

**ACTUALIZACIÓN DE LOS ESTUDIOS CONCEPTUALES DEL CONTRATO EAAB-ESP
1-02-25500-0626-2009, INCLUYENDO LA TOPOGRAFÍA DETALLE NECESARIA PARA
EL AJUSTE AL PLAN VIAL ARTERIAL VIGENTE, QUE SIRVAN DE BASE PARA
DEFINIR LAS ALTERNATIVAS TÉCNICAS Y ECONÓMICAS PARA EL DESARROLLO
DE LA CIUDAD LAGOS DE TORCA**

PRODUCTO 4. ESTUDIOS DE HIDROLOGIA

CONCOL CONSULTORES S.A.S – WSP INGENIERIA COLOMBIA S.A.S.

VERSION 10

FIDEICOMISO LAGOS DE TORCA



Bogotá D.C., 20 de abril de 2020

PRODUCTO 4. ESTUDIOS HIDROLOGIA

MODELO HIDROLOGICO E HIDRÁULICO DEL SISTEMA HIDRICO TORCA - GUAYMARAL

CONTROL DE VERSIONES

| Versión | Fecha | Descripción de Modificación | Folios |
|----------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| 00 | 2019-04-26 | Versión inicial – para revisión de interventoría | 96 |
| 01 | 2019-05-23 | Atención de observaciones mediante comunicado H2O-FDLT-0001-IWSP-035 | 141 |
| 02 | 2019-06-16 | Atención a comentarios asesoría de EAAB Atención de observaciones mediante comunicado H2O-FDLT-0001-IWSP-046 | 151 |
| 03 | 2019-07-18 | Atención de observaciones mediante comunicado del FLT con radicado WSP 001532 Atención de observaciones EAAB mediante comunicado S-2019-194383 y comunicado del 15 de julio de 2019 | 225 |
| 04 | 2019-08-01 | Atención a comentarios de Interventoría mediante comunicación H2O-FDLT-0001-IWSP-065 Atención a comentarios asesoría del FLT (23/07/2019) | 233 |
| 05 | 2019-08-22 | Atención a comentarios de Interventoría mediante comunicación H2O-FDLT-0001-IWSP-069 y H2O-FDLT-0001-IWSP-070. | 235 |
| 06 | 2019-09-02 | Atención a comentarios de Interventoría mediante comunicación H2O-FDLT-0001-IWSP-081 | 235 |
| 07 | 2019-09-04 | Atención a comentarios del Fideicomiso Lagos de Torca FLT, correo electrónico del 02/09/2019 | 257 |
| 08 | 2019-09-10 | Atención a comentarios de Interventoría mediante comunicación H2O-FDLT-0001-IWSP-088 | 259 |
| 09 | 2019-09-20 | Atención a comentarios de Interventoría mediante comunicación H2O-FDLT-0001-IWSP-089 y revisión EAAB Reunión 11/09/2019 | 302 |
| 10 | 2020-04-20 | Atención a comentarios de DIE, RTMA de la EAAB | 398 |

FIDEICOMISO LAGOS DE TORCA

| Validado por | Revisado por | Aprobado por |
|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Mildred Jiménez Especialista Consultoría MP. No. 25202-77888 CND | | |
| Fabián Cerón Especialista Consultoría MP. No. 52202-50655 CPN | Rodrigo Antonio Ballén Barragán Coordinador de proyecto Consultoría MP. No. A25232003-799951534 | Danilo Arturo Rodríguez C. Director de proyecto Consultoría MP. No.25202-18211 CND |

Revisión y aprobación Interventoría

| Versión | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fecha | |
| Omar Armando Gaitán Bejarano Especialista Hidráulica – Interventoría MP. No. 25202-097198 CND | Germán Monsalve Sáenz Especialista Hidrología – Interventoría MP. No. 00000-13444 CND |
| Lexia Cecilia Rojas Ojeda Especialista Ambiental – Interventoría MP. No.25238-202093 CND | William Nivaldo Uscátegui Ciendua Director de Interventoría MP. No. 25202-35047 CND |

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------|
| 1 ANTECEDENTES | 19 |
| 2 INTRODUCCION | 21 |
| 3 OBJETIVOS | 27 |
| 3.1 OBJETIVO GENERAL..... | 27 |
| 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 27 |
| 4 DESCRIPCION DE ACTIVIDADES..... | 28 |
| 4.1 ANÁLISIS DE INFORMACIÓN SECUNDARIA..... | 29 |
| 4.2 INFORMACIÓN PRIMARIA..... | 29 |
| 4.3 PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN | 31 |
| 4.3.1 Delimitación de cuencas | 31 |
| 4.3.2 Determinación de usos y coberturas del suelo | 33 |
| 4.3.3 Construcción de mapas de número de curva | 33 |
| 4.3.4 Análisis de datos de precipitación | 34 |
| 4.3.5 Construcción de modelos lluvia-escorrentía | 35 |
| 4.3.6 Determinación de caudales de diseño | 35 |
| 4.3.7 Período de Retorno de diseño | 35 |
| 4.3.8 Modelo hidráulico | 36 |
| 5 ANÁLISIS HIDROLÓGICO | 37 |
| 5.1 ÁREA DE ESTUDIO | 37 |
| 5.1.1 Recopilación y análisis de la información | 37 |
| 5.2 ANÁLISIS ESPACIAL DE TORMENTAS..... | 37 |
| 5.3 ANÁLISIS TEMPORAL DE TORMENTAS..... | 52 |
| 5.4 HIETOGRAMAS DE TORMENTA..... | 60 |
| 5.5 HIETOGRAMAS DE DISEÑO | 62 |
| 5.6 SELECCIÓN DEL PATRÓN DE PRECIPITACIÓN | 66 |
| 5.6.1 Isoyetas con patrón elíptico..... | 77 |
| 5.6.2 Análisis evento Niña 2010-2011 | 83 |
| 5.7 HIDROGRAFÍA | 95 |
| 5.7.1 Generalidades de la cuenca Torca - Guaymaral | 95 |
| 5.7.2 Identificación y descripción de sistemas lénticos y lóticos | 97 |
| 5.8 ANÁLISIS CAUDALES MÁXIMOS | 128 |
| 5.8.1 Metodología | 128 |
| 5.8.2 Estructuración del modelo Hec HMS | 168 |
| 5.8.3 Resultados..... | 176 |

| | | |
|--------|-----------------------------------------------------------------|-----|
| 5.8.4 | Análisis de sensibilidad del modelo HEC-HMS | 227 |
| 5.8.5 | Calibración del Modelo | 231 |
| 6 | ESTUDIOS HIDRÁULICOS | 235 |
| 6.1 | DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES | 235 |
| 6.1.1 | Selección del modelo de simulación | 235 |
| 6.1.2 | Modelo digital de terreno -MDT) | 235 |
| 6.1.3 | Rugosidades..... | 235 |
| 6.1.4 | Condiciones de borde..... | 236 |
| 6.1.5 | Limitaciones del modelo | 236 |
| 6.1.6 | Esquema de la modelación | 237 |
| 6.2 | RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN..... | 240 |
| 6.2.1 | Información de campo | 240 |
| 6.2.2 | Información secundaria | 243 |
| 6.2.3 | Humedal Torca-Guaymaral..... | 244 |
| 6.3 | MODELO HIDRÁULICO HEC-RAS 2D SISTEMA TORCA-GUAYMARAL..... | 245 |
| 6.3.1 | Generalidades | 245 |
| 6.3.2 | Objetivo del modelo..... | 245 |
| 6.3.3 | Localización general del modelo..... | 245 |
| 6.3.4 | Descripción del sistema Torca Guaymaral | 246 |
| 6.3.5 | Insumos generales para la modelación | 246 |
| 6.3.6 | Estructuras existentes | 246 |
| 6.3.7 | Condiciones de borde..... | 250 |
| 6.3.8 | Construcción del modelo..... | 263 |
| 6.3.9 | Parámetros de simulación..... | 264 |
| 6.3.10 | Escenarios de simulación..... | 270 |
| 6.3.11 | Generación de resultados | 271 |
| 6.3.12 | Presentación y análisis de resultados..... | 278 |
| 6.3.13 | Consideraciones ambientales | 326 |
| 6.3.14 | Análisis de amenaza por rotura del Jarillón del Río Bogotá..... | 328 |
| 6.3.15 | Análisis de estructuras | 339 |
| 7 | MODELAMIENTO DE CALIDAD DE AGUA..... | 375 |
| 7.1 | INTRODUCCION..... | 375 |
| 7.2 | METODOLOGIA | 375 |
| 7.3 | PÁRAMETROS..... | 376 |
| 7.3.1 | Análisis de calidad de agua..... | 376 |

| | | |
|-------|---------------------------------------|-----|
| 7.3.2 | Parámetros hidrológicos..... | 376 |
| 7.3.3 | Parámetros hidráulicos..... | 378 |
| 7.4 | CONCLUSIONES | 378 |
| 7.4.1 | Calidad de agua | 378 |
| 7.4.2 | Modelamiento de calidad de agua | 379 |
| 7.5 | RECOMENDACIONES..... | 379 |
| 8 | CONCLUSIONES..... | 381 |
| 9 | RECOMENDACIONES | 385 |
| 10 | BIBLIOGRAFÍA | 390 |

LISTA DE FIGURAS

| | Pág. |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Figura 1 Detalle de condiciones de actuales de cauces y cuerpos de agua del sistema hídrico Torca - Guaymaral..... | 30 |
| Figura 2 Delimitación de la cuenca de drenaje de alcantarillado pluvial de Torca | 32 |
| Figura 3 Localización estaciones Pluviográficas | 38 |
| Figura 4 Distribución espacial 2016 D=1 hora..... | 43 |
| Figura 5 Distribución espacial 2017 D=3 horas..... | 44 |
| Figura 6 Curvas PADF duración de tormenta 1 hora | 46 |
| Figura 7 Curvas PADF duración de tormenta 3 horas | 47 |
| Figura 8 Curvas PADF duración de tormenta 6 horas | 47 |
| Figura 9 Curvas PADF duración de tormenta 9 horas | 48 |
| Figura 10 Curvas PADF duración de tormenta 12 horas | 48 |
| Figura 11 Curvas PADF duración de tormenta 15 horas | 49 |
| Figura 12 Hietograma aguacero del 06/11/2013 – Estación La Conejera | 53 |
| Figura 13 Hietograma aguacero del 25/11/2016 – Estación La Conejera | 53 |
| Figura 14 Hietograma aguacero del 06/11/2013 – Estación Serrezuela | 54 |
| Figura 15 Hietograma aguacero del 16/04/2014 – Estación Usaquén Santa Ana | 54 |
| Figura 16 Hietograma aguacero del 07/03/2017 – Estación Serrezuela | 55 |
| Figura 17 Hietograma aguacero del 03/03/2014 – Estación La Caro | 55 |
| Figura 18 Hietograma aguacero del 27/01/2015 – Estación Cerro Suba | 56 |
| Figura 19 Hietograma aguacero del 01/10/2013 – Estación Conejera | 56 |
| Figura 20 Hietograma aguacero del 30/05/2016 – Estación Usaquén Santa Ana | 57 |
| Figura 21 Hietograma aguacero del 07/03/2017 – Estación Usaquén Santa Ana | 57 |
| Figura 22 Distribución temporal de tormentas – Duración 3 horas..... | 58 |
| Figura 23 Distribución temporal de tormentas – Duración 6 horas..... | 58 |
| Figura 24 Distribución temporal de tormentas – Duración 9 horas..... | 59 |
| Figura 25 Comparación Distribución temporal | 59 |
| Figura 26 Hietograma de tormenta de 3 horas..... | 60 |
| Figura 27 Hietograma de tormenta de 6 horas..... | 61 |
| Figura 28 Hietograma de tormenta de 9 horas..... | 61 |
| Figura 29 Hietogramas duración 3 horas – TR 3 años..... | 62 |
| Figura 30 Hietogramas duración 3 horas – TR 10 años..... | 63 |
| Figura 31 Hietogramas duración 3 horas – TR 100 años | 63 |
| Figura 32 Distribución temporal del hietograma de diseño | 64 |
| Figura 33 Hietograma de diseño San Juan 5 | 65 |
| Figura 34 Hietograma cuenca Canal Torca Occidental..... | 65 |
| Figura 35 Distribución espacial de Tormentas en el área de estudio | 68 |
| Figura 36 Patrón de precipitación desplazado 2004 | 69 |
| Figura 37 Patrón de precipitación desplazado 2005 | 69 |
| Figura 38 Patrón de precipitación desplazado 2006 | 70 |
| Figura 39 Patrón de precipitación desplazado 2007 | 70 |
| Figura 40 Patrón de precipitación desplazado 2008 | 71 |
| Figura 41 Patrón de precipitación desplazado 2009 | 71 |
| Figura 42 Patrón de precipitación desplazado 2010 | 72 |
| Figura 43 Patrón de precipitación desplazado 2011 | 72 |
| Figura 44 Patrón de precipitación desplazado 2012 | 73 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 45 Patrón de precipitación desplazado 2013 | 73 |
| Figura 46 Patrón de precipitación desplazado 2014 | 74 |
| Figura 47 Patrón de precipitación desplazado 2015 | 74 |
| Figura 48 Patrón de precipitación desplazado 2016 | 75 |
| Figura 49 Patrón de precipitación desplazado 2017 | 75 |
| Figura 50 Desplazamiento patrón elíptico relación a/b=2.0 | 81 |
| Figura 51 Desplazamiento patrón elíptico relación a/b=2.5 | 81 |
| Figura 52 Patrón elíptico escenario f | 82 |
| Figura 53 Patrón de distribución año 2013 WSP..... | 83 |
| Figura 54 Precipitación diaria estaciones analizadas..... | 84 |
| Figura 55 Resumen gráfico estación Usaquén Santa Ana | 85 |
| Figura 56 Resumen gráfico estación Cerro Suba..... | 86 |
| Figura 57 Resumen gráfico estación Serrezuela..... | 87 |
| Figura 58 Resumen gráfico estación La Conejera | 88 |
| Figura 59 Resumen gráfico estación La Caro | 89 |
| Figura 60 Precipitación mensual..... | 89 |
| Figura 61 Boxplot precipitación diaria estación Usaquén Santa Ana | 90 |
| Figura 62 Boxplot precipitación diaria estación Cerro Suba | 90 |
| Figura 63 Boxplot precipitación diaria estación Serrezuela | 91 |
| Figura 64 Boxplot precipitación diaria estación La Conejera | 91 |
| Figura 65 Boxplot precipitación diaria estación La Caro | 92 |
| Figura 66 Boxplot precipitación mensual estación Usaquén Santa Ana | 93 |
| Figura 67 Boxplot precipitación mensual estación Cerro Suba..... | 93 |
| Figura 68 Boxplot precipitación mensual estación Serrezuela..... | 94 |
| Figura 69 Boxplot precipitación mensual estación La Conejera | 94 |
| Figura 70 Boxplot precipitación mensual estación La Caro | 95 |
| Figura 71 Detalle de áreas de aporte del sistema hídrico Torca-Guaymaral | 98 |
| Figura 72 Detalle de áreas con espejo de agua en el humedal Torca-Guaymaral, sector Torca..... | 99 |
| Figura 73 Detalle de áreas de aporte al Humedal Torca-Guaymaral | 100 |
| Figura 74 Detalle de áreas de espejo de agua del humedal Torca-Guaymaral, sector Guaymaral | 101 |
| Figura 75 Delimitación de cuencas de la zona de estudio | 102 |
| Figura 76 Detalles del cauce de la quebrada Aguas Calientes, sector bajo..... | 103 |
| Figura 77 Detalles del cauce de la quebrada Aguas Calientes, sector medio. | 103 |
| Figura 78. Delimitación de la cuenca de la quebrada Aguas Calientes..... | 104 |
| Figura 79. Perfil longitudinal quebrada Aguas Calientes..... | 105 |
| Figura 80 Detalles del cauce de la quebrada Patiño, sector bajo..... | 106 |
| Figura 81 Delimitación de la cuenca de la quebrada Patiño | 107 |
| Figura 82 Perfil longitudinal quebrada Patiño | 108 |
| Figura 83 Detalle del cauce actual de la quebrada San Juan..... | 108 |
| Figura 84 Delimitación de la cuenca de la quebrada San Juan..... | 109 |
| Figura 85 Perfil longitudinal quebrada San Juan..... | 110 |
| Figura 86 Delimitación de la cuenca de la quebrada Las Pilas..... | 111 |
| Figura 87 Perfil longitudinal quebrada Las Pilas | 112 |
| Figura 88 Detalle del cauce actual de la quebrada La Floresta (sector Bima) | 113 |
| Figura 89 Delimitación de la cuenca de la quebrada La Floresta | 114 |
| Figura 90 Perfil longitudinal quebrada La Floresta | 115 |
| Figura 91 Detalle del cauce actual de la quebrada Cañiza, sector K7 – Vía Férrea | 116 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 92 Delimitación de la cuenca de la quebrada Cañiza | 117 |
| Figura 93 Perfil longitudinal quebrada Cañiza | 118 |
| Figura 94 Detalle del cauce actual de la quebrada Nóvita | 119 |
| Figura 95 Delimitación de la cuenca de la quebrada Nóvita | 119 |
| Figura 96 Perfil longitudinal quebrada Nóvita | 120 |
| Figura 97 Delimitación de la cuenca de la quebrada Torca | 121 |
| Figura 98 Perfil longitudinal quebrada Torca | 122 |
| Figura 99 Detalle del cauce actual del Río Bogotá, sector de la desembocadura del sistema Torca-Guaymaral | 123 |
| Figura 100 Delimitación de la cuenca de la quebrada Tibabita | 124 |
| Figura 101 Perfil longitudinal quebrada Tibabita | 125 |
| Figura 102 Detalle del cauce actual del Canal Torca, antes de la desembocadura en el Humedal Torca Guaymaral (izq.) y aguas abajo de la Autopista Norte (der.) | 126 |
| Figura 103 Cuenca de drenaje del canal Torca..... | 127 |
| Figura 104 Detalle del cauce actual del Canal Guaymaral, sector medio (izq.) y sector bajo (der.) | 128 |
| Figura 105 Representación del Modelo Digital de Terreno (MDT) | 130 |
| Figura 106 Pendiente del cauce principal..... | 133 |
| Figura 107 Hidrograma Unitario Adimensional del U.S.S.C.S. | 144 |
| Figura 108 Unidades de suelo cuencas hidrográficas..... | 147 |
| Figura 109 Tipo de suelo hidrológico | 148 |
| Figura 110 Coberturas del suelo condiciones actuales..... | 152 |
| Figura 111 Mapa de coberturas y usos proyectados para el Borde Norte, Decreto 088 de 2017..... | 153 |
| Figura 112 Distribución de valores de precipitación antecedente para eventos seleccionados..... | 159 |
| Figura 113 Número de Curva condiciones actuales por Cuencas..... | 165 |
| Figura 114 Número de Curva condiciones futuras por Cuencas | 166 |
| Figura 115 Conceptualización general de drenaje del sistema Torca-Guaymaral..... | 171 |
| Figura 116 Distribución esquemática del modelo hidrológico de Hec-HMS..... | 175 |
| Figura 117 Esquema espacial de las cuencas y humedales | 177 |
| Figura 118 Hidrograma cuenca Quebrada Aguascalientes Subcuenca AGC-7M1 | 178 |
| Figura 119 Hidrograma cuenca Quebrada Aguascalientes Subcuenca AGC-7M2..... | 179 |
| Figura 120 Hidrograma cuenca Quebrada Aguascalientes Subcuenca AGUAS CALIENTES 3..... | 179 |
| Figura 121 Hidrograma cuenca Quebrada Aguascalientes Subcuenca AGUAS CALIENTES 4..... | 180 |
| Figura 122 Hidrograma cuenca Canal Torca Subcuenca CANAL TORCA 1 | 180 |
| Figura 123 Hidrograma cuenca Canal Torca Subcuenca CANAL TORCA 2 | 181 |
| Figura 124 Hidrograma cuenca Canal Torca Subcuenca CANAL TORCA 3 | 181 |
| Figura 125 Hidrograma cuenca Quebrada La Floresta Subcuenca FLO1 | 182 |
| Figura 126 Hidrograma cuenca Quebrada La Floresta Subcuenca FLORESTA 3 | 182 |
| Figura 127 Hidrograma cuenca Quebrada La Floresta Subcuenca FLORESTA 4 | 183 |
| Figura 128 Hidrograma cuenca Quebrada La Floresta Subcuenca FLO 7M1 | 183 |
| Figura 129 Hidrograma cuenca Guaymaral Subcuenca GUAY2..... | 184 |
| Figura 130 Hidrograma cuenca Guaymaral Subcuenca GUAY3..... | 184 |
| Figura 131 Hidrograma cuenca Humedal Guaymaral Subcuenca HG2 | 185 |
| Figura 132 Hidrograma cuenca Humedal Guaymaral Subcuenca HG3 | 185 |
| Figura 133 Hidrograma cuenca Humedal Guaymaral Subcuenca HGUAY 1-2 | 186 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 134 Hidrograma cuenca Humedal Guaymaral Subcuenca HGUAY 1-1 | 186 |
| Figura 135 Hidrograma cuenca Quebrada N3vita Subcuenca NOVITA 2 | 187 |
| Figura 136 Hidrograma cuenca Quebrada N3vita Subcuenca NOVITA 3 | 187 |
| Figura 137 Hidrograma cuenca Quebrada N3vita Subcuenca NOV 7M1 | 188 |
| Figura 138 Hidrograma cuenca Occidente Subcuenca OCC3-1 | 188 |
| Figura 139 Hidrograma cuenca Occidente Subcuenca OCCIDENTE 1-1 | 189 |
| Figura 140 Hidrograma cuenca Occidente Subcuenca OCC 2..... | 189 |
| Figura 141 Hidrograma cuenca Occidente Subcuenca OCC 3..... | 190 |
| Figura 142 Hidrograma cuenca Pati3o Subcuenca PATINO 3 | 190 |
| Figura 143 Hidrograma cuenca Pati3o Subcuenca PATINO 4 | 191 |
| Figura 144 Hidrograma cuenca Pati3o Subcuenca PAT 7M1..... | 191 |
| Figura 145 Hidrograma cuenca Pati3o Subcuenca PAT 7M2..... | 192 |
| Figura 146 Hidrograma cuenca Quebrada Las Pilas Subcuenca PILAS 2..... | 192 |
| Figura 147 Hidrograma cuenca Quebrada Las Pilas Subcuenca PILAS 3..... | 193 |
| Figura 148 Hidrograma cuenca Quebrada Las Pilas Subcuenca PILAS 4..... | 193 |
| Figura 149 Hidrograma cuenca Quebrada Las Pilas Subcuenca PIL 7M1 | 194 |
| Figura 150 Hidrograma cuenca Quebrada San Juan Subcuenca SAN JUAN 3 | 194 |
| Figura 151 Hidrograma cuenca Quebrada San Juan Subcuenca SAN JUAN 4 | 195 |
| Figura 152 Hidrograma cuenca Quebrada San Juan Subcuenca SAN JUAN 5 | 195 |
| Figura 153 Hidrograma cuenca Quebrada San Juan Subcuenca SAN 7M1 | 196 |
| Figura 154 Hidrograma cuenca Quebrada San Juan Subcuenca SAN 7M2..... | 196 |
| Figura 155 Hidrograma cuenca Quebrada Tibabita Subcuenca TBT1 | 197 |
| Figura 156 Hidrograma cuenca Quebrada Tibabita Subcuenca TBT 7M1 | 197 |
| Figura 157 Hidrograma cuenca Quebrada Tibabita Subcuenca TBT 7M2 | 198 |
| Figura 158 Hidrograma cuenca Quebrada Torca Subcuenca TOR1 | 198 |
| Figura 159 Hidrograma cuenca Quebrada Torca Subcuenca TORCA4..... | 199 |
| Figura 160 Hidrograma cuenca Quebrada Aguascalientes Subcuenca AGC-7M1 | 201 |
| Figura 161 Hidrograma cuenca Quebrada Aguascalientes Subcuenca AGC-7M2..... | 202 |
| Figura 162 Hidrograma cuenca Quebrada Aguascalientes Subcuenca AGUAS CALIENTES 3..... | 202 |
| Figura 163 Hidrograma cuenca Quebrada Aguascalientes Subcuenca AGUAS CALIENTES 4..... | 203 |
| Figura 164 Hidrograma cuenca Canal Torca Subcuenca CANAL TORCA 1 | 203 |
| Figura 165 Hidrograma cuenca Canal Torca Subcuenca CANAL TORCA 2 | 204 |
| Figura 166 Hidrograma cuenca Canal Torca Subcuenca CANAL TORCA 3 | 204 |
| Figura 167 Hidrograma cuenca Quebrada La Floresta Subcuenca FLO1 | 205 |
| Figura 168 Hidrograma cuenca Quebrada La Floresta Subcuenca FLORESTA 3 | 205 |
| Figura 169 Hidrograma cuenca Quebrada La Floresta Subcuenca FLORESTA 4 | 206 |
| Figura 170 Hidrograma cuenca Quebrada La Floresta Subcuenca FLO 7M1 | 206 |
| Figura 171 Hidrograma cuenca Guaymaral Subcuenca GUAY2..... | 207 |
| Figura 172 Hidrograma cuenca Guaymaral Subcuenca GUAY3..... | 207 |
| Figura 173 Hidrograma cuenca Humedal Guaymaral Subcuenca HG2 | 208 |
| Figura 174 Hidrograma cuenca Humedal Guaymaral Subcuenca HG3 | 208 |
| Figura 175 Hidrograma cuenca Humedal Guaymaral Subcuenca HGUAY 1-2 | 209 |
| Figura 176 Hidrograma cuenca Humedal Guaymaral Subcuenca HGUAY 1-1 | 209 |
| Figura 177 Hidrograma cuenca Quebrada N3vita Subcuenca NOVITA 2 | 210 |
| Figura 178 Hidrograma cuenca Quebrada N3vita Subcuenca NOVITA 3..... | 210 |
| Figura 179 Hidrograma cuenca Quebrada N3vita Subcuenca NOV 7M1 | 211 |
| Figura 180 Hidrograma cuenca Occidente Subcuenca OCC3-1 | 211 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 181 Hidrograma cuenca Occidente Subcuenca OCCIDENTE 1-1 | 212 |
| Figura 182 Hidrograma cuenca Occidente Subcuenca OCC 2..... | 212 |
| Figura 183 Hidrograma cuenca Occidente Subcuenca OCC 3..... | 213 |
| Figura 184 Hidrograma cuenca Patiño Subcuenca PATINO 3 | 213 |
| Figura 185 Hidrograma cuenca Patiño Subcuenca PATINO 4 | 214 |
| Figura 186 Hidrograma cuenca Patiño Subcuenca PAT 7M1..... | 214 |
| Figura 187 Hidrograma cuenca Patiño Subcuenca PAT 7M2..... | 215 |
| Figura 188 Hidrograma cuenca Quebrada Las Pilas Subcuenca PILAS 2..... | 215 |
| Figura 189 Hidrograma cuenca Quebrada Las Pilas Subcuenca PILAS 3..... | 216 |
| Figura 190 Hidrograma cuenca Quebrada Las Pilas Subcuenca PILAS 4..... | 216 |
| Figura 191 Hidrograma cuenca Quebrada Las Pilas Subcuenca PIL 7M1 | 217 |
| Figura 192 Hidrograma cuenca Quebrada San Juan Subcuenca SAN JUAN 3 | 217 |
| Figura 193 Hidrograma cuenca Quebrada San Juan Subcuenca SAN JUAN 4 | 218 |
| Figura 194 Hidrograma cuenca Quebrada San Juan Subcuenca SAN JUAN 5 | 218 |
| Figura 195 Hidrograma cuenca Quebrada San Juan Subcuenca SAN 7M1 | 219 |
| Figura 196 Hidrograma cuenca Quebrada San Juan Subcuenca SAN 7M2..... | 219 |
| Figura 197 Hidrograma cuenca Quebrada Tibabita Subcuenca TBT1 | 220 |
| Figura 198 Hidrograma cuenca Quebrada Tibabita Subcuenca TBT 7M1 | 220 |
| Figura 199 Hidrograma cuenca Quebrada Tibabita Subcuenca TBT 7M2..... | 221 |
| Figura 200 Hidrograma cuenca Quebrada Torca Subcuenca TORCA1..... | 221 |
| Figura 201 Hidrograma cuenca Quebrada Torca Subcuenca TORCA4..... | 222 |
| Figura 202. Comparación de caudales con estudios del Consorcio Borde Norte | 225 |
| Figura 203. Hidrogramas de creciente en las subcuencas del sistema Torca-Guaymaral (Tr 100 años Escenario Futuro) | 226 |
| Figura 204. Hidrogramas TR100 Futuro cuenca Canal torca 1 | 228 |
| Figura 205. Hidrogramas TR100 Futuro cuenca Occidente 1_1 | 228 |
| Figura 206. Hidrogramas TR100 Futuro cuenca San Juan 5..... | 229 |
| Figura 207. Hidrogramas TR100 Futuro cuenca Occ_3..... | 230 |
| Figura 208. Hidrogramas TR100 Futuro cuenca Canal Torca 3 | 230 |
| Figura 209. Visualización del MDT en Ras Mapper de HecRas 2d | 240 |
| Figura 210. Levantamiento batimétrico de cauces y humedales del sistema hídrico..... | 242 |
| Figura 211. Detalle del levantamiento topográfico de detalles del sistema hídrico | 242 |
| Figura 212. Detalle del levantamiento lodos en fondo de cauces y humedales | 243 |
| Figura 213. Detalle del sitio de desembocadura del Canal Guaymaral al Río Bogotá..... | 250 |
| Figura 214. Detalle de la sección actual y proyectada del río Bogotá, sitio de desembocadura del canal Guaymaral | 251 |
| Figura 215. Registros históricos de niveles y caudales en el río Bogotá, estación La Balsa | 251 |
| Figura 216. Áreas Homogéneas – Condición Actual..... | 252 |
| Figura 217. Distribución de la rugosidad de Manning – Condición Actual..... | 256 |
| Figura 218. Áreas Homogéneas – Condición Futura | 257 |
| Figura 219. Distribución de la rugosidad de Manning – Condición Futura | 258 |
| Figura 220 Planta y Perfil modelo de terreno humedal Guaymaral | 259 |
| Figura 221. Planta y Perfil modelo de terreno humedal Torca..... | 261 |
| Figura 222. Conformación de nivel de embalsamiento previo en los humedales | 262 |
| Figura 223. Comparación de niveles mediante dos procedimientos de análisis del embalse inicial en el humedal | 263 |
| Figura 224 Localización de BC Lines en el modelo de simulación hidráulico | 269 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 225 Representación general del modelo de inundaciones del Sistema Hídrico Torca Guaymaral – Tr100 Condición Futura. | 272 |
| Figura 226 Representación del modelo de inundaciones del Sistema Hídrico Torca Guaymaral – Sector Sur Tr100 Condición Futura. | 273 |
| Figura 227 Representación del modelo de inundaciones del Sistema Hídrico Torca Guaymaral – Sector Central Tr100 Condición Futura. | 274 |
| Figura 228 Representación del modelo de inundaciones del Sistema Hídrico Torca Guaymaral – Sector Norte Tr100 Condición Futura. | 275 |
| Figura 229 Representación general de la elevación del nivel del agua del Sistema Hídrico Torca Guaymaral – Tr 100, Condición Actual..... | 276 |
| Figura 230 Representación general de la elevación del nivel del agua del Sistema Hídrico Torca Guaymaral – Tr100 Condición Futura | 277 |
| Figura 231 Localización de sitios de obtención de hidrogramas – Escenario Futuro Tr100. | 278 |
| Figura 232 Perfil longitudinal de inundaciones del Sistema Torca – Guaymaral | 280 |
| Figura 233 Perfil hidráulico longitudinal | 285 |
| Figura 234 Modelo de terreno inicio humedal Guaymaral | 286 |
| Figura 235 Trazado para toma de perfil hidráulico en el humedal Torca | 287 |
| Figura 236 Perfil hidráulico longitudinal del Humedal Torca | 288 |
| Figura 237 Hidrogramas de caudal de afluentes al Humedal Torca – Tr100 años | 289 |
| Figura 238 Tránsito de hidrograma en el Humedal Torca – Tr100 años | 289 |
| Figura 239 Tránsito de hidrograma en el Humedal Guaymaral – Tr100 años | 290 |
| Figura 240 Hidrograma de entrada y salida en el Humedal Torca | 291 |
| Figura 241 Curva de almacenamiento del Humedal Torca..... | 292 |
| Figura 242 Hidrograma de caudales en el Humedal Guaymaral | 293 |
| Figura 243 Curva de almacenamiento del Humedal Guaymaral | 294 |
| Figura 244 Hidrograma de caudales en la desembocadura al Río Bogotá | 295 |
| Figura 245. Profundidad Inundación Humedales | 296 |
| Figura 246. Curva de regresión para volúmenes de almacenamiento y períodos de retorno en el humedal Torca-Guaymaral..... | 298 |
| Figura 247. Superposición de áreas de ZMPA del Humedal y las áreas de desborde | 299 |
| Figura 248. Mapa de variación de elevaciones dentro del Humedal Torca-Guaymaral... | 300 |
| Figura 249 Áreas preseleccionadas para reconfiguración de humedales | 301 |
| Figura 250 Coberturas de suelo en el Humedal, sector Torca..... | 302 |
| Figura 251 Coberturas de suelo en el Humedal, sector Guaymaral (San Viator) | 303 |
| Figura 252 Coberturas de suelo en el Humedal, Guaymaral Sector 3 | 303 |
| Figura 253 Coberturas de suelo en el Humedal, sector Guaymaral (Autopista Norte) | 304 |
| Figura 254 Coberturas de suelo en el Humedal, sector Torca..... | 304 |
| Figura 255 Coberturas de suelo en el Humedal, Guaymaral, Sector 6 | 305 |
| Figura 256 Sección preliminar de adecuación geomorfológica del Humedal, sector Guaymaral, Tramo Autopista Norte. | 315 |
| Figura 257 Sección preliminar de adecuación geomorfológica del Humedal, sectores Torca (cabecera norte) y Guaymaral (Autopista Norte) | 316 |
| Figura 258 Sección preliminar de adecuación geomorfológica del Humedal, sectores Torca (zona media) y Guaymaral (Col. San Viator) | 317 |
| Figura 259 Sección típica de restauración hidráulica, geomorfológica y ecosistémica para las quebradas del sistema hídrico Torca – Guaymaral. | 320 |
| Figura 260 Planta general de restauración propuesta para las quebradas del sistema hídrico Torca - Guaymaral..... | 320 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 261 Confinamiento canal Guaymaral | 321 |
| Figura 262 Perfil hidráulico del Canal Guaymaral – Escenario Tr100 | 322 |
| Figura 263 Localización de la zona de adecuación del canal y humedal, sector Guaymaral (Tramo Cementerios – C.C. Bima)..... | 323 |
| Figura 264 Detalle preliminar de la sección de modelamiento para adecuación del canal y humedal, sector Guaymaral (Tramo Cementerios – C.C. Bima)..... | 324 |
| Figura 265 Localización de la zona de adecuación del canal y humedal, sector Guaymaral (Tramo C.C. Bima – Río Bogotá)..... | 325 |
| Figura 266 Detalle preliminar de la sección de modelamiento para adecuación del canal y humedal, sector Guaymaral (Tramo C.C. Bima – Río Bogotá)..... | 325 |
| Figura 267 Caudales máximos mensuales registrados en las estaciones Puente Vargas, La Balsa, Chicú, El Cortijo, La Isla ubicadas en el río Bogotá (2006-2015) | 329 |
| Figura 268 Condición de borde río Bogotá | 331 |
| Figura 269 Cuenca río Bogotá estación Puente Vargas | 332 |
| Figura 270 Área de simulación 2D..... | 333 |
| Figura 271 Conexión 2d – Dique | 334 |
| Figura 272 Representación brecha de rotura | 335 |
| Figura 273 Área de inundación resultante | 336 |
| Figura 274 Perfil inundación rotura del dique del Río Bogotá..... | 337 |
| Figura 275 Detalle comparación escenarios de inundación, (Tr100 años Futuro y Rotura Río Bogotá) – Vista en detalle. | 338 |
| Figura 276 Estructuras hidráulicas principales del sistema | 340 |
| Figura 277 Hidrograma Alcantarilla $\phi=0.6m$, ID: Box3_1 | 341 |
| Figura 278 Sección transversal Alcantarilla $\phi=0.6m$, ID: Box3_1 | 342 |
| Figura 279 Hidrograma Alcantarilla $\phi=0.6m$, ID: Box3_2 | 342 |
| Figura 280 Sección transversal Alcantarilla $\phi=0.6m$, ID: Box3_2 | 343 |
| Figura 281 Vista en planta Estructuras ID_Box3_1 y Box3_2 | 343 |
| Figura 282 Hidrograma alcantarilla cajón de 2.0m x 1.5m, ID: Box4..... | 344 |
| Figura 283 Sección transversal alcantarilla cajón de 2.0m x 1.5m, ID: Box4..... | 344 |
| Figura 284 Vista en planta estructura ID: Box4..... | 345 |
| Figura 285 Hidrograma alcantarilla cajón 3.0m x 1.5m, ID: Box8..... | 346 |
| Figura 286 Sección transversal alcantarilla cajón 3.0m x 1.5m, ID: Box8 | 346 |
| Figura 287 Vista en planta estructura ID: Box8 | 347 |
| Figura 288 Hidrograma alcantarilla cajón 1.5m x 3.0 m, ID: Box_FLO1..... | 347 |
| Figura 289 Sección transversal alcantarilla cajón 1.5m x 3.0m, ID: Box_FLO1 | 348 |
| Figura 290 Hidrograma alcantarilla cajón 1.5m x 3.0m, ID: Box_FLO2..... | 348 |
| Figura 291 Sección transversal alcantarilla cajón 1.5m x 3.0m, ID: Box_FLO2..... | 349 |
| Figura 292 Hidrograma alcantarilla cajón 2.0m x 2.0m, ID: Box_FLO5..... | 349 |
| Figura 293 Sección transversal alcantarilla cajón 2.0m x 2.0 m, ID: Box_FLO5..... | 350 |
| Figura 294 Vista en planta estructuras quebrada La Floresta | 350 |
| Figura 295 Vista en planta estructuras quebrada Novita | 351 |
| Figura 296 Hidrograma alcantarilla cajón 1.7m x 2.9m, ID: Nov_25..... | 351 |
| Figura 297 Sección transversal alcantarilla cajón 1.7m x 2.9m, ID: Nov_25..... | 352 |
| Figura 298 Hidrograma alcantarilla cajón 3.2m x 2.4m, ID: Nov08_1..... | 352 |
| Figura 299 Sección transversal alcantarilla cajón 3.2m x 2.4m, ID: Nov08_1..... | 353 |
| Figura 300 Hidrograma alcantarilla cajón 3.1m x 1.5m, ID: Nov08_2..... | 353 |
| Figura 301 Sección transversal alcantarilla cajón 3.1m x 1.5m, ID: Nov08_2..... | 354 |
| Figura 302 Hidrograma alcantarilla cajón 6.0m x 3.0m, ID: Box5..... | 354 |
| Figura 303 Sección transversal alcantarilla cajón 6.0m x 3.0m, ID: Box5 | 355 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 304 Estructura alcantarilla $\phi= 1.0\text{m}$, ID: QGuay2..... | 355 |
| Figura 305 Sección transversal alcantarilla $\phi=1.0\text{m}$, ID: QGuay2 | 356 |
| Figura 306 Vista en planta estructura ID: QGuay2..... | 356 |
| Figura 307 Estructura 3 alcantarillas paralelas $\phi=2.2\text{ m}$, ID: Box6 | 357 |
| Figura 308 Sección transversal 3 alcantarillas paralelas $\phi=2.2\text{m}$, ID: Box6..... | 357 |
| Figura 309 Vista en planta estructura ID: Box6 | 358 |
| Figura 310 Estructura pontón 15.0m x 4.0m, ID: Box7 | 358 |
| Figura 311 Sección transversal de 15.0m x 4.0m, ID: Box7 | 359 |
| Figura 312 Vista en planta estructura ID: Box7 | 359 |
| Figura 313 Hidrogramas alcantarilla $\phi=0.60\text{m}$, ID: Box3_1..... | 360 |
| Figura 314 Sección transversal alcantarilla de $\phi=0.60\text{ m}$, ID: Box3_1 | 360 |
| Figura 315 Hidrograma alcantarilla de $\phi=0.6\text{ m}$, ID: Box3_2 | 361 |
| Figura 316 Sección transversal alcantarilla $\phi=0.60\text{ m}$, ID: Box3_2..... | 361 |
| Figura 317 Hidrograma alcantarilla de cajón de 2.0m x 1.5m, ID: Box4..... | 362 |
| Figura 318 Sección transversal alcantarilla de cajón 2.0m x 1.5m, ID: Box4 | 362 |
| Figura 319 Hidrograma alcantarilla de cajón de 3.0m x 1.5m, ID: Box8..... | 363 |
| Figura 320 Sección transversal alcantarilla de cajón 3.0m x 1.50m, ID: Box8 | 363 |
| Figura 321 Hidrograma alcantarilla de cajón de 1.5m x 3.0m, ID: Box_FLO1 | 364 |
| Figura 322 Sección transversal alcantarilla de cajón 1.5m x 3.0m, ID: Box_Flo1 | 364 |
| Figura 323 Hidrograma alcantarilla de cajón de 1.5m x 3.0m, ID: Box_FLO2 | 365 |
| Figura 324 Sección transversal alcantarilla de cajón 1.5m x 3.0m, ID: Box_Flo2..... | 365 |
| Figura 325 Hidrograma alcantarilla cajón de 2.0m x 2.0 m, Box_FLO5 | 366 |
| Figura 326 Sección transversal alcantarilla de cajón 2.0m x 2.0 m, ID: Box_Flo5..... | 366 |
| Figura 327 Hidrograma alcantarilla cajón 1.7m x 2.9m Nov_25 | 367 |
| Figura 328 Sección transversal alcantarilla de cajón 1.7m x 2.9m, ID: Nov_25..... | 367 |
| Figura 329 Hidrograma alcantarilla de cajón 3.2m x 2.4m, ID: Nov08_1 | 368 |
| Figura 330 Sección transversal alcantarilla de cajón 3.2m x 2.4m, ID: Nov08_1..... | 368 |
| Figura 331 Hidrograma alcantarilla cajón de 6.0m x 3.0 m, ID: Box5..... | 369 |
| Figura 332 Sección transversal alcantarilla de cajón 6.0m x 3.0m, ID: Box5 | 369 |
| Figura 333 Estructura alcantarilla de $\phi=1.0\text{m}$, ID:QGuay2..... | 370 |
| Figura 334 Sección transversal alcantarilla $\phi=1.0\text{m}$, ID: QGuay2 | 370 |
| Figura 335 Estructura alcantarillas de $\phi=2.2$, ID: Box6 | 371 |
| Figura 336 Sección transversal alcantarillas $\phi=2.2\text{ m}$, ID: Box6..... | 371 |
| Figura 337 Estructura pontón de 15.0m x 4.0 m, ID: Box7 | 372 |
| Figura 338 Sección transversal Pontón de 15.0m x 4.0m, ID: Box7..... | 372 |
| Figura 339 Sección transversal Cruce No. 1 | 373 |
| Figura 340 Sección transversal Cruce No. 2 | 373 |
| Figura 341 Sección transversal Cruce No. 3 | 374 |
| Figura 342. Variación de caudales medios y ecológicos afluentes esperados en el humedal Torca-Guaymaral..... | 377 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Tabla 1 Clasificación de clases antecedentes de humedad (AMC) para el método de abstracciones de lluvia del SCS..... | 34 |
| Tabla 2 Estaciones pluviográficas área de estudio | 37 |
| Tabla 3 Altura de precipitación generada mediante curvas PAD año 2011 (mm)..... | 45 |
| Tabla 4 Precipitación para tormentas de 1 hora en 100 hectáreas | 45 |
| Tabla 5 Relaciones PADF | 49 |
| Tabla 6 Precipitación total por cuencas (Duración del evento de 3 horas)..... | 50 |
| Tabla 7 Tormentas analizadas..... | 52 |
| Tabla 8 Volumen total de precipitación Sistema Torca – Guaymaral | 66 |
| Tabla 9 Precipitación total por cuencas y subcuencas..... | 76 |
| Tabla 10 Características geométricas de las elipses | 77 |
| Tabla 11 Precipitación total máxima por áreas – Curvas PDF Ingetec..... | 78 |
| Tabla 12 Comparación de la precipitación total por subcuencas..... | 78 |
| Tabla 13 Volumen total de precipitación, evento Tr100 años y duración de 3 horas | 80 |
| Tabla 14. Red Hidrográfica en la zona de estudio..... | 97 |
| Tabla 15 Coeficiente de Masividad (Km) | 132 |
| Tabla 16 Parámetros morfométricos de las subcuencas del sistema Torca-Guaymaral . | 135 |
| Tabla 17 Parámetros morfométricos asociados a la forma de las subcuencas del sistema Torca-Guaymaral..... | 137 |
| Tabla 18 Expresiones empleadas para el cálculo del tiempo de concentración | 140 |
| Tabla 19 Tiempo de concentración..... | 141 |
| Tabla 20 Unidades de suelo y tipo de suelo hidrológico | 149 |
| Tabla 21 Clasificación de clases antecedentes de humedad (AMC) para el método de las abstracciones de lluvia del SCS..... | 154 |
| Tabla 22 Humedad Antecedente estación La Caro..... | 154 |
| Tabla 23 Humedad Antecedente estación La Conejera..... | 155 |
| Tabla 24 Humedad Antecedente estación Serrezuela | 156 |
| Tabla 25 Humedad Antecedente estación Usaquén | 157 |
| Tabla 26. Humedad Antecedente estación Cerro Suba | 158 |
| Tabla 27 Numero de Curva (CN) condición antecedente AMC=II, Áreas Naturales | 159 |
| Tabla 28 Numero de Curva (CN) condición antecedente AMC=II, Áreas Urbanas..... | 160 |
| Tabla 29 Numero de Curva (CN) condición antecedente AMC=II, Áreas Cultivadas | 161 |
| Tabla 30 Equivalencia de coberturas según niveles del Manual de Drenajes de INVIAS | 161 |
| Tabla 31 Asignación del número de curva para condición II según usos del suelo | 162 |
| Tabla 32 Número de curva (CN) recomendados para zonas urbanas | 163 |
| Tabla 33 Asignación del número de curva CN para condición II según usos del suelo ... | 167 |
| Tabla 34 Resumen de parámetros morfométricos del sistema Torca-Guaymaral | 173 |
| Tabla 35 Caudales máximos para la Condición Actual | 199 |
| Tabla 36 Caudales máximos para la Condición Futura..... | 222 |
| Tabla 37 Incremento en porcentaje, de los caudales de la condición actual y la condición futura..... | 227 |
| Tabla 38 Listado de estructuras implementadas en el modelo | 247 |
| Tabla 39 Coeficientes de Rugosidad Asignados | 253 |
| Tabla 40. Localización de BC Lines de ingreso al modelo hidráulico | 266 |
| Tabla 41. Perfil hidráulico del Sistema Torca – Guaymaral | 281 |
| Tabla 42. Volumen por almacenar en los humedales | 297 |
| Tabla 43. Volumen Almacenamiento ZMPA y Desbordamiento | 297 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 44. Volúmenes de excavación total y útiles en las áreas de reconfiguración preseleccionadas..... | 306 |
| Tabla 45. Descripción de funcionamiento hídrico de sitios críticos en el sistema Torca-Guaymaral | 307 |
| Tabla 46. Secciones geométricas de prediseño del canal Guaymaral | 326 |
| Tabla 47. Análisis de frecuencias caudales máximos estación Pte. Vargas. | 330 |
| Tabla 48. Áreas de inundación por escenarios, sistema Torca - Guaymaral | 339 |
| Tabla 49. Resumen condiciones de drenaje en la zona de estudio..... | 385 |

ANEXOS

- Anexo 1 Análisis Precipitación (Medio magnético)
- Anexo 2 Análisis Caudales (medio magnético)
- Anexo 3 Cartográfico (Físico y magnético)
- Anexo 4 Modelo Hidráulico (Medio magnético)
- Anexo 5 Información Topográfica (Medio magnético)
- Anexo 6 Calidad del Agua (Medio magnético)
- Anexo 7 Calibración Modelo Hidrológico (Medio magnético)

LISTADO DE PLANOS

| No. | ID | TÍTULO PLANOS TEMATICOS |
|----------------------------------------------------------------|----------|-----------------------------|
| HIDROLOGIA (MEDIO MAGNETICO) (Anexo 3 Carpeta 3.3 PDFs) | | |
| 1 | 01 DE 10 | CUENCAS HIDROGRÁFICAS |
| 2 | 02 DE 10 | CUENCAS HIDROGRÁFICAS DEM |
| 3 | 03 DE 10 | UNIDADES SUELOS |
| 4 | 04 DE 10 | CN CONDICIÓN ACTUAL |
| 5 | 05 DE 10 | CN CONDICIÓN FUTURA |
| 6 | 06 DE 10 | RUGOSIDAD CONDICIÓN ACTUAL |
| 7 | 07 DE 10 | RUGOSIDAD CONDICIÓN FUTURA |
| 8 | 08 DE 10 | INUNDACIÓN CONDICIÓN ACTUAL |
| 9 | 09 DE 10 | INUNDACIÓN CONDICIÓN FUTURA |
| 10 | 10 DE 10 | ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS |

| No. | PLANO No. | TÍTULO |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PLANTAS PERFILES (Anexo 3. Carpeta 3.6) | | |
| 1 | 01DVHPP01 | PRODUCTO 4. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO PLANTA PERFIL CANAL TORCA - HUMEDAL GUAYMARAL - CANAL GUAYMARAL CONDICIÓN ACTUAL K0+000 A K2+150 |
| 2 | 01DVHPP02 | PRODUCTO 4. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO PLANTA PERFIL CANAL TORCA - HUMEDAL GUAYMARAL - CANAL GUAYMARAL CONDICIÓN ACTUAL K2+040 A K4+230 |
| 3 | 01DVHPP03 | PRODUCTO 4. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO PLANTA PERFIL CANAL TORCA - HUMEDAL GUAYMARAL - CANAL GUAYMARAL CONDICIÓN ACTUAL K4+120 A K6+310 |
| 4 | 01DVHPP04 | PRODUCTO 4. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO PLANTA PERFIL CANAL TORCA - HUMEDAL GUAYMARAL - CANAL GUAYMARAL CONDICIÓN ACTUAL K6+210 A K8+080 |
| 5 | 01DVHPP05 | PRODUCTO 4. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO PLANTA PERFIL CANAL TORCA - HUMEDAL GUAYMARAL - CANAL GUAYMARAL CONDICIÓN FUTURA K0+000 A K2+150 |
| 6 | 01DVHPP06 | PRODUCTO 4. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO PLANTA PERFIL CANAL TORCA - HUMEDAL GUAYMARAL - CANAL GUAYMARAL CONDICIÓN FUTURA K2+040 A K4+230 |
| 7 | 01DVHPP07 | PRODUCTO 4. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO PLANTA PERFIL CANAL TORCA - HUMEDAL GUAYMARAL - CANAL GUAYMARAL CONDICIÓN FUTURA K4+120 A K6+310 |
| 8 | 01DVHPP08 | PRODUCTO 4. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO PLANTA PERFIL CANAL TORCA - HUMEDAL GUAYMARAL - CANAL GUAYMARAL CONDICIÓN FUTURA K6+210 A K8+080 |
| RECONFORMACIÓN QUEBRADAS PLANTAS PERFILES (Anexo 3. Carpeta 3.6) | | |
| 9 | 01DVHPL01 | 04. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO PROPUESTA DE RECONFORMACIÓN DE QUEBRADAS QUEBRADA TORCA |
| 10 | 02DVHPL01 | 04. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO PROPUESTA DE RECONFORMACIÓN DE QUEBRADAS QUEBRADA NOVITA |
| 11 | 03DVHPL01 | 04. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO PROPUESTA DE RECONFORMACIÓN DE QUEBRADAS QUEBRADA CAÑIZA |
| 12 | 04DVHPL01 | 04. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO PROPUESTA DE RECONFORMACIÓN |

| No. | PLANO No. | TÍTULO |
|---------------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | DE QUEBRADAS QUEBRADA FLORESTA |
| 13 | 05DVHHPL01 | 04. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO PROPUESTA DE RECONFORMACIÓN DE QUEBRADAS QUEBRADA LAS PILAS |
| 14 | 06DVHHPL01 | 04. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO PROPUESTA DE RECONFORMACIÓN DE QUEBRADAS QUEBRADA SAN JUAN |
| 15 | 07DVHHPL01 | 04. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO PROPUESTA DE RECONFORMACIÓN DE QUEBRADAS QUEBRADA PATIÑO |
| 16 | 08DVHHPL01 | 04. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO PROPUESTA DE RECONFORMACIÓN DE QUEBRADAS QUEBRADA AGUAS CALIENTES |
| 17 | 09DVHHPL01 | 04. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO PROPUESTA DE RECONFORMACIÓN DE QUEBRADAS QUEBRADA TIBABITA |
| 18 | 10DVHHPL01 | 04. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO PROPUESTA DE RECONFORMACIÓN DE QUEBRADAS CANAL GUAYMARAL PLANTA Y SECCIONES TRANSVERSALES |
| 19 | 11DVHHPL01 | 04. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO PROPUESTA DE RECONFORMACIÓN DE QUEBRADAS HUMEDAL TORCA PLANTA Y SECCIONES TRANSVERSALES |
| 20 | 12DVHHPL01 | 04. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO PROPUESTA DE RECONFORMACIÓN DE QUEBRADAS HUMEDAL GUAYMARAL PLANTA Y SECCIONES TRANSVERSALES |
| LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE QUEBRADAS (Anexo 5) | | |
| 21 | 02DVHHTO01 | 04. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE QUEBRADAS QUEBRADA NOVITA PLANTA Y SECCIONES TRANSVERSALES |
| 22 | 03DVHHTO01 | 04. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE QUEBRADAS QUEBRADA CAÑIZA PLANTA Y SECCIONES TRANSVERSALES |
| 23 | 04DVHHTO01 | 04. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE QUEBRADAS QUEBRADA FLORESTA PLANTA Y SECCIONES TRANSVERSALES |
| 24 | 05DVHHTO01 | 04. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE QUEBRADAS QUEBRADA LAS PILAS PLANTA Y SECCIONES TRANSVERSALES |
| 25 | 06DVHHTO01 | 04. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE QUEBRADAS QUEBRADA SAN JUAN PLANTA Y SECCIONES TRANSVERSALES |
| 26 | 07DVHHTO01 | 04. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE QUEBRADAS QUEBRADA PATIÑO PLANTA Y SECCIONES TRANSVERSALES |
| 27 | 08DVHHTO01 | 04. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE QUEBRADAS QUEBRADA AGUAS CALIENTES PLANTA Y SECCIONES TRANSVERSALES |
| 28 | 09DVHHTO01 | 04. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE QUEBRADAS QUEBRADA TIBABITA PLANTA Y SECCIONES TRANSVERSALES |
| 29 | 10DVHHTO01 | 04. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE CANALES CANAL GUAYMARAL PLANTA Y SECCIONES TRANSVERSALES |
| 30 | 11DVHHTO01 | 04. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE HUMEDALES HUMEDAL TORCA PLANTA Y SECCIONES TRANSVERSALES |
| 31 | 12DVHHTO01 | 04. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE HUMEDALES HUMEDAL GUAYMARAL PLANTA Y SECCIONES TRANSVERSALES |
| 32 | 13DVHHTO01 | 04. ACTUALIZACIÓN ESTUDIO HIDROLÓGICO LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE CANALES CANAL TORCA PLANTA Y SECCIONES TRANSVERSALES |

1 ANTECEDENTES

El Decreto No. 088 del 3 de marzo de 2017 “por medio del cual se establecen las normas para el ámbito de aplicación del Plan de Ordenamiento Zonal del Norte “Ciudad Lagos de Torca” y se dictan otras disposiciones”, es el instrumento de planeación a través del cual se definen y se precisan las condiciones de ordenamiento, las infraestructuras, el sistema general de espacio público y equipamientos colectivos, los criterios para armonizar usos y tratamientos urbanísticos asignados en el área, los criterios para la precisión o ajuste de la normativa urbanística, así como la delimitación y criterios para la gestión de planes parciales en el marco de la estrategia de ordenamiento territorial, del área de la Ciudad Lagos de Torca.

