmira	873452,42	1066908,69	956	Limnimétrica	1945
AMAIME	CVC	2612800403	El Cerrito	890926,02	1089535,54	1032	Limnimétrica	1984
BOLO ARRIBA	CVC	2612720401	Palmira	875802,67	1086633,44	984	Limnimétrica	1960
BOLO LOS MINCHOS	CVC	2612720403	Pradera	869952,34	1100392,68	1394	Limnigráfica	1992
FRAILE BUCHITOLO	CVC	2612710401	Candelaria	864927,09	1080859,43	979	Limnimétrica	1961
GUACHAL PALMASECA	CVC	2612700401	Palmira	885379,02	1068903,35	947	Limnigráfica	1977

Fuente: elaboración propia

En la Figura 169 se presenta la ubicación de las estaciones hidrométricas con influencia en el área de estudio.

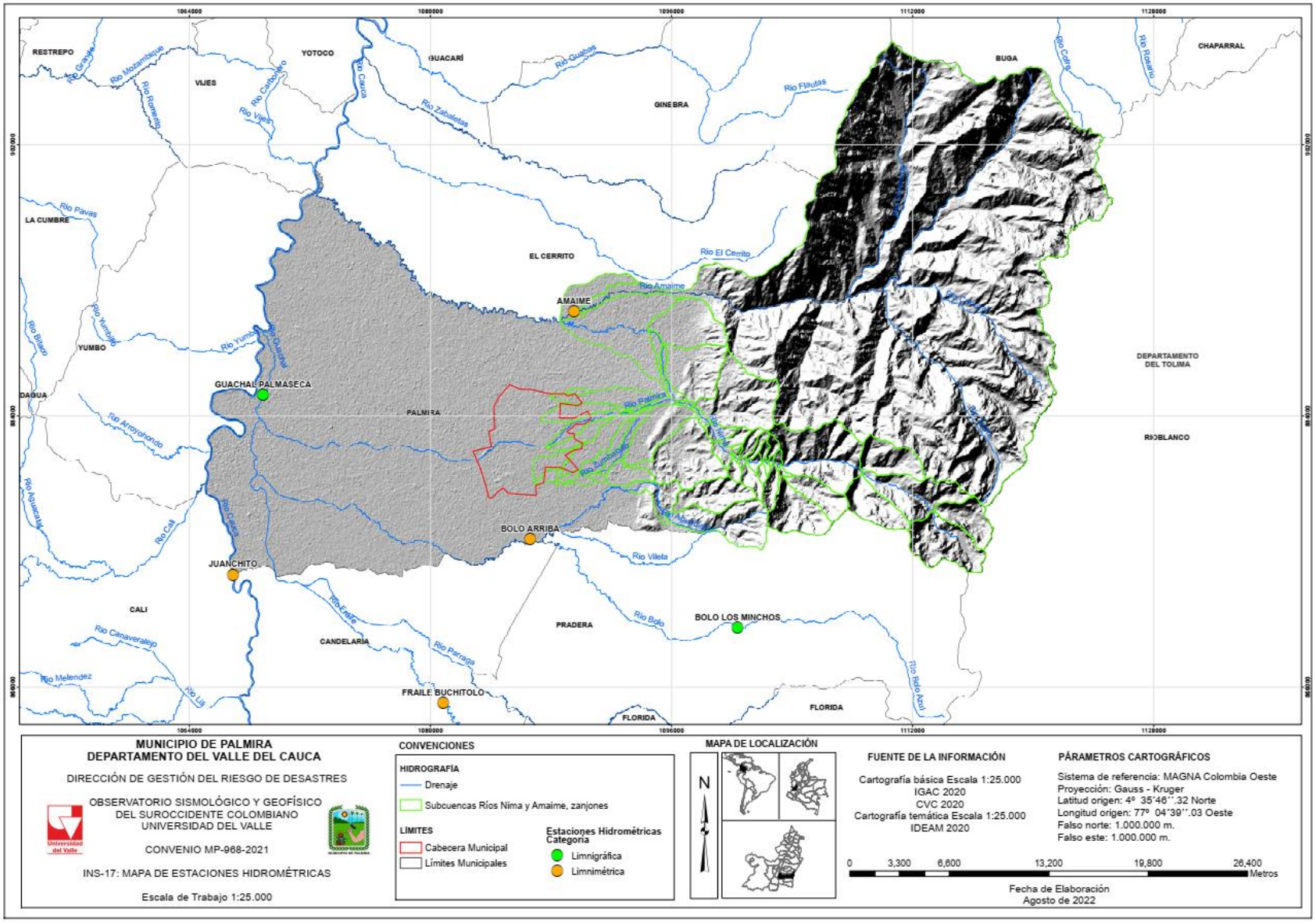


Figura 169. Localización de las estaciones hidrométricas en relación con el área de estudio del municipio de Palmira
Fuente: elaboración propia

5.6.2.1.1 Caudales río Cauca

La información para el presente análisis fue obtenida de los registros de la estación hidrométrica Cauca – Juanchito, localizada sobre el cauce del río Cauca, operada por la CVC.

Las curvas de la variación anual de caudales medios, máximos y mínimos instantáneos de la estación hidrológica Cauca - Juanchito se presentan en la Figura 170.

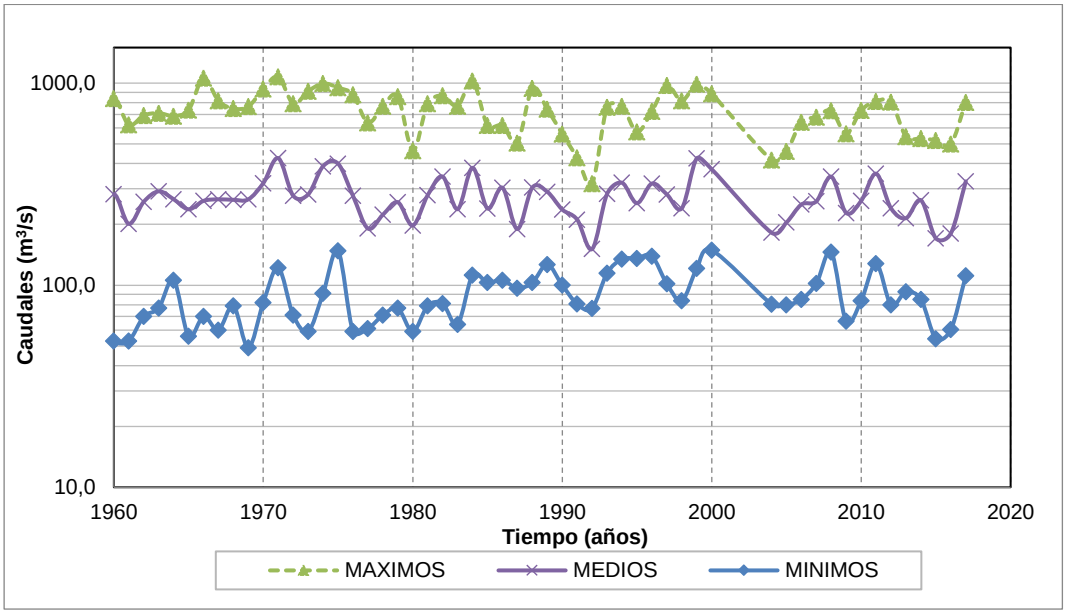


Figura 170. Variación anual de caudales máximos, medios y mínimos anuales en el río Cauca. Estación Cauca - Juanchito. Periodo: 1945 - 2017.
Fuente: elaboración propia

De acuerdo con la información suministrada por la CVC, se pudo establecer que el río Cauca, en la estación Cauca – Juanchito, registra una variación anual de caudales máximos entre 318,4 m^3/s y 1074 m^3/s, el promedio de caudales máximos mensuales multianuales para esta estación es de 740,6 m^3/s. Los caudales medios anuales oscilan entre 151 m^3/s y 454 m^3/s, con un valor promedio de 574,3 m^3/s; mientras que los caudales mínimos reportados presentan valores que van desde 48 m^3/s hasta 149 m^3/s y un promedio de 87,7 m^3/s.

En cuanto a los caudales promedios mensuales multianuales se tiene que, de acuerdo con los datos registrados por la estación Cauca-Juanchito, el mes que presenta mayores valores es diciembre, mientras que septiembre exhibe los registros de caudales más bajos, siendo el promedio para esta estación de 273,4 m^3/s (ver Figura 171).

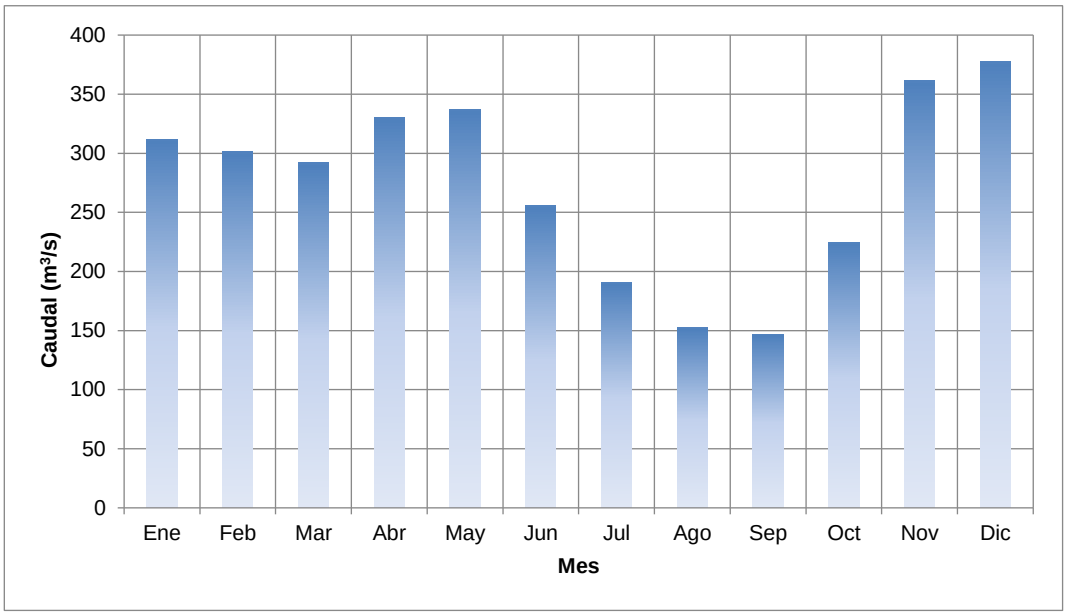


Figura 171. Variación de caudales medios mensuales multianuales en el río Cauca. Estación Cauca - Juanchito. Periodo: 1945 - 2017.
Fuente: elaboración propia

La evaluación de la disponibilidad de agua sin regulación se representa, generalmente, a través de la curva de duración de caudales. Esta consiste en un gráfico en el cual se relacionan los caudales medios del río, ordenados por su magnitud, contra la frecuencia de ocurrencia del evento en términos del porcentaje total.

Las curvas de duración de caudales indican el periodo de tiempo (en términos de porcentaje) en que un determinado caudal es igualado o excedido en magnitud. En la Figura 172 presenta la curva de duración de caudales medios diarios en el río Cauca, estación Cauca-Juanchito. En la Tabla 55 se muestran los valores de los caudales para los porcentajes de tiempo del 10%, 25%, 50%, 75% y 90%, para el periodo comprendido entre los años 1945 y 2017.

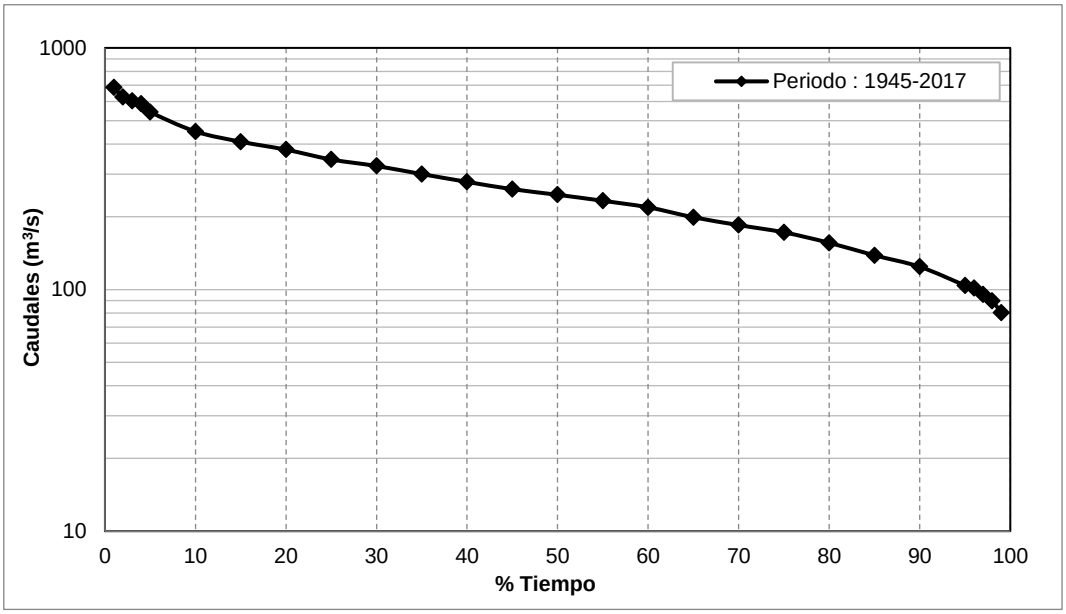


Figura 172. Curva de duración de caudales medios mensuales en el río Cauca. Estación Cauca - Juanchito. Periodo: 1945 - 2017.
Fuente: elaboración propia

La curva de duración de caudales elaborada con base en los registros de los caudales medios mensuales de la estación Cauca - Juanchito ubicada sobre el cauce del río Cauca, presenta un Q10 (caudal de aguas altas) de 450,8 m^3/s, un Q50 (caudal medio) de 246,7 m^3/s, un Q90 (caudal base) de 124,2 m^3/s.

Asimismo, se realizó un análisis de frecuencia de la información hidrológica con el fin de relacionar la magnitud de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribuciones de probabilidad. Con base en las series de caudales máximos instantáneos anuales se calcularon los caudales extremos para períodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 100, 300 y 500 años para el periodo comprendido entre los años 1945 y 2017, aplicando un análisis de frecuencia utilizando como factor de frecuencia las distribuciones de Normal, Gumbel, Pearson III y Log Pearson. Los resultados se presentan en la Figura 173 mientras que, en la Tabla 54 se presentan los caudales máximos esperados (predicción) asociados a diferentes períodos de retorno. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Gumbel.

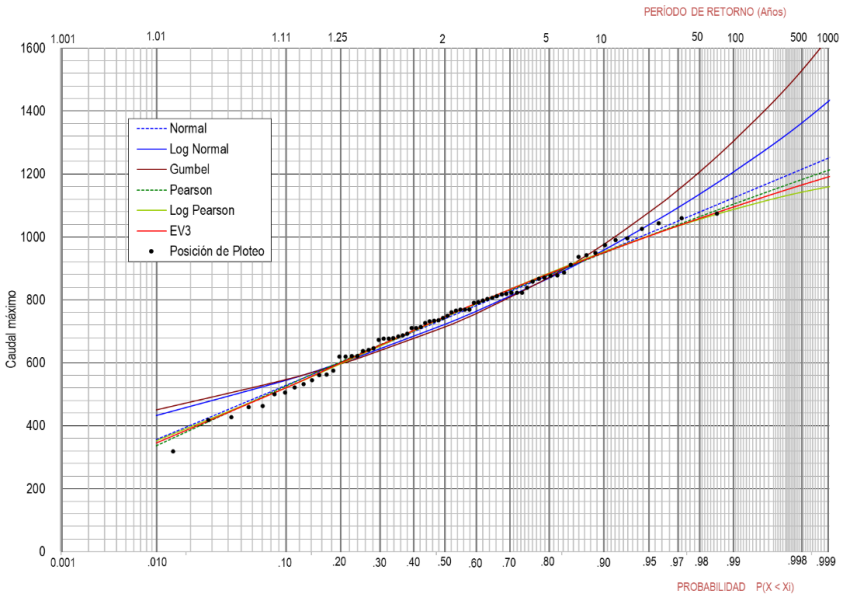


Figura 173. Caudales máximos característicos para diferentes periodos de retorno en el río Cauca Estación Cauca - Juanchito. Periodo: 1945 - 2017.
Fuente: elaboración propia

Tabla 54. Caudales máximos esperados (predicción) asociados a diferentes períodos de retorno. Estación Cauca - Juanchito. Periodo: 1945 - 2017.

Tr (Años)	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG- PEAR	LOG-NOR
2,33	770,1	743,9	774,4	776,5	751,9
5	879,5	872,2	880,7	886,3	870,0
10	952,1	976,7	949,0	953,4	958,5
25	1029,5	1108,7	1019,9	1018,5	1062,8
50	1079,6	1206,6	1064,8	1056,6	1136,1
100	1124,6	1303,9	1104,4	1088,0	1206,4
500	1215,6	1528,5	1182,8	1142,9	1362,2
10000	1354,4	1945,7	1297,2	1204,5	1639,2
chi 2	28,21	175,40	20,74	23,28	111,68

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 55 presentan los principales caudales característicos del río Cauca en la estación Cauca - Juanchito. En este cuadro se consignan los caudales máximos y mínimos instantáneos presentados para todo el período de registro con su respectivo año de ocurrencia, el promedio de los caudales máximos y mínimos instantáneos anuales y los caudales correspondientes a eventos con diferentes periodos de retorno y los caudales específico y unitario.

Tabla 55. Caudales característicos del río Cauca. Estación: Cauca - Juanchito (1945-2017).

Caudal Característico			Valor	
Caudal Medio Multianual (m^3/s)		**Máximo**	835,9	Diciembre
		Mínimo	71,2	Septiembre
		Medio	273,4	
Caudal Instantáneo Histórico (m^3/s)		**Máximo**	1074	1971
		Mínimo	48	1946
Curva de Duración de Caudales	**Caudal (m^3/s)**	**% de Tiempo en que los caudales son**	**10%**	450,83
			25%	345,29
			50%	246,68
			75%	172,41

Tabla 55. Caudales característicos del río Cauca. Estación: Cauca - Juanchito (1945-2017).

Caudal Característico		Valor	
	igualados o excedidos	90%	124,23
Caudales Máximos utilizando método de distribución Gumbel Estimados para un Periodo de Retorno (T) (m^3/s)	T=2,33		774,4
	T=5		880,7
	T=10		949,0
	T=25		1019,9
	T=50		1064,8
	T=100		1104,4
	T=500		1182,8
	T=10000		1297,2

Fuente: elaboración propia

5.6.2.1.2 Caudales río Amaime

La información para el presente análisis fue obtenida de los registros de la estación hidrométrica Amaime, localizada sobre el cauce del río del mismo nombre, operada por la CVC.

Las curvas de la variación anual de caudales medios, máximos y mínimos instantáneos en el río Amaime, estación hidrológica Amaime, se presentan en la Figura 174.

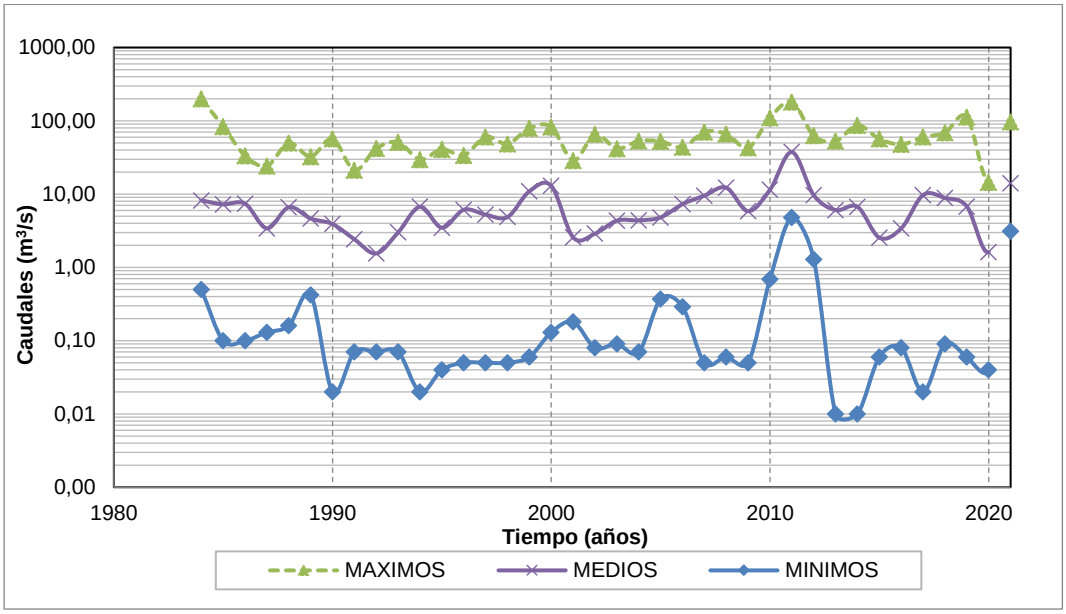


Figura 174. Variación anual de caudales máximos, medios y mínimos anuales en el río Amaime. Estación Amaime. Periodo: 1984 - 2021.
Fuente: elaboración propia

De acuerdo con la información suministrada por la CVC, se pudo establecer que el río Amaime, en la estación del mismo nombre registra una variación anual de caudales máximos que está entre los 14,5 m^3/s y los 198,8 m^3/s, el promedio de caudales máximos mensuales multianuales para esta estación es de 62,7 m^3/s. Los caudales medios anuales oscilan entre 1,5 m^3/s y 37,5 m^3/s, con un valor promedio de 7,1 m^3/s; mientras que los caudales mínimos reportados presentan valores que van desde 0,01 m^3/s hasta 4,7 m^3/s y un promedio de 0,4 m^3/s.

En cuanto a los caudales promedios mensuales multianuales se tiene que, de acuerdo con los datos registrados en la estación Amaime, el mes que presenta mayores valores es noviembre, mientras que septiembre exhibe los registros de caudales más bajos, siendo el promedio para esta estación de 7,2 m^3/s (ver Figura 175).

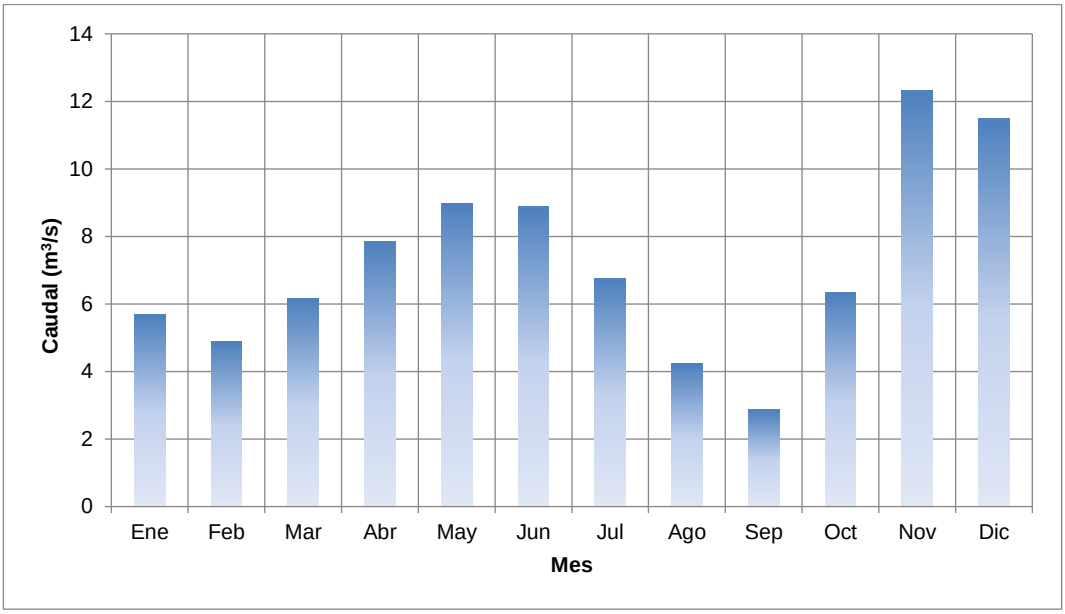


Figura 175. Variación de caudales medios mensuales multianuales en el río Amaime. Estación Amaime. Periodo: 1984 - 2021.
Fuente: elaboración propia

La evaluación de la disponibilidad de agua sin regulación se representa, generalmente, a través de la curva de duración de caudales. Esta consiste en un gráfico en el cual se relacionan los caudales medios del río, ordenados por su magnitud, contra la frecuencia de ocurrencia del evento en términos del porcentaje total.

Las curvas de duración de caudales indican el número de días del año o periodo de tiempo (en términos de porcentaje) en que un determinado caudal es igualado o excedido en magnitud. En la Figura 176 presenta la curva de duración de caudales medios diarios para la estación Amaime. En la Tabla 57 se muestran los valores de los caudales para los porcentajes de tiempo del 10%, 25%, 50%, 75% y 90%, para el periodo comprendido entre los años 1984 y 2021.

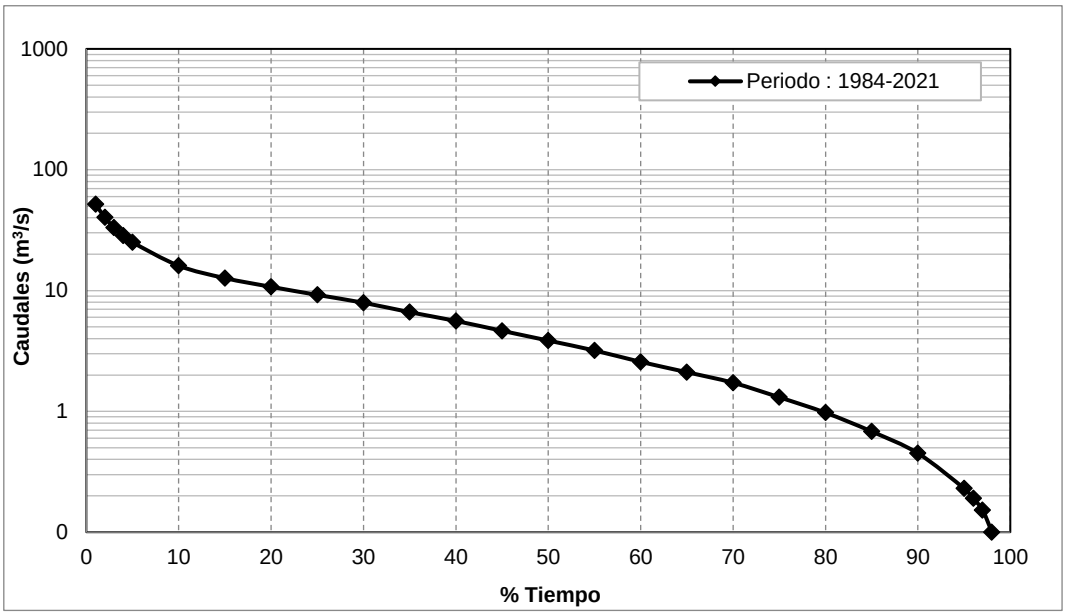


Figura 176. Curva de duración de caudales diarios en el río Amaime. Estación Amaime. Periodo: 1984 - 2021.
Fuente: elaboración propia

La curva de duración de caudales elaborada con los registros de los caudales diarios de la estación Amaime ubicada sobre el cauce del drenaje del mismo nombre, presenta un Q10 (caudal de aguas altas) de 13.8 m^3/s, un Q50 (caudal medio) de 5.1 m^3/s, un Q90 (caudal base) de 0.93 m^3/s.

Asimismo, se realizó un análisis de frecuencia de la información hidrológica con el fin de relacionar la magnitud de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribuciones de probabilidad. Con base en las series de caudales máximos instantáneos anuales se calcularon los caudales extremos para períodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 100, 300 y 500 años para el periodo comprendido entre los años 1984 y 2021, aplicando un análisis de frecuencia utilizando como factor de frecuencia las distribuciones de Normal, Gumbel, Pearson III, Log Pearson y Log Normal. Los resultados se presentan en la Figura 177 mientras que, en la Tabla 56 se presentan los caudales máximos esperados (predicción) asociados a diferentes períodos de retorno. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Log Pearson.

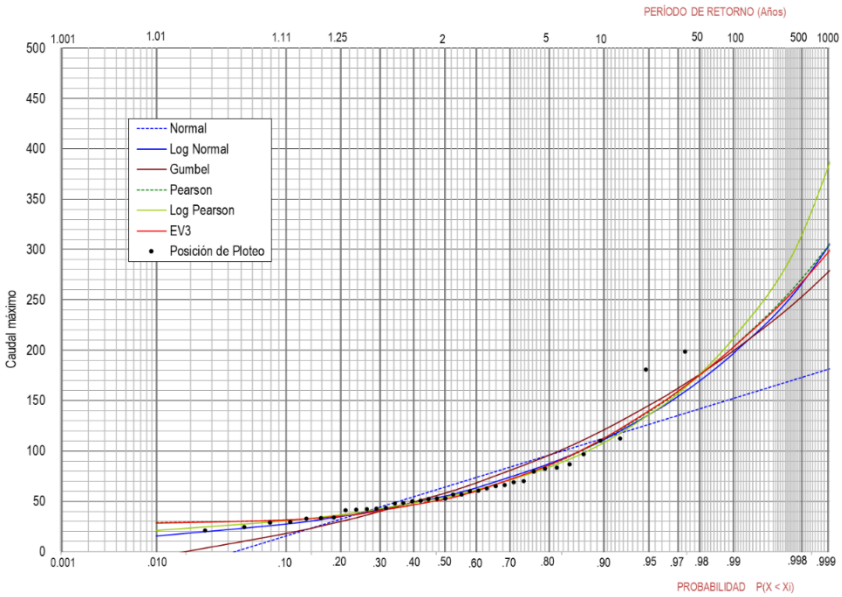


Figura 177. Caudales máximos característicos para diferentes periodos de retorno en el río Amaime. Estación Amaime. Periodo: 1984 - 2021.
Fuente: elaboración propia

Tabla 56. Caudales máximos esperados (predicción) asociados a diferentes períodos de retorno en el río Amaime. Estación Amaime. Periodo: 1984 - 2021.

Tr (Años)	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG- PEAR	LOG-NOR
2,33	70,8	65,3	57,7	59,1	60,8
5	95,8	96,0	85,7	84,0	87,4
10	112,4	121,0	111,7	108,2	111,1
25	130,2	152,5	147,2	144,4	143,6
50	141,6	176,0	174,8	175,9	169,4
100	151,9	199,2	203,0	211,4	196,7
500	172,8	253,0	270,8	313,7	265,9
chi 2	201,16	206,86	32,37	28,66	34,57

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 57 se presentan los principales caudales registrados por la estación Amaime. En este cuadro se consignan los caudales máximos y mínimos instantáneos presentados para todo el período de registro con su respectivo año de ocurrencia, el promedio de los caudales máximos y mínimos instantáneos anuales y los caudales correspondientes a eventos con diferentes periodos de retorno y los caudales específico y unitario.

Tabla 57. Caudales característicos del río Amaime. Estación: Amaime (1984-2021)

Caudal Característico			Valor	
Caudal Medio Multianual (m^3/s)		**Máximo**	82,7	Diciembre
		Mínimo	0,1	Septiembre
		Medio	7,2	
Caudal Instantáneo Histórico (m^3/s)		**Máximo**	198,8	1984
		Mínimo	0,01	2014
Curva de Duración de Caudales	**Caudal (m^3/s)**	**% de Tiempo en que los caudales son igualados o excedidos**	**10%**	13,82
			25%	9,63
			50%	5,07
			75%	2,24
			90%	0,93

Tabla 57. Caudales característicos del río Amaime. Estación: Amaime (1984-2021)

Caudal Característico		Valor
Caudales Máximos utilizando método de distribución Gumbel Estimados para un Periodo de Retorno (T) (m^3/s)	T=2,33	59,1
	T=5	61,4
	T=10	108,2
	T=25	144,4
	T=50	175,9
	T=100	211,4
	T=500	313,7
	T=10000	605,9

Fuente: elaboración propia

5.6.2.1.3 Caudales río Bolo

Estación Bolo Arriba

La información para el presente análisis fue obtenida de los registros de la estación hidrométrica Bolo arriba, localizada sobre el cauce del Bolo, operada por la CVC.

Las curvas de la variación anual de caudales medios, máximos y mínimos instantáneos de la estación hidrológica Bolo Arriba se presenta en la Figura 178.

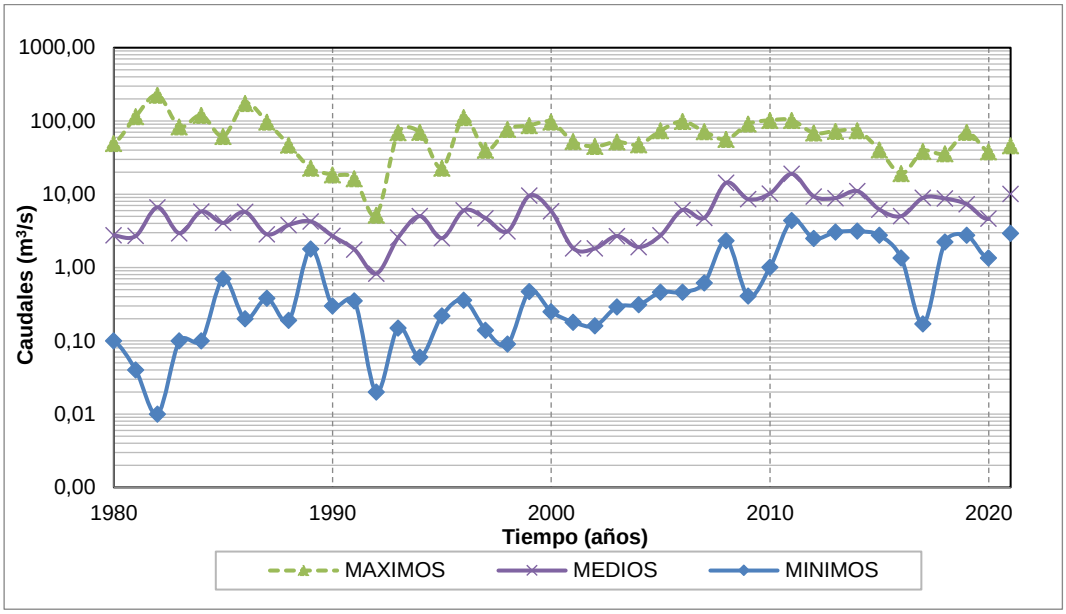


Figura 178. Variación anual de caudales máximos, medios y mínimos anuales en el río Bolo. Estación Bolo Arriba. Periodo: 1960 - 2021.
Fuente: elaboración propia

De acuerdo con la información suministrada por la CVC, se pudo establecer que el río Bolo, en la estación Bolo Arriba registra una variación anual de caudales máximos que está entre los 5,2 m^3/s y los 226m^3/s, el promedio de caudales máximos mensuales multianuales para esta estación es de 63,8 m^3/s. Los caudales medios anuales oscilan entre 0,8 m^3/s y 19 m^3/s, con un valor

promedio de 5,3 m^3/s; mientras que los caudales mínimos reportados presentan valores que van desde 0,01 m^3/s hasta 4,3 m^3/s y un promedio de 0,8 m^3/s.

En cuanto a los caudales promedios mensuales multianuales se tiene que, de acuerdo con los datos registrados por la estación Bolo Arriba, el mes que presenta mayores valores es noviembre, mientras que agosto exhibe los registros de caudales más bajos, siendo el promedio para esta estación de 5,3 m^3/s (ver Figura 179).

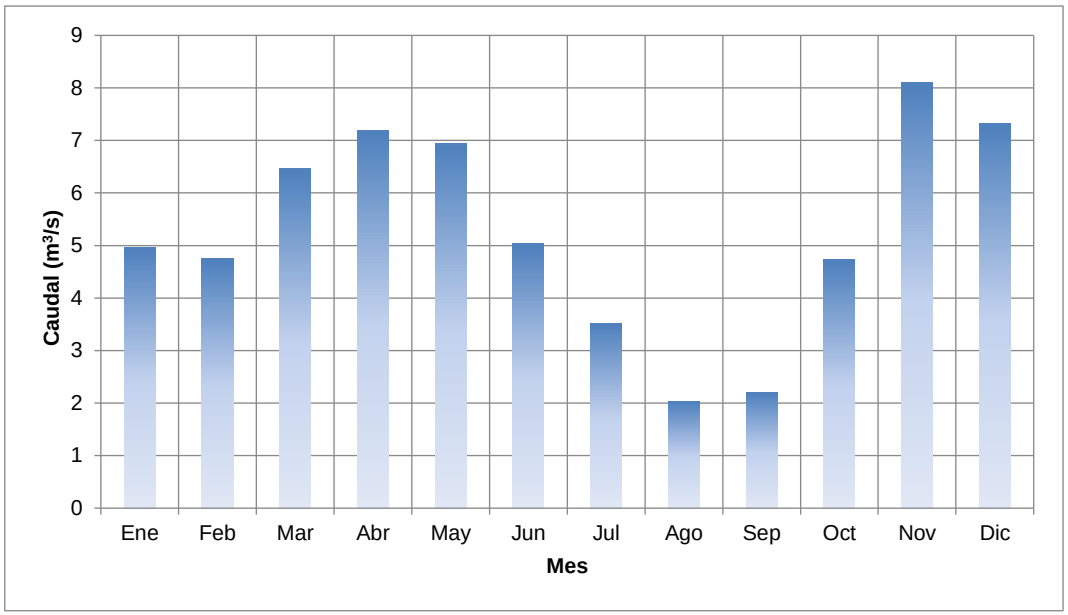


Figura 179. Variación de caudales medios mensuales multianuales en el río Bolo. Estación Bolo Arriba. Periodo: 1960 - 2021.
Fuente: elaboración propia

La evaluación de la disponibilidad de agua sin regulación se representa, generalmente, a través de la curva de duración de caudales. Esta consiste en un gráfico en el cual se relacionan los caudales medios del río, ordenados por su magnitud, contra la frecuencia de ocurrencia del evento en términos del porcentaje total.

Las curvas de duración de caudales indican el periodo de tiempo (en términos de porcentaje) en que un determinado caudal es igualado o excedido en magnitud. En la Figura 180 presenta la curva de duración de caudales medios diarios para la estación Bolo Arriba. En la Tabla 59 se muestran los valores de los caudales para los porcentajes de tiempo del 10%, 25%, 50%, 75% y 90%, para el periodo comprendido entre los años 1960 y 2021.