El 25 de enero de 2018, la sociedad Fiduciaria Bogotá S.A., suscribió Contrato de Fiducia Mercantil Irrevocable con Antonio Sefair Saab, Eagle S.A.S., Constructora Fernando Mazuera S.A., Mazuera Villegas y CIA S.A., Malibú S.A. en reorganización, El Olivo S.A., El Roble Universal S.A., Promotora de Proyectos Andalucía S.A., Constructora Hayuelos Colombia S.A.S, Multiparque Creativo S.A.S., Tierradentro INC, Constructora Colpatría S.A., Urbanizadora Santa Fe de Bogotá Urbansa S.A., Jardines de Paz S.A., Colegio Mayor Nuestra Señora del Rosario Bogotá, Easton S.A.S., Inversiones Barantes S.A.S., Inversiones Baroja S.A.S., Gloria Maria Pardo Barrera, Maria Fernando Roa Rozo, Carlos Ernesto Roa Rozo, Arraya S.A.S., Erglo S.A.S., Blancol S.A.S., Global FRB S.A.S., South River Partners LLC, Bohemia Investment S.A. Sucursal Colombia, Ludwig Frederick Haderer Villamizar y la sociedad Fiduciaria Bogotá S.A. en su calidad de vocera de los Fideicomisos El Otoño Fidubogota, Construnova Fidubogotá, Hayuelos Colombia 3 Fidubogotá, Hayuelos Colombia 4 Fidubogotá, El Otoño 2 Fidubogotá, cuyo objeto es la constitución de un vehículo fiduciario denominado “Fideicomiso Lagos de Torca”, a través del cual los Fideicomitentes, en coordinación con los Beneficiarios Futuros, planifiquen, desarrollen, ejecuten y entreguen unas, algunas o todas las obras correspondientes a las Cargas Generales de Ciudad Lagos de Torca, de acuerdo con la priorización establecida para el efecto en el Artículo 169 del Decreto, para garantizar el reparto equitativo de las cargas y los beneficios derivados de las decisiones que se adoptan en el marco del POZ norte, así como la asignación de los beneficios adicionales sujetos al pago o a la asunción voluntaria de cargas urbanísticas y todas aquellas finalidades directamente relacionadas con la principal.

En desarrollo del anterior contrato y lo establecido en el numeral 7º del artículo 203 del Decreto, para efectos de la contratación y ejecución de las obras de carga general a las que se refiere el artículo 168 del Decreto, será el Comité Fiduciario el encargado de definir las condiciones que deban cumplirse para el efecto, respetando en todo caso, el orden de operación definido en el artículo 169 “Implementación de las obras de carga general” y observando los principios de selección objetiva, distribución de riesgos y desarrollando contrataciones a costo fijo global.



En razón a lo anterior, el Fideicomiso Lagos de Torca contrató a WSP Colombia para llevar a cabo la consultoría para realizar los diseños técnicos que sirvan para la construcción de las obras de carga general del proyecto Lagos de Torca acogido mediante el Decreto 088 de 2017, y su modificación contenida en el Decreto 049 de 2018, que tienen por objeto establecer las normas para el ámbito de aplicación del Plan de Ordenamiento Zonal del Norte - POZ Norte.

2 INTRODUCCION

El informe presente corresponde al Producto 4 - de la Fase I, Actualización Estudio Hidrológico del Humedal Torca Guaymaral, que hace parte de un estudio macro de 14 productos requerido por la EAAB al Fidecomiso Lagos de Torca, definiendo el estudio conceptual de redes para el desarrollo de Ciudad Lagos de Torca.

Dicho estudio macro es el resultado de la actualización de varios estudios que durante los últimos 20 años ha adelantado la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, en la zona norte de la ciudad, especialmente, para definir las condiciones de servicio de Acueducto y Alcantarillado del actual Plan Zonal del Norte - Lagos de Torca.

La condición fundamental del estudio que a continuación se desarrolla, parte de la necesidad de contar con información detallada, como es el caso de los levantamientos topográficos detallados del área comprendida dentro del ámbito del Plan Zonal del Norte - Lagos de Torca, aprobado mediante decreto 088 del 3 de marzo de 2017. El Decreto No. 088 del 3 de marzo de 2017 “por medio del cual se establecen las normas para el ámbito de aplicación del Plan de Ordenamiento Zonal del Norte “Ciudad Lagos de Torca” y se dictan otras disposiciones”, es el instrumento de planeación a través del cual se definen y se precisan las condiciones de ordenamiento, las infraestructuras, el sistema general de espacio público y equipamientos colectivos, los criterios para armonizar usos y tratamientos urbanísticos asignados en el área, los criterios para la precisión o ajuste de la normativa urbanística, así como la delimitación y criterios para la gestión de planes parciales en el marco de la estrategia de ordenamiento territorial, del área del Plan Zonal del Norte – Ciudad Lagos de Torca.

Los estudios anteriores han realizado sus análisis, diagnósticos y recomendaciones finales a partir de topografías parciales que han impedido que de una manera integral se presenten los resultados de toda el área en estudio y se han limitado a la condición de estudios particulares para los humedales Torca y Guaymaral, para el diseño detallado del Canal Torca o de manera conceptual para el estudio de factibilidad del drenaje de todo el sector norte de la ciudad.

El presente estudio durante la Fase I tiene por objeto adelantar los diseños a nivel de ingeniería básica de las obras de carga general para el Plan Zonal del Norte – Ciudad Lagos de Torca y dentro de la Fase I debe actualizar el estudio conceptual que hizo la empresa a través del contrato 1-02-25500-0626-2009.

Como metodología los diferentes productos que hacen parte del estudio, se entregan de manera independiente ya que están desarrollados por dos consultorías, las empresas WSP y HMV que diseñan una el costado occidente y la otra el oriente de la autopista Norte, del área de influencia del proyecto; para facilitar la comprensión del estudio total, se radicará el 18 de septiembre a la EAAB el “Informe Ejecutivo” que resumen los productos fundamentales (Producto 4 y Producto 7 al Producto 13) y concluye con las alternativas sugeridas técnicamente integrado los sectores oriente y occidente de los diferentes tipos de redes.

La Fase I del proyecto corresponde a la “Actualización de los estudios conceptuales del Contrato EAAB-ESP 1-02-25500-0626-2009, incluyendo la topografía de detalle necesaria para el ajuste al plan vial arterial vigente, que sirvan de base para definir las alternativas técnicas y económicas para el desarrollo del Plan Zonal Del Norte - Ciudad Lagos de Torca”. La consultoría en esta Fase presentará los siguientes productos:

Actualización de los estudios conceptuales Contrato EAAB-ESP 1-02-25500-0626-2009, que comprende:

1. Antecedentes: Recopilación y análisis de información del proyecto.
2. Topografía detallada y levantamiento de redes existentes - Vías y Espacio Público
3. Estudios Geológicos y Geomorfológicos
4. Actualización Estudio Hidrológico del Humedal Torca Guaymaral
5. Estudio Ambiental
6. Estudio de tipologías SUDS (específica para la Alternativa Conceptual que se decida)
7. Estudios y Diseños a nivel de Ingeniería Básica Hidráulicos
8. Estudios y Diseños a nivel de Ingeniería Básica Geotécnicos
9. Estudios y Diseños a nivel de Ingeniería Básica Estructurales
10. Especificaciones técnicas particulares
11. Descripción del proceso constructivo sugerido con su respectivo cronograma de ejecución
12. Presupuesto a nivel de actividades con sus respectivos Análisis de Precios Unitarios - Plan de Operación y mantenimiento
13. Comparativo Técnico y Económico de las tres alternativas con una recomendación justificada para cada uno de los sistemas.

Alcantarillado pluvial

El Producto 4 elaborado por WSP es el resultado del estudio hidrológico para las condiciones de lluvia máxima determinadas por el consultor para un periodo de retorno de 100 años de acuerdo con la normatividad actual de la EAAB. Las condiciones de lluvia máxima fueron aplicadas en toda la zona de estudio del plan zonal, teniendo en cuenta el modelo digital topográfico generado a partir de los levantamientos detallados de topografía y las modificaciones geomorfológicas que se presentan entre las condiciones actuales y las debidas a la implantación de los 34 planes parciales que hacen parte del plan zonal.

A su vez se realizó el estudio hidrodinámico de las condiciones de drenaje causadas por la tormenta de diseño para los 100 años de periodo de retorno y aplicada sobre la totalidad del área del plan zonal, para las condiciones más desfavorables determinadas en el capítulo de hidrología en todos los cauces y cuerpos de agua. Para las condiciones definidas en la hidrología y con la ayuda de software especializado, se estableció la huella de la lámina de agua de la inundación y el perfil hidráulico para los periodos de retorno de 2.33, 10, 25, 50 y 100 años.

Para fines de establecer las condiciones de mayor persistencia en el cuerpo hídrico del humedal y con miras a la definición de las propuestas de manejo ambiental que se presentan en el Producto 5, se llevó a cabo al estimación de los caudales medios y

mínimos que naturalmente deberían hacer su ingreso al sistema, con lo cual se definen las condiciones actuales de deficiencia hídrica del humedal.

Hay que indicar que se evaluó detenidamente el efecto generado por el tránsito de la creciente en los cauces naturales al oriente de la autopista norte, verificando en todo momento que las condiciones de tránsito se desplazaran por los accidentes topográficos que conforman cada cauce.

Especial atención mereció el estudio de todos los controles hidráulicos en el tránsito de la creciente, en los cruces de los cauces naturales, en el cruce del humedal Torca con la Autopista Norte, en los cruces del canal Guaymaral con las diferentes vías y finalmente la entrega del sistema al Río Bogotá para la condición de la lámina de agua de 100 años en el Río.

Con todos los elementos y la información anteriormente indicada se elaboraron planos de lámina de agua, perfiles hidráulicos, huellas en los cauces naturales, comportamiento hidráulico de los cruces y cotas de inundación.

A partir de esta información el consultor elaboró un diagnóstico detallado de la situación indicando todas las limitaciones actuales en el funcionamiento de cada componente del drenaje pluvial del plan zonal y la forma como este se afecta cuando estén desarrollados todos los planes parciales. Tomando todos los elementos del diagnóstico y al análisis de cada componente se estudiaron y definieron las diferentes alternativas de solución y que son presentadas detalladamente en el Producto 7 del presente estudio.

El eje articulador del drenaje natural del plan zonal es el humedal Torca Guaymaral y su drenaje hacia el Río Bogotá se lleva a cabo a través del Canal Guaymaral. La pendiente topográfica natural de este eje se desarrolla en sentido sur - norte y es el punto más bajo de todo el plan zonal, debido a lo anterior, la totalidad de los drenajes naturales desde el oriente y el occidente drenan hacia este sistema. Es importante entender su conformación natural porque para estudiar en detalle las alternativas de diseño se debe en la medida de lo posible seguir esta condición.

Las alternativas de diseño fueron estudiadas teniendo en cuenta esta conformación natural, es así como el costado oriental del sistema fue estudiado en detalle por el consultor HMV y el costado occidental fue desarrollado por WSP. Las alternativas que se estudiaron partieron de la situación definida en el Producto 4, es decir con la lámina de agua y las cotas definidas a partir del tránsito de la creciente de los 100 años y con las condiciones geomorfológicas de los planes parciales ya desarrollados.

Cada alternativa estudiada contempló la adecuación hidráulica de las diferentes quebradas para garantizar que los colectores que entreguen a cada una de ellas lo puedan hacer libremente o con en menor remanso en los colectores. De igual forma se evaluó la adecuación hidro morfológica de los humedales para garantizar el almacenamiento y amortiguación de la creciente. Así mismo las alternativas también tuvieron en cuenta el desarrollo de las unidades funcionales del plan zonal y la entrada de los diferentes planes parciales.

Es importante indicar que dentro del estudio de las alternativas, se llevó a cabo el análisis de llevar una fracción importante de ingreso del caudal al humedal Torca y conducirla directamente al Río Bogotá, con el propósito de disminuir de manera importante el tránsito de la creciente a través del sistema Torca Guaymaral; sin embargo, para poder entregar este caudal al Río Bogotá, se requiere de infraestructura demasiado costosa, ya que se requiere de un pondaje de amortiguación de caudales y una estación elevadora que disponga las aguas en el Río.

La escogencia de la alternativa seleccionada se hizo a través de una matriz de decisión que evaluó parámetros técnicos, operativos, de costo y finalmente de funcionalidad a partir de la entrada de los diferentes planes parciales y el desarrollo de las unidades funcionales.

Alcantarillado Sanitario

Las alternativas del drenaje sanitario del Plan Zonal Lagos de Torca se llevaron a cabo en el Producto 7, teniendo en cuenta la topografía del terreno en el sentido oriente occidente, razón por la cual el consultor HVM planteó las alternativas de la parte oriental drenando en el sentido indicado por la topografía; sin embargo es necesario aprovechar la infraestructura que actualmente tiene la Empresa de Acueducto en la zona y que desde el diseño de estos sistemas planteó las áreas de drenaje del borde norte de la ciudad, entregando a esta infraestructura, como son los interceptores izquierdo y derecho del canal Torca, los cuales al llegar a la calle 200, se unifican y entregan sus aguas al pozo inicial del Interceptor Río Bogotá. Esta situación obliga a que el diseño de los sistemas sanitarios en el sentido norte sur transversalmente a la topografía general del plan zonal.

De acuerdo con el párrafo anterior, WSP de igual manera planteó las alternativas del sector occidental del Plan Zonal drenando hacia el Interceptor Río Bogotá, sin embargo, para este sector del plan zonal es necesario contar con una estación elevadora que haga posible que los planes parciales ubicados más hacia el norte del plan zonal puedan entregar sus aguas sin inconvenientes.

Teniendo en cuenta que se requiere de una estación elevadora en el sector occidental del plan zonal, es conveniente evaluar que un sector del costado oriental puede drenar sus aguas a la estación elevadora y desde allí enviar al Interceptor del Río Bogotá sus aguas. Este planteamiento se hace dentro del análisis de alternativas del Producto 7, que es necesario adelantar para evaluar el ingreso de los diferentes planes parciales y su desarrollo en concordancia con las unidades funcionales del plan zonal.

Acueducto

El suministro de agua en el plan zonal Lagos de Torca es tal vez el de más expedita obtención, pues se cuenta con dos de los sistemas más importantes de conducción de agua de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, sin embargo, para optimizar estos dos sistemas, las alternativas planteadas en el Producto 7 se configuraron para el sector oriental alimentadas desde la línea Tibitoc-Usaquén y para el sector occidental desde la línea Tibitoc-Casablanca.

Para optimizar la conexión a los dos sistemas y teniendo en cuenta que la Dirección de Red Matriz de la Empresa de Acueducto es enfática en utilizar la menor cantidad de conexiones a las cajas existentes de los dos sistemas, cada alternativa planteó minimizar las conexiones a las redes anteriormente indicadas.

De igual forma las alternativas presentadas fueron evaluadas con alimentación con alternativa de servicio bien sea desde la línea Tibitoc Usaquén para el sector occidental y desde la línea Tibitoc Casablanca para el sector oriental del plan zonal.

Las alternativas también contemplaron las longitudes y los diámetros óptimos para garantizar las presiones en condiciones dinámicas o estáticas, en los momentos de mayor y menor consumo, así como las velocidades óptimas que garanticen en todo momento que no se presentan depósitos de sedimentos y/ desgaste por alta velocidad.

En el Producto 7 se presenta de manera detallada el soporte técnico, de la valoración de cada alternativa y su evaluación hasta obtener la mejor de las tres, a nivel técnico, económico y de operación.

En el Producto 14 del presente estudio se presentará la alternativa seleccionada con su diseño a nivel de ingeniería básica, incluidos memoria detallada, planos con todos sus detalles y presupuesto.

El presente documento hace referencia al Producto 4 “Actualización Estudio Hidrológico del Humedal Torca Guaymaral”

Para el desarrollo de este producto se recopiló información pluviográfica y pluviométrica de estaciones de la zona, operadas por la EAAB, seleccionando las fechas en las cuales se presentan las crecientes de mayor importancia para el estudio y procesándola mediante software especializado para el efecto. También se actualiza la información de la geometría compuesta por información de modelos de elevación digital y batimetrías del cauce tanto de las cuencas tributarias como del cauce de los canales Torca y Guaymaral, así como de los Humedales, a una escala adecuada para cada procesamiento.

Este documento hace la evaluación del comportamiento hidrológico e hidráulico del sistema hídrico Torca – Guaymaral para las condiciones morfológicas actuales del humedal, canales y quebradas aferentes y especialmente analizados para un evento hidrológico con un período de retorno de 100 años.

Este informe se compone de 9 capítulos y 7 anexos. En los primeros capítulos se presentan los antecedentes de la consultoría, así como la introducción al documento y los objetivos propuestos. El Capítulo 4 hace referencia a la Descripción de Actividades e información utilizada a lo largo del estudio. En el Capítulo 5 se hace la descripción detallada de los procesos de actualización hidrológica, así como las características que permitieron obtener los datos de entrada para la modelación. Se analizan los componentes del HEC-HMS 5.0, y se explica la metodología a seguir para realizar un proyecto con dichos modelos. El capítulo 6 contiene todos los aspectos relacionados con el desarrollo de los modelos de simulación hidráulica bidimensional, así como los resultados encontrados.

Finalmente, en los últimos capítulos se exponen las principales conclusiones y recomendaciones encontradas durante el desarrollo del estudio, así como la bibliografía.

Los anexos representan de forma gráfica y a partir de tablas el procedimiento y los cálculos utilizados en el estudio, igualmente se presentan los resultados obtenidos para las crecientes estudiadas.

Es de anotar que el alcance definido por el Anexo Técnico para esta consultoría, se contempla la inclusión de los modelos de simulación de calidad de agua que tiene a su vez incorporado el análisis de caudales medios y mínimos (Anexo 6), así como la Calibración del Modelo hidrológico e hidráulico, los cuales se encuentran incorporados en el Anexo 7 “Calibración del Modelo Hidrológico” del presente informe.

En lo que respecta al análisis de las metodologías de los SUDS y de los cuales se hace referencia en el Anexo Técnico de los Términos de Referencia, su alcance está desarrollado en detalle en el Producto 6, en el cual se hace la descripción de los sistemas alternativos no convencionales para el control y regulación de las aguas lluvias basados en los conceptos y filosofía de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible SUDS, así como de las acciones de operación y mantenimiento, aplicando metodologías relacionadas con los parámetros y condiciones propias de la zona plana de la cuenca del sistema hídrico Torca – Guaymaral.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

El producto tiene como propósito la actualización del estudio hidrológico de la zona del proyecto y la realización y entrega de un modelo integral hidrodinámico de detalle de los cuerpos de agua del proyecto que permita modelar la hidráulica y la calidad del agua en todos los puntos del modelo.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Validar y actualizar el modelo hidrológico producto del contrato de consultoría 1-02-25500-0626-2009 de la EAAB-ESP.
- Calibrar y validar el modelo hidrológico de cada una de las quebradas (coeficientes de escorrentía y los modelos lluvia escorrentía de las cuencas altas de cada quebrada).
- Modelar tormentas con periodos de retorno según lo descrito en las normas técnicas de la EAAB ESP, justificando ante esta todos los escenarios de modelación teniendo en cuenta un estudio de riesgo de inundación para la justificación de los periodos de retorno.
- Contemplar la totalidad de las áreas aportantes a los humedales Torca y Guaymaral, así como las aportantes aguas abajo al canal Guaymaral, contemplando el escenario actual y el escenario futuro de nuevos usos de las áreas definidas (2 escenarios: actual y futuro).
- Presentar conclusiones y recomendaciones para la modelación hidrológica e hidráulica en la cuenca del sistema hídrico Torca – Guaymaral, mediante la aplicación de un modelo bidimensional, como por ejemplo HEC-RAS versión 5.0.

4 DESCRIPCION DE ACTIVIDADES

El estudio tiene como objetivos, en primer lugar, presentar una descripción cuantitativa de la variable de la precipitación en el sector norte de Bogotá y finalmente estimar los caudales de escorrentía superficial que serán utilizados en el análisis hidráulico de inundaciones, a partir de transformaciones lluvia-escorrentía.

Lo anterior se lleva a cabo a partir de etapas o fases que suceden a modo de actividades consecutivas como se describe a continuación.

- Recopilación y análisis de información secundaria.
 - Estudios previos.
 - Información cartográfica base y temática.
 - Aerofotografías (Ortofotografía, IDECA)
 - Mapa de caracterización agrológica (POMA Río Bogotá, 2018)
- Suelos
- Cobertura y Usos del suelo
- Información hidroclimatológica.
 - Estaciones del IDEAM
 - Estaciones de la Corporación Autónoma Regional (CAR)
 - Estaciones de la Empresa de Acueducto, Agua y Alcantarillado de Bogotá (EAAB)
- Recopilación de información primaria en campo.
 - Verificación de dirección de las corrientes y alcance de las cuencas en zonas planas, no representadas en la cartografía.
 - Control de campo de elementos del terreno analizados en oficina a partir de información secundaria.
 - Inventario de estructuras hidráulicas de paso existentes.
- Procesamiento de información secundaria y primaria.
 - Delimitación de cuencas.
 - Determinación definitiva de usos y coberturas del suelo.
 - Construcción de mapas de número de curva.
 - Análisis estadístico de eventos hidrológicos máximos.
 - Construcción de modelos lluvia – escorrentía.
 - Determinación de caudales de diseño.
 - Elaboración del modelo hidráulico.
- Calibración y validación del modelo hidrológico
- Elaboración de informe final y presentación de resultados.

A continuación, se presenta en mayor detalle la metodología general empleada.

4.1 ANÁLISIS DE INFORMACIÓN SECUNDARIA

La recopilación de información secundaria inicia a partir de la consulta de estudios previos y lectura de informes de caracterización ambiental que permitan establecer una primera aproximación al comportamiento hidrológico de la zona. Estas lecturas comprenden la caracterización geológica, geomorfológica, hidrológica y demás aspectos ambientales relevantes, presentes en los documentos e informes que se describen a continuación:

- a. Estudio Hidrológico de Carácter Regional de la “Factibilidad para el Desarrollo de la Infraestructura de Acueducto y Alcantarillado Sanitario y Sistema de Drenaje Pluvial del Borde Norte de la Ciudad de Bogotá” del Plan Zonal de Bogotá (POZ), 2010. Elaborado por el Consorcio Borde Norte.
- b. Informe de Consultoría para la Elaboración de los Diseños Detallados para la Adecuación Hidráulica y Restauración Ecológica del Humedal Torca (Romero, 2002).
- c. Informe “Descripción y Contexto de las Cuencas Hídricas del Distrito Capital – Torca, Salitre, Fucha y Tunjuelo” de la Secretaría Distrital de Ambiente (2015).

Durante el proceso de identificación, recopilación y análisis de información secundaria, se solicita la información ante las entidades oficiales, IGAC, IDEAM, EAAB, CAR, entre otras, que aportan datos relevantes en cuanto a las bases cartográficas de trabajo, estaciones hidroclimatológicas con datos disponibles, cartografía específica de suelos y coberturas vegetales (Ver Anexo 3 – Anexo Cartográfico).

Igualmente, se obtiene información pública disponible en la red en lo referente a la representación del terreno. Para el área de Bogotá y Cerros Orientales, se descargó el modelo digital del terreno (MDT) proveniente del satélite ALOS PALSAR de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (DAICHI), con una resolución de 12.5 m y procesado de la Imagen de radar AP_26958_FBS_F0080, capturada en 2010 y descargada en abril de 2019. Este MDT, en adición a una Ortofoto de 25 cm de resolución de la ciudad de Bogotá sirvió para definir el área de las principales cuencas y sus características morfométricas, tales como áreas y pendientes, entre otras.

Referente a cartografía temática, se dispone de las planchas de agrología de los suelos y coberturas del POMCA del Río Bogotá (2018).

4.2 INFORMACIÓN PRIMARIA

Durante la visita de campo se realiza el recorrido de la zona, lo que permite obtener la imagen general de las características hidrológicas, tipos de coberturas presentes y suelos, así como determinar las zonas en las que la cartografía y los modelos del terreno no permiten establecer con claridad la dirección de las corrientes y zonas aferentes a ciertas cuencas en terrenos planos.

En el estudio hidrológico lo primero que se llevó a cabo fue el recorrido y reconocimiento físico de la cuenca, donde evalúa sus características geomorfológicas e hidrológicas; en las geomorfológicas se observan in situ la forma de la cuenca, variaciones altitudinales, se toman las características de los cauces (Figura 1), entre otras y en las hidrológicas se miden los caudales de estos cauces, se anotan las huellas históricas de los eventos máximos y mínimos.

Figura 1 Detalle de condiciones de actuales de cauces y cuerpos de agua del sistema hídrico Torca - Guaymaral



Inspección de estructuras, Canal Torca, entrada a JDP



Sitio de desembocadura del sistema Torca - Guaymaral al Río Bogotá



Condición actual del Canal Guaymaral, sector bajo



Cauce de quebradas y coberturas de suelo, Zona oriental (Quebrada san Juan)



Detalle del Humedal Torca, cabecera
Fuente: WSP, 2019.



Detalle de cobertura y cauce de la quebrada Patiño

Durante la inspección visual al sistema hídrico se tuvo especial detalle en observar los componentes físicos y geomorfológicos de las cuencas, tales como:

- Características geomorfológicas, geológicas, edafológicas, cobertura vegetal y de sus suelos, entre otros.
- Verificación de todo el sistema hidrográfico de la cuenca, densidad de drenaje, características más importantes de las fuentes hídricas superficiales, aportes de redes de alcantarillado y vallados y humedales.
- Verificación de los aportes de cuencas vecinas y/o trasvase de otras cuencas.
- Verificación de la existencia de obras de represamiento y/o almacenamientos, infraestructuras de retención, estructuras de cruce, entre otros.

Con el objeto de obtener la conformación morfométrica de la totalidad del polígono de Lagos de Torca, se llevó a cabo un levantamiento de tipo Lidar, el cual fue complementado con información de levantamientos topográficos convencionales para cauces de drenajes y batimetrías en el caso de los cuerpos de agua y humedales. Cabe anotar que para la determinación morfométrica de la totalidad de las cuencas de drenaje que confluyen a este polígono, se empleó información secundaria proveniente de IGAC y Modelos de Terreno disponibles.

4.3 PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

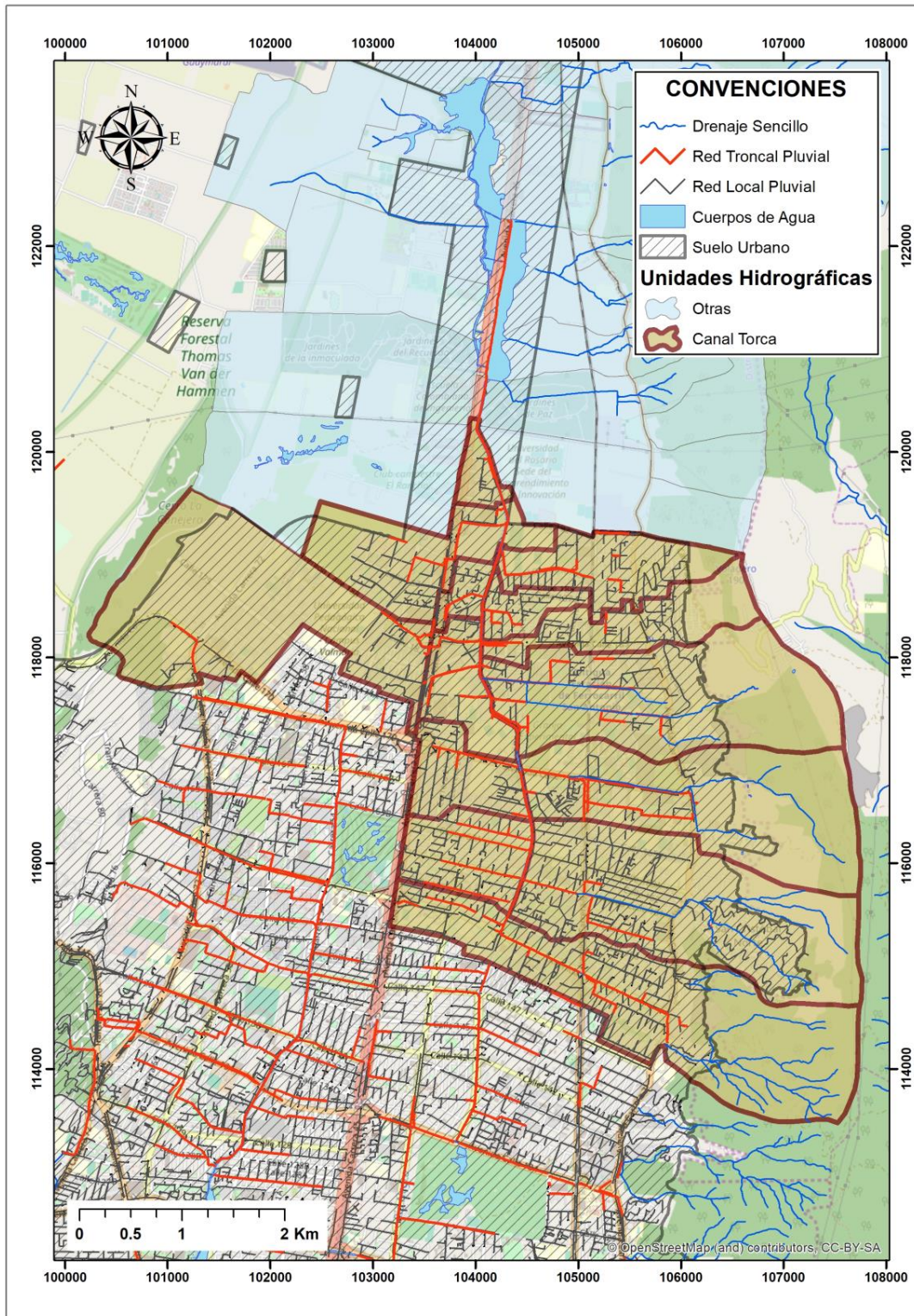
En primer lugar, se procesa la información morfométrica a partir de la cartografía base y el MDT, realizando una primera delimitación de cuencas y microcuencas. Este proceso se realiza utilizando un procesador de Sistemas de Información Geográfica (ArcGIS y QGIS), que permite mediante diferentes módulos obtener parámetros como tamaño de áreas, pendientes y perímetros de cuenca, así como realizar los cruces necesarios para extraer información de conductividad hidrológica de diversos tipos de suelos y coberturas. Esta información se procesó en formato vectorial (shape file) y en formatos raster, cuyos resultados se presentan en los mapas del Anexo 3 Anexo Cartográfico.

4.3.1 Delimitación de cuencas

Se realiza en primer lugar a partir del procesamiento en ArcGIS del MDT, mediante el módulo Arc Hydro Tools, que permite definir áreas y corrientes de los sistemas de drenaje en cuencas hidrográficas, a través del análisis de la dirección y acumulación de flujo por diferencia de elevaciones. Esta primera delimitación de cuencas se refinó a partir de la interpretación cartográfica y de imágenes satelitales disponibles a través de la identificación de límites de cuencas urbanas representados por vías, canales y colectores de la red de alcantarillado pluvial de Bogotá, esta última obtenida del Servicio Web geográfico Alcantarillado Pluvial de la Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá (EAAB) (Figura 2).

Mediante el uso de esta información se obtuvo la clasificación ordinal de las cuencas y subcuencas, longitud del cauce principal, rectángulo equivalente, altitud media de la cuenca, curva hipsométrica y de distribución de frecuencias, pendiente media de la cuenca, pendiente media, densidad de drenaje, coeficiente de compacidad o índice de gravelius, factor de forma y el coeficiente de pasividad.

Figura 2 Delimitación de la cuenca de drenaje de alcantarillado pluvial de Torca



Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

Así mismo, a partir de la información de la visita a campo se pudo establecer las direcciones de ciertos canales y cunetas cuya interpretación resultara compleja a partir de cartografía o la misma ortofoto del proyecto.

En el Anexo 3 Anexo Cartográfico 3.3 PDF 1. Cuencas hidrográficas, se presenta un mapa detallado de las cuencas que incluye la hidrografía, curva de nivel y cartografía base. De igual manera en el Anexo 5 se presenta la información de los levantamientos topográficos llevados a cabo.

4.3.2 Determinación de usos y coberturas del suelo

Los diferentes tipos de suelo se obtuvieron de la cartografía del IGAC, que determina los diferentes tipos agrológicos de los suelos; estos sirven para determinar el grupo hidrológico de cada suelo, ya que aportan información acerca de composición, profundidad y características físicas, así como la infiltración y la retención de humedad, parámetros que son determinantes en la respuesta de la cuenca ante las precipitaciones. Dada la importancia de esta característica del suelo y su cobertura, se hará un análisis particular

La cobertura de tierras, en combinación con el tipo hidrológico de suelos permite establecer el número de curva de los suelos según el método del SCS. Por tal razón es necesario discriminar dichas coberturas, lo cual se realizó a partir de la comparación de la Ortofoto tomada para el proyecto de 25 cm de resolución, con las coberturas determinadas en el POMCA del Río Bogotá, a partir de tablas de referencia.

4.3.3 Construcción de mapas de número de curva

Para la estimación de caudales se utilizó la metodología del número de curva del SCS, por lo que es necesario obtener el número de curva medio de las cuencas aferentes. Para ello se realiza el cruce entre la información de las clases agrológicas de suelos, que permiten establecer su comportamiento hidrológico, con las diferentes coberturas, que permiten a través de tablas definidas a tal efecto, determinar el número de curva, mediante procedimientos de ponderación. Cabe destacar que el número de curva se ha estimado bajo la condición actual de cobertura de los suelos.

La metodología del Número de Curva considera como variables para su determinación, el complejo de suelo hidrológico que considera la interrelación suelo – cobertura vegetal, así como la condición de humedad antecedente. El SCS define cuatro grupos de suelo:

- 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 altos contenidos de arcilla.
- Grupo D: Suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos

Los valores de CN para varios tipos de cobertura del suelo en estos tipos de suelos se encuentran tabulados por diferentes autores (Referencia 5).

De acuerdo con lo anterior, para las cuencas en el área de estudio, tanto las del costado occidental como el oriental de la Autopista Norte, con base en la actualización del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá de 2017, se determinaron los tipos de cobertura y unidades de suelo, los cuales fueron analizados específicamente para la determinación del tipo de suelo hidrológico. Con respecto a las condiciones de humedad antecedente (Tabla 1), se realizó el análisis de 5 días de precipitación antecedentes para las tormentas analizadas, el detalle de la determinación del número de curva para las unidades hidrográficas definidas se presenta en el numeral 5.8.1.4.

Tabla 1 Clasificación de clases antecedentes de humedad (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: (Chow & Maidment, Hidrología Aplicada, 1994).

4.3.4 Análisis de datos de precipitación

Para este factor se llevó a cabo un análisis específico de eventos de precipitación máximos para la zona de estudio, con el objeto de obtener diagramas de distribución espacial y temporal particulares a la zona del borde norte de la ciudad, siguiendo la misma metodología establecida por Ingetec en el Informe de Tormentas del año 2015. De este mismo procedimiento se obtienen el análisis estadístico de las precipitaciones, de tal forma que se puedan determinar las máximas precipitaciones para diferentes periodos de retorno requeridos para tal análisis.

Teniendo en cuenta que el estudio de tormentas de la EAAB se realizó recientemente (2015) por la firma Ingetec S.A., el presente análisis se enfoca en la determinación del comportamiento de espacial y temporal de la precipitación para la zona de estudio, según lo recomienda dicho consultor, dada la extensión del área de análisis.

En lo que respecta a las Curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF), se acogerán los resultados del estudio realizado por Ingetec en el año 2015, teniendo en cuenta que su enfoque directo fue la generación de este tipo de curvas para toda la Sabana de Bogotá y que por lo reciente, no se amerita su complementación. Este aspecto fue acordado con la dependencia de Hidrología de la EAAB. Para el efecto se recibió y analizó la información suministrada por la EAAB del estudio de tormentas de INGETEC (2015), verificando la validez de los resultados de este y que en lo que respecta a las curvas IDF, podrían aplicarse en el presente estudio, sin necesidad de realizar ajustes. Por otro lado, esta revisión llevó también a establecer, que el enfoque de esta consultoría será, por lo tanto, realizar la actualización y complementación de los análisis para la determinación de las curvas PADF para la cuenca Torca-Guaymaral, fundamentado en las conclusiones de esa consultoría, en cuanto a que se deberán llevar a cabo estudios de distribución espacial de tormentas de manera particular en sectores de la Sabana de Bogotá.

4.3.5 Construcción de modelos lluvia-escorrentía

En el presente estudio se definen las cuencas de drenaje, que se caracterizan en su mayoría por tener zonas de nacederos en los cerros orientales de Bogotá. La distribución de los drenajes urbanos en sistemas de colectores y corredores viales implica estudiar los efectos acumulativos y de pérdidas de la escorrentía a su llegada a los distintos puntos de interés. Este aparte del documento de actualización hidrológica hará énfasis en la estimación de los caudales máximos de crecida para diversos períodos de retorno; el cálculo de caudales medios y mínimos fue objeto de un análisis específico en el Anexo 6 de este documento.

El cálculo de caudales por hidrograma sintético se realizó a partir del hidrograma unitario del Soil Conservation Service (SCS) implementando los parámetros de cuencas y meteorológicos en el software HEC-HMS 4.2 de la U.S. Army Corps of Engineers (USACE). Este procedimiento se detalla en el numeral 5.7 de este documento.

4.3.6 Determinación de caudales de diseño

Los caudales de diseño son los resultantes de aplicar las máximas lluvias, para cada periodo de retorno aplicable, según el procedimiento del hidrograma unitario. Esta actividad toma los resultados de los análisis de distribución temporal y espacial de la precipitación, en conjunto con los parámetros morfométricos, características del suelo y cobertura de las cuencas del área de estudio y mediante la metodología de transformación de lluvia a escorrentía superficial, se estiman los caudales de crecida. El desarrollo de este procedimiento se detalla en el Numeral 5.7.

4.3.7 Período de Retorno de diseño

Para la definición del período de retorno de diseño se han tenido en cuenta diversos criterios establecidos en la normatividad vigente al respecto así:

- Norma NS-163 (EAAB)
- Norma NS-085 (EAAB)
- Decreto 2245 de diciembre 2017

En las dos normativas se expresa que para cuerpos de agua que han sido intervenidos y que su dinámica fluvial se ha visto alterada, principalmente en tramos donde en sus márgenes ya hay asentamientos urbanos consolidados, debe contemplarse las nuevas condiciones de acuerdo con el criterio hidráulico definido como el cauce por el cual puedan discurrir sin inconvenientes los caudales con período de retorno de 100 años sin que se produzca desbordamientos.

En cuerpos de agua que han tenido modificaciones considerables en su morfología y donde no se han dejado posibilidades para el almacenamiento temporal de agua y sedimentos (llanura inundable ocupada), el componente hidrológico de la ronda hídrica se debe definir por el espacio que requiere el flujo en un evento de mayor importancia y al menos con 100 años de período de retorno.

4.3.8 Modelo hidráulico

La conformación del modelo hidráulico tiene como insumo el modelo de terreno (MDT) construido a partir de la conjunción de los resultados de los levantamientos topográficos empleados durante la etapa de toma de información. Estas metodologías incluyen el Lidar, las batimetrías de cuerpos de agua léntico y lótico, y el levantamiento de topografía convencional para los detalles, cauces de quebradas, jarillones, estructuras, etc.

El MDT permitió generar una superficie bidimensional de la zona de interés a partir de la cual se establecieron las condiciones de frontera y las condiciones iniciales incorporadas a partir del análisis hidrológico, parámetros hidráulicos, estructuras de cruce, teniendo en cuenta criterios de estabilidad del modelo hidráulico con respecto a la velocidad de propagación del flujo a través de las celdas, considerando aspectos como el tamaño de estas y el intervalo de tiempo de resolución del sistema. En el Capítulo 6 se presenta el detalle del proceso de elaboración del modelo hidráulico y se presentan los resultados de este.

5 ANÁLISIS HIDROLÓGICO

5.1 ÁREA DE ESTUDIO

5.1.1 Delimitación del área

El área de estudio se determinó a partir del cruce del insumo cartográfico del área del humedal, reconocido a través de la Resolución 033 de 1991 y delimitado por el Decreto 190 del 2004, e igualmente se tomaron en cuenta los nueve corredores ecológicos y sus cuencas asociados a los drenajes reconocidos como afluentes del humedal; los canales de Torca y Guaymaral que funcionan como conectores entre los sectores del humedal, y el conector de desagüe de las aguas del humedal hacia el río Bogotá. Esta zona representa un área total de la cuenca de 5708 ha, de los cuales 1803 pertenecen al ámbito del Plan Zonal Lagos de Torca, como lo establece el Decreto 088 de 2017.

5.1.2 Recopilación y análisis de la información

En la Tabla 2 se presentan las estaciones pluviográficas cercanas al área de estudio, a partir de las cuales se obtuvo la información de precipitación a escala horaria, para el análisis espacial de precipitación. De estas estaciones, se seleccionaron las tormentas más representativas correspondientes al periodo 2012 a 2017, junto con la información disponible de la base de datos del informe de Ingetec 2015, que contiene datos de tormentas desde el año 2004 hasta el 2012, que a su vez complementó las analizadas por dicho consultor en los estudios de los años 1995 y 2005. En la Figura 3 se presenta la localización de estas estaciones con respecto al área de estudio.

Tabla 2 Estaciones pluviográficas área de estudio

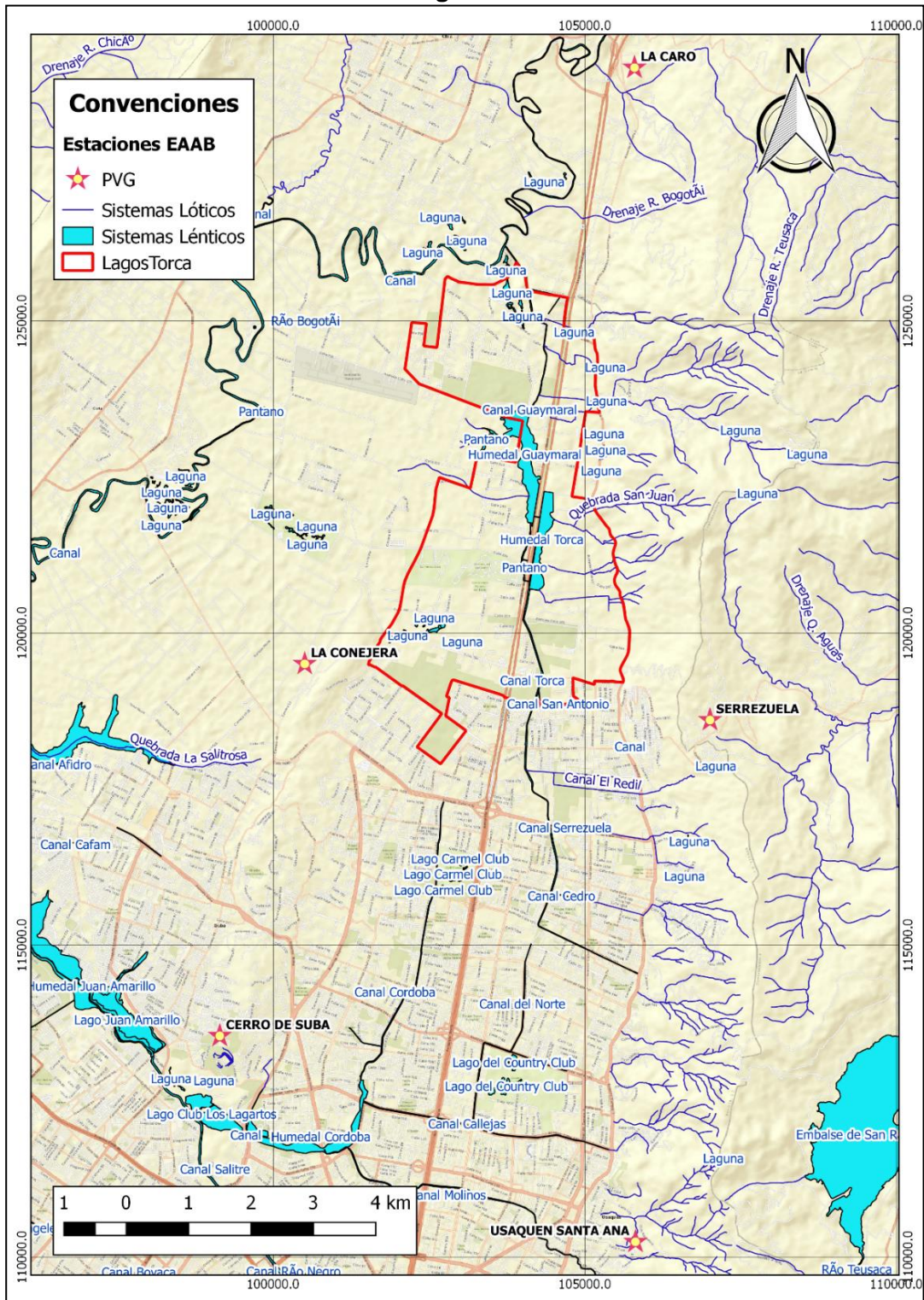
| CÓDIGO | NOMBRE ESTACIÓN | ENTIDAD | TIPO | FECHA INICIO | FECHA FIN | ELEVACIÓN (m.s.n.m.) |
|---------|-------------------|---------|------|--------------|------------|----------------------|
| 2120031 | CERRO DE SUBA | EAAB | PVG | 01/04/1946 | 21/10/2018 | 2691 |
| 2120111 | USAQUEN SANTA ANA | EAAB | PVG | 01/03/1929 | 25/09/2018 | 2647 |
| 2120202 | SERREZUELA | EAAB | PVG | 01/01/1990 | 13/08/2018 | 2800 |
| 2120208 | LA CONEJERA | EAAB | PVG | 30/05/1990 | 10/08/2018 | 2500 |
| 2120531 | LA CARO | EAAB | PVG | 01/01/1990 | 08/08/2018 | 2560 |

Fuente: EAAB, 2019.

5.2 ANÁLISIS ESPACIAL DE TORMENTAS

Se realizó el análisis espacial de eventos extremos de precipitación sobre áreas extensas, para establecer las relaciones entre la precipitación máxima anual de un aguacero con cierta duración, que ocurre sobre un área extensa con un periodo de retorno definido. A estas relaciones se les conoce como curvas PADF (Precipitación – Área – Duración – Frecuencia). A partir de estas relaciones se pretende obtener las tormentas de diseño, aplicando la misma metodología empleada por Ingetec (2015).

Figura 3 Localización estaciones Pluviográficas



Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

Para determinar las relaciones PADF, actualizadas hasta el año 2017, se empleó la información disponible de tormentas en los años 2004 – 2012, del estudio de Tormentas de INGETEC (2015) y se complementó con la información disponible en las estaciones de estudio hasta el año 2017, esta información se presenta en el Anexo 1.1 Datos Lluvias Analizadas. El procedimiento llevado a cabo en el presente estudio se basa en lo plasmado en el estudio de Tormentas de INGETEC de 2015, en el cual se presenta el detalle de la metodología para la elaboración de las relaciones PADF.

De acuerdo con el área de influencia del proyecto, se establecieron áreas diferentes con respecto al estudio de INGETEC, por el tamaño del área de estudio, aunque se conservaron las duraciones de aguacero. Estos parámetros se describen a continuación:

- Áreas seleccionadas: 100 ha, 500 ha, 2000 ha, 8000 ha y 15000 ha.
- Duraciones en horas: 1,3,6,9,12 y 15
- Periodos de retorno en años: 3,5,10,25,50 y 100

Con la base de datos de las tormentas actualizadas se generó un resumen mensual de tormentas para todo el período de 2004 a 2017, en el que se muestra la precipitación total diaria registrada en cada una de las estaciones del área de estudio, este resumen se presenta en el Anexo 1.1 Datos Lluvias Analizadas – Resumen Tormentas Torca.

El análisis de distribución de la precipitación consideró la información disponible en el Estudio de Tormentas de Ingetec del año 2015, como punto de partida para la actualización de esta consultoría, con miras a comparar los resultados de aquel con respecto a los resultados obtenidos en este estudio, dado que no corresponde a esta consultoría llevar a cabo un análisis particular de las tormentas, como si lo contempló para Ingetec en su momento, para la totalidad de la Sabana.

A partir de este resumen, se establecieron los días en los cuales se registraron lluvias en un mayor número de estaciones con los valores medios y de precipitación total más altos. Para cada una de esas fechas se generó un resumen diario de tormentas en el que se muestra la precipitación total horaria que fue registrada simultáneamente en las estaciones y el número de estaciones que registraron el evento de lluvia.

A partir del resumen diario de tormentas horarias se establecieron para cada una de las duraciones (1, 3, 6, 9, 12 y 15 horas) las horas consecutivas con la mayor precipitación y las estaciones que registraron dicho evento, este cuadro se presenta en el Anexo 1.1 Datos Lluvias Analizadas – Acumulación Duración.

Con la información anterior se generó un reporte por tormenta y por duración que incluía la precipitación total acumulada en cada estación, y las coordenadas de las estaciones que registraron lluvia.

Para cada uno de estos reportes y con ayuda de subrutinas elaboradas en el lenguaje de programación denominado R, se realizó una interpolación espacial con el modelo de mejor ajuste a los datos, es decir se llevó a cabo el proceso de validación cruzada por diferentes métodos de interpolación espacial, y se eligió el que presentaba el menor valor del error medio cuadrático, por medio del Sistema de Información Geográfica Qgis, se

obtuvo el área dentro de las isoyetas y se calculó la precipitación media dentro de cada una de ellas aplicando la siguiente ecuación:

$$P_1 = p_1 + \frac{1}{3}(p_{max} - p_1)$$
$$P_n = \frac{P_1 A_1 + \frac{1}{2} \sum_{i=2}^n (p_i + p_{i-1})(A_i - A_{i-1})}{A_n}$$

Dónde:

P_1 : Precipitación media sobre el área encerrada por la isoyeta con mayor valor.

p_1 : Valor de la isoyeta con mayor valor.

p_{max} : Precipitación máxima puntual de la tormenta.

P_n : Precipitación media sobre el área encerrada por la isoyeta del enésimo valor.

p_i : Valor de la isoyeta de precipitación para el área i .

A_n : Área encerrada dentro de p_i .

Con respecto a la distribución espacial de la precipitación se tuvo en cuenta el informe de Tormentas de Ingetec (INGETEC, 2015), que establece con respecto a la definición de isoyetas a partir de los resultados de la actualización de las curvas PADF, que, durante el análisis espacial de tormentas consideradas en el estudio, se detectaron eventos con distribuciones espaciales dispersas difícilmente representables mediante isoyetas elípticas, por lo tanto concluyen que la aplicabilidad de isoyetas con patrón elíptico se encuentra alrededor del 2% de las tormentas presentando un coeficiente de correlación (r^2) superior a 0.756. Lo que sugiere que las isoyetas de patrón elíptico no representan adecuadamente los eventos de tormentas registrados en la Sabana de Bogotá.

De acuerdo con lo anterior, en el presente estudio, para el análisis espacial de tormentas, se procedió a determinar el patrón espacial de la precipitación a partir de los datos de precipitación registrados en cada una de las estaciones pluviométricas en el área de estudio. Una vez identificado este patrón, variable para cada tormenta y duración, se movió sobre el área con el fin de obtener el máximo caudal pico teórico, producido sobre las cuencas, con el fin de obtener el nivel de aguas máximo instantáneo sobre el humedal Torca Guaymaral.

La interpolación espacial es un procedimiento matemático utilizado para estimar el valor de un atributo, en este caso, la precipitación, en una localidad o celda a partir de valores obtenidos en puntos de medición. En el caso de la precipitación la interpolación espacial transforma un número finito de observaciones de las estaciones meteorológicas, en un espacio continuo de manera que su patrón espacial sea comparable con aquel presentado por las observaciones puntuales de origen (Clark, 1979).

Existen muchos métodos de interpolación para la espacialización de variables climáticas a partir de registros de estaciones meteorológicas, de acuerdo con Vicente-Serrano (Serrano, M., & Saz, 2003), el método de interpolación de mejor rendimiento varía en función del área y la escala espacial deseada para el mapeo. También son importantes la duración temporal y la naturaleza de la variable climática a interpolar; los campos de precipitación son discontinuos espacialmente en escalas de tiempo más cortas y más continuos en escalas de tiempo más largas (New, Todd, Hulme, & Jones, 2002). Para

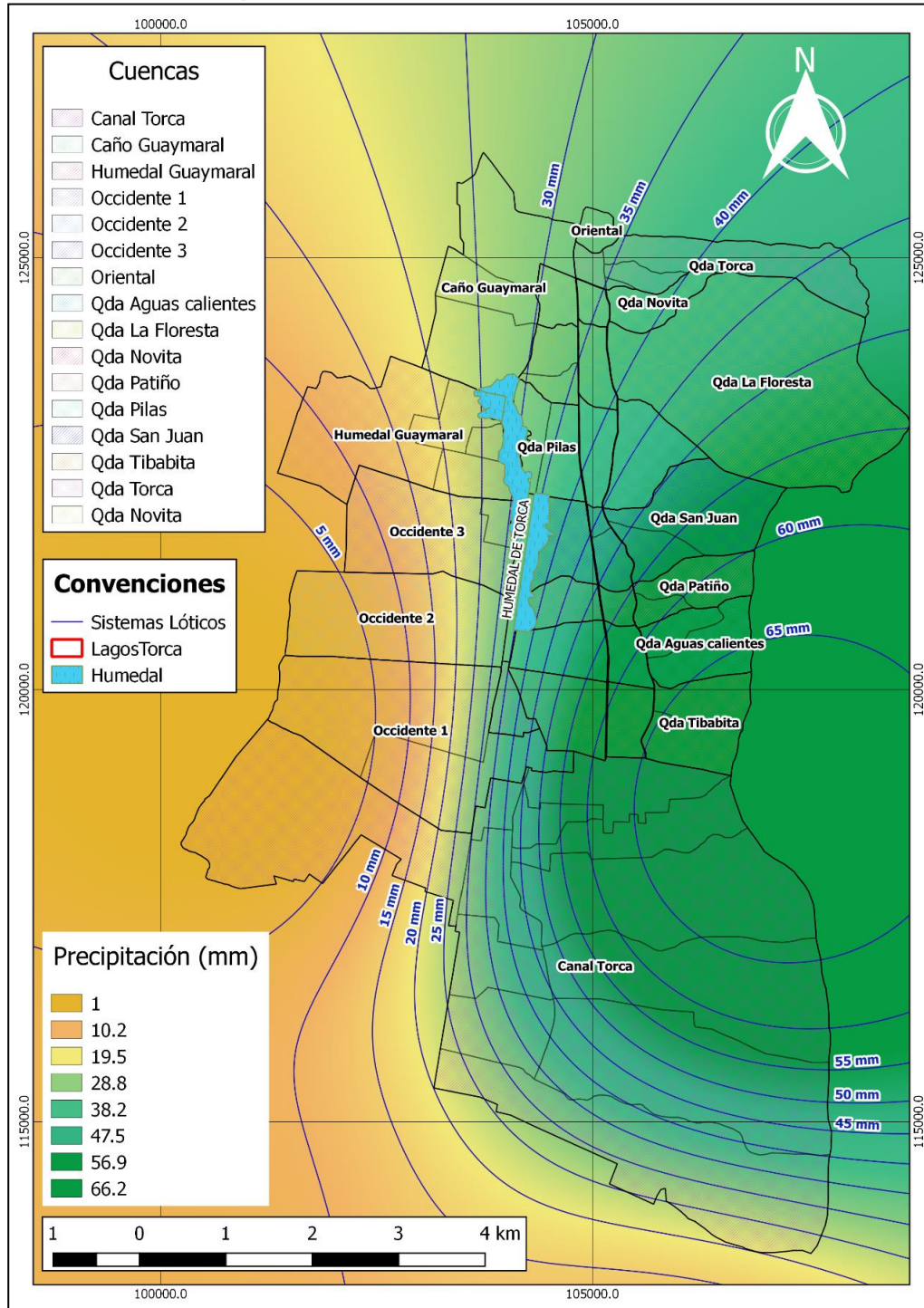
representación espacial de los datos de precipitación de las estaciones cercanas al área de estudio, se realizó el análisis y validación de diferentes métodos de interpolación:

- **Inverse Distance Weighted (IDW):** Es un método de estimación determinístico mediante el cual los valores en los puntos no muestreados se determinan mediante una combinación lineal de valores en los puntos muestreados conocidos. La ponderación de los puntos cercanos es estrictamente una función de la distancia, no se consideran otros criterios. Este enfoque combina ideas de proximidad, como los polígonos de Thiessen, con un cambio gradual de la superficie de tendencia. El supuesto es que los valores más cercanos a la ubicación no muestreada son más representativos del valor a estimar que los valores de las muestras más alejadas. Los pesos cambian según la distancia lineal de las muestras desde el punto no muestreado; en otras palabras, las observaciones cercanas tienen un peso mayor (Hartkamp, De Beurs, Stein, & White, 1999).
- **Splining:** Esta es una técnica de interpolación determinística, localmente estocástica que representa curvas bidimensionales en superficies tridimensionales. Estima los valores en las ubicaciones no muestreadas utilizando una función matemática que minimiza la curvatura general de la superficie, lo que resulta en una superficie suave que pasa exactamente por los puntos de entrada.
- **Global Polynomial Interpolation:** Este método determinístico, ajusta una superficie suave que es definida por una función matemática, un polinomio, al registro de datos en las estaciones. La superficie del polinomio global cambia gradualmente y captura patrones de escala gruesa en los datos.
- **Natural Neighbor Interpolation (NNI):** Este método determinístico toma lo mejor de los polígonos y triangulación de Thiessen y elige objetivamente el número de vecinos a partir de los cuales interpolar en función de la geometría. Los pesos para cada estación se seleccionan en función del área proporcional en lugar de la distancia, produce una superficie interpolada que tiene una pendiente continua en todos los puntos, excepto en los puntos de entrada originales. Es un interpolador exacto, ya que reproduce las observaciones en las ubicaciones de las estaciones.

El siguiente paso es la selección de la metodología de interpolación más representativa, por medio de la validación de los campos de precipitación generados. Para realizar esta selección se realizó el procedimiento de validación cruzada, el cual consiste en la eliminación deliberada de una ubicación muestreada y generar la predicción en este punto, de esta forma para las demás estaciones de medición, consignando el error generado por cada campo simulado. Como parámetro de comparación se empleó la Raíz del Error Medio Cuadrático (RMSE), seleccionando el modelo que presenta el menor error acumulado. Un aspecto importante a tener en cuenta es que para este estudio, no se consideraron los métodos de interpolación estocásticos como Krigging que fue el empleado por Ingetec en su informe, ya que su desempeño depende en gran medida de la cantidad de datos observados, se considera que 5 estaciones no son suficientes para emplear adecuadamente este tipo de interpolación estocástica (Vargas, Santos, Cárdenas, & Obregón, 2011).

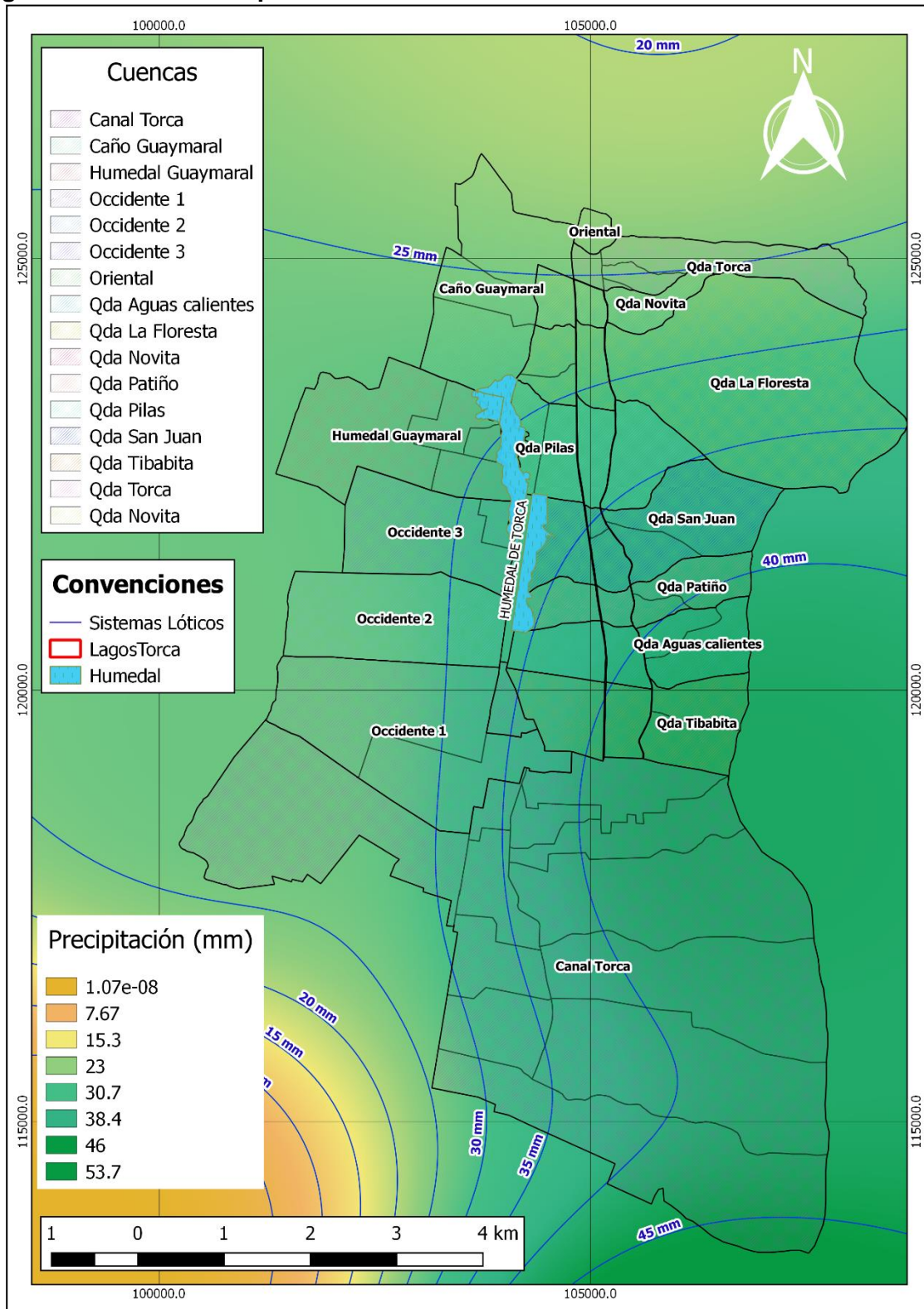
A modo de ejemplo, en la Figura 4 se presenta el patrón espacial de tormenta máxima para el año 2016, de una hora de duración, donde se aprecia que el foco de tormenta se localiza en los cerros orientales, específicamente a la altura de la estación Serrezuela. En el Anexo 1 Análisis Precipitación – 1.3 Distribución espacial precipitación, se presentan los patrones de distribución espacial para cada año analizado y cada duración de tormenta. En la Figura 5 se presenta el patrón espacial de la precipitación para duración de 3 horas del año 2017, en la cual se aprecia que el centro de la tormenta se ubica en la estación Usaquén Santa Ana y presenta una distribución espacial muy diferente a la tormenta de duración 1 hora para el año 2016. Por esta razón, en el presente estudio, se decide encontrar el patrón de precipitación que mejor ajuste presente a los datos específicos para cada año y duración, y, con base en este patrón, se determinan las precipitaciones para las cuencas que conforman el sistema Torca – Guaymaral, desplazando el centro de la tormenta al centroide de cada una de las cuencas, y, a partir del área superficial, establecer la precipitación media que presenta cada una de las cuencas. Este volumen total se distribuye temporalmente, de acuerdo con la distribución definida, para una duración de 3 horas.

Figura 4 Distribución espacial 2016 D=1 hora.



Fuente: WSP 2019, a partir de datos EAAB 2019.

Figura 5 Distribución espacial 2017 D=3 horas.



Fuente: WSP 2019, a partir de datos EAAB 2019.

Con base en la relación entre la precipitación media ponderada en cada una de las áreas y el área que encierran las isoyetas, se establecieron los valores de precipitación para cada una de áreas establecidas (100, 500, 2000, 5000, 8000 y 15000 ha) por interpolación directa de estos valores. Este procedimiento se realizó para cada una de las tormentas, teniendo en cuenta el año del evento y su duración en horas. Con la información obtenida en el paso anterior se determinaron las relaciones PAD para cada año y duración. Es decir, para cada una de las profundidades totales de precipitación, para cada una de las duraciones de tormenta analizadas, se determinó el volumen de precipitación que cae en las áreas definidas previamente, se extra este dato y se organiza tal como se presenta en la Tabla 3, en la cual se presenta como ejemplo la precipitación que cae en cada una de las áreas definidas en cada una de las duraciones.

Tabla 3 Altura de precipitación generada mediante curvas PAD año 2011 (mm)

| ÁREA (Ha) | PRECIPITACIÓN (mm) | | | | | |
|-----------|--------------------|-------|-------|-------|--------|--------|
| | D= 1h | D= 3h | D= 6h | D= 9h | D= 12h | D= 15h |
| 100 | 12.94 | 26.65 | 30.96 | 40.57 | 44.89 | 52.59 |
| 500 | 12.97 | 26.17 | 29.80 | 39.96 | 44.30 | 51.83 |
| 2000 | 13.01 | 24.53 | 29.42 | 37.78 | 42.30 | 49.19 |
| 5000 | 12.68 | 21.79 | 27.17 | 33.94 | 39.05 | 44.84 |
| 8000 | 11.90 | 19.65 | 25.14 | 30.75 | 36.66 | 41.56 |
| 15000 | 8.85 | 15.94 | 21.19 | 25.44 | 33.52 | 37.04 |

Fuente: WSP 2019, a partir de datos EAAB.

Una vez obtenidas las relaciones PAD, se organizan los datos por duración y por área, para todos los años analizados, tal como se presenta en la Tabla 4, en la cual se presentan como ejemplo, las precipitaciones que caen en 100 hectáreas para una duración de tormenta de 1 hora.

Tabla 4 Precipitación para tormentas de 1 hora en 100 hectáreas

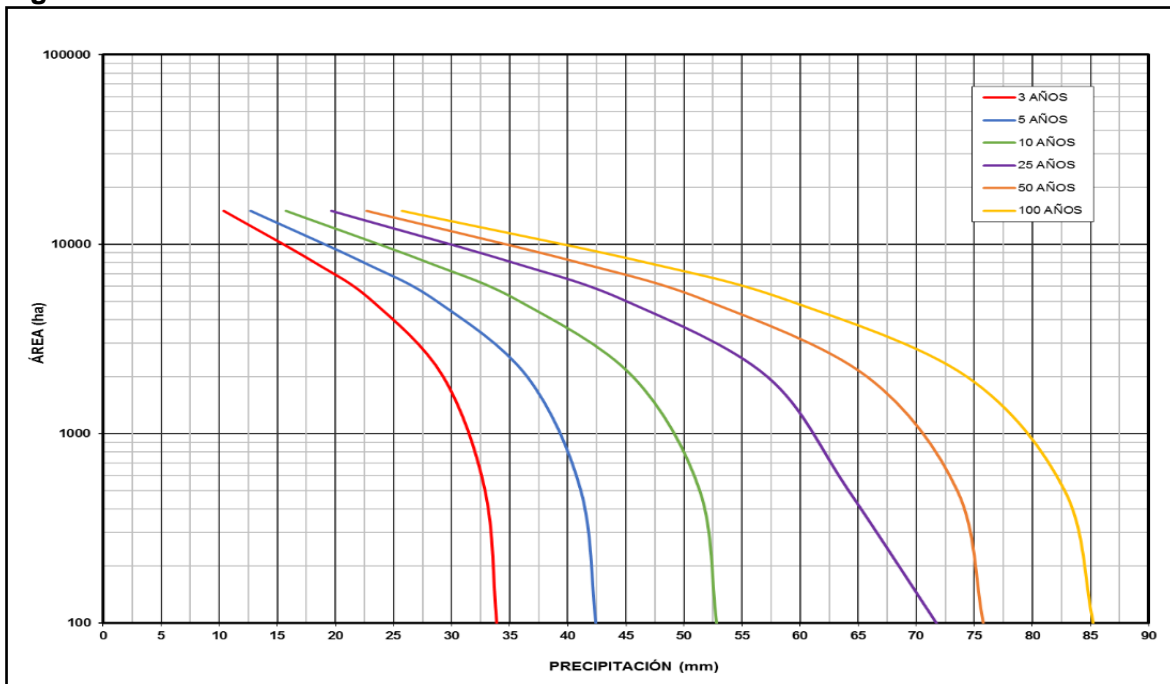
| AÑO | P (mm) |
|------|--------|
| 2004 | 17.38 |
| 2005 | 21.15 |
| 2006 | 16.39 |
| 2007 | 6.42 |
| 2008 | 20.40 |
| 2009 | 26.35 |
| 2010 | 16.91 |
| 2011 | 12.94 |
| 2012 | 17.32 |
| 2013 | 42.90 |
| 2014 | 53.77 |
| 2015 | 39.11 |
| 2016 | 70.55 |
| 2017 | 44.10 |

Fuente: WSP 2019, a partir de datos EAAB.

A estos datos, organizados de esta manera, se les realizó el análisis de frecuencia de las series de PAD para cada combinación de área (100, 500, 2000, 5000, 8000, y 15000 ha) y duración (1, 3, 6, 9, 12 y 15 horas), ajustando a la distribución GEV y GUMBEL. De este análisis se obtuvieron las relaciones PADF (Precipitación – Área – Duración – Frecuencia) de la Sabana de Bogotá.

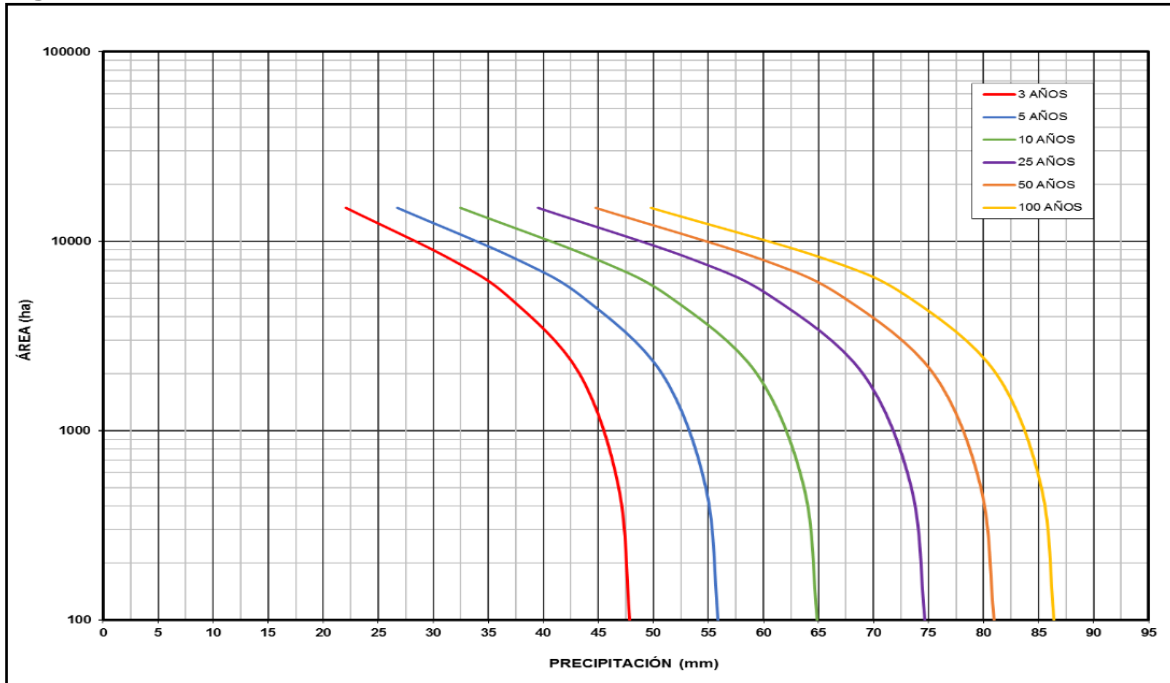
Todo este procedimiento se desarrolló por medio de subrutinas propias soportadas en R y SQL, los cuales corresponden a lenguajes de programación orientados al manejo y análisis de datos. En la Figura 6 se presentan los resultados de las curvas PADF para la duración de 1 hora, clasificados por duración de tormenta, en la cual se aprecian en el eje de las ordenadas el área en hectáreas y en el eje de las abscisas la precipitación en milímetros. En la Figura 7 se presentan las curvas para duración de tormenta de 3 horas, en la Figura 8 para duración de tormenta de 6 horas, en la Figura 9 para duración de tormenta de 9 horas, en la Figura 10 para duración de tormenta de 12 horas y en la Figura 11 para duración de tormenta de 15 horas. En el Anexo 1 Análisis Precipitación – 1.2 Relaciones PADF se presentan las curvas PAD, el análisis de frecuencias correspondiente y la clasificación por duración y periodo de retorno correspondiente.

Figura 6 Curvas PADF duración de tormenta 1 hora



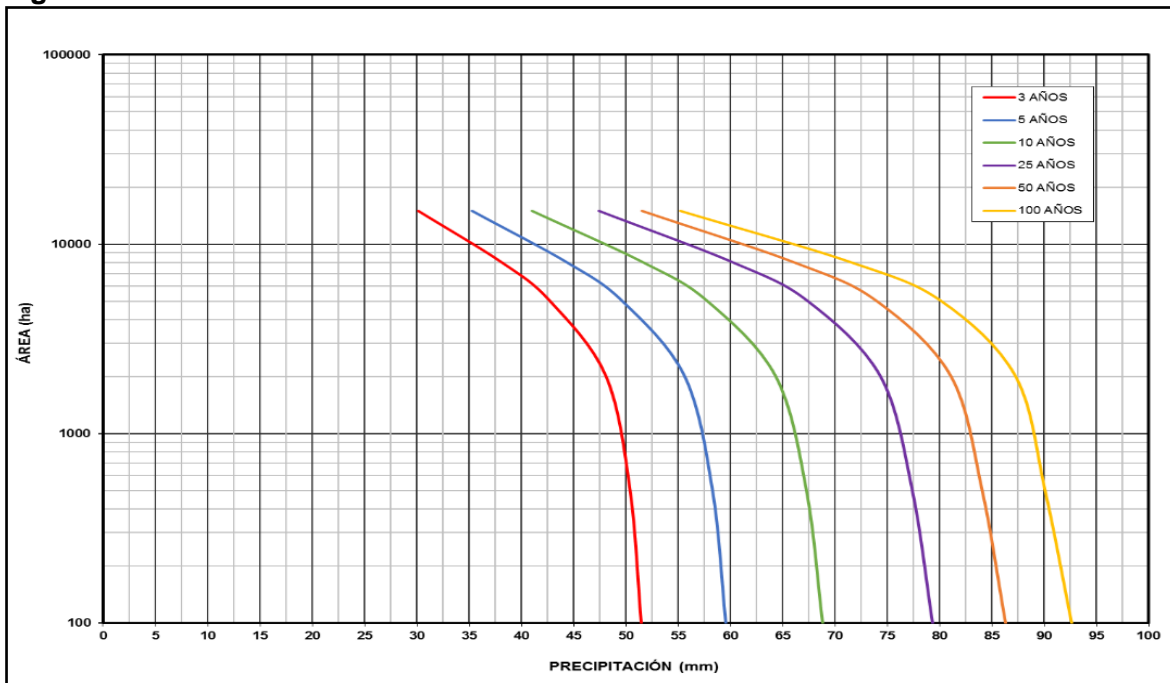
Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

Figura 7 Curvas PADF duración de tormenta 3 horas



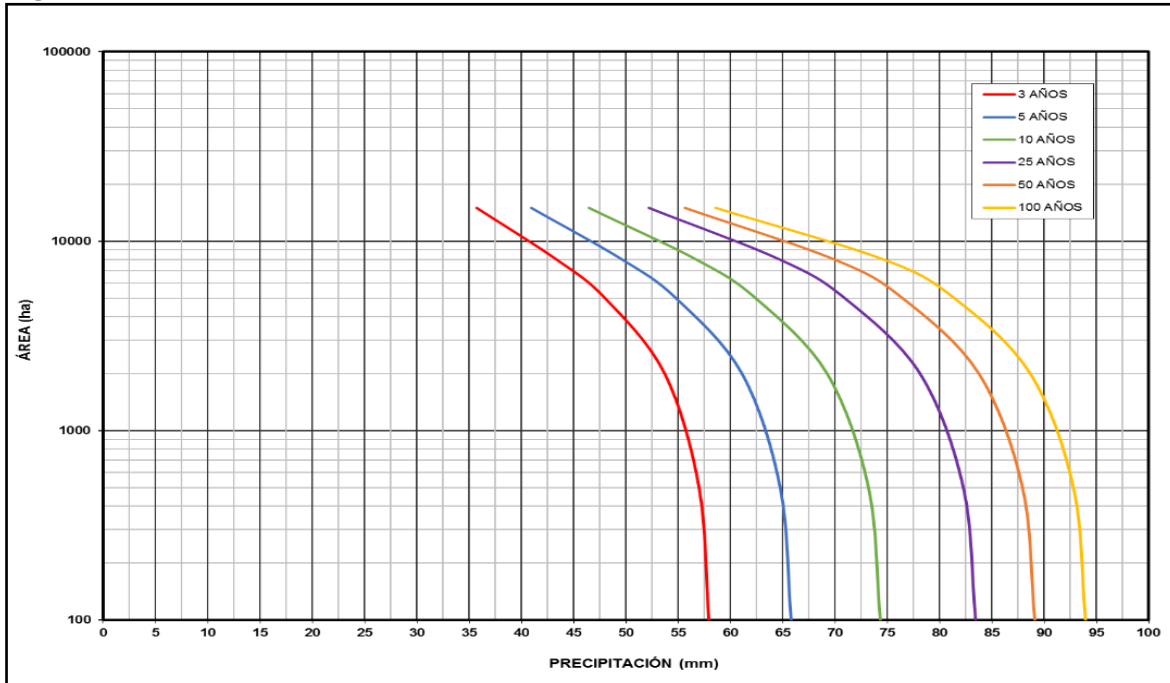
Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

Figura 8 Curvas PADF duración de tormenta 6 horas



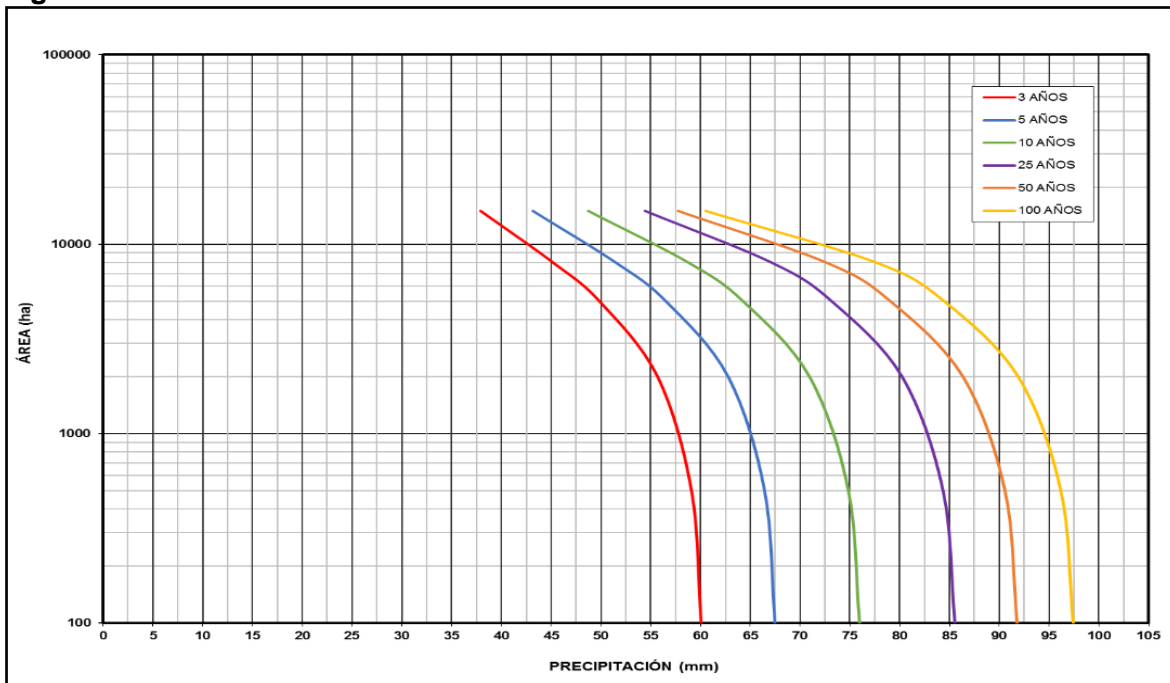
Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

Figura 9 Curvas PADF duración de tormenta 9 horas



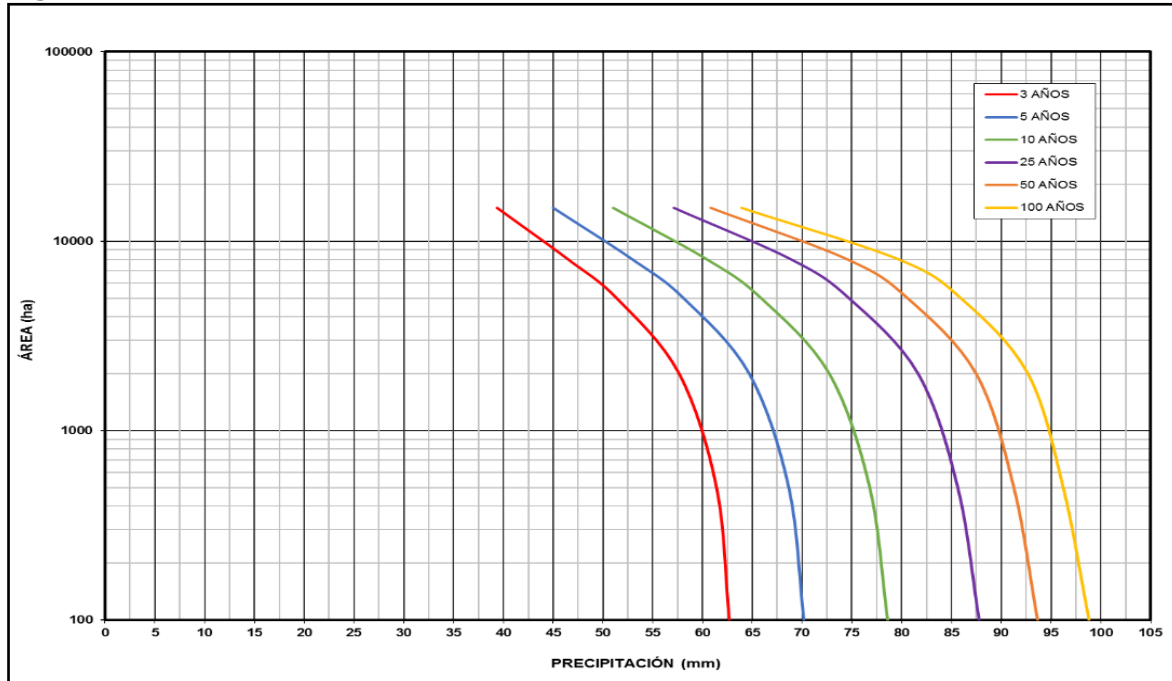
Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

Figura 10 Curvas PADF duración de tormenta 12 horas



Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

Figura 11 Curvas PADF duración de tormenta 15 horas



Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

En la Tabla 5 se presentan los volúmenes de precipitación obtenidos a partir del análisis de las relaciones Precipitación – Área – Duración – Frecuencia, para las diferentes duraciones seleccionadas y los diferentes periodos de retorno. La asignación de la precipitación para cada área, diferente a la obtenida en el análisis, se calcula por medio de interpolación lineal, tal como se especifica en la referencia de la metodología (INGETEC, 2015). Se aprecia que los volúmenes de precipitación para un área de 100 ha y de 500 ha, son muy similares, las cuencas en su mayoría presentan áreas en este rango de precipitación, por lo cual las variaciones de los volúmenes son muy pequeñas, cambiando inclusive en algunas cuencas tan solo en el segundo decimal.

Tabla 5 Relaciones PADF

| DURACIÓN | ÁREA [ha] | PRECIPITACIÓN [mm] | | | | | |
|----------|--------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | TR3 | TR5 | TR10 | TR25 | TR50 | TR100 |
| 1 HORA | 100 | 33.88 | 42.41 | 52.82 | 71.72 | 75.79 | 85.22 |
| 1 HORA | 500 | 32.88 | 41.12 | 51.37 | 64.17 | 73.55 | 82.77 |
| 1 HORA | 2000 | 29.27 | 36.50 | 45.61 | 57.17 | 65.77 | 74.34 |
| 1 HORA | 5000 | 23.19 | 28.73 | 35.85 | 45.06 | 52.07 | 59.16 |
| 1 HORA | 8000 | 18.23 | 22.47 | 28.00 | 35.30 | 40.95 | 46.78 |
| 1 HORA | 15000 | 10.39 | 12.73 | 15.74 | 19.67 | 22.67 | 25.72 |
| 3 HORAS | 100 | 47.86 | 55.90 | 64.88 | 74.65 | 80.92 | 86.42 |
| 3 HORAS | 500 | 46.86 | 54.78 | 63.68 | 73.43 | 79.72 | 85.28 |
| 3 HORAS | 2000 | 43.29 | 50.79 | 59.38 | 69.03 | 75.41 | 81.16 |
| 3 HORAS | 5000 | 37.01 | 43.71 | 51.64 | 60.94 | 67.36 | 73.34 |

| DURACIÓN | ÁREA | PRECIPITACIÓN [mm] | | | | | |
|----------|-------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | | | | |
| 3 HORAS | 8000 | 31.67 | 37.64 | 44.88 | 53.63 | 59.85 | 65.81 |
| 3 HORAS | 15000 | 22.10 | 26.72 | 32.45 | 39.56 | 44.75 | 49.82 |
| 6 HORAS | 100 | 51.45 | 59.53 | 68.83 | 79.34 | 86.33 | 92.66 |
| 6 HORAS | 500 | 50.39 | 58.27 | 67.28 | 77.41 | 84.10 | 90.12 |
| 6 HORAS | 2000 | 48.10 | 55.62 | 64.36 | 74.37 | 81.12 | 87.31 |
| 6 HORAS | 5000 | 42.75 | 49.66 | 57.83 | 67.42 | 74.03 | 80.20 |
| 6 HORAS | 8000 | 38.16 | 44.38 | 51.72 | 60.29 | 66.17 | 71.63 |
| 6 HORAS | 15000 | 30.15 | 35.28 | 41.06 | 47.42 | 51.54 | 55.19 |
| 9 HORAS | 100 | 57.94 | 65.78 | 74.34 | 83.43 | 89.10 | 93.97 |
| 9 HORAS | 500 | 57.00 | 64.73 | 73.22 | 82.26 | 87.93 | 92.82 |
| 9 HORAS | 2000 | 53.71 | 61.08 | 69.27 | 78.12 | 83.76 | 88.68 |
| 9 HORAS | 5000 | 48.02 | 54.78 | 62.44 | 70.93 | 76.48 | 81.42 |
| 9 HORAS | 8000 | 43.38 | 49.64 | 56.77 | 64.74 | 69.98 | 74.69 |
| 9 HORAS | 15000 | 35.74 | 40.94 | 46.49 | 52.21 | 55.69 | 58.60 |
| 12 HORAS | 100 | 60.06 | 67.49 | 75.99 | 85.51 | 91.79 | 97.44 |
| 12 HORAS | 500 | 59.09 | 66.45 | 74.87 | 84.32 | 90.57 | 96.19 |
| 12 HORAS | 2000 | 55.68 | 62.79 | 70.97 | 80.20 | 86.35 | 91.91 |
| 12 HORAS | 5000 | 49.84 | 56.54 | 64.29 | 73.13 | 79.07 | 84.48 |
| 12 HORAS | 8000 | 45.18 | 51.51 | 58.81 | 67.10 | 72.64 | 77.68 |
| 12 HORAS | 15000 | 37.89 | 43.17 | 48.74 | 54.39 | 57.76 | 60.55 |
| 15 HORAS | 100 | 62.69 | 70.19 | 78.59 | 87.75 | 93.65 | 98.83 |
| 15 HORAS | 500 | 61.42 | 68.68 | 76.79 | 85.61 | 91.27 | 96.24 |
| 15 HORAS | 2000 | 57.66 | 64.71 | 72.72 | 81.63 | 87.47 | 92.69 |
| 15 HORAS | 5000 | 51.40 | 58.13 | 65.89 | 74.71 | 80.60 | 85.96 |
| 15 HORAS | 8000 | 46.56 | 53.02 | 60.48 | 68.95 | 74.61 | 79.75 |
| 15 HORAS | 15000 | 39.41 | 45.05 | 51.03 | 57.15 | 60.84 | 63.91 |

Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

En la Tabla 6 se presenta el volumen de precipitación asignado cada una de las cuencas con base en los resultados obtenidos de las relaciones PADF, se aprecia que los volúmenes son muy similares para cuencas con un rango de áreas similar, solo se aprecia una variación en las cuencas de mayor tamaño, esto es un resultado intrínseco del método seleccionado.

Tabla 6 Precipitación total por cuencas (Duración del evento de 3 horas)

| CUENCA | ÁREA [ha] | PRECIPITACIÓN [mm] | | | | | |
|---------------------|--------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | | TR 3 | R 5 | TR 10 | TR 25 | TR 50 | TR 100 |
| Qda Torca 3 | 2.27 | 48.12 | 56.19 | 65.18 | 74.95 | 81.20 | 86.68 |
| Qda San Juan 3 | 6.40 | 48.11 | 56.18 | 65.16 | 74.93 | 81.19 | 86.67 |
| Qda Torca 4 | 13.67 | 48.09 | 56.15 | 65.14 | 74.91 | 81.17 | 86.65 |
| Humedal Guaymaral 3 | 14.99 | 48.09 | 56.15 | 65.14 | 74.91 | 81.16 | 86.65 |
| Qda Patiño 2 | 15.35 | 48.09 | 56.15 | 65.14 | 74.91 | 81.16 | 86.64 |

| CUENCA | ÁREA | PRECIPITACIÓN [mm] | | | | | |
|-----------------------------|--------|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | | | | | |
| Qda Patiño 3 | 15.38 | 48.09 | 56.15 | 65.14 | 74.91 | 81.16 | 86.64 |
| Qda Novita 2 | 16.13 | 48.09 | 56.15 | 65.14 | 74.91 | 81.16 | 86.64 |
| Occidente 3-1 | 17.77 | 48.08 | 56.14 | 65.13 | 74.90 | 81.16 | 86.64 |
| Qda La Floresta 4 | 18.57 | 48.08 | 56.14 | 65.13 | 74.90 | 81.15 | 86.64 |
| Qda Torca 2 | 20.04 | 48.07 | 56.14 | 65.12 | 74.89 | 81.15 | 86.63 |
| Qda San Juan 4 | 25.15 | 48.06 | 56.12 | 65.11 | 74.88 | 81.13 | 86.62 |
| Canal Torca Oriental 2 | 25.27 | 48.06 | 56.12 | 65.11 | 74.88 | 81.13 | 86.62 |
| Canal Torca Oriental_sub8 | 25.32 | 48.06 | 56.12 | 65.11 | 74.88 | 81.13 | 86.62 |
| Qda Novita 3 | 28.70 | 48.05 | 56.11 | 65.10 | 74.87 | 81.12 | 86.61 |
| Qda Aguas calientes 2 | 29.33 | 48.05 | 56.11 | 65.09 | 74.87 | 81.12 | 86.61 |
| Qda La Floresta 3 | 29.38 | 48.05 | 56.11 | 65.09 | 74.87 | 81.12 | 86.61 |
| Qda Aguas calientes 3 | 30.56 | 48.05 | 56.10 | 65.09 | 74.86 | 81.12 | 86.60 |
| Qda La Floresta 2 | 34.22 | 48.04 | 56.09 | 65.08 | 74.85 | 81.11 | 86.59 |
| Qda San Juan 2 | 36.83 | 48.03 | 56.09 | 65.07 | 74.84 | 81.10 | 86.59 |
| Canal Torca Oriental_sub7 | 37.37 | 48.03 | 56.08 | 65.07 | 74.84 | 81.10 | 86.59 |
| Qda Patiño 4 | 38.57 | 48.02 | 56.08 | 65.07 | 74.84 | 81.10 | 86.58 |
| Pilas 4 | 39.23 | 48.02 | 56.08 | 65.06 | 74.84 | 81.09 | 86.58 |
| Humedal Guaymaral 2 | 39.62 | 48.02 | 56.08 | 65.06 | 74.83 | 81.09 | 86.58 |
| Qda Tibabita 3 | 40.35 | 48.02 | 56.08 | 65.06 | 74.83 | 81.09 | 86.58 |
| Qda Pilas 2 | 41.75 | 48.02 | 56.07 | 65.06 | 74.83 | 81.09 | 86.57 |
| Qda Novita 1 | 44.35 | 48.008 | 56.063 | 65.049 | 74.820 | 81.080 | 86.568 |
| Humedal Guaymaral 1_2 | 45.48 | 48.005 | 56.060 | 65.045 | 74.817 | 81.077 | 86.565 |
| Qda Pilas 3 | 46.53 | 48.00 | 56.06 | 65.04 | 74.81 | 81.07 | 86.56 |
| Canal Guaymaral Occidente 3 | 52.37 | 47.99 | 56.04 | 65.02 | 74.80 | 81.06 | 86.55 |
| Qda San Juan 5 | 53.83 | 47.98 | 56.04 | 65.02 | 74.79 | 81.05 | 86.54 |
| Qda Tibabita 1 | 53.89 | 47.98 | 56.04 | 65.02 | 74.79 | 81.05 | 86.54 |
| Qda Tibabita 2 | 56.73 | 47.97 | 56.03 | 65.01 | 74.78 | 81.04 | 86.53 |
| Qda Patiño 1 | 59.48 | 47.97 | 56.02 | 65.00 | 74.77 | 81.04 | 86.53 |
| Qda Aguas calientes 4 | 62.55 | 47.96 | 56.01 | 64.99 | 74.77 | 81.03 | 86.52 |
| Qda Aguas calientes 1 | 70.47 | 47.94 | 55.99 | 64.97 | 74.74 | 81.00 | 86.50 |
| Canal Torca Oriental_sub9 | 73.70 | 47.928 | 55.98 | 64.96 | 74.73 | 81.00 | 86.49 |
| Canal Torca Oriental_sub10 | 77.01 | 47.92 | 55.97 | 64.95 | 74.72 | 80.99 | 86.48 |
| Qda Tibabita 4 | 80.75 | 47.91 | 55.96 | 64.94 | 74.71 | 80.98 | 86.47 |
| Qda Pilas 1 | 83.62 | 47.90 | 55.95 | 64.93 | 74.70 | 80.97 | 86.46 |
| Canal Torca Oriental_sub11 | 95.66 | 47.87 | 55.91 | 64.89 | 74.67 | 80.93 | 86.43 |
| Canal Guaymaral Occidente 2 | 108.16 | 47.84 | 55.88 | 64.85 | 74.63 | 80.90 | 86.40 |
| Canal Torca Oriental_sub5 | 111.15 | 47.83 | 55.87 | 64.85 | 74.62 | 80.89 | 86.39 |
| Canal Torca Oriental_sub6 | 113.25 | 47.82 | 55.86 | 64.84 | 74.61 | 80.88 | 86.38 |
| Canal Guaymaral Occidente 1 | 121.47 | 47.80 | 55.84 | 64.81 | 74.59 | 80.86 | 86.36 |
| Qda Torca 1 | 125.93 | 47.79 | 55.83 | 64.80 | 74.57 | 80.84 | 86.35 |
| Qda San Juan 1 | 129.91 | 47.78 | 55.82 | 64.79 | 74.56 | 80.83 | 86.33 |

| CUENCA | ÁREA | PRECIPITACIÓN [mm] | | | | | |
|---------------------------|---------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | | | | |
| Occidente 1_2 | 150.74 | 47.73 | 55.76 | 64.73 | 74.50 | 80.77 | 86.27 |
| Occidente 3 | 183.30 | 47.61 | 55.63 | 64.59 | 74.36 | 80.64 | 86.15 |
| Occidente 2 | 247.00 | 47.46 | 55.46 | 64.40 | 74.17 | 80.45 | 85.97 |
| Humedal Guaymaral 1_1 | 203.18 | 47.56 | 55.57 | 64.53 | 74.30 | 80.58 | 86.09 |
| Occidente 1_1 | 255.36 | 47.44 | 55.43 | 64.38 | 74.15 | 80.43 | 85.95 |
| Canal Torca Oriental_sub3 | 317.23 | 47.29 | 55.27 | 64.20 | 73.97 | 80.25 | 85.78 |
| Canal Torca Oriental_sub4 | 330.08 | 47.26 | 55.23 | 64.17 | 73.93 | 80.21 | 85.75 |
| Canal Torca Occidental | 365.37 | 47.18 | 55.14 | 64.06 | 73.82 | 80.11 | 85.65 |
| Canal Torca Oriental_sub2 | 370.50 | 47.17 | 55.13 | 64.05 | 73.81 | 80.10 | 85.64 |
| Canal Torca Oriental_sub1 | 388.87 | 47.12 | 55.08 | 64.00 | 73.76 | 80.04 | 85.59 |
| Qda La Floresta 1 | 570.15 | 46.69 | 54.60 | 63.48 | 73.22 | 79.52 | 85.09 |
| Canal Torca Oriental 1 | 1964.44 | 43.38 | 50.89 | 59.48 | 69.13 | 75.51 | 81.26 |

Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

En el Anexo 1 – Análisis Precipitación - 1.4 Hietogramas de diseño, se presentan los hietogramas de diseño para cada una de las cuencas, elaborados a partir de los volúmenes totales y la distribución temporal obtenida para la duración de tormenta de diseño de 3 horas, los cuales fueron introducidos al modelo hidrológico (ver Anexo 2 Análisis Caudales– 2.4 Modelo HEC-HMS).

5.3 ANÁLISIS TEMPORAL DE TORMENTAS

El criterio de selección de las tormentas corresponde a la determinación del volumen de precipitación más alto registrado por las cinco estaciones, así como registro pluviógrafo legible, a partir de las tormentas seleccionadas por cada estación, se revisaron los pluviogramas correspondientes, a partir de estos registros, se obtuvieron los hietogramas correspondientes a dichos aguaceros. En la Tabla 7 se presentan las tormentas seleccionadas para las estaciones representativas del área de estudio.

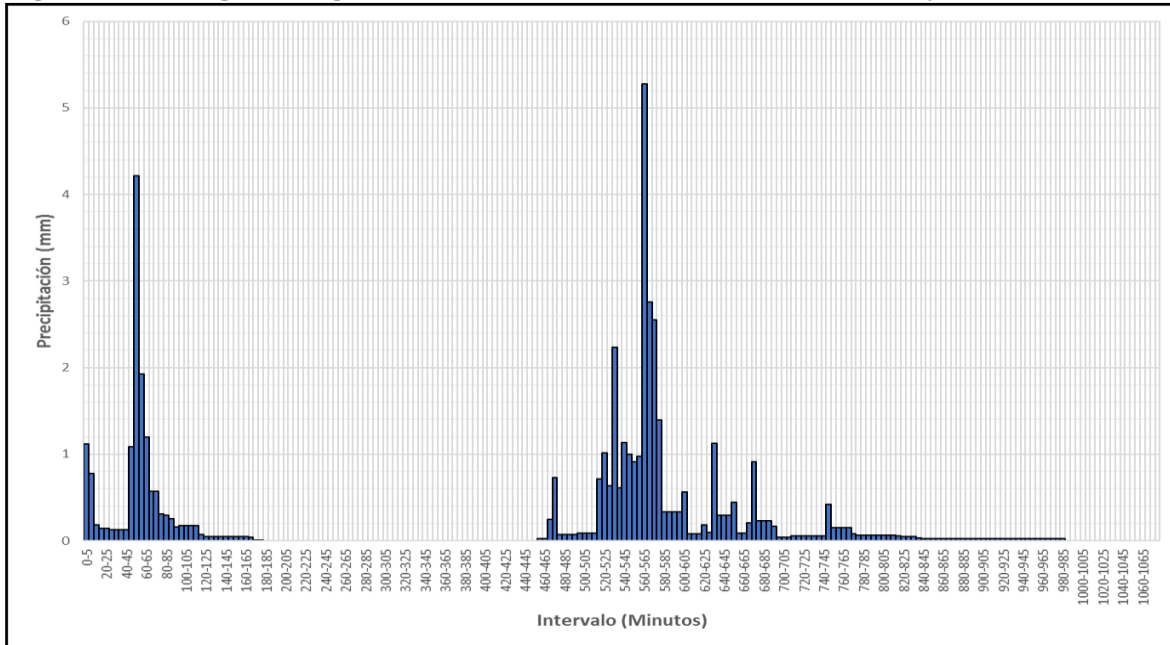
Tabla 7 Tormentas analizadas

| Código | Nombre Estación | Tormenta | P (mm) |
|---------|-------------------|------------|--------|
| 2120031 | Cerro De Suba | 27/01/2015 | 39.8 |
| 2120111 | Usaquén Santa Ana | 07/03/2017 | 73.2 |
| | | 16/04/2014 | 66.5 |
| | | 30/05/2016 | 56.5 |
| | | 06/11/2013 | 77.7 |
| 2120202 | Serrezuela | 07/03/2017 | 64.6 |
| | | 25/11/2016 | 67.5 |
| 2120208 | La Conejera | 06/11/2013 | 47.7 |
| | | 01/10/2013 | 58.3 |
| | | 03/03/2014 | 52.1 |
| 2120531 | La Caro | 03/03/2014 | 52.1 |

Fuente: WSP, 2019.

En la Figura 12 a Figura 21 se presentan los hietogramas de las tormentas correspondientes a las fechas analizadas, para las diferentes estaciones del área de estudio

Figura 12 Hietograma aguacero del 06/11/2013 – Estación La Conejera



Fuente: WSP, 2019.

Figura 13 Hietograma aguacero del 25/11/2016 – Estación La Conejera

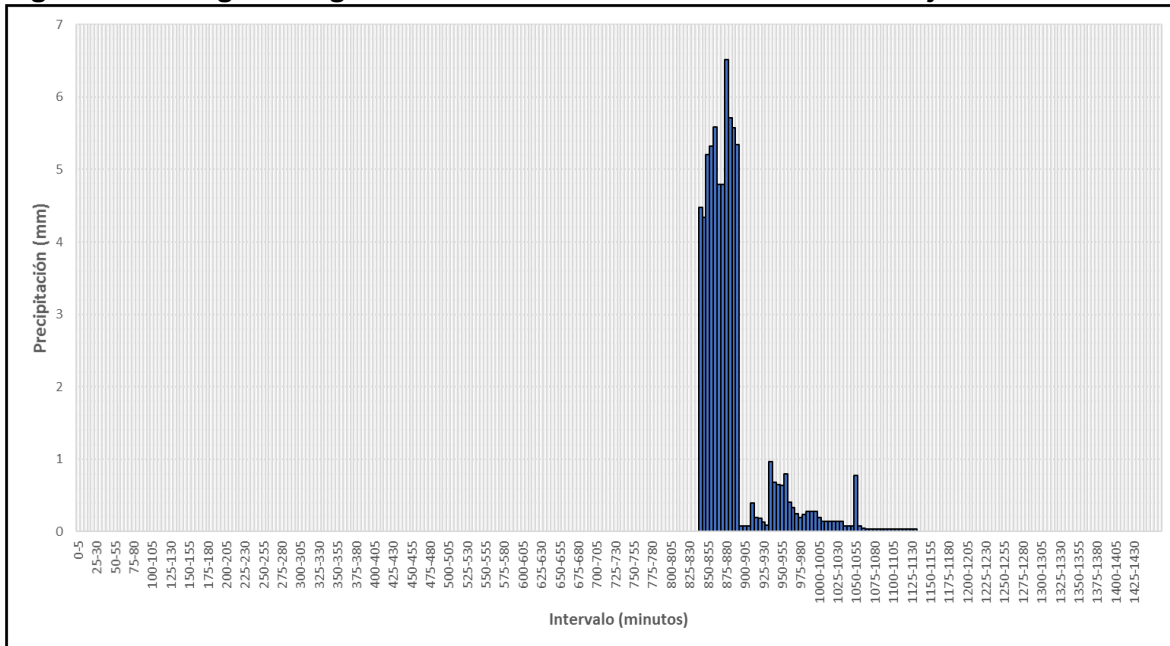
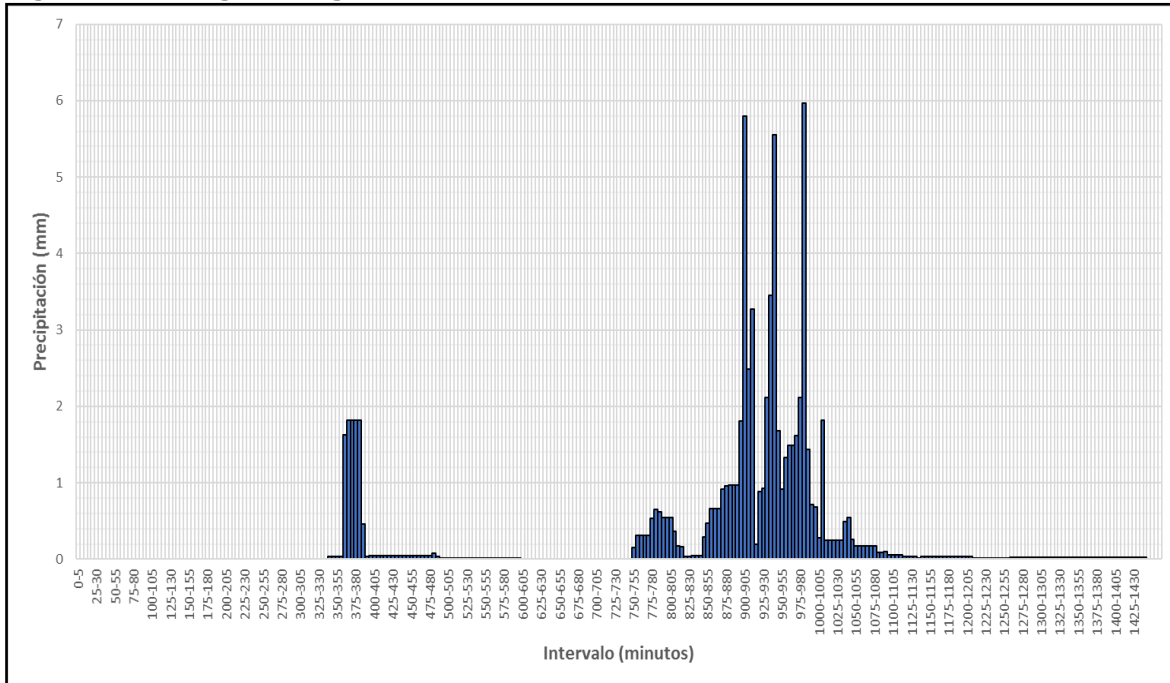
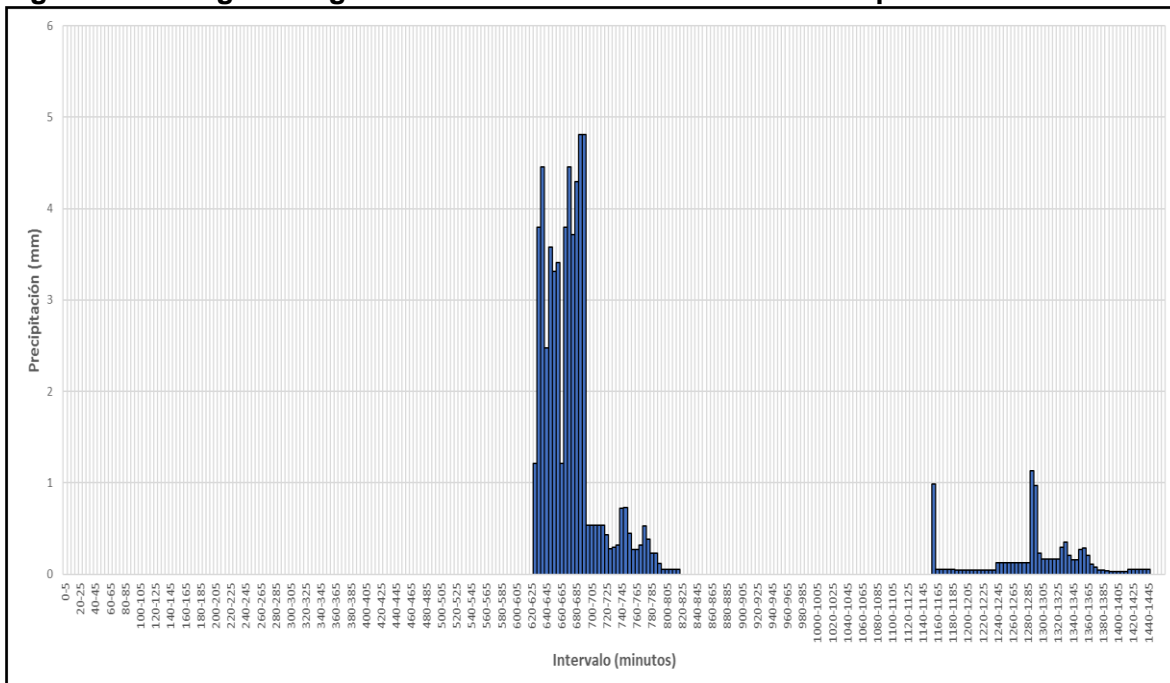


Figura 14 Hietograma aguacero del 06/11/2013 – Estación Serrezuela



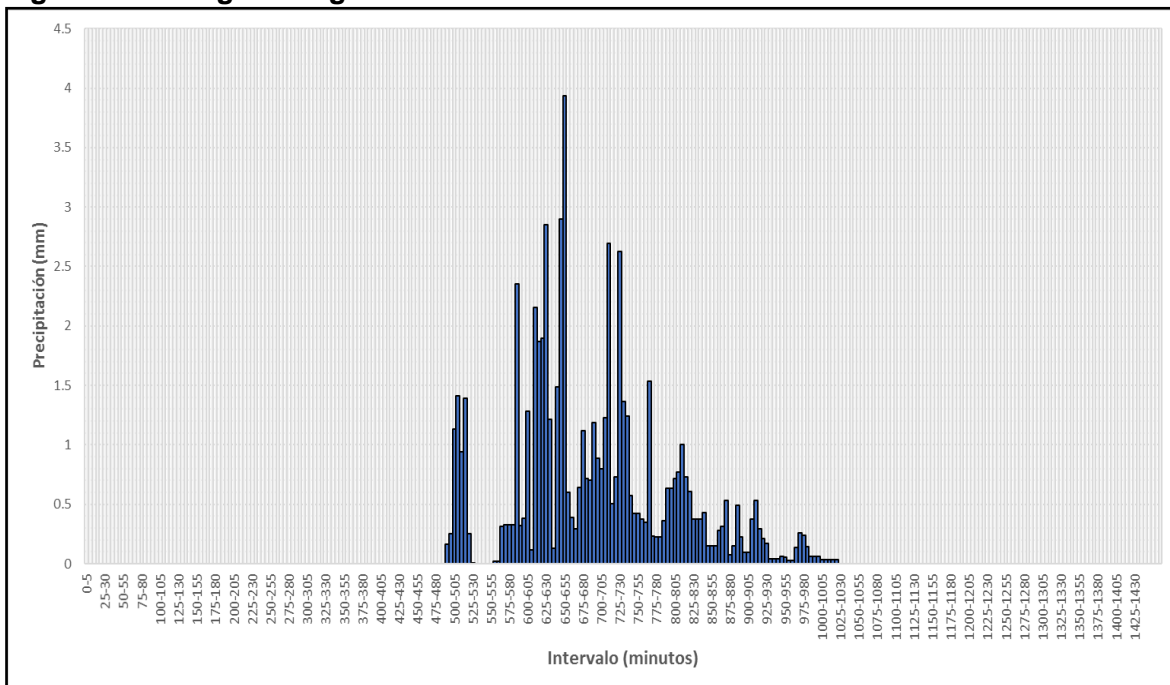
Fuente: WSP, 2019.