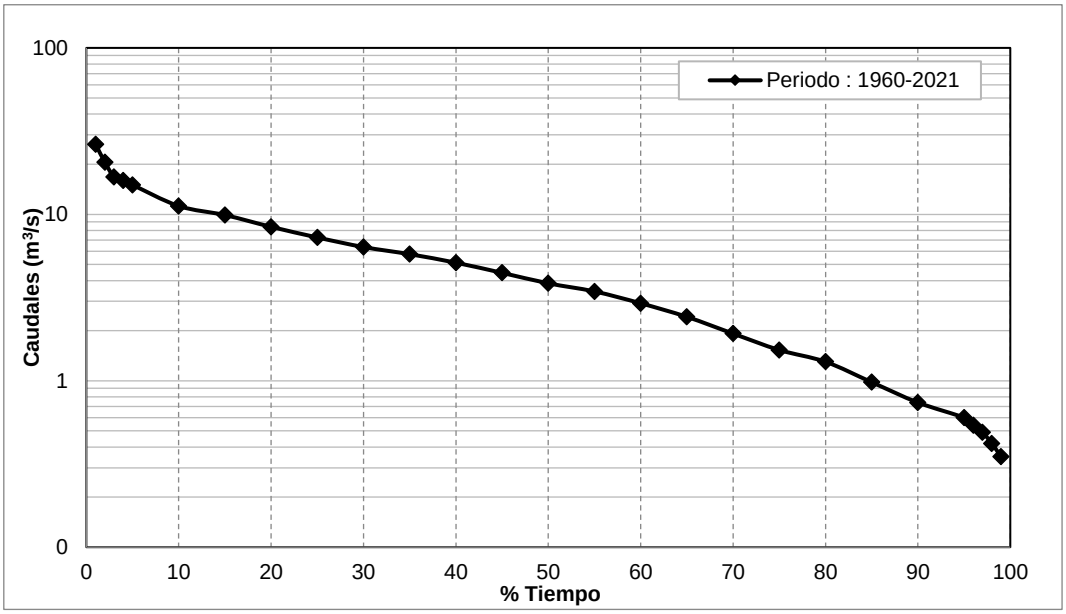


Figura 180. Curva de duración de caudales medios mensuales en el río Bolo. Estación Bolo Arriba. Periodo: 1960 - 2021.
Fuente: elaboración propia

La curva de duración de caudales elaborada con los registros de los caudales medios mensuales de la estación Bolo Arriba ubicada sobre el cauce del río Bolo, presenta un Q10 (caudal de aguas altas) de 11,2 m^3/s, un Q50 (caudal medio) de 3,9 m^3/s, un Q90 (caudal base) de 0,7 m^3/s.

Asimismo, se realizó un análisis de frecuencia de la información hidrológica con el fin de relacionar la magnitud de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribuciones de probabilidad. Con base en las series de caudales máximos instantáneos anuales se calcularon los caudales extremos para períodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 100, 300 y 500 años entre 1960 y 2021, aplicando un análisis de frecuencia utilizando como factor de frecuencia las distribuciones de Normal, Gumbel, Pearson III y Log Normal. Los resultados se presentan en la Figura 181 mientras que, en la Tabla 58 se presentan los caudales máximos esperados (predicción) asociados a diferentes períodos de retorno. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Log Normal.

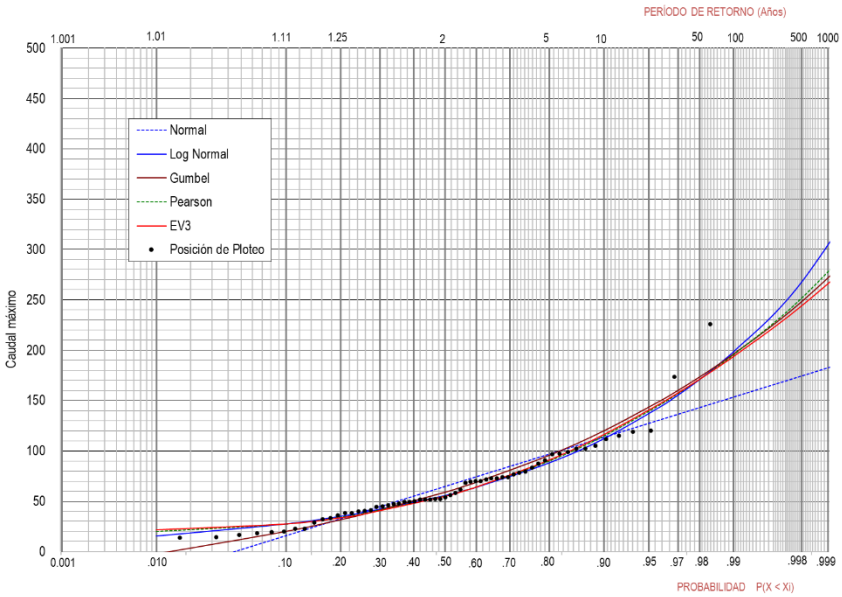


Figura 181. Caudales máximos característicos para diferentes periodos de retorno en el río Bolo. Estación Bolo Arriba. Periodo: 1960 - 2021.
Fuente: elaboración propia

Tabla 58. Caudales máximos esperados (predicción) asociados a diferentes períodos de retorno. Estación Bolo Arriba. Periodo: 1960 - 2021.

Tr (Años)	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-NOR
2,33	71,6	65,6	61,2	61,6
5	96,8	95,5	89,9	88,3
10	113,6	119,7	114,7	112,2
25	131,4	150,4	146,8	144,9
50	142,9	173,2	171,0	170,9
100	153,3	195,8	195,2	198,2
500	174,3	248,0	251,7	267,6
chi 2	115,73	201,78	43,14	37,96

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 59 se presentan los principales caudales registrados por la estación Bolo Arriba. En este cuadro se consignan los caudales máximos y mínimos instantáneos presentados para todo el período de registro con su respectivo año de ocurrencia, el promedio de los caudales máximos y mínimos instantáneos anuales y los caudales correspondientes a eventos con diferentes periodos de retorno y los caudales específico y unitario.

De acuerdo con los registros de caudales máximos obtenidos de la estación Bolo Arriba, en 1982 se superó el caudal (226 m^3/s) calculado para el periodo de retorno de 100 años.

Tabla 59. Caudales característicos del río Bolo. Estación: Bolo Arriba (1960-2021)

Caudal Característico			Valor	
Caudal Medio Multianual (m^3/s)		Máximo	40,8	Noviembre
		Mínimo	0,2	Marzo
		Medio	5,3	
Caudal Instantáneo Histórico (m^3/s)		Máximo	226,0	1982
		Mínimo	0,01	1982
Curva de Duración de Caudales	Caudal (m^3/s)	% de Tiempo en que los caudales son igualados o excedidos	10%	11,2
			25%	7,3
			50%	3,9
			75%	1,5
			90%	0,7
Caudales Máximos utilizando método de distribución Gumbel Estimados para un Periodo de Retorno (T) (m^3/s)		T=2,33	61,6	
		T=5	88,3	
		T=10	112,2	
		T=25	144,9	
		T=50	170,9	
		T=100	198,2	
		T=500	267,6	
		T=10000	422,9	

Fuente: elaboración propia

Estación Bolo Los Minchos

La información para el presente análisis fue obtenida de los registros de la estación hidrométrica Bolo – Los Minchos, localizada sobre el cauce del río Bolo, operada por la CVC.

Las curvas de la variación anual de caudales medios, máximos y mínimos instantáneos de la estación hidrológica Bolo Los Minchos se presenta en la Figura 182.

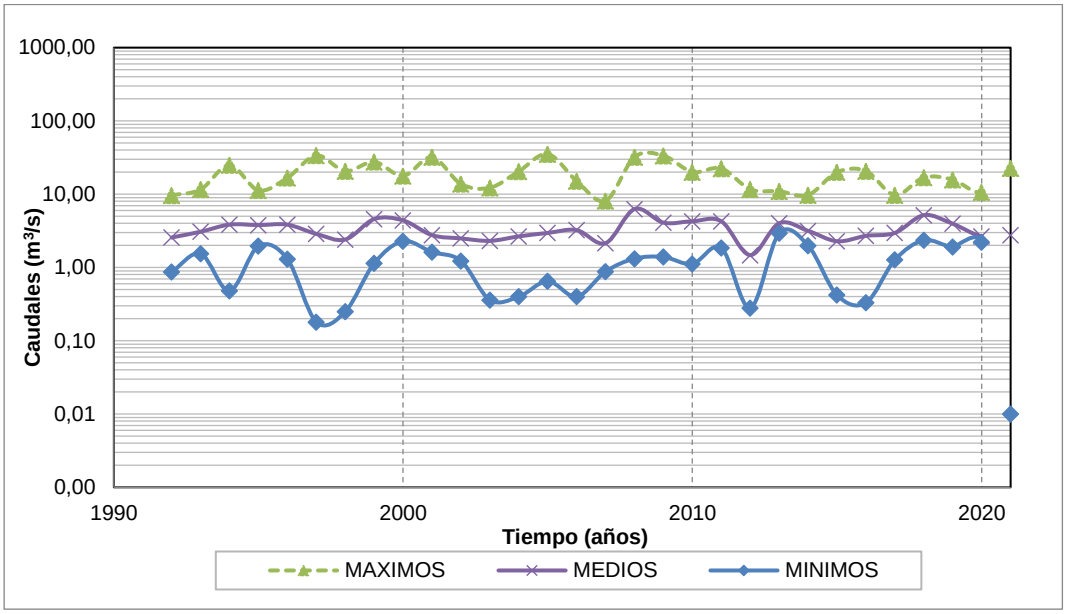


Figura 182. Variación anual de caudales máximos, medios y mínimos anuales en el río Bolo. Estación Bolo - Los Minchos. Periodo: 1992 - 2021.
Fuente: elaboración propia

De acuerdo con la información suministrada por la CVC, se pudo establecer que el río Bolo, en la estación Bolo - Los Minchos registra una variación anual de caudales máximos que está entre los 8,1 m^3/s y los 35,3 m^3/s, el promedio de caudales máximos mensuales multianuales para esta estación es de 18,9 m^3/s. Los caudales medios anuales oscilan entre 1,5 m^3/s y 6,3 m^3/s, con un valor promedio de 3,3 m^3/s; mientras que los caudales mínimos reportados presentan valores que van desde 0,01 m^3/s hasta 2,9 m^3/s y un promedio de 1,2 m^3/s.

En cuanto a los caudales promedios mensuales multianuales se tiene que, de acuerdo con los datos registrados por la estación Bolo Los Minchos, el mes que presenta mayores valores es diciembre, mientras que septiembre exhibe los registros de caudales más bajos, siendo el promedio para esta estación de 5,3 m^3/s (ver Figura 183).

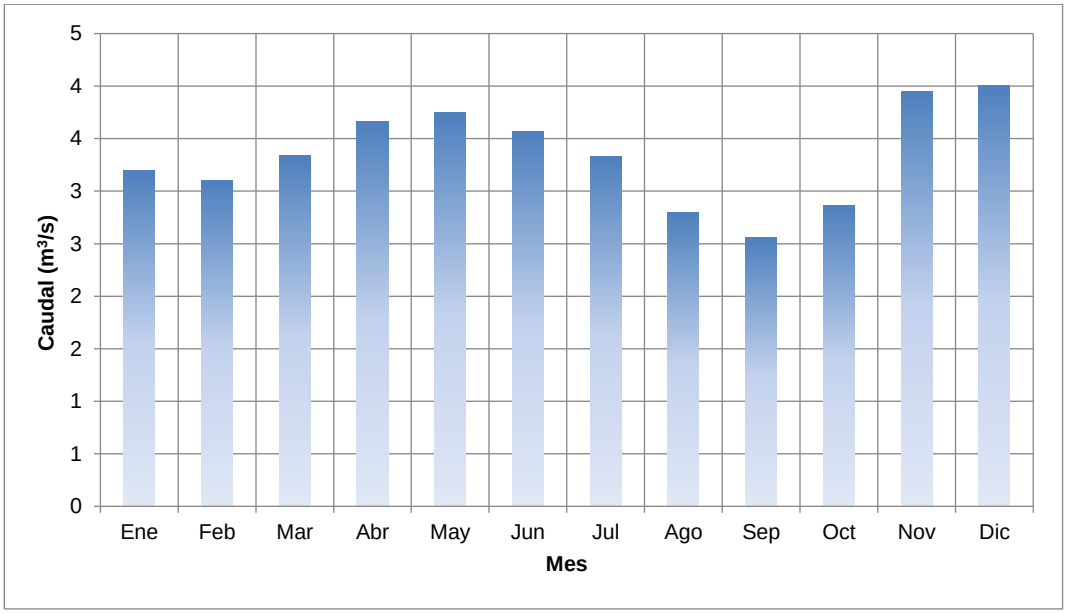


Figura 183. Variación de caudales medios mensuales multianuales en el río Bolo. Estación Bolo - Los Minchos. Periodo: 1992 - 2021.
Fuente: elaboración propia

Las curvas de duración de caudales indican el periodo de tiempo (en términos de porcentaje) en que un determinado caudal es igualado o excedido en magnitud. En la Figura 184 presenta la curva de duración de caudales medios diarios para la estación Bolo - Los Minchos. En la Tabla 61 se muestran los valores de los caudales para los porcentajes de tiempo del 10%, 25%, 50%, 75% y 90%, para el periodo comprendido entre los años 1992 y 2021.

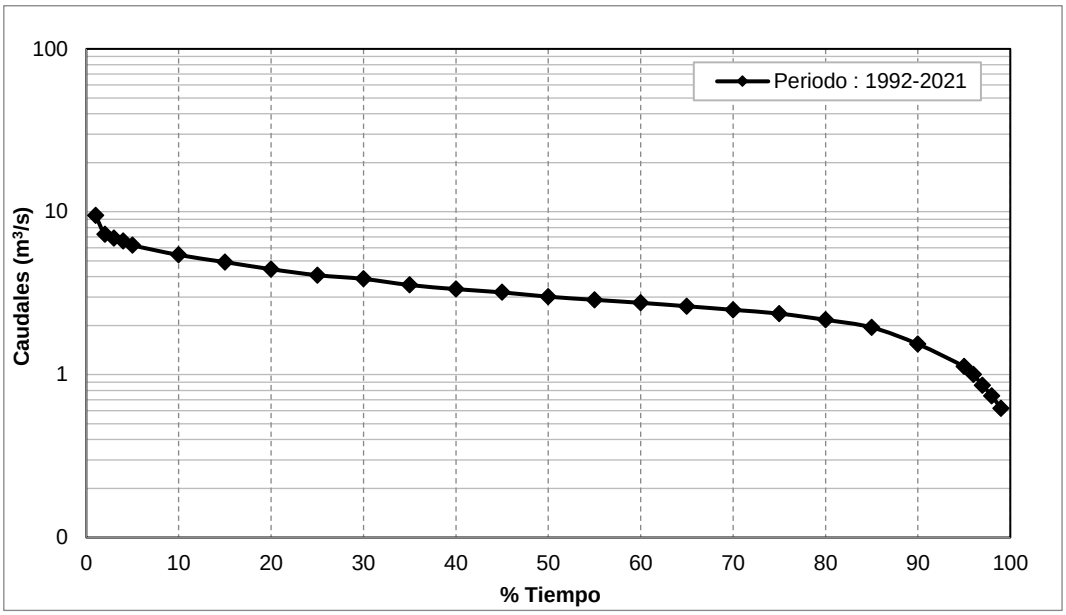


Figura 184. Curva de duración de Caudales medios mensuales en el río Bolo. Estación Bolo - Los Minchos. Periodo: 1992 - 2021.
Fuente: elaboración propia

La curva de duración de caudales elaborada con los registros de los caudales medios mensuales de la estación Bolo - Los Minchos ubicada sobre el cauce del río Bolo, presenta un Q10 (caudal de aguas altas) de 5,4 m^3/s, un Q50 (caudal medio) de 3 m^3/s, un Q90 (caudal base) de 1,5 m^3/s.

Asimismo, se realizó un análisis de frecuencia de la información hidrológica con el fin de relacionar la magnitud de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribuciones de probabilidad. Con base en las series de caudales máximos instantáneos anuales se calcularon los caudales extremos para períodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 100, 300 y 500 años entre 1992 y 2021, aplicando un análisis de frecuencia utilizando como factor de frecuencia las distribuciones de Normal, Gumbel, Pearson III y Log Normal. Los resultados se presentan en la Figura 185 mientras que, en la Tabla 60 se presentan los caudales máximos esperados (predicción) asociados a diferentes períodos de retorno. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Gumbel.

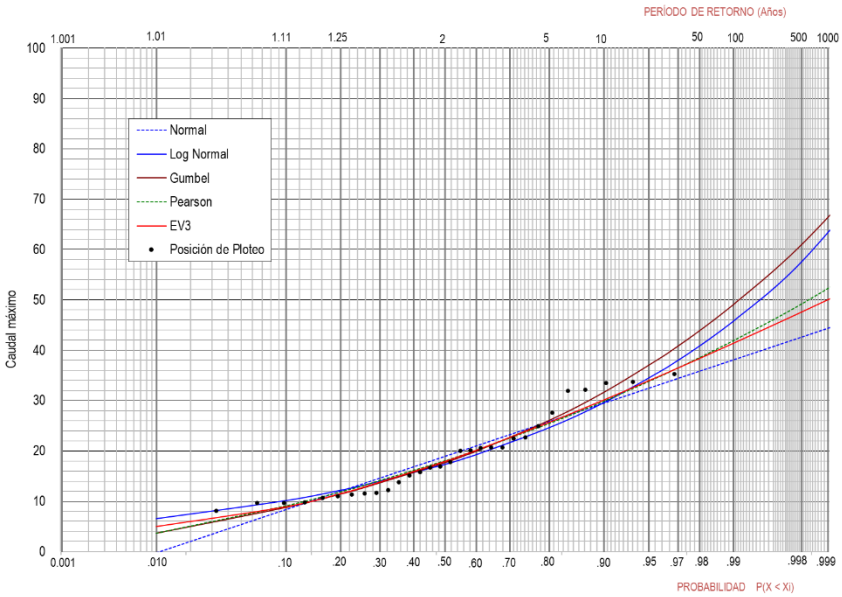


Figura 185. Caudales máximos característicos para diferentes periodos de retorno en el río Bolo. Estación Bolo - Los Minchos. Periodo: 1992 - 2021.
Fuente: elaboración propia

Tabla 60. Caudales máximos esperados (predicción) asociados a diferentes períodos de retorno en el río Bolo. Estación Bolo - Los Minchos. Periodo: 1992 - 2021.

Tr (Años)	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-NOR
2,33	20,4	19,2	19,5	18,7
5	25,9	26,1	25,5	24,7
10	29,5	31,6	29,9	29,6
25	33,4	38,7	35,0	36,0
50	35,9	43,9	38,6	40,8
100	38,1	49,0	41,9	45,7
500	42,6	61,0	49,2	57,6
chi 2	12,31	4,24	4,92	4,65

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 61 se presentan los principales caudales registrados por la estación Bolo - Los Minchos. En este cuadro se consignan los caudales máximos y mínimos instantáneos presentados para todo el período de registro con su respectivo año de ocurrencia, el promedio de los caudales máximos y mínimos instantáneos anuales y los caudales correspondientes a eventos con diferentes periodos de retorno y los caudales específico y unitario.

Tabla 61. Caudales característicos del río Bolo. Estación: Bolo - Los Minchos (1992-2021)

Caudal Característico			Valor	
Caudal Medio Multianual (m^3/s)		**Máximo**	11,4	Diciembre
		Mínimo	0,03	Mayo
		Medio	3,3	
Caudal Instantáneo Histórico (m^3/s)		**Máximo**	35,3	2005
		Mínimo	0,001	2021
Curva de Duración de Caudales	**Caudal (m^3/s)**	**% de Tiempo en que los caudales son igualados o excedidos**	**10%**	5,4
			25%	4,1
			50%	3,0
			75%	2,4
			90%	1,5

Tabla 61. Caudales característicos del río Bolo. Estación: Bolo - Los Minchos (1992-2021)

Caudal Característico		Valor
Caudales Máximos utilizando método de distribución Gumbel Estimados para un Periodo de Retorno (T) (m^3/s)	T=2,33	19,5
	T=5	26,1
	T=10	31,6
	T=25	38,7
	T=50	43,9
	T=100	49,0
	T=500	61,0
	T=10000	83,2

Fuente: elaboración propia

5.6.2.1.4 Caudales río Fraile

La información para el presente análisis fue obtenida de los registros de la estación hidrométrica Fraile - Buchitolo, localizada sobre el cauce del río Fraile, operada por la CVC.

Las curvas de la variación anual de caudales medios, máximos y mínimos instantáneos de la estación hidrológica Fraile - Buchitolo se presenta en la Figura 186.

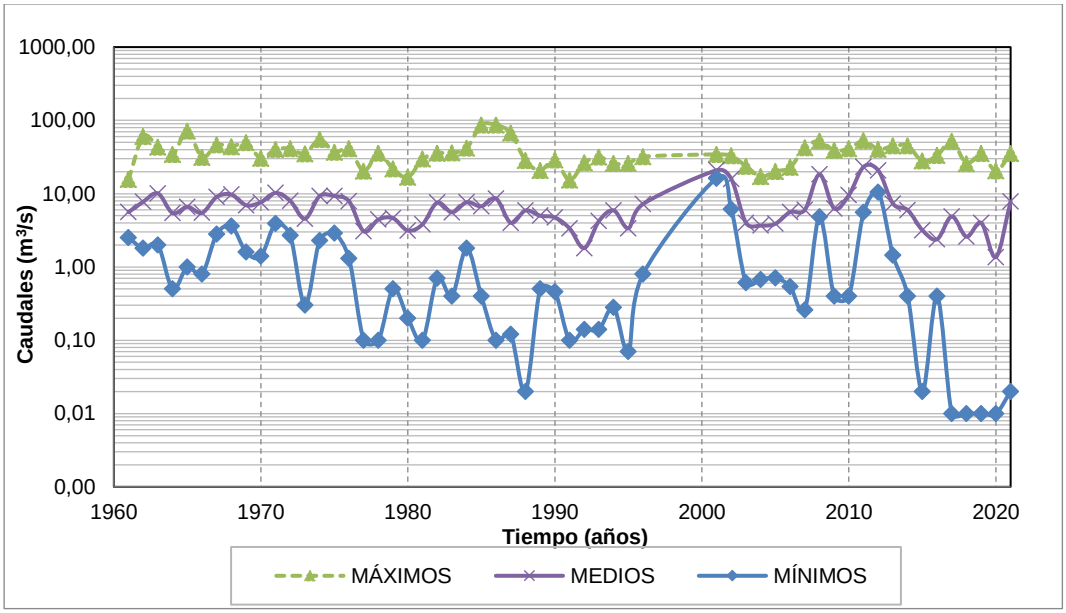


Figura 186. Variación anual de caudales máximos, medios y mínimos anuales en el río Fraile. Estación Fraile - Buchitolo. Periodo: 1961 - 2021.
Fuente: elaboración propia

De acuerdo con la información suministrada por la CVC, se pudo establecer que el río Fraile, en la estación Fraile – Buchitolo, registra una variación anual de caudales máximos que está entre los 15,3 m^3/s y los 86,3 m^3/s, el promedio de caudales máximos mensuales multianuales para esta estación es de 37,3 m^3/s. Los caudales medios anuales oscilan entre 1,4 m^3/s y 23,2 m^3/s, con un valor promedio de 7 m^3/s; mientras que los caudales mínimos reportados presentan valores que van desde 0,01 m^3/s hasta 16,2 m^3/s y un promedio de 1,5 m^3/s.

En cuanto a los caudales promedios mensuales multianuales se tiene que, de acuerdo con los datos registrados por la estación Fraile - Buchitolo, el mes que presenta mayores valores es mayo, mientras que septiembre exhibe los registros de caudales más bajos, siendo el promedio para esta estación de 6,9 m^3/s (ver Figura 187).

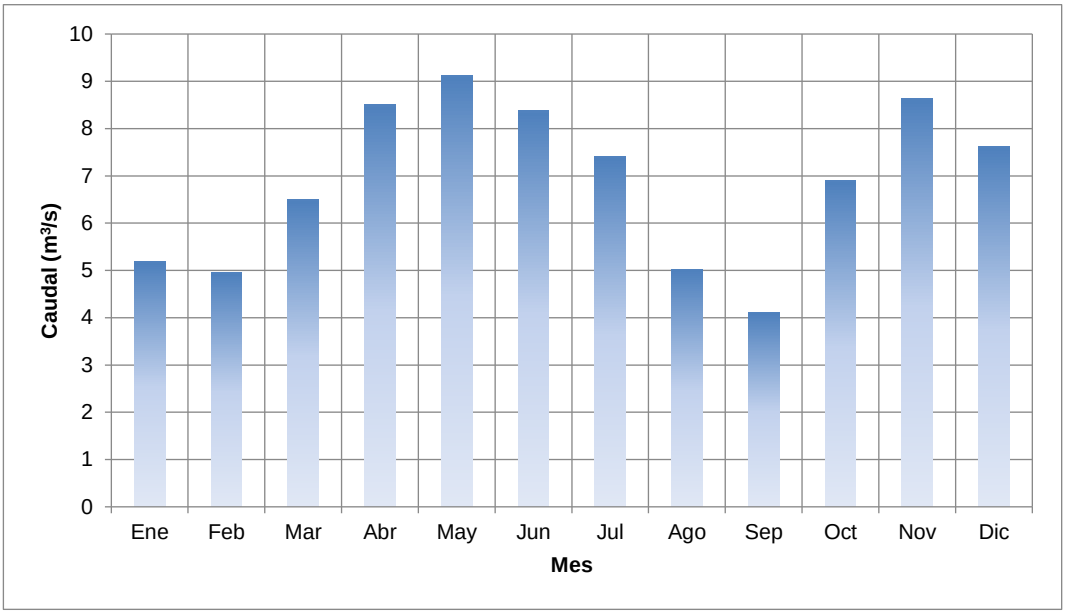


Figura 187. Variación de caudales medios mensuales multianuales en el río Fraile. Estación Fraile - Buchitolo. Periodo: 1961 - 2021.
Fuente: elaboración propia

Las curvas de duración de caudales indican el número de días del año o periodo en términos de porcentaje del tiempo en que un determinado caudal es igualado o excedido en magnitud. En la Figura 188 presenta la curva de duración de caudales medios diarios para la estación Fraile - Buchitolo. En la Tabla 63 se muestran los valores de los caudales para los porcentajes de tiempo del 10%, 25%, 50%, 75% y 90%, para el periodo comprendido entre los años 1961 y 2021.

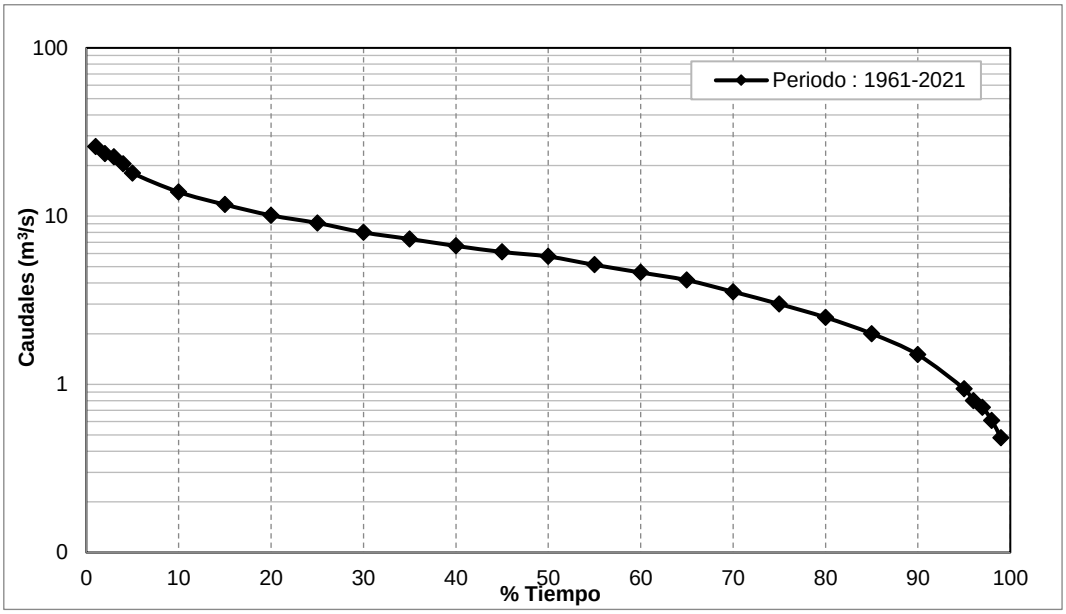


Figura 188. Curva de duración de caudales medios mensuales en el río Fraile. Estación Fraile - Buchitolo. Periodo: 1961 - 2021.
Fuente: elaboración propia

La curva de duración de caudales elaborada con los registros de los caudales medios mensuales de la estación Fraile - Buchitolo ubicada sobre el cauce del río Fraile, presenta un Q10 (caudal de aguas altas) de 13,9 m^3/s, un Q50 (caudal medio) de 5,8 m^3/s, un Q90 (caudal base) de 1,5 m^3/s.

Asimismo, se realizó un análisis de frecuencia de la información hidrológica con el fin de relacionar la magnitud de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribuciones de probabilidad. Con base en las series de caudales máximos instantáneos anuales se calcularon los caudales extremos para períodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 100, 300 y 500 años entre 1961 y 2021, aplicando un análisis de frecuencia utilizando como factor de frecuencia las distribuciones de Normal, Gumbel, Pearson III y Log Normal. Los resultados se presentan en la Figura 189 mientras que, en la Tabla 62 se presentan los caudales máximos esperados (predicción) asociados a diferentes períodos de retorno. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Log Normal.

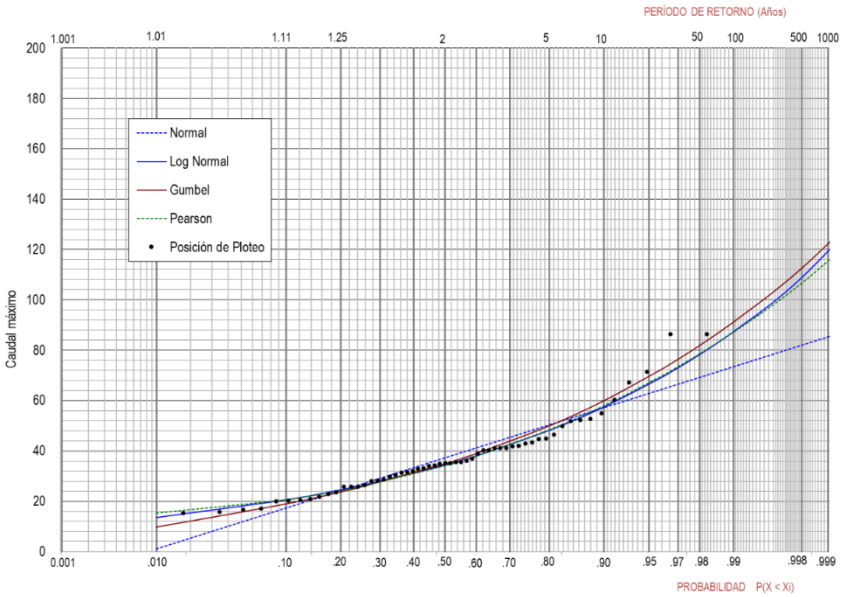


Figura 189. Caudales máximos característicos para diferentes periodos de retorno en el río Fraile. Estación Fraile - Buchitolo. Periodo: 1961 - 2021.
Fuente: elaboración propia

Tabla 62. Caudales máximos esperados (predicción) asociados a diferentes períodos de retorno en el río Fraile. Estación Fraile - Buchitolo. Periodo: 1961 - 2021.

Tr (Años)	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-NOR
2,33	40,1	37,7	36,8	37,0
5	50,4	49,9	48,4	48,2
10	57,2	59,8	58,0	57,5
25	64,5	72,4	69,9	69,3
50	69,2	81,8	78,6	78,3
100	73,4	91,0	87,1	87,3
500	82,0	112,4	106,6	108,9
chi 2	54,04	7,97	7,02	6,60

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 63 se presentan los principales caudales registrados por la estación Fraile - Buchitolo. En este cuadro se consignan los caudales máximos y mínimos instantáneos presentados para todo el período de registro con su respectivo año de ocurrencia, el promedio de los caudales máximos y mínimos instantáneos anuales y los caudales correspondientes a eventos con diferentes periodos de retorno y los caudales específico y unitario.

Tabla 63. Caudales característicos del río Fraile. Estación: Fraile - Buchitolo (1961-2021)

Caudal Característico			Valor	
Caudal Medio Multianual (m^3/s)		**Máximo**	33,9	Diciembre
		Mínimo	0,22	Enero
		Medio	6,9	
Caudal Instantáneo Histórico (m^3/s)		**Máximo**	86,3	1985
		Mínimo	0,010	2020
Curva de Duración de Caudales	**Caudal (m^3/s)**	**% de Tiempo en que los caudales son igualados o excedidos**	**10%**	13,9
			25%	9,1
			50%	5,8
			75%	3,0
			90%	1,5

Tabla 63. Caudales característicos del río Fraile. Estación: Fraile - Buchitolo (1961-2021)

Caudal Característico		Valor
Caudales Máximos utilizando método de distribución Gumbel Estimados para un Periodo de Retorno (T) (m^3/s)	T=2,33	37,0
	T=5	48,2
	T=10	57,5
	T=25	69,3
	T=50	78,3
	T=100	87,3
	T=500	108,9
	T=10000	152,4

Fuente: elaboración propia

5.6.2.1.5 Caudales río Guachal

La información para el presente análisis fue obtenida de los registros de la estación hidrométrica Guachal - Palmaseca, localizada sobre el cauce del río Guachal, operada por la CVC.

Las curvas de la variación anual de caudales medios, máximos y mínimos instantáneos de la estación hidrológica Guachal - Palmaseca se presenta en la Figura 190.

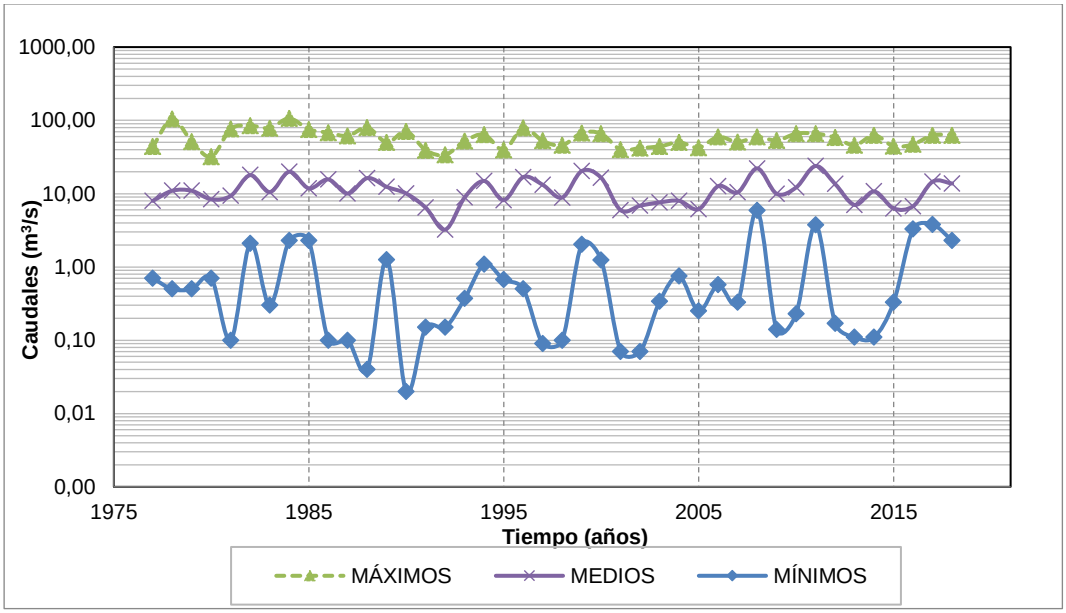


Figura 190. Variación anual de caudales máximos, medios y mínimos anuales en el río Guachal. Estación Guachal - Palmaseca. Periodo: 1977 - 2018.
Fuente: elaboración propia

De acuerdo con la información suministrada por la CVC, se pudo establecer que el río Guachal, en la estación Guachal - Palmaseca registra una variación anual de caudales máximos que está entre los 32 m^3/s y los 106,6 m^3/s, el promedio de caudales máximos mensuales multianuales para esta estación es de 59,1 m^3/s. Los caudales medios anuales oscilan entre 3,2 m^3/s y 23,9 m^3/s, con un valor promedio de 11,6 m^3/s; mientras que los caudales mínimos reportados presentan valores que van desde 0,02 m^3/s hasta 5,9 m^3/s y un promedio de 1 m^3/s.

En cuanto a los caudales promedios mensuales multianuales se tiene que, de acuerdo con los datos registrados por la estación Guachal - Palmaseca, el mes que presenta mayores valores es mayo, mientras que agosto exhibe los registros de caudales más bajos, siendo el promedio para esta estación de 11,7 m^3/s (ver Figura 191).

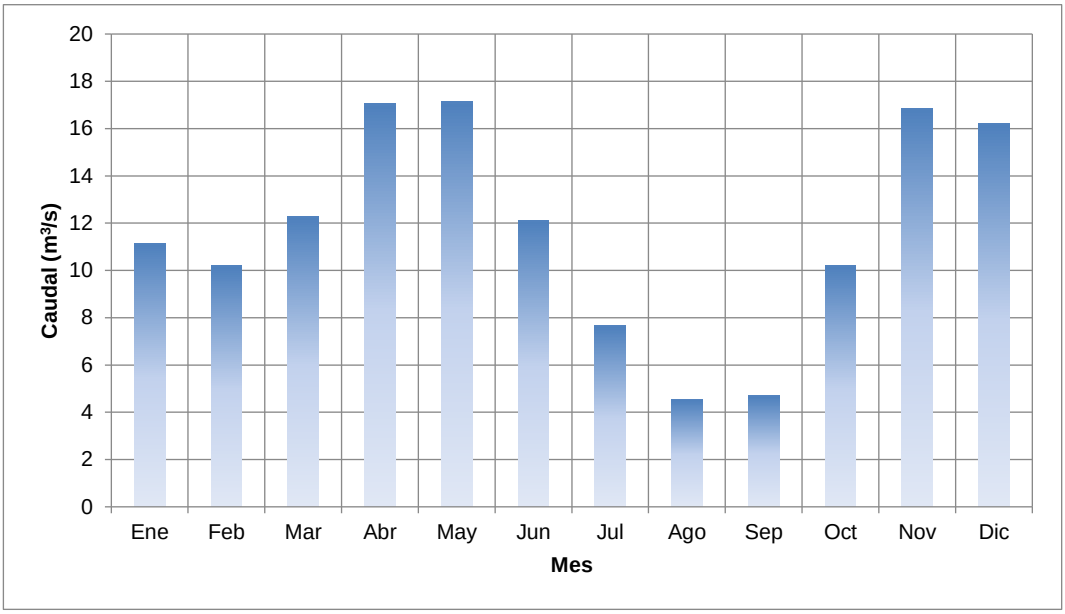


Figura 191. Variación de caudales medios mensuales multianuales en el río Guachal. Estación Guachal- Palmaseca. Periodo: 1977 - 2018.
Fuente: elaboración propia

Las curvas de duración de caudales indican el número de días del año o periodo en términos de porcentaje del tiempo en que un determinado caudal es igualado o excedido en magnitud. En la Figura 192 presenta la curva de duración de caudales medios diarios para la estación Guachal - Palmaseca. En la Tabla 65 se muestran los valores de los caudales para los porcentajes de tiempo del 10%, 25%, 50%, 75% y 90%, para el periodo comprendido entre los años 1977 y 2018.

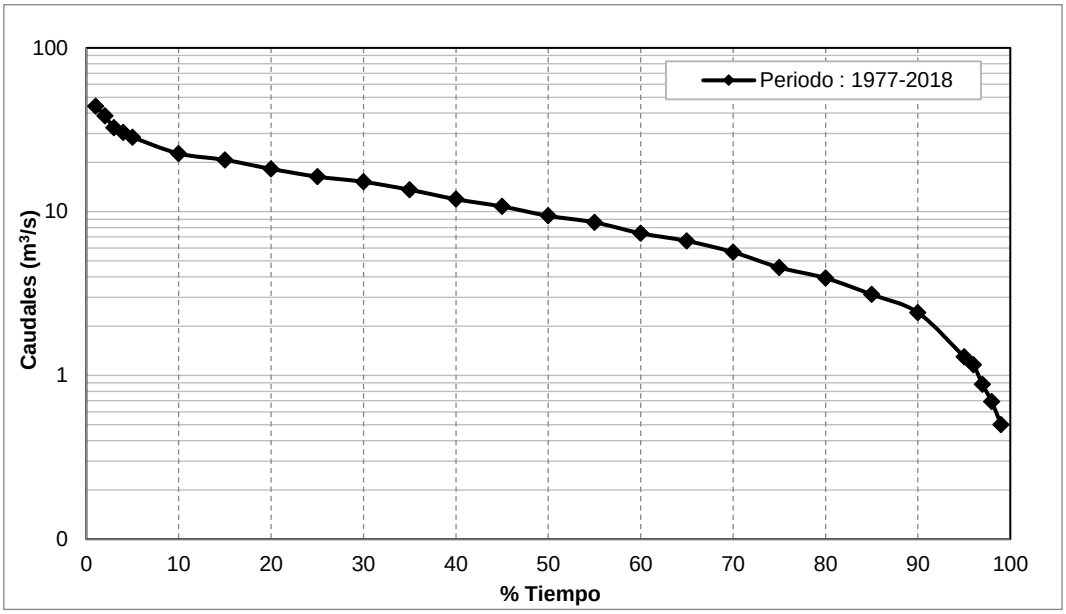


Figura 192. Curva de duración de caudales medios mensuales en el río Guachal. Estación Guachal - Palmaseca. Periodo: 1977 - 2018.
Fuente: elaboración propia

La curva de duración de caudales elaborada con los registros de los caudales medios mensuales de la estación Guachal - Palmaseca ubicada sobre el cauce del río Guachal, presenta un Q10 (caudal de aguas altas) de 22,6 m^3/s, un Q50 (caudal medio) de 9,4 m^3/s, un Q90 (caudal base) de 2,4 m^3/s.

Asimismo, se realizó un análisis de frecuencia de la información hidrológica con el fin de relacionar la magnitud de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribuciones de probabilidad. Con base en las series de caudales máximos instantáneos anuales se calcularon los caudales extremos para períodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50, 100, 300 y 500 años entre 1977 y 2018, aplicando un análisis de frecuencia utilizando como factor de frecuencia las distribuciones de Normal, Gumbel, Pearson III y Log Normal. Los resultados se presentan en la Figura 193 mientras que, en la Tabla 64 se presentan los caudales máximos esperados (predicción) asociados a diferentes períodos de retorno. La distribución de probabilidad que mejor se ajusta es Gumbel.

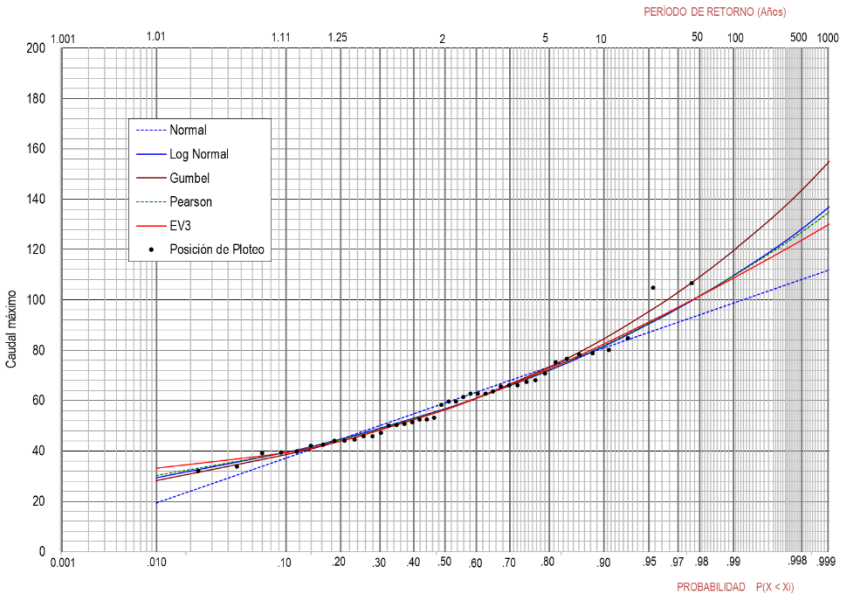


Figura 193. Caudales máximos característicos para diferentes periodos de retorno en el río Guachal. Estación Guachal - Palmaseca. Periodo: 1977 - 2018.
Fuente: elaboración propia

Tabla 64. Caudales máximos esperados (predicción) asociados a diferentes períodos de retorno en el río Guachal. Estación Guachal - Palmaseca. Periodo: 1977 - 2018.

Tr (Años)	NORMAL	GUMBEL	PEARSON	LOG-NOR
2,33	62,1	59,6	59,6	59,7
5	73,4	73,3	72,2	72,0
10	80,9	84,5	81,8	81,6
25	88,9	98,6	93,4	93,2
50	94,1	109,1	101,6	101,5
100	98,8	119,5	109,4	109,6
500	108,2	143,5	126,8	128,2
chi 2	11,41	2,93	3,86	3,98

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 65 se presentan los principales caudales registrados por la estación Guachal - Palmaseca. En este cuadro se consignan los caudales máximos y mínimos instantáneos presentados para todo el período de registro con su respectivo año de ocurrencia, el promedio de los caudales máximos y mínimos instantáneos anuales y los caudales correspondientes a eventos con diferentes periodos de retorno y los caudales específico y unitario.

Tabla 65. Caudales característicos del río Guachal. Estación: Guachal - Palmaseca (1977-2018)

Caudal Característico			Valor	
Caudal Medio Multianual (m^3/s)		**Máximo**	50,6	Noviembre
		Mínimo	0,36	Febrero
		Medio	11,7	
Caudal Instantáneo Histórico (m^3/s)		**Máximo**	106,6	1984
		Mínimo	0,100	2014
Curva de Duración de Caudales	**Caudal (m^3/s)**	**% de Tiempo en que los caudales son igualados o excedidos**	**10%**	22,6
			25%	16,4
			50%	9,4
			75%	4,6
			90%	2,4

Tabla 65. Caudales característicos del río Guachal. Estación: Guachal - Palmaseca (1977-2018)

Caudal Característico		Valor
Caudales Máximos utilizando método de distribución Gumbel Estimados para un Periodo de Retorno (T) (m^3/s)	T=2,33	59,6
	T=5	73,3
	T=10	84,5
	T=25	98,6
	T=50	109,1
	T=100	119,5
	T=500	143,5
	T=10000	188,1

Fuente: elaboración propia

5.6.3 Modelación hidrológica

Considerando que en la zona de estudio del municipio de Palmira no todas las corrientes de agua, cuentan con estaciones hidrométricas sobre los cauces que aporten información sobre sus caudales, se hace necesaria la implementación de modelos hidrológicos que permitan conocer los respectivos caudales máximos, asociados, para este caso, a los periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50, 100, 300 y 500 años.

5.6.3.1 Generalidades teóricas del modelo

Un modelo hidrológico es una herramienta que permite representar la realidad de una manera simplificada y que posee un valor predictivo útil para la utilización de los recursos hídricos; además, sirve como orientación en la toma de decisiones para la solución de problemas que se puedan presentar en una zona determinada.

Dentro de las herramientas informáticas para la generación de modelos de simulación hidrológica usados a nivel mundial se encuentra HEC-HMS 4.9, desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos. El modelo HEC-HMS 4.9 fue diseñado para simular la escorrentía superficial de respuesta de una cuenca a la precipitación mediante la representación de la cuenca como un sistema interconectado de componentes hidrológicos e hidráulicos (Figura 194), cada uno de los cuales refleja un aspecto del proceso precipitación-escorrentía a partir de parámetros físicos e hidrológicos (U.S. Army Corps of Engineers - Hydrologic Engeneering Center, 2020).

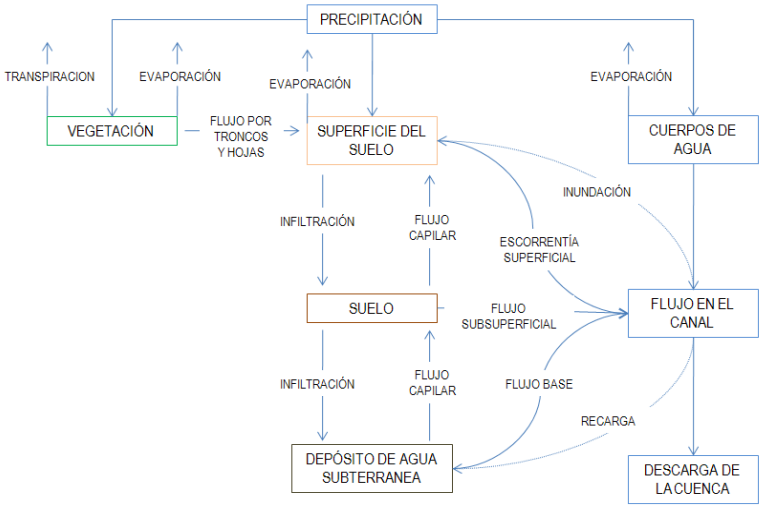


Figura 194. Esquema de las componentes hidrológicos e hidráulicos que utiliza el modelo HEC-HMS para representar una cuenca hidrográfica.
Fuente: Adaptado de HEC-HMS (2000).

HEC-HMS es un modelo de uso libre y ampliamente evaluado a nivel nacional e internacional (Cunderlink y Simonovic, 2004, Knebl et al., 2005, McColl y Aggett, 2006, Moges et al., 2006), el cual puede clasificarse como un modelo hidrológico determinístico, de tipo evento y/o continuo, distribuido y/o agregado y de propósito general. En HEC-HMS, la cuenca se describe a través de una serie de elementos interconectados (subcuencas, canales de tránsito, nodos, fuentes y sumideros). Entre los múltiples procedimientos hidrológicos disponibles en HEC-HMS para transformar la precipitación en escorrentía, por su parsimonia y buen desempeño en estudios y análisis anteriores, en este proyecto se han seleccionado los métodos del número de curva para la estimación de la precipitación efectiva, el hidrograma triangular del Servicio de Conservación de Suelos para la transformación de la precipitación de excesos en escorrentía directa y el método de tránsito de Muskingum para el tránsito hidrológico de la creciente entre tramos (Rodriguez S. & Gonzalez P., 2007).

5.6.3.1.1 Variables y parámetros de modelación

La efectividad de la simulación de un proceso lluvia-escorrentía depende fundamentalmente de la calidad de la información de entrada, tanto de la lluvia como de las características físicas de la cuenca o área de influencia. A pesar de las dificultades que generalmente se presentan para conseguir información de calidad, la tendencia en hidrología es al uso de estos modelos, específicamente por la capacidad para simular eventos que no han sido registrados históricamente, pero que son dependientes de parámetros físicos factibles de medir con la tecnología desarrollada en los sistemas de comunicación modernos. Esto los hace más robustos que los modelos estocásticos que dependen básicamente de la historia.

El modelo HEC-HMS permite desarrollar la implementación de la metodología del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS), el cual establece básicamente cinco componentes de interés. A partir de la precipitación, se calculan las pérdidas como función de la

infiltración para obtener un hidrograma unitario, que luego, mediante el rastreo hidrológico, es llevado a diferentes puntos de la cuenca para hacer cómputos generales de caudales. El modelo tiene, además, un algoritmo matemático de optimización de los parámetros básicos que permite realizar la calibración del modelo sobre la cuenca.

Precipitación: La Lluvia es parte fundamental en el sistema hidrológico y su representación adecuada en los modelos de Precipitación - Escorrentía es muy importante, pero con frecuencia difícil. La variación temporal y espacial de la lluvia afecta directamente el comportamiento de la escorrentía, pues es el resultado directo una de otra. Los eventos de lluvia son medidos en estaciones localizadas estratégicamente, para luego ser generalizados en el área de influencia mediante promedios. La lluvia puede obtenerse con procesos sencillos, como promedios de series históricas o con medidas a tiempo real que requiere técnicas de medición más sofisticadas.

Distribución espacial de la precipitación: Lo más común en la evaluación espacial de la lluvia es promediar las medidas de pluviómetros a lo largo y ancho de la cuenca, ya sea por falta de tecnologías especiales para la medición directa e instantánea de eventos, por falta de recursos para el desarrollo e implementación de nuevas técnicas de medición o por desconocimiento de métodos estadísticos apropiados. Tres métodos de evaluación espacial de la lluvia se han usado con frecuencia: Promedio Aritmético de magnitudes de lluvia puntuales, los Polígonos de Thiessen y el Método de Isoyetas. Lo más apropiado para la aplicación de estos métodos sería una alta densidad de estaciones de lluvia en el área de influencia del sector en estudio.

Distribución temporal de la precipitación: Los eventos de lluvia que van a ser simulados deben ser distribuidos tanto espacialmente como en forma temporal. La distribución temporal es expresada generalmente en forma gráfica o analítica mediante hietogramas. Para conseguir esta distribución se debe desarrollar un análisis estadístico que relacione el tiempo con los incrementos de lluvia. Se debe agrupar los eventos de acuerdo con la duración, pues las lluvias se distribuyen en forma diferente según sea su duración. Por esta razón no es lógico distribuir una lluvia de 24 horas con una distribución de duraciones pequeñas.

Precipitación Efectiva y Pérdidas de Precipitación: Se hace referencia con esto al destino del volumen de lluvia total; por un lado, las pérdidas son agrupadas en los fenómenos como la infiltración, evapotranspiración, evaporación, almacenamiento en depresiones topográficas e Intercepciones. Por otro lado, la lluvia efectiva, es aquella que se convierte en escorrentía directa.

Infiltración: Como parte componente de las pérdidas de precipitación, la infiltración es la cantidad de lluvia que llega al suelo, sobrepasa el estrato superficial, siguiendo caminos subterráneos más lentos para conformar en algún momento parte del flujo base. Este es un parámetro muy importante en la simulación de los modelos P-E, sirviendo de patrón para evaluar el resto de parámetros que componen las pérdidas de lluvia.

El software HEC-HMS basa el cálculo de pérdidas de lluvia en la infiltración, teniendo opciones como: pérdidas iníciales uniformes, en tiempo y espacio, pérdidas no uniformes y, en general, la metodología del SCS. El método del SCS, empleado en el presente estudio, tiene como

parámetro principal Número de Curva (CN), para el cálculo de las perdidas. Este parámetro es función del tipo de suelo, tipo de cobertura de la superficie (uso del suelo) y condición de humedad antecedente. La formulación de este modelo se presenta de la siguiente manera:

Número de curva: Siguiendo el proceso, necesario para la caracterización de las cuencas del sistema hidrológico en estudio, se hace un reconocimiento sobre el tipo de superficie que cubre el área de las mismas, utilizando como herramienta el plano temático de uso del suelo y el grupo hidrológico el cual se basa en el tipo de suelo, geomorfología y geología. En forma inicial, los suelos son agrupados en categorías, dependientes del potencial de escorrentía y de su capacidad de infiltración. La agrupación de los suelos se hace teniendo en cuenta la siguiente clasificación (Chow, 1994):

Grupo A Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.

Grupo B Suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa.

Grupo C Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con alto contenido de arcilla.

Grupo D Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, altamente plásticas y ciertos suelos salinos.

De acuerdo con el método del SCS, se deben ajustar las características de la cuenca a los requerimientos, condiciones y clasificación básica del método.

Para el cálculo de las cantidades de escorrentía directa de una lluvia, el valor de S se relaciona con el número de curva de escorrentía, CN, según la siguiente expresión:

$$CN = \frac{1000}{10 + S}$$

La condición de humedad antecedente (AMC, por sus siglas en inglés) o condición promedia o normal de potencial de escorrentía (AMC II), para condición mínima o seca de potencial de escorrentía (AMC I) o condición máxima o húmeda de potencial de escorrentía (AMC III), los números de curva equivalentes pueden calcularse empleando las siguientes expresiones:

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)}$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)}$$

En la Tabla 66 se muestra el rango para las condiciones de humedad antecedente para cada clase. Los valores de CN para varios tipos de uso de la tierra se presentan en la Tabla 67. Para

una cuenca hecha de varios tipos de suelos y con diferentes usos de la tierra, se puede calcular un CN compuesto.

Tabla 66. Clasificación de clases de humedad antecedente (AMC) para el método de abstracciones de lluvia del SCS.

Grupo AMC	Lluvia antecedente total de 5 días (pulg)	
	Estación Inactiva	Estación de crecimiento
I	Menor que 0,5	Menor que 1,4
II	0,5 a 1,1	1,4 a 2,1
III	Sobre 1,1	Sobre 2,1

Fuente: Soil Conservation Service, 1972 en Tabla 4.2, pág. 4.12 (Chow, 1994)

Tabla 67. Valores de CN para varios tipos de uso del suelo

Descripción del uso de la tierra		Grupo hidrológico del suelo			
		A	B	C	D
Tierra cultivada[1]: sin tratamientos de conservación		72	81	88	91
con tratamientos de conservación		62	71	78	81
Pastizales: condiciones pobres		68	79	86	89
condiciones óptimas		39	61	74	80
Vegas de ríos: condiciones óptimas		30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas		45	66	77	83
cubierta buena[2]		25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc.		39	61	74	80
óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más		49	69	79	84
condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%					
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)		89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeables)		81	88	91	93
Residencial[3]:					
Tamaño promedio del lote	Porcentaje promedio impermeble[4]				
1/8 acre o menos	65	77	85	90	92
1/4 acre	38	61	75	83	87
1/3 acre	30	57	72	81	86
1/2 acre	25	54	70	80	85
lacre	20	51	68	79	84
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc.[5]		98	98	98	98
Calles y carreteras:					
Pavimentados con cunetas y a1cantarillados[5]		98	98	98	98
Grava		76	85	89	91
Tierra		72	82	87	89

[1]Para una descripción más detallada de tos números de curva para usos agrícolas de la tierra, remitirse a Soil Conservation Service, t 972, Cap. 9

[2] Una buena cubierta está protegida por pastizales, y los desechos del retiro de la cubierta del suelo.

[3] Los números de curva se calculan suponiendo que la escorrentía desde las casas y de los accesos se dirige hacia la calle, con un mínimo del agua del techo dirigida hacia el césped donde puede ocurrir infiltración adicional.

[4] Las áreas permeables restantes (césped) se consideran como pastizales en buena condición para estos números de curva. S En algunos países con climas más cálidos se puede utilizar 95 como número de curva.

Fuente: Soil Conservation Service (Chow, 1994)

Una vez se haya establecido los valores de CN para cada tipo de suelo y tipo de cobertura, se procede a estimar la magnitud de las áreas que poseen estas características a fin de estimar el valor globalizado de este parámetro por cuenca.

Cálculo del caudal de escurrimiento: La máxima retención potencial (*S*) después de iniciada la escorrentía está dada por:

$$S = {}^{100}/_{CN}$$

Las abstracciones iniciales se calculan como *Ia=0.2S*. Y por último, la escorrentía directa es calculada como una función de la lluvia (P), de *Ia* y de S:

$$Q = \frac{(P - Ia)^2}{P + 0.8S}$$

La evaluación de la infiltración se estima por el método de Holtan que se conceptualiza con base a la siguiente ecuación:

$$Fp = GI \cdot A \cdot SA^a + fc$$

En donde *Fp* es la capacidad de infiltración, *GI* es un índice de crecimiento de la vegetación, *SA* es el volumen potencial de almacenamiento en el estrato superficial, *fc* es la razón constante de infiltración y α es un parámetro empírico que generalmente toma el valor de 1.4.

Como última alternativa se encuentra el modelo de Green-Amp, en el cual se hace el cálculo de la infiltración acumulada usando la siguiente ecuación:

$$F(t) = \frac{PSIF \cdot DTHETA}{f(t)/XKAST - 1}$$

Donde F(t) es la infiltración acumulada, f(t) es la razón de infiltración, XKSAT es la conductividad hidráulica saturada, DTHETA es el déficit volumétrico de humedad y PSIF es la succión del frente húmedo. Las últimas tres variables son los parámetros del modelo que deben ser calibrados.

Hidrograma unitario: Para la determinación del hidrograma unitario, el que puede ser determinado mediante tres alternativas, el hidrograma de Clark, el hidrograma de Snyder y el método del SCS.

En el método de Clark se utilizan los conceptos del hidrograma instantáneo para definir un único hidrograma para la cuenca analizada. Los parámetros que se deben calibrar son el tiempo de concentración (tc), el coeficiente de almacenamiento (R) y una curva tiempo-área que es expresada como una proporción del tiempo de concentración.

El método de Snyder, es un proceso que se basa en las características de la cuenca para la determinación del hidrograma unitario. Los parámetros a calibrar son el tiempo de desfase (tp) y el coeficiente de almacenamiento (Cp).

El método del SCS, usado en HEC-HMS, se basa en el desarrollo de un hidrograma unidimensional obtenido del análisis de muchos hidrogramas unitarios para pequeñas cuencas

rurales que representan diferentes zonas geográficas. El parámetro que debe ser calibrado es el tiempo de concentración (*tc*).

Tiempo de concentración: Es el tiempo que demora una partícula de agua desde el punto más remoto de la cuenca hasta el punto de interés. Corresponde al lapso entre el final de la lluvia y el momento en que cesa el escurrimiento superficial. También se puede definir como el lapso de tiempo entre el inicio de la precipitación y el momento en que toda el área de drenaje contribuye al escurrimiento superficial.

Existe diversidad de métodos y propuestas para la estimación del tiempo de concentración en cuencas no instrumentadas, el valor promedio en la práctica se asemeja a los resultados de las ecuaciones propuestas como la de Kirpich (Upegui & Gutierrez, 2010) la cual se establece mediante la siguiente formula:

$$T_c = 0.0078 L_P^{0.77} * S^{-0.385}$$

Donde:
T_c : Tiempo de concentración expresado en minutos
L_p : es la longitud del curso de agua más largo (km),
S : la pendiente promedio del cauce principal (m/m)

Rastreo de inundaciones: El modelo HEC-HMS posee una opción general para hacer rastreo de inundaciones; su único enfoque en este aspecto es el rastreo hidrológico. Dentro de esta concepción se tienen: el método Muskingum-Cunge, el método de rastreo de onda cinemática, el método Muskingum, el método “straddle / stagger" y los métodos de almacenamiento, como los métodos modificado de "puls", de profundidad normal y el de niveles de embalse. El modelo tiene la opción de optimizar los parámetros de los tres últimos métodos.

5.6.3.2 Implementación del modelo hidrológico

Dentro de los requerimientos de información o datos de entrada del modelo hidrológico HEC - HMS se encuentran la siguiente información:

- Cartografía básica (red hídrica, curvas de nivel, límite de divisoria de aguas)
- Cartografía temática (uso y cobertura del suelo, tipo de suelos)
- Información precipitación total de las estaciones más cercanas
- Hietogramas de precipitación.
- Información de caudales base.

5.6.3.2.1 Delimitación y características morfométricas de las unidades de modelación

Para la delimitación de las cuencas de las corrientes de agua en estudio con influencia en la zona rural del municipio de Palmira se empleó cartografía base (curvas de nivel y drenajes) y fotografías satelitales disponibles (Figura 195).

Posteriormente se procedió a determinar las respectivas características morfométricas de las unidades de modelación (Anexo 5), tales como la longitud del cauce principal, el valor de las cotas aguas arriba y aguas abajo del cauce, la pendiente del cauce principal y los tiempos de concentración (ver Tabla 68), información requerida para el estudio hidrológico.

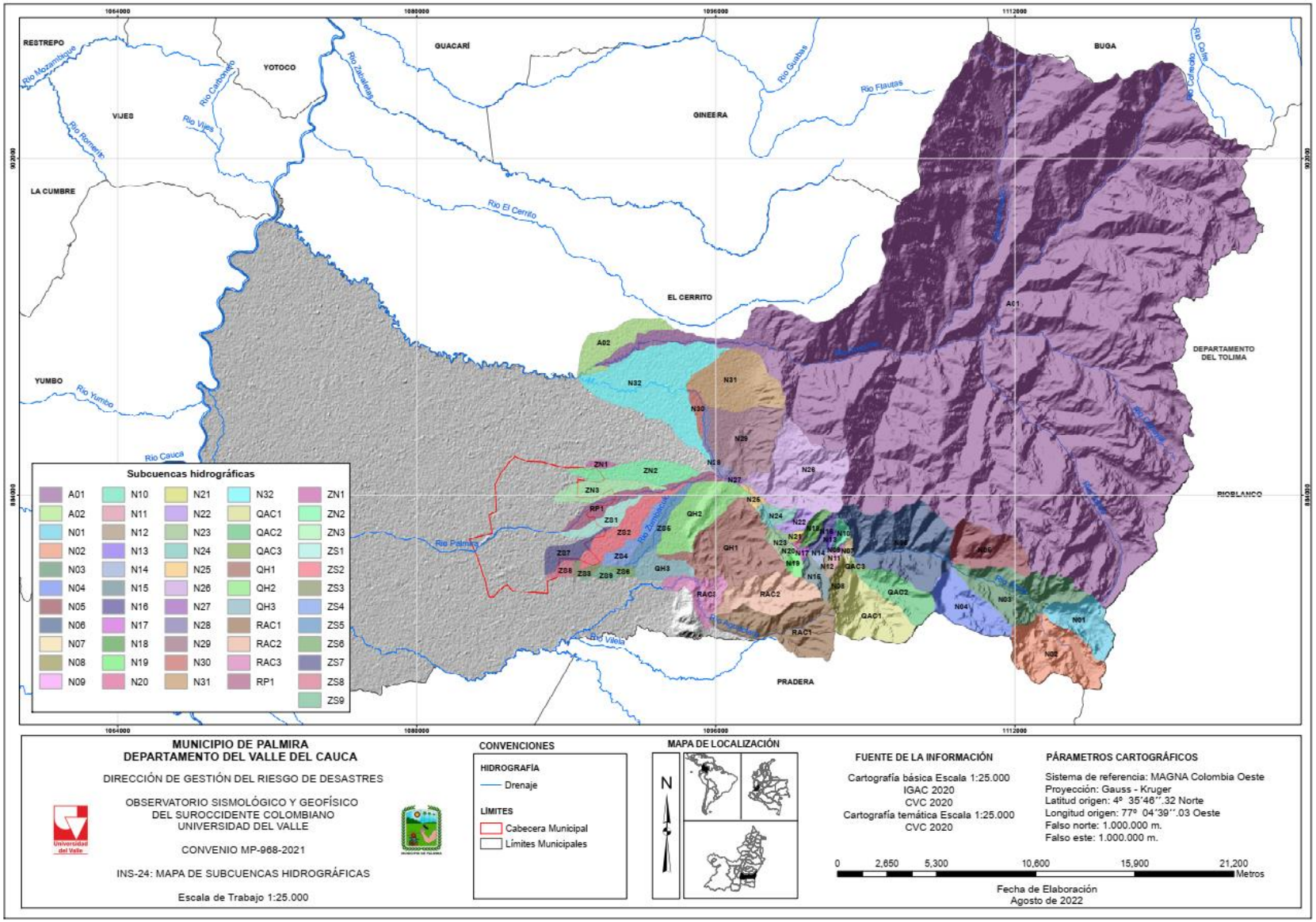


Figura 195. Subcuencas hidrográficas en estudio municipio de Palmira
Fuente: elaboración propia

Tabla 68. Características generales y morfométricas de las cuencas de interés

ID	Subcuenca	No.	Área (Km²)	Longitud Cauce principal (Km)	Cota máx. (msnm)	Cota mín. (msnm)	Tiempo de concentración (min)
1	Río Amaime Estación Amaime	A01	478,33	44,56	3750	1023	406
2	Río Amaime hasta Barrio Azul	A02	5,97	1,57	1023	1018	123
3	Quebrada Santa Rita	N01	6,77	4,61	3950	3340	65
4	Quebrada Casa de Teja	N02	12,62	3,48	3820	3325	54
5	Río Nima	N03	12,36	5,62	3325	2360	70
6	Quebrada Los Cuervos	N04	8,03	5,67	3980	2360	60
7	Quebrada Golondrinas	N05	8,06	4,84	3950	2330	52
8	Río Nima	N06	19,29	6,40	2360	1720	91
9	Río Nima	N07	0,55	0,52	1720	1660	18
10	Quebrada Las Mirlas	N08	2,29	3,55	2640	1660	44
11	Río Nima	N09	0,18	0,62	1900	1630	15
12	Río Nima	N10	0,93	1,93	2350	1630	27
13	Drenaje Sin Nombre	N11	0,33	0,90	1955	1595	16
14	Cañada Los Amores	N12	0,61	1,37	2555	1596	18
15	Río Nima	N13	0,57	1,47	2250	1595	21
16	Quebrada Careperro	N14	0,73	1,14	1595	1520	33
17	Cañada El Cofre	N15	1,94	2,97	2500	1520	37
18	Río Nima	N16	0,94	2,66	2410	1520	34
19	Quebrada El Cofre	N17	0,31	0,77	1780	1480	15
20	Drenaje Sin Nombre	N18	1,49	1,93	1990	1480	30
21	Río Nima	N19	1,05	1,82	2000	1465	28
22	Drenaje Sin Nombre	N20	0,25	1,28	1780	1445	22
23	Cañada Naranjales	N21	0,31	1,17	1830	1445	20
24	Río Nima	N22	1,45	2,26	1930	1385	34
25	Río Nima	N23	1,51	1,58	1465	1385	44
26	Río Nima	N24	1,73	1,36	1385	1325	42
27	Quebrada Los Negros	N25	0,69	1,72	1325	1245	47
28	Río Nima	N26	16,70	7,58	2390	1245	87
29	Río Nima	N27	0,36	1,10	1245	1202	36
30	Quebrada Honda	N28	1,62	4,52	1202	1078	103
31	Río Nima	N29	11,91	7,11	1505	1078	110
32	Quebrada Aguazul o Anasco	N30	1,17	1,48	1078	1064	72
33	Quebrada Tablones	N31	11,94	5,97	1745	1064	80
34	Río Nima	N32	21,03	9,46	1064	1018	303
35	Quebrada Agua Clara	QAC1	9,52	5,27	2980	1790	62
36	Quebrada La María	QAC2	5,78	4,89	3140	1790	55
37	Quebrada Agua Clara	QAC3	0,40	0,80	1790	1720	24
38	Quebrada La Honda	QH1	15,51	11,27	1895	1037	145
39	Quebrada El Guavito	QH2	9,32	3,82	1096	1037	117
40	Quebrada La Honda	QH3	3,31	2,67	1037	1022	127
41	Río Aguaclara	RAC1	12,89	7,54	2695	1190	81
42	Quebrada Chontaduro	RAC2	8,28	7,19	1350	1190	159
43	Río Aguaclara	RAC3	4,60	6,26	1190	1042	140
44	Río Palmira	RP1	4,27	10,60	1202	1004	202
45	Acequia La Rica	ZN1	0,51	0,94	1041	1032	53
46	Zanjón Zamorano	ZN2	5,78	8,26	1128	1017	193
47	Zanjón Mirriñao	ZN3	4,08	6,50	1091	1007	164
48	Zanjón Romero	ZS1	2,74	5,78	1066	1004	157
49	Zanjón Beringo	ZS2	5,79	6,54	1076	1004	176
50	Zanjón Beringo, Beringuito y San José Final	ZS3	0,85	2,37	1012	999	113
51	Zanjón Beringuito	ZS4	2,98	4,03	1019	1012	244
52	Río Zumbaculo	ZS5	2,96	6,70	1126	1019	159

Tabla 68. Características generales y morfométricas de las cuencas de interés

ID	Subcuenca	No.	Área (Km²)	Longitud Cauce principal (Km)	Cota máx. (msnm)	Cota mín. (msnm)	Tiempo de concentración (min)
53	Acequia San José	ZS6	0,62	1,81	1022	1012	94
54	Área Aferente Acequia Barrancas	ZS7	2,73	4,93	1032	989	148
55	Acequia Barrancas	ZS8	0,87	1,17	998	989	67
56	Acequia Barrancas	ZS9	0,82	2,48	1016	1000	109

Fuente: elaboración propia

5.6.3.2.2 Esquematización de las cuencas

Definida las zonas de estudio, procesada la información requerida para la implementación del modelo y evaluada la calidad de la misma, se procede a la esquematización de las cuencas, la evaluación de características morfométricas e hidrológicas y las corridas del modelo hidrológico como se muestra a continuación.

Para representar adecuadamente el comportamiento hidrológico de determinada cuenca, es preciso, en primer lugar, llevar a cabo una representación esquemática de la misma (basin model), que refleje, de la mejor manera posible, su morfología y las características de su red de drenaje. En la Figura 196 se presenta un esquema general de las cuencas en el modelo HEC-HMS 4.9.

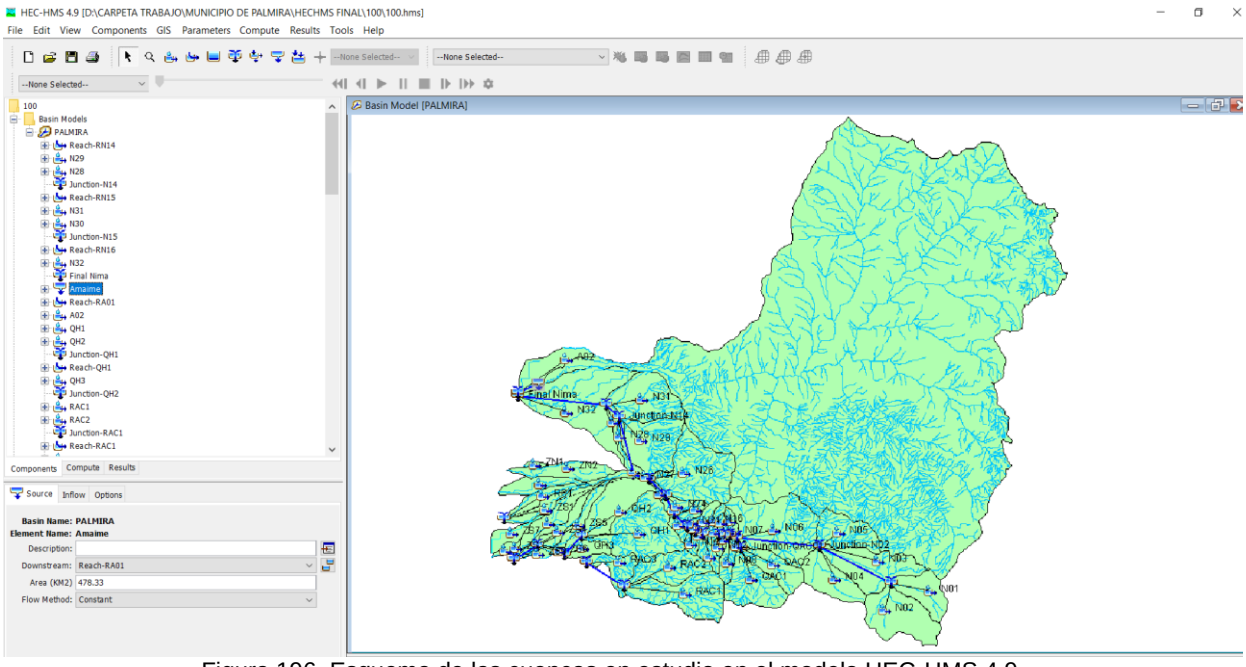


Figura 196. Esquema de las cuencas en estudio en el modelo HEC-HMS 4.9.
Fuente: elaboración propia

5.6.3.2.3 Suelos

En el año 2014 la CVC y el IGAC, mediante el Convenio Interadministrativo N°CVC-087-IGAC-4488, realizaron el levantamiento semidetallado de suelos a escala 1:25000 en 37 cuencas hidrográficas ubicadas en 41 municipios del norte, centro y sur del departamento del Valle del Cauca, priorizadas por la CVC (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, 2014) (ver Anexo 6), incluida el área de trabajo del presente estudio, correspondiente al municipio de Palmira. Dicho levantamiento identifica alternativas de uso y manejo sostenible de los suelos, como herramienta básica de trabajo en la elaboración de instrumentos de planificación y gestión a nivel municipal, departamental y regional. De esta forma, entre otros, presenta el origen, la evolución y la distribución de los suelos en el paisaje del departamento.

A continuación, en la Tabla 69 y en la Figura 197 se presentan los suelos existentes en el área de estudio del municipio de Palmira en el Valle del Cauca y sus respectivos componentes y características.