Figura 15 Hietograma aguacero del 16/04/2014 – Estación Usaquén Santa Ana



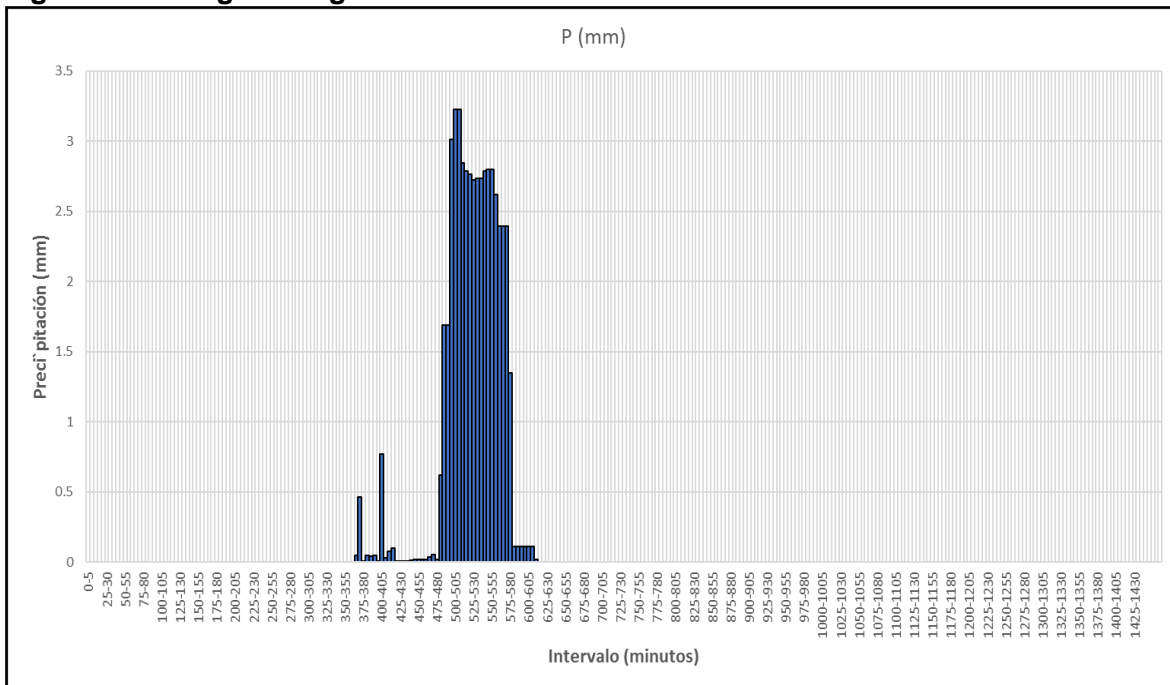
Fuente: WSP, 2019.

Figura 16 Hietograma aguacero del 07/03/2017 – Estación Serrezuela



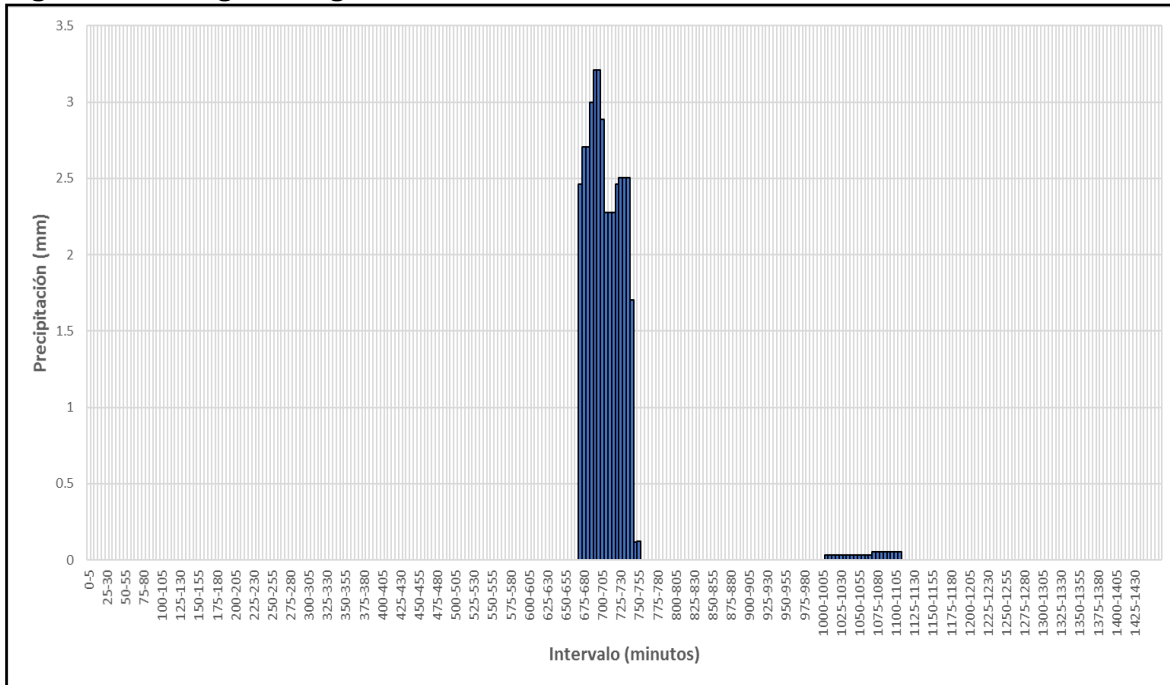
Fuente: WSP, 2019.

Figura 17 Hietograma aguacero del 03/03/2014 – Estación La Caro



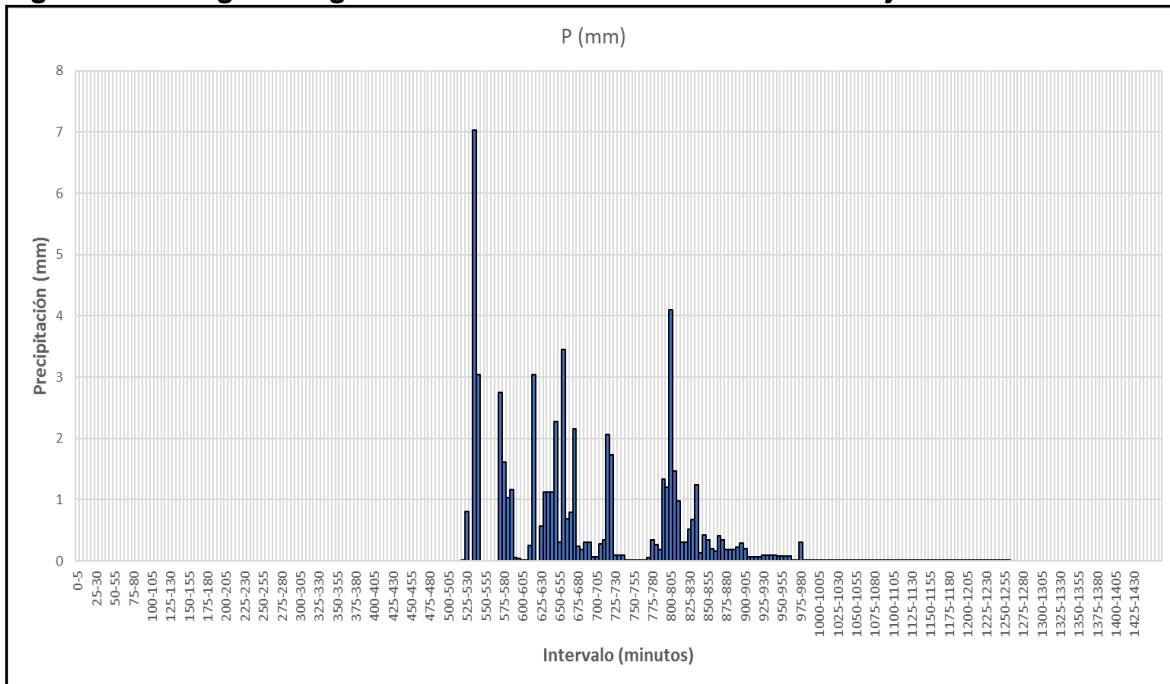
Fuente: WSP, 2019.

Figura 18 Hietograma aguacero del 27/01/2015 – Estación Cerro Suba



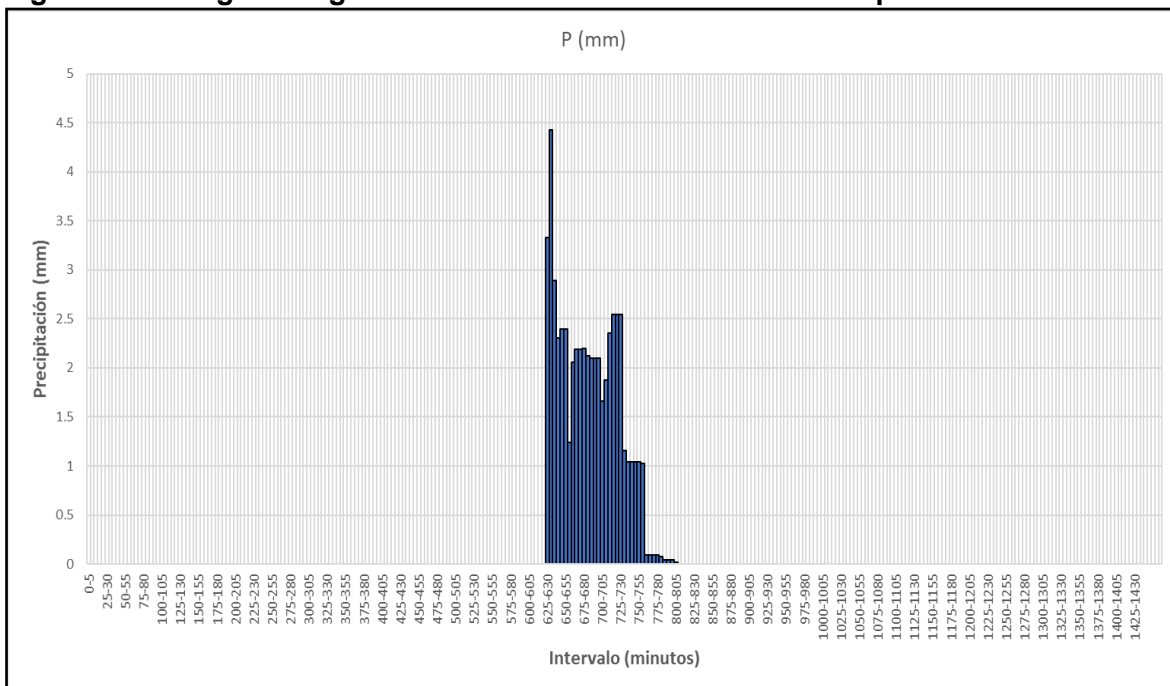
Fuente: WSP, 2019.

Figura 19 Hietograma aguacero del 01/10/2013 – Estación Conejera



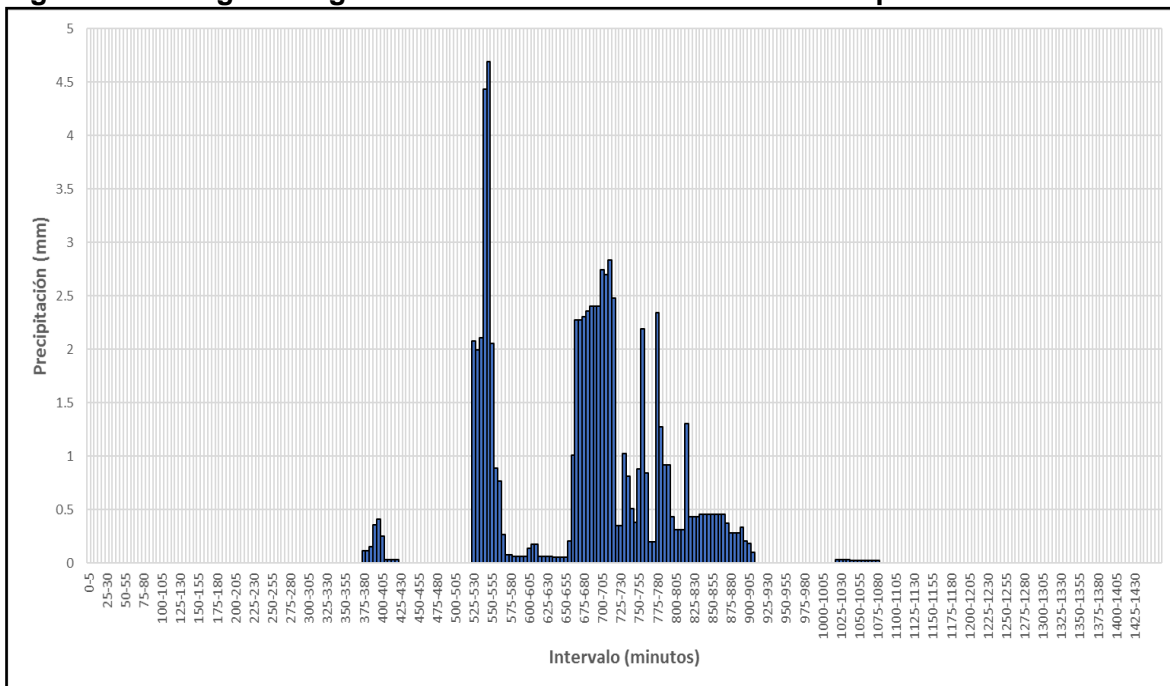
Fuente: WSP, 2019.

Figura 20 Hietograma aguacero del 30/05/2016 – Estación Usaquén Santa Ana



Fuente: WSP, 2019.

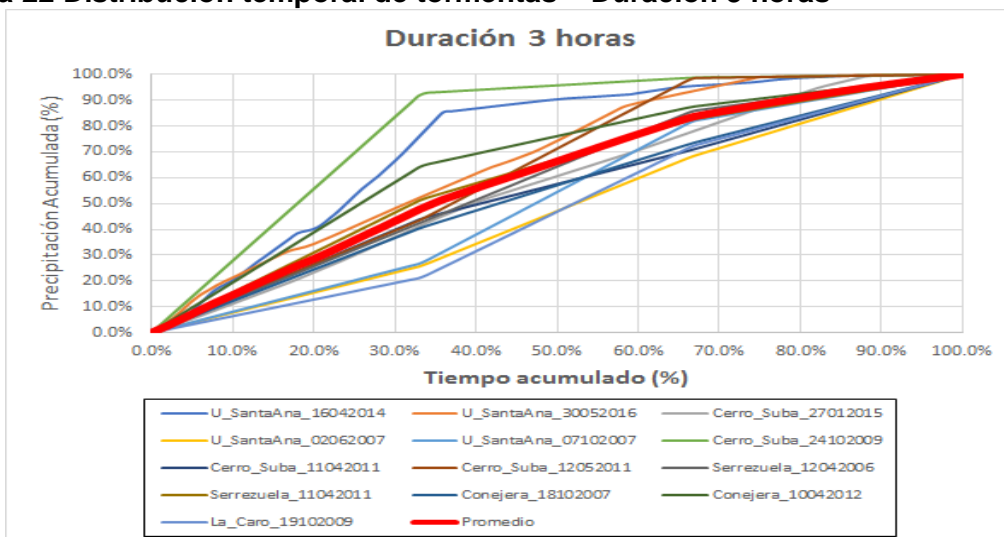
Figura 21 Hietograma aguacero del 07/03/2017 – Estación Usaquén Santa Ana



Fuente: WSP, 2019.

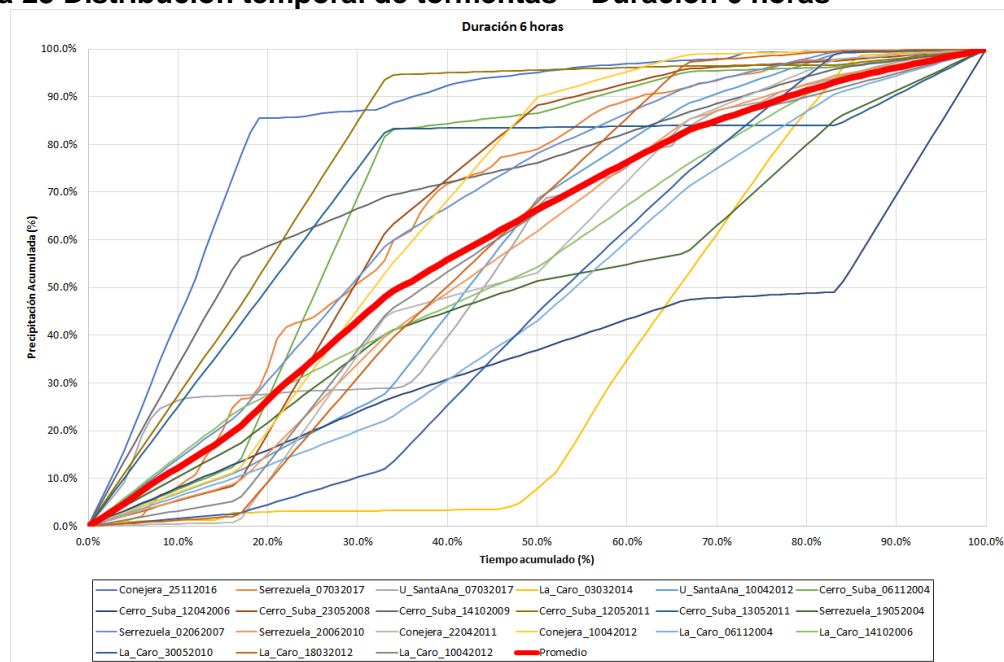
Teniendo en cuenta las duraciones de cada uno de los aguaceros analizados, se elaboraron las gráficas de curvas de distribución temporal para 3, 6 y 9 horas, en las cuales se incluyeron los aguaceros correspondientes, se promediaron las curvas de cada tormenta, con el fin de obtener curvas de distribución temporal aplicables a las cuencas para aguaceros con estas duraciones. En la Figura 22 se presenta la curva de distribución temporal para duración de tormenta de 3 horas, en la Figura 23 se presentan las curvas de distribución temporal para duración de tormenta de 6 horas y en la Figura 24 se presentan las cuervas de distribución temporal para las tormentas de duración de 9 horas.

Figura 22 Distribución temporal de tormentas – Duración 3 horas



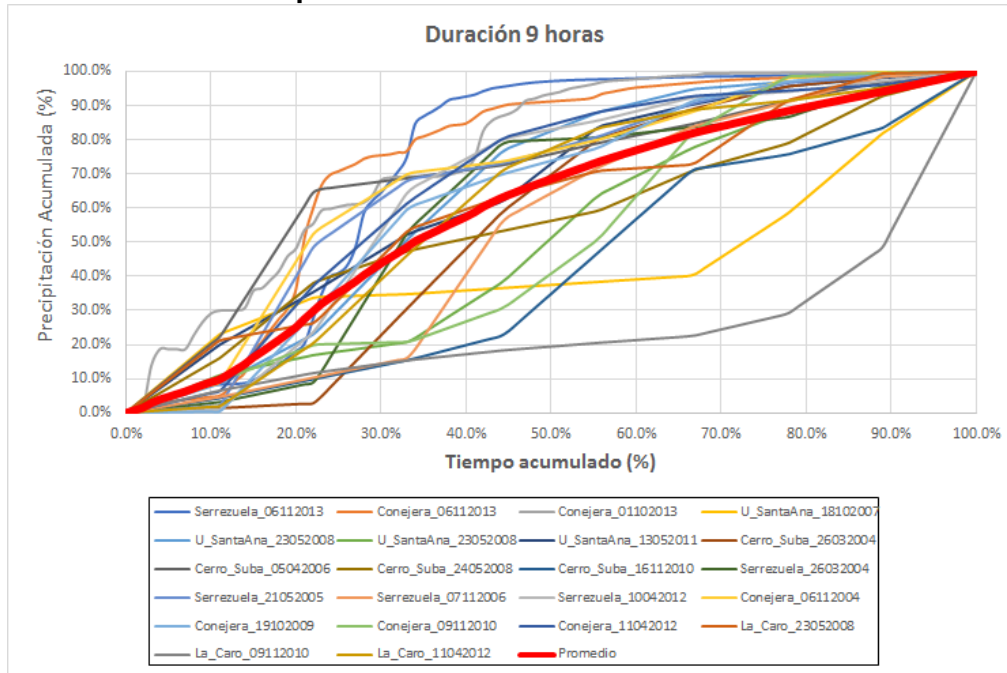
Fuente: WSP, 2019.

Figura 23 Distribución temporal de tormentas – Duración 6 horas



Fuente: WSP, 2019.

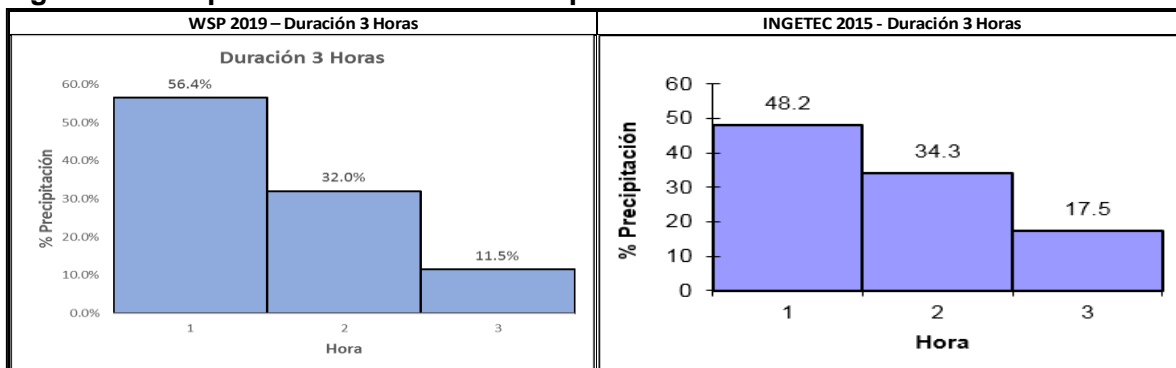
Figura 24 Distribución temporal de tormentas – Duración 9 horas



Fuente: WSP, 2019.

Una vez realizado el análisis de distribución temporal de tormentas, se realizó la comparación con los resultados obtenidos por el estudio de tormentas de INGETEC 2015 y el Estudio de Buenavista, con lo cual se identificó un comportamiento similar, en el cual aproximadamente el 50% de la precipitación cae durante la primera hora de la tormenta, para la duración de tormenta de 3 horas, la duración de tormenta definida para el diseño. Por tal razón no se considera necesario el análisis de un mayor número de tormentas, ya que la probabilidad de que se modifique esta distribución es muy baja, teniendo en cuenta que en el estudio de INGETEC se realizó el análisis detallado de 207 tormentas, tal como se ilustra en la Figura 25.

Figura 25 Comparación Distribución temporal

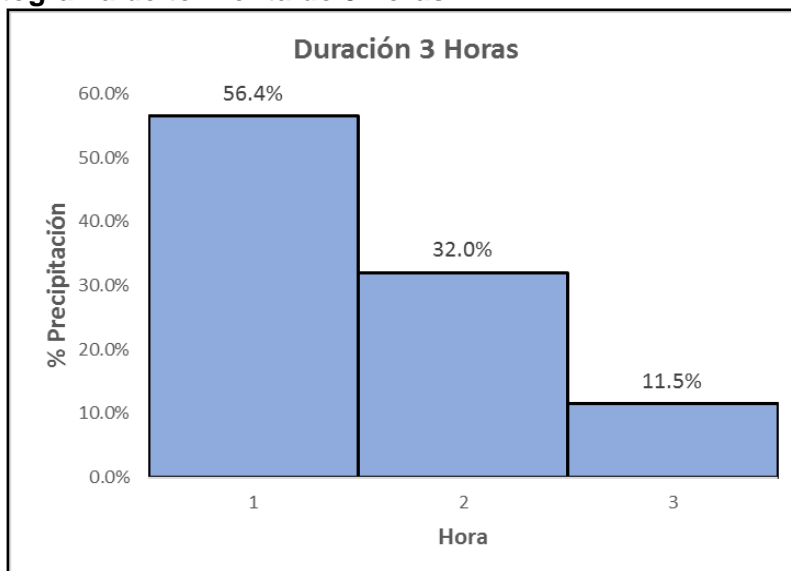


Fuente: WSP, 2019 INGETEC 2015.

5.4 HIETOGRAMAS DE TORMENTA

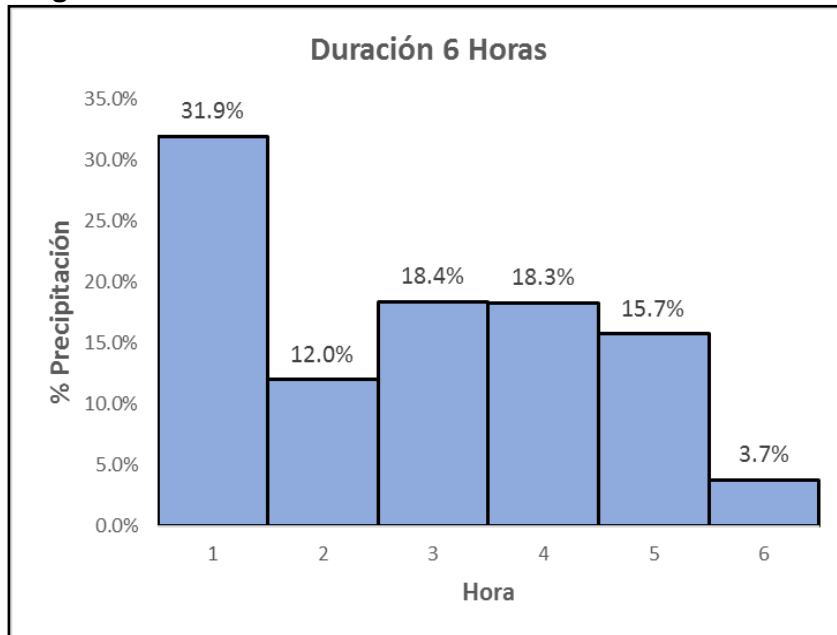
De acuerdo con el resultado de las curvas de distribución temporal obtenidas para las duraciones de 3, 6 y 9 horas, se determinaron los hietogramas típicos de tormenta, los cuales presentan la distribución porcentual del volumen de precipitación, obteniendo los promedios de las curvas de distribución para cada duración. En la Figura 26 se presenta el hietograma típico de tormenta de 3 horas de duración, en el cual se aprecia que para esta duración el 56.4% del volumen total, precipita durante la primera hora. En la Figura 27 se presenta el hietograma típico de tormenta para la duración de 6 horas, en la cual se aprecia que la mayor parte del volumen, precipita en la primera hora (31.9%), en la Figura 28 se presenta en hietograma típico de tormenta de 9 horas de duración, en el cual se aprecia que el mayor volumen de precipitación, se presenta durante la segunda hora (33.1%).

Figura 26 Hietograma de tormenta de 3 horas



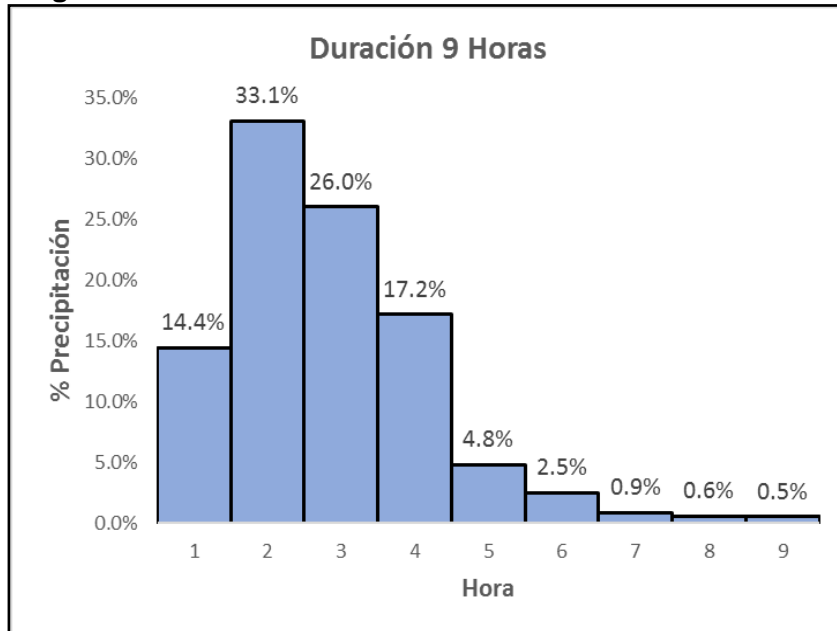
Fuente: WSP, 2019.

Figura 27 Hietograma de tormenta de 6 horas



Fuente: WSP, 2019.

Figura 28 Hietograma de tormenta de 9 horas



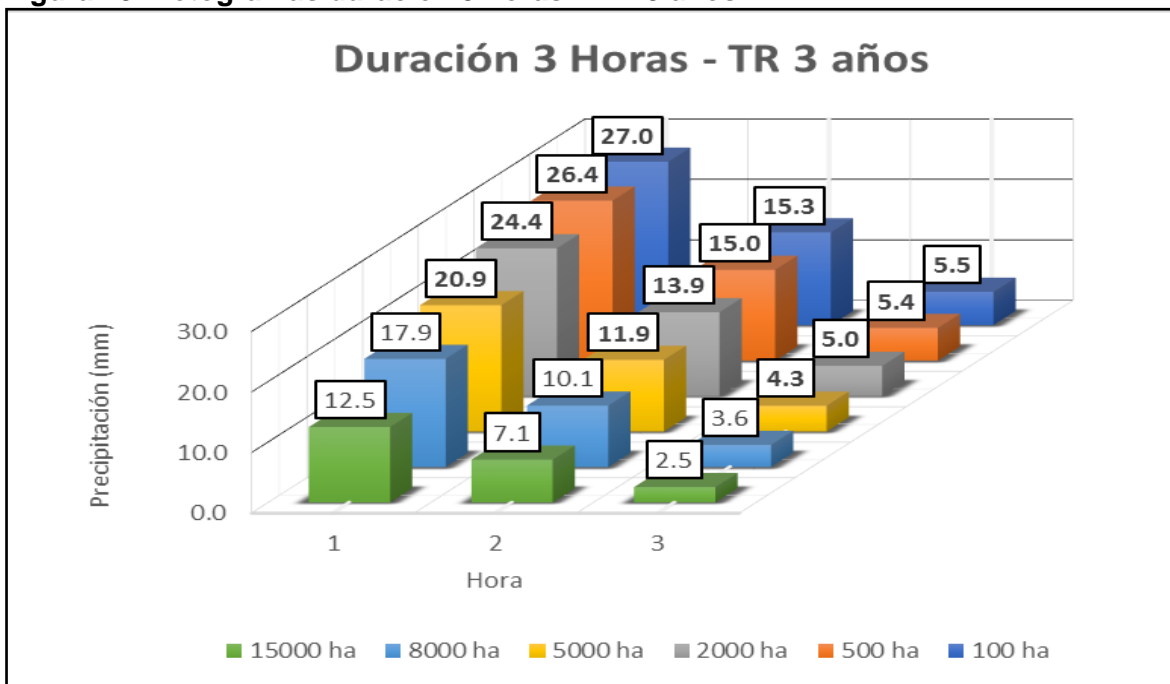
Fuente: WSP, 2019.

5.5 HIETOGRAMAS DE DISEÑO

A partir de los volúmenes de precipitación obtenidos por medio de las curvas PADF, para área de 100, 500, 2000, 5000, 8000 y 15000 ha y diferentes periodos de retorno, así como la distribución temporal de la precipitación para las duraciones de tormenta de 3, 6 y 9 horas, se determinaron los hietogramas de diseño para periodo de retorno de 3, 10, 25, 50 y 100 años. A modo de ejemplo, en la Figura 29 se presentan los hietogramas de tormenta de 3 horas de duración, correspondientes a los volúmenes de precipitación para las diferentes áreas definidas, para el periodo de retorno de 3 años, en la Figura 30 se presentan los hietogramas correspondientes a periodo de retorno de 10 años y en la Figura 31 los hietogramas para periodo de retorno de 100 años.

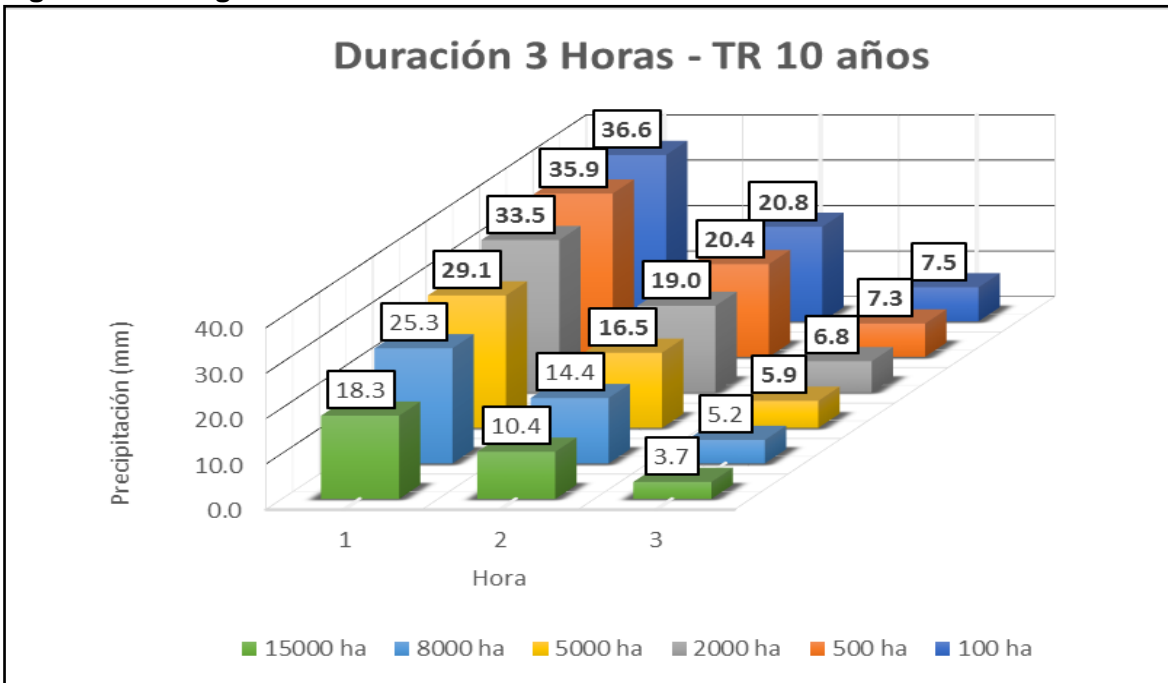
Se eligió la duración de 3 horas para la tormenta de diseño, teniendo en cuenta los resultados de estudios anteriores en el área de estudio, en los cuales se concluye que esta es la duración que produce los resultados más críticos en comparación con tormentas de duraciones mayores en términos de caudales máximos instantáneos y es la duración de tormentas típica en proyectos para la sabana de Bogotá (ESSERE, 1998), (Ponce de León y Asociados, 2000), (INGETEC, 2015). Teniendo en cuenta la distribución temporal de la tormenta, se realizó la distribución del volumen de precipitación para un intervalo de tiempo de 5 minutos, en el Anexo 1 Análisis Precipitación – 1.4 Hietogramas de diseño se presentan los hietogramas para cada cuenca ingresados en el modelo HEC-HMS.

Figura 29 Hietogramas duración 3 horas – TR 3 años



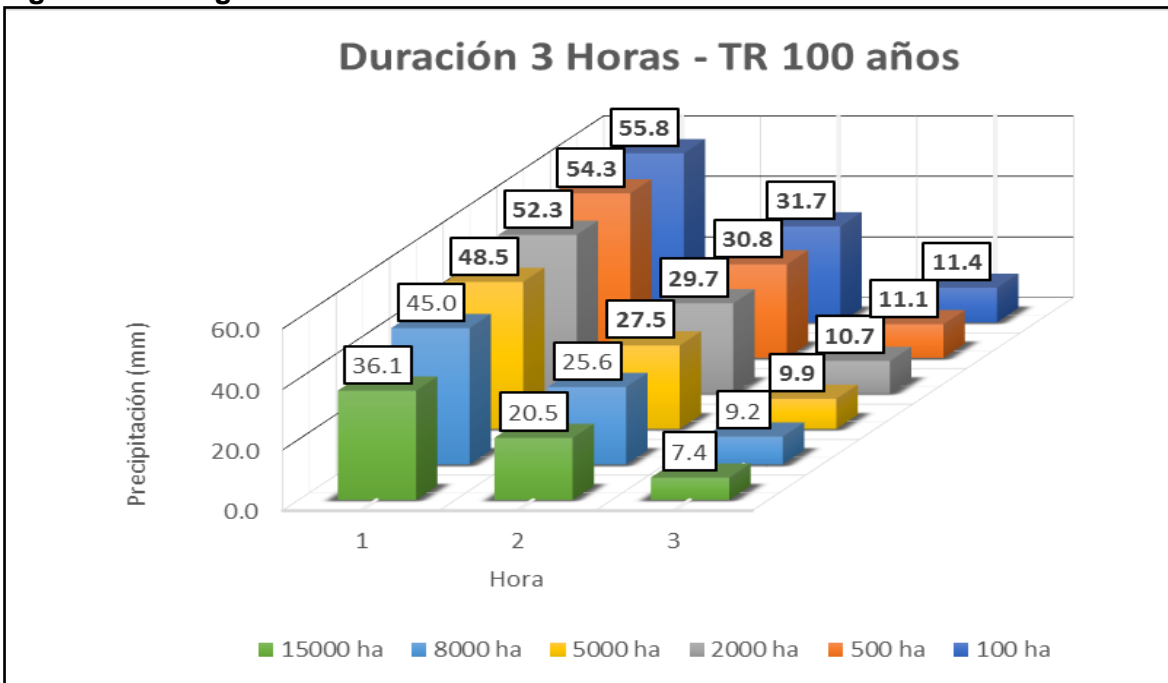
Fuente: WSP, 2019.

Figura 30 Hietogramas duración 3 horas – TR 10 años



Fuente: WSP, 2019.

Figura 31 Hietogramas duración 3 horas – TR 100 años



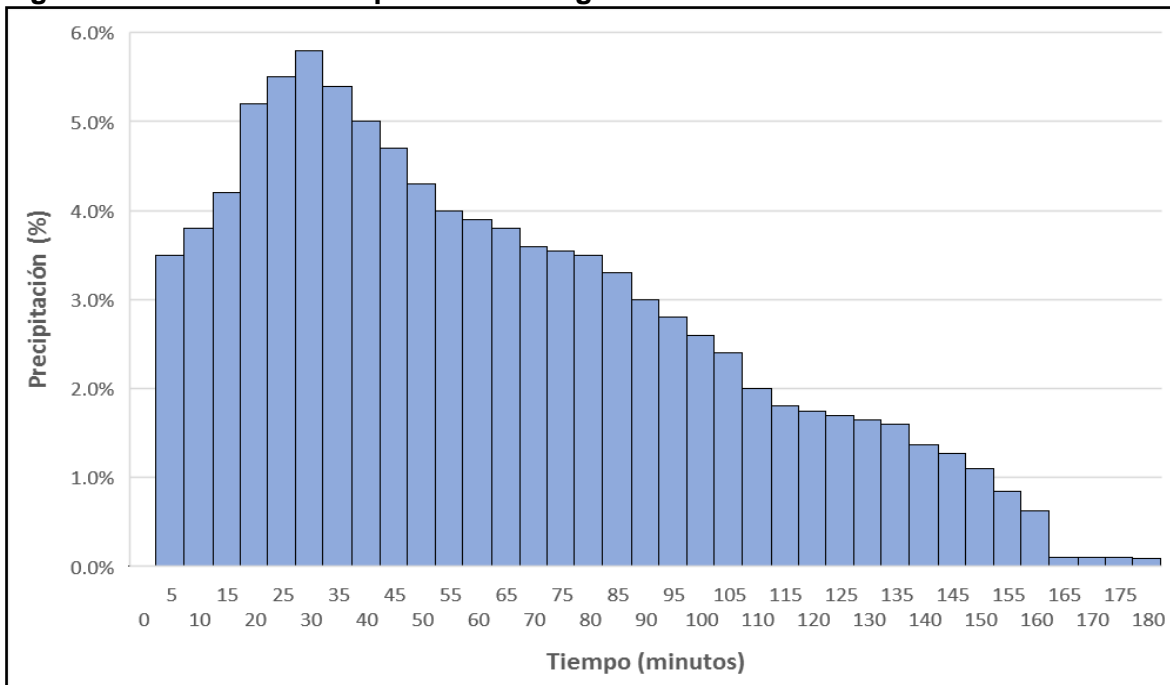
Fuente: WSP, 2019.

En relación con el análisis de precipitación realizado en el estudio del Consorcio Borde Norte en el año 2009, se encontró que este se realizó a partir del análisis de frecuencias de precipitaciones máximas en 24 horas de la estación Serrezuela, es decir no se llevó a cabo la distribución espacial de tormentas. La distribución temporal se acogió a los resultados en el informe de tormentas de Ingetec del año 2005, el cual también es similar al encontrado en el año 2015 por ese mismo consultor.

A pesar de esto, los volúmenes de precipitación total estimados en ambos estudios son similares, presentando variaciones inferiores al 10%.

De acuerdo con el análisis de distribución temporal realizado, se obtiene el hietograma de precipitación para la duración de tormenta de 3 horas, para un intervalo de 5 minutos, el cual se presenta en términos de porcentaje de precipitación total, en la Figura 32.

Figura 32 Distribución temporal del hietograma de diseño

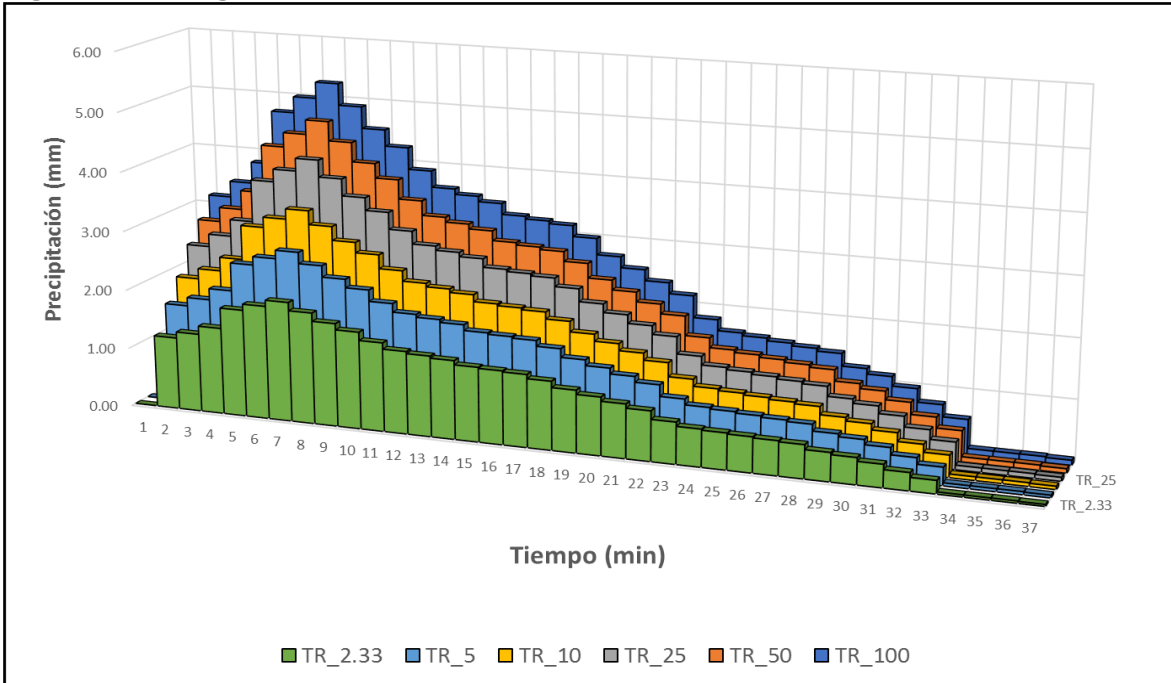


Fuente: WSP 2019, a partir de datos EAAB.

A partir de los volúmenes totales de precipitación obtenidos del análisis de la distribución espacial y el análisis de distribución temporal, se obtienen los hietogramas de diseño para cada una de las cuencas que conforman el sistema para los diferentes periodos de retorno analizados. A modo de ejemplo, en la Figura 33 se presentan los hietogramas para la cuenca denominada San Juan 5 y en la Figura 34 se presentan los hietogramas para las cuenca denominada Canal Torca Occidental, en el Anexo 1 Análisis Precipitación – 1.4 Hietogramas de Diseño, se presentan los hietogramas para todas las cuencas que conforman el sistema. Así mismo en este mismo Anexo 1.1 Datos lluvias analizadas, se presenta la interpretación de los pluviogramas recolectados de las estaciones de registro de la EAAB, a partir de la cual se realizó la lectura con período de 5 minutos. La lectura detallada para cada lapso de tiempo establecido se llevó a cabo realizando el

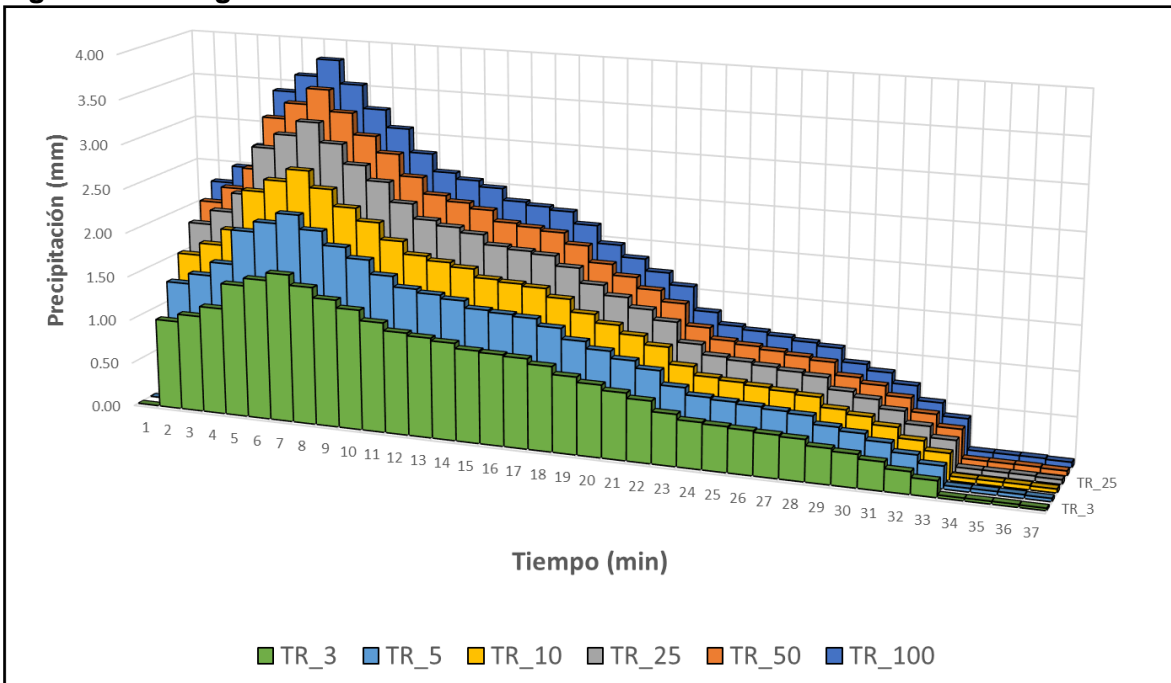
escalamiento de los pluviogramas y tomando la lectura de la altura de precipitación de la imagen escalada.

Figura 33 Hietograma de diseño San Juan 5



Fuente: WSP 2019, a partir de datos EAAB.

Figura 34 Hietograma cuenca Canal Torca Occidental



Fuente: WSP 2019, a partir de datos EAAB.

5.6 SELECCIÓN DEL PATRÓN DE PRECIPITACIÓN

Para los análisis de distribución espacial de la precipitación se empleó el método de interpolación determinístico IDW (seleccionado a partir de validación cruzada), mediante un patrón de distribución espacial máximo para cada año con base en el resultado del método de Precipitación – Área – Duración (PAD). A partir de esta distribución se calculó la precipitación media para el área de drenaje del sistema Torca - Guaymaral, esto, para cada año de estudio considerado.

Con el objeto de estimar el volumen máximo de lluvia caída, se llevó a cabo el desplazamiento del patrón de precipitación sobre el área de drenaje del sistema Torca-Guaymaral, generado tres escenarios de desplazamiento: el primero corresponde al Patrón Original; el segundo (Patrón 1) localizando el centro de la tormenta en el centroide de la cuenca total de tal manera que se abarcara la totalidad del área del sistema; y el tercero (Patrón 2) desplazando el centro de la tormenta sobre el centroide de la cuenca de mayor aporte, que en este caso corresponde a la cuenca del canal Torca. 3.

En la Figura 36 a la Figura 49 se presentan los desplazamientos del patrón para las tormentas máximas de cada año. En la Tabla 8 se presentan los volúmenes totales de precipitación obtenidos del análisis de los patrones de distribución espacial para cada año, donde se observa que el Patrón de desplazamiento No. 1, es el que genera el mayor volumen de precipitación para el área de drenaje del sistema, por lo cual, es el que se selecciona para determinar la precipitación total para cada una de las cuencas y realizar el posterior análisis de frecuencias.