Tabla 69. Componentes y características de los suelos presentes en el municipio de Palmira

Item	Descripción del Suelo	Área ha
Característica	Cuerpo de agua	133,2
Unidad Cartográfica de Suelo	CA	
Litología	Cuerpo de agua	
Componente	Cuerpo de agua	
Característica	Moderadamente profundos a superficiales, texturas moderadamente gruesas gravillosas, pedregosas, bien drenados, muy fuerte a fuertemente ácidos, fertilidad moderada	2350,5
Unidad Cartográfica de Suelo	MGB	
Litología	Depósitos superficiales clásticos piroclásticos no consolidados (ceniza volcánica) sobre rocas metamórficas de mediano y bajo grado (anfibolitas-esquistos) y en algunos sectores (turba ligeramente descompuesta)	
Componente	Inasociación: Typic Hapludands o Typic Haplofibrists o Lithic Udorthents o Typic Endoaquands o Afloramientos rocosos	
Característica	Moderadamente profundos a superficiales, texturas moderadamente gruesas gravillosas, pedregosas, bien drenados, muy fuerte a fuertemente ácidos, fertilidad moderada; No hay desarrollo de suelos	4979,0
Unidad Cartográfica de Suelo	MGA	
Litología	Depósitos superficiales clásticos piroclásticos no consolidados (ceniza volcánica) y/o rocas metamórficas de bajo grado (esquistos) y en algunos sectores (diabasas)	
Componente	Inasociación: Typic Hapludands o Afloramientos rocosos o Lithic Udorthents	
Característica	Moderadamente profundos limitados por fragmentos de roca, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad alta	98,4
Unidad Cartográfica de Suelo	SO	
Litología	Coluviones heterométricos	
Componente	Consociación: Typic Haplusterts, arcillosa sobre fragmental, isohipertérmica	
Característica	Moderadamente profundos limitados por fragmentos de roca, moderadamente drenados, ligeramente ácidos, fertilidad muy alta	247,1
Unidad Cartográfica de Suelo	ES	

Tabla 69. Componentes y características de los suelos presentes en el municipio de Palmira

Item	Descripción del Suelo	Área ha
Litología	Coluviones heterométricos	
Componente	Consociación: Udic Haplusterts, arcillosa sobre fragmental, isohipertérmica	
Característica	Moderadamente profundos limitados por fragmentos de roca, moderadamente drenados, ligeramente ácidos, fertilidad muy alta; moderadamente profundos limitados por fragmentos de roca, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	(ES-PR)	88,9
Litología	Coluviones heterométricos y aluviones mixtos	
Componente	Complejo: Udic Haplusterts, arcillosa sobre fragmental, isohipertérmica; Vertic Haplustepts, francosa fina sobre esqueletal arenosa, isohipertérmica	
Característica	Moderadamente profundos limitados por nivel freático, moderadamente drenados, neutros, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	GU	22,5
Litología	Aluviones gruesos	
Componente	Consociación: Fluvaquentic Haplustolls, francosa gruesa, isohipertérmica	
Característica	Muy profundos, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad moderada	
Unidad Cartográfica de Suelo	AM	602,7
Litología	Aluviones gruesos	
Componente	Consociación: Typic Ustifluvents, francosa gruesa, no ácida, isohipertérmica	
Característica	Muy profundos, bien drenados, ligeramente alcalinos, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	MN	587,7
Litología	Aluviones mixtos	
Componente	Consociación: Cumulic Haplustolls, francosa fina, isohipertérmica	
Característica	Muy profundos, bien drenados, ligeramente alcalinos, fertilidad alta; muy profundos, bien drenados, neutros, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	(MN-PL)	232,8
Litología	Aluviones mixtos	
Componente	Complejo: Cumulic Haplustolls, francosa fina, isohipertérmica; Pachic Haplustolls, francosa fina, isohipertérmica	
Característica	Muy profundos, bien drenados, neutros, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	PL	2415,3
Litología	Aluviones mixtos	
Componente	Consociación: Pachic Haplustolls, francosa fina, isohipertérmica	
Característica	Muy profundos, texturas moderadamente finas, bien drenados, moderada a ligeramente ácidos, fertilidad alta; muy superficiales, texturas moderadamente gruesas gravillosas, bien drenados, moderada a ligeramente ácidos, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	MLC	24099,0
Litología	Depósitos superficiales clásticos piroclásticos no consolidados (ceniza volcánica) y rocas metamórficas dinamo-termales de bajo grado (esquistos)	
Componente	Asociación: Typic Fulvudands; Typic Udorthents	
Característica	Muy profundos, texturas moderadamente finas, bien drenados, muy fuerte a fuertemente ácidos, fertilidad alta; muy profundos, texturas medias a moderadamente gruesas, bien drenados, fuertemente ácidos, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	MLB	208,2

Tabla 69. Componentes y características de los suelos presentes en el municipio de Palmira

Item	Descripción del Suelo	Área ha
Litología	Depósitos superficiales clásticos piroclásticos no consolidados (ceniza volcánica) y rocas metamórficas dinamo-termales de bajo grado (esquistos)	
Componente	Asociación: Typic Fulvudands; Humic Eutrudepts	
Característica	Muy superficiales a superficiales, texturas moderadamente gruesas, cascajosas y pedregosas y moderadamente finas, gravillosas, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad muy alta; superficiales, texturas moderadamente finas gravillosas	
Unidad Cartográfica de Suelo	MQH	103,3
Litología	Depósitos superficiales clásticos gravigénicos (coluviones heterométricos)	
Componente	Asociación: Typic Eutrudepts; Typic Udifluvents	
Característica	Muy superficiales limitados por fragmentos de roca, bien drenados, moderadamente ácidos, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	CE	112,4
Litología	Coluviones heterométricos	
Componente	Consociación: Entic Haplustolls, esqueletal francosa sobre fragmental, isohipertérmica	
Característica	Muy superficiales limitados por fragmentos de roca, bien drenados, moderadamente ácidos, fertilidad alta; superficiales limitados por fragmentos de roca, bien drenados, neutros, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	(CE-NM)	98,2
Litología	Coluviones heterométricos	
Componente	Consociación: Entic Haplustolls, esqueletal francosa sobre fragmental, isohipertérmica; Entic Haplustolls, francosa fina sobre esqueletal arenosa, isohipertérmica	
Característica	Muy superficiales limitados por saturación de sodio mayor de 15%, moderadamente drenados, fuertemente alcalinos, fertilidad muy baja	
Unidad Cartográfica de Suelo	LF	28,7
Litología	Aluviones medianos	
Componente	Consociación: Sodic Calciusterts, fina, isohipertérmica	
Característica	Muy superficiales, texturas moderadamente finas gravillosas, imperfecta a pobremente drenados, moderada a ligeramente ácidos, fertilidad alta; moderadamente profundos a profundos, texturas moderadamente finas, imperfectamente drenados	
Unidad Cartográfica de Suelo	MQJ	33,8
Litología	Depósitos superficiales clásticos gravigénicos (coluviones heterométricos)	
Componente	Complejo: Aquertic Hapludalfs; Aquic Argiudolls; Aeric Endoaqualfs	
Característica	Muy superficiales, texturas moderadamente finas, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad muy baja; muy profundos a moderadamente profundos, texturas moderadamente finas y finas, bien drenados, muy fuerte a ligeramente ácidos, fertilidad baja	
Unidad Cartográfica de Suelo	MRC	7256,0
Litología	Rocas ígneas volcánicas máficas, afaníticas y porfiríticas (diabasas) y en algunos sectores (areniscas y calizas)	
Componente	Asociación: Lithic Ustorthents; Humic Dystrustepts; Typic Haplustepts	
Característica	N/A	
Unidad Cartográfica de Suelo	MEA	8604,8
Litología	Rocas metamórficas de bajo grado (esquistos) y/o rocas ígneas plutónicas félsicas, faneríticas y porfiríticas (cuarzodiorita), cubiertas parcialmente por depósitos piroclásticos de ceniza volcánica	
Componente	Inasociación: Afloramientos rocosos o Lithic Cryorthents o Lithic fulvicryands o Typic Haplocryands	
Característica	No hay desarrollo de suelos; muy superficiales, texturas moderadamente finas, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad muy baja; muy profundos a moderadamente profundos, texturas moderadamente finas y finas, bien drenados	517,4

Tabla 69. Componentes y características de los suelos presentes en el municipio de Palmira

Item	Descripción del Suelo	Área ha
Unidad Cartográfica de Suelo	MRD	
Litología	Rocas ígneas volcánicas máficas, afaníticas y porfiríticas (diabasas) y en algunos sectores (areniscas y calizas)	
Componente	Complejo: Afloramientos rocosos; Lithic Ustorthents; Humic Dystrustepts	
Característica	Profundos a superficiales, texturas finas y moderadamente finas, bien drenados, muy fuerte a fuertemente ácidos, alta saturación de aluminio, fertilidad moderada; superficiales, texturas moderadamente finas y finas gravillosas, bien drenados	
Unidad Cartográfica de Suelo	MQD	3888,6
Litología	Rocas ígneas volcánicas máficas, afaníticas y porfiríticas (diabasa) y en algunos sectores (basaltos)	
Componente	Asociación: Typic Dystrudepts; Lithic Udorthents	
Característica	Profundos, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad moderada; moderadamente profundos limitados por nivel freático, moderadamente drenados, neutros, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	(FL-GU)	0,1
Litología	Aluviones gruesos	
Componente	Complejo: Entic Haplustolls, arenosa, isohipertérmica; Fluvaquentic Haplustolls, francosa gruesa, isohipertérmica	
Característica	Profundos, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad muy alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	AR	1161,4
Litología	Aluviones finos	
Componente	Complejo: Entic Haplustolls, esqueletal arenosa, isohipertérmica; Fluvaquentic Haplustolls, francosa gruesa, isohipertérmica	
Característica	Profundos, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad muy alta; moderadamente profundos limitados por fragmentos de roca, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	(AR-PR)	317,2
Litología	Aluviones finos y coluviones heterométricos	
Componente	Complejo: Vertic Haplustalfs, fina, esmectítica, isohipertérmica; Vertic Haplustepts, francosa fina sobre esqueletal arenosa, isohipertérmica	
Característica	Profundos, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad muy alta; superficiales limitados por fragmentos de roca, bien drenados, neutros, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	(AR-NM)	51,9
Litología	Aluviones finos y coluviones heterométricos	
Componente	Complejo: Vertic Haplustalfs, fina, esmectítica, isohipertérmica; Entic Haplustolls, francosa fina sobre esqueletal arenosa, isohipertérmica	
Característica	Profundos, texturas finas y moderadamente finas, bien drenados, ligeramente ácidos, fertilidad alta; moderadamente profundos, tex turas moderadamente gruesas a moderadamente finas, bien drena dos, moderada a ligeramente ácidos, fertilidad alta.	
Unidad Cartográfica de Suelo	MLA	5031,7
Litología	Depósitos superficiales clásticos piroclásticos no consolidados (ceniza volcánica) y rocas ígneas volcánicas máficas, afaníticas y porfiríticas (diabasas)	
Componente	Asociación: Typic Hapludands; Typic Eutrudepts; Typic Hydrudands	
Característica	Profundos, texturas moderada mente finas, bien drenados, muy fuerte a moderadamente ácidos, alta saturación de aluminio, fertilidad moderada; profundos, texturas moderadamente gruesas, moderada a bien drenados, moderada a ligeramente ácidos	
Unidad Cartográfica de Suelo	MLD	3634,5
Litología	Depósitos superficiales clásticos piroclásticos no consolidados (ceniza volcánica) sobre rocas metamórficas dinamo-termales de mediano grado (neis, anfibolitas)	

Tabla 69. Componentes y características de los suelos presentes en el municipio de Palmira

Item	Descripción del Suelo	Área ha
Componente	Asociación: Typic Hapludands; Andic Dystrudepts	
Característica	Superficiales a moderadamente profundos, texturas finas, pedregosas, moderadamente bien drenados, moderadamente ácidos a neutros, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	MLE	476,7
Litología	Depósitos superficiales clásticos gravigénicos (coluviones heterométricos)	
Componente	Consociación: Typic Argiudolls	
Característica	Superficiales a muy superficiales, texturas medias a finas gravillosas, bien drenados, ligera a moderadamente ácidos, fertilidad alta; muy superficiales, texturas moderadamente finas y moderadamente gruesas gravillosas, pedregosas, bien drenados	
Unidad Cartográfica de Suelo	MLG	596,1
Litología	Depósitos superficiales clásticos hidrogravigénicos (coluviones heterométricos)	
Componente	Asociación: Inceptic Hapludalfs; Entic Hapludolls	
Característica	Superficiales a muy superficiales, texturas medias gravillosas, bien drenados, moderada a ligeramente ácidos, fertilidad alta; muy superficiales y superficiales, texturas moderadamente gruesas y gruesas, bien drenados, ligeramente ácidos	
Unidad Cartográfica de Suelo	MQI	523,0
Litología	Depósitos superficiales clásticos hidrogénicos (aluviones mixtos)	
Componente	Complejo: Entic Hapludolls; Typic Udifluvents	
Característica	Superficiales limitados por fragmentos de roca, bien drenados, neutros, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	NM	1688,6
Litología	Coluviones heterométricos	
Componente	Consociación: Entic Haplustolls, francosa fina sobre esqueletal arenosa, isohipertérmica	
Característica	Superficiales limitados por fragmentos de roca, bien drenados, neutros, fertilidad alta; moderadamente profundos limitados por fragmentos de roca, moderadamente drenados, ligeramente ácidos, fertilidad alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	(NM-PR)	406,2
Litología	Coluviones heterométricos y aluviones mixtos	
Componente	Complejo: Entic Haplustolls, francosa fina sobre esqueletal arenosa, isohipertérmica; Vertic Haplustepts, francosa fina sobre esqueletal arenosa, isohipertérmica	
Característica	Superficiales limitados por nivel freático, imperfectamente drenados, neutros, fertilidad muy alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	GL	150,2
Litología	Aluviones finos	
Componente	Consociación: Udic Calciusterts, fina, vermiculítica, isohipertérmica	
Característica	Superficiales, texturas moderadamente finas a medias gravillosas, pedregosas, bien drenados, fuerte a moderadamente ácidos, fertilidad alta; muy profundos, texturas medias a moderadamente finas, bien drenados, moderadamente ácidos, fertilidad muy alta	
Unidad Cartográfica de Suelo	MLF	370,6
Litología	Depósitos superficiales clásticos gravigénicos (coluviones heterométricos) y depósitos superficiales clásticos piroclásticos no consolidados (ceniza volcánica)	
Componente	Asociación: Typic Hapludolls; Typic Fulvudands; Typic Endoaquands	
Característica	Superficiales, texturas moderadamente finas y finas pedregosas, moderadamente drenados, fuerte a moderadamente ácidos, fertilidad alta; moderadamente profundos, texturas finas, bien drenados, fuerte a moderadamente ácidos, fertilidad moderada	
Unidad Cartográfica de Suelo	PRA	2135,3

Tabla 69. Componentes y características de los suelos presentes en el municipio de Palmira

Item	Descripción del Suelo	Área ha
Litología	Depósitos superficiales clásticos hidrogénicos (aluviones mixtos) cubiertos parcialmente por depósitos superficiales piroclásticos (ceniza volcánica)	
Componente	Asociación: Ultic Haplustalfs; Humic Dystrustepts; Typic Haplustands	
Característica	Zona urbana	680,5
Unidad Cartográfica de Suelo	ZU	
Litología	Zona urbana	
Componente	Zona urbana	

Fuente: (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, 2014)

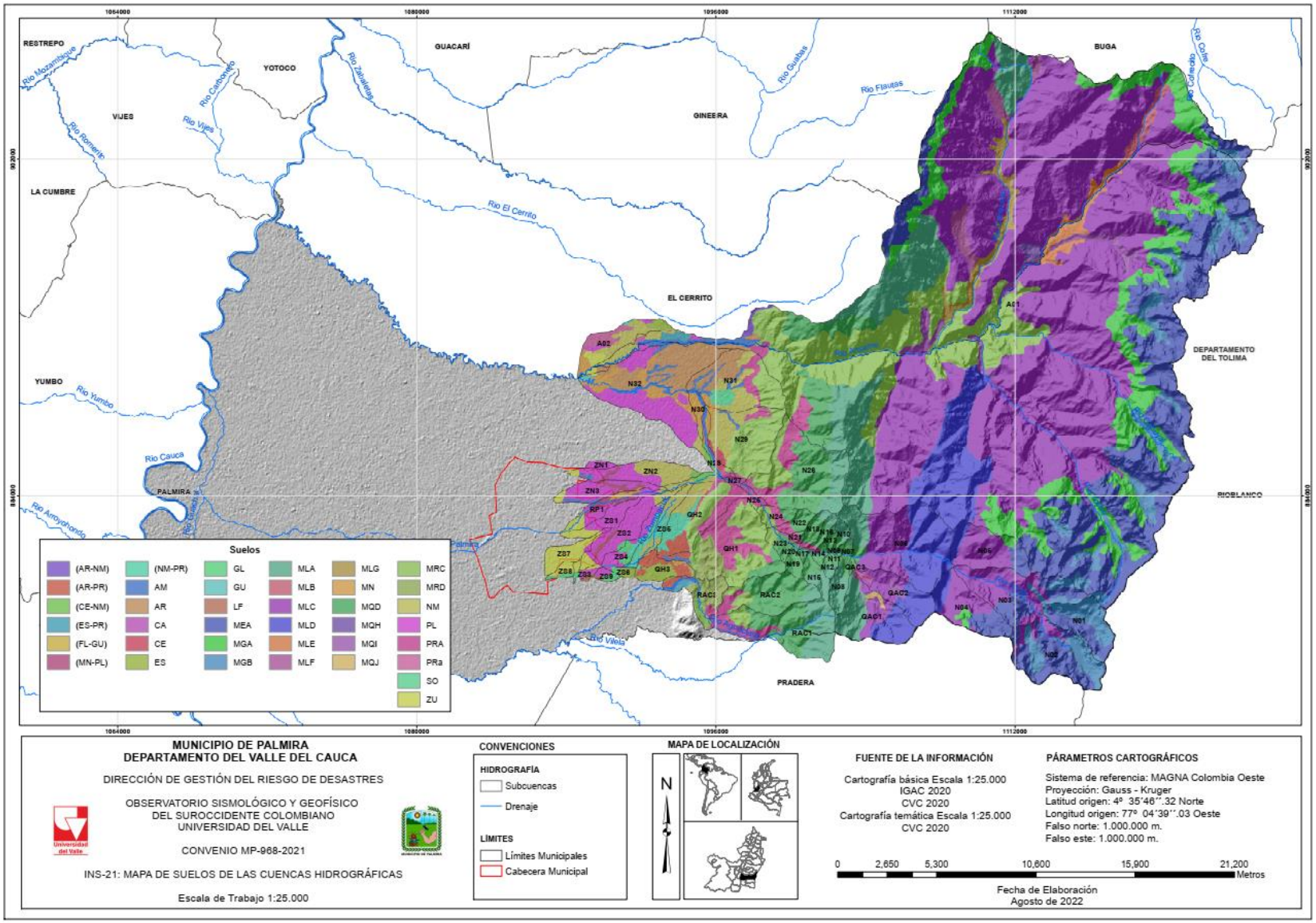


Figura 197. Suelos de las cuencas hidrográficas en estudio

Fuente: elaboración propia a partir de cartografía (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, 2014)

5.6.3.2.4 Usos del suelo – Número de escurrimiento

Para el cálculo del número de curva de las cuencas hidrográficas, CN, se utilizó la información de uso y cobertura del suelo suministrada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. Con base en la información de cobertura y grupo hidrológico de los suelos del área se procesa para obtener el valor de CN, el cual fue ponderado con respecto al área total de la unidad de codificación para obtener el CN ponderado para cada unidad.

Con base en la cartografía temática se estableció que la cobertura del suelo que predomina en el área de estudio corresponde a Bosque mixto denso alto de tierra firme con 18,1%, seguido del Pasto cultivado con 14,9% (ver Tabla 70). En la Figura 198 se observa el uso del suelo de la zona de estudio de acuerdo con las coberturas identificadas.

Tabla 70. Cobertura del suelo de la zona de estudio

Cobertura	Área (Ha)	Área (%)
Afloramientos rocosos	47,0	0,06
Arbustal y matorral abierto alto de tierra firme	1528,5	2,07
Arbustal y matorral abierto bajo de tierra firme	2641,0	3,58
Arbustal y matorral abierto bajo inundable	15,7	0,02
Arbustal y matorral abierto bajo paramuno	635,5	0,86
Arbustal y matorral denso alto de tierra firme	810,5	1,10
Arbustal y matorral denso alto inundable	0,5	0,00
Arbustal y matorral denso bajo de tierra firme	1649,8	2,23
Arbustal y matorral denso bajo inundable	31,6	0,04
Áreas de cultivo con suelo desnudo	888,4	1,20
Áreas de deslizamientos	24,1	0,03
Áreas naturales desnudas	260,2	0,35
Áreas quemadas	103,9	0,14
Arenal	11,0	0,01
Bosque de guadua	283,4	0,38
Bosque mixto abierto alto de tierra firme	2952,4	4,00
Bosque mixto abierto bajo de tierra firme	1496,2	2,03
Bosque mixto denso alto de tierra firme	13363,5	18,09
Bosque mixto denso bajo de tierra firme	1445,8	1,96
Bosque mixto fragmentado con pastos y cultivos	1390,3	1,88
Bosque mixto fragmentado con vegetación natural	2082,7	2,82
Bosque mixto relictual	102,1	0,14
Café	122,4	0,17
Café-Otros arbóreos	272,0	0,37
Café-Otros cultivos	113,7	0,15
Café-Plátano	135,0	0,18
Caña de azúcar	6632,9	8,98
Canal	17,3	0,02
Cebolla de rama	248,1	0,34
Embalse	2,7	0,00
Estanques artificiales	73,0	0,10
Eucalipto	950,4	1,29
Eucalipto cosechado	220,3	0,30
Guanábano	0,3	0,00
Helechal	7,0	0,01
Herbazal natural abierto rocoso	179,3	0,24
Herbazal natural denso arbolado	763,5	1,03
Herbazal natural denso con arbustos	4025,5	5,45

Tabla 70. Cobertura del suelo de la zona de estudio

Cobertura	Área (Ha)	Área (%)
Herbazal natural denso no arbolado	5935,0	8,04
Isla	1,2	0,00
Lagunas	215,0	0,29
Limón	1,1	0,00
Maíz	25,1	0,03
Misceláneo de árboles frutales	6,8	0,01
Misceláneo de Cítricos	14,4	0,02
Misceláneo de cultivos y espacios naturales	67,0	0,09
Misceláneo de pastos y cultivos	1236,1	1,67
Misceláneo de pastos y espacios naturales	32,9	0,04
Otras asociaciones de cultivos	2,0	0,00
Otras superficies artificiales con construcción	400,2	0,54
Otras superficies artificiales sin construcción	219,6	0,30
Otras superficies pantanosas	11,9	0,02
Otros cuerpos de agua	16,2	0,02
Otros cultivos arbóreos plantados abiertos	23,2	0,03
Otros cultivos arbóreos plantados densos	185,5	0,25
Otros cultivos arbustivos plantados abiertos	417,1	0,56
Otros Cultivos confinados	8,0	0,01
Otros cultivos herbáceos plantados densos	647,8	0,88
Pasto cultivado	11017,5	14,92
Pasto cultivado arbolado	396,1	0,54
Pasto cultivado enmalezado	3978,1	5,39
Piña	49,7	0,07
Pino	243,0	0,33
Pino cosechado	40,0	0,05
Plátano	7,8	0,01
Ríos	194,0	0,26
Superficies de inundación temporal	22,1	0,03
Tomate-Habichuela	1,3	0,00
Turberas	1,2	0,00
Vegetación secundaria o transición	2108,3	2,85
Zonas urbanas continuas	426,5	0,58
Zonas urbanas discontinuas	382,6	0,52

Fuente: elaboración propia a partir de cartografía CVC 2020 y UNIVALLE 2021

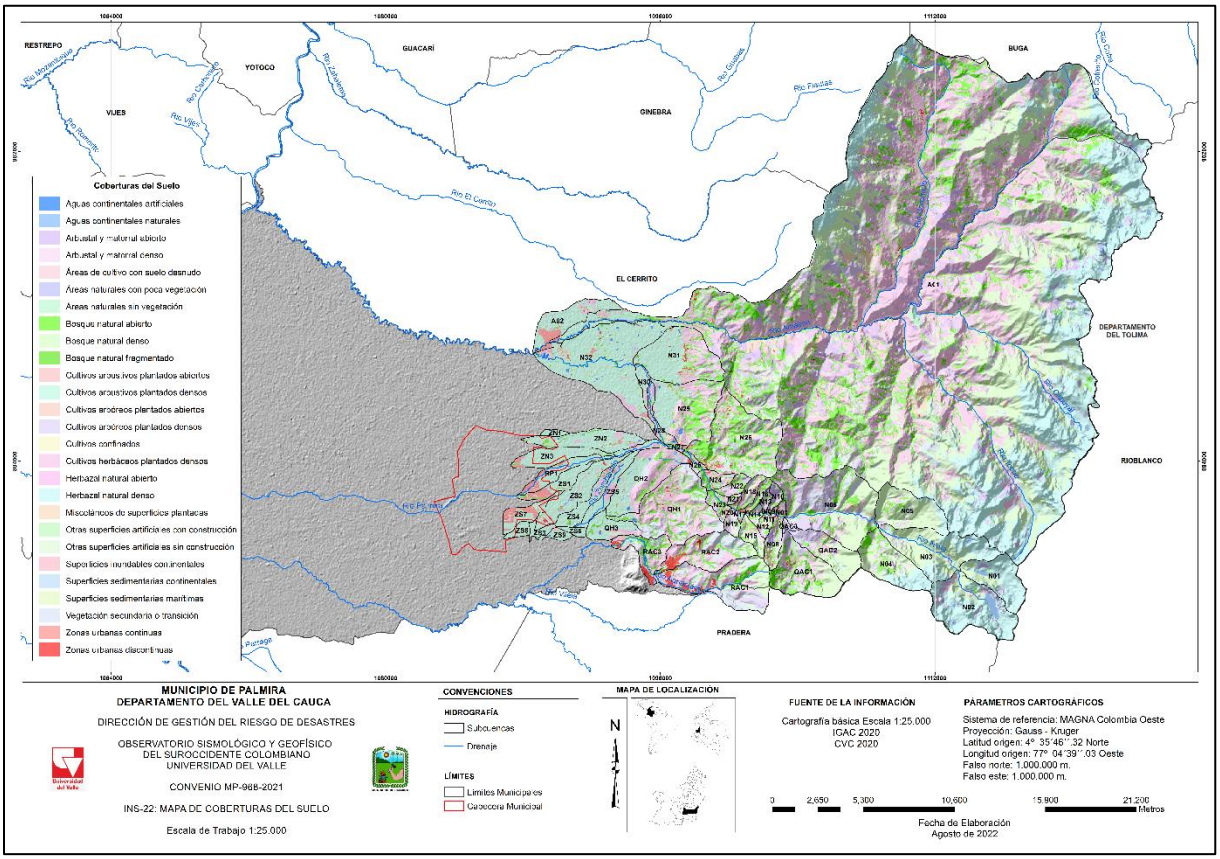


Figura 198. Uso y cobertura del suelo de las cuencas hidrográficas en el área de estudio.
Fuente: elaboración propia a partir de cartografía CVC 2020 y UNIVALLE 2021

Una vez ponderados las coberturas de uso del suelo con número de curva se estimaron los valores correspondientes al CN, teniendo como referencia los valores para varios tipos de suelo (Chow, 1994). En la Figura 199 y en la Tabla 71 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 71. Valores de CN para las cuencas hidrográficas en estudio

ID CUENCAS	CN	ID CUENCAS	CN	ID CUENCAS	CN
A01	62	N18	63	QH2	65
A02	74	N19	59	QH3	69
N01	67	N20	68	RAC1	61
N02	68	N21	63	RAC2	60
N03	61	N22	68	RAC3	63
N04	61	N23	66	RP1	74
N05	57	N24	68	ZN1	71
N06	61	N25	65	ZN2	71
N07	64	N26	66	ZN3	72
N08	62	N27	74	ZS1	77
N09	69	N28	68	ZS2	71
N10	60	N29	67	ZS3	71
N11	66	N30	69	ZS4	71

ID CUENCAS	CN	ID CUENCAS	CN	ID CUENCAS	CN
N12	59	N31	69	ZS5	70
N13	64	N32	71	ZS6	72
N14	68	QAC1	61	ZS7	81
N15	61	QAC2	60	ZS8	71
N16	62	QAC3	66	ZS9	71
N17	74	QH1	61		

Fuente: elaboración propia

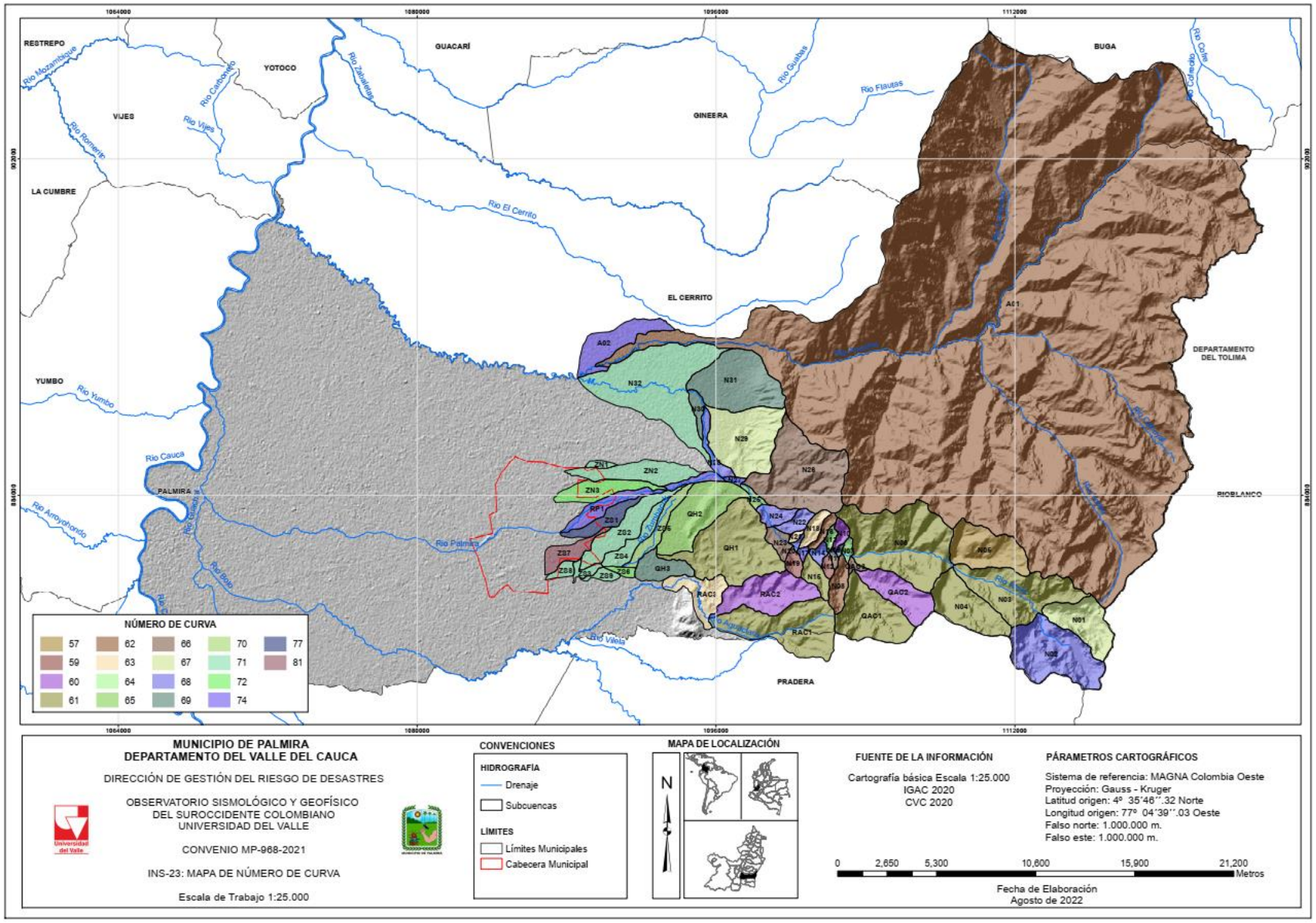


Figura 199. Valores de CN cuencas hidrográficas en estudio
Fuente: elaboración propia

Flujo base

Los parámetros hidrológicos se analizaron espacialmente implementando herramientas de SIG a partir de los mapas temáticos de la zona de estudio y el modelo digital de elevaciones – DEM (siglas en inglés). En la Tabla 72 se muestran los parámetros hidrológicos calculados utilizando las metodologías expuestas anteriormente.

Tabla 72. Parámetros hidrológicos de las cuencas hidrográficas en estudio

ID	SUBCUENCA	No.	Tlag (min)	CN	S (mm)	Ia (mm)	Flujo Base (m^3/s)
1	Río Amaime	A01	244	62	158	32	4,646
2	Río Amaime	A02	74	74	89	18	0,112
3	Río Nima	N01	39	67	125	25	0,108
4	Río Nima	N02	32	68	121	24	0,212
5	Río Nima	N03	42	61	164	33	0,145
6	Río Nima	N04	36	61	165	33	0,090
7	Río Nima	N05	31	57	189	38	0,075
8	Río Nima	N06	55	61	166	33	0,233
9	Río Nima	N07	11	64	144	29	0,011
10	Río Nima	N08	27	62	157	31	0,039
11	Río Nima	N09	9	69	115	23	0,004
12	Río Nima	N10	16	60	170	34	0,016
13	Río Nima	N11	10	66	128	26	0,007
14	Río Nima	N12	11	59	175	35	0,010
15	Río Nima	N13	13	64	144	29	0,013
16	Río Nima	N14	20	68	120	24	0,019
17	Río Nima	N15	22	61	160	32	0,035
18	Río Nima	N16	21	62	153	31	0,020
19	Río Nima	N17	9	74	90	18	0,010
20	Río Nima	N18	18	63	149	30	0,032
21	Río Nima	N19	17	59	176	35	0,018
22	Río Nima	N20	13	68	118	24	0,007
23	Río Nima	N21	12	63	150	30	0,007
24	Río Nima	N22	20	68	121	24	0,035
25	Río Nima	N23	26	66	128	26	0,033
26	Río Nima	N24	25	68	120	24	0,037
27	Río Nima	N25	28	65	136	27	0,012
28	Río Nima	N26	52	66	132	26	0,352
29	Río Nima	N27	22	74	88	18	0,009
30	Río Nima	N28	62	68	118	24	0,031
31	Río Nima	N29	66	67	126	25	0,234
32	Río Nima	N30	43	69	112	22	0,022
33	Río Nima	N31	48	69	115	23	0,242
34	Río Nima	N32	182	71	103	21	0,375
35	Río Nima Quebrada Agua Clara	QAC1	37	61	161	32	0,131
36	Río Nima Quebrada La María	QAC2	33	60	169	34	0,066
37	Río Nima Quebrada Agua Clara	QAC3	14	66	132	26	0,008
38	Río Aguaclara	QH1	87	61	164	33	0,203
39	Río Aguaclara	QH2	70	65	134	27	0,147
40	Río Aguaclara	QH3	76	69	115	23	0,057
41	Río Aguaclara	RAC1	49	61	164	33	0,180
42	Río Aguaclara	RAC2	96	60	167	33	0,120
43	Río Aguaclara	RAC3	84	63	151	30	0,065
44	Río Palmira	RP1	121	74	90	18	0,082

Tabla 72. Parámetros hidrológicos de las cuencas hidrográficas en estudio

ID	SUBCUENCA	No.	Tlag (min)	CN	S (mm)	Ia (mm)	Flujo Base (m^3/s)
45	Zanjones Norte	ZN1	32	71	103	21	0,006
46	Zanjones Norte	ZN2	116	71	104	21	0,097
47	Zanjones Norte	ZN3	99	72	97	19	0,065
48	Zanjones Sur	ZS1	94	77	77	15	0,055
49	Zanjones Sur	ZS2	106	71	103	21	0,100
50	Zanjones Sur	ZS3	68	71	106	21	0,012
51	Zanjones Sur	ZS4	147	71	103	21	0,053
52	Zanjones Sur	ZS5	95	70	109	22	0,053
53	Zanjones Sur	ZS6	57	72	100	20	0,011
54	Zanjones Sur	ZS7	89	81	61	12	0,056
55	Zanjones Sur	ZS8	40	71	104	21	0,012
56	Zanjones Sur	ZS9	66	71	101	20	0,014

Fuente: elaboración propia

5.6.3.2.5 Resultados de la simulación y análisis hidrológico

El presente estudio tiene como objetivo determinar los caudales máximos de crecidas para periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 25, 50, 100, 300 y 500 años. Con el fin de evaluar los eventos de interés se implementó el modelo hidrológico mediante el programa computacional HEC – HMS 4.9, el cual se fundamenta en la relación lluvia – escorrentía, pues permite calcular los caudales máximos en función de la profundidad total de precipitación, parámetros de forma (morfométrica de las cuencas) y de parámetros de abstracción.

En la Tabla 73 se presentan los caudales máximos generados con el modelo hidrológico para las cuencas hidrográficas en estudio. En el Anexo 7 se encuentra el modelo hidrológico con las hidrógrafas para los diferentes periodos de retorno.

Tabla 73. Caudales máximos (m^3/s) para diferentes periodos de retorno, generados con el modelo hidrológico

Hydrologic Element	Drainage Area (km^2)	2,33 años	5 años	10 años	25 años	50 años	75 años	100 años	200 años	300 años	400 años	500 años
Amaime	478,33	59,1	61,4	108,2	144,4	175,9	196,1	211,4	251,8	277,9	297,7	313,7
A02	5,97	7,7	10,9	14,7	21,3	27,6	32	35,4	44,8	50,8	55,7	59,7
Diversion-1	117,18	48,3	74,2	109,8	183,4	260,2	316,4	360,4	484,5	573	642,4	700,8
Final Amaime	484,3	66,8	72,3	122,9	165,7	203,5	228,1	246,8	296,6	328,7	353,4	373,4
Final Nima	164,85	59,7	89	124,9	201,4	281,8	340,8	387	517,2	609,5	682,1	743
Junction-N01	19,39	15,3	25,7	38,7	63,9	88,7	106,3	120,4	158,1	184,9	206,4	224,6
Junction-N02	47,84	17,5	31,8	50,9	90,8	134,1	166,4	191,9	263,7	315,4	356	390,7
Junction-N03	82,83	26,5	48,3	76,5	135,9	199,9	247,7	284,8	389,8	465,5	526,7	578,5
Junction-N04	85,67	28,9	52	82	144,6	210,1	259,8	299	410,1	490,2	553,1	606,1
Junction-N05	86,78	29,4	52,8	83,7	146,4	213,4	263	301,7	410,9	489,2	551,4	604,6
Junction-N06	87,72	29,7	53,5	84,8	147,5	214,6	264,7	303,8	414,4	493,8	556,1	608,5
Junction-N07	91,33	32,9	58,4	91,5	157,2	227	278,9	319,4	434,2	516,3	580,9	635,1
Junction-N08	93,13	34,2	60,4	94	161,4	232,7	285,1	326,1	441,9	524,6	589,6	644,2
Junction-N09	94,18	34,6	61	94,8	163,4	235,2	287,9	329,2	445,6	528,8	594,2	649,1

Tabla 73. Caudales máximos (m^3/s) para diferentes periodos de retorno, generados con el modelo hidrológico

Hydrologic Element	Drainage Area (km^2)	2,33 años	5 años	10 años	25 años	50 años	75 años	100 años	200 años	300 años	400 años	500 años
Junction-N10	94,74	34,6	61	94,9	162,7	234,3	287	328,3	444,8	528,2	593,7	648,7
Junction-N11	97,7	35,6	62,2	96,9	166,2	238,5	291,6	333,1	450,2	533,9	599,7	654,9
Junction-N12	99,43	35,8	62,5	97,3	166,7	239,1	292,2	333,8	451	534,8	600,6	655,9
Junction-N13	116,82	50,8	76,5	112	186,8	264,5	321,1	365,5	491	580,4	650,8	710
Junction-N14	130,71	50,6	77	111,6	185,6	263	319,2	363,3	487,9	576,6	646,3	705
Junction-N15	143,82	51	77,4	111,9	185,8	262,9	319	362,9	487,1	575,6	645,2	703,7
Junction-QAC01	15,3	4,9	9	14,9	27,7	41,3	52,1	60,6	84,9	102,4	116,3	127,8
Junction-QH1	24,83	19,5	30,7	44,7	69,2	94	111,2	125,1	163,3	189,3	210,3	226,7
Junction-QH2	28,14	24	37	53,5	82,3	111,2	130,8	146,7	190,1	219,5	243,3	261,7
Junction-RAC1	21,17	13,5	22	32,9	53,3	74,3	88,7	100,3	132,3	155,2	173,1	187,7
Junction-RAC2	25,77	16,7	27,2	40,4	64,5	89,7	107,1	121,3	160,3	187,4	208,6	225,8
Junction-RP1	7,01	9,7	12,6	16,1	21,9	27,6	31,4	34,3	42,5	47,7	52	55,3
Junction-ZS1	6,56	6,7	9,5	12,9	18,6	24,1	27,7	30,6	38,5	43,9	48,1	51,4
Junction-ZS2	14,02	13,1	18,8	25,5	37	48,3	55,7	61,8	78,1	89	97,5	104,3
N01	6,77	3,2	5,5	8,5	14,8	21,1	25,8	29,4	39,8	47,3	53,2	58,1
N02	12,62	12,5	20,9	30,8	49,6	67,9	81,5	92,4	121,8	142,4	158,3	171,8
N03	12,36	2	4,3	7,3	14,3	22,1	28,2	33,1	47,4	58	66,3	73,4
N04	8,03	1,4	2,9	4,9	9,8	15,4	19,8	23,1	33,3	40,9	46,9	52,1
N05	8,06	0,6	1,7	3,2	6,7	11,2	15,1	18,2	27,4	34,4	39,9	44,7
N06	19,29	5,1	9,7	15,7	28,4	42	52,4	60,4	83,4	99,8	112,7	123,7
N07	0,55	1,3	2,2	3,4	5,5	7,5	8,9	10	13	15,1	16,7	18
N08	2,29	3,4	5,6	8,5	13,6	18,8	22,4	25,2	33	38,3	42,5	45,8
N09	0,18	0,8	1,2	1,6	2,4	3,1	3,6	4	5,1	5,8	6,3	6,7
N10	0,93	1,1	2,1	3,3	5,6	8	9,7	11,1	15,1	17,9	20,1	21,9
N11	0,33	1,1	1,8	2,6	4	5,3	6,2	6,9	8,8	10,1	11,1	11,9
N12	0,61	0,8	1,6	2,6	4,6	6,7	8,1	9,2	12,4	14,6	16,3	17,6
N13	0,57	1,2	2,1	3,3	5,3	7,4	8,8	9,9	13	15	16,7	18
N14	0,73	2,3	3,5	4,9	7,3	9,7	11,3	12,5	15,8	18,1	19,8	21,2
N15	1,94	2,8	4,8	7,3	12,1	17,1	20,5	23,3	30,8	36,1	40,1	43,4
N16	0,94	1,4	2,4	3,7	6,1	8,5	10,2	11,5	15,3	17,8	19,8	21,4
N17	0,31	2,2	3	4	5,5	7	7,9	8,6	10,6	12	13,1	13,9
N18	1,49	2,7	4,5	6,9	11,1	15,2	18,1	20,3	26,6	30,8	34,1	36,8
N19	1,05	1,2	2,3	3,8	6,4	9,1	11	12,5	16,7	19,5	22	23,9
N20	0,25	1	1,5	2,2	3,2	4,3	5	5,5	7	8	8,8	9,4
N21	0,31	0,7	1,2	1,9	3	4,2	5	5,6	7,3	8,5	9,4	10,2
N22	1,45	4,4	6,7	9,5	14,1	18,7	21,8	24,1	30,7	35,1	38,5	41,2
N23	1,51	3,5	5,5	7,8	11,7	15,6	18,2	20,2	25,9	29,9	33	35,4
N24	1,73	4,3	6,5	9,1	13,6	18,1	21,2	23,6	30,4	34,9	38,4	41,3
N25	0,69	1,1	1,8	2,6	4,1	5,6	6,7	7,4	9,7	11,2	12,4	13,4

Tabla 73. Caudales máximos (m^3/s) para diferentes periodos de retorno, generados con el modelo hidrológico

Hydrologic Element	Drainage Area (km^2)	2,33 años	5 años	10 años	25 años	50 años	75 años	100 años	200 años	300 años	400 años	500 años
N26	16,7	29,8	43,9	60,4	90,4	118,9	138,5	153,6	195,8	224	245,9	264
N27	0,36	1,5	2,1	2,8	4,1	5,2	6	6,5	8,1	9,2	10	10,7
N28	1,62	2,1	3,1	4,3	6,4	8,5	9,9	11,1	14,2	16,3	18	19,3
N29	11,91	18,7	27,3	37,2	55,1	72	83,5	92,7	118,1	135,2	148,6	159,6
N30	1,17	2	2,9	4,1	6,1	8	9,3	10,4	13,2	15,1	16,7	17,9
N31	11,94	28,6	41,2	55,1	80,5	104,4	120,6	133,4	168	191,1	209	223,6
N32	21,03	11,8	17,2	23,5	34,5	45,3	52,6	58,4	74,3	84,6	93,1	99,9
QAC1	9,52	4	7,1	11,6	20,8	30,6	37,8	43,7	60,3	72,3	81,7	89,5
QAC2	5,78	1	2	3,4	6,9	11	14,3	17	24,6	30,1	34,6	38,3
QAC3	0,4	1	1,7	2,5	4	5,4	6,4	7,2	9,3	10,7	11,8	12,8
QH1	15,51	10,6	16,9	25	39,4	54	64	72,2	94,9	110,3	122,9	132,7
QH2	9,32	9,5	14,4	20,6	31,1	41,8	49,1	55	71,2	82,1	90,9	97,8
QH3	3,31	5	7,2	9,9	14,3	18,6	21,5	23,8	30	34,2	37,6	40,2
RAC1	12,89	9,9	16,7	25,3	41,3	58	69,4	78,7	104,4	122,5	136,9	148,7
RAC2	8,28	4,8	7,8	11,6	18,4	25,3	30	33,9	44,6	52,1	58	62,7
RAC3	4,6	3,3	5,2	7,6	11,9	16,2	19,2	21,6	28,1	32,7	36,2	39,1
Reach-QAC1	15,3	4,9	9	14,8	27,6	41,3	51,6	60,1	84,3	101,7	115,6	127,1
Reach-QH1	24,83	19,4	30,6	44,5	68,9	94	111,1	124,9	163	188,7	209,6	225,9
Reach-RAC1	21,17	13,4	22	32,9	52,7	73,7	88,2	99,9	132,3	154,8	172,4	186,7
Reach-RA01	478,33	59,1	61,4	108,2	144,4	175,9	196,1	211,4	251,8	277,9	297,7	313,7
Reach-RN01	19,39	15,2	25,3	38,1	63,2	88,1	105,8	119,9	157,9	184,6	205,3	222,9
Reach-RN02	47,84	17,5	31,6	50,5	90,3	131,4	162	187,1	258,2	309,5	349,9	384,5
Reach-RN03	82,83	26,3	48	76,3	135,6	198,4	245,3	281,7	388,3	465,4	526,1	577,2
Reach-RN04	85,67	28,7	51,8	81,9	143,7	209,9	259,1	297,4	405,5	483,2	544	596,5
Reach-RN05	86,78	29,2	52,8	83,3	145,4	211,8	261,5	300,3	410,1	488,9	550,8	602,9
Reach-RN06	87,72	29,6	53,5	84,4	147,4	212,9	262,8	301,8	412,3	491,6	554	606,5
Reach-RN07	91,33	32,8	58,3	91,3	156,7	226,8	278,5	318,9	433,1	514,8	579	632,9
Reach-RN08	93,13	34,2	60,4	94	161,4	232,7	285,1	326,1	441,9	524,6	589,6	644,2
Reach-RN09	94,18	34,5	60,9	94,7	162,2	233,8	286,4	327,6	444	527,3	592,8	647,7
Reach-RN10	94,74	34,5	60,9	94,6	162,6	234	286,6	327,6	443,6	526,6	591,8	646,5
Reach-RN11	97,7	35,6	62,2	96,9	166,2	238,5	291,6	333,1	450,2	533,9	599,7	654,9
Reach-RN12	99,43	35,8	62,5	97,2	166,4	238,5	291,4	332,7	449,3	532,6	598	653
Reach-RN13	116,82	50,5	76,4	112	185,5	262,4	318,6	362,6	486,7	575,1	644,6	702,9
Reach-RN14	117,18	48,2	74	109,4	183,2	260	315,8	359,6	483,4	571,6	640,9	699,2
Reach-RN15	130,71	50,6	76,9	111,5	185,5	262,5	318,6	362,5	486,8	575,2	644,8	703,3
Reach-RN16	143,82	51	77,3	111,7	184,9	261,8	317,7	361,5	485,1	573,2	642,3	700,4
Reach-ZS1	6,56	6,7	9,5	12,9	18,5	24	27,7	30,6	38,5	43,8	48	51,3
RP1	4,27	4,1	5,8	7,8	11,1	14,4	16,6	18,3	23,1	26,2	28,7	30,7
ZN1	0,51	0,6	0,9	1,3	2,1	2,8	3,4	3,8	5	5,8	6,4	6,9

Tabla 73. Caudales máximos (m^3/s) para diferentes periodos de retorno, generados con el modelo hidrológico

Hydrologic Element	Drainage Area (km^2)	2,33 años	5 años	10 años	25 años	50 años	75 años	100 años	200 años	300 años	400 años	500 años
ZN2	5,78	4,8	6,9	9,5	13,9	18,4	21,3	23,7	30,2	34,4	37,8	40,6
ZN3	4,08	3,4	4,9	6,7	9,9	13,1	15,2	16,9	21,6	24,5	27,1	29
ZS1	2,74	3,5	4,9	6,5	9,1	11,6	13,3	14,6	18,3	20,6	22,5	24
ZS2	5,79	5,6	8,1	11	16,1	21,1	24,4	27,1	34,4	39,3	43	46,1
ZS3	0,85	0,8	1,2	1,7	2,5	3,4	3,9	4,4	5,6	6,5	7,1	7,6
ZS4	2,98	2,7	3,8	5,2	7,4	9,6	11,1	12,2	15,4	17,5	19,2	20,5
ZS5	2,96	3,7	5,3	7,3	10,5	13,6	15,7	17,4	21,9	25	27,4	29,3
ZS6	0,62	1,2	1,7	2,3	3,3	4,2	4,9	5,4	6,8	7,7	8,5	9
ZS7	2,73	4,9	6,6	8,4	11,5	14,5	16,3	17,7	21,7	24,4	26,3	27,9
ZS8	0,87	1	1,6	2,3	3,5	4,7	5,5	6,2	8,1	9,3	10,3	11,1
ZS9	0,82	1	1,4	2	2,9	3,8	4,4	4,9	6,3	7,2	7,9	8,5

Fuente: elaboración propia

A continuación, se presentan lo caudales que serán empleados en la modelación de verificación de capacidad hidráulica, debido a estos tramos de ríos no cuentan con información hidrométrica sobre sus cauces.

Tabla 74. Caudales máximos (m^3/s) para diferentes periodos de retorno, generados con el modelo hidrológico para verificación de capacidad hidráulica

Hydrologic Element	Drainage Area (km^2)	2,33 años	5 años	10 años	25 años	50 años	75 años	100 años	200 años	300 años	400 años	500 años
Amaime	478,33	59,1	61,4	108,2	144,4	175,9	196,1	211,4	251,8	277,9	297,7	313,7
Final Amaime	484,3	66,8	72,3	122,9	165,7	203,5	228,1	246,8	296,6	328,7	353,4	373,4
Final Nima	164,85	59,7	89	124,9	201,4	281,8	340,8	387	517,2	609,5	682,1	743
Junction-N14 (Nima)	130,71	50,6	77	111,6	185,6	263	319,2	363,3	487,9	576,6	646,3	705
Junction-RAC2 (Aguaclara)	25,77	16,7	27,2	40,4	64,5	89,7	107,1	121,3	160,3	187,4	208,6	225,8
Junction-RP1 (Palmira)	7,01	9,7	12,6	16,1	21,9	27,6	31,4	34,3	42,5	47,7	52	55,3

Fuente: elaboración propia

5.7 Capacidad hidráulica en ríos principales

Con el fin de verificar la capacidad hidráulica y el caudal máximo transportado en los sectores evaluados de los ríos principales del municipio Palmira, con y sin estructuras de mitigación de inundaciones, se realizarán modelaciones hidráulicas empleando el software Flow Master, el cual fue desarrollado para el diseño y análisis de estructuras hidráulicas. El programa Flow Master calcula caudales, velocidades del agua, profundidades y presiones, basado en las fórmulas o expresiones más conocidas para determinar la capacidad de una conducción, como son, Manning, Darcy-Weisbach, Kutter y Hazen-Williams.

5.7.1 Generalidades teóricas del modelo

5.7.1.1 Flujo uniforme

Las ecuaciones empleadas en el programa Flow Master hacer referencia en su gran mayoría al flujo uniforme El flujo uniforme se refiere a la condición hidráulica en la cual la profundidad del flujo, el caudal y el área de descarga no varían en un canal con características constantes de sección tales como forma y material. La condición de flujo uniforme se alcanza sólo cuando la pendiente del fondo del canal y la pendiente friccional son iguales. Cuando el agua fluye bajo condiciones de flujo uniforme, la profundidad del flujo se denomina profundidad normal (Bentley Institute Press, 2008). El flujo uniforme se describe mediante la ecuación generalizada de fricción:

$$V = C * R^x * S^y$$

Donde *V* es la velocidad media (m/s), *C* es un factor de resistencia del flujo, o coeficiente de rugosidad, *R* es el radio hidráulico (m), *S* es la pendiente friccional (m/m), o de energía, *X*, e *Y* son exponentes.

El material de recubrimiento del canal usualmente determina el factor de resistencia del flujo (o coeficiente de rugosidad), aunque el valor canal de *C* puede darse en función de la forma del canal, profundidad y velocidad de flujo. El radio hidráulico se expresa en función de la forma del canal. Una vez que se asuma o conozca un valor de profundidad, el valor de *R* puede ser calculado para cada forma geométrica dividiendo el área de flujo de la sección transversal por el perímetro mojado. La pendiente de energía, *S*, se considera siempre constante bajo condiciones de flujo uniforme (Bentley Institute Press, 2008). Dado que la velocidad media se considera constante bajo condiciones de flujo uniforme (condiciones constantes de área y caudal), la combinación de la ecuación de velocidad media con la ecuación de continuidad, genera la ecuación de flujo uniforme generalizada, que finalmente determina la descarga:

$$Q = A * C * R^x * S^y$$

Donde *Q* es la descarga (m^3/s) y *A* es el área de la sección transversal de flujo (m^2). El programa Flow Master dispone de cuatro variaciones de la ecuación de flujo uniforme generalizada. Estas ecuaciones difieren entre sí por la determinación del valor de *C* y por los valores asignados a *X* y a *Y* (Bentley Institute Press, 2008).

5.7.1.2 Fórmula de Manning

La fórmula de Manning es probablemente la ecuación para flujo en canales abiertos más utilizada, y una de las más fáciles de resolver. El componente de rugosidad *C* resulta constante para todo el rango de flujos y usualmente se representa mediante el coeficiente n de Manning. Los valores de los exponentes *X* e *Y* son 2/3 y 1/2 respectivamente. La fórmula de Manning es (Bentley Institute Press, 2008):

$$V = \frac{1}{n} * R^{2/3} * S^{1/2}$$

Donde *V* es la velocidad media (m/s), *R* es el radio hidráulico (m) y *S* es la pendiente friccional (m/m).

Coeficiente de rugosidad de Manning El coeficiente de rugosidad de Manning se puede calcular a partir del coeficiente de rugosidad en la ecuación de Chèzy como:

$$C = k * \frac{R^{1/6}}{n}$$

Donde *C* es el coeficiente de rugosidad de Chèzy (m1/2/s), *R* es el radio hidráulico (m), *n* es la rugosidad de Manning (s/m$^{1/3}$) y *k* es una constante, igual a 1,00 m$^{1/3}$/m$^{1/3}$ para el Sistema Internacional.

5.7.1.3 Fórmula de Kutter

La forma estándar de la fórmula de Kutter es conocida como la fórmula de Chèzy. La fórmula de Kutter se utiliza ampliamente en el diseño y análisis de colectores y canales sanitarios. El coeficiente de rugosidad *C* resulta variable y se expresa en función de *R*, *S* y del material del canal. Tanto a *X* como a *Y* se le asigna el valor de ½. La fórmula de Kutter se expresa entonces como (Bentley Institute Press, 2008):

$$V = C * \sqrt{R * S}$$

$$C = \frac{K_1 + \frac{K_2}{S} + \frac{K_3}{n}}{1 + \frac{n}{\sqrt{R}} . \left(K_1 + \frac{K_2}{S}\right)}$$

Donde *C* es el coeficiente de rugosidad de Chèzy (m1/2/s), S es la pendiente friccional (m/m), *R* es la rugosidad hidráulica (adimensional), *n* es la rugosidad de Kutter (adimensional), *K1* es una constante igual a 23,0; *K*2 es constante igual a 0,00155 y *K3* es constante igual a 1,0 para el Sistema Internacional.

5.7.1.4 Fórmula de Hazen-Williams

La fórmula de Hazen-Williams es comúnmente utilizada para el diseño de sistemas de distribución de agua a presión. El coeficiente de rugosidad *C* es constante para todo el rango de flujos

turbulentos. Para esta ecuación empírica los valores de *X* e *Y* son 0,63 y 0,54 (Bentley Institute Press, 2008):

$$V = 0{,}85 * C * R^{0{,}63} * S^{0{,}54}$$

5.7.1.5 Fórmula de Darcy-Weisbach

La fórmula de Darcy-Weisbach fue desarrollada para el análisis de sistemas a presión, aunque resulta suficientemente general para ser aplicada en flujos de canales abiertos. Aunque su solución por medios manuales es extremadamente difícil, la disponibilidad de computadores ha hecho que el uso de esta fórmula gane aceptación, dado que ella modela con gran exactitud la variabilidad de la rugosidad efectiva en función de la geometría, velocidad y material del canal.

Esta fórmula es considerada por muchos ingenieros como la más acertada para la modelación en condiciones de flujo uniforme. El componente de rugosidad en la ecuación de Darcy-Weisbach se expresa en función del material del canal y del Número de Reynolds, el cual varía a su vez con *V* y *R*. Al igual que en la ecuación de Kutter, ambos exponentes, *X* y *Y*, son iguales a *1/2*. La forma de la ecuación para tuberías circulares con flujo a tubo lleno es (Bentley Institute Press, 2008):

$$h_f = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}$$

Donde h_f: pérdida de carga (m), *f*: factor de fricción de Darcy-Weisbach, D: diámetro de la tubería (m), *L*: longitud de la tubería (m), *V*: velocidad del flujo (m/s), g: aceleración de la gravedad (m/s^2). Esta relación se adapta a geometrías de canal diferentes a circulares mediante la relación:

$$D = 4 * R$$

$$V = \sqrt{\frac{8g}{f} R * S}$$

El factor de fricción de Darcy-Weisbach *f*, puede determinarse mediante la ecuación de Colebrook-White para flujo turbulento totalmente desarrollado. En ella, la altura de rugosidad *k* es una propiedad física del material del canal. Para canales a superficie libre esta ecuación es (Bentley Institute Press, 2008):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2log\left(\frac{k}{12R} + \frac{2{,}51}{Re\sqrt{f}}\right)$$

Donde *Re* es el número de Reynolds (adimensional) y *K* la altura de rugosidad (m).

5.7.1.6 Flujo crítico

Las condiciones de flujo crítico ocurren cuando, para una descarga dada, la energía específica del flujo se encuentra en un punto mínimo. La energía específica *E*, en el programa Flow Master, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$E = y + \frac{V^2}{2g}$$

Donde *Y* es la profundidad del flujo (m), *V* es la velocidad (m/s) y *g* es la aceleración de la gravedad (m/s^2). La ecuación de energía específica utilizada por el programa Flow Master es válida solamente para pendientes pequeñas (< 10%) y además ignora los efectos de la variación de la velocidad a través de la sección del flujo.

A la profundidad crítica, la velocidad del flujo es igual a la celeridad de la onda. El número de Froude (*F*), se define como la razón entre la velocidad real y la celeridad de la onda. Este número se define sólo para secciones que tienen una superficie libre, y resulta indefinido para conductos cerrados o para canales irregulares cerrados en su parte superior cuando trabajan a sección llena.

El número de Froude se define como:

$$F = \frac{V}{\sqrt{gD}}$$

Donde *D* es la profundidad hidráulica del canal, equivalente a *A/T* (m), A es el área de flujo (m^2) y T es ancho superior del flujo (m). Cuando *F* es menor de 1, se dice que el flujo es subcrítico (la velocidad es más lenta que la celeridad de la onda). Cuando *F* es mayor a 1, se dice que el flujo es supercrítico (la velocidad es más rápida que la celeridad de la onda). Cuando *F* es igual a 1, el flujo se denomina crítico. La condición de flujo crítico se define por una situación donde:

$$\frac{A^3}{T} = \frac{Q^2}{g}$$

Donde *A* es el área de flujo (m^2), *T* es el ancho superior del flujo (m), *Q* es el caudal de descarga en la sección (m^3/s) y *g* es la aceleración de la gravedad (m/s^2). Este cálculo resulta relativamente sencillo para geometrías simples, pero puede requerir cálculos iterativos para formas más complejas. Consecuentemente, la pendiente crítica se refiere a la pendiente para la cual la profundidad crítica de una conducción resulta igual a la profundidad normal.

5.7.1.7 Coeficiente de rugosidad

En la etapa de calibración de un modelo hidráulico una de las principales dificultades es la definición de la rugosidad de los cauces y las planicies adyacentes (coeficiente de rugosidad n Manning, en este caso). A partir de las características de los sedimentos y materiales del lecho, la vegetación de las bancas y las bancas de los cauces y las planicies en la zona e información de cobertura de uso del suelo, se define el coeficiente de rugosidad para el drenaje en estudio, tomando como referencia los valores de rugosidad n de Manning adaptados de la literatura, como lo es Ven Te Chow (Ver Tabla 75).

Tabla 75. Valores de rugosidad para diferentes tipos de suelos y coberturas

Rango Valores n Manning	Descripción del tipo de Cobertura
0,025 - 0,05	**Aguas abiertas**: áreas de aguas abiertas, generalmente con menos del 25% de cobertura de vegetación o suelo.
0,03 - 0,05	**Espacio abierto desarrollado**: áreas con una mezcla de algunos materiales construidos, pero principalmente vegetación en forma de césped. Las superficies impermeables representan menos del 20% de la cobertura total. Estas áreas más importantes incluyen unidades de vivienda unifamiliar en lotes grandes, parques, campos de golf y vegetación plantada en entornos desarrollados para recreación, control de erosión o con fines estéticos.
0,06 - 0,12	**Desarrollado, de baja intensidad**: áreas con una mezcla de materiales construidos y vegetación. Las superficies impermeables representan del 20% al 49% de la cobertura total. Estas áreas suelen incluir unidades de vivienda unifamiliares.
0,08 - 0,16	**Áreas desarrolladas de intensidad** media con una mezcla de materiales construidos y vegetación. Las superficies impermeables representan del 50% al 79% de la cobertura total. Estas áreas suelen incluir unidades de vivienda unifamiliares.
0,12 - 0,20	**Desarrollado de alta intensidad:** áreas altamente desarrolladas donde la gente reside o trabaja en grandes cantidades. Los ejemplos incluyen complejos de apartamentos, casas adosadas y comerciales / industriales. Las superficies impermeables representan del 80% al 100% de la cobertura total.
0,023 - 0,030	**Tierra estéril (roca / arena / arcilla)** : áreas de lecho rocoso, pavimento desértico, escarpes, talud, deslizamientos, material volcánico, escombros glaciales, dunas de arena, minas a cielo abierto, pozos de grava y otras acumulaciones de material de tierra. Generalmente, la vegetación representa menos del 15% de la cobertura total.
0,10 - 0,20	**Bosque caducifolio**: áreas dominadas por árboles generalmente de más de 5 metros de altura y más del 20% de la cubierta vegetal total. Más del 75% de las especies de árboles pierden follaje simultáneamente en respuesta al cambio estacional.
0,08 - 0,16	**Bosque siempre verde**: áreas dominadas por árboles generalmente de más de 5 metros de altura y más del 20% de la cubierta vegetal total. Más del 75% de las especies arbóreas mantiene sus hojas todo el año. El dosel nunca está exento de follaje verde.
0,08 - 0,20	**Bosque mixto**: áreas dominadas por árboles generalmente de más de 5 metros de altura y más del 20% de la cubierta vegetal total. Ni las especies de hoja caduca ni las de hoja perenne superan el 75% de la cobertura total de árboles.
0,025 - 0,05	**Matorral enano**: solo áreas de Alaska dominadas por arbustos de menos de 20 centímetros de altura con un dosel de arbustos que generalmente supera el 20% de la vegetación total. Este tipo a menudo se asocia con pastos, juncos, hierbas y vegetación no vascular.

Tabla 75. Valores de rugosidad para diferentes tipos de suelos y coberturas

Rango Valores n Manning	Descripción del tipo de Cobertura
0,07 - 0,16	**Arbustos / matorrales**: áreas dominadas por arbustos; menos de 5 metros de altura con un dosel de arbustos que generalmente supera el 20% de la vegetación total. Esta clase incluye arbustos verdaderos, árboles jóvenes en una etapa de sucesión temprana o árboles atrofiados por las condiciones ambientales.
0,025 - 0,05	**Pastizales / herbáceos** - áreas dominadas por vegetación gramínea o herbácea, generalmente más del 80% de la vegetación total. Estas áreas no están sujetas a un manejo intensivo como la labranza, pero pueden utilizar para el pastoreo.
0,025 - 0,05	**Juncia / herbáceas** - Alaska solo áreas dominadas por juncos y hierbas, generalmente más del 80% de la vegetación total. Este tipo puede ocurrir con otras gramíneas importantes u otras plantas similares a las gramíneas, e incluye la tundra de juncia y la tundra de matas de juncia.
0,025 - 0,05	**Pastizales / heno:** áreas de pastos, leguminosas o mezclas de pastos y leguminosas plantadas para el pastoreo de ganado o la producción de semillas o cultivos de heno, típicamente en un ciclo perenne. La vegetación de pastos / heno representa más del 20% de la vegetación total.
0,020 - 0,05	**Cultivos Cultivados:** áreas utilizadas para la producción de cultivos anuales, como maíz, soja, hortalizas, tabaco y algodón, y también cultivos leñosos perennes como huertos y viñedos. La vegetación de los cultivos representa más del 20% de la vegetación total. Esta clase también incluye toda la tierra que se está cultivando activamente.
0,045 - 0,15	**Humedales leñosos**: áreas donde la vegetación de bosques o matorrales representa más del 20% de la cubierta vegetal y el suelo o sustrato se satura o cubre periódicamente con agua.
0,05 - 0,085	**Humedales herbáceos emergentes**: áreas donde la vegetación herbácea perenne representa más del 80% de la cubierta vegetal y el suelo o sustrato se satura o cubre periódicamente con agua.

Fuente: (_)

5.7.2 Resultados capacidad hidráulica en ríos principales

Para determinar la capacidad hidráulica en los tramos de los ríos Amaime, Nima, Guachal, Bolo, Aguaclara, Frayle y Palmira, con jarillones y sin obras de mitigación, se contó con información batimétrica y topográfica de dichos drenajes, lo que se constituyó en insumo para obtener las respectivas secciones transversales (ver Figura 200) y las pendientes hidráulicas. Adicionalmente, de acuerdo con los recorridos de campo, se pudo determinar la rugosidad n de Manning requerida por el programa computacional Flow Master.

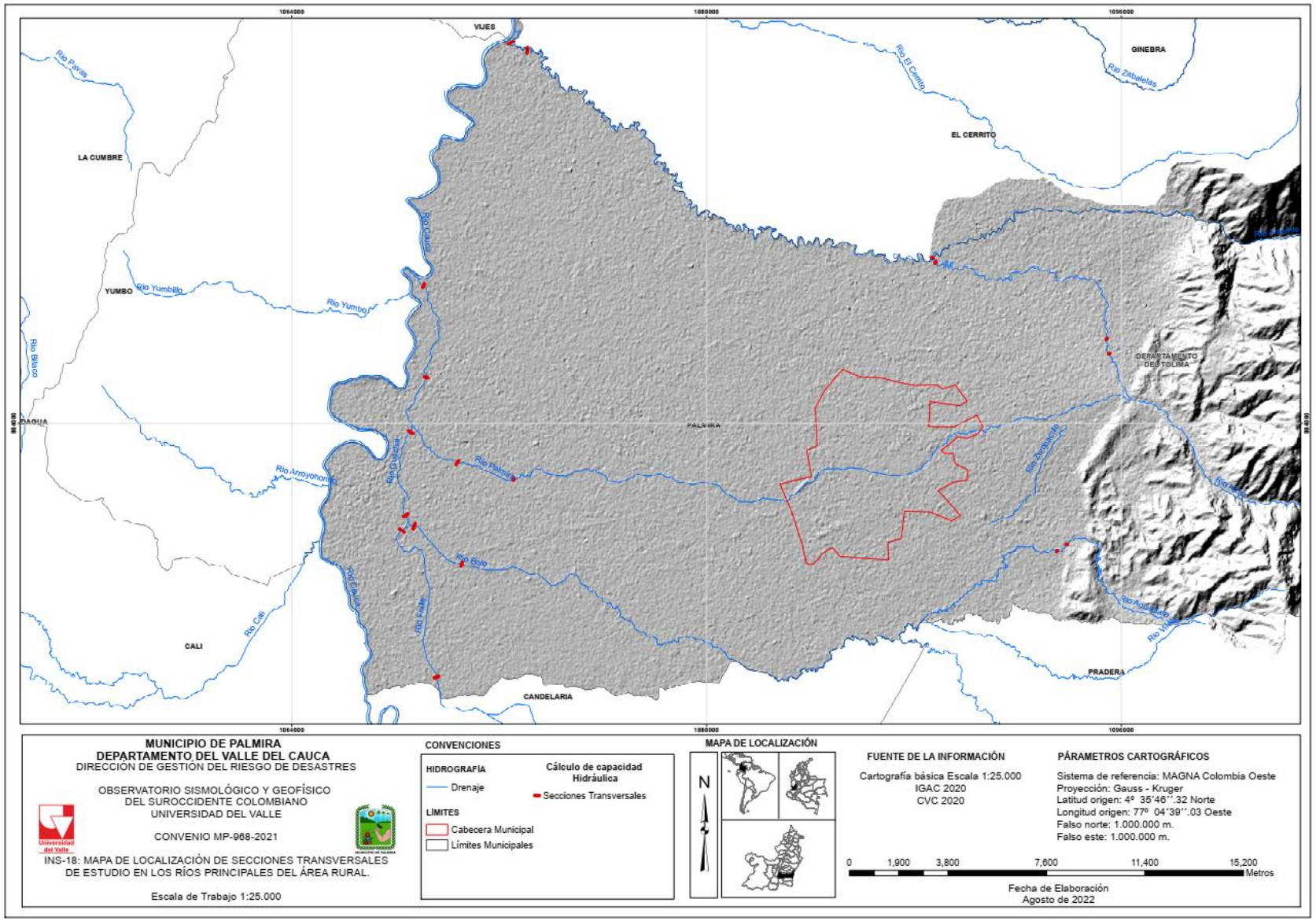


Figura 200. Localización secciones transversales para cálculo de capacidad hidráulica
Fuente: elaboración propia

A continuación, desde la Figura 201 hasta la Figura 218 se presentan los resultados de las modelaciones de capacidad hidráulica obtenidas para secciones transversales en tramos de los ríos Amaime, Nima, Guachal, Bolo, Aguaclara, Fraile y Palmira.

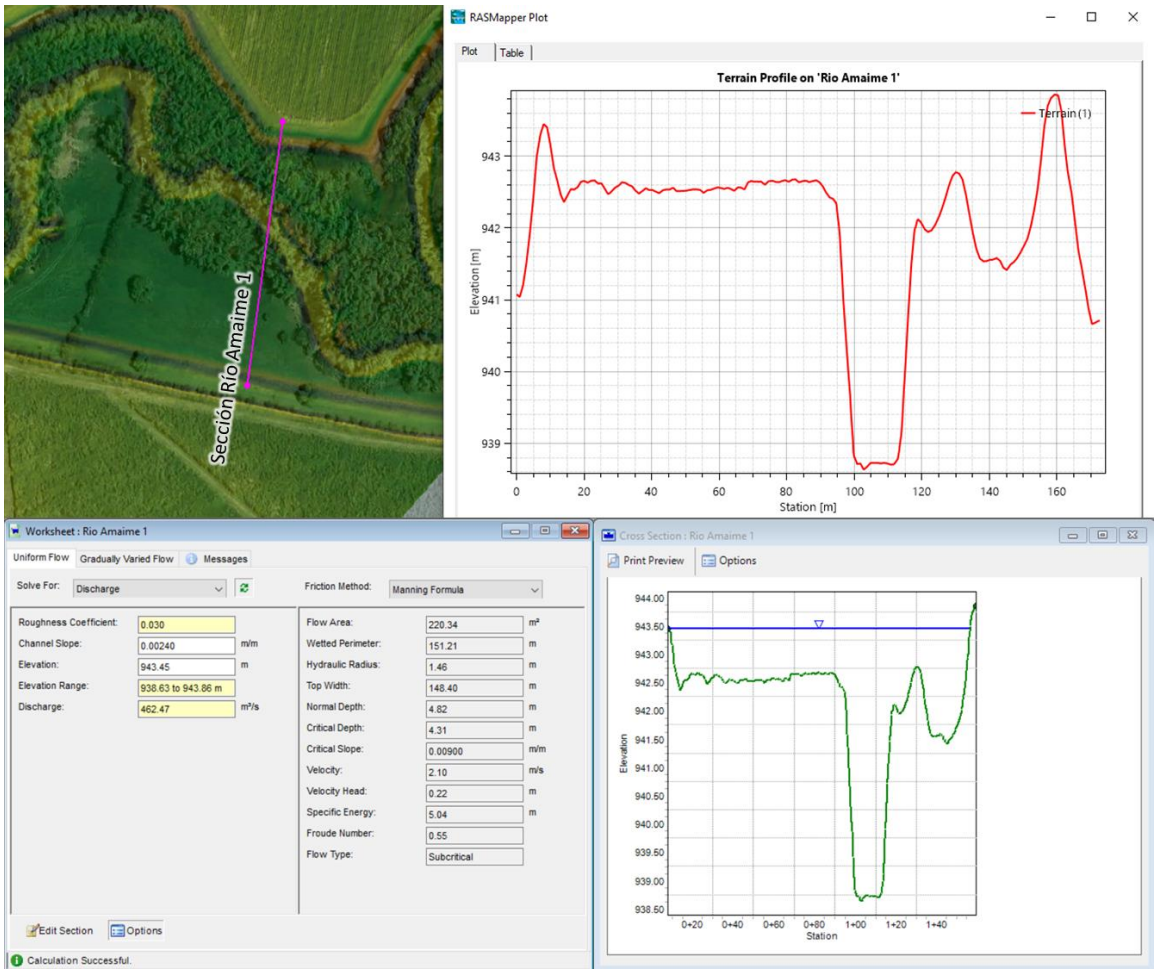


Figura 201. Localización, sección transversal y resultados río Amaime 1.
Fuente: elaboración propia

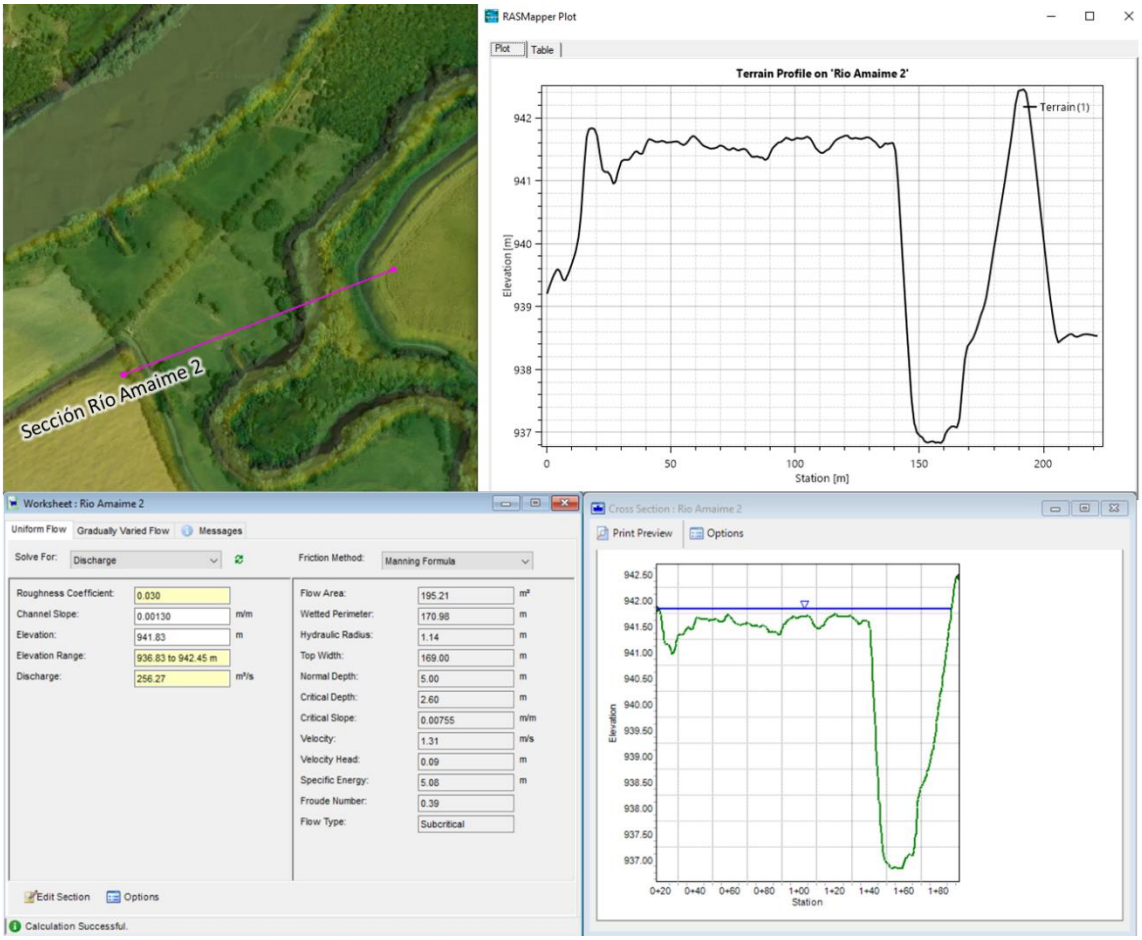


Figura 202. Localización, sección transversal y resultados río Amaime 2.
Fuente: elaboración propia