Tabla 8 Volúmenes de precipitación para la totalidad de las cuencas del Sistema Torca – Guaymaral

| AÑO | VOLUMEN DE PRECIPITACION | | | | | |
|----------|--------------------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| | Patrón Original | | Patrón Desplazado 1 | | Patrón Desplazado 2 | |
| | ΣP (mm) | Promedio (mm/Km2) | ΣP (mm) | Promedio (mm/Km2) | ΣP (mm) | Promedio (mm/Km2) |
| 2004 | 529.7 | 9.28 | 2087.35 | 36.57 | 2247.21 | 39.37 |
| 2005 | 489 | 8.57 | 590.88 | 10.35 | 502.76 | 8.81 |
| 2006 | 1053.2 | 18.45 | 1520.88 | 26.64 | 1502.19 | 26.32 |
| 2007 | 478.3 | 8.38 | 1093.57 | 19.16 | 921.86 | 16.15 |
| 2008 | 247.3 | 4.33 | 976.83 | 17.11 | 899.63 | 15.76 |
| 2009 | 1201.3 | 21.05 | 1731.75 | 30.34 | 1687.26 | 29.56 |
| 2010 | 771.7 | 13.52 | 1486.71 | 26.05 | 1312.42 | 22.99 |
| 2011 | 987.1 | 17.29 | 1286.99 | 22.55 | 1327.47 | 23.26 |
| 2012 | 1506.2 | 26.39 | 1549.83 | 27.15 | 1468.34 | 25.72 |
| 2013 | 2112.3 | 37.01 | 3527.1 | 61.79 | 1922.2 | 33.68 |
| 2014 | 596.7 | 10.45 | 2092.25 | 36.65 | 2756.04 | 48.28 |
| 2015 | 961.3 | 16.84 | 1771.7 | 31.04 | 2125.81 | 37.24 |
| 2016 | 2710.1 | 47.48 | 3872.07 | 67.84 | 3864.13 | 67.70 |
| 2017 | 1948 | 34.13 | 2487.01 | 43.57 | 2353.99 | 41.24 |
| Promedio | 1113.7 | 19.51 | 1862.5 | 32.63 | 1778 | 31.15 |

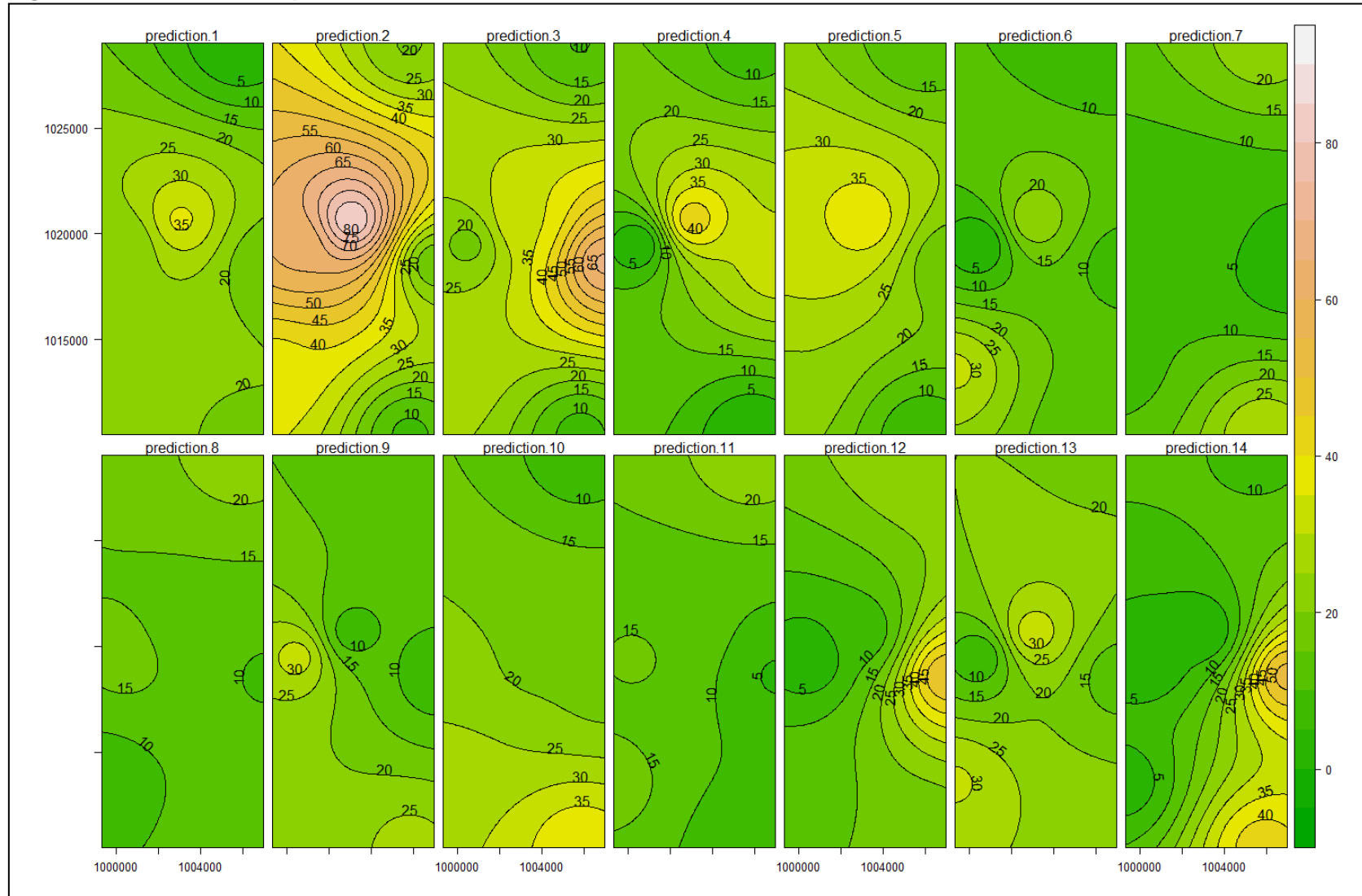
Fuente: WSP 2019, a partir de datos EAAB.

Los valores de precipitación presentados corresponden a la precipitación total caída sobre el límite que corresponde a la totalidad de las cuencas del sistema hídrico Torca-Guaymaral, que suma en su totalidad 5708 ha, con la que se estima el valor promedio.

Considerando el patrón desplazado uno (1), se procedió a determinar el volumen de precipitación para cada una de las cuencas, obteniendo de esta manera una serie de precipitación anual por cuenca. A estas series de precipitación por cuenca, se le realizó el análisis de frecuencia con el fin de determinar la precipitación para diferentes periodos de retorno, en el Anexo 1 Análisis Precipitación – 1.3 Distribución Espacial Precipitación, se presentan los resultados de este análisis de frecuencia.

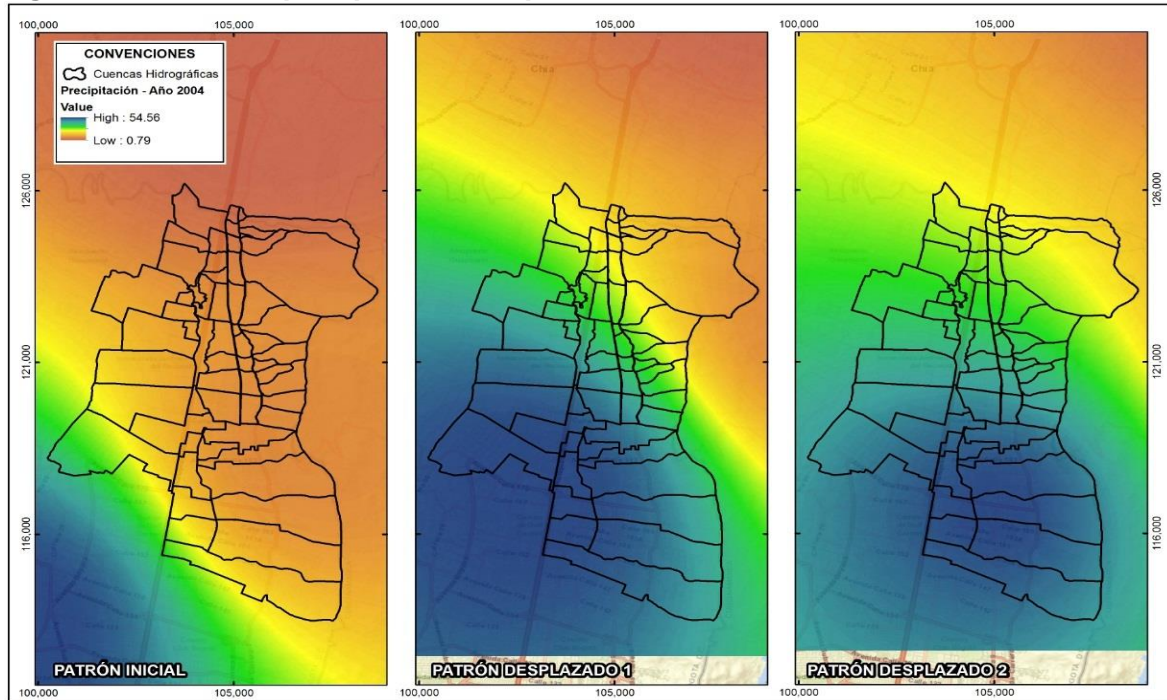
Con los resultados obtenidos del análisis de frecuencia, se determinó el volumen de precipitación total por cuenca, para los diferentes periodos de retorno; en la Tabla 9 se presentan los valores totales por cuenca. La distribución espacial corresponde al Patrón de Desplazamiento 1.

Figura 35 Distribución espacial de Tormentas en el área de estudio



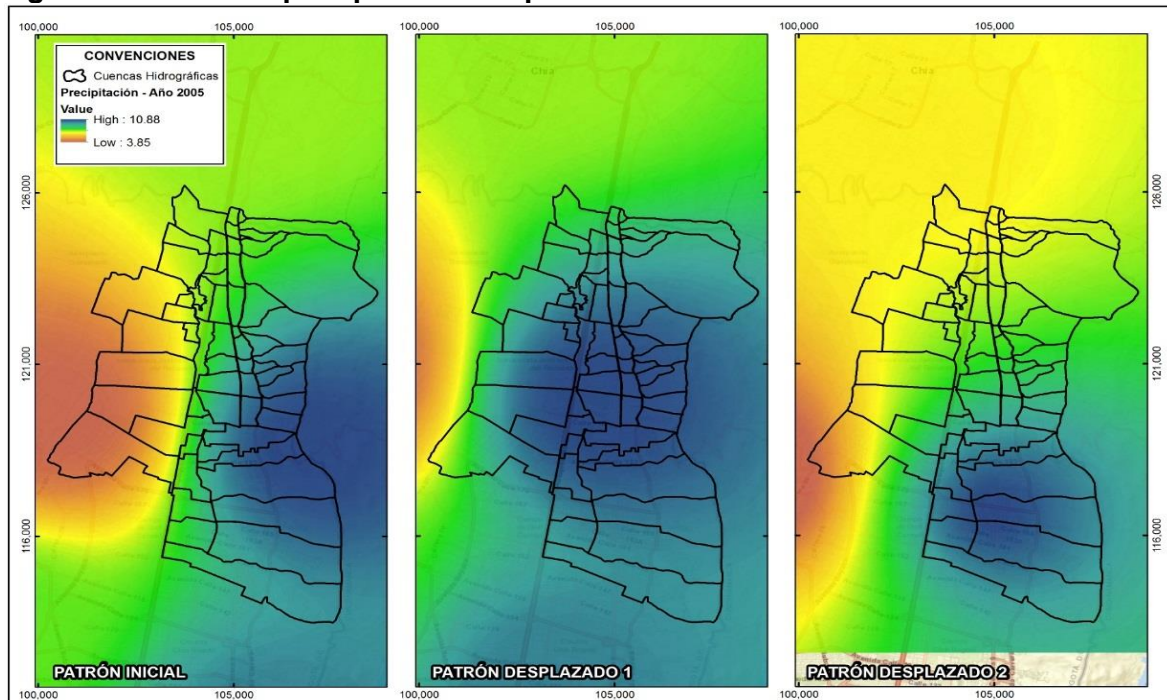
Fuente: ESP a partir de datos de precipitación EAAB, 2019.

Figura 36 Patrón de precipitación desplazado 2004



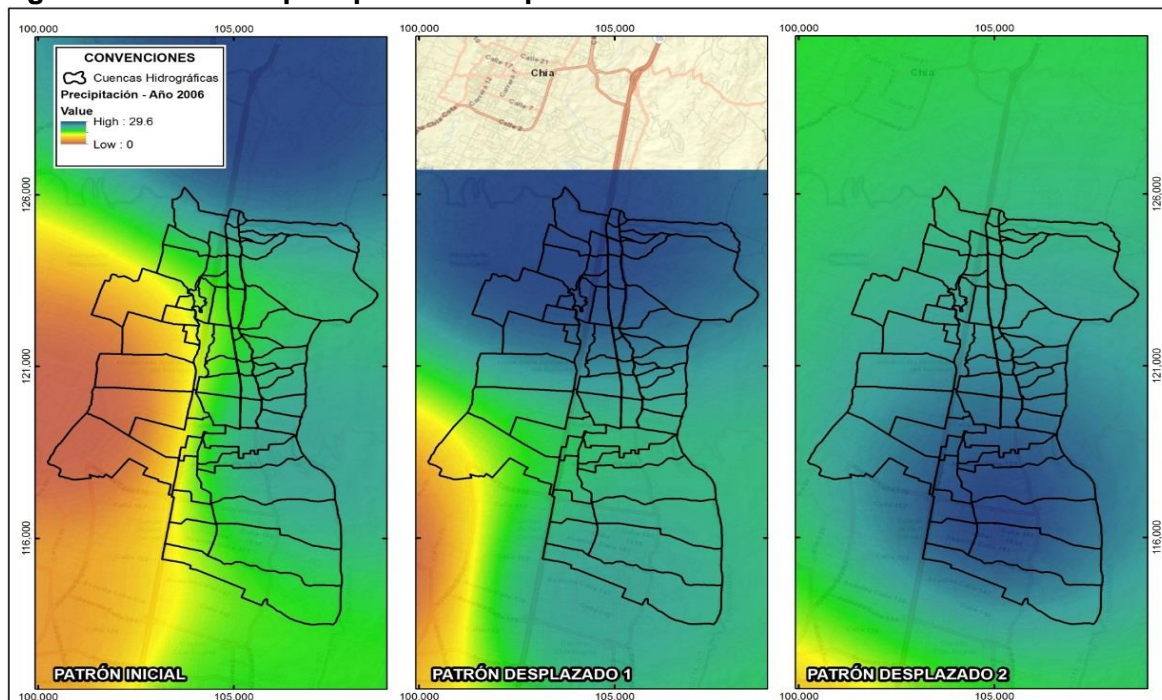
Fuente: WSP 2019, a partir de datos EAAB.

Figura 37 Patrón de precipitación desplazado 2005



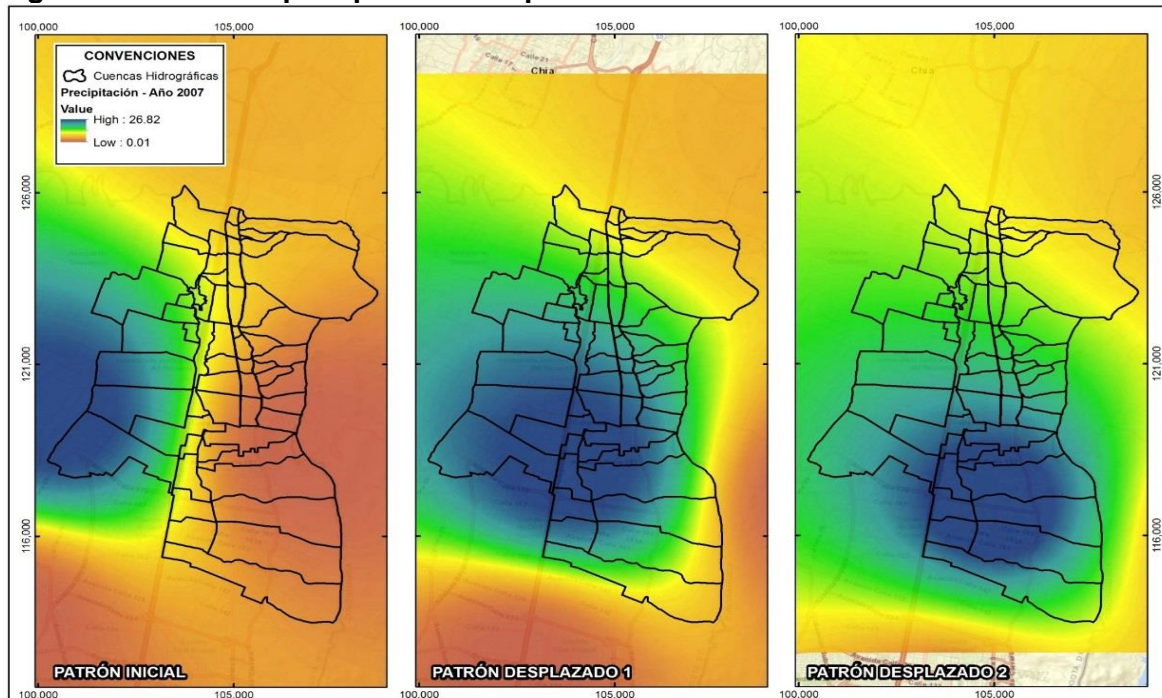
Fuente: WSP 2019, a partir de datos EAAB.

Figura 38 Patrón de precipitación desplazado 2006



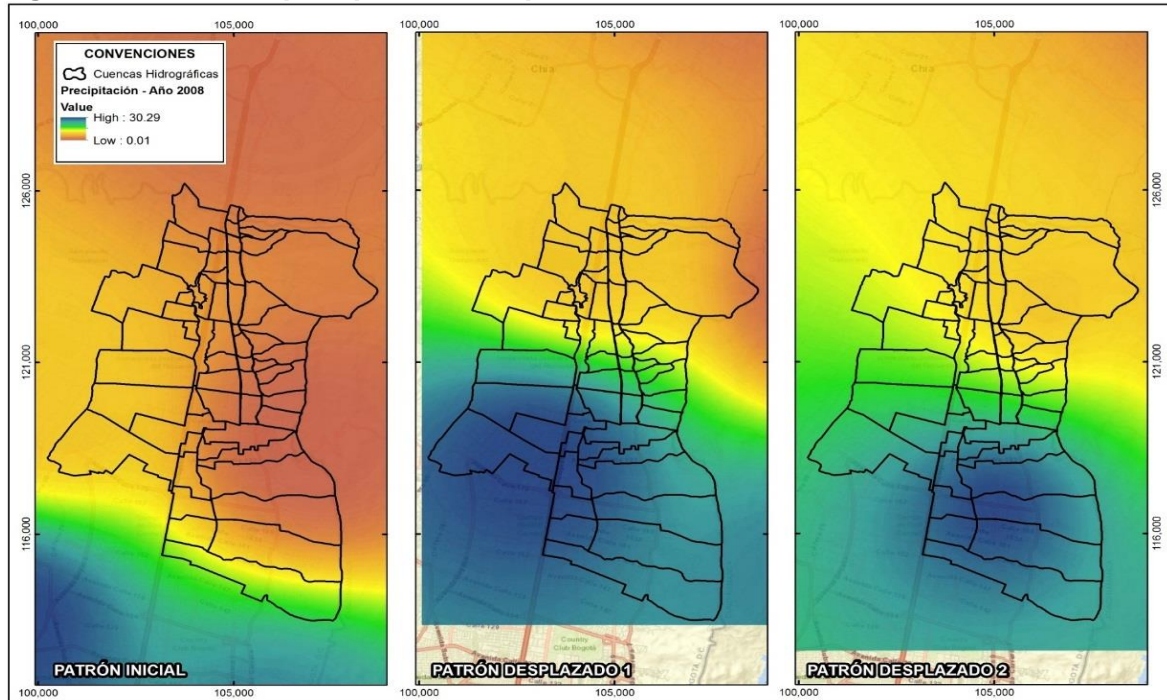
Fuente: WSP 2019, a partir de datos EAAB.

Figura 39 Patrón de precipitación desplazado 2007



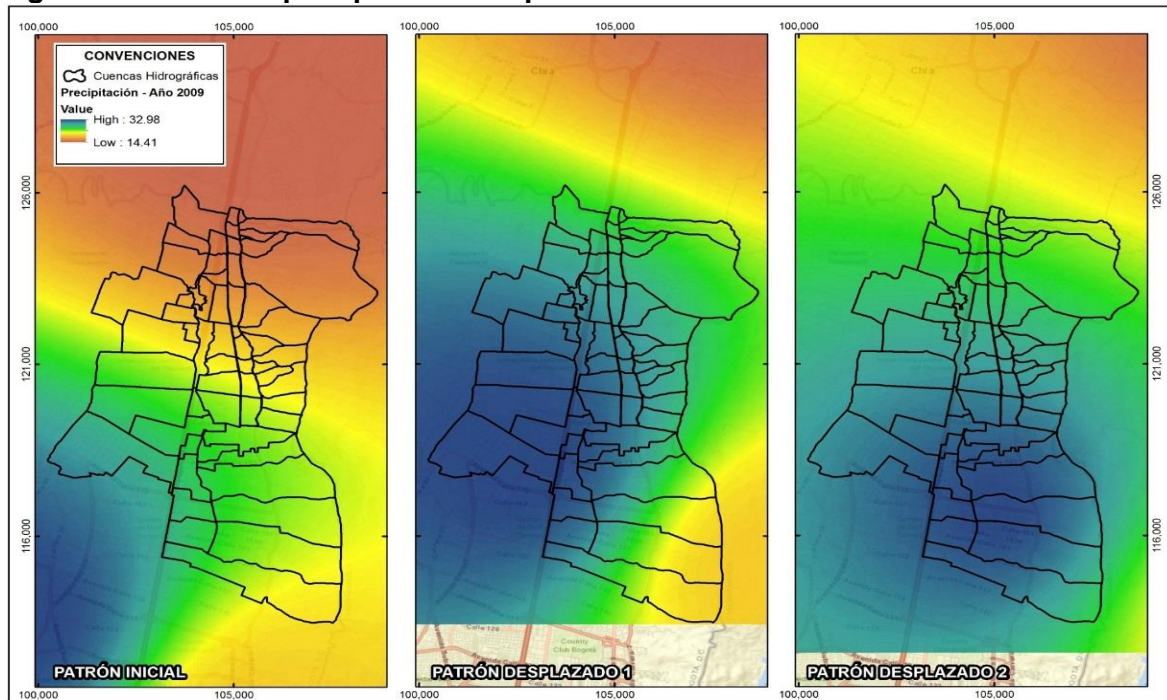
Fuente: WSP 2019, a partir de datos EAAB.

Figura 40 Patrón de precipitación desplazado 2008



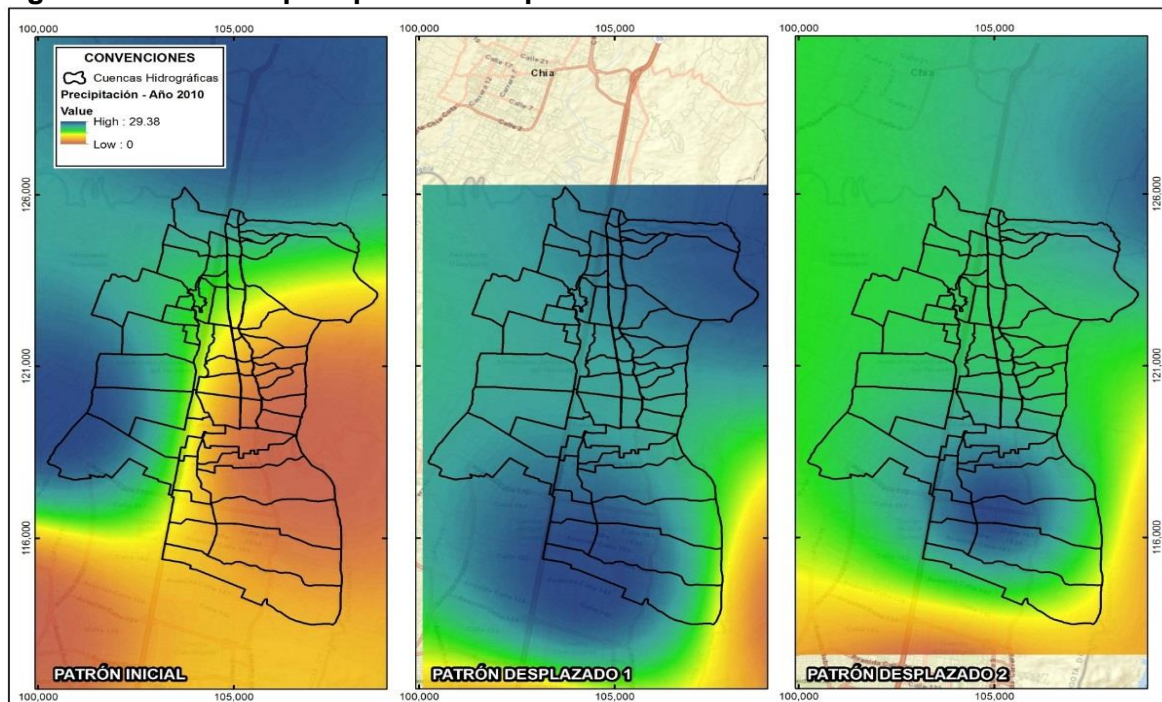
Fuente: WSP 2019, a partir de datos EAAB.

Figura 41 Patrón de precipitación desplazado 2009



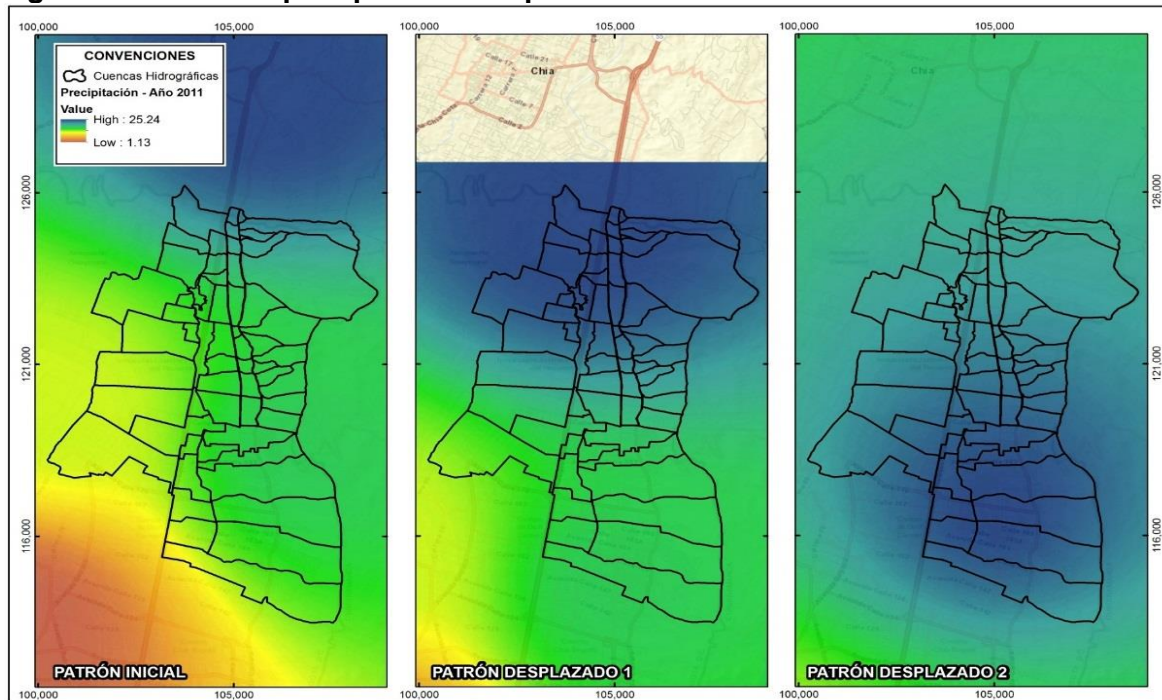
Fuente: WSP 2019, a partir de datos EAAB.

Figura 42 Patrón de precipitación desplazado 2010



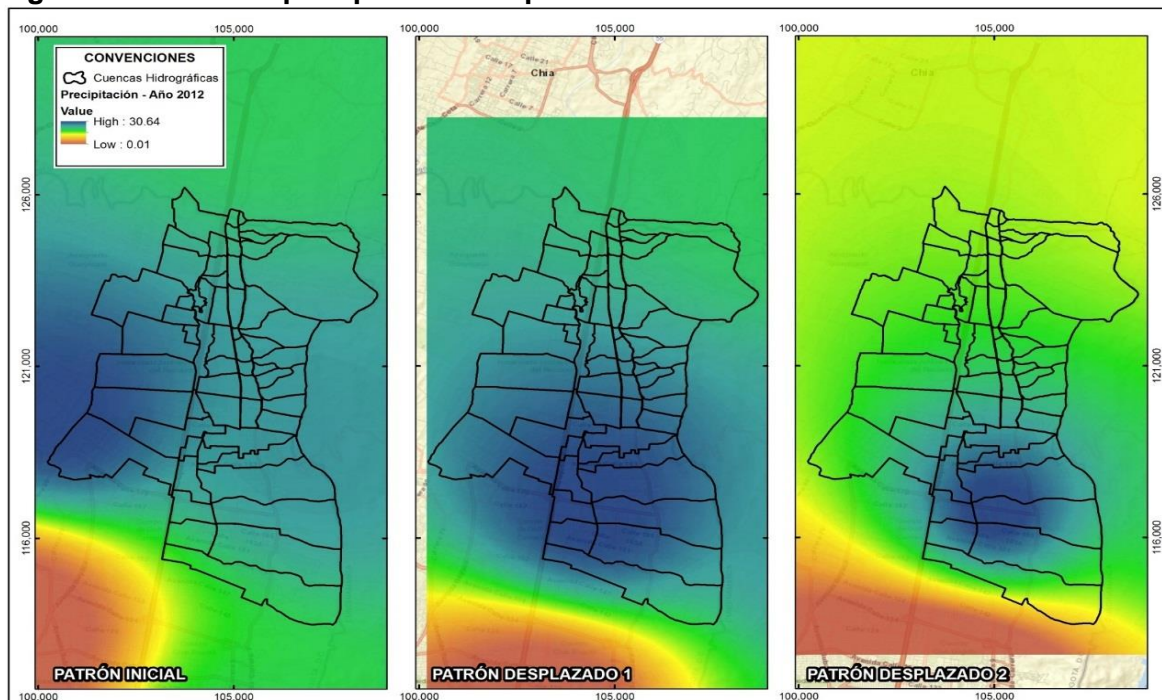
Fuente: WSP 2019, a partir de datos EAAB.

Figura 43 Patrón de precipitación desplazado 2011



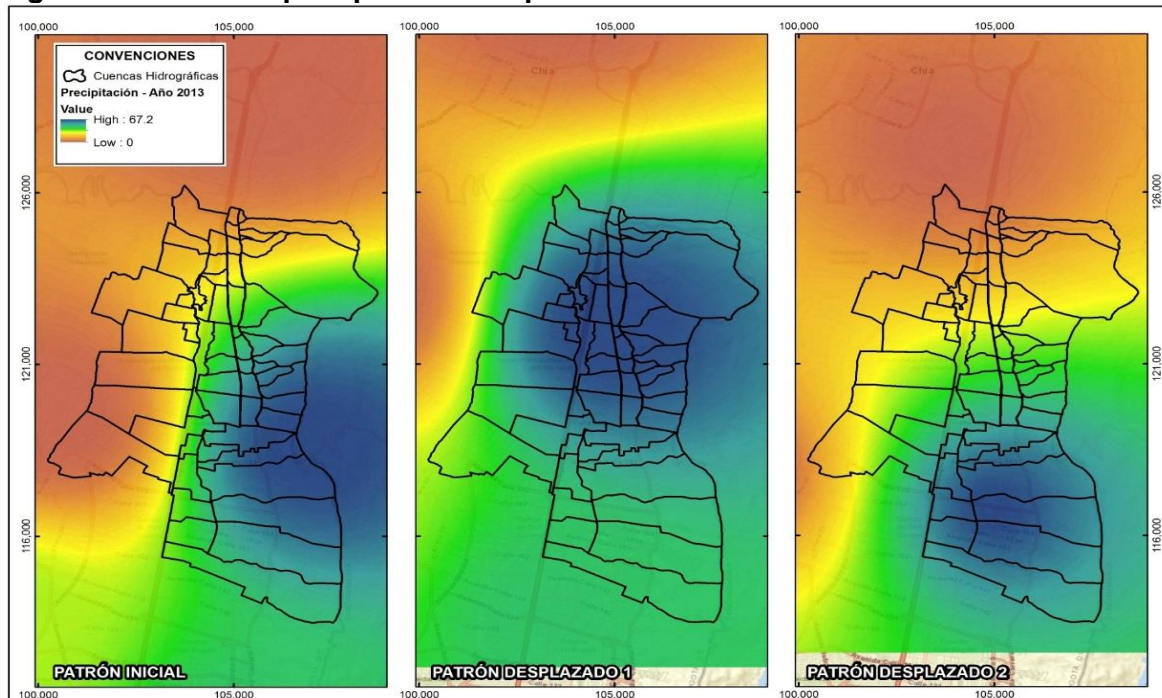
Fuente: WSP 2019, a partir de datos EAAB.

Figura 44 Patrón de precipitación desplazado 2012



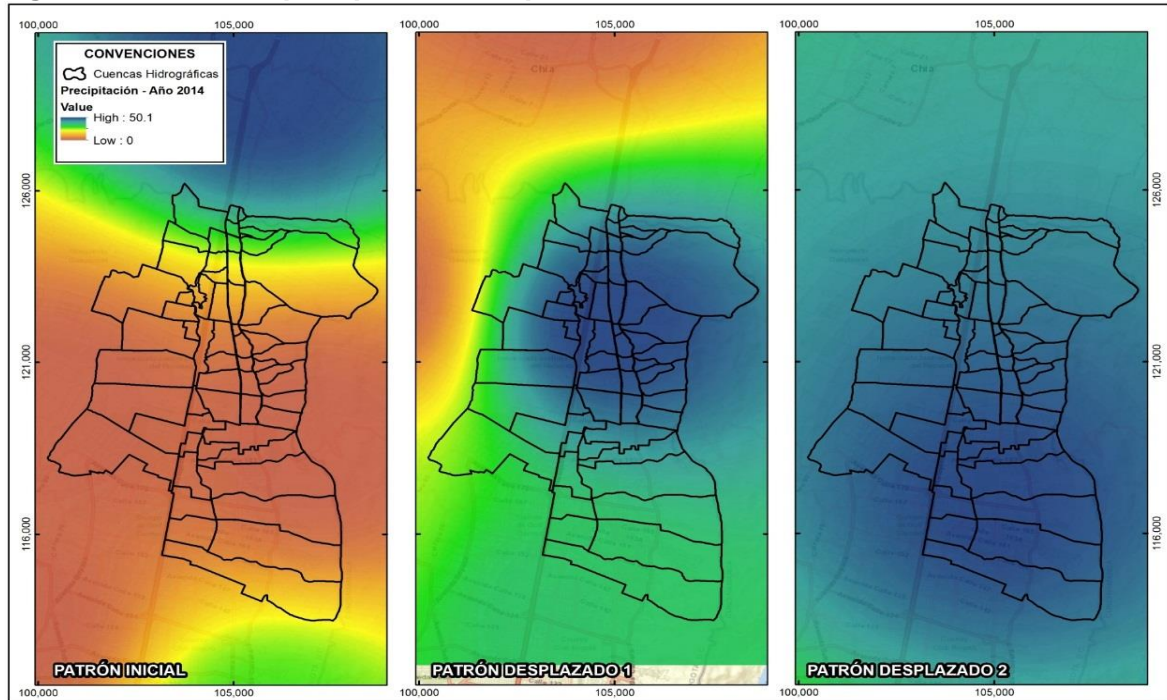
Fuente: WSP 2019, a partir de datos EAAB.

Figura 45 Patrón de precipitación desplazado 2013



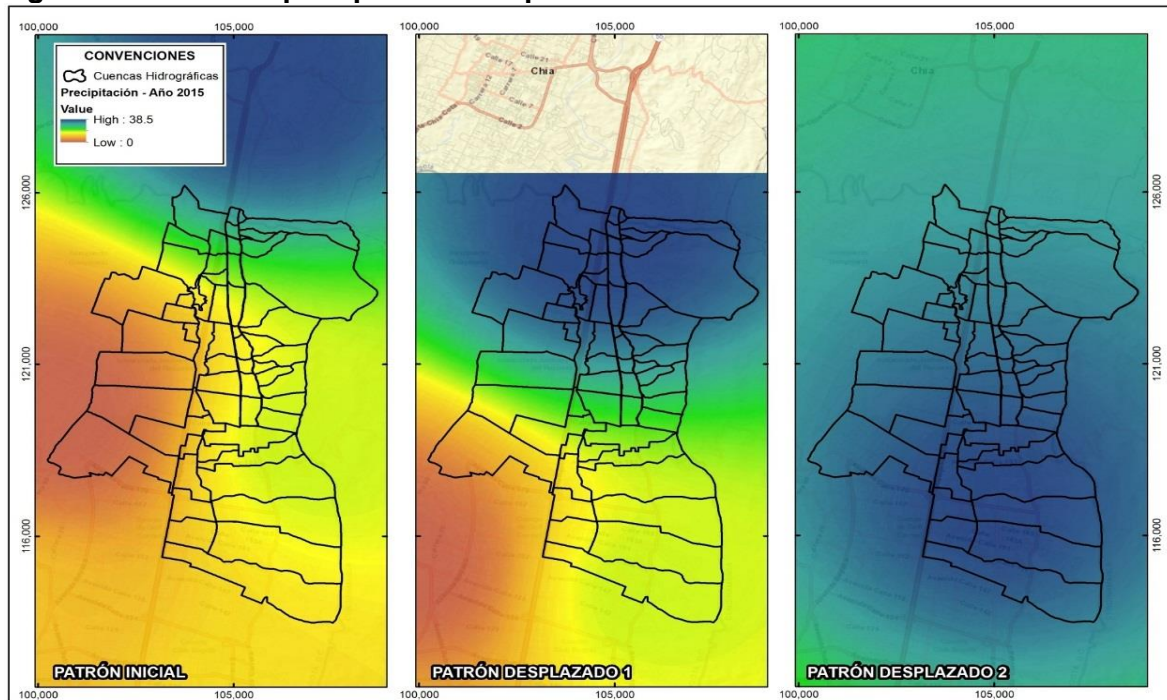
Fuente: WSP 2019, a partir de datos EAAB.

Figura 46 Patrón de precipitación desplazado 2014



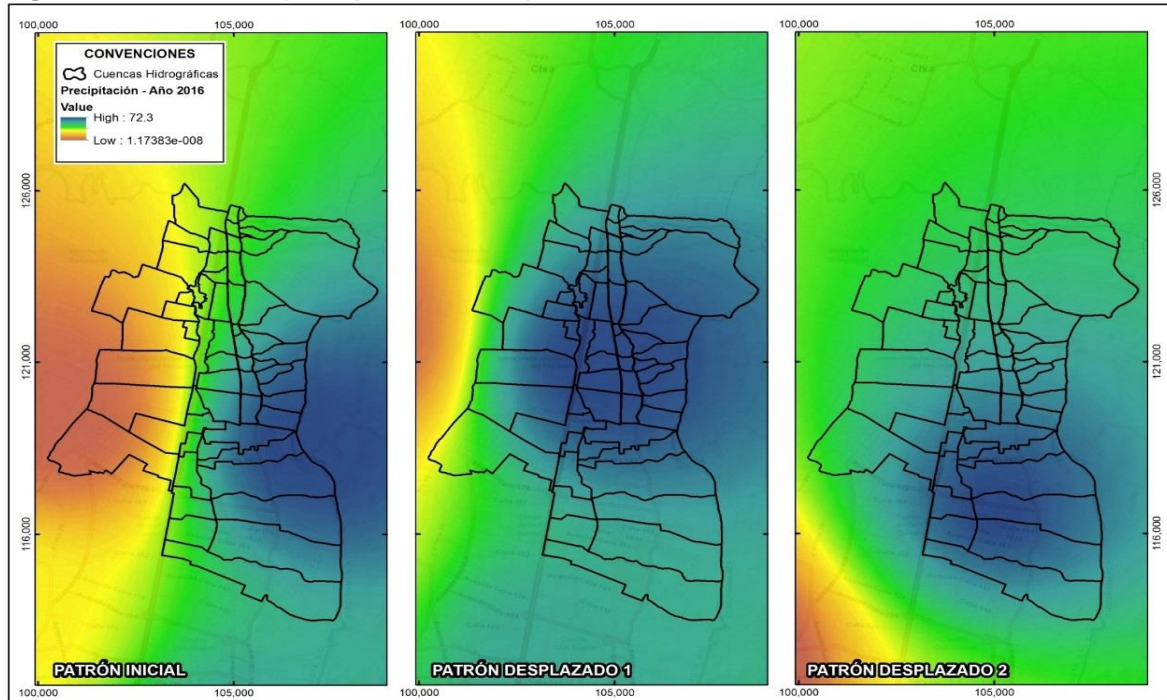
Fuente: WSP 2019, a partir de datos EAAB.

Figura 47 Patrón de precipitación desplazado 2015



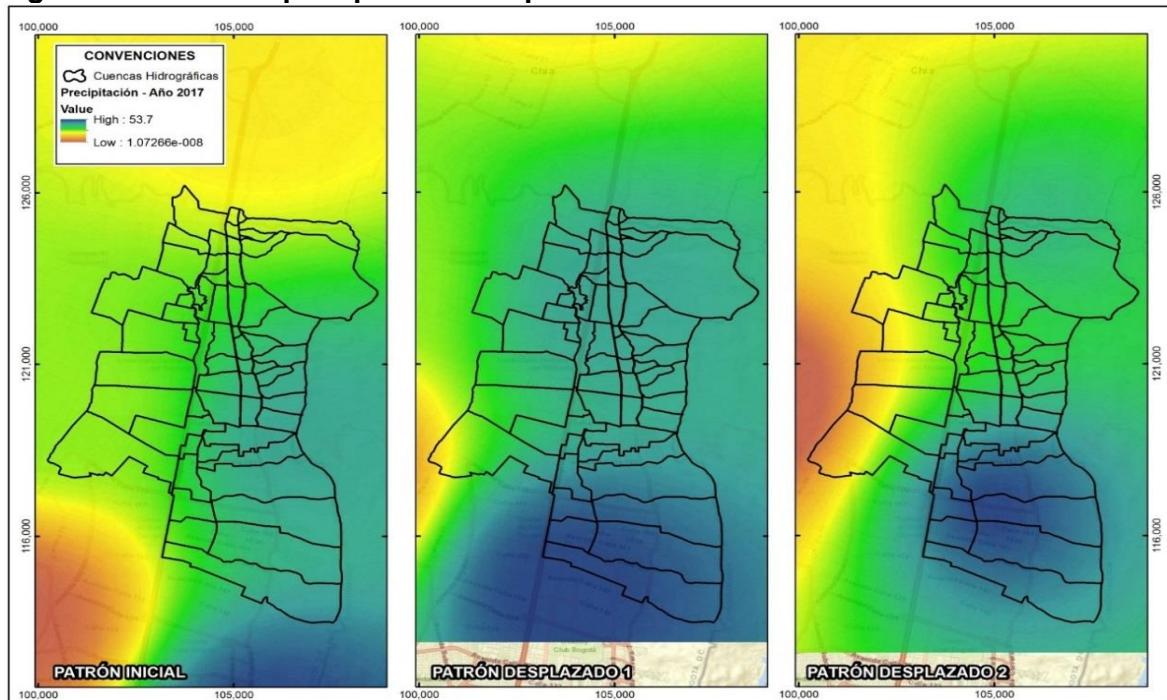
Fuente: WSP 2019, a partir de datos EAAB.

Figura 48 Patrón de precipitación desplazado 2016



Fuente: WSP 2019, a partir de datos EAAB.

Figura 49 Patrón de precipitación desplazado 2017



Fuente: WSP 2019, a partir de datos EAAB.

Tabla 9 Precipitación total por cuencas y subcuencas

| CUENCA | PRECIPITACIÓN (mm) | | | | | | |
|-----------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | TR2.33 | TR3 | TR5 | TR10 | TR25 | TR50 | TR100 |
| Qda Torca 3 | 30.50 | 34.95 | 43.14 | 53.44 | 66.44 | 76.09 | 85.67 |
| Oriental 1 | 29.56 | 33.92 | 41.86 | 51.67 | 63.82 | 72.66 | 81.29 |
| Qda San Juan 3 | 35.13 | 39.82 | 48.24 | 58.43 | 70.71 | 79.42 | 87.73 |
| Oriental 2 | 29.34 | 33.61 | 41.49 | 51.38 | 63.89 | 73.17 | 81.01 |
| Qda Torca 4 | 30.59 | 35.03 | 43.10 | 53.02 | 65.23 | 74.05 | 82.62 |
| Humedal Guaymaral 3 | 35.14 | 39.89 | 48.34 | 58.37 | 70.20 | 78.41 | 86.09 |
| Qda Patiño 2 | 33.85 | 38.14 | 46.05 | 55.98 | 68.54 | 77.85 | 87.10 |
| Qda Patiño 3 | 34.45 | 38.78 | 46.76 | 56.78 | 69.45 | 78.85 | 88.17 |
| Qda Novita 2 | 31.55 | 36.11 | 44.35 | 54.44 | 66.79 | 75.66 | 84.23 |
| Occidente 3-1 | 35.91 | 40.62 | 48.99 | 58.99 | 70.82 | 79.06 | 86.82 |
| Qda La Floresta 4 | 33.67 | 38.37 | 46.82 | 57.03 | 69.33 | 78.03 | 86.33 |
| Qda Torca 2 | 30.52 | 35.05 | 43.26 | 53.33 | 65.70 | 74.63 | 83.28 |
| Qda San Juan 4 | 35.02 | 39.57 | 47.80 | 57.83 | 70.03 | 78.77 | 89.84 |
| Canal Torca Oriental 2 | 33.74 | 37.81 | 45.30 | 54.71 | 66.61 | 75.43 | 84.19 |
| Canal Torca Oriental_sub8 | 32.48 | 36.72 | 44.28 | 53.30 | 63.98 | 71.42 | 78.42 |
| Qda Novita 3 | 31.60 | 36.10 | 44.24 | 54.19 | 66.34 | 75.06 | 83.47 |
| Qda Aguas calientes 2 | 33.38 | 37.59 | 45.36 | 55.11 | 67.44 | 76.59 | 85.67 |
| Qda La Floresta 3 | 32.91 | 37.54 | 45.88 | 56.00 | 68.26 | 76.99 | 85.35 |
| Qda Aguas calientes 3 | 33.99 | 38.18 | 45.90 | 55.61 | 67.88 | 76.98 | 86.01 |
| Qda La Floresta 2 | 32.92 | 37.60 | 46.03 | 56.30 | 68.76 | 77.66 | 86.21 |
| Qda San Juan 2 | 33.88 | 38.33 | 46.53 | 56.84 | 69.86 | 79.52 | 89.10 |
| Canal Torca Oriental_sub7 | 32.43 | 36.72 | 44.35 | 53.43 | 64.15 | 71.60 | 78.60 |
| Qda Patiño 4 | 34.95 | 39.30 | 47.30 | 57.35 | 70.05 | 79.48 | 88.83 |
| Pilas 4 | 34.81 | 39.56 | 48.05 | 58.23 | 70.34 | 78.83 | 86.84 |
| Humedal Guaymaral 2 | 35.59 | 40.32 | 48.70 | 58.62 | 70.26 | 78.29 | 85.78 |
| Qda Tibabita 3 | 33.10 | 37.21 | 44.78 | 54.29 | 66.31 | 75.23 | 84.08 |
| Qda Pilas 2 | 34.35 | 39.08 | 47.60 | 57.91 | 70.34 | 79.15 | 87.57 |
| Qda Novita 1 | 31.02 | 35.61 | 43.92 | 54.10 | 66.56 | 75.52 | 84.18 |
| Humedal Guaymaral 1-2 | 34.73 | 39.38 | 47.58 | 57.27 | 68.59 | 76.37 | 83.60 |
| Qda Pilas 3 | 34.07 | 38.70 | 47.22 | 57.94 | 71.47 | 81.52 | 91.49 |
| Canal Guaymaral Occidente 3 | 31.56 | 35.89 | 43.67 | 53.08 | 64.41 | 72.43 | 80.08 |
| Qda San Juan 5 | 34.87 | 39.39 | 47.71 | 58.16 | 71.38 | 81.18 | 90.91 |
| Qda Tibabita 1 | 31.96 | 35.99 | 43.45 | 52.87 | 64.84 | 73.77 | 82.68 |
| Qda Tibabita 2 | 31.74 | 35.78 | 43.25 | 52.64 | 64.55 | 73.41 | 82.22 |
| Qda Patiño 1 | 32.90 | 37.23 | 45.20 | 55.21 | 67.86 | 77.24 | 86.55 |
| Qda Aguas calientes 4 | 34.60 | 38.79 | 46.52 | 56.24 | 68.51 | 77.61 | 86.65 |
| Qda Aguas calientes 1 | 32.41 | 36.53 | 44.13 | 53.72 | 65.90 | 74.98 | 84.04 |
| Canal Torca Oriental_sub9 | 31.97 | 36.31 | 43.78 | 52.29 | 61.80 | 68.04 | 73.64 |
| Canal Torca Oriental_sub10 | 31.30 | 35.64 | 43.01 | 51.22 | 60.13 | 65.83 | 70.83 |

| CUENCA | PRECIPITACIÓN (mm) | | | | | | |
|------------------------------|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | | | | | | |
| Qda Tibabita 4 | 33.68 | 37.79 | 45.35 | 54.86 | 66.87 | 75.79 | 84.63 |
| Qda Pilas 1 | 33.68 | 38.38 | 46.86 | 57.22 | 69.86 | 78.91 | 87.63 |
| Canal Torca Oriental_sub11 | 30.18 | 34.57 | 42.05 | 50.43 | 59.58 | 65.47 | 70.66 |
| Canal Guaymaral Occidente 2 | 33.16 | 37.68 | 45.74 | 55.40 | 66.89 | 74.92 | 82.51 |
| Canal Torca Oriental_sub5 | 30.80 | 34.91 | 42.49 | 52.00 | 64.02 | 72.94 | 81.80 |
| Canal Torca Oriental_sub6 | 31.86 | 35.97 | 43.54 | 53.06 | 65.09 | 74.01 | 82.86 |
| Canal Guaymaral Occidente 1 | 29.83 | 34.00 | 41.54 | 50.79 | 62.11 | 70.26 | 78.15 |
| Qda Torca 1 | 29.25 | 33.80 | 41.99 | 51.95 | 64.02 | 72.61 | 80.85 |
| Qda San Juan 1 | 32.59 | 37.10 | 45.40 | 55.83 | 69.00 | 78.78 | 88.48 |
| Occidente 1_2 | 32.42 | 36.53 | 43.89 | 52.75 | 63.33 | 70.78 | 77.84 |
| Occidente 3 | 34.33 | 38.50 | 46.20 | 55.87 | 68.08 | 77.15 | 86.14 |
| Occidente 2 | 34.19 | 38.06 | 44.93 | 53.13 | 62.83 | 69.58 | 75.92 |
| Humedal Guaymaral 1-1 | 34.11 | 38.04 | 44.59 | 51.70 | 59.18 | 63.81 | 67.77 |
| Occidente 1_1 | 31.80 | 35.47 | 42.22 | 50.72 | 61.44 | 69.40 | 77.30 |
| Canal Torca Oriental_sub3 | 27.88 | 31.94 | 39.41 | 48.80 | 60.66 | 69.47 | 78.20 |
| Canal Torca Oriental_sub4 | 29.50 | 33.59 | 41.13 | 50.60 | 62.56 | 71.44 | 80.25 |
| Canal Torca Occidental_sub12 | 28.88 | 32.73 | 39.34 | 46.86 | 55.21 | 60.68 | 65.57 |
| Canal Torca Oriental_sub2 | 27.00 | 31.11 | 38.67 | 48.16 | 60.17 | 69.07 | 77.91 |
| Canal Torca Oriental_sub1 | 27.47 | 31.93 | 39.64 | 48.49 | 58.47 | 65.09 | 71.08 |
| Qda La Floresta 1 | 30.81 | 35.51 | 43.97 | 54.23 | 66.65 | 75.48 | 83.94 |
| Promedio | 32.41 | 36.76 | 44.63 | 54.24 | 65.99 | 74.45 | 82.66 |

Fuente: WSP 2019, a partir de datos EAAB.

5.6.1 Isoyetas con patrón elíptico

Tomando como base los resultados obtenidos por INGETEC con respecto a la distribución espacial con patrón elíptico, se determinaron los volúmenes totales de precipitación del sistema Torca – Guaymaral. En la Tabla 10 se presentan las características geométricas de las isoyetas elípticas para relaciones a/b de 2.0 y 2.5, donde a y b son el radio mayor y el radio menor de la elipse, respectivamente definidas por Ingetec.

Tabla 10 Características geométricas de las elipses

| ÁREA (ha) | RELACIÓN (a/b) = 2 | | RELACIÓN (a/b) = 2.5 | |
|-----------|--------------------|----------|----------------------|----------|
| | a (m) | b (m) | a (m) | b (m) |
| 100 | 398.94 | 797.88 | 356.82 | 892.06 |
| 1000 | 1261.57 | 2523.13 | 1128.38 | 2820.95 |
| 5000 | 2820.95 | 5641.90 | 2523.13 | 6307.83 |
| 10000 | 3989.42 | 7978.85 | 3568.25 | 8920.62 |
| 30000 | 6909.88 | 13819.77 | 6180.39 | 15450.97 |
| 50000 | 8920.62 | 17841.24 | 7978.85 | 19947.11 |
| 100000 | 12615.66 | 25231.33 | 11283.79 | 28209.48 |
| 200000 | 17841.24 | 35682.48 | 15957.69 | 39894.23 |

Fuente: (INGETEC, 2015).

En la Tabla 11 se presenta la precipitación total dentro de cada área definida por Ingetec (2015). A partir de estos valores se distribuyó espacialmente la precipitación con base en las características geométricas de las isoyetas elípticas, considerando 7 escenarios de desplazamiento del patrón. Para los 5 primeros, el foco de la tormenta se localizó en el sitio de cada una de las estaciones analizadas, La Caro (a), La Conejera (b), Serrezuela (c), Usaquén (d), Cerro Suba (e). En el escenario (f), el foco de la tormenta estuvo ubicado en el centroide del área de drenaje del sistema Torca – Guaymaral, por último, para el escenario (g), el centro de la tormenta fue localizado en el centroide de la cuenca de mayor aporte al sistema, correspondiente a la cuenca del canal Torca.

Tabla 11 Precipitación total máxima por áreas – Curvas PDF Ingetec

| ÁREA (ha) | PRECIPITACIÓN (mm) | | | | | |
|-----------|--------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | TR 3 | TR 5 | TR 10 | TR 25 | TR 50 | TR 100 |
| 100 | 46.90 | 51.90 | 57.70 | 64.40 | 69.00 | 73.20 |
| 1000 | 41.10 | 45.20 | 50.10 | 55.90 | 59.80 | 63.50 |
| 5000 | 34.70 | 38.00 | 41.70 | 45.90 | 48.60 | 50.90 |
| 10000 | 31.30 | 34.50 | 38.00 | 41.80 | 44.20 | 46.30 |
| 30000 | 26.30 | 29.50 | 33.10 | 37.10 | 39.70 | 42.10 |
| 50000 | 20.80 | 23.70 | 26.80 | 29.90 | 31.80 | 33.40 |
| 100000 | 14.50 | 16.10 | 17.70 | 19.00 | 19.60 | 19.90 |

Fuente: (INGETEC, 2015).

En la Tabla 12 se presenta la comparación de los volúmenes de precipitación estimados para cada una de las cuencas, a partir del patrón elíptico sugerido por Ingetec a partir de las dos relaciones a/b de las isoyetas elípticas, y el patrón estimado por esta consultoría para periodo de retorno de 100 años.

Tabla 12 Comparación de la precipitación total por subcuencas

| CUENCAS | PRECIPITACIÓN TOTAL TR 100 (mm) | | |
|------------------------------|---------------------------------|----------|------------|
| | a/b= 2.0 | a/b =2.5 | PATRÓN WSP |
| Canal Guaymaral Occidente 1 | 49.36 | 49.02 | 78.15 |
| Canal Guaymaral Occidente 2 | 50.64 | 51.45 | 82.51 |
| Canal Guaymaral Occidente 3 | 49.90 | 50.24 | 80.08 |
| Canal Torca Occidental_sub12 | 53.88 | 51.60 | 65.57 |
| Canal Torca Oriental 2 | 67.16 | 67.32 | 84.19 |
| Canal Torca Oriental_sub10 | 65.98 | 66.32 | 70.83 |
| Canal Torca Oriental_sub1 | 53.32 | 53.68 | 71.08 |
| Canal Torca Oriental_sub11 | 62.99 | 63.88 | 70.66 |
| Canal Torca Oriental_sub2 | 55.84 | 55.78 | 77.91 |
| Canal Torca Oriental_sub3 | 57.13 | 56.23 | 78.2 |
| Canal Torca Oriental_sub4 | 62.44 | 61.20 | 80.25 |
| Canal Torca Oriental_sub5 | 65.58 | 64.16 | 81.8 |
| Canal Torca Oriental_sub6 | 67.81 | 66.93 | 82.86 |
| Canal Torca Oriental_sub7 | 73.55 | 73.42 | 78.6 |
| Canal Torca Oriental_sub8 | 71.12 | 70.73 | 78.42 |

| CUENCAS | PRECIPITACIÓN TOTAL TR 100 (mm) | | |
|---------------------------|---------------------------------|----------|------------|
| | a/b= 2.0 | a/b =2.5 | PATRÓN WSP |
| Canal Torca Oriental_sub9 | 69.77 | 69.73 | 73.64 |
| Humedal Guaymaral 1-1 | 50.22 | 49.29 | 67.77 |
| Humedal Guaymaral 1-2 | 51.46 | 52.44 | 83.6 |
| Humedal Guaymaral 2 | 53.38 | 54.65 | 85.78 |
| Humedal Guaymaral 3 | 52.59 | 53.93 | 86.09 |
| Occidente 1_1 | 57.24 | 56.11 | 77.3 |
| Occidente 1_2 | 65.12 | 64.23 | 77.84 |
| Occidente 2 | 55.45 | 55.19 | 75.92 |
| Occidente 3 | 53.68 | 54.23 | 86.14 |
| Occidente 3-1 | 55.88 | 57.45 | 86.82 |
| Oriental 1 | 49.31 | 48.79 | 81.29 |
| Oriental 2 | 49.34 | 48.97 | 81.01 |
| Pilas 4 | 52.95 | 54.50 | 86.84 |
| Qda Aguas calientes 1 | 55.83 | 54.98 | 84.04 |
| Qda Aguas calientes 2 | 57.62 | 57.62 | 85.67 |
| Qda Aguas calientes 3 | 62.11 | 62.35 | 86.01 |
| Qda Aguas calientes 4 | 64.41 | 65.10 | 86.65 |
| Qda La Floresta 1 | 49.32 | 47.55 | 83.94 |
| Qda La Floresta 2 | 51.04 | 52.25 | 86.21 |
| Qda La Floresta 3 | 50.89 | 52.17 | 85.35 |
| Qda La Floresta 4 | 51.52 | 53.00 | 86.33 |
| Qda Novita 1 | 49.79 | 49.57 | 84.18 |
| Qda Novita 2 | 50.14 | 50.88 | 84.23 |
| Qda Novita 3 | 50.13 | 50.98 | 83.47 |
| Qda Patiño 1 | 53.87 | 53.78 | 86.55 |
| Qda Patiño 2 | 57.97 | 58.53 | 87.1 |
| Qda Patiño 3 | 60.03 | 61.23 | 88.17 |
| Qda Patiño 4 | 61.63 | 63.38 | 88.83 |
| Qda Pilas 1 | 52.29 | 53.35 | 87.63 |
| Qda Pilas 2 | 53.05 | 54.57 | 87.57 |
| Qda Pilas 3 | 53.57 | 55.23 | 91.49 |
| Qda San Juan 1 | 51.76 | 51.78 | 88.48 |
| Qda San Juan 2 | 55.44 | 56.50 | 89.1 |
| Qda San Juan 3 | 55.92 | 57.65 | 87.73 |
| Qda San Juan 4 | 57.71 | 59.33 | 89.84 |
| Qda San Juan 5 | 57.74 | 59.73 | 90.91 |
| Qda Tibabita 1 | 57.49 | 56.10 | 82.68 |
| Qda Tibabita 2 | 60.07 | 58.53 | 82.22 |
| Qda Tibabita 3 | 64.76 | 64.27 | 84.08 |
| Qda Tibabita 4 | 67.79 | 68.03 | 84.63 |

| CUENCAS | PRECIPITACIÓN TOTAL TR 100 (mm) | | |
|-------------|---------------------------------|----------|------------|
| | a/b= 2.0 | a/b =2.5 | PATRÓN WSP |
| Qda Torca 1 | 48.80 | 46.56 | 80.85 |
| Qda Torca 2 | 49.59 | 49.24 | 83.28 |
| Qda Torca 3 | 49.80 | 50.01 | 85.67 |
| Qda Torca 4 | 49.70 | 49.97 | 82.62 |
| Promedio | 56.52 | 56.71 | 82.66 |

Fuente: WSP 2019, a partir de datos INGETEC 2015.

De la Tabla 12 se coligen dos hechos principales: el primero que la precipitación máxima para un mismo patrón, distribuida espacialmente, tiene escasa variación entre las cuencas, esto debido posiblemente a que el tamaño de las cuencas dentro de la zona de estudio, no presentan una notoria variación espacial. En segundo término, al comparar los patrones, la distribución de la precipitación de la zona nororiental de la ciudad es distinta al de toda la Sabana, razón por la cual Ingetec no considera adecuado el empleo de un patrón elíptico para llevar a cabo análisis de este tipo, y que por el contrario deberán llevarse a cabo estudios específicos, como es el caso de la presente consultoría.

En la Tabla 13 se presenta el volumen medio de precipitación del sistema de drenaje Torca Guaymaral para cada uno de los escenarios analizados, considerando las precipitaciones de periodo de retorno de 100 años y duración de tormenta de tres (3) horas, teniendo en cuenta las dos relaciones de geometría de isoyetas elípticas definidas por INGETEC ($a/b = 2$ y 2.5). El valor promedio se calcula a partir de un área de 5708 ha para toda la cuenca. En la Figura 50 se presenta el desplazamiento del patrón elíptico para la relación $a/b = 2.0$ y en la Figura 51 para la relación $a/b=2.5$.

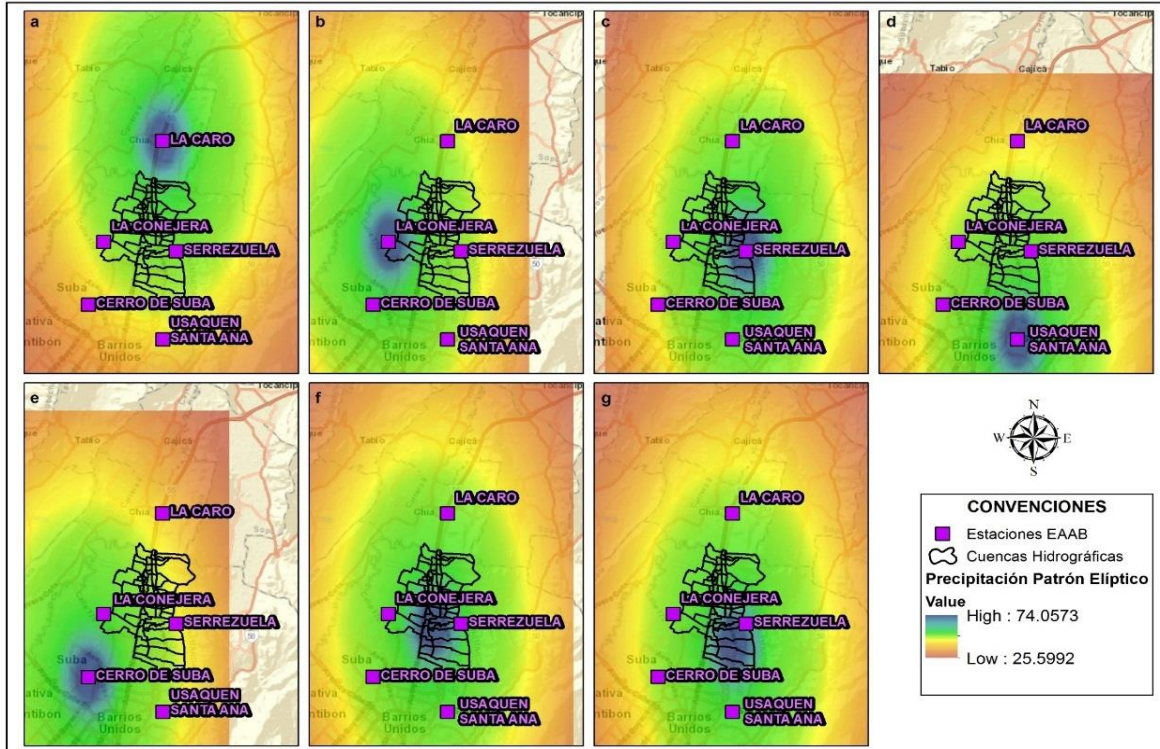
Tabla 13 Volumen total de precipitación, evento Tr100 años y duración de 3 horas

| ESCENARIO | CENTROIDE | VOLUMEN DE PRECIPITACION | | | |
|-----------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------|--------------------------------|
| | | a/b =2.0 | | a/b=2.5 | |
| | | ΣP (mm) | Promedio (mm/Km ²) | ΣP (mm) | Promedio (mm/Km ²) |
| a | Estación La Caro | 2915.7 | 51.08 | 2846.4 | 49.87 |
| b | Estación La Conejera | 2876.7 | 50.40 | 2674.4 | 46.85 |
| c | Estación Serrezuela | 3124.8 | 54.74 | 3045.6 | 53.36 |
| d | Estación Usaquén | 2793.1 | 48.93 | 2669.5 | 46.77 |
| e | Estación Cerro Suba | 2695.2 | 47.22 | 2336.4 | 40.93 |
| f | Centroide Área Lagos de Torca | 3334.9 | 58.42 | 3345.7 | 58.61 |
| g | Centroide Cuenca Canal Torca | 3122.6 | 54.71 | 3085.8 | 54.06 |

Fuente: WSP 2019, a partir de datos INGETEC 2015.

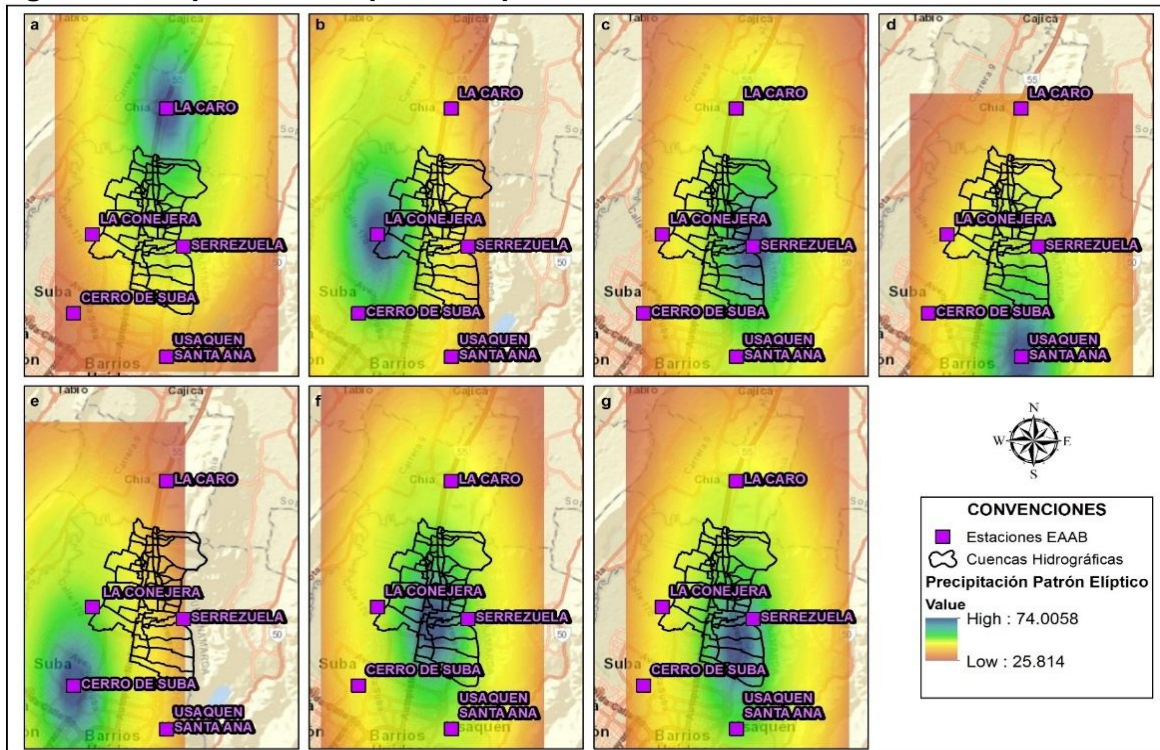
La estimación del volumen total de la Tabla 13, aunque no tiene un significado físico, es decir que corresponda a una precipitación real, es un indicador de la manera como se concentra un evento de precipitación según una distribución elíptica sugerida para cada una de las estaciones de registro y en dos centroides adicionales, uno en el área del polígono de Lagos de Torca y el segundo en la cuenca más extensa.

Figura 50 Desplazamiento patrón elíptico relación $a/b=2.0$



Fuente: WSP 2019, a partir de datos INGETEC 2015.

Figura 51 Desplazamiento patrón elíptico relación $a/b=2.5$



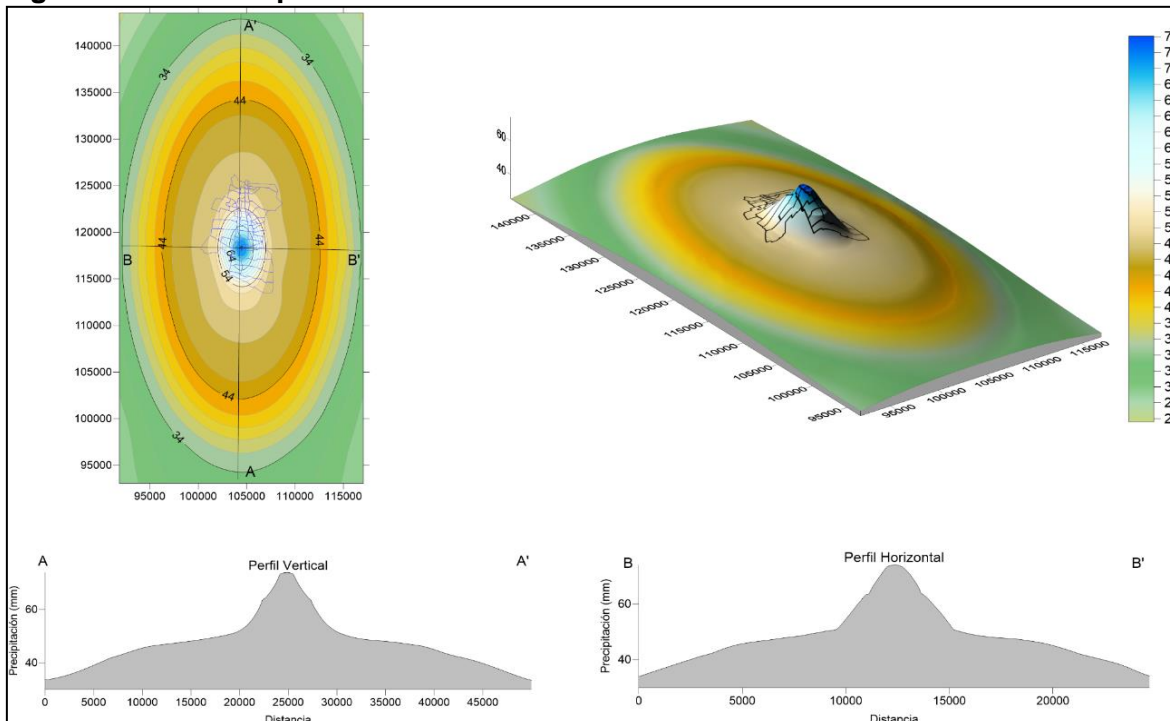
Fuente: WSP 2019, a partir de datos INGETEC 2015.

En comparación con el análisis espacial realizado con los patrones anuales definidos en el desarrollo del presente informe, se tiene una altura de precipitación promedio del sistema Torca – Guaymaral para un periodo de retorno de 100 años de 82.66 mm, a partir del patrón desplazado 1, que corresponde a un volumen mayor con respecto a los encontrados con el desplazamiento del patrón elíptico, por tal razón, se selecciona este patrón para la determinación de la tormenta de diseño.

De manera gráfica y con el objeto de efectuar una comparación del comportamiento de la distribución espacial de la precipitación, en la Figura 52 se presenta el patrón elíptico para la relación $a/b= 2.0$ para las precipitaciones de periodo de retorno de 100 años y en la Figura 53 se presenta el patrón para el año 2013 encontrado por esta consultoría. Se presenta la localización de las cuencas y los perfiles transversales de las distribuciones a lo largo de los ejes vertical (Sur – Norte) y horizontal (Este – Oeste).

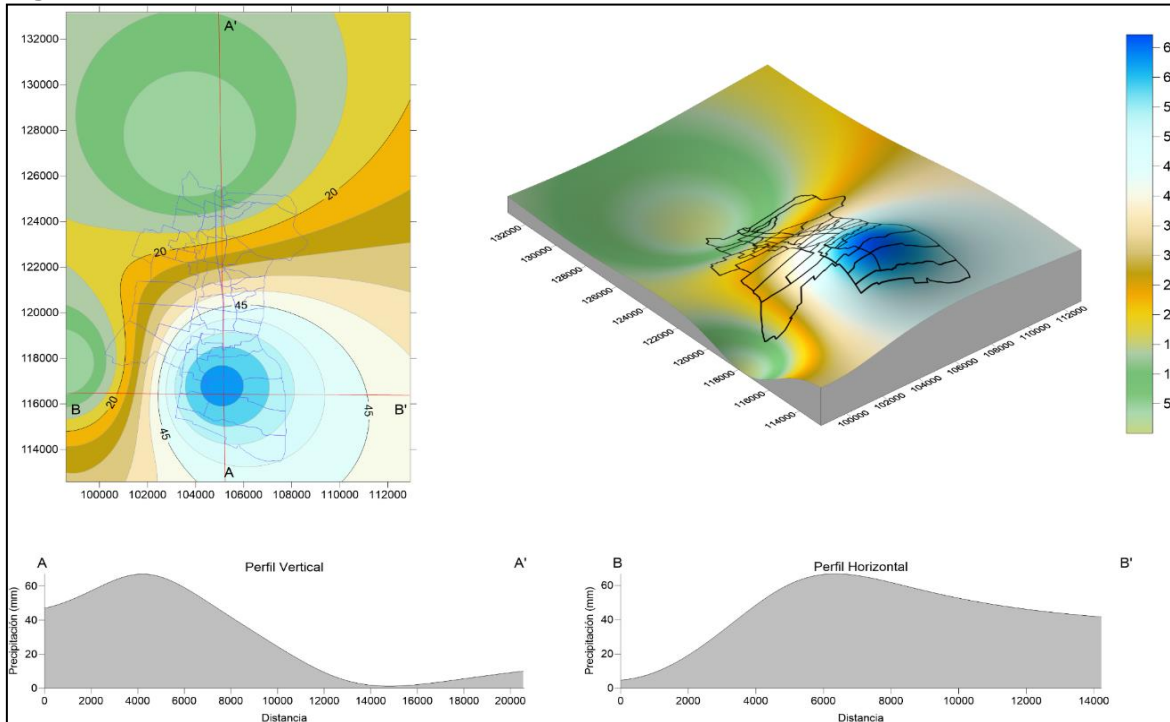
Según lo anterior se sugiere que la duración del evento de máximo volumen siga siendo el de 3 horas, con una distribución temporal según lo aquí planteado. De todas maneras, debe evaluarse su aplicación de manera específica al diseño de redes de alcantarillado o estimación de caudales hidrológicos de cuencas en la zona, según lo establece la Norma NS-085 de la EAAB, ya que la respuesta hidrológica de una cuenca, dependerá fundamentalmente de su extensión y el criterio que se aplique para diferenciar el método de cálculo de la escorrentía final.

Figura 52 Patrón elíptico escenario f



Fuente: WSP 2019, a partir de datos INGETEC 2015 y EAAB 2019.

Figura 53 Patrón de distribución año 2013 WSP

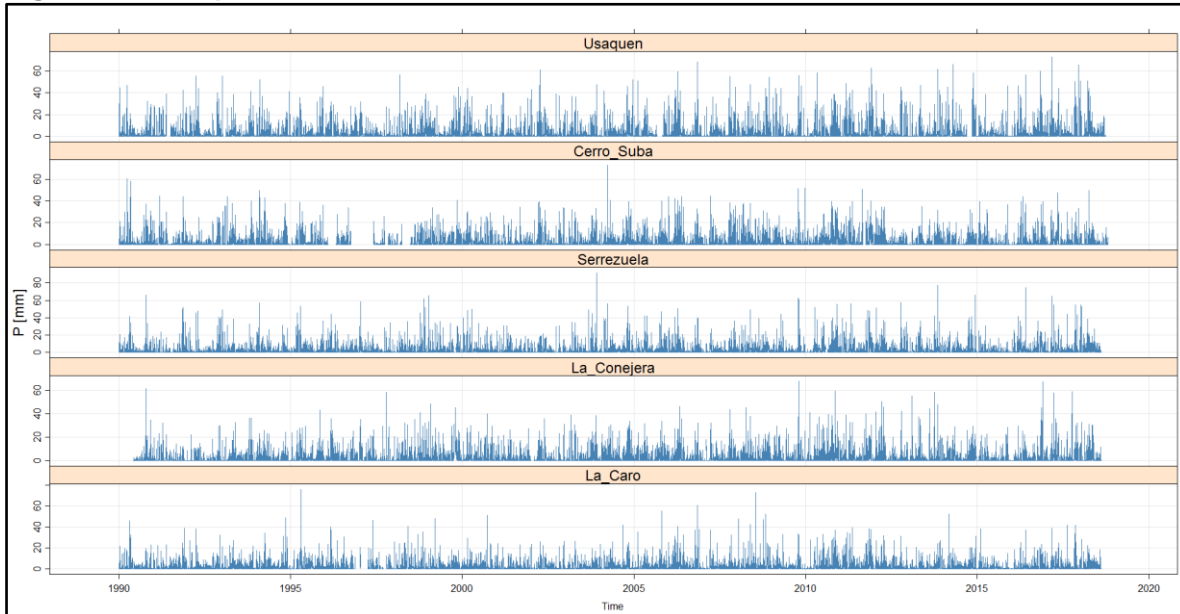


Fuente: WSP 2019, a partir de datos INGETEC 2015 y EAAB 2019.

5.6.2 Análisis evento Niña 2010-2011

Con el objeto de evaluar eventos hidrológicos extremos ocurridos recientemente en la cuenca de análisis, en este aparte se hace un análisis comparativo de los registros de precipitación ocurrida en la zona de estudio y establecer la incidencia en el comportamiento de los niveles de inundación del sistema hídrico Torca – Guaymaral. Para analizar los eventos extremos de precipitación en el área de estudio, se realizó el análisis del fenómeno de la niña ocurrido en el periodo 2010-2011, analizando la precipitación diaria de este periodo en comparación con otros años. En la Figura 54 se presentan las series de precipitación diaria de las estaciones analizadas que tienen influencia sobre el área de estudio. La precipitación máxima diaria registrada en la estación Usaquén es de 121.2 mm, para la estación Cerro Suba es de 73.2 mm, para la estación Serrezuela de 91 mm, para la estación La Conejera de 67.7 mm y para la estación La Caro 76.0 mm.

Figura 54 Precipitación diaria estaciones analizadas



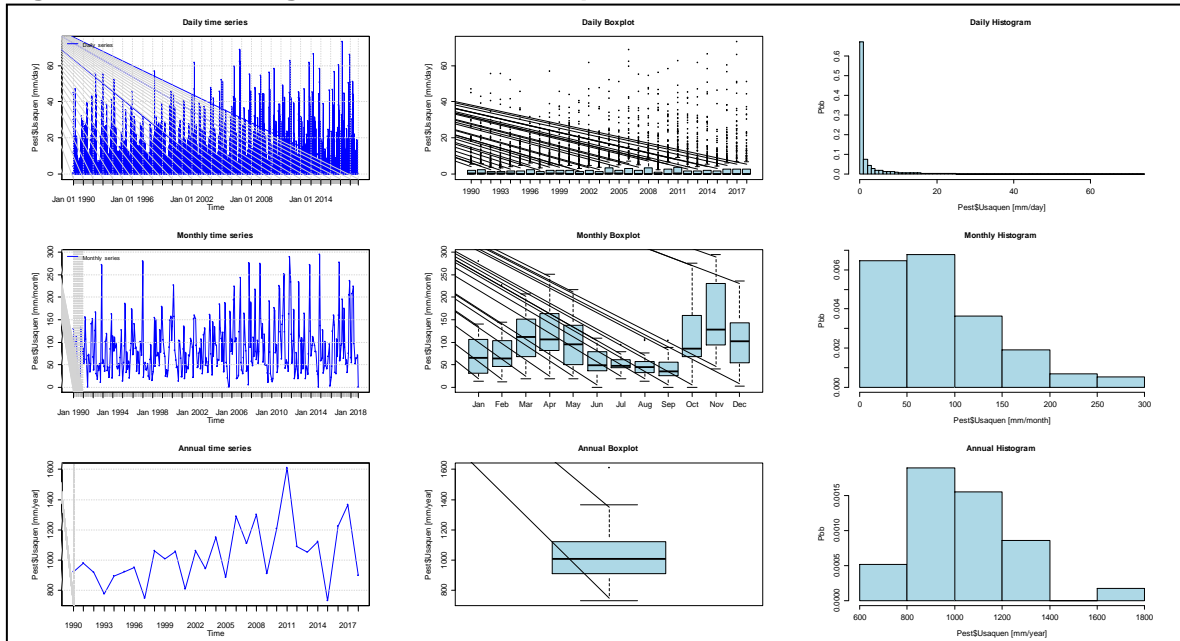
Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

En la Figura 55, Figura 56, Figura 57, Figura 58 y Figura 59 se presenta el resumen gráfico de la precipitación registrada en cada una de las estaciones analizadas, en las cuales se aprecia el rango de precipitación diaria, mensual y anual registrado, en el cual se muestra que el volumen acumulado por año para el periodo 2010-2011 es relativamente alto, a pesar de que durante ese periodo no se registraron eventos puntuales de alto volumen. Esto se explica considerando que, durante el Fenómeno de aquellos años, se presentaron tormentas de moderada intensidad en periodos continuos, lo que se verificó al momento de llevar a cabo la selección de eventos de mayor volumen de precipitación, cuando se hizo el análisis de distribución espacial de la precipitación, descrito en un aparte anterior (Tabla 8).

La distribución temporal de igual manera refleja un comportamiento claramente bimodal, presentando los volúmenes más altos de precipitación en los meses de octubre y noviembre.

Para la estación Usaquén Santa Ana se observa un régimen bimodal presentando las precipitaciones más altas en el mes de noviembre, con respecto a la precipitación mensual; de acuerdo con el histograma de frecuencias el rango más recurrente corresponde al rango de 50 a 100 mm, el mayor valor de precipitación diaria correspondiente a 121.2 mm que se registró el 4 de enero de 1938; la máxima precipitación total mensual se registró el mes de noviembre de 2014 con un valor de 293.9 mm, con respecto al valor anual, el mayor valor registrado corresponde al año 2011 con 1609.2 mm.

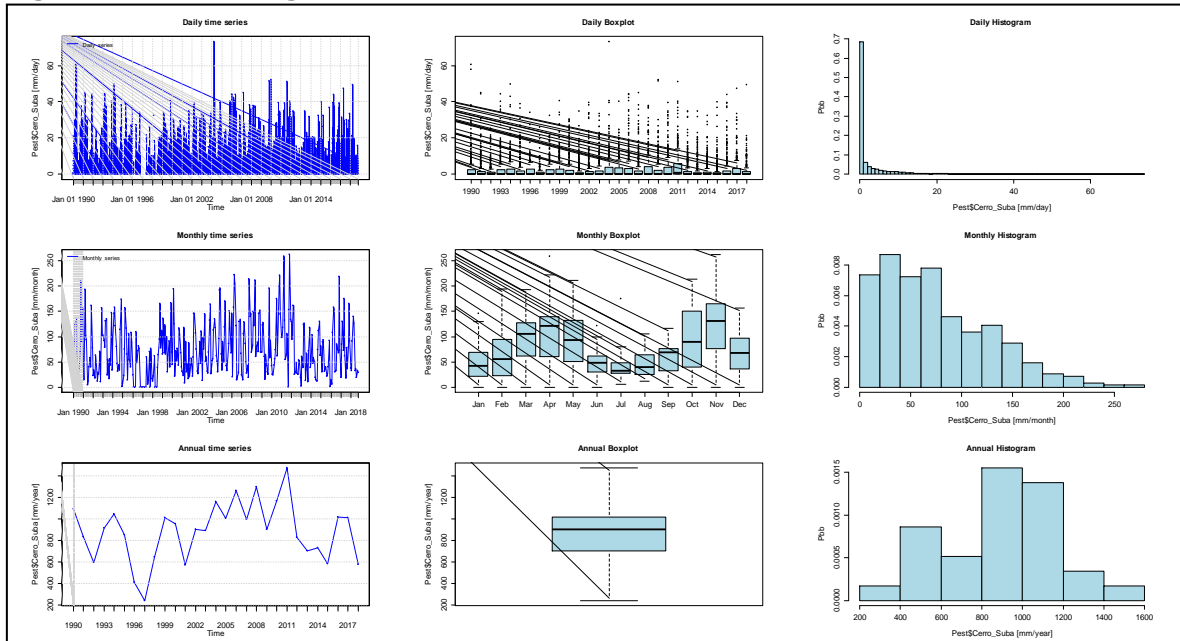
Figura 55 Resumen gráfico estación Usaquéen Santa Ana



Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

Para la estación Cerro Suba el régimen es igualmente bimodal presentando precipitaciones más altas en el mes de noviembre, con respecto a la precipitación mensual, de acuerdo con el histograma de frecuencias el rango más recurrente corresponde al rango de 25 a 50 mm, el mayor valor de precipitación diaria correspondiente a 73.2 mm se registró el 26 de marzo de 2004, la máxima precipitación total mensual se registró el mes de noviembre de 2011 con un valor de 261.8 mm, con respecto al valor anual, el mayor valor registrado corresponde al año 2011 con 1476.1 mm.

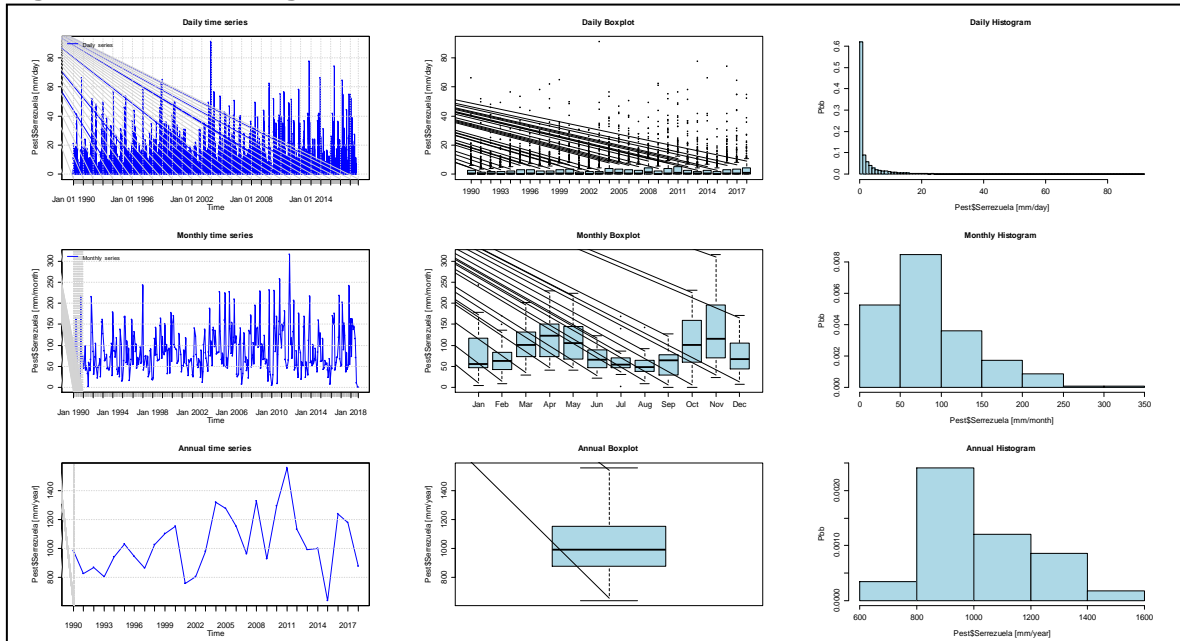
Figura 56 Resumen gráfico estación Cerro Suba



Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

En la estación Serrezuela se aprecia un régimen bimodal presentando las precipitaciones más altas en el mes de noviembre, con respecto a la precipitación mensual; de acuerdo con el histograma de frecuencias el rango más recurrente se encuentra entre 50 a 100 mm y el mayor valor de precipitación diaria correspondiente a 91.2 mm se registró el 1 de diciembre de 2013; la máxima precipitación total mensual se registró el mes de noviembre de 2011 con un valor de 315.6 mm, con respecto al valor anual, el mayor valor registrado corresponde al año 2011 con 1554.8 mm.

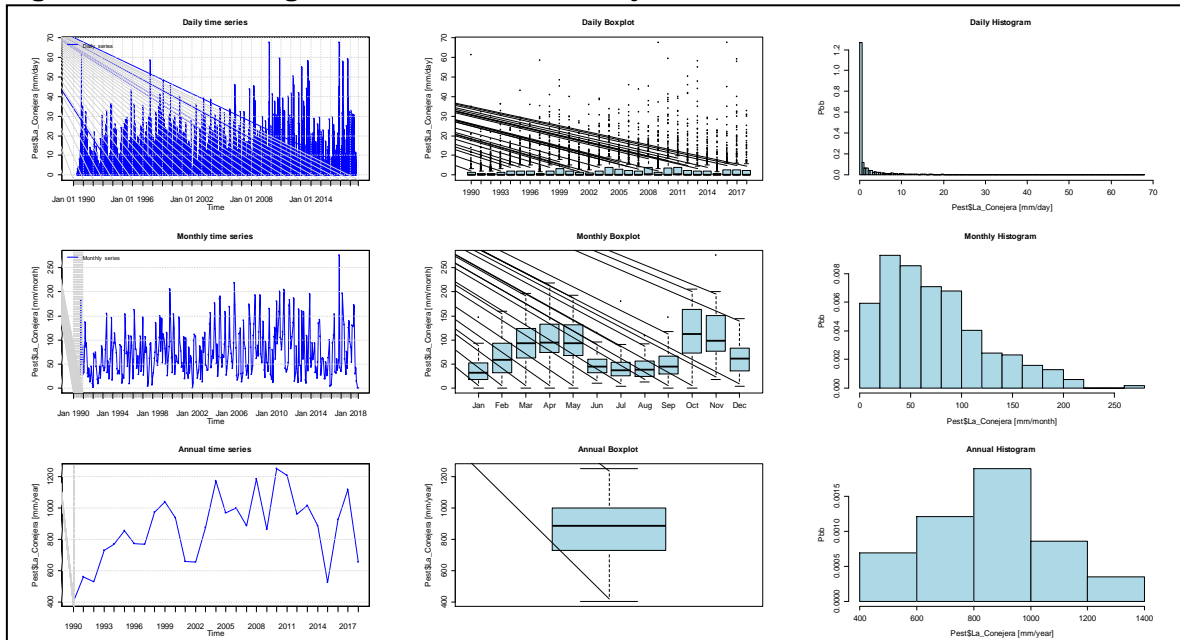
Figura 57 Resumen gráfico estación Serrezuela



Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

Para la estación la Conejera se aprecia claramente un régimen bimodal presentando las precipitaciones más altas en el mes de abril, con respecto a la precipitación mensual, de acuerdo con el histograma de frecuencias el rango más recurrente corresponde al rango de 25 a 50 mm, el mayor valor de precipitación diaria correspondiente a 67.7 mm se registró el 19 de octubre de 2009, la máxima precipitación total mensual se registró el mes de noviembre de 2016 con un valor de 275.3 mm, con respecto al valor anual, el mayor valor registrado corresponde al año 2010 con 1251.4 mm.

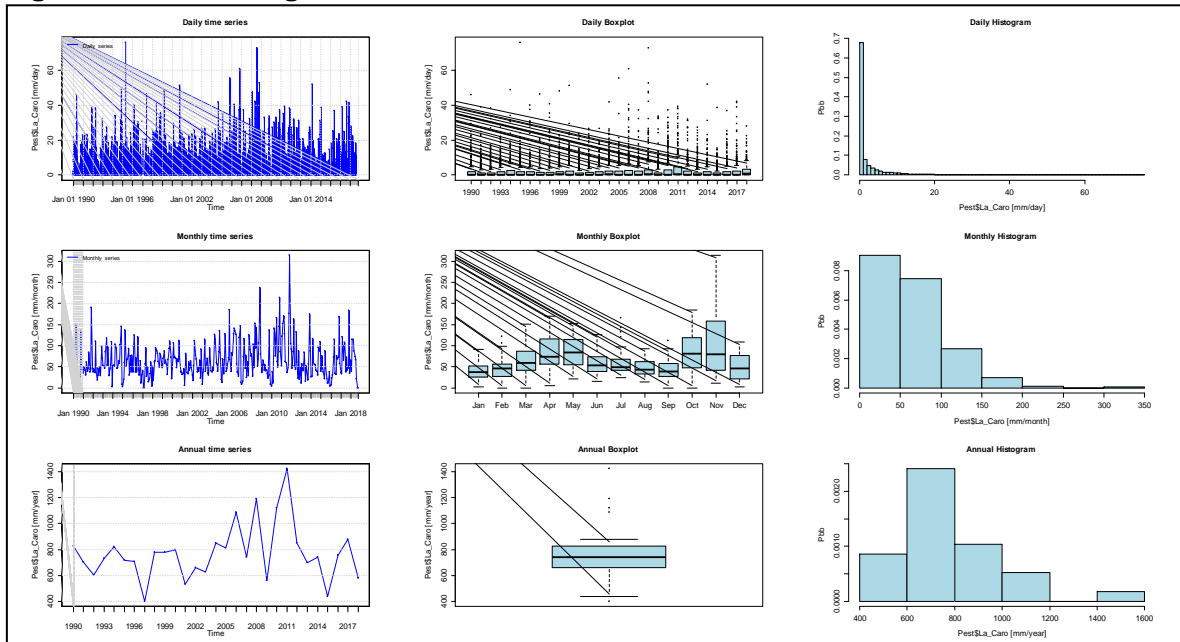
Figura 58 Resumen gráfico estación La Conejera



Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

Para la estación La Caro se aprecia claramente un régimen bimodal presentando las precipitaciones más altas en el mes de noviembre, con respecto a la precipitación mensual, de acuerdo con el histograma de frecuencias el rango más recurrente corresponde al rango de 0 a 50 mm, el mayor valor de precipitación diaria correspondiente a 76.0 mm se registró el 20 de abril de 1995, la máxima precipitación total mensual se registró el mes de noviembre de 2011 con un valor de 313.2 mm, con respecto al valor anual, el mayor valor registrado corresponde al año 2011 con 1422.4 mm.

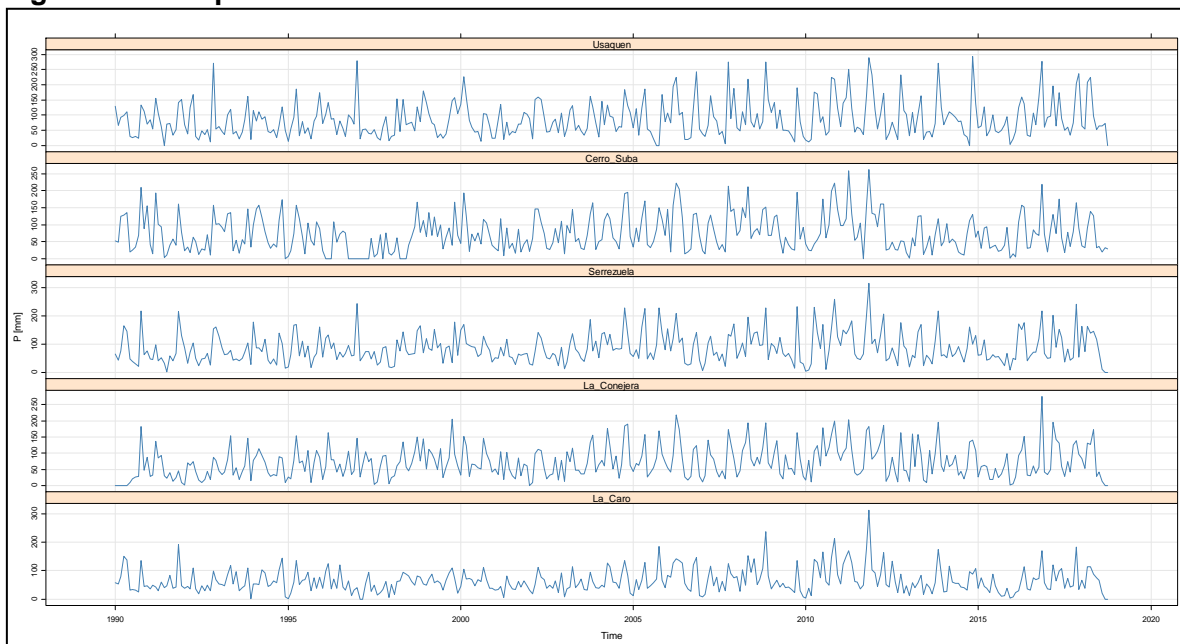
Figura 59 Resumen gráfico estación La Caro



Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

En la Figura 60 se presenta la precipitación mensual de las estaciones, donde se aprecia que el periodo 2010-2011 no presenta un volumen de precipitación particularmente alto.

Figura 60 Precipitación mensual

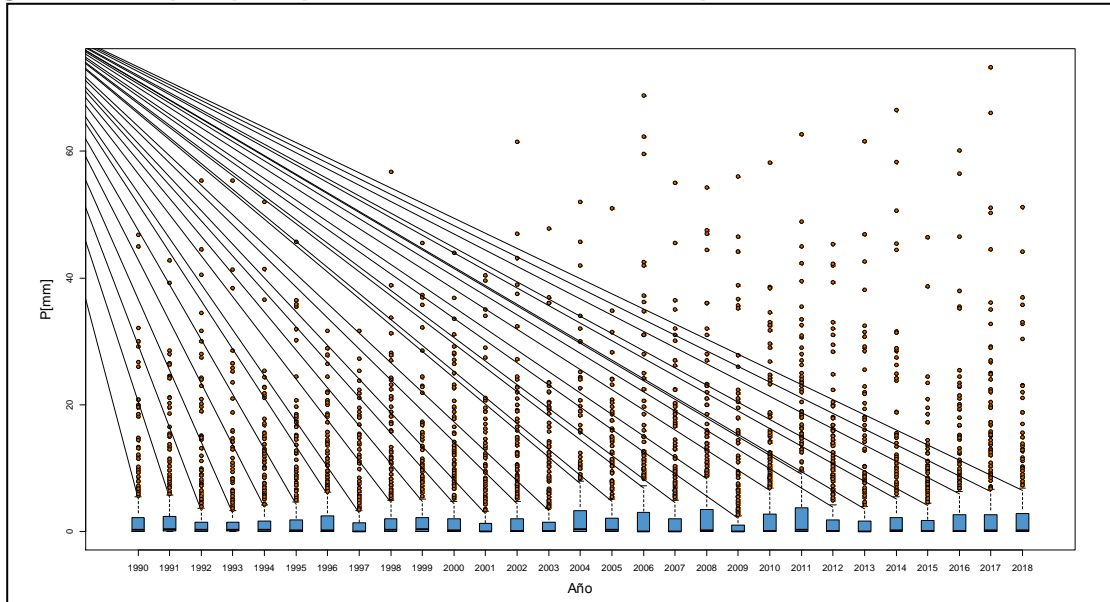


Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

5.6.2.1 Diagrama de cajas precipitación diaria

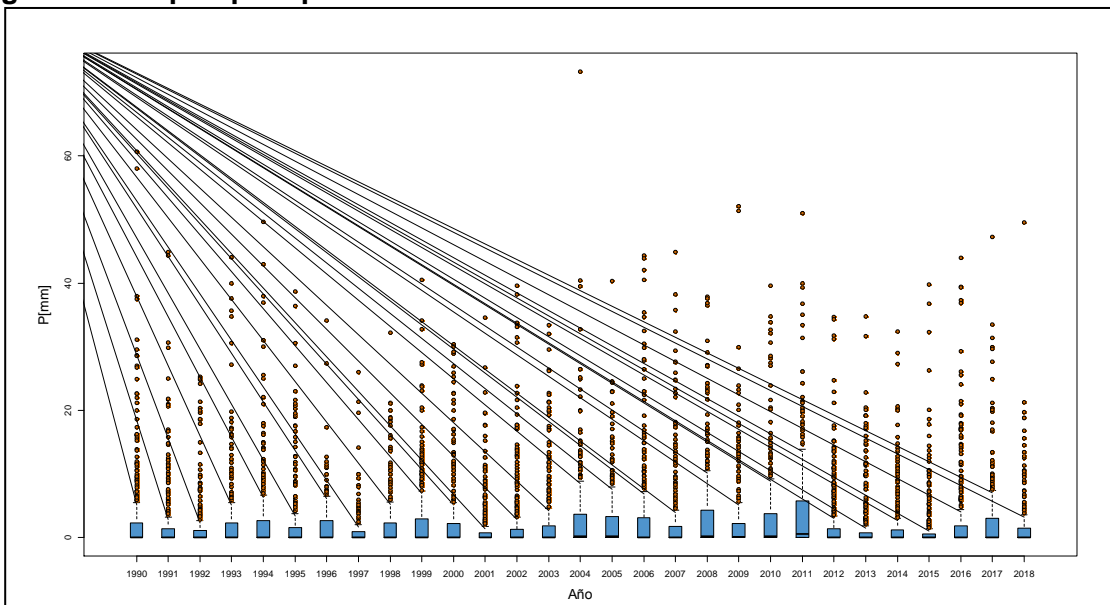
En la Figura 61, Figura 62, Figura 63, Figura 64 y Figura 65 se presentan los diagramas de cajas y bigotes de la precipitación diaria registrada en las estaciones del área de estudio, en las cuales se aprecia que para los registros diarios, a diferencia de los registros anuales en el periodo 2010-2011, no se presenta un volúmenes altos que puedan registrarse dentro del análisis de máximos que se llevó a cabo previamente.

Figura 61 Boxplot precipitación diaria estación Usaqué Santa Ana



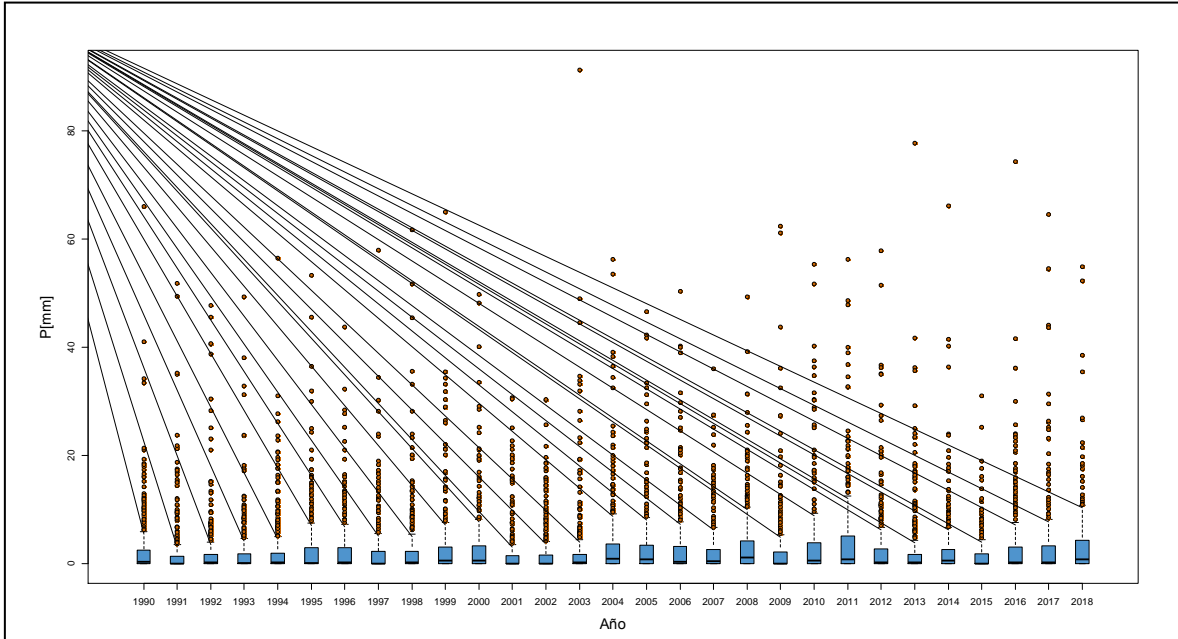
Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

Figura 62 Boxplot precipitación diaria estación Cerro Suba



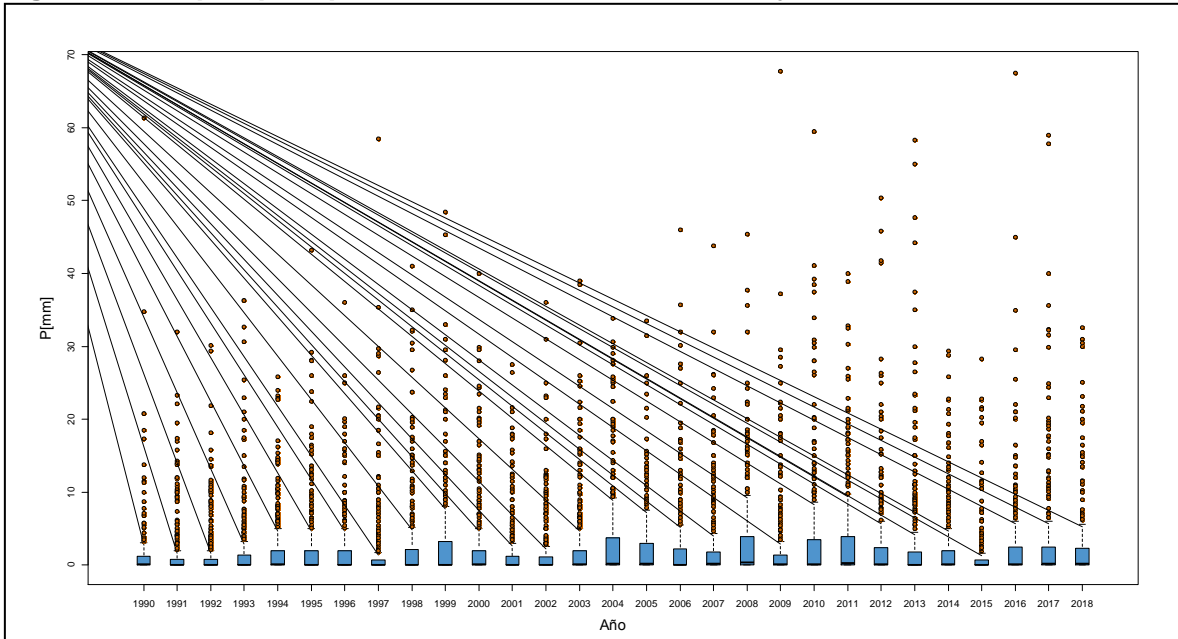
Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

Figura 63 Boxplot precipitación diaria estación Serrezuela



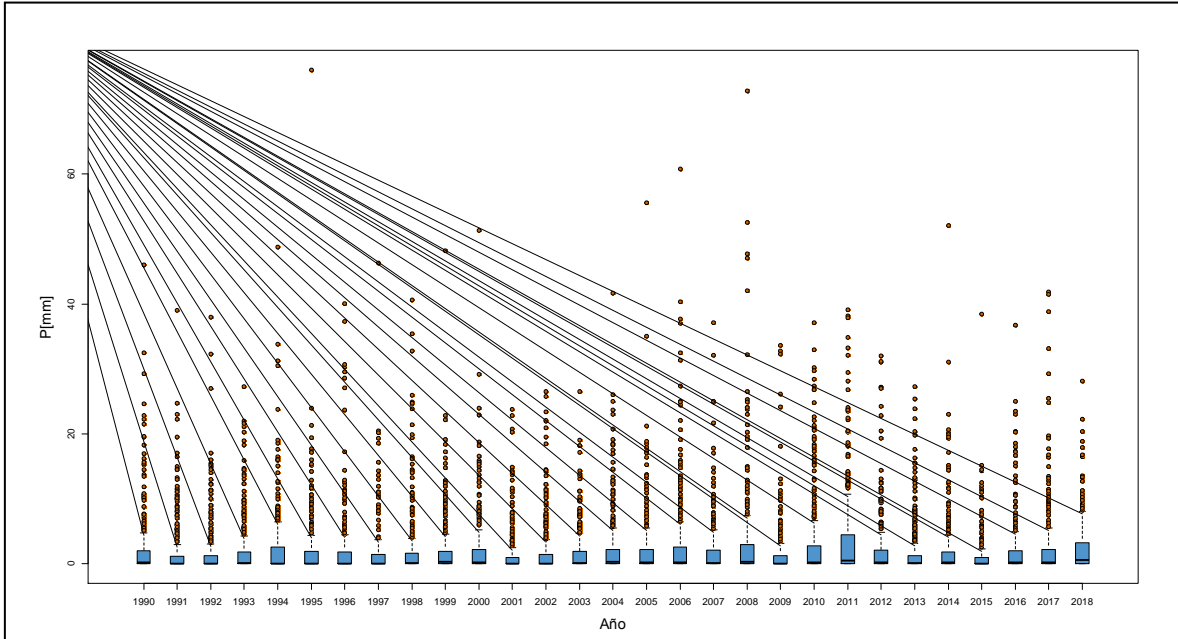
Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

Figura 64 Boxplot precipitación diaria estación La Conejera



Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

Figura 65 Boxplot precipitación diaria estación La Caro

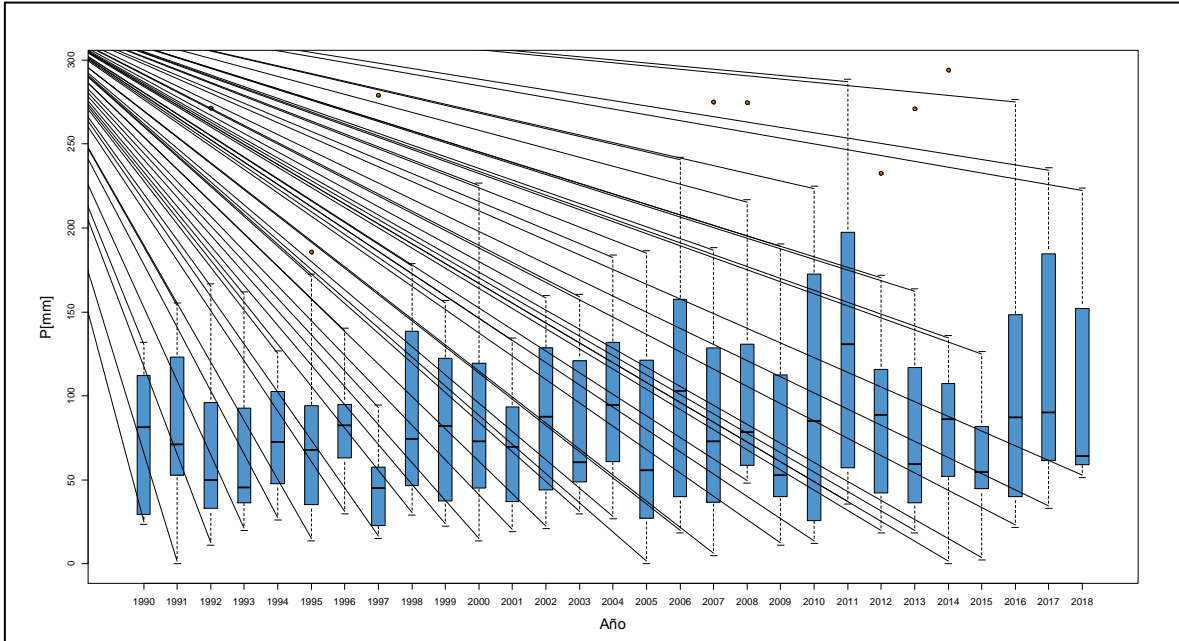


Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

5.6.2.2 Diagrama de cajas precipitación mensual

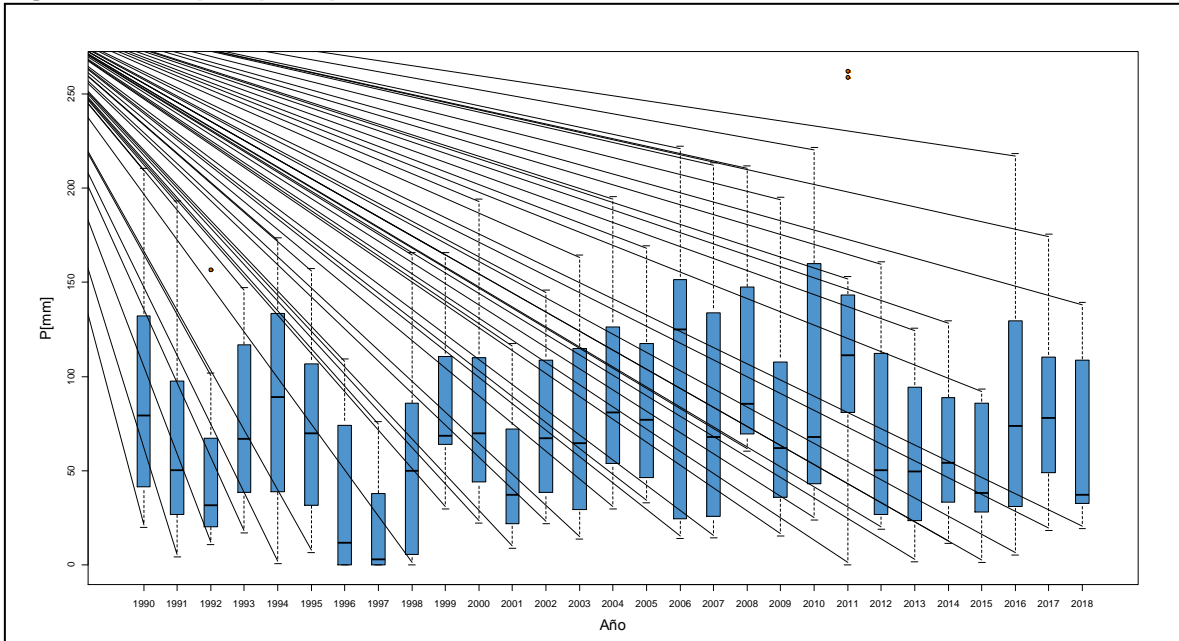
En la Figura 66, Figura 67, Figura 68, Figura 69 y Figura 70 se presentan los diagramas de cajas y bigotes de la precipitación mensual de las estaciones analizadas, en este caso, si es posible apreciar un aumento de los volúmenes de precipitación para el periodo 2010-2011, es decir, este periodo de fenómeno Niña evidentemente tuvo gran influencia sobre el área de estudio en cuanto a volúmenes de precipitación acumulados mensuales, más no en cuanto a precipitaciones máximas en 24 horas o tormentas únicas de gran magnitud.