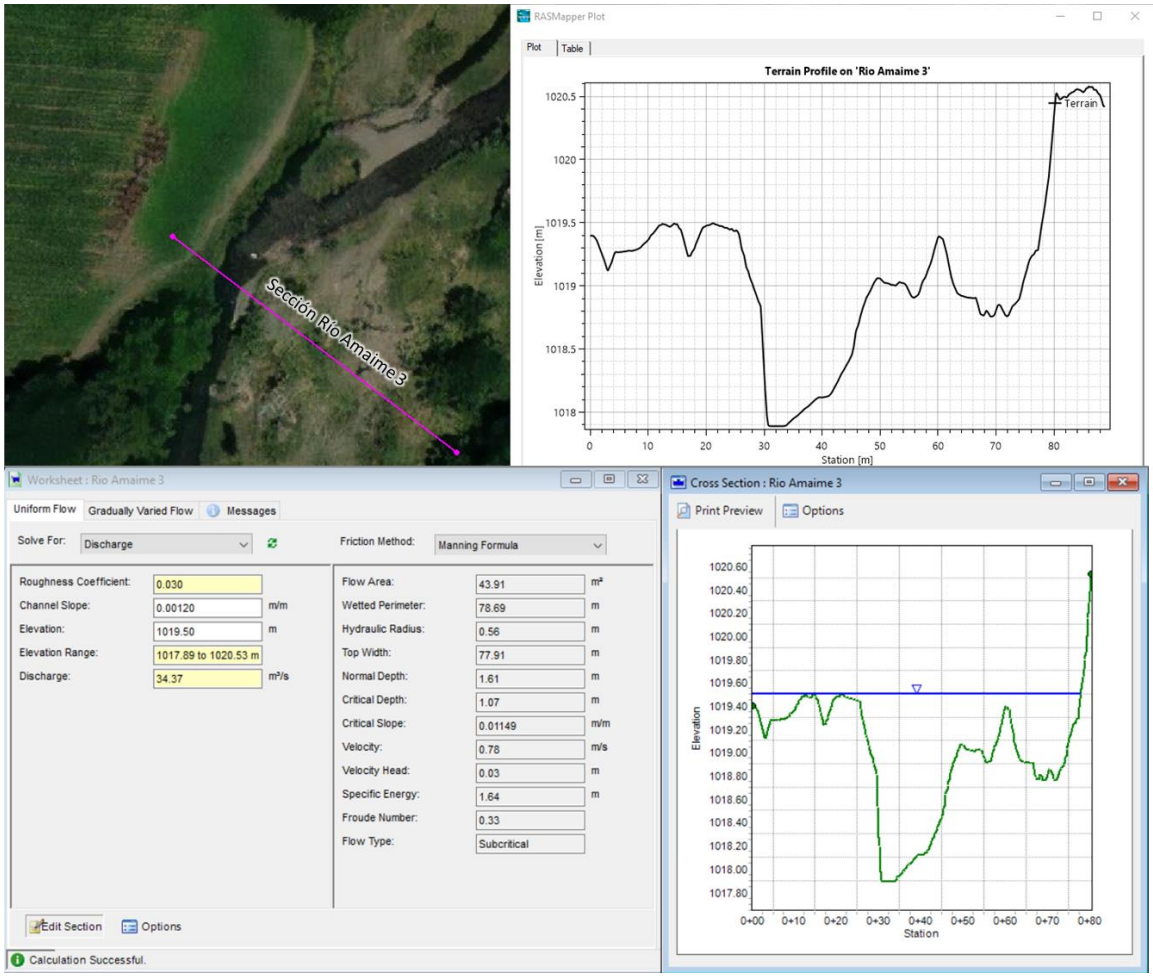


Figura 203. Localización, sección transversal y resultados río Amaime 3.
Fuente: elaboración propia

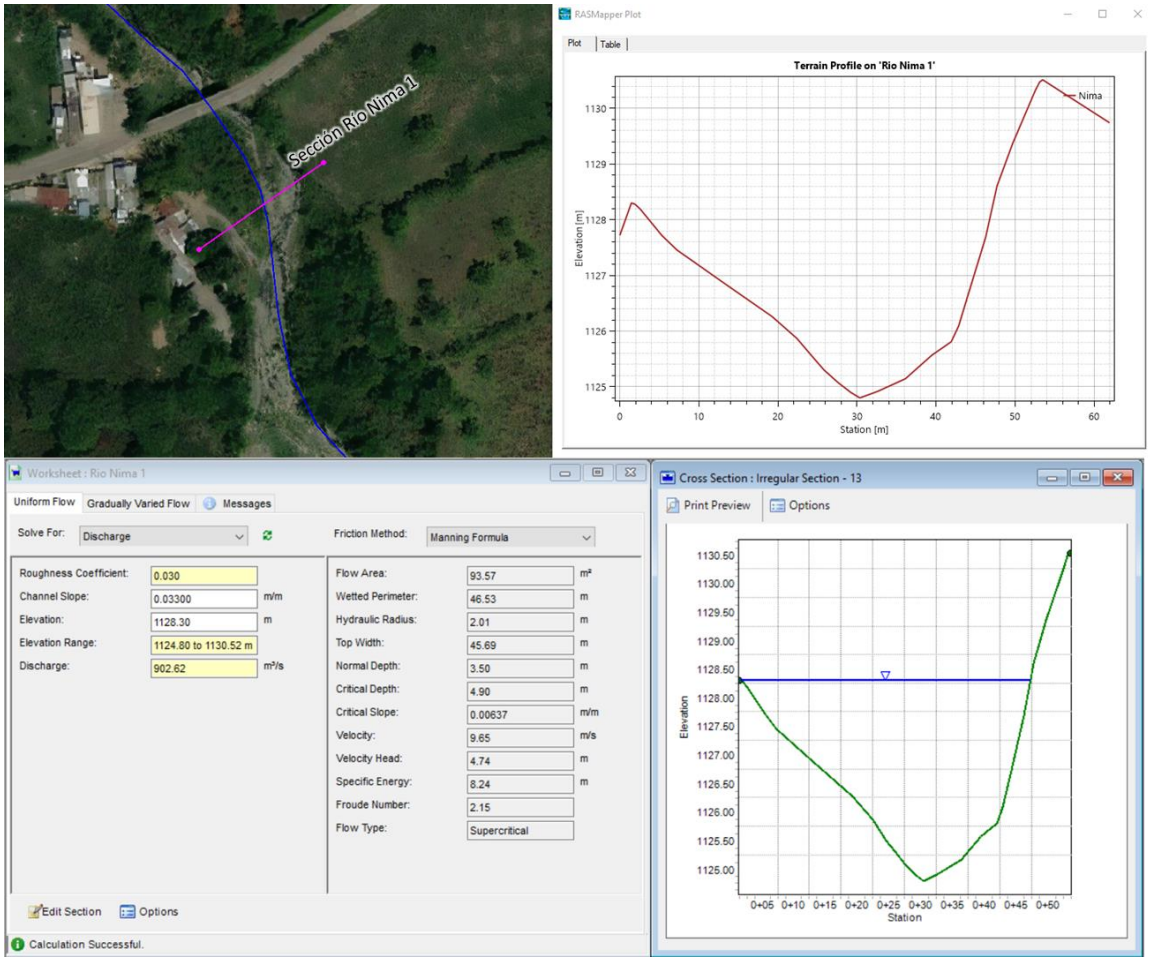


Figura 204. Localización, sección transversal y resultados río Nima 1.
Fuente: elaboración propia

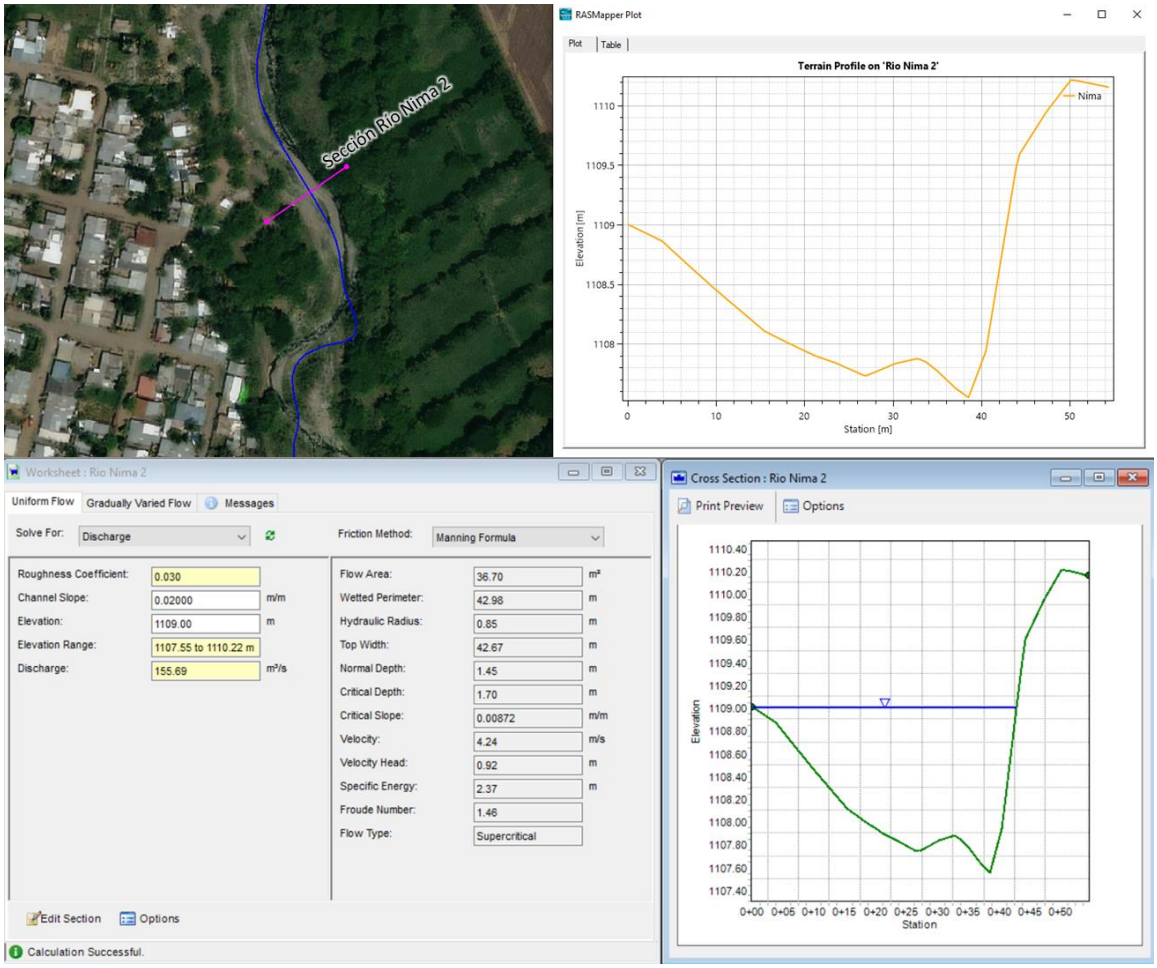


Figura 205. Localización, sección transversal y resultados río Nima 2.
Fuente: elaboración propia

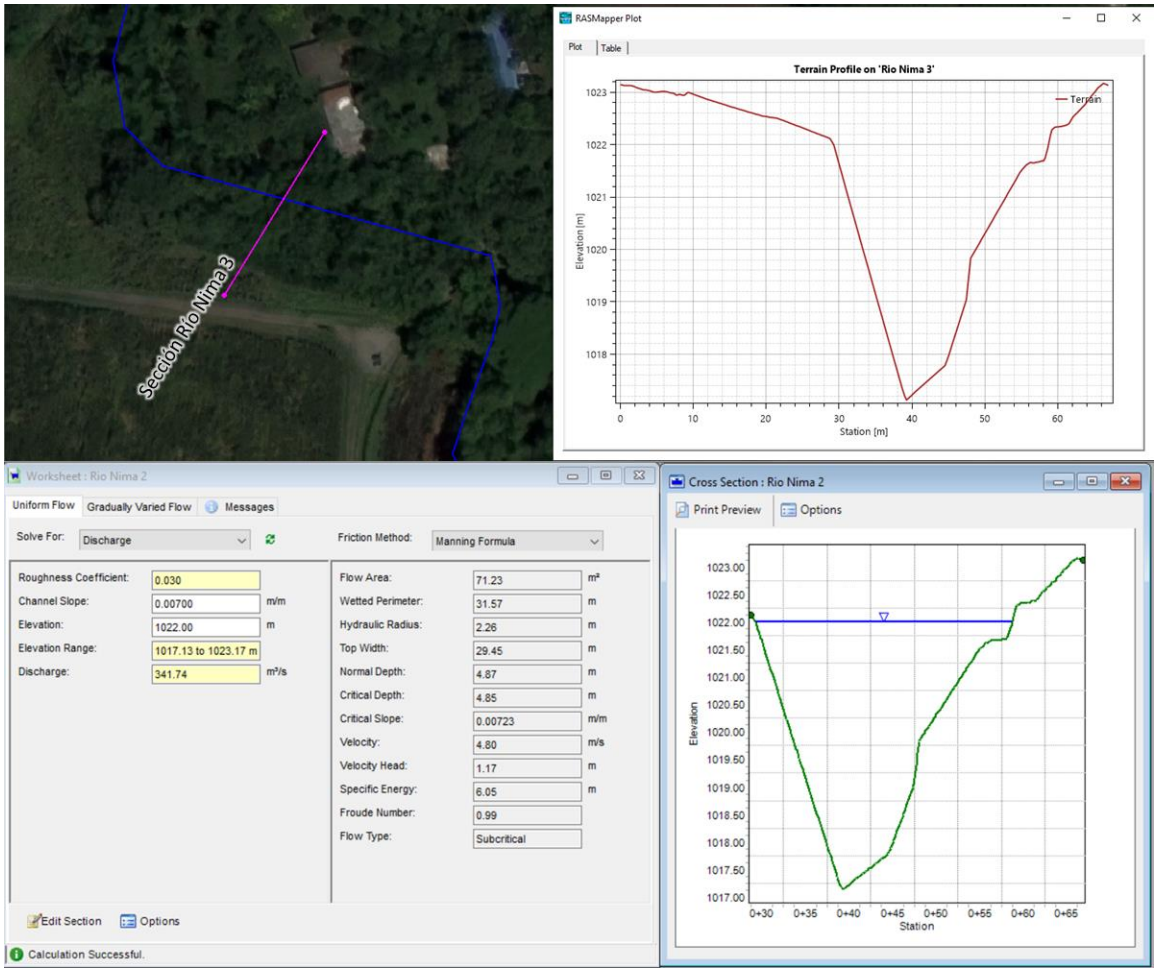


Figura 206. Localización, sección transversal y resultados río Nima 3.
Fuente: elaboración propia

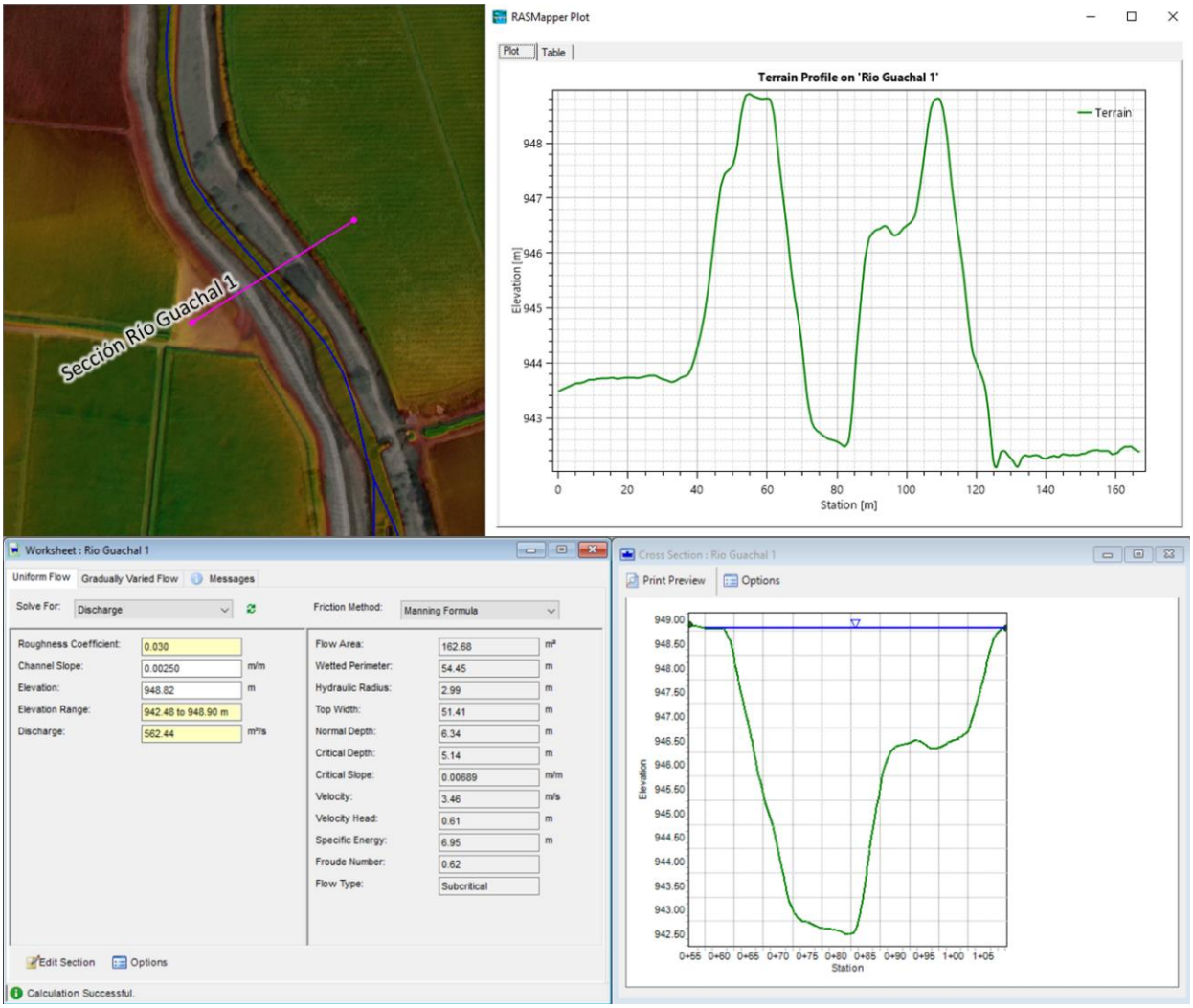


Figura 207. Localización, sección transversal y resultados río Guachal 1.
Fuente: elaboración propia

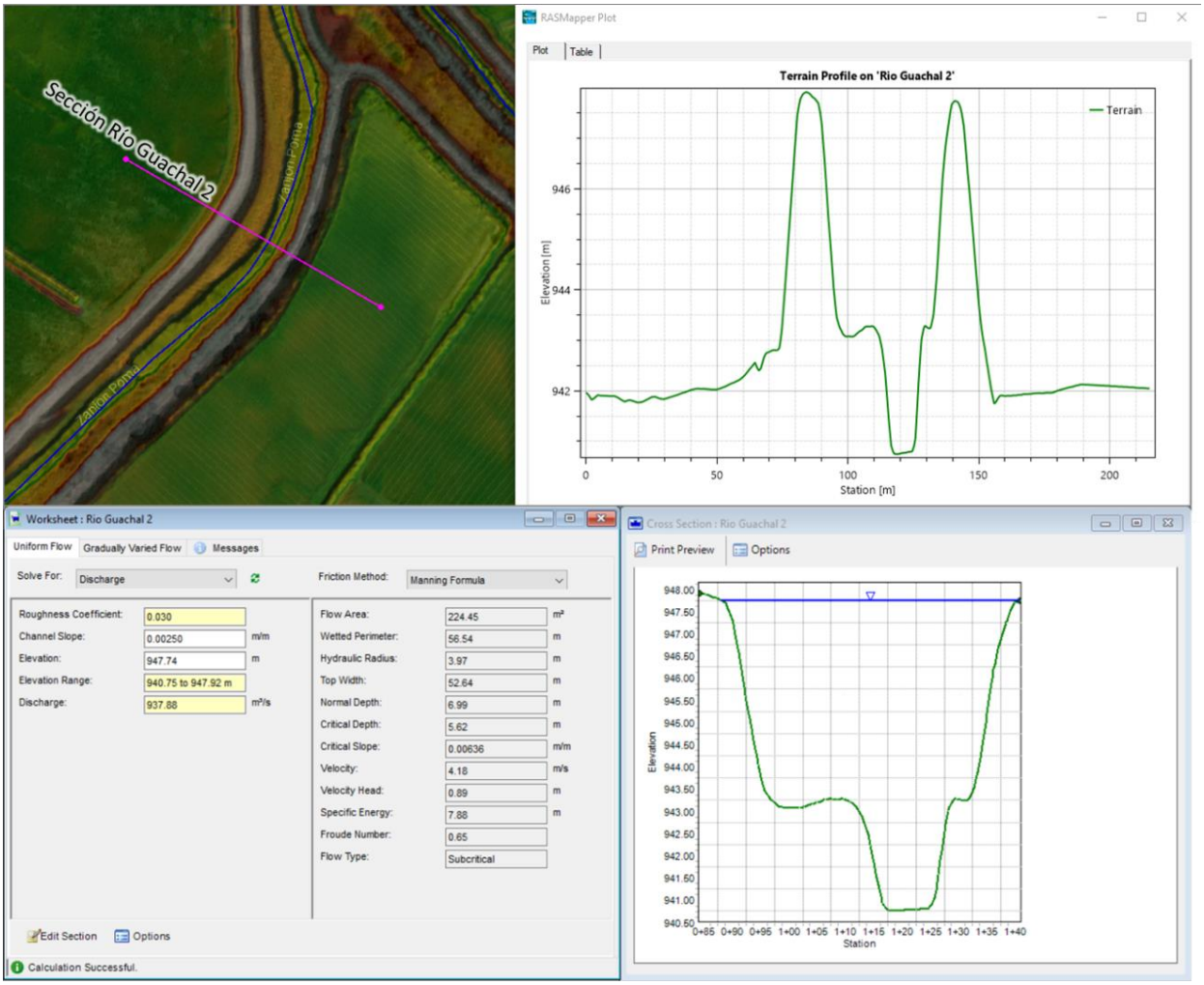


Figura 208. Localización, sección transversal y resultados río Guachal 2.
Fuente: elaboración propia

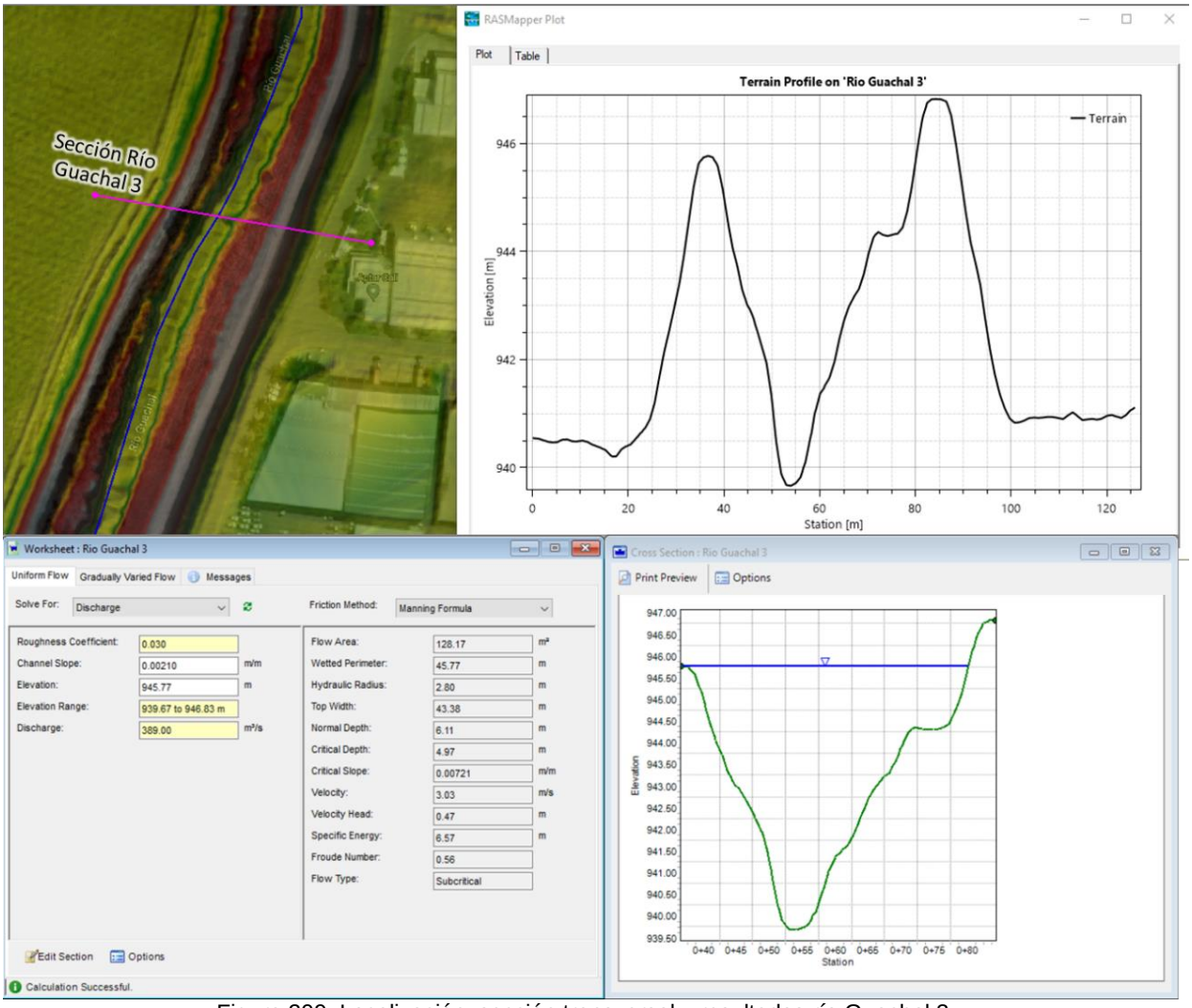


Figura 209. Localización, sección transversal y resultados río Guachal 3.
Fuente: elaboración propia

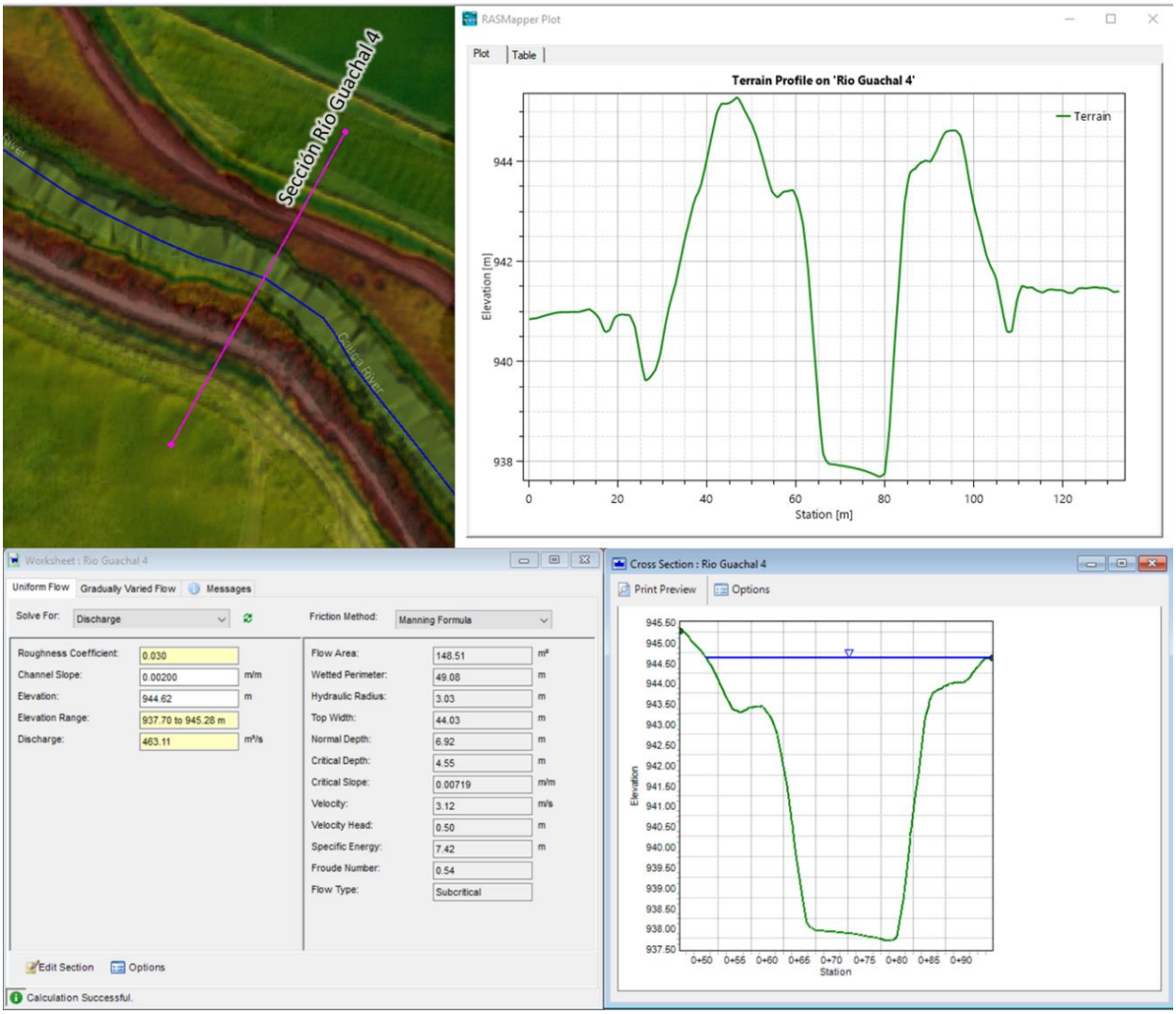


Figura 210. Localización, sección transversal y resultados río Guachal 4.
Fuente: elaboración propia

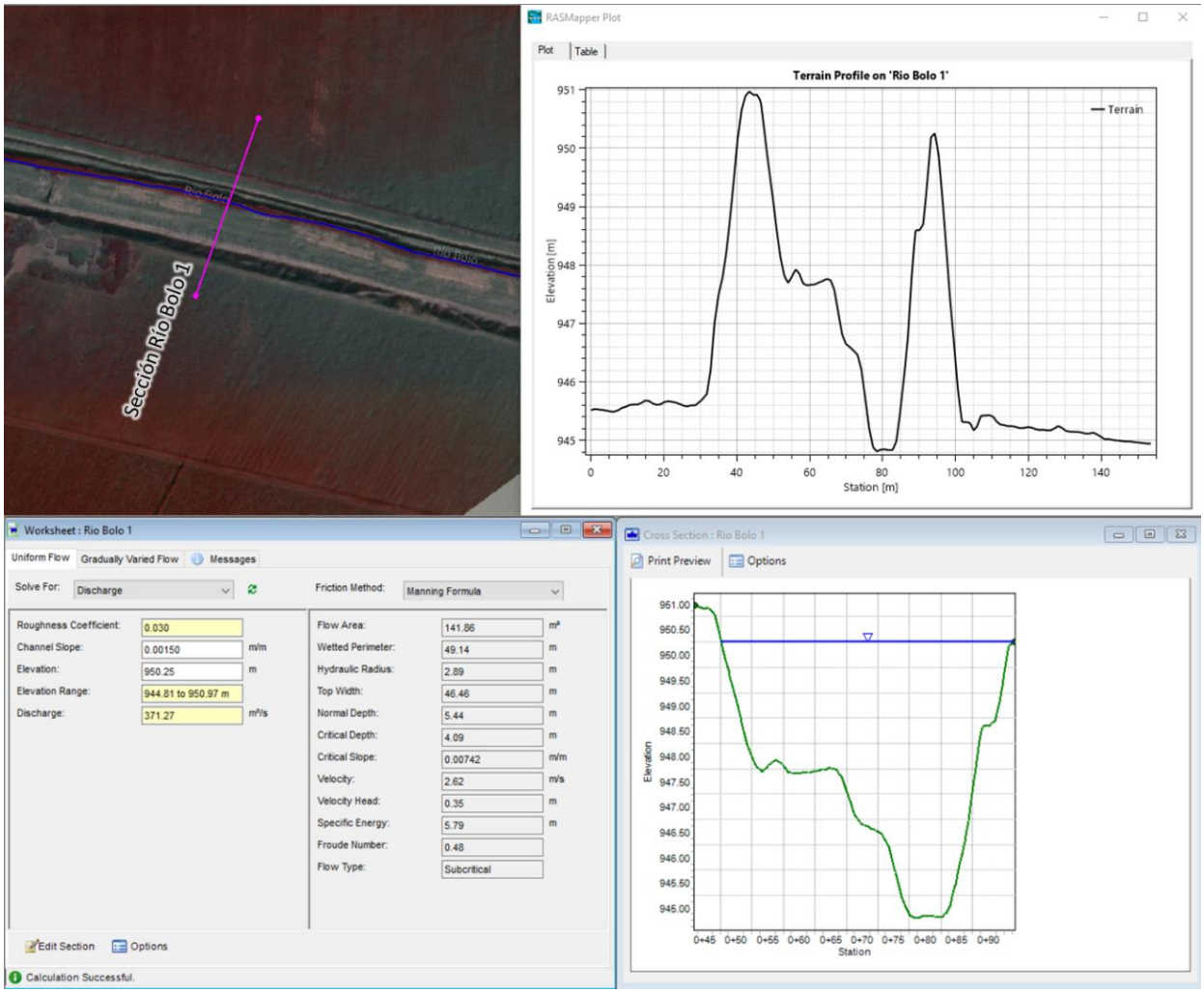


Figura 211. Localización, sección transversal y resultados río Bolo 1.
Fuente: elaboración propia

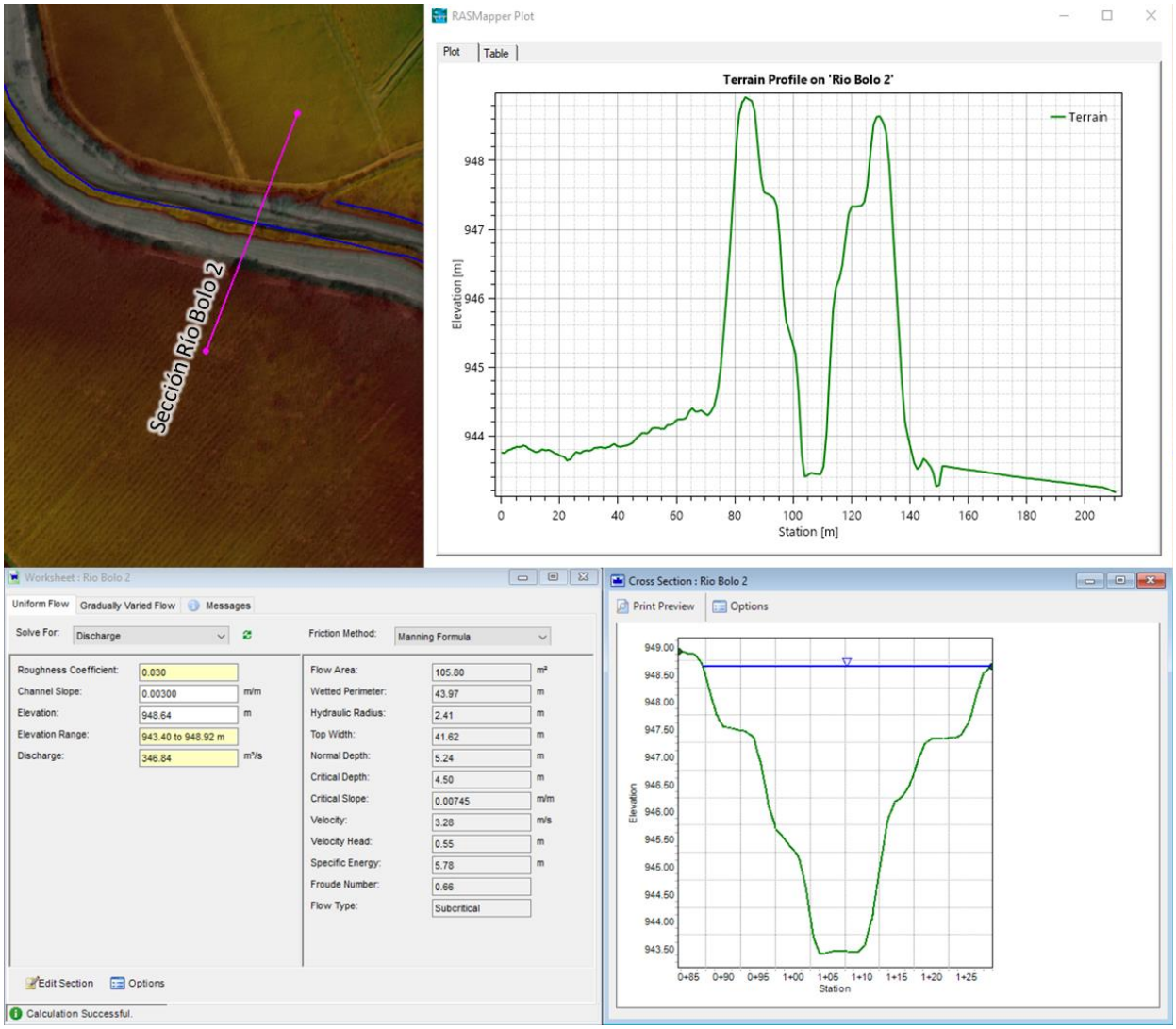


Figura 212. Localización, sección transversal y resultados río Bolo 2.
Fuente: elaboración propia