Figura 66 Boxplot precipitación mensual estación Usaquén Santa Ana



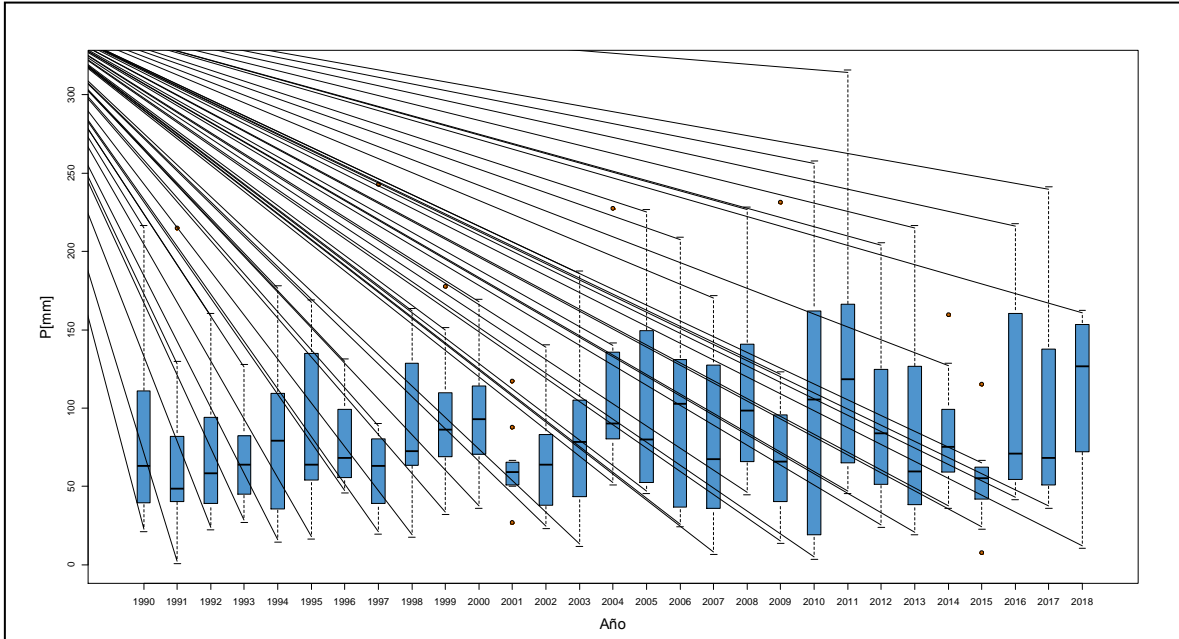
Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

Figura 67 Boxplot precipitación mensual estación Cerro Suba



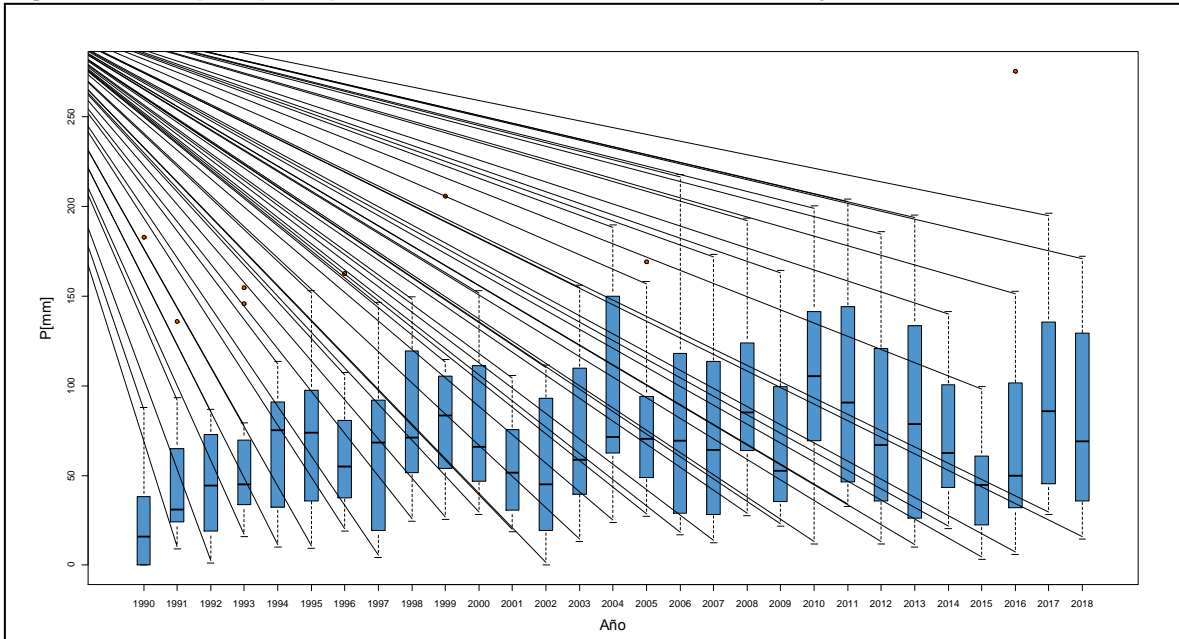
Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

Figura 68 Boxplot precipitación mensual estación Serrezuela



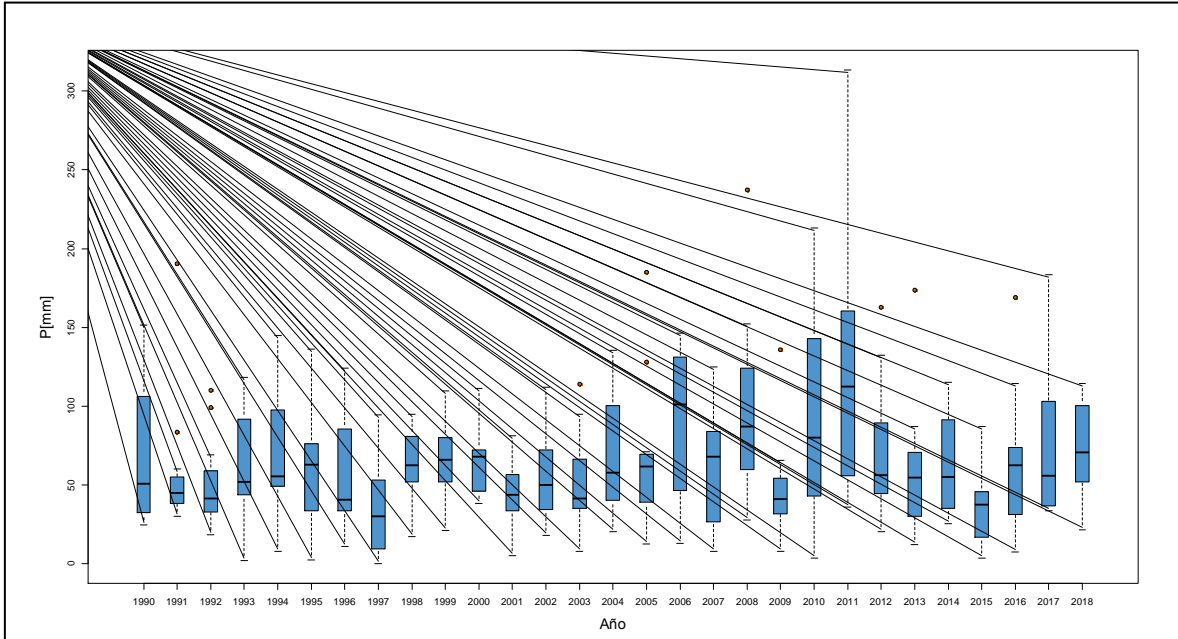
Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

Figura 69 Boxplot precipitación mensual estación La Conejera



Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

Figura 70 Boxplot precipitación mensual estación La Caro



Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

5.7 HIDROGRAFÍA

5.7.1 Generalidades de la cuenca Torca - Guaymaral

El proyecto se sitúa dentro de la cuenca del Río Bogotá, al borde de los cerros orientales al norte de Bogotá desde la calle 193 hasta la calle 245 y la desembocadura en el Río Bogotá, recibiendo las aguas de escorrentía de los cerros.

La zona de estudio incluye dos áreas de drenaje externas que confluyen al humedal de Torca-Guaymaral en el nororiente de la ciudad (Cuenca Torca), cuyo sistema hídrico está conformado por una serie de drenajes de alcantarillado que fluyen a través del Canal Torca que, en la zona urbana, se inicia hacia la Calle 134 (Lago del Country) en la localidad de Usaquén, corre en sentido sur norte, contrario al río Bogotá hasta desembocar en éste. La segunda área externa corresponde a las áreas de drenaje pluvial correspondientes al área comprendida entre la Calle 170 y la Calle 201, y entre el corredor de la Avenida Boyacá y la Autopista Norte.

El territorio del área de drenaje Torca-Guaymaral pertenece a las localidades de Suba y Usaquén y se caracteriza por un paisaje de modelado fluvio-lacustre con materiales aluviales duros y blandos e intermedios de depósitos de arcilla. El humedal Torca-Guaymaral fue fraccionado por la construcción de la Autopista Norte en 1952; la fracción más grande, ubicada al occidente, se denominada Guaymaral, mientras que la ubicada en el fragmento oriental recibe el nombre de Torca.

El humedal de Torca está alimentado directamente por tres quebradas que descienden de los Cerros Orientales: las quebradas Patiño, San Juan y Aguas Calientes, además del canal urbano Torca, en el que as su vez hace su entrega la quebrada Tibabita. En el humedal Guaymaral, lo alimenta las aguas del humedal de Torca a través de obras de drenaje que atraviesan la Autopista Norte y la quebrada del Guaco, la cual es represada antes para alimentar algunos cultivos. En el transcurso entre la salida del humedal Guaymaral hasta el río Bogotá, hacen la entrega las quebradas La Floresta, Nóvita y Torca. Estas quebradas y canales que alimentan el complejo, principalmente llevan aguas lluvias y negras de conexiones erradas del área cercana al complejo hídrico (CAR y Planeación Ecológica Ltda., 2006).

Esta área de drenaje tiene una extensión de 5708 ha, con alturas máximas de 3215 msnm y mínimas de 2641 msnm. El canal Torca tiene una longitud de 4,24 kilómetros, nace en los Cerros Orientales, y desemboca al sistema Humedal Torca-Guaymaral. La cuenca que drena a dicha corriente tiene un área de aproximadamente 2330 hectáreas, con una precipitación media de 982 mm/año. Esta subcuenca se caracteriza por recibir descargas de residuos provenientes de actividades agropecuarias (EAAB, 2007).

El alcantarillado ha sido proyectado como un sistema separado, que descarga las aguas lluvias al canal Torca (o alguno de sus afluentes), y las aguas residuales son transportadas por la red de interceptores hacia la PTAR Salitre. El principal interceptor de la cuenca se denomina el Interceptor del río Bogotá Torca-Salitre, más conocido como IRB. De acuerdo con el Plan de Saneamiento y Manejo de Vertimientos (PSMV, EAAB, 2007), el IRB drena las aguas residuales producidas en la cuenca hacia la PTAR Salitre. Por lo tanto, los problemas de calidad del agua en el canal Torca se deben principalmente a conexiones erradas a los colectores del alcantarillado pluvial y otro tanto al vertimiento tratado o no que hacen los desarrollos urbanos aislados que se encuentran en el sector, hacia el sistema de vallados y/o canales antrópicos, que descargan finalmente al sistema Torca – Guaymaral.

El proyecto se desarrolla sobre la terraza aluvial del Río Bogotá. Las aguas de escorrentía que llegan desde los cerros bajan en régimen torrencial hasta la Carrera Séptima, a partir de la cual las pendientes se suavizan y los cauces se dividen en canales, conductos, cunetas y cauces menores. Esta zona con drenajes artificiales entre la Séptima y la Autopista se encuentra fuertemente intervenida, con presencia de zonas urbanizadas residenciales o industriales, potreros y áreas recreativas.

Hacia el costado occidental de la Autopista Norte, el sistema de drenaje es típico de las zonas llanas de la Sabana, y se compone de vallados o canales relictos del gran sistema hídrico de humedales, los cuales han sido reconfigurados o realineados por la presión sobre la tierra en la zona. De estos sistemas se pueden destacar el existente sobre la Calle 200 o Avenida El Polo, la Calle 209 o Avenida Arrayanes, la Calle 222, la Calle 234 o Avenida Guymaral, y otros menores que drenan solamente grandes predios. Todos estos sistemas hacen su entrega directa al canal o Humedal Guaymaral.

5.7.2 Identificación y descripción de sistemas lénticos y lóuticos¹

El sistema de drenaje del POZ Norte, está conformado por varios elementos dentro de los cuales se destaca el sistema Torca – Guaymaral, conformado por los canales y humedales que llevan los mismos nombres (canal Torca, humedal Torca, humedal Guaymaral, canal Guaymaral), sistema que es el eje central de drenaje, no solo del Borde Norte, sino también de la cuenca del Canal río Torca, cuenca que drena de sur a norte y cuya área aproximada es de 5708 Ha.

Si se divide el sector en dos grandes áreas, oriental y occidental, separadas entre sí por la Autopista Norte la zona oriental está drenada por el canal Tibabita y las quebradas (nombradas de Sur a Norte) Aguas Calientes, Patiño, San Juan, Las Pilas, La Floresta, Novita y Torca. Mientras la zona occidental es drenada por un sistema conformado por tres importantes vallados o canales artificiales (vallado San José, Guaymaral y Arrayanes), y una serie de zanjas artificiales conformadas generalmente a los lados de las vías del sector.

Visto de esta forma, es claro que el drenaje del sector debe aprovechar estos sistemas como sistemas de recolección de aguas lluvias que permitan conducir el flujo hacia un eje central articulador, es decir, hacia un elemento que drene el caudal total de la cuenca del sistema Torca – Guaymaral hacia el río Bogotá.

Teniendo en cuenta la zonificación hidrográfica del IDEAM (IDEAM, 2013), el área de estudio se encuentra en el Área Hidrográfica 2, del Magdalena-Cauca, Subzona Hidrográfica 21, del Alto Magdalena, en la Subzona Hidrográfica 2120, del Río Bogotá. En la Tabla 14. se presenta la zonificación hidrográfica del área de estudio y en la Figura 71 se presenta la distribución espacial de la red hidrológica del área de estudio.

Tabla 14. Red Hidrográfica en la zona de estudio

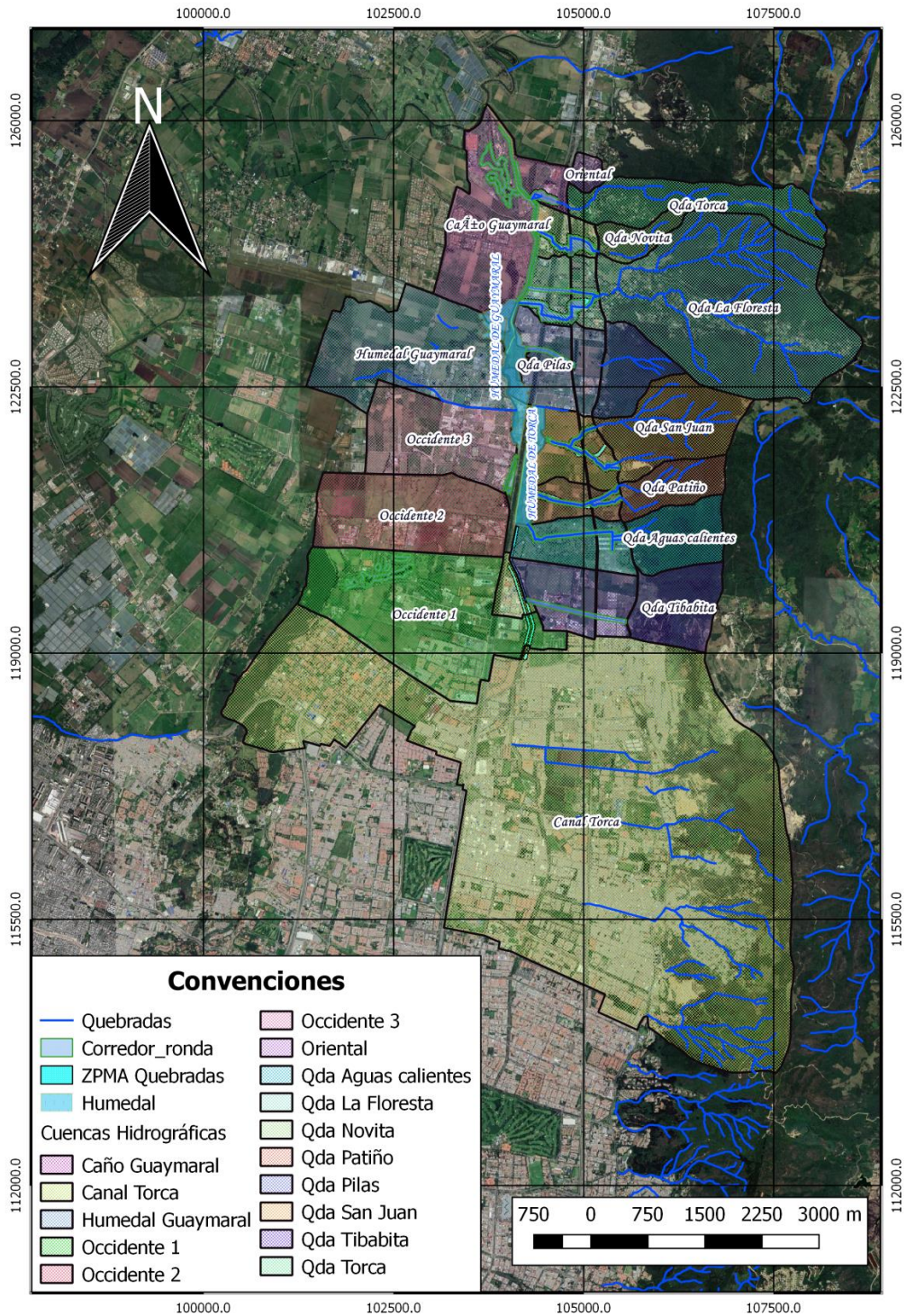
| IDEAM. 2013 | | | Decreto 1640 de 2004. | |
|-----------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------------|
| Área Hidrográfica | Zona Hidrográfica | Subzona Hidrográfica | Orden 4 | Orden 5 |
| Magdalena - Cauca (2) | Alto Magdalena (21) | Río Bogotá (2120) | Humedal Torca | Quebrada Tibabita |
| | | | | Quebrada Aguas Calientes |
| | | | | Quebrada Patiño |
| | | | | Quebrada San Juan |
| | | | | Quebrada Las Pilas |
| | | | | Quebrada Nóvita |
| | | | | Quebrada La Floresta |
| | | | | Quebrada Torca |
| | | | Humedal Guaymaral | Sistema de vallados y canales |

ZH: Zona Hidrográfica SHZ: Sub zona hidrográfica

Fuente: IDEAM. 2013. Plan de Ordenamiento Territorial. Decreto 190 de 2004. Mapa Mo. 3. Cuencas Hidrográficas.

¹ ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÀ, D.C – SECRETARIA DE PLANEACION DISTRITAL. Documento técnico de soporte – DTS. Plan de Ordenamiento Zonal del Norte Ciudad Lagos de Torca. 2017.

Figura 71 Detalle de áreas de aporte del sistema hídrico Torca-Guaymaral



Fuente: WSP; 2019

A continuación, se presenta la identificación de los cuerpos de agua presentes en el área de estudio.

5.7.2.1 Sistemas lénticos

Corresponden a todas las aguas interiores sin flujo o estáticos, los cuales representan geoformas de especial importancia desde el punto de vista ecológico de esta zona de la ciudad. En la zona se encuentran humedales de planicie, definidos como ecosistemas que se desarrollan en paisajes fluvioacustres del plano inundable del río Bogotá y su comportamiento está ligado con los pulsos anuales y multianuales; son ecosistemas anfibios en los cuales la fase terrestre y la fase acuática no tienen límites precisos y varían “estacionalmente”. Los humedales de Torca y Guaymaral comprenden un área de drenaje estimada en 32,3 km². A pesar de la división producida por la Autopista Norte, los dos sectores que lo conforman continúan interactuando hidráulicamente a través de estructuras de paso como alcantarillas.

Actualmente el humedal de Torca-Guaymaral se encuentran en su mayoría inmersos en zonas verdes y no construidas que permiten su adecuación; sin embargo, la función de amortiguamiento de crecientes no la puede cumplir debido a que se encuentra terrificado por la alta carga de sedimentos y por el exceso de nutrientes que contienen las aguas residuales que recibe principalmente a través del canal Torca².

Sector Torca:

Este sector del humedal Torca-Guaymaral cuenta con tres estructuras de salida que permiten transitar los flujos de este humedal hacia el sector de Guaymaral. Es importante mencionar que el humedal Torca-Guaymaral era un único cuerpo de agua hasta que se construyó la Autopista Norte fraccionándolos. Las estructuras de conexión entre los dos sectores y entre estos y una fracción inundable localizada en el separador central del Autopista, corresponde a alcantarillas (EAAB, 2011). En la Figura 72 se presentan vistas del Humedal en el sector Torca, al oriente de la Autopista Norte.

Figura 72 Detalle de áreas con espejo de agua en el humedal Torca-Guaymaral, sector Torca



Fuente: WSP; 2019

² Ibid.

Figura 73 Detalle de áreas de aporte al Humedal Torca-Guaymaral



Fuente: WSP; 2019

Para este sector del Humedal, el sistema de drenaje puede definirse de pulsos, donde las quebradas y el Canal de Torca generan la entrega del recurso hídrico al humedal, siendo mayores las descargas en épocas de lluvias, los cuales generan la entrada de sedimentos y nutrientes dentro del humedal. Este humedal se encuentra conectado con el Humedal Guaymaral por un canal donde se genera el flujo de materiales entre humedales. Los aportes que recibe esta parte del humedal, corresponden a los generados en las cuencas Canal Torca y las Quebradas Tibabita, Aguas Calientes, Patiño y San Juan.

Sector Guaymaral:

La entrada al sector Guaymaral está ubicada en el costado sur de este, en el cual se presenta una conexión con un canal que drena aguas residuales domésticas de las zonas aledañas que carecen de alcantarillado sanitario y pluvial, lo que genera olores y alteración de la calidad de agua. La salida de este sector del Humedal se localiza en el costado norte, sobre el costado occidental del Centro Comercial Bima.

El Humedal de Guaymaral recibe del río Bogotá en épocas de inundación o altas crecientes los materiales y sedimentos, los cuales son transportados por el canal del mismo nombre. Generando de este modo, un flujo entre humedales de los recursos hidrológicos y elementos tales como sedimentos, entre otros. Esta parte del humedal recibe los aportes de las cuencas generadas por el Canal Torca, el cual recibe a su vez las cuencas de los vallados principales San José y Arrayanes y otros canales secundarios existentes al costado de las vías del costado occidental de la Autopista Norte. Hacia el norte recibe los aportes de los vallados primarios de la Avenida El Jardín y Guaymaral. Del costado oriental, la única cuenca que aporta caudal corresponde a la quebrada Las Pilas, bastante alterada en su cauce original.

Figura 74 Detalle de áreas de espejo de agua del humedal Torca-Guaymaral, sector Guaymaral



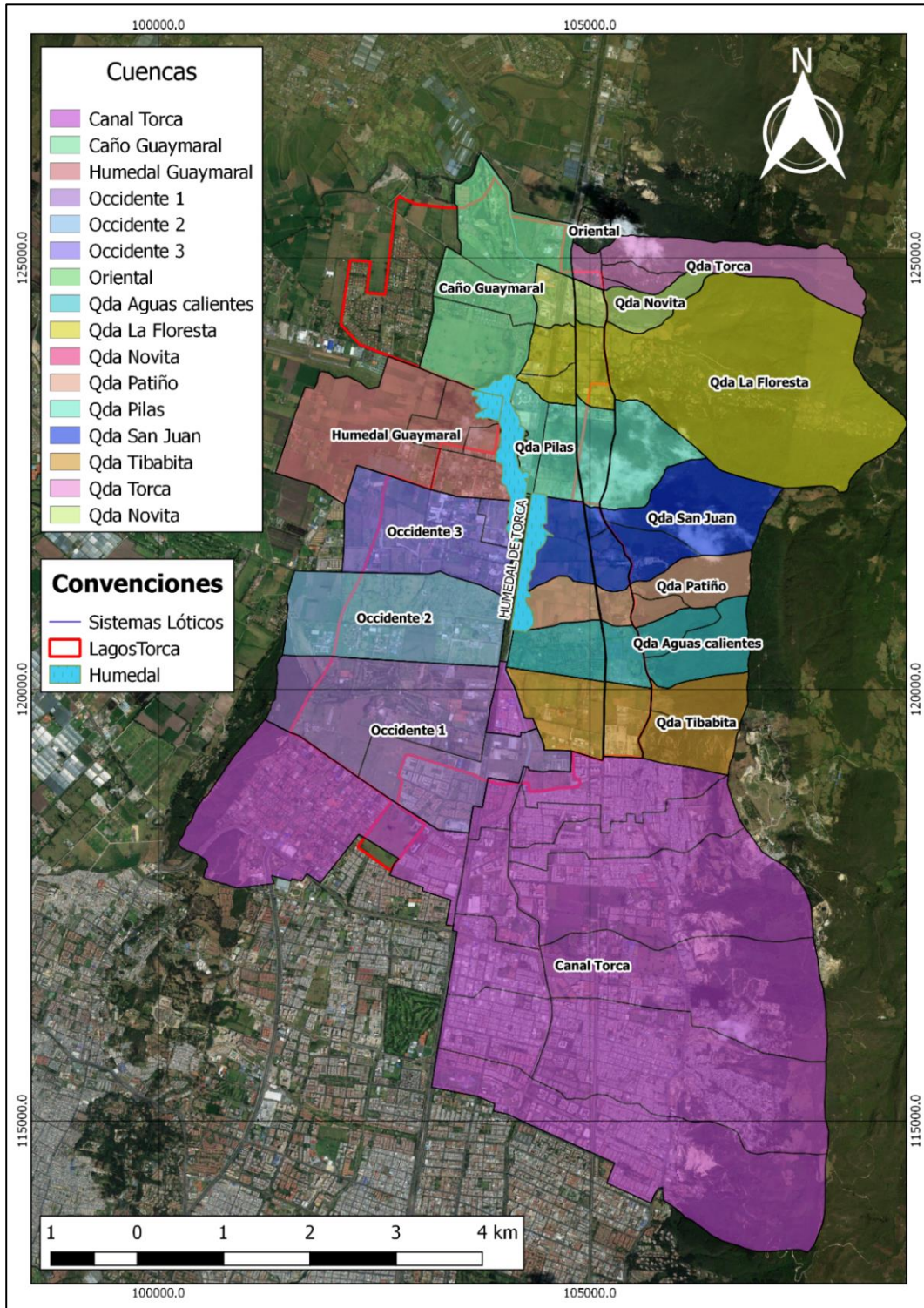
Fuente: WSP; 2019

5.7.2.2 Sistemas Lóticos

La hidrología del POZ Norte se compone de Quebradas (Aguas Calientes, Patiño, San Juan, La Floresta, Las Pilas, Novita y Torca, ubicados en el sector oriental), Vallados (Primarios y Secundarios principalmente en el costado occidental del área de estudio) y los Canales (Torca y Guaymaral). En la Figura 75 se presenta la delimitación general de subcuencas en el sistema hídrico Torca-Guaymaral.

A continuación, se realiza el análisis de hidrología de cada uno de estos subsistemas y que tienen intervención en el comportamiento hidrológico de la cuenca, así como el análisis morfométrico de cada subsistema, llevado a cabo, a partir de la información del levantamiento topográfico, como de información cartográfica del IGAC.

Figura 75 Delimitación de cuencas de la zona de estudio



Fuente: WSP, 2019

5.7.2.2.1 Quebrada Aguas Calientes

Esta quebrada se encuentra en el sector sur oriental del área de estudio, y drena en su mayor parte en sentido este-oeste, originándose en los Cerros Orientales, para luego entrar en la parte sur del Humedal Torca. Atraviesa el cementerio Jardines de Paz, recogiendo las aguas lluvias de la zona y encontrándose canalizada en algunos tramos. Así mismo, presenta un bajo caudal (parte alta), con predominio de sedimentos en su sustrato y con baja presencia de rocas. Sin embargo, esta zona se encuentra totalmente desprovista de vegetación y es utilizada en actividades ganaderas. En la Figura 76 se presenta detalles del cauce principal en la zona baja, previo a la desembocadura y en la Figura 77 se presentan detalles del cauce en el sector que cruza los predios del Cementerio.

Figura 76 Detalles del cauce de la quebrada Aguas Calientes, sector bajo.



Fuente: WSP, 2019

Figura 77 Detalles del cauce de la quebrada Aguas Calientes, sector medio.

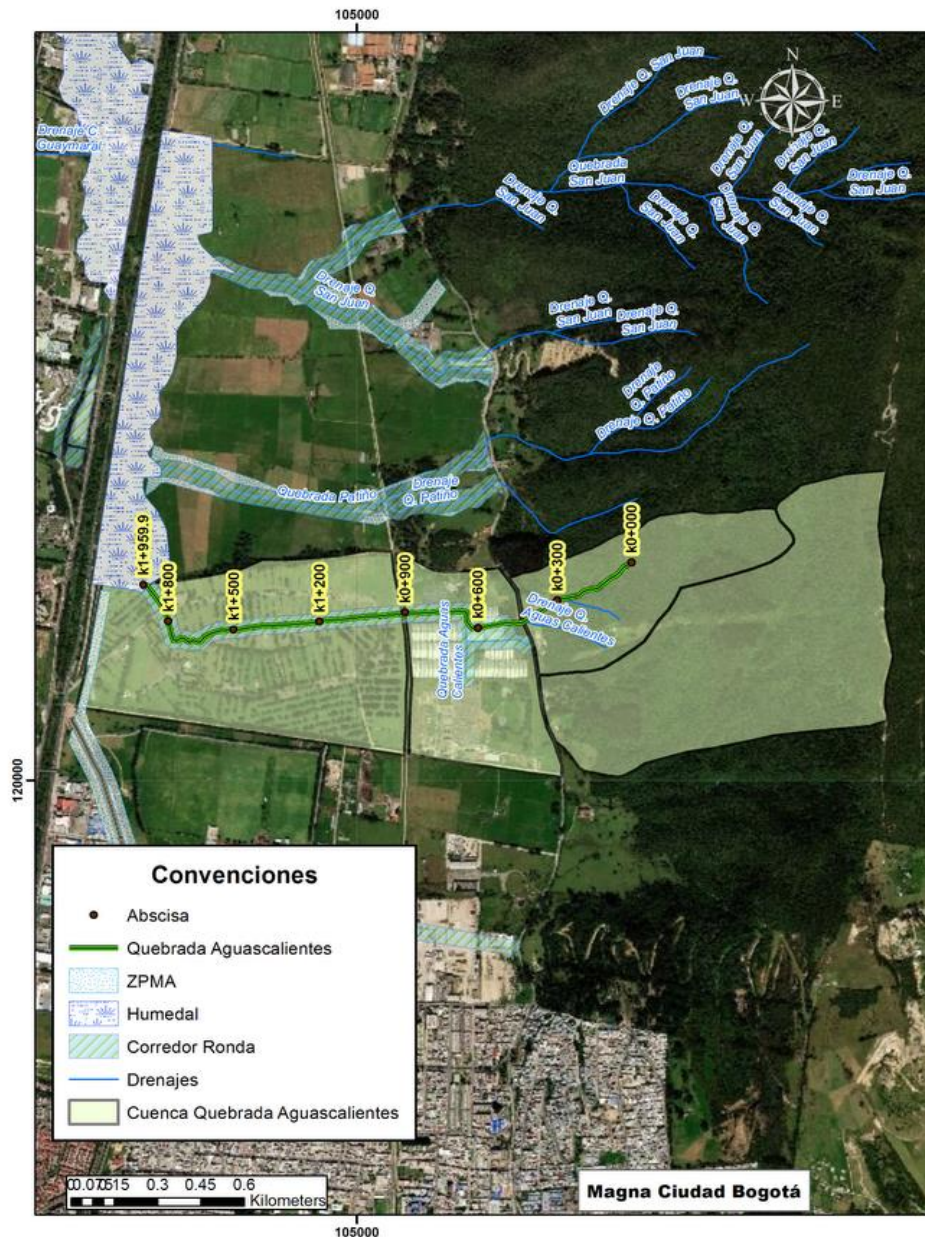


Fuente: WSP, 2019

La subcuenca limita al norte con la quebrada Patiño, al sur con la quebrada Tibabita, al oriente con el municipio de La Calera y al occidente con el Humedal Torca-Guaymaral, sector Torca. La Figura 78 presenta la delimitación de la subcuenca de la quebrada Aguas Calientes. El área total es de 192.9 ha, con una longitud del cauce principal de 1960 m y

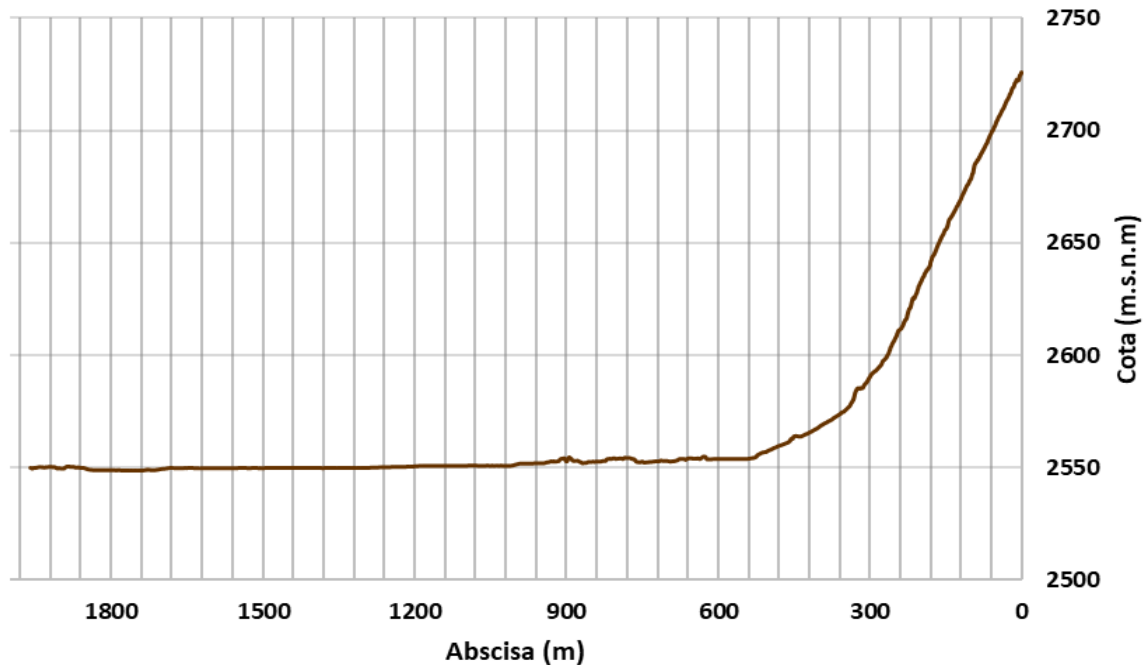
un ancho medio de 980 m. La elevación más alta de la cuenca es 3009 msnm y la más baja 2547 en el Humedal. La pendiente media del cauce principal es de 23,5%, mientras que en la zona baja la pendiente está entre el 0.4% a 0.2%. La parte rural de la cuenca corresponde al tramo comprendido entre la divisoria y la Carrera 7a, en el ápice de la formación geomorfológica. A pesar de esto en la zona baja de la cuenca la cobertura del suelo que predomina es la de vegetación de zonas agrícolas y pecuarias, así como un jardín cementerio e invernaderos.

Figura 78. Delimitación de la cuenca de la quebrada Aguas Calientes



Fuente: WSP, 2019

Figura 79. Perfil longitudinal quebrada Aguas Calientes



Fuente: WSP, 2019

5.7.2.2.2 Quebrada Patiño

Esta quebrada recoge las aguas lluvias de los cerros orientales, drenando en sentido este-oeste para luego entregar en el costado este del sector Torca del Humedal. El cauce principal de la quebrada ha sido alterado por la existencia de sistema de drenaje artificial (cunetas) a la altura del cruce de la vía férrea, en las cuales se evidencia que existe un trasvase de hacia la quebrada San Juan, al norte, como también hacia el sur, formando un drenaje denominado El Perro. Alrededor de esta quebrada se evidencian principalmente viviendas, el suelo es utilizado en actividades ganaderas y no registra ningún corredor vegetal. La parte rural de la cuenca corresponde al tramo comprendido entre la divisoria y la Carrera 7a, en donde se evidencia un control geomorfológico, que da inicio a la zona plana de la cuenca. A pesar de esto en la zona baja de la cuenca la cobertura del suelo que predomina es la de vegetación de zona agrícolas y pecuarias.

Figura 80 Detalles del cauce de la quebrada Patiño, sector bajo.



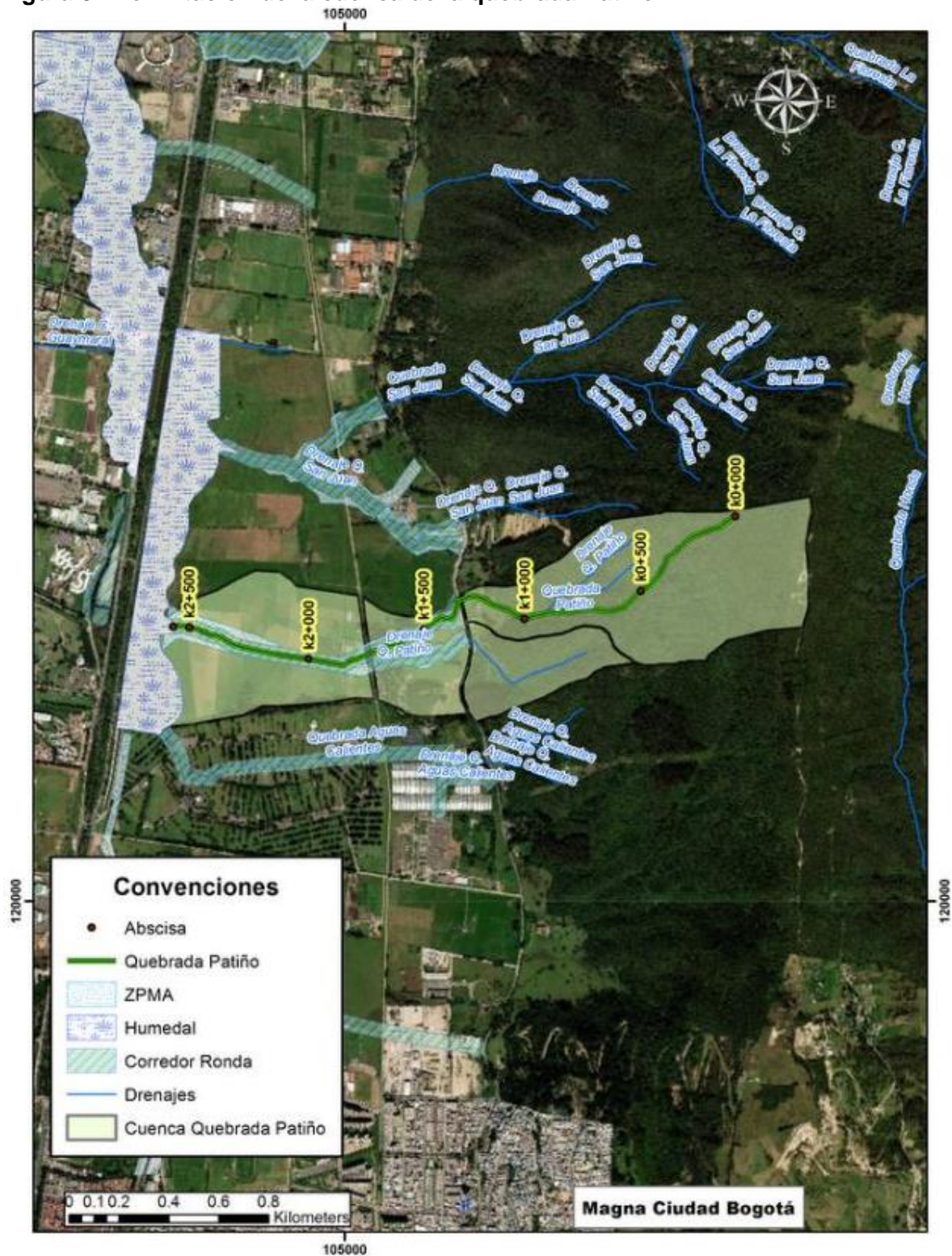
Fuente: WSP, 2019

Esta subcuenca, limita al norte con la cuenca de la quebrada San Juan. Al sur con la cuenca de la quebrada Aguas Calientes, al oriente con el municipio de La Calera y al occidente con el sector Torca del Humedal. En la Figura 81 se presenta la delimitación de la cuenca de la quebrada Patiño.

El caudal de aporte medio y mínimo generado por la cuenca es totalmente empleado en actividades agropecuarias, con lo cual no hay aferencia hacia el sector Torca del Humedal, como lo muestra la Figura 80, en la que se registra un cauce seco.

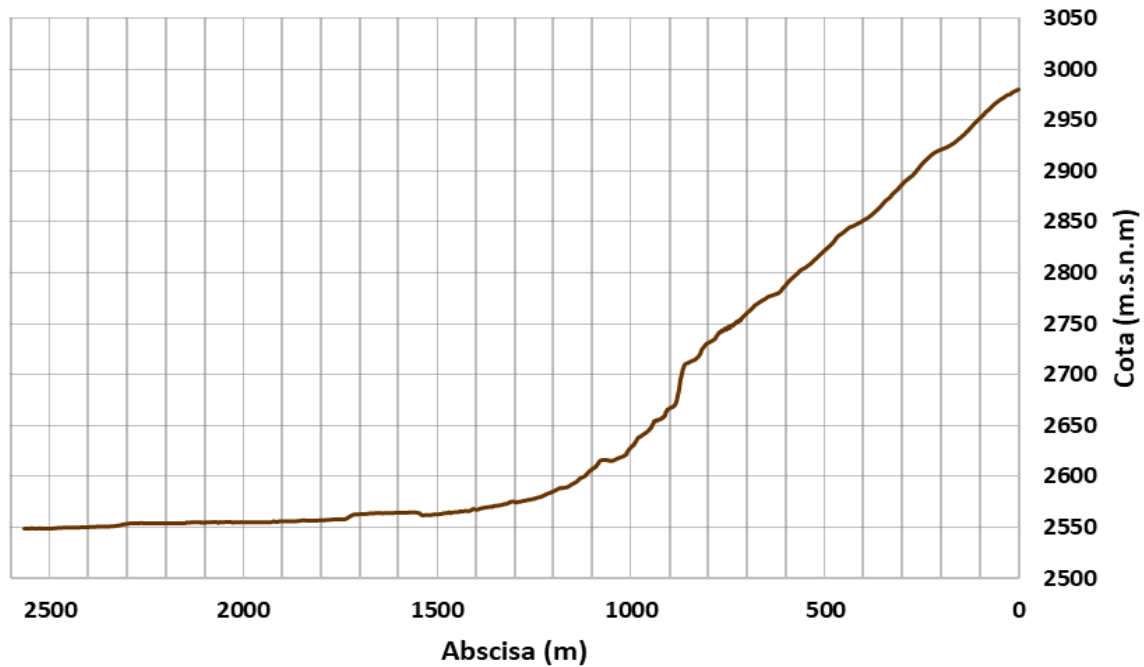
El área total es de 38.6 ha, con una longitud del cauce principal de 814 m y un ancho medio de 474 m. La elevación más alta de la cuenca es 2558 msnm y la más baja 2548 en el Humedal. La pendiente media del cauce principal es de 1,17%, mientras que en la zona baja la pendiente está entre el 0.5% a 1.0%.

Figura 81 Delimitación de la cuenca de la quebrada Patiño



Fuente: WSP, 2019

Figura 82 Perfil longitudinal quebrada Patiño



Fuente: WSP, 2019

5.7.2.2.3 Quebrada San Juan

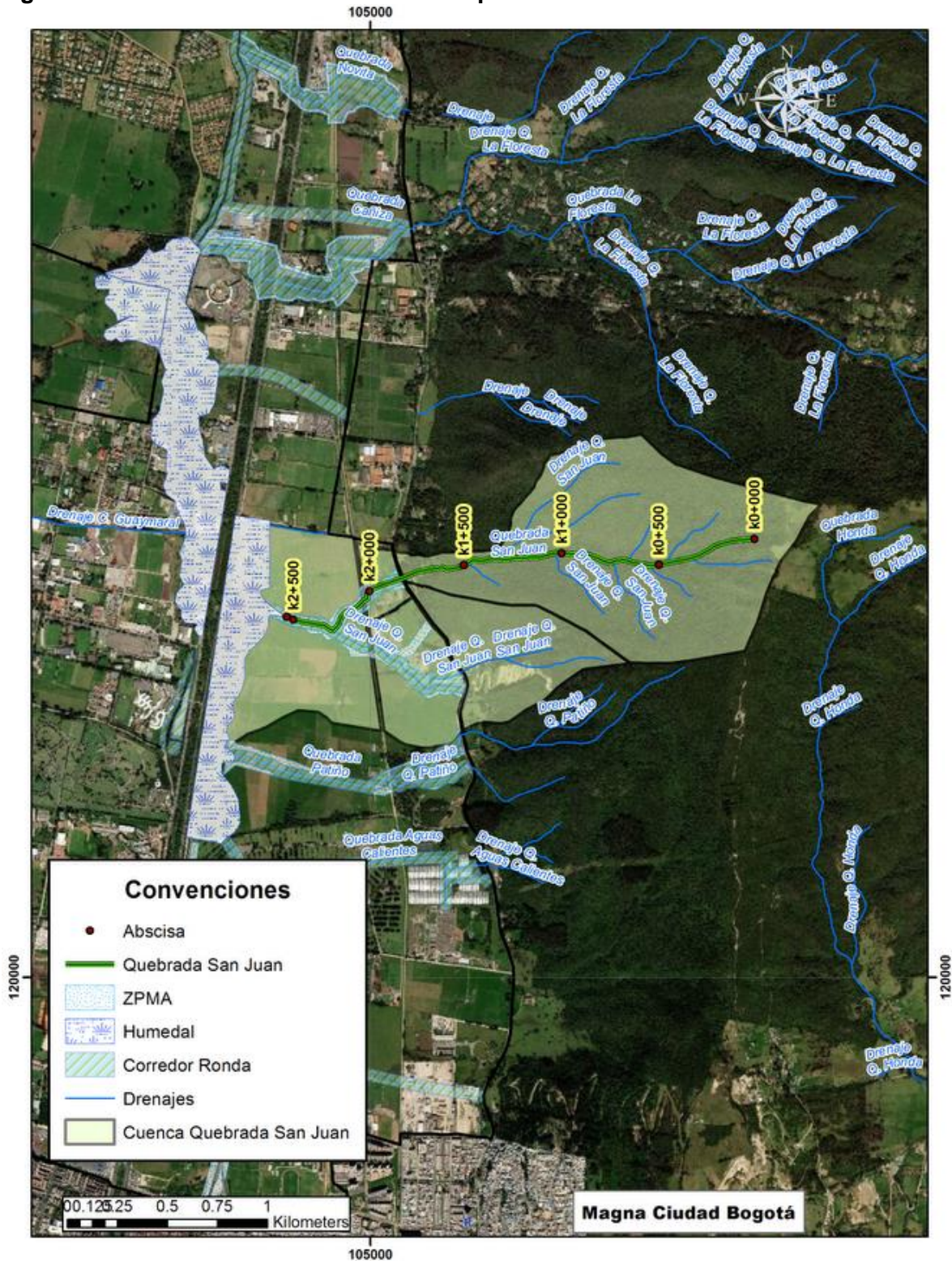
Esta quebrada recoge las aguas lluvias de los cerros orientales y entrega directamente en el humedal Torca por el norte. Esta quebrada se encuentra en inmediaciones de la alcantarilla de la calle 222 que comunica al humedal Torca con el Guaymaral. El principal uso del suelo es el de vivienda, lo cual indica alteraciones de tipo antrópico. La vegetación riparia solo está presente en algunos tramos de la quebrada. La quebrada registra un corredor ripario solo en algunos puntos. El curso del agua que se observa en este tramo es producto de la infiltración debido a que aguas arriba se construyó un paso peatonal que desvió el curso de la quebrada. La desviación del cauce presenta una forma lineal con un sustrato constituido principalmente de sedimentos.

Figura 83 Detalle del cauce actual de la quebrada San Juan



Fuente: WSP, 2019

Figura 84 Delimitación de la cuenca de la quebrada San Juan

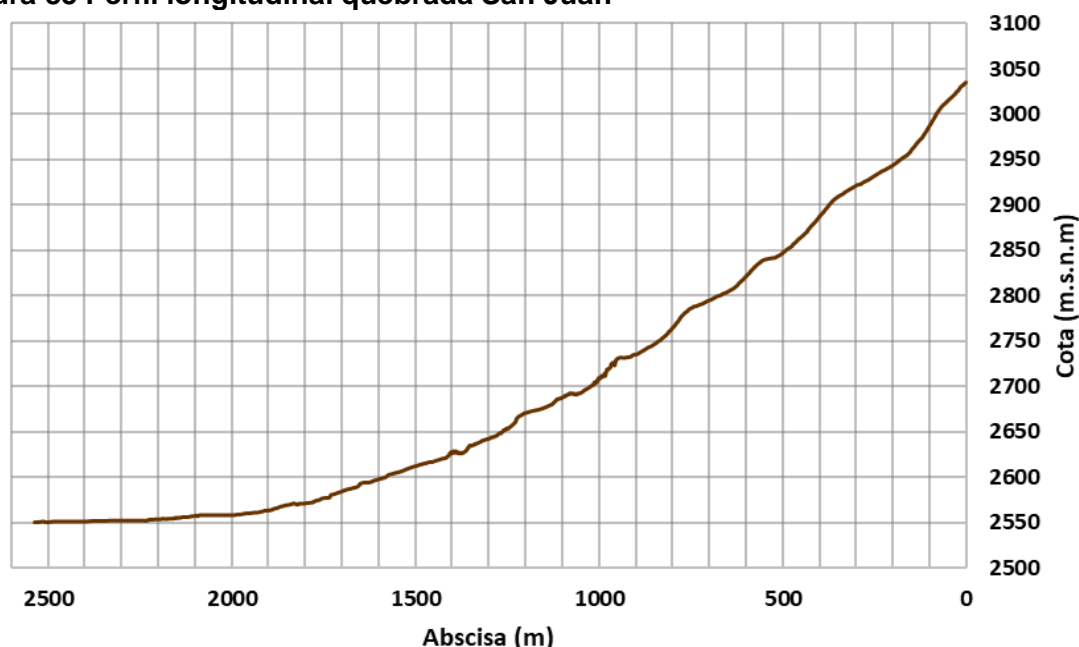


Fuente: WSP, 2019

La parte rural de la cuenca corresponde al tramo comprendido entre la divisoria y la Carrera 7a, en donde se evidencia un control geomorfológico, que da inicio a la zona plana de la cuenca. A pesar de esto en la zona baja de la cuenca la cobertura del suelo que predomina es la de vegetación de zonas agrícolas y pecuarias, y algunos usos institucionales.

El área total es de 342 ha, con una longitud del cauce principal de 2537 m y un ancho medio de 1350 m. La elevación más alta de la cuenca es 3120 msnm y la más baja 2548 en el Humedal. La pendiente media del cauce principal es de 22,5%, mientras que en la zona baja la pendiente está entre el 0.8% a 1.0%.