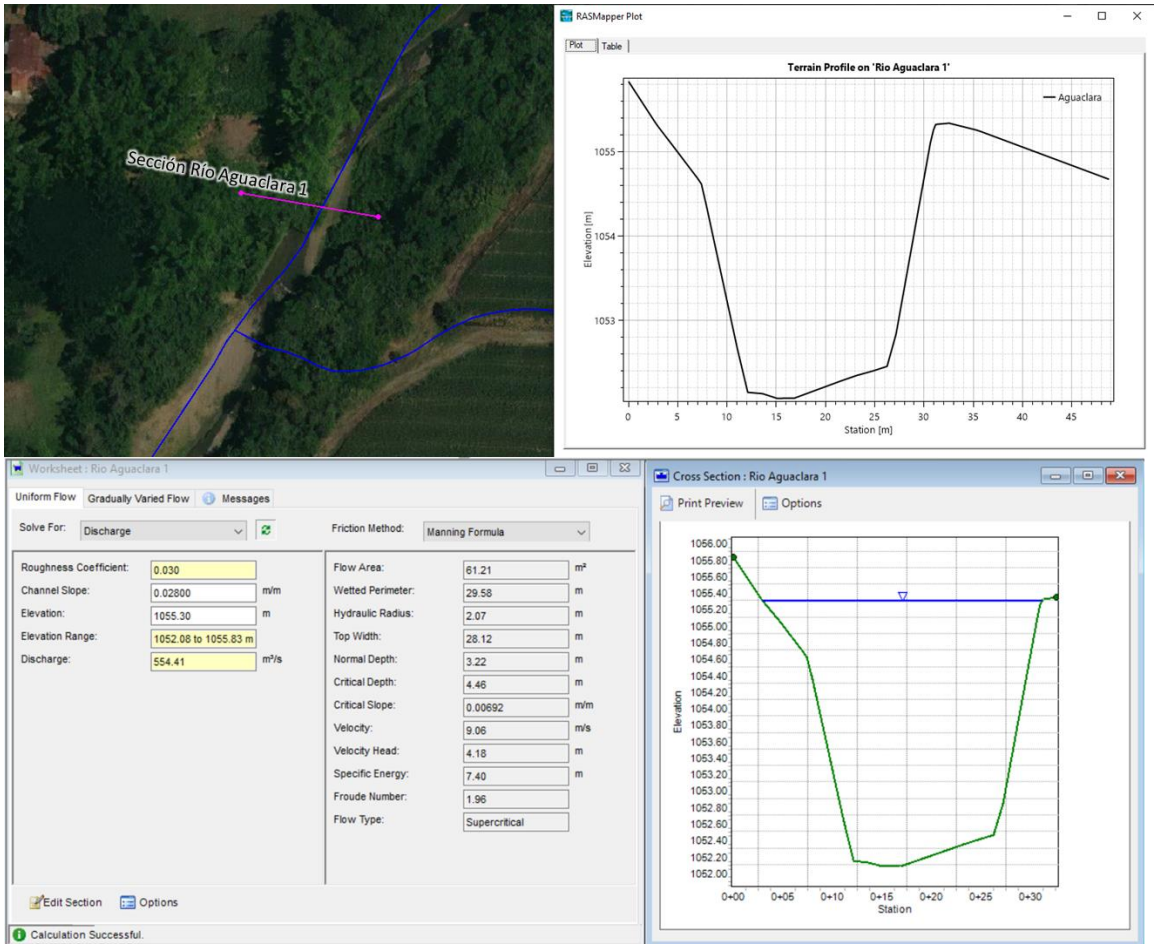


Figura 213. Localización, sección transversal y resultados río Aguaclara 1.
Fuente: elaboración propia

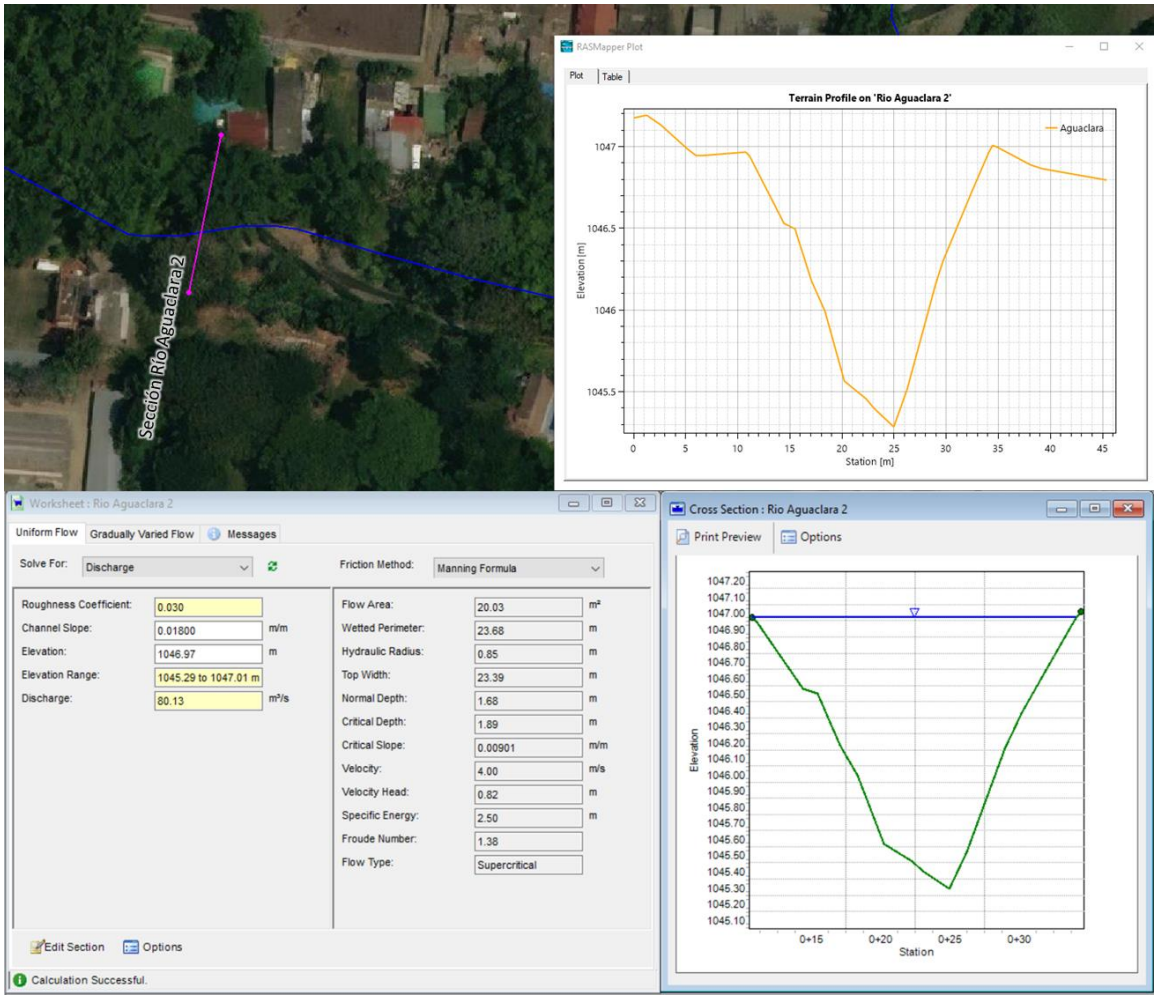


Figura 214. Localización, sección transversal y resultados río Aguaclara 2.
Fuente: elaboración propia

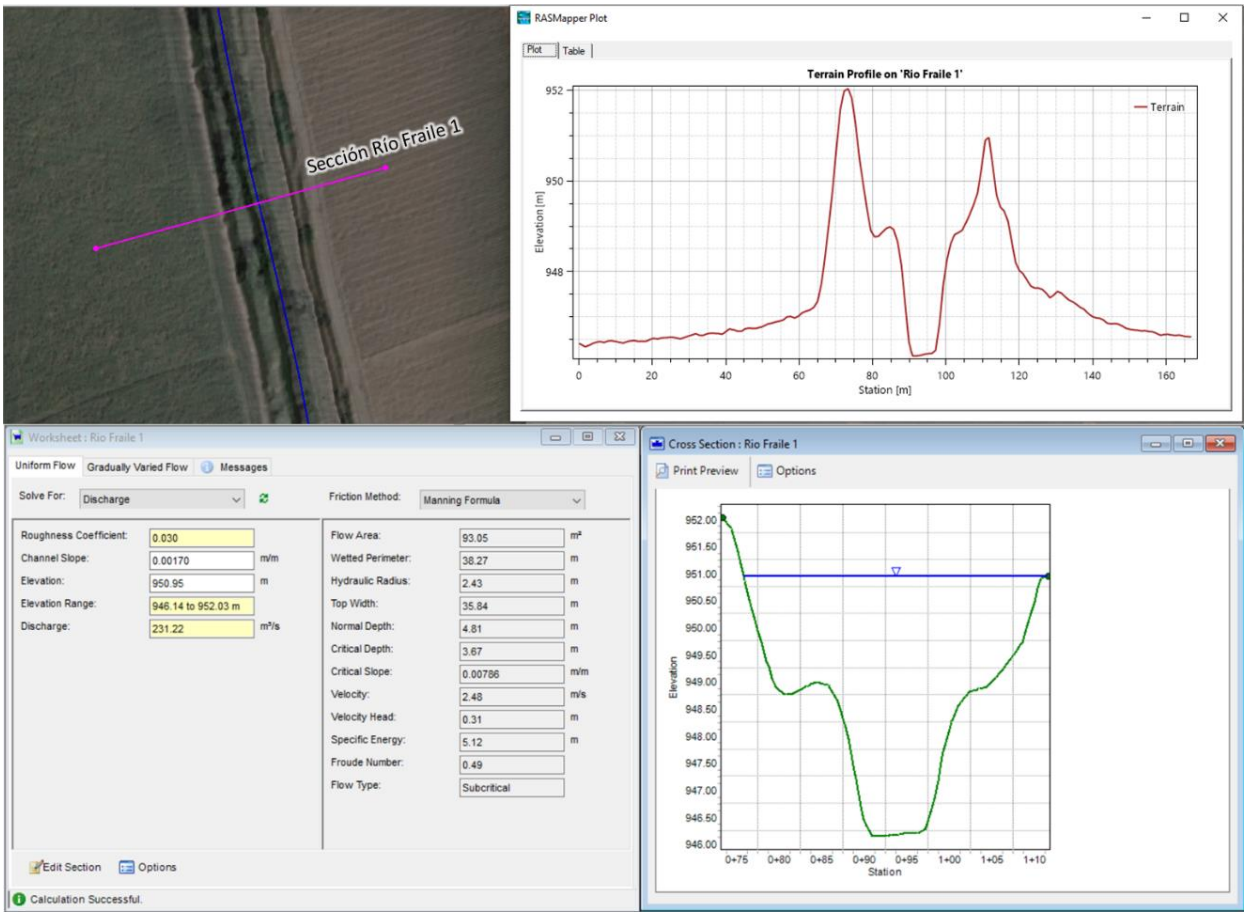


Figura 215. Localización, sección transversal y resultados río Fraile 1.
Fuente: elaboración propia

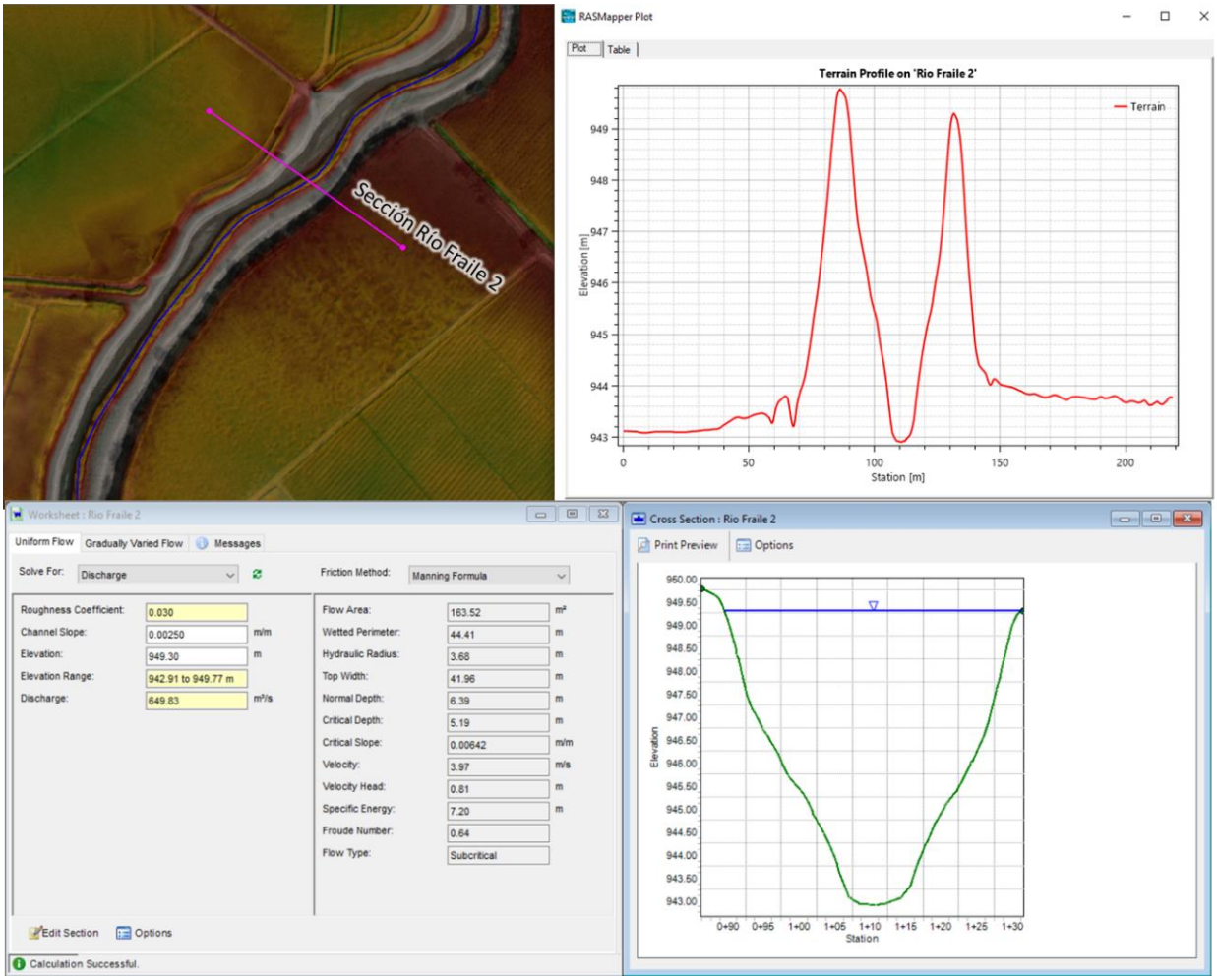


Figura 216. Localización, sección transversal y resultados río Fraile 2.
Fuente: elaboración propia

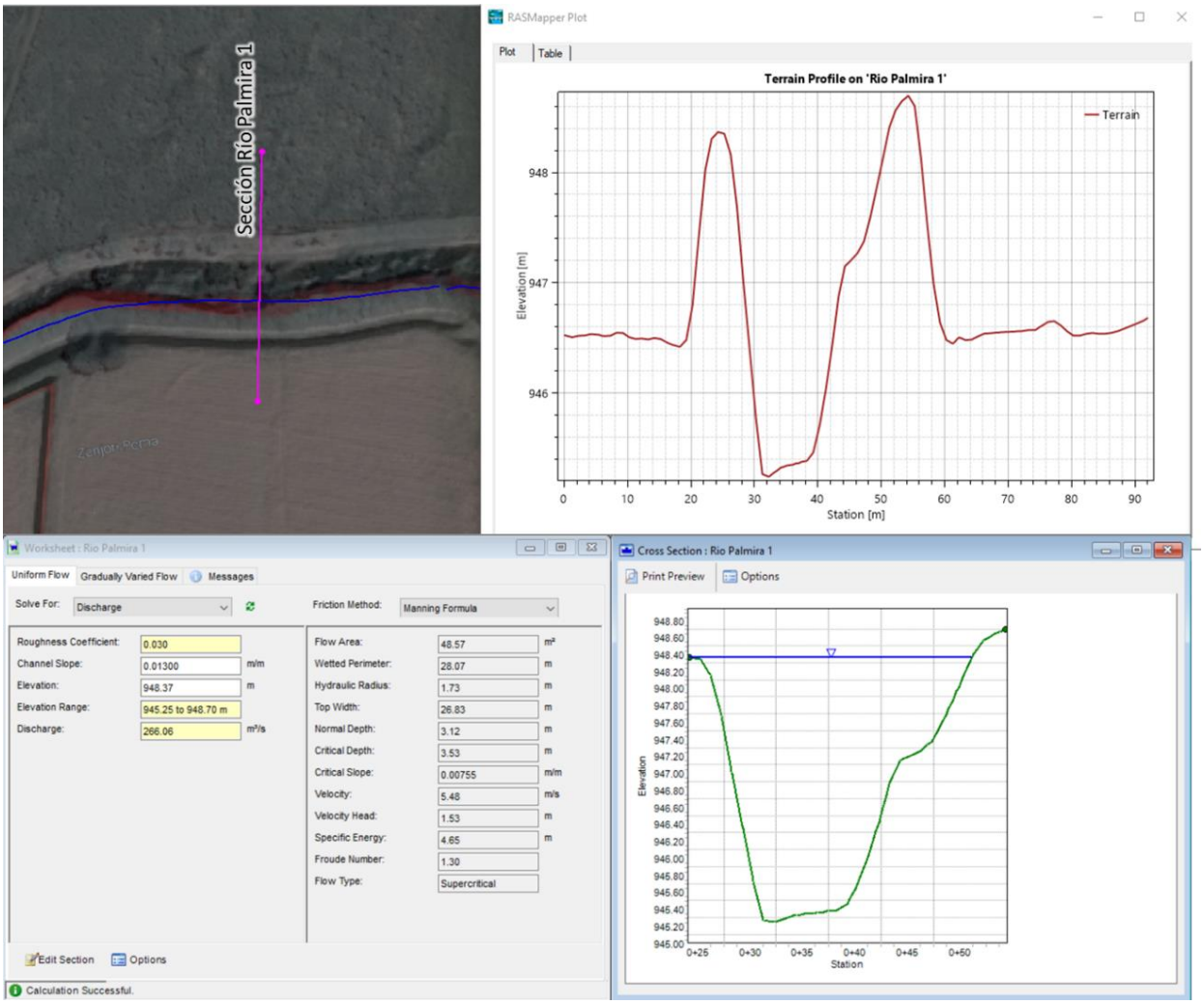


Figura 217. Localización, sección transversal y resultados río Palmira 1.
Fuente: elaboración propia

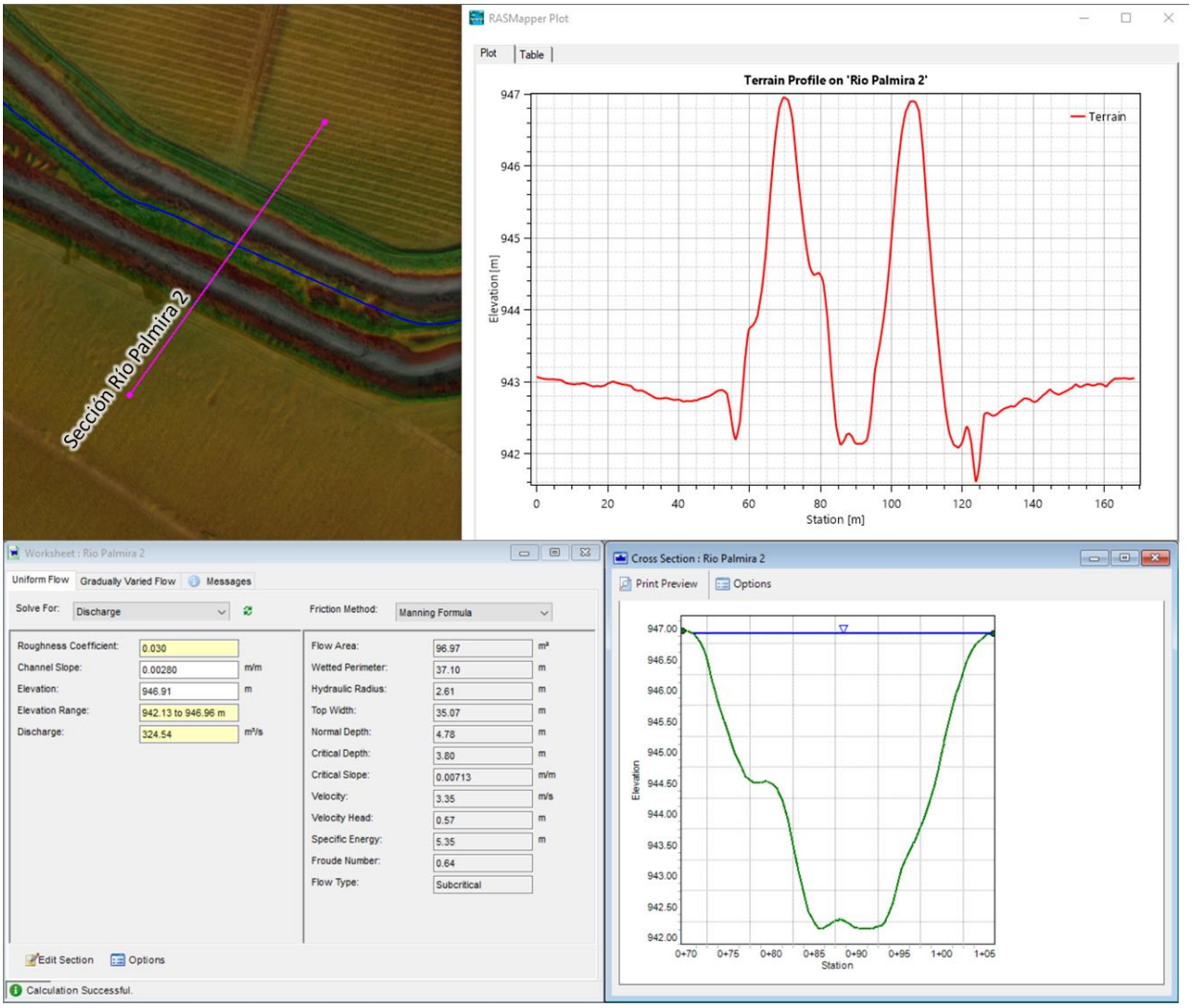


Figura 218. Localización, sección transversal y resultados río Palmira 2.
Fuente: elaboración propia

En la Tabla 76 se relacionan las principales características hidráulicas de las secciones transversales trazadas sobre los ríos Amaime, Nima, Guachal, Bolo, Aguaclara, Frayle y Palmira. Así mismo, se presenta la capacidad hidráulica de la sección del río evaluada junto a los caudales calculados en la Tabla 57, Tabla 58, Tabla 62, Tabla 64 y Tabla 74 del estudio hidrológico, evidenciando así que dichas secciones conformadas con los jarillones pueden contener las crecientes con caudales asociados a los de periodos de 100 años, lo cual indica que los desbordamientos generados en los sectores de municipio asociados a los ríos Amaime, Guachal, Bolo, Frayle y Palmira, posiblemente, son producto del represamiento y reflujo del río Cauca convirtiendo en estas zonas en embalses con poca capacidad.

Con el fin de conocer con mayor certeza la dinámica fluvial, la capacidad hidráulica y el comportamiento de los jarillones en los diferentes tramos de los ríos en estudio, se requiere construir un modelo hidráulico bidimensional cuyo insumo, entre otros, sea la topografía y

batimetría actualizada de los cauces de los ríos Fraile, Bolo, Guachal, Palmira, Amaime y Cauca, así como de cada una de las estructuras de mitigación.

Tabla 76. Principales características hidráulicas de las secciones transversales en estudio

Drenaje	Pendiente (m/m)	Elevación máxima del agua (msnm)	Caudal /capacidad hidráulica (m^3/s)	Periodo de retorno 100 años	Área de flujo (m^2)	Perímetro Mojado (m)	Profundidad Normal (m)
Río Amaime 1	0,00240	943,45	462,47		220,34	151,21	4,82
Río Amaime 2	0,001	941,83	256.27	211,4	195,21	170,98	5,00
Río Amaime 3	0,0012	1019,50	34,37		43,91	78,69	1,61
Río Nima 1	0,033	1128,3	902,62	363,3	93,57	46,53	3,50
Río Nima 2	0,020	1109	155,69		36,70	42,98	1,45
Río Nima 3	0,0070	1022	341,74	387	71,23	31,57	4,87
Río Guachal 1	0,00250	948,82	562,44		162,68	54,45	6,34
Río Guachal 2	0,00250	947,74	937,88	119,5	224,45	56,54	6,99
Río Guachal 3	0,00210	945,77	389		128,17	45,77	6,11
Río Guachal 4	0,00200	944,62	463,11		148,51	49,08	6,92
Río Bolo 1	0,00150	950,25	371,27	198,2	141,86	49,14	5,44
Río Bolo 2	0,00300	948,64	346,84		105,80	43,97	5,24
Río Aguaclara 1	0,028	1055,30	554,41	121,3	61,21	29,58	3,22
Río Aguaclara 2	0,018	1046,97	80,13		20,03	23,68	1,68
Río Fraile 1	0,00170	950,95	231,22	87,3	93,05	38,27	4,61
Río Fraile 2	0,00250	949,30	649,83		163,52	44,41	6,39
Río Palmira 1	0,00130	948,37	266,06	34,3	48,57	28,07	3,12
Río Palmira 2	0,00280	946,91	324,54		96,97	37,10	4,78

Fuente: elaboración propia

6 ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR INUNDACIÓN ÁREA RURAL ESCALA 1:25000

6.1 Zonificación de amenaza por inundación a partir de susceptibilidad a inundación por geomorfología, drenajes e historicidad

De conformidad con lo establecido en la normatividad aplicable vigente (Decreto 1807 de 2014) para determinar las condiciones de amenaza por inundación en suelos urbanos, de expansión urbana y rural, los estudios básicos a escala 1:25.000 deberán emplear, como mínimo, análisis de tipo histórico y geomorfológico; de esta forma, en razón de la escala de trabajo, la evaluación y zonificación de la amenaza por inundación para la zona rural del municipio de Palmira, se desarrolla metodológicamente a partir del análisis e integración de la información disponible de los drenajes existentes (ríos principales y zanjones), la utilización de los polígonos reconstruidos de los espejos de agua asociados a registros históricos de inundaciones y de las áreas inundadas en el corredor del río Cauca durante los diferentes eventos de precipitación (información tomada del portal avanzado de datos geográficos de la CVC – GEOCVC), cruzados a través de herramientas del Sistema de Información Geográfica – SIG, con la susceptibilidad de inundación por resultante del análisis de las subunidades geomorfológicas, unidades geológicas superficiales y la morfodinámica fluvial, siendo estos los insumos que aportan mayor objetividad bajo seguridad técnica más precisa, siempre buscando un acercamiento a la condición real del municipio.

A continuación se presentan los niveles de amenaza por inundación obtenidos de la susceptibilidad a inundación por geomorfología, historicidad y presencia de drenajes en la zona de estudio (Tabla 77).

Tabla 77. Categorías de nivel de amenaza por inundación según historicidad, presencia de drenajes y susceptibilidad a inundación por geomorfología

Nivel amenaza	Descripción	
Alta	Susceptibilidad de inundación por geomorfología Historicidad	Alta Espejos de agua
	Drenajes	Presencia
Media	Susceptibilidad de inundación por geomorfología Historicidad	Media Sin espejos de agua
Baja	Susceptibilidad de inundación por geomorfología Historicidad	Baja Sin espejos de agua

Fuente: elaboración propia

El mapa de zonificación de la amenaza por inundación para la zona rural del municipio de Palmira a escala 1:25.000, obtenido del análisis de la susceptibilidad de inundación por geomorfología, la historicidad y los drenajes existentes, se presenta en la Figura 219.

Teniendo en cuenta que según el Decreto 1807 de 2014 los análisis para estudios básicos de amenaza de inundación se realizan en función de la magnitud de la amenaza, su intensidad, consecuencias y la disponibilidad de información, y considerando que, a la fecha no se cuenta con estudios hidráulicos para determinar la magnitud e intensidad del fenómeno, de conformidad con lo establecido por el (Servicio Geológico Colombiano, 2017) se empleará el mapa de susceptibilidad como un producto final de amenaza por inundación.

Amenaza Alta

Corresponde a: áreas que presentan geoformas asociadas a procesos activos, recientes, a los canales de movilidad de los cauces y las llanuras o planicies de inundación; representan procesos natura- les, fluviales (lagos, canales, barras, terrazas, etc.), antrópicos, denudacionales y estructurales cercanos a cuerpos de agua.

Asimismo, se encuentran polígonos reconstruidos de los espejos de agua asociados a registros históricos de inundaciones y de las áreas inundadas en el corredor del río Cauca y tributarios durante los diferentes eventos de precipitación.

Amenaza Media

En estos sectores se ubican las geoformas subrecientes asociadas a procesos intermitentes fluviales lentos, con tres ambientes morfogenéticos: antrópico (A), fluvial (F) y glacial (G).

En el ambiente antrópico (A) se identifican áreas donde se encuentran jarillones (Allj) dispuestos de manera paralela a algunos de los cauces de los ríos principales, que pueden ser sobrepasados por el agua ocasionalmente, dependiendo de la intensidad de las lluvias y de las crecientes de las corrientes hídricas.

En el ambiente fluvial (F) se identifican todas las geoformas relacionadas con los abanicos aluviales.

En el ambiente glaciar (G), se asocian superficies de planas a inclinadas por donde circulan corrientes hídricas que generalmente son alimentadas por las lagunas glaciares (Glg) y que en épocas invernales pueden llegar a inundar estas superficies.

La amenaza media se encuentra asociada a terrenos llanos cruzados por ríos aluviales, los cuales por génesis son desbordables para caudales de baja recurrencia. Dichas áreas se encuentran relacionadas con desbordamientos generados en estos sectores del municipio, posiblemente producto del represamiento, remanso y contraflujo del río Cauca.

Amenaza Baja

En esta categoría se localizan las geoformas antiguas (terrazas, abanicos, cerros, etc.), geoformas asociadas a procesos fluviales abandonados y de origen estructural y denudacional alejados de los cuerpos de agua (distancia y altura).

La geoforma a la que se hace referencia esta amenaza corresponde a pedimentos de acumulación (Dpa) que se encuentran localizados en la margen izquierda del río Amaime y en el piedemonte de la cordillera Central. Esta corresponde a una geoforma de origen morfogenético denudacional (D); caracterizada por presentar relieve tipo montículo, de laderas suavemente inclinadas, cuyo origen está relacionado con la acumulación de material fino procedente del desgaste y por procesos de erosión intensa de los basaltos de la Formación Amaime.

Los pedimentos de acumulación (Dpa), corresponden a una geoforma de origen morfogenético diferente a las geoformas fluviales predominantes en el sector; abanicos aluviales (Faa), abanicos coalescentes (Fac) y terrazas de acumulación (Fta), pero que comparten una morfología de relieve similar, con un origen muy diferente a la base o piedemonte de la cordillera Central.

De acuerdo con lo anterior las zonas que presentan Amenaza Alta por inundación corresponden a los drenajes y áreas aledañas a los cauces principales de los ríos Cauca, Bolo, Fraile, Guachal, Palmira, Nima y Amaime, entre otras corrientes de agua que discurren por el municipio (zanjones). Así mismo, la zonificación de Amenaza Alta se observa en sectores de los corregimientos Aguaclara, Bolo La Italia, Amaime, Coronado, La Herradura, Bolo – Alisal, Juanchito, Caucaseco, La Dolores, Palmaseca, Matapalo, La Torre, Guayabal y La Acequia.

De dicha zonificación se identifica que, la amenaza media se encuentra asociada a terrenos llanos cruzados por ríos aluviales, los cuales por génesis son desbordables para caudales de baja recurrencia. Por su parte, dichas áreas se encuentran relacionadas a desbordamientos generados en estos sectores del municipio, posiblemente producto del represamiento, remanso y contraflujo del río Cauca.

Los nuevos desarrollos proyectados en área rural del municipio de Palmira deberán regirse y estar supeditados a la escala y estudios determinados en el Decreto 1807 de 2014.

Con el fin de conocer con mayor certeza la dinámica fluvial, la capacidad hidráulica y el comportamiento de los jarillones en los diferentes tramos de los ríos en estudio, se requiere construir un modelo hidráulico bidimensional cuyo insumo, entre otros, sea la topografía y batimetría actualizada de los cauces de los ríos, así como de cada una de las estructuras de mitigación.

La presente zonificación de amenaza por inundación del área rural del municipio de Palmira a escala 1:25.000 no cuenta con el detalle suficiente para identificar en la zona urbana las áreas inundables de acuerdo con la normatividad aplicable vigente, razón por la cual, se deberán tener

en cuenta los resultados obtenidos en el documento de zonificación de amenaza por inundación en las áreas urbana y de expansión urbana del municipio, elaborado en el marco del Convenio Interadministrativo MP968 de 2021.

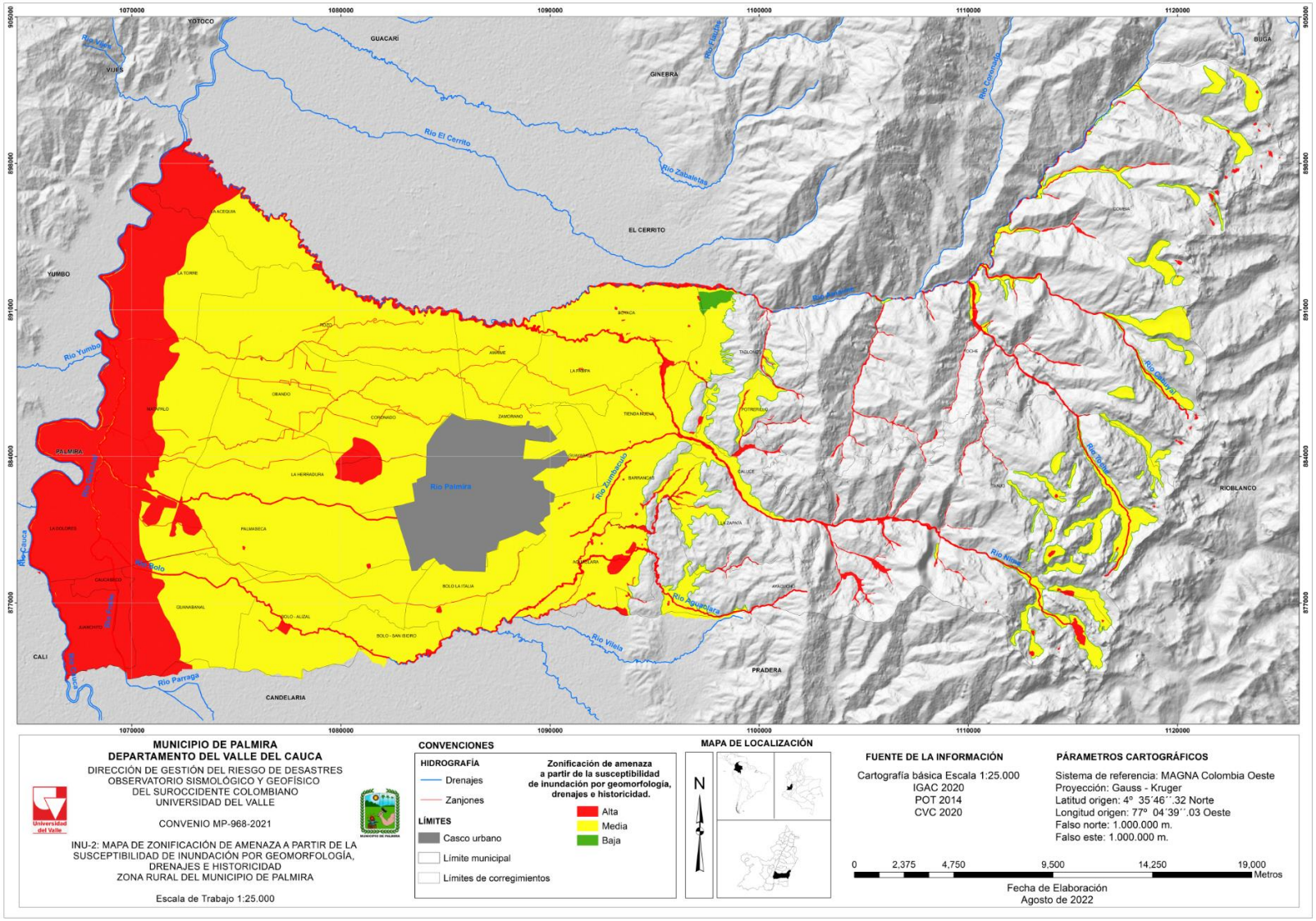


Figura 219. Zonificación de amenaza por inundación área rural municipio de Palmira obtenida a partir de la susceptibilidad de inundación por geomorfología, drenajes e historicidad.
Fuente: elaboración propia

6.2 Nivel de amenaza por inundación corredor río Cauca

De acuerdo con los términos de referencia, la zonificación de amenaza por inundación por desbordamientos del río Cauca no está incluida en el presente estudio, considerando que la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC ya cuenta con resultados (ver Figura 220 y Figura 221) del proyecto Corredor de Conservación y Uso Sostenible del Río Cauca, donde se evalúa la existencia de diques y otras obras de mitigación asociadas a dicha corriente de agua para los escenarios de los periodo de retorno de 30 y 100 años con el modelo SOBEK, insumos que fueron remitidos a la Dirección de Gestión del Riesgo de Desastres - DGRD del municipio de Palmira mediante radicado CVC 0611-966812021 del 07 de marzo de 2022.

No obstante lo anterior, es importe señalar que, dada la magnitud e importancia del río Cauca en la dinámica fluvial del departamento y un gran sector del país, es de gran relevancia para el presente estudio tener en cuenta los resultados de zonificación de amenaza por inundación asociados a dicha corriente de agua, obtenidos por la CVC.

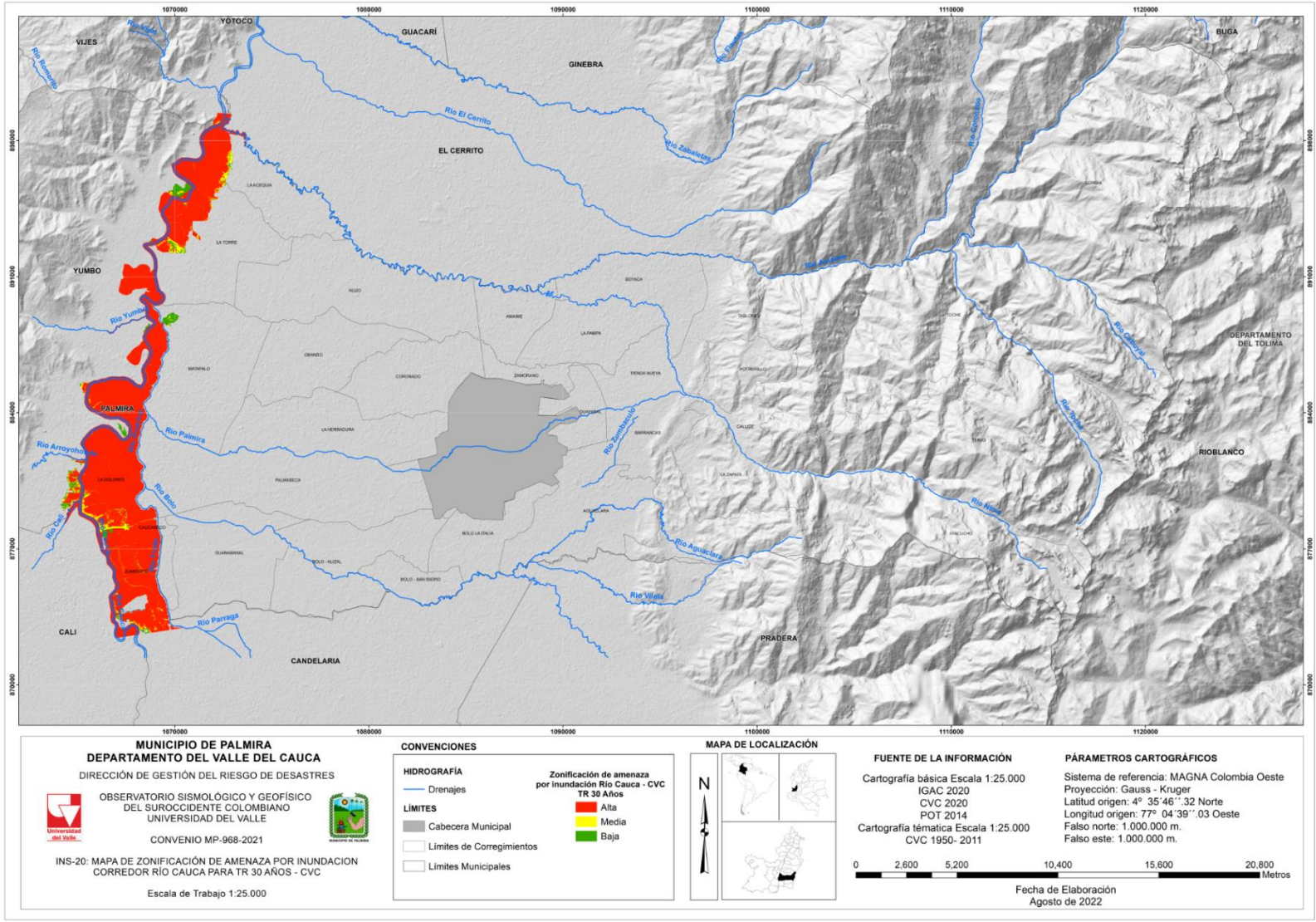


Figura 220. Zonificación de amenaza por inundación corredor río Cauca para TR 30 años
Fuente: (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, 2018), entregado a la DGRD mediante radicado CVC 0611-966812021 de 2022.
Fuente: elaboración propia

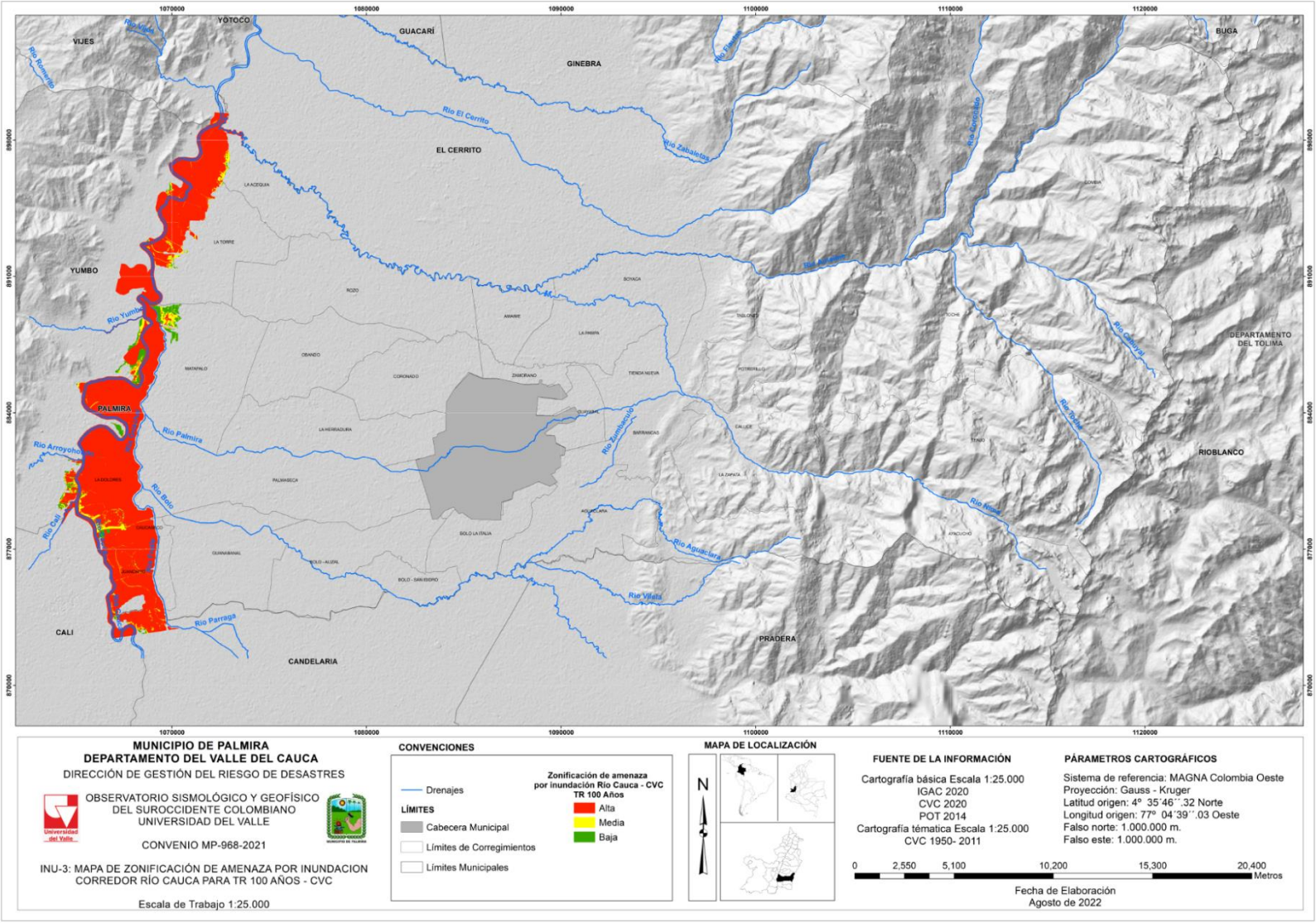


Figura 221. Zonificación de amenaza por inundación corredor río Cauca para TR 100 años
Fuente: (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, 2018), entregado a la DGRD mediante radicado CVC 0611-966812021 de 2022.
Fuente: elaboración propia

6.3 Áreas con amenaza mitigada

Considerando que en la zona baja del municipio de Palmira donde tributan los ríos Guachal, Palmira y Amaime hacia el río Cauca, existen estructuras de mitigación (jarillones) en ambas márgenes, asimismo, se cuenta con información espacial de inundaciones históricas en el corredor río Cauca obtenidas del portal avanzado de datos geográficos de la CVC – GEOCVC y con la zonificación producto del estudio Corredor de Conservación y Uso Sostenible del Río Cauca, suministrada por la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC a la Dirección de Gestión del Riesgo de Desastres - DGRD del municipio de Palmira mediante radicado CVC 0611-966812021 del 07 de marzo de 2022, a partir del procesamiento de dichos insumos mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica – SIG se obtuvieron las áreas con amenaza mitigada a inundación (ver Figura 222).

Estas áreas con amenaza mitigada debido a que cuentan con jarillones corresponderían a sectores con “riesgo residual”, debido a que si bien, cuentan con estructuras hidráulicas para protección, todavía existe un nivel de riesgo que persiste después de la implementación de medidas de mitigación o de seguridad, no obstante, considerando el alcance del presente documento asociado a la zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento, el cual no contempla la evaluación de vulnerabilidad y riesgo, dichas áreas podrían identificarse como de “amenaza residual”.

En la Figura 223 se presentan las áreas con amenaza por inundación que cuentan con estructuras hidráulicas para mitigar el riesgo por dicho fenómeno, sin conocerse los caudales, periodos de retorno, características hidráulicas y morfodinámicas (pendiente, rugosidad de Manning, entre otras) bajo los cuales fueron construidos. Está área se ubica posterior a la zonificación de amenaza por inundación del corredor del río Cauca, mitigando parcialmente los corregimientos de Guanabanal, Juanchito, Caucaseco, La Dolores, Palmaseca, Matapalo, La Torre y La Acequia, donde se encuentran jarillones en las márgenes de los ríos y zanjones que discurren por estas zonas.

Con el fin de conocer con mayor certeza la dinámica fluvial, la capacidad hidráulica y el comportamiento de los jarillones en los diferentes tramos de los ríos en estudio teniendo en cuenta que estos son modificados con frecuencia y en muchas ocasiones sin criterio técnico, se requiere construir un modelo hidráulico bidimensional cuyo insumo, entre otros, sea la topografía y batimetría actualizada de los cauces de los ríos, así como de cada una de las estructuras de mitigación.

Con el fin de evitar posibles afectaciones en las áreas aledañas a los cauces debido al rompimiento o falla de jarillones, en las zonas que han sido adecuadas con estas obras de mitigación, se debe mantener el monitoreo continuo del estado dichas estructuras, así como su mantenimiento periódico.

Estas áreas que cuentan con estructuras hidráulicas de mitigación (jarillones) que pueden ser sobrepasadas por niveles de agua de las crecientes, presentar fallas o rompimiento que generan inundaciones, por lo cual, dichos sectores se encuentran en amenaza alta.

De acuerdo con lo anterior, y teniendo en cuenta lo señalado en la zonificación de amenazas por inundaciones del río Cauca en su valle alto y planteamiento de opciones de protección, los nuevos enfoques indican que el establecimiento de estructuras hidráulicas deben considerar toda la cuenca como unidad básica para la gestión del riesgo por inundaciones, donde se busca recuperar la capacidad de retención de agua, ubicando los diques marginales de protección lo suficientemente distanciados del cauce principal para permitir la laminación de las crecientes en la planicie de inundación adyacente, zonas de amortiguación y humedales conectados al río, entre otros. De esta forma, los diques marginales deben ubicarse suficientemente distanciados del cauce principal para permitir que la planicie adyacente o llanura aluvial cumpla con sus funciones naturales (laminación de los caudales pico de las crecientes, soporte básico de flora y fauna, recarga de acuíferos subterráneos, etc.) (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - Universidad del Valle, 2014).

En este sentido, debe existir una efectiva armonía entre la condición natural y las medidas estructurales que se planteen en procura de devolverle al sistema fluvial parte del espacio que le pertenece, para permitirle laminar de forma más natural las crecientes, disminuyendo así los caudales y los niveles máximos, obteniendo como resultado una reducción de los niveles de amenaza, y, por ende, mitigando los riesgos por inundaciones.

En el numeral 5.7 del presente documento se realizó el chequeo de capacidad hidráulica y el caudal máximo transportado en los sectores evaluados de los ríos Amaime, Guachal, Bolo, Frayle y Palmira, evidenciando así que dichas secciones conformadas con jarillones pueden contener hasta las crecientes asociadas a los periodos de retorno de 100 años (ver Tabla 76), tramos de ríos que se encuentran representadas en la Figura 200, lo cual indica que los desbordamientos generados en estos sectores del municipio, posiblemente son producto del represamiento, remanso y contraflujo del río Cauca.

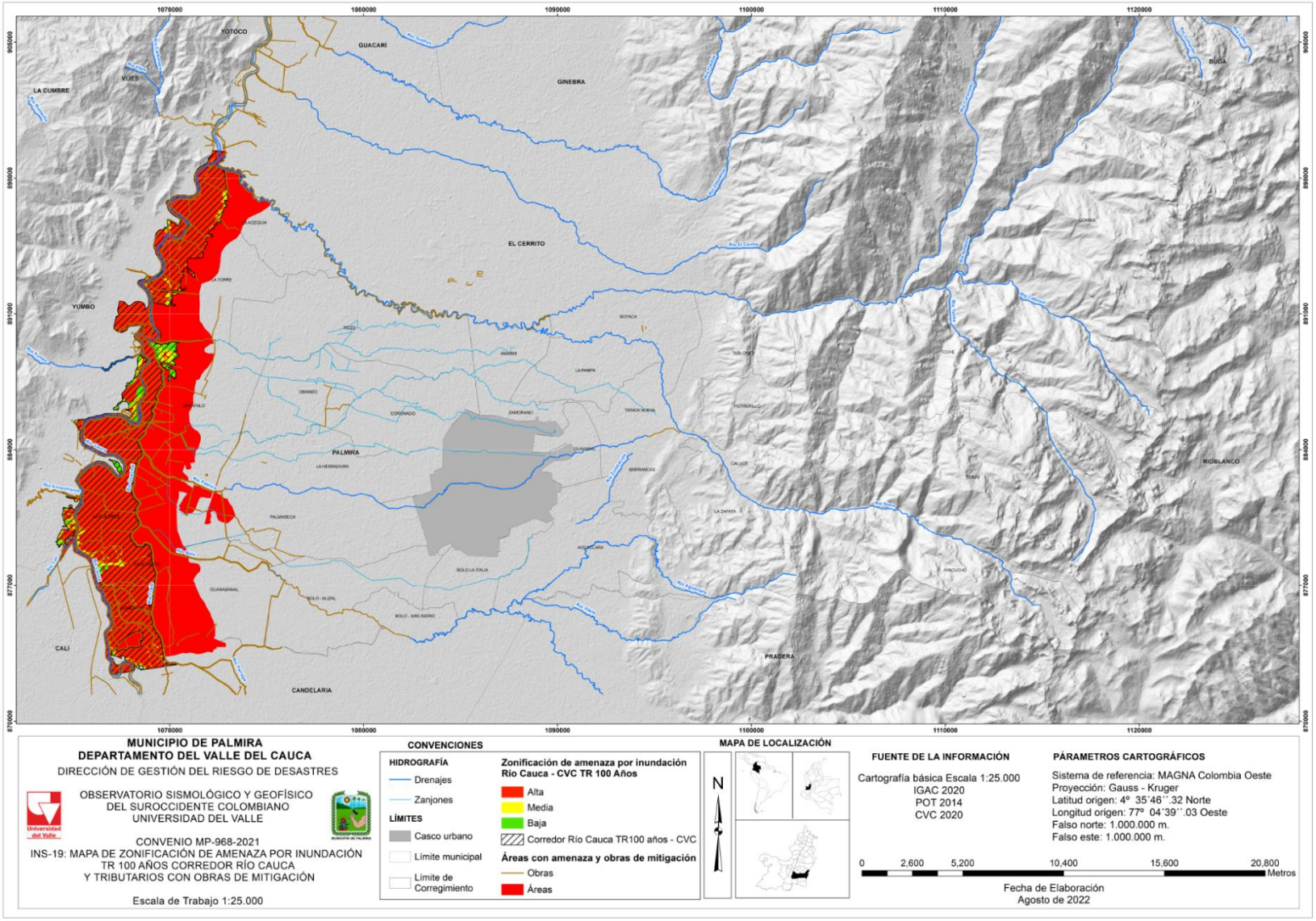


Figura 222. Zonificación de amenaza por inundación TR 100 años corredor río Cauca y tributarios con obras de mitigación
Fuente: elaboración propia

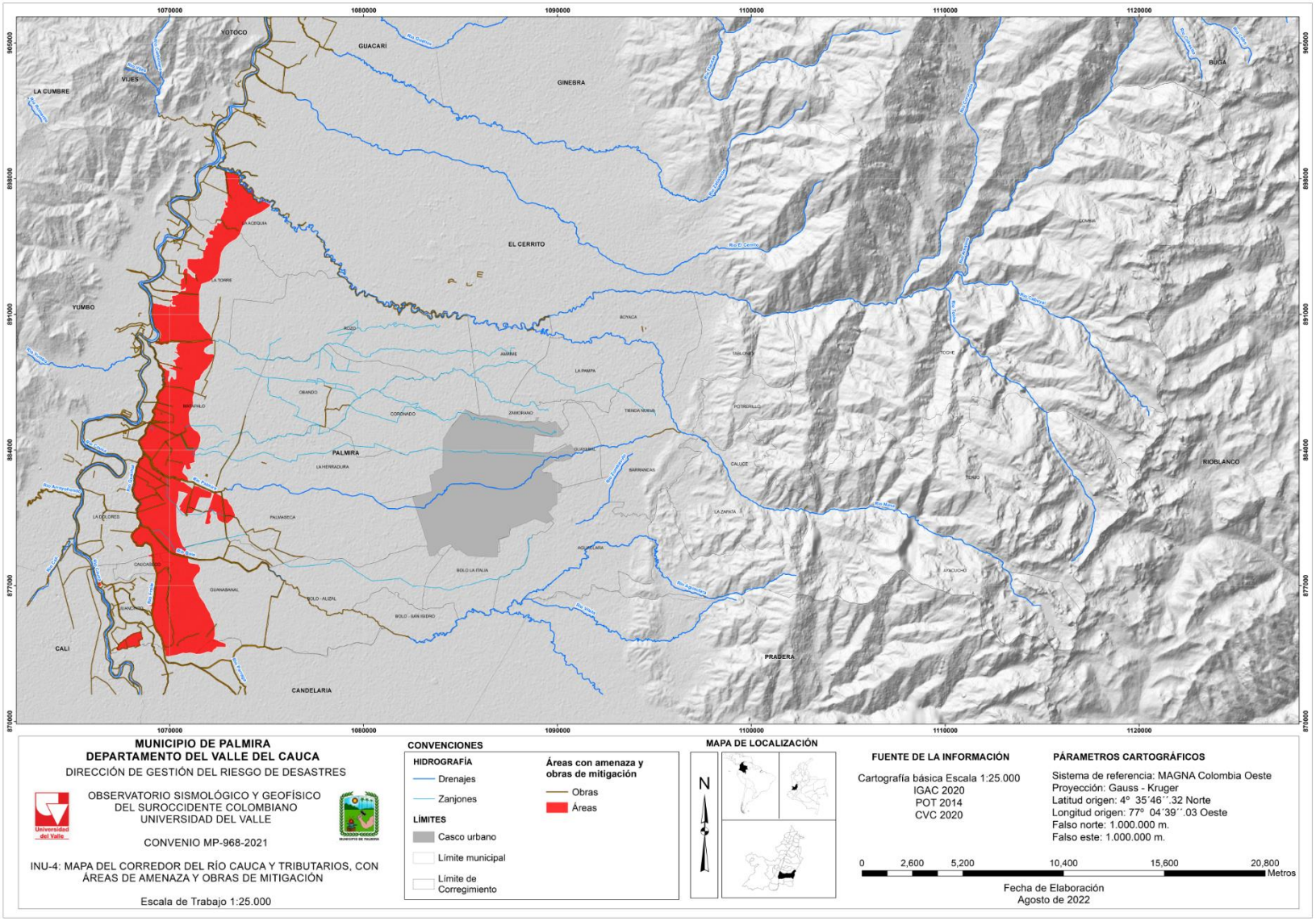


Figura 223. Corredor río Cauca y tributarios con obras de mitigación
Fuente: (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, 2018), entregado a la DGRD mediante radicado CVC 0611-966812021 de 2022
Fuente: elaboración propia

6.4 Zonificación de amenaza por inundación consolidada

Considerando que el área rural del municipio de Palmira cuenta con la zonificación de amenaza por inundación por desbordamiento del río Cauca elaborada por la CVC (remitida a la DGRD de Palmira mediante radicado CVC 0611-966812021 de 2022), adicional a las áreas con amenaza mitigada mediante obras hidráulicas (jarillones) localizadas en las márgenes de los tramos finales de los ríos principales del municipio, y con base en los resultados obtenidos en este estudio del nivel de amenaza por inundación a partir de la susceptibilidad de inundación por geomorfología, los drenajes existentes y la historicidad (escala 1:25.000), resulta necesario establecer una zonificación consolidada o integrada que represente la amenaza por inundación en la zona rural del municipio de Palmira para las condiciones descritas en el presente estudio. Por ello, a continuación se presenta el mapa de zonificación de amenaza por inundación consolidada para el área rural del municipio de Palmira a escala 1:25.000 (ver Figura 224).

Cabe resaltar que las áreas con amenaza mitigada mediante obras hidráulicas cuentan con jarillones en las márgenes de los tramos finales de los ríos y zanjones, de los cuales no se conocen los caudales, periodos de retorno, características hidráulicas y morfodinámicas (pendiente, rugosidad de Manning, entre otras) bajo los cuales fueron construidos y que pueden ser sobrepasadas por niveles de agua de las crecientes, presentar fallas o rompimiento que generan inundaciones, por lo cual, dichos sectores se encuentran en amenaza alta.

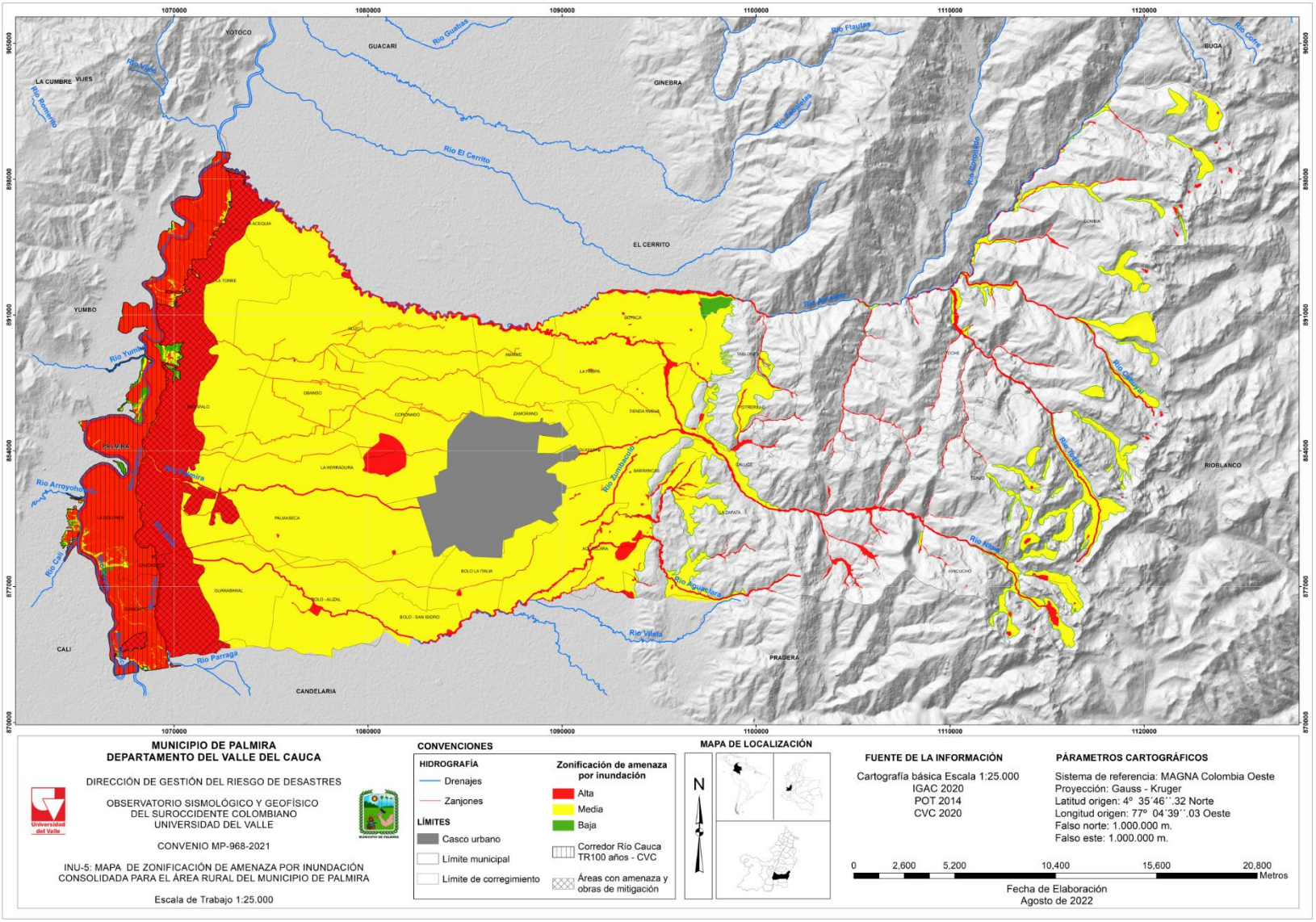


Figura 224. Zonificación de amenaza por inundación consolidada para el área rural del municipio de Palmira a escala 1:25000
Fuente: elaboración propia

7 CONCLUSIONES

En el presente estudio se realizó la zonificación de la amenaza por inundación en la zona rural del municipio de Palmira a escala 1:25.000 considerando principalmente la susceptibilidad a inundación por geomorfología, el modelo digital de elevaciones del terreno, el registro de eventos históricos y los drenajes existentes definiéndose tres zonas de amenaza alta, media y baja. De acuerdo con el decreto 1807 de 2014 (compilado en el decreto 1077 de 2015) estos resultados pueden ser utilizados en el proceso de revisión y ajuste de los contenidos de mediano y largo plazo del Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Palmira.

La metodología del Índice Topográfico de Humedad (ITH) aplicada en el estudio no arrojó resultados apropiados y concluyentes, acorde con el registro de eventos históricos, que permitan determinar con un buen grado de aproximación las condiciones de amenaza por inundación en la zona rural del municipio de Palmira. Esto por cuanto el ITH presenta valores que no corresponden con las condiciones topográficas del terreno; es decir, al analizar las geoformas del terreno más cercanas a los ríos y de menor altitud como orillas y planicies de inundación, el índice toma valores muy bajos, indicando una amenaza baja correspondiente a una menor posibilidad de almacenamiento de agua; igualmente se encontró que en sectores cercanos y de condiciones topográficas similares el ITH presenta valores muy diferentes.

Se realizó la zonificación de la susceptibilidad a inundación por geomorfología teniendo en cuenta la edad relativa de las geoformas, su distribución espacial y la distancia de las unidades geomorfológicas respecto a los cauces. La susceptibilidad baja corresponde a áreas donde se localizan geoformas antiguas (terrazas, abanicos, cerros, etc), geoformas asociadas a procesos fluviales abandonados y de origen estructural y denudacional alejados de los cuerpos de agua (distancia y altura); la susceptibilidad media corresponde a áreas donde se ubican geoformas subrecientes asociadas a procesos intermitentes fluviales lentos; y la susceptibilidad alta corresponde principalmente a geoformas asociadas a procesos activos, recientes, al canal de movilidad de los cauces activos y las llanuras de inundación. Se encontró que en el área de estudio predominan zonas de susceptibilidad media, seguida por zonas de susceptibilidad baja y en menor porcentaje de susceptibilidad alta.

Teniendo en cuenta que según el Decreto 1807 de 2014 los análisis para estudios básicos de amenaza de inundación se realizan en función de la magnitud de la amenaza, su intensidad, consecuencias y la disponibilidad de información, y considerando que, a la fecha no se cuenta con estudios hidráulicos para determinar la magnitud e intensidad del fenómeno, de conformidad con lo establecido por el Servicio Geológico Colombiano se empleará el mapa de susceptibilidad a inundación por geomorfología como un producto final de zonificación de amenaza por inundación.

El proceso de recolección de registro de eventos históricos de inundaciones, incluyendo los relatos de las comunidades asentadas en la zona de estudio, permitió comprender mejor las causas de las inundaciones en algunos sectores del municipio, como son la falla o rompimiento

de los diques y las obras que se han realizado sobre los zanjones sin supervisión técnica alguna. Debido a esto, la información de historicidad se utilizó principalmente como herramienta para la validación de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por inundación realizadas.

De las modelaciones de capacidad hidráulica obtenidas para secciones transversales de los ríos Fraile, Bolo, Guachal, Palmira y Amaime, se concluye que dichas secciones conformadas con los jarillones pueden contener las crecientes con caudales asociados a los de periodos de 100 años, lo cual indica que, los desbordamientos generados en estos sectores de municipio, posiblemente, son producto del represamiento y retraflujo del río Cauca convirtiendo en estas zonas en embalses con poca capacidad.

De acuerdo con la zonificación de amenaza por inundación para el área rural del municipio de Palmira, producto de la integración de la historicidad, los drenajes y la susceptibilidad a inundación por geomorfología, los sectores que presentan nivel de amenaza Alta corresponden a las áreas aledañas de los cauces principales de los ríos Cauca, Bolo, Fraile, Guachal, Palmira, Aguaclara, Nima y Amaime, entre otras corrientes de agua que discurren por el municipio (zanjones). Asimismo, la zonificación de amenaza Alta se observa en sectores de los corregimientos Aguaclara, Bolo La Italia, Amaime, Coronado, La Herradura, Bolo – Alisal, Juanchito, Caucaseco, La Dolores, Palmaseca, Matapalo, La Torre, Guayabal y La Acequia.

Teniendo en cuenta la escala de trabajo del presente estudio, la zonificación de amenaza por inundación del municipio de Palmira desarrollada no incluye la zona urbana, por lo cual, para identificar los sectores inundables en esta área, de acuerdo con la normatividad aplicable vigente, se deberá tener en cuenta los resultados obtenidos en el documento de zonificación de amenaza por inundación en las áreas urbana y de expansión urbana del municipio, elaborado en el marco del Convenio Interadministrativo MP968 de 2021.

Atendiendo lo indicado en los términos de referencia del Convenio Interadministrativo, si bien en el presente estudio no se incluye la zonificación de amenaza por inundación del río Cauca, considerando que la CVC ya cuenta con estudios donde se evalúa la existencia de diques y otras obras de mitigación asociadas a dicha corriente de agua, dada la importancia del río Cauca en la dinámica fluvial del departamento y un gran sector del país, fue de gran relevancia para el presente estudio considerar los resultados de zonificación de amenaza por inundación asociados a dicha corriente de agua, obtenidos por la Corporación y remitidos a la DGRD mediante radicado CVC 0611-966812021 de 2022.

Los sectores o tramos de corrientes de agua que presentan amenaza mitigada a inundación por la presencia de jarillones de los cuales no se conocen los caudales, periodos de retorno, características hidráulicas y morfodinámicas (pendiente, rugosidad de Manning, entre otras) bajo los cuales fueron construidos, se ubican principalmente en los corregimientos de Guanabanal, Juanchito, Caucaseco, La Dolores, Palmaseca, Matapalo, La Torre y La Acequia.

Las áreas que cuentan con estructuras hidráulicas de mitigación (jarillones) podrían ser sobrepasadas por niveles de agua de las crecientes, presentar fallas o rompimiento que generan inundaciones; es por ello que, dichos sectores se encuentran en amenaza alta.

Los mapas de amenaza por inundación se constituyen en conocimiento aplicado para la definición de medidas prospectivas de reducción de riesgo, que al ser adoptados mediante instrumentos normativos se convierten en medidas no estructurales para reducción de amenaza asociado a dicho fenómeno.

8 RECOMENDACIONES

Considerando la escala de trabajo, las áreas identificadas con niveles de amenaza Alta y Media deberán ser objeto de estudios de detalle con el fin de verificar con mayor certeza técnica su probabilidad, ser orientados a determinar la categorización del riesgo y establecer las medidas de mitigación correspondientes, así como las restricciones o condicionamientos para el uso del suelo cuando sea viable, mediante la determinación de normas urbanísticas de acuerdo con la normatividad aplicable, incluido lo determinado en el artículo 13 del Decreto 1807 de 2014.

La autoridad ambiental, en el marco de sus competencias, deberá delimitar las respectivas zonas de ronda hídrica atendiendo lo determinado en el parágrafo del artículo 2.2.3.2.3A.3 del Decreto 1076 de 2015 que recoge lo señalado en el Decreto 2245 de 2017 y en la Resolución 0957 de 2018, actos administrativos que adoptan la “Guía técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia”, junto al despliegue de las respectivas acciones de evaluación, control y seguimiento ambiental de conformidad con el régimen de usos establecido para dichas zonas. Lo anterior bajo el entendido que las manchas de inundación y delimitación de las geoformas son los componentes hidrológico y geomorfológico necesarios para la delimitación de las rondas hídricas, y de acuerdo con la normatividad aplicable, dicho acotamiento se convierte en una medida de prevención de riesgos por inundación.

Con el fin de conocer con mayor certeza la dinámica fluvial y la capacidad hidráulica de los cauces y el comportamiento de los jarillones en los diferentes tramos de los ríos en estudio, se requiere construir un modelo hidráulico bidimensional cuyo insumo, entre otros, sea la topografía y batimetría actualizada de los cauces y las planicies de inundación de los ríos, así como de cada una de las estructuras de mitigación.

Mantener el aislamiento de las zonas de ronda y protección de la construcción de infraestructura, conservando las madreviejas y humedales como el sitio propio de amortiguamiento de las crecientes de los ríos.

Las entidades municipales y ambientales deberán velar por el diseño, construcción y mantenimiento de obras de adecuación y de regulación hídrica; asimismo, deberán contemplar el desarrollo de acciones de educación ambiental para la protección de los cuerpos hídricos de acuerdo con el régimen de usos establecido en la normatividad aplicable.

La comunidad debe propender por participar conjuntamente con las autoridades ambientales y territoriales en la evaluación, control y seguimiento de la minería ilegal de extracción de material de arrastre de los ríos en estudio, que a través de la sobreexplotación acelera los procesos erosivos en las bancas del cauce que pueden llegar a afectar los centros poblados ubicados tanto aguas arriba como aguas abajo de los tramos en explotación. Asimismo, se recomienda desplegar acciones relacionadas con la legalización de las licencias de minería y mayor control sobre los volúmenes máximos de explotación.

En las zonas que han sido adecuadas con la construcción de jarillones y canales de drenaje se debe mantener el monitoreo continuo del estado de las estructuras, así como su mantenimiento periódico y reforzamiento para evitar afectaciones a las zonas aledañas debido al rompimiento o falla de estos.

En los casos donde se requiera la implementación de medidas estructurales de mitigación de amenaza por inundación (sistemas urbanos de drenaje sostenible) se debe garantizar una efectiva armonía con la condición natural de las áreas, en procura de devolverle al sistema fluvial parte del espacio que le pertenece, para permitirle laminar de forma más natural las crecientes, disminuyendo así los caudales y los niveles máximos, obteniendo como resultado una reducción de los niveles de amenaza, y, por ende, mitigando los riesgos por inundaciones.

Se deberá diseñar, implementar y mantener sistemas de alerta temprana ante inundaciones en las corrientes hídricas del área de estudio como una medida no estructural que contribuya a la gestión integral del riesgo por inundaciones.

En los sectores de vocación agrícola, que presentan áreas de captación o derivación sin estructuras de control de niveles y caudales, se sugiere el diseño y construcción de estructuras hidráulicas (bocatomas con compuertas) que regulen de forma adecuada los caudales derivados de las corrientes de agua asociadas, así como el establecimiento de diques de protección contra inundaciones.

En los tramos de los ríos donde se presenten procesos de erosión de orillas se recomienda la evaluación de los procesos morfodinámicos existentes que conduzcan al diseño de obras de protección y estabilización de orillas.

En las cuencas hidrográficas de los ríos, donde actualmente se presentan cambios de uso y cobertura del suelo (deforestación, minería y ganadería extensiva) que conducen a la disminución de la capacidad de la regulación hídrica de la misma, se recomienda la implementación de actividades de educación ambiental, así como acciones de evaluación, control y seguimiento ambiental para la protección y recuperación integral de las cuencas y su funcionalidad.

En los sectores del cauce y zonas colindantes a los drenajes del municipio, donde se identifica una disposición inadecuada de residuos sólidos (basuras) y de construcción y demolición (escombros), se recomienda la implementación de acciones de mantenimiento (dragado) y limpieza de los cauces y llanuras de inundación, así como el desarrollo de actividades de educación ambiental y de evaluación, control y seguimiento ambiental.

Considerando la ocupación en algunas llanura de inundación de los drenajes objeto del presente estudio, se hace necesario la definición de áreas de protección y aislamiento que funcionen como franjas de amortiguamiento de las crecientes y conectores ambientales, junto al despliegue de las respectivas acciones de evaluación, control y seguimiento ambiental y policivo en lo referente

a establecimiento de edificaciones en dichas áreas, equiparables a franjas de protección aferente ambiental.

9 REFERENCIAS

Bentley Institute Press. (2008). *Computer application in hydraulic engineering: Headstad methods.* Connecticut.

Beven K., K. M. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin. *Hydrol Sci Bull* , 43-69.

Chow, V. T. (1994). *Hidrología Aplicada.* Santa Fé de Bogotá: Mc Graw Hill Interamericana S.A.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - Universidad del Valle. (2000). *Caracterización de los Ríos Tributarios del Río Cauca - Tramo Salvagina - La Virginia.* Santiago de Cali.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC - Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. (2014). *Levantamiento semidetallado de suelos a escala 1:25.000 de las cuencas priorizadas por la CVC.* Bogotá D.C.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - Universidad del Valle. (2009). *Modelación Matemática del Sistema Río Cauca - Humedales.* Santiago de Cali.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - Universidad del Valle. (2014). *Zonificación de amenazas por inundaciones del río Cauca en su valle alto y planteamiento de opciones de protección los nuevos enfoques.* Santiago de Cali.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. (2018). *Corredor de Conservación y Uso Sostenible del Río Cauca .* Santiago de Cali.

Deng, Y. W. (2007). DEM resolution dependencies of terrain attributes across a landscape . *Int Journal of Geogr Informat Sci*, 187-213.

Instituto Colombiano de Geología y Minas. (2011). *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia. INGEOMINAS. Bogotá, Colombia. 71 p.* Bogotá D.C.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2016). Especificaciones Técnicas para Cartografía Básica.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2020). Resolución No. 529 05 de junio de 2020 “Por medio de la cual se modifica la Resolución 471 de 2020. “Por medio de la cual se establecen Especificaciones Técnicas Mínimas Para la Generación de Productos de Cartografía Básica Oficial de Colombia”.

Olaya, F. V. (2004). *Hidrología Computacional y Modelos Digitales de Terreno.*

Rodriguez S., E. A., & Gonzalez P., R. A. (2007). Propuesta metodológica para la generación de mapas de inundación y clasificación de zonas de amenaza. Caso de Estudio en la parte baja del río Las Ceibas (Neiva - Huila). *Redalyc*.

Servicio Geológico Colombiano. (2012). *Propuesta metodológica sistemática para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000.* Bogotá D.C.

Servicio Geológico Colombiano. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000.* Bogotá D.C.

U.S. Army Corps of Engineers - Hydrologic Engeneering Center. (2020). *Water Surfaces Profile HEC-HMS, User Manual.* California.

Upegui, J. J., & Gutierrez, A. B. (2010). Estimación de tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales. *Redalyc*.