Figura 85 Perfil longitudinal quebrada San Juan



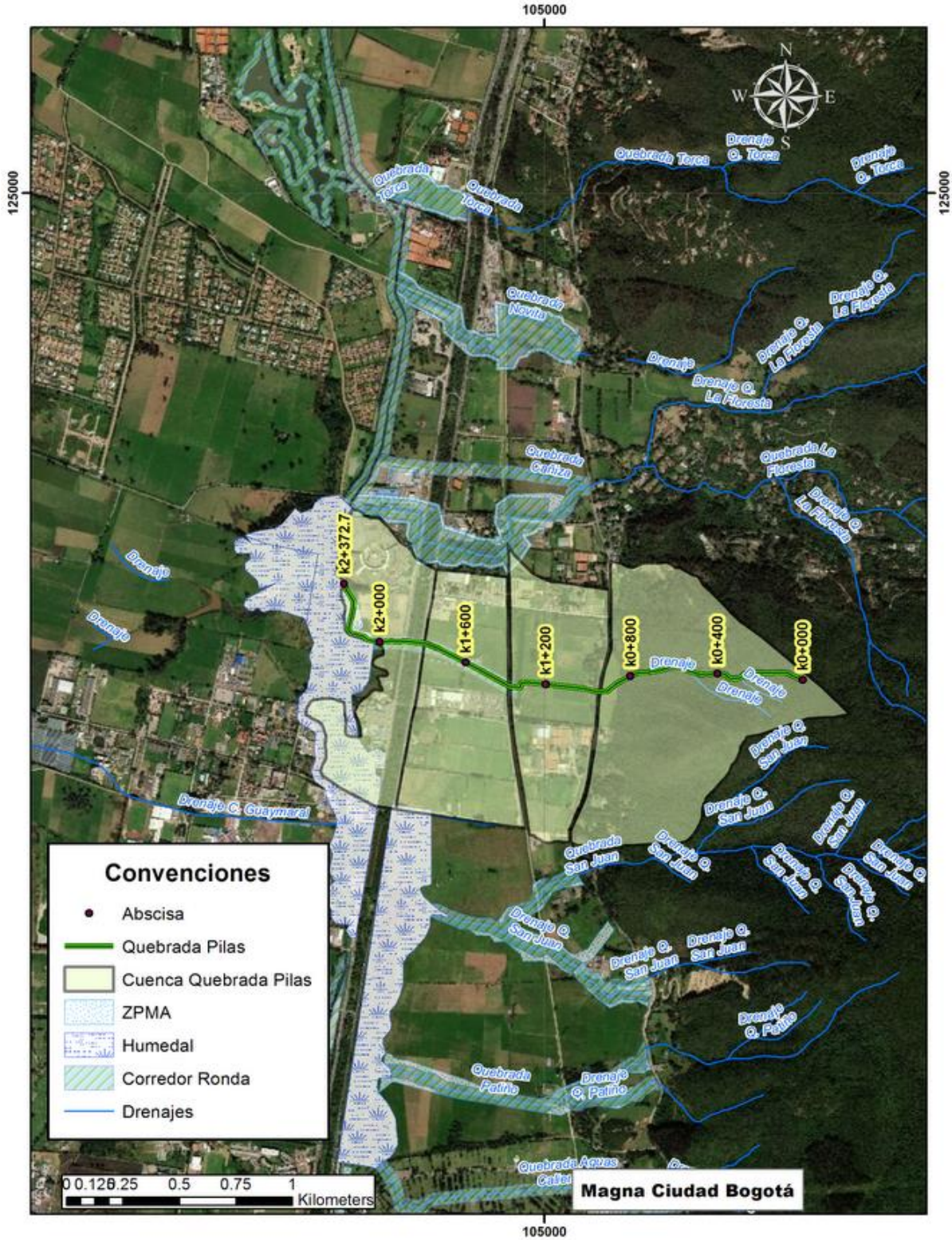
Fuente: WSP, 2019

5.7.2.2.4 Quebrada Las Pilas

Esta es una quebrada que nace en los cerros orientales y se encuentra rodeada por vegetación nativa hasta atravesar la carrera séptima. Una vez pasa por ésta vía, el cauce se modificó para abastecer un cultivo de flores en la zona, con una alta intervención del cauce principal al punto de que previo al cruce de la vía férrea, se ha conformado un pondaje de almacenamiento de agua que genera un control, a la totalidad del flujo de agua que desciende desde la parte alta de la cuenca.

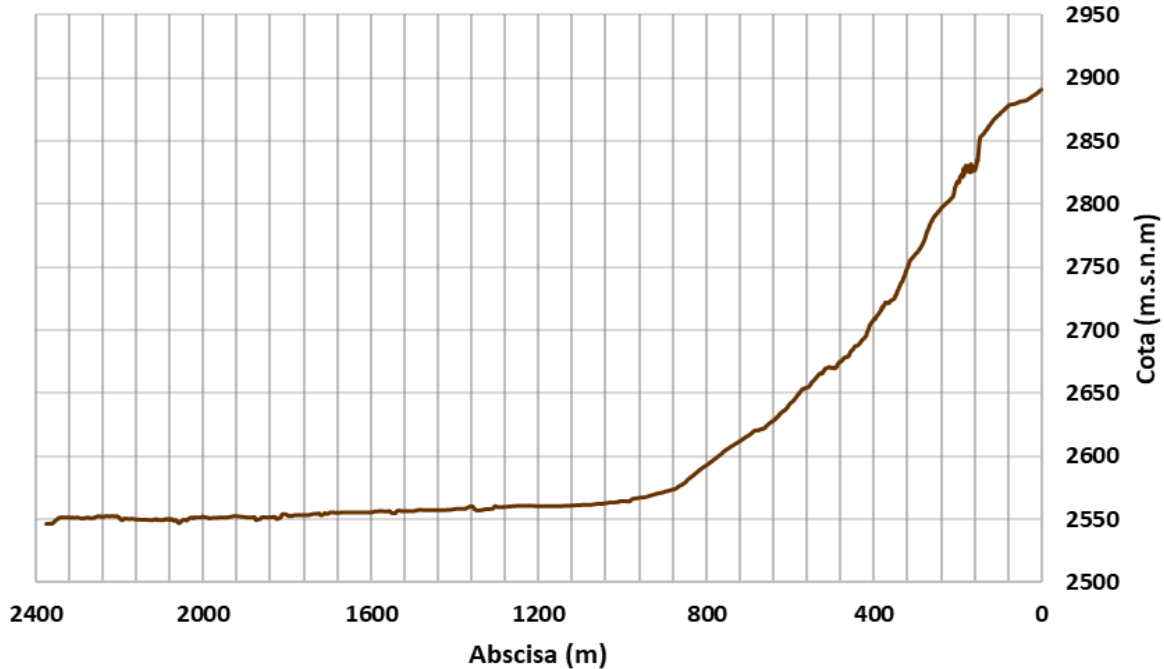
La parte rural de la cuenca corresponde al tramo comprendido entre la divisoria y la Carrera 7a, en donde se evidencia un control geomorfológico, que da inicio a la zona plana de la cuenca. En la zona baja de la cuenca la cobertura del suelo que predomina es la de usos institucionales y comerciales, con algunas áreas dedicadas a la explotación pecuaria. La desembocadura de esta quebrada se identifica hacia la zona media del humedal en el sector Guaymaral, con pasos previos mediante box culverts, bajo la Autopista Norte.

Figura 86 Delimitación de la cuenca de la quebrada Las Pilas



Fuente: WSP, 2019

Figura 87 Perfil longitudinal quebrada Las Pilas



Fuente: WSP, 2019

El área total es de 211 ha, con una longitud del cauce principal de 965 m y un ancho medio de 2187 m. La elevación más alta de la cuenca es 2944 msnm y la más baja 2545 en el Canal Guaymaral. La pendiente media del cauce principal es de 41,3%, mientras que en la zona baja la pendiente es del orden del 1.0%

5.7.2.2.5 Quebrada La Floresta

Esta quebrada recibe las aguas lluvias de los cerros orientales y entra directamente en el humedal Torca. Se conecta con el Parque Guaymaral que se encuentra en el costado oriental de la calle 224 y este a su vez comunica al humedal Torca con el Guaymaral. Esta quebrada se encuentra determinada como área de protección natural. La vegetación actual de la quebrada (cuenca alta y parte de la cuenca media), se encuentra distribuida de forma uniforme.

Figura 88 Detalle del cauce actual de la quebrada La Floresta (sector Bima)

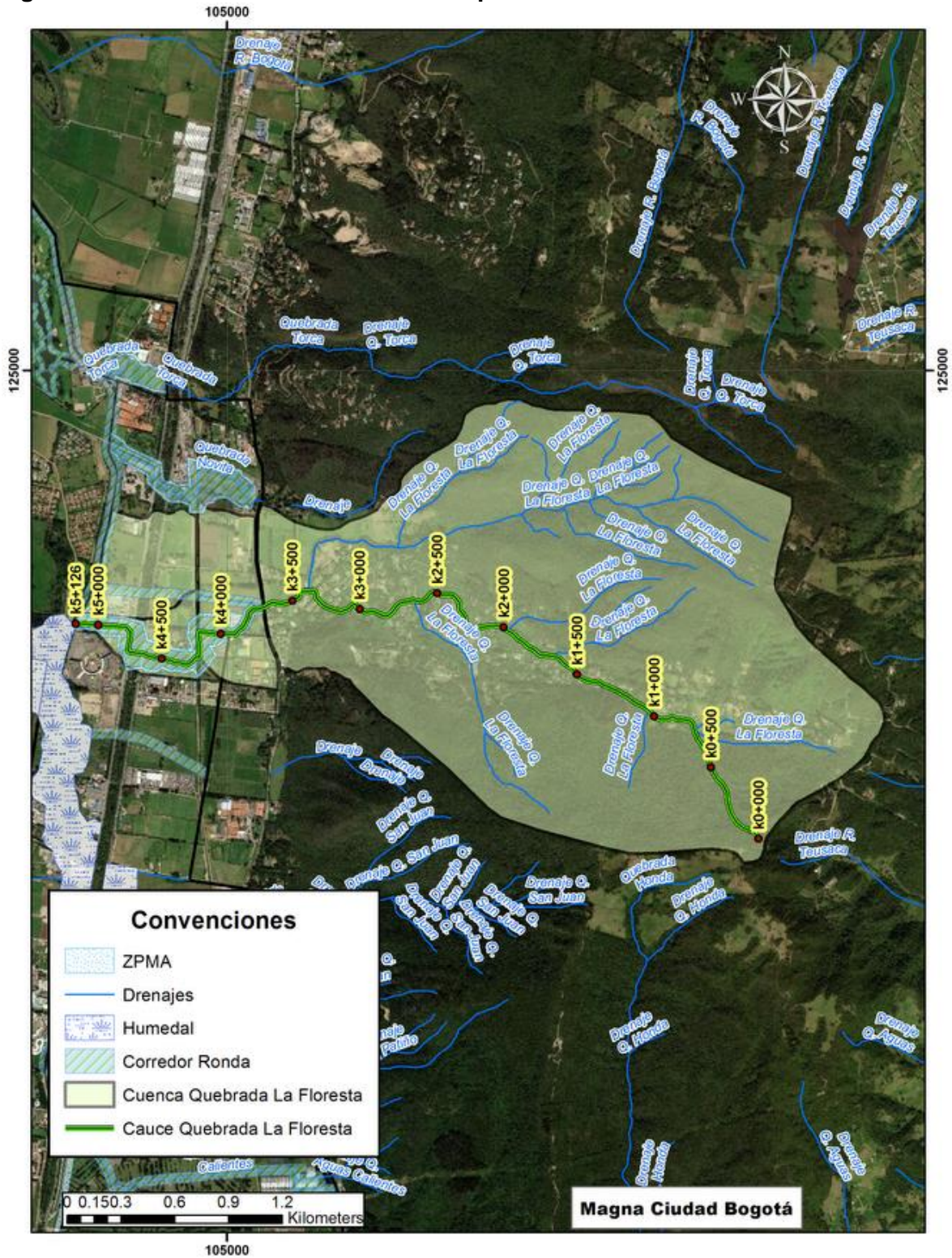


Fuente: WSP, 2019

El cauce de esta quebrada presenta forma sinuosa en algunos tramos, sin embargo, por modificaciones antrópicas su último tramo presenta un trazado rectilíneo. El área total es de 652 ha, con una longitud del cauce principal de 5126 m y un ancho medio de 1273 m. La elevación más alta de la cuenca es 3215 msnm y la más baja 2543 en el Canal Guaymaral. La pendiente media del cauce principal es de 13,1%, mientras que en la zona baja la pendiente es del orden del 2.0%

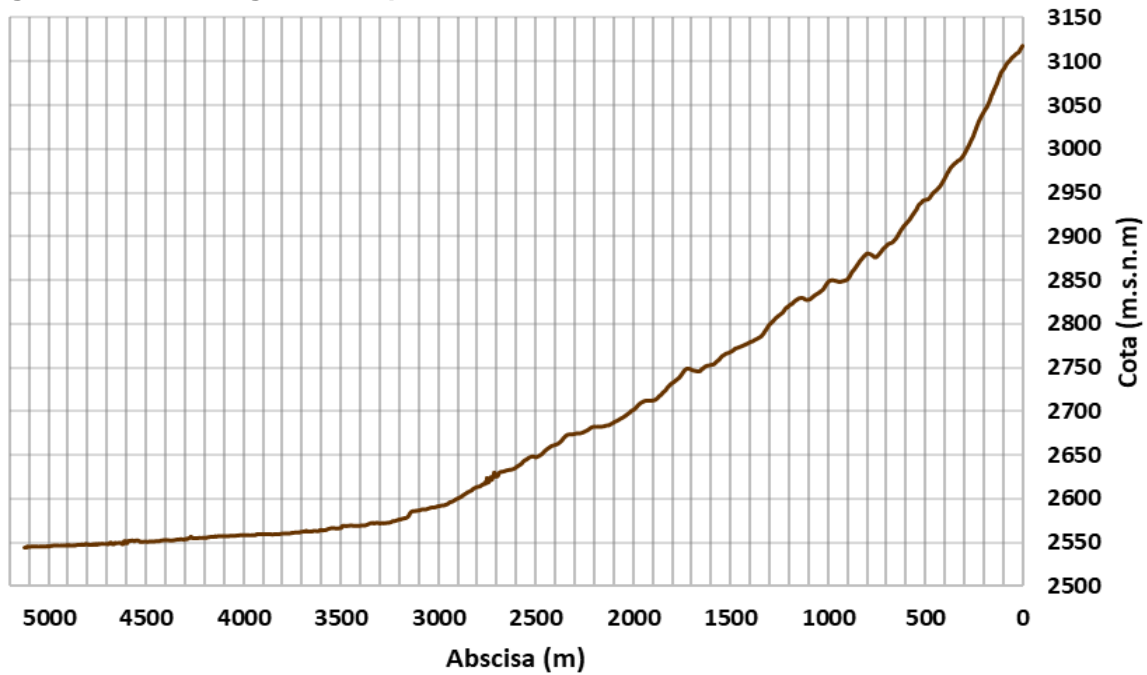
La parte rural de la cuenca corresponde al tramo comprendido entre la divisoria y la Carrera 7a, en donde se evidencia un control geomorfológico, que da inicio la zona plana de la cuenca. En la zona baja de la cuenca la cobertura del suelo que predomina es la de usos institucionales y comerciales, con algunas áreas dedicadas a la explotación pecuaria. La desembocadura de esta quebrada se identifica en inmediaciones de la salida del Humedal en el sector Guaymaral, hacia la Calle 235, en la parte posterior del Centro Comercial Bima. Los cruces bajo la Autopista Norte se llevan a cabo mediante estructuras tipo box culvert, de regular estado.

Figura 89 Delimitación de la cuenca de la quebrada La Floresta



Fuente: WSP, 2019

Figura 90 Perfil longitudinal quebrada La Floresta



Fuente: WSP, 2019

5.7.2.2.6 Quebrada Cañiza

Este cauce corresponde a una derivación antrópica de la quebrada La Floresta, de la cual toma sus aguas una vez esta cruza la Carrera Séptima (Figura 91), siguiendo hacia el occidente hasta la desembocadura en el Canal Guaymaral, 120 m aguas abajo de la desembocadura de la quebrada La Floresta.

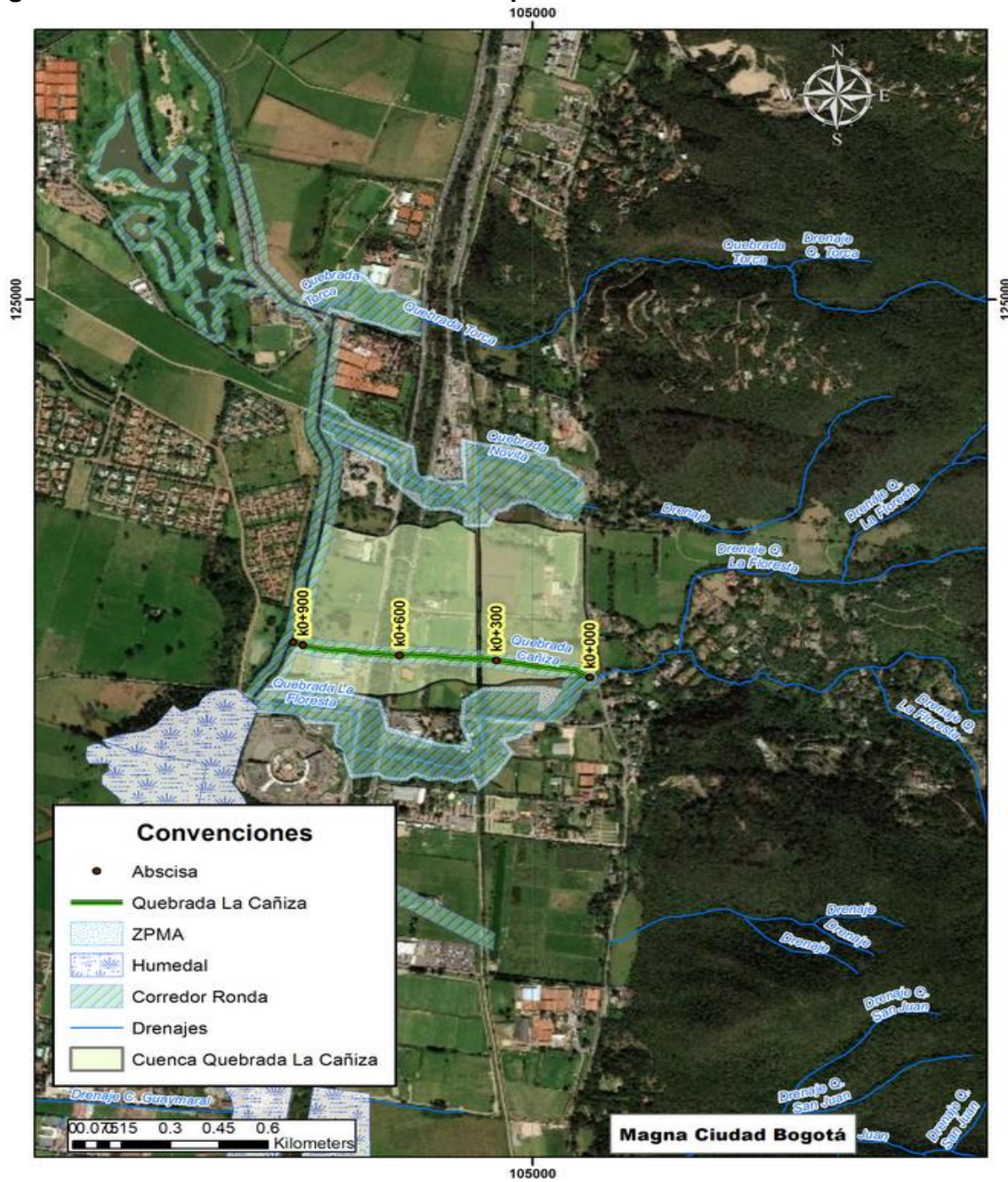
Figura 91 Detalle del cauce actual de la quebrada Cañiza, sector K7 – Vía Férrea



Fuente: WSP, 2019

El cauce de esta quebrada presenta un trazado rectilíneo a partir del punto de derivación de la quebrada La Floresta. Esta quebrada cruza la Autopista Norte mediante dos estructuras tipo box culvert (2.0x1.20 m). El área total es de 48,58 ha, con una longitud del cauce principal de 930 m y un ancho medio de 555 m (Figura 92). La elevación más alta de la cuenca es 2562.5 msnm y la más baja 2544 en el Canal Guaymaral. La pendiente media del cauce principal es de 2,04% (Figura 93).

Figura 92 Delimitación de la cuenca de la quebrada Cañiza

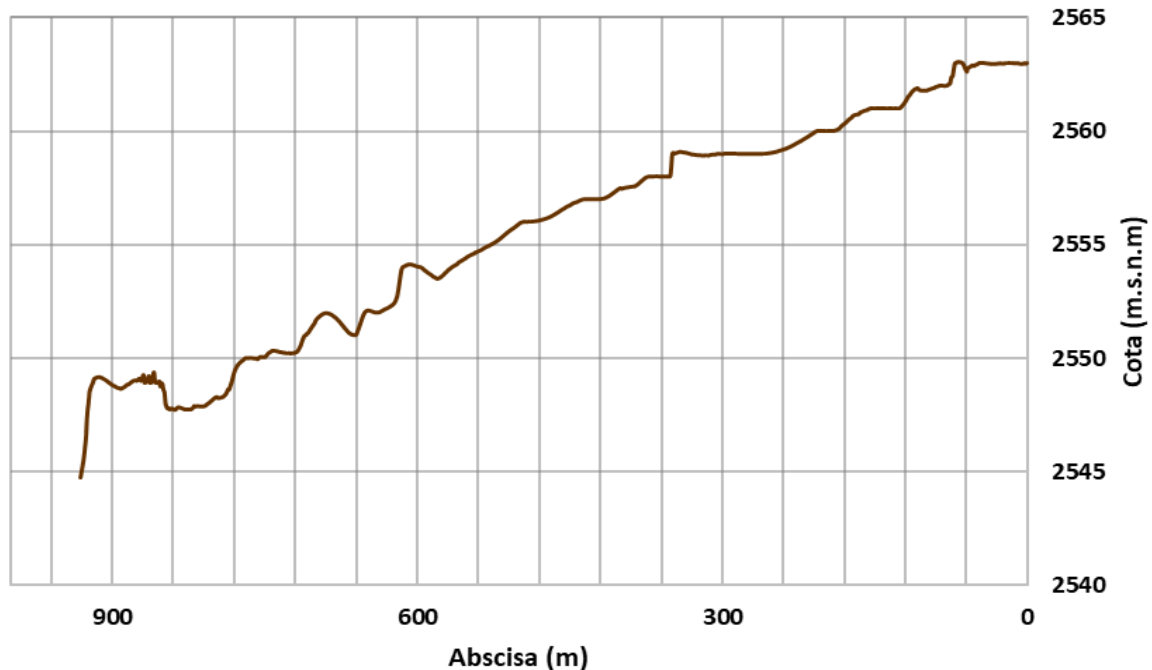


Fuente: WSP, 2019

Entre la vía férrea y la Autopista Norte, este cauce se convierte en una cuneta que drena los predios interceptados, sin que se evidencie un caudal mínimo. En el tramo final a partir de la Autonorte, el cauce es prácticamente inexistente y con un trazado que borde el límite norte de un predio que se extiende entre esta vía y el canal Guaymaral.

Esta cuenca no tiene área rural hacia la parte alta de la Carrera 7a, a pesar de que en la zona media la cuenca la cobertura del suelo que predomina es la de usos pecuarios y algunos institucionales y comerciales en inmediaciones de la Autopista Norte. La desembocadura de esta quebrada no se identifica, debido a la alteración del cauce en el sector del cruce de la Autopista Norte.

Figura 93 Perfil longitudinal quebrada Cañiza



Fuente: WSP, 2019

5.7.2.2.7 Quebrada Novita

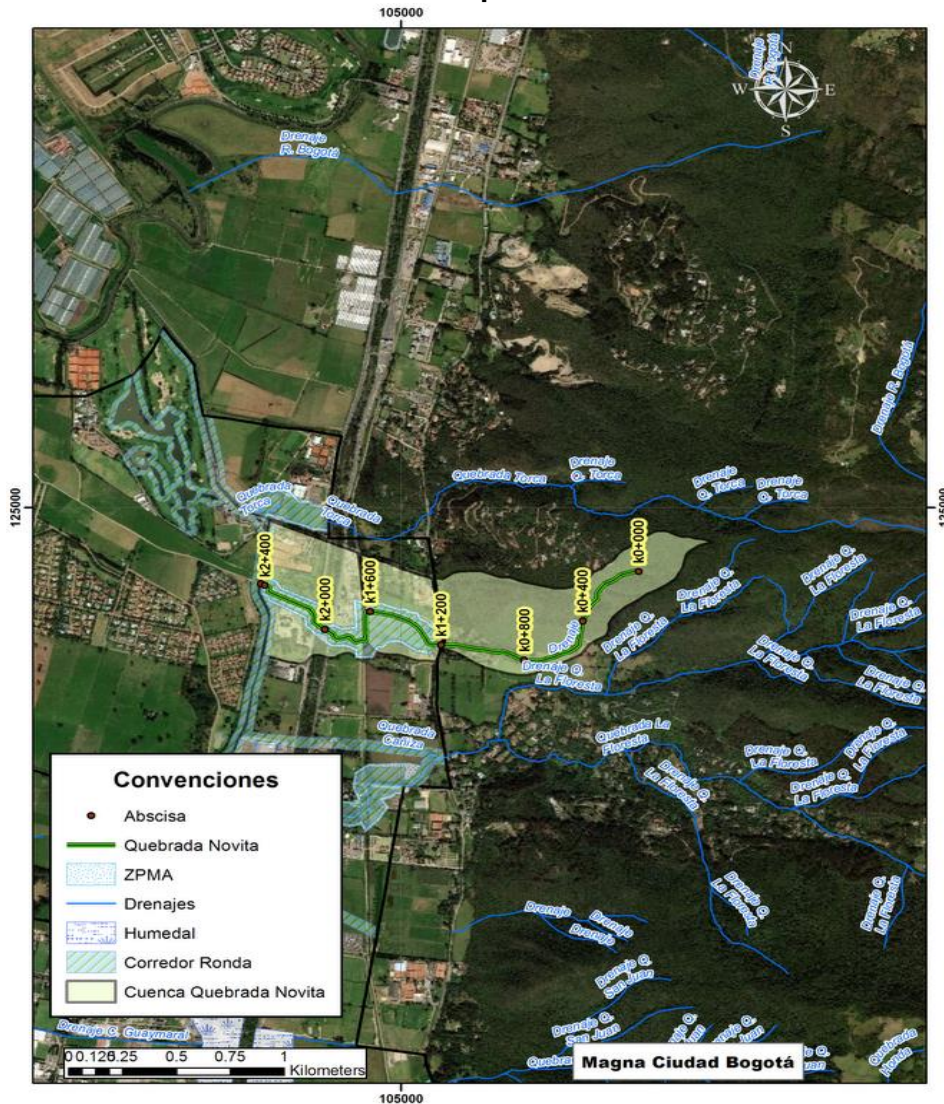
El área total es de 89 ha, con una longitud del cauce principal de 2422 m y un ancho medio de 368 m.

La elevación más alta de la cuenca es 2973 msnm y la más baja 2543 en el Canal Guaymaral. La pendiente media del cauce principal es de 17.7%, mientras que en la zona baja la pendiente se encuentra entre el 1.0% al 1.5%.

Figura 94 Detalle del cauce actual de la quebrada Nóvita



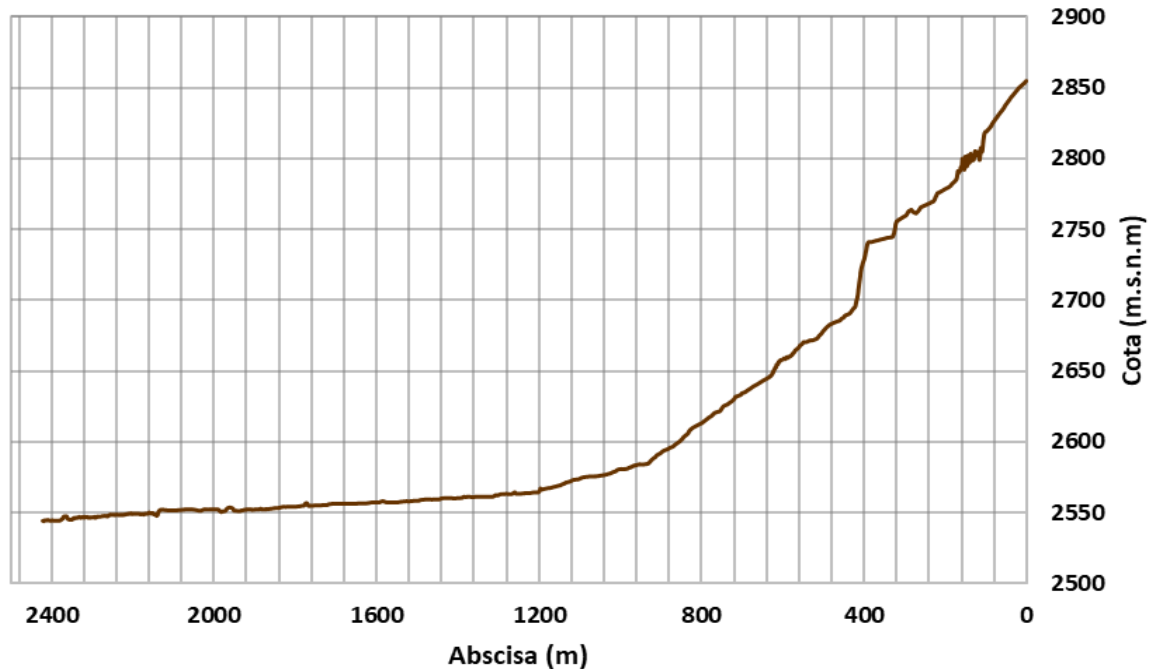
Figura 95 Delimitación de la cuenca de la quebrada Nóvita



Fuente: WSP, 2019

La parte rural de la cuenca corresponde al tramo comprendido entre la divisoria y la Carrera 7a, en donde se evidencia un control geomorfológico, que da inicio la zona plana de la cuenca. La cobertura de uso pecuario y/o de pastos se extiende hacia aguas abajo de la carrera 7a hasta la vía férrea, a partir de la cual el uso del suelo cambia al de tipo institucional y comercial. La desembocadura de esta quebrada se identifica en el canal Guaymaral, hacia la Calle 242, en la parte posterior del Club de Tenis de Bogotá. Los cruces bajo la Autopista Norte se llevan a cabo mediante estructuras tipo box culvert, de regular estado.

Figura 96 Perfil longitudinal quebrada Nóvita

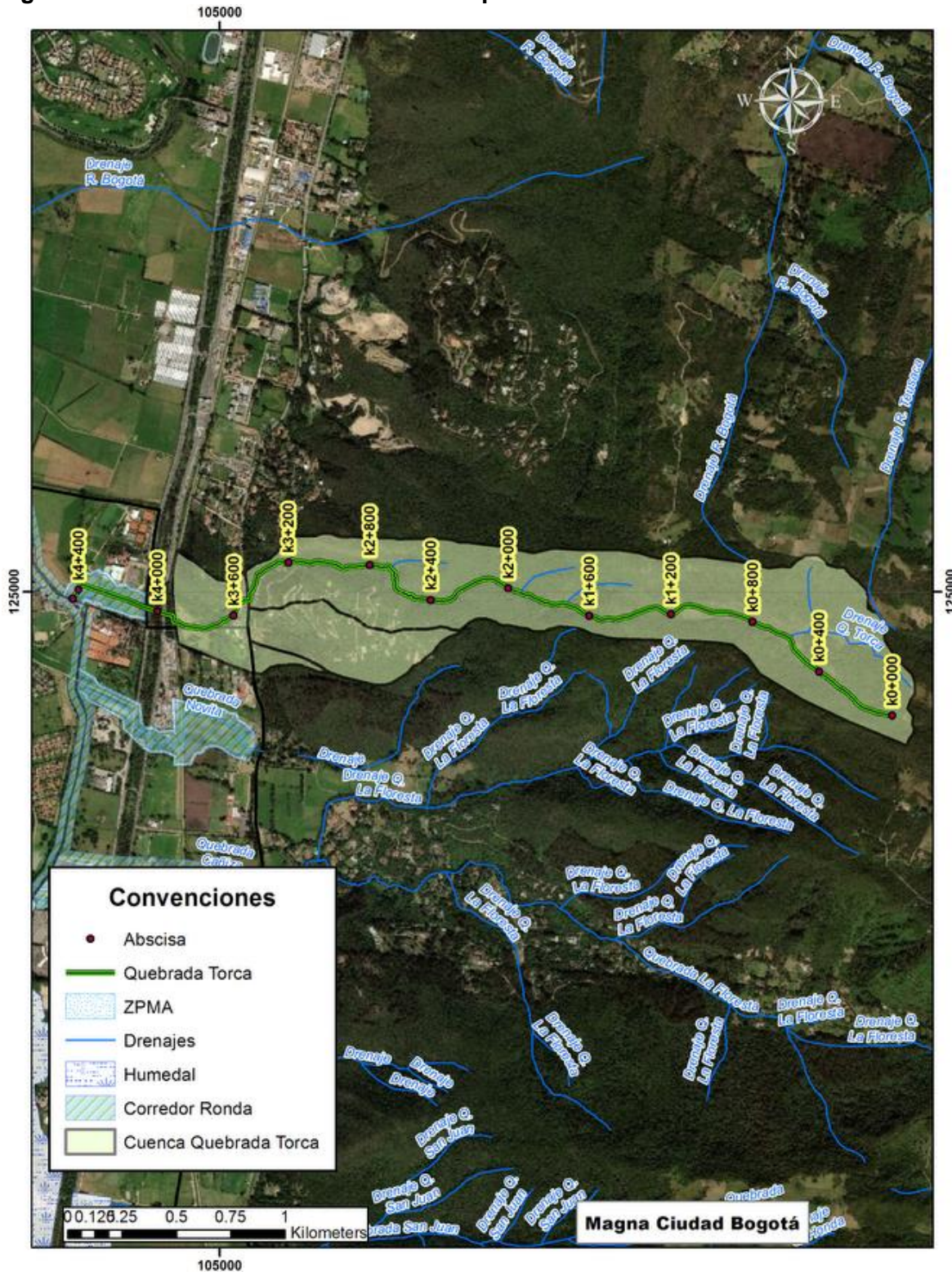


Fuente: WSP, 2019

5.7.2.2.8 Quebrada Torca

El área total es de 162 ha, con una longitud del cauce principal de 3846 m. El ancho medio de la cuenca es de 421 m. La elevación más alta de la cuenca es 3218 msnm y la más baja 2558 en el Canal Guaymaral. La pendiente media del cauce principal es de 17.2%, mientras que en la zona baja la pendiente se encuentra entre el 0.1% al 0.5%.

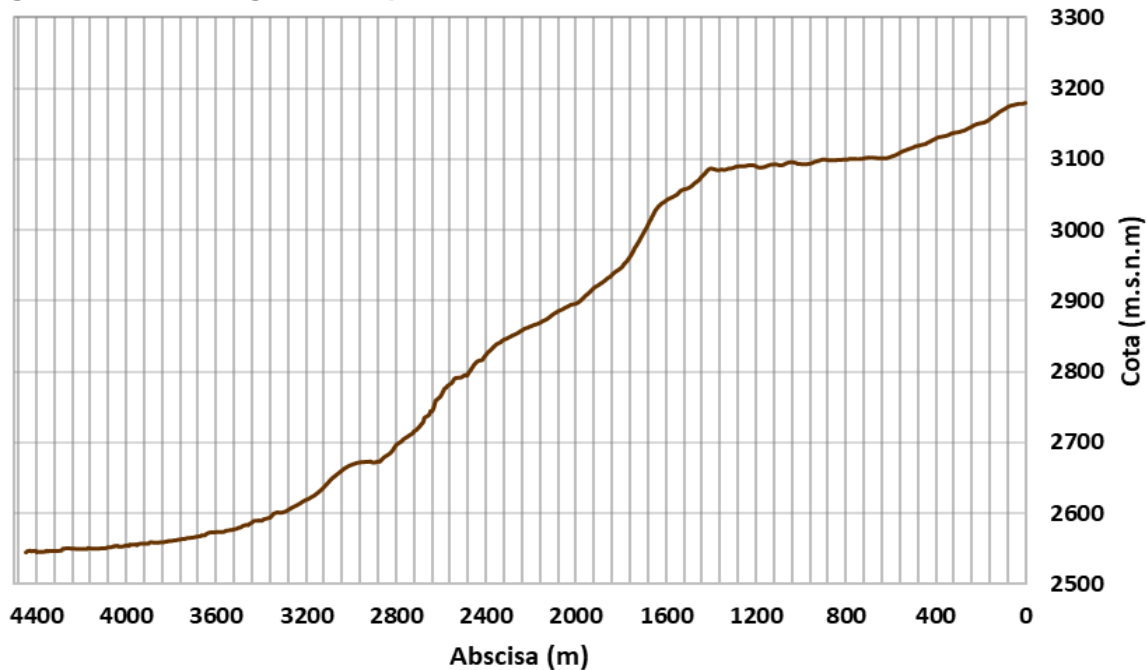
Figura 97 Delimitación de la cuenca de la quebrada Torca



Fuente: WSP, 2019

Actualmente, casi la totalidad de la cuenca corresponde uso con cobertura rural, con usos institucionales sola en la parte baja, a partir de la Autopista Norte, donde se ubica el Club de Colsubsidio, al interior del cual, el cauce de la quebrada ha sufrido importantes alteraciones antrópicas. Los cruces bajo la Autopista Norte se llevan a cabo mediante estructuras en regular estado, que en el momento se encuentran en intervención para las obras de ampliación de la esta vía.

Figura 98 Perfil longitudinal quebrada Torca



Fuente: WSP, 2019

5.7.2.2.9 Río Bogotá

La cuenca del Río Bogotá está clasificada como de segundo orden en el país, tiene un área de drenaje de 5.886 Km², presentando una predominancia de relieve fuertemente ondulado a fuertemente quebrado en más de la mitad de su extensión territorial. Esta característica corresponde principalmente a las zonas montañosas que rodean la Sabana de Bogotá en altitudes por encima de los 2.600 msnm y a las zonas montañosas y de ladera del flanco oeste de la cordillera oriental que drena hacia el río Magdalena en altitudes que oscilan entre 240 y 2000 msnm. Su recorrido se encuentra dividido en tres partes: cuenca alta con un recorrido de 170 km, desde el Municipio de Villapinzón hasta la estación hidroeléctrica Puente la Virgen; cuenca media con un recorrido de 90 km, desde la estación hidroeléctrica hasta el Puente la Virgen - Compuertas de Alicachín; y la cuenca baja con un tramo de 120 km, desde las puertas de Alicachín – Embalse del Muña - hasta la desembocadura del río Bogotá en el río Magdalena. (Flores 2006).

En una longitud aproximada de 336 Km, el Río Bogotá recibe las aguas de los ríos Sisga, Tominé, Neusa, Tejar, Negro, Teusacá, Frío, Chicú, Torca, Salitre, Fucha, Tunjuelo, Soacha, Balsillas, Calandaima y Apulo, entre otros (EAAB-UNAL, 2010). En la zona de estudio tiene una sección controlada por jarillones marginales, pero que de igual manera

se encuentra en proceso de adecuación hidráulica por parte de la CAR. En la actualidad la sección hidráulica es la que se presenta en la Figura 99.

Figura 99 Detalle del cauce actual del Río Bogotá, sector de la desembocadura del sistema Torca-Guaymaral



Fuente: WSP, 2019

5.7.2.2.10 Canales en el POZ Norte

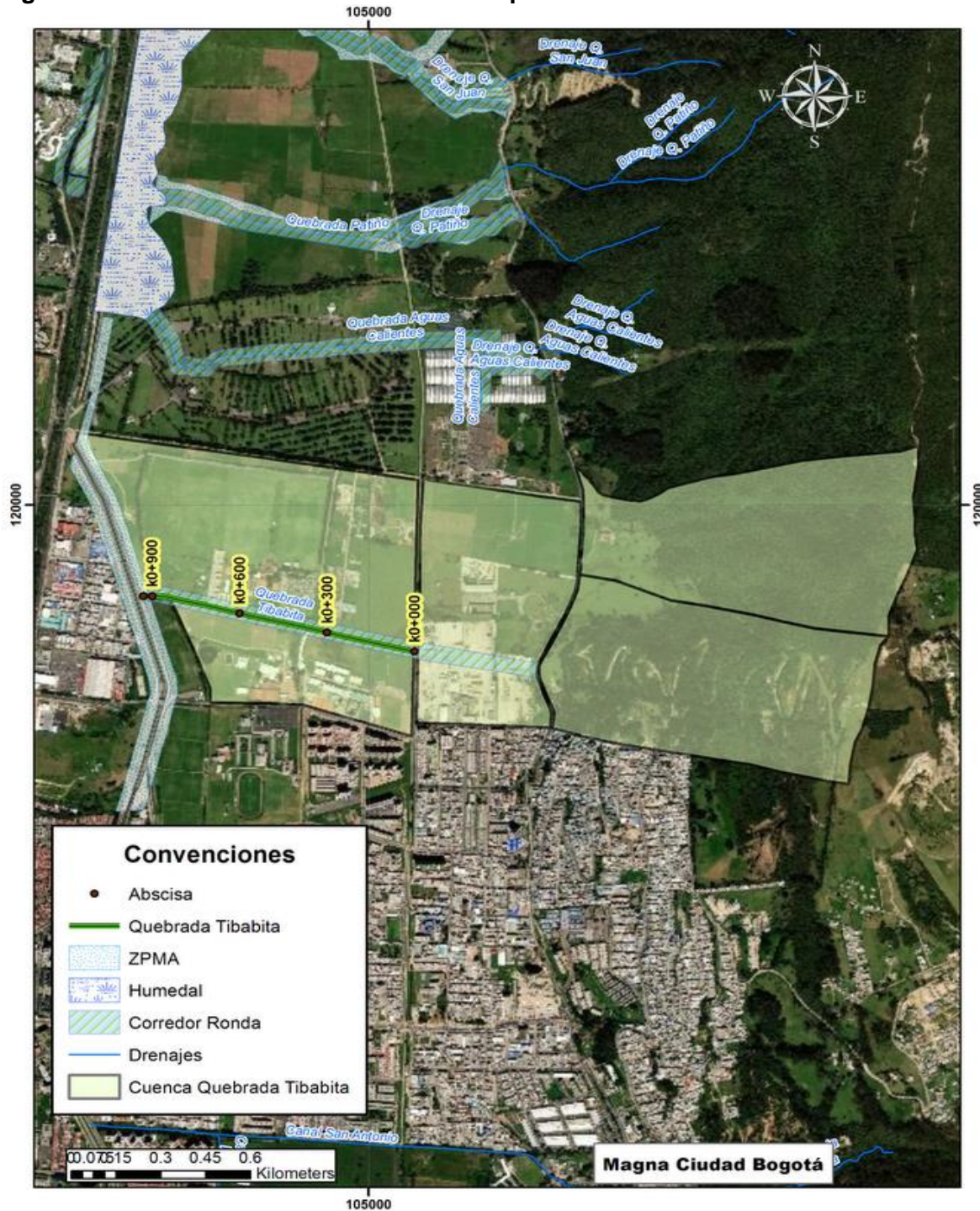
Canal Tibabita:

El área total es de 232 ha, con una longitud del cauce principal de 928 m y un ancho medio de 2496 m. La elevación más alta de la cuenca es 2926 msnm y la más baja 2548 en el Canal Torca. La pendiente media del cauce principal es de 40,7%, mientras que en la zona baja la pendiente es del orden del 1.0%

Este canal se localiza en el costado suroriental del Campus de la universidad del Rosario. Aguas arriba se encuentra una industria de fabricación de tuberías de concreto, que actualmente entrega sus vertimientos sobre el canal, lo que ha generado una alteración en la calidad de este. El cauce presenta una forma totalmente lineal, en el sustrato predominan los sedimentos. En cuanto a la vegetación solo se observa la presencia de algunos Sauces.

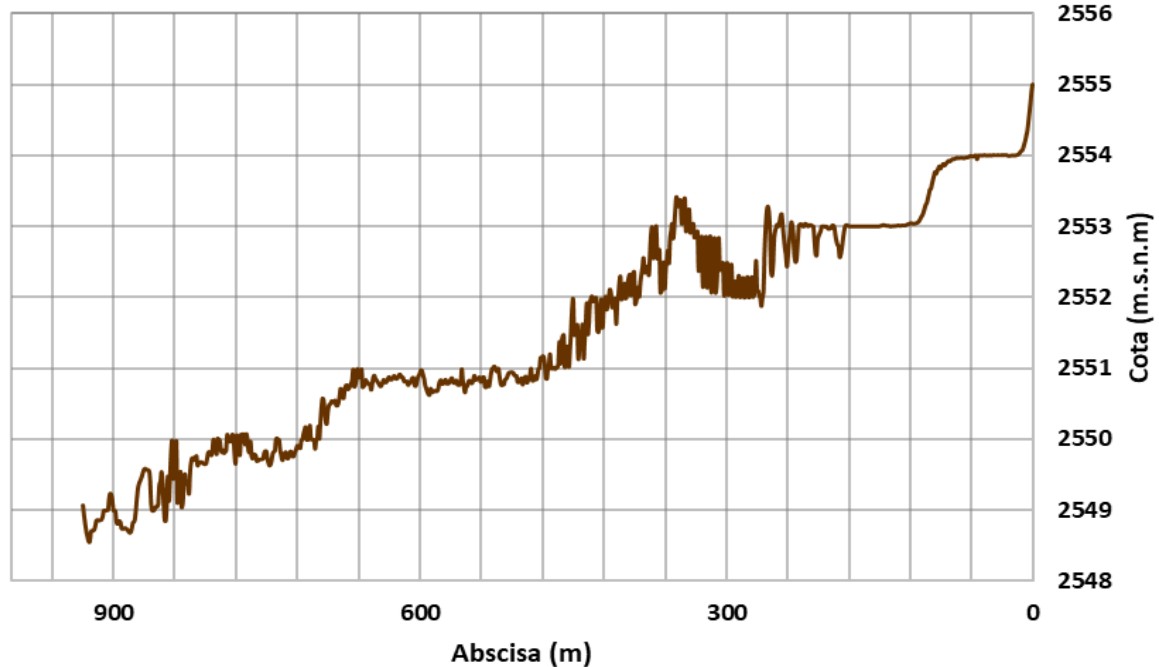
La parte rural de la cuenca corresponde al tramo comprendido entre la divisoria y la Carrera 7a, en donde se evidencia un control geomorfológico, que da inicio la zona plana de la cuenca. La cobertura de uso pecuario y/o de pastos se extiende hacia aguas abajo de la carrera 7a hasta el borde oriental del canal Torca; en esta zona el uso del suelo tiene zonas de tipo institucional y comercial. La desembocadura de esta corriente al canal Torca se llevan a cabo mediante una estructura tipo alcantarilla de regular estado.

Figura 100 Delimitación de la cuenca de la quebrada Tibabita



Fuente: WSP, 2019

Figura 101 Perfil longitudinal quebrada Tibabita



Fuente: WSP, 2019

Canal Torca:

Este Canal (estructura revestida en concreto) tiene su origen sobre la Calle 153 a la altura de la Carrera Séptima, con trayectos abiertos y otros subterráneos, el cual confluye a la altura de la Calle 170 y continua hasta el con una longitud total de 4,1 km, que drena de sur a norte entre la Calle 170 y el cementerio Jardines de Paz este último ubicado en la Calle 200 y siendo este el punto de entrega al humedal.

Del sistema Torca – Guaymaral, el primer elemento es el humedal Torca, que recibe el aporte de caudal proveniente de la cuenca del río Torca (canal Torca) el cual discurre de sur a norte a través a través de un canal de forma trapezoidal revestido en concreto y que desemboca hasta el sitio donde intercepta al humedal a la altura del Cementerio Jardines de Paz. Adicionalmente.

La subcuenca del Canal Torca, nace a la altura de la calle 153 con carrera séptima en Cerros Orientales de la ciudad de Bogotá, recorre dentro de la ciudad una distancia aproximada de 8.5 kilómetros, encontrándose canalizados 6.2 kilómetros aproximadamente.

Para la delimitación de las cuencas urbanas o externas que hacen su ingreso al sistema Torca-Guaymaral se tuvo en cuenta la red de drenaje pluvial suministrado por el SIGUE de la EAAB, a partir del cual se llevó a cabo la delimitación que se presenta en la Figura 103.

La cuenca rural inicia en la divisoria de drenaje de los Cerros Orientales conformada por áreas de alta pendiente morfológica, con un cambio en el ápice que se presenta a la altura de la carrera Séptima. Desde este sitio hacia aguas abajo, se configuran una serie de canales afluentes, entre los más representativos se identifican el canal El Cedro que está ubicado sobre la calle 153, el canal San Cristóbal que viene desde el barrio San Cristóbal norte sobre la calle 161 y el canal Serrezuela que nace arriba de la carrera séptima con calle 170.

Figura 102 Detalle del cauce actual del Canal Torca, antes de la desembocadura en el Humedal Torca Guaymaral (izq,) y aguas abajo de la Autopista Norte (der.).

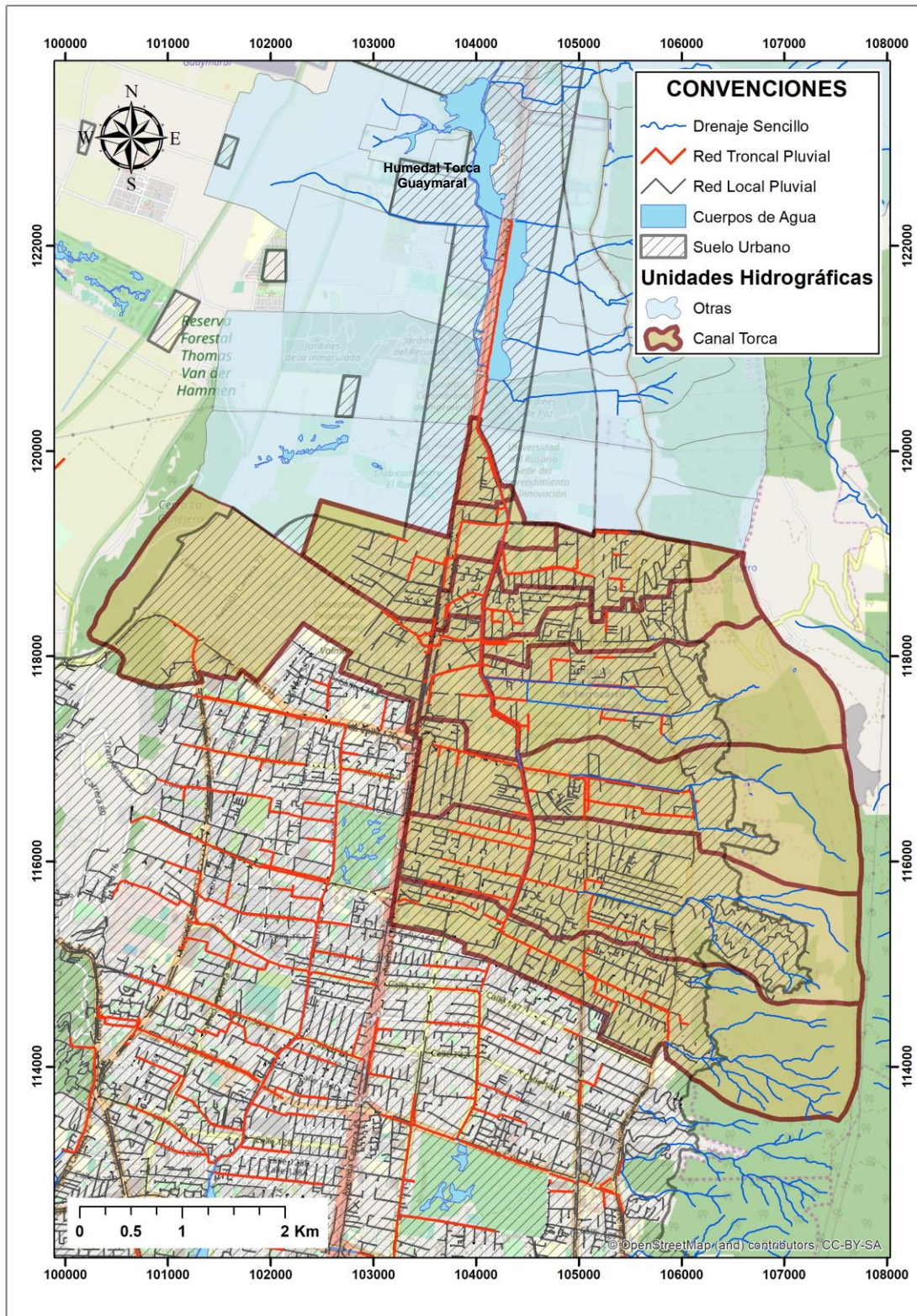


Fuente: WSP, 2019

Las aguas lluvias transportadas por el canal Torca son entregadas al humedal Torca, se diseñó para funcionar como cuerpo de amortiguación, sin embargo, la alta carga de sedimentos y materia orgánica que posteriormente se comunica con el humedal Guaymaral por debajo de la Autopista Norte, aportan sedimentos que deben retirarse frecuentemente del lecho de los dos canales.

La principal fuente de contaminación en el Canal Torca en su primer tramo corresponde a la red de alcantarillado público (sanitarios, pluviales o combinados). El área asociada al segundo tramo del río Torca-Guaymaral no cuenta con red de alcantarillado público por lo tanto allí se asientan usuarios generadores de vertimientos como instituciones educativas y conjuntos residenciales que vierten sobre una red de vallados que conducen las aguas residuales al río.

Figura 103 Cuenca de drenaje del canal Torca



Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

Canal Guaymaral:

Este canal se encuentra ubicado en el costado noroccidental del área conectando el Río Bogotá y el Humedal de Guaymaral. Este canal recibe los aportes del Humedal Guaymaral y los entrega al río Bogotá. Diferentes predios del sector de Borde Norte, drenan en sentido occidente oriente o viceversa, hacia los humedales, y la descarga final va hacia el norte por el canal Guaymaral, lo que indica que el sector de San Simón se encuentra en una cota más baja con relación a las cotas del interceptor de Río Bogotá.

Figura 104 Detalle del cauce actual del Canal Guaymaral, sector medio (izq.) y sector bajo (der.)



Fuente: WSP, 2019

El segundo elemento es el humedal Guaymaral, el cual se conecta con el humedal Torca a través de unas alcantarillas tipo cajón que atraviesan la Autopista Norte. Este humedal recibe el aporte de cuatro subcuencas del costado oriental: cuenca de la quebrada Las Pilas. Adicionalmente, recibe el aporte de cuatro cuencas localizadas al costado occidental de la Autopista Norte.

5.8 ANÁLISIS CAUDALES MÁXIMOS

5.8.1 Metodología

Se realiza el análisis y determinación de los principales parámetros morfométricos de cada cuenca, que se utilizan en la estimación de los caudales máximos para los periodos de retorno requeridos. Para lo anterior se realizó una primera delimitación de las cuencas aferentes a partir del MDT originario de las imágenes del satélite ALOS, con resolución de 12.5 m, para el área de estudio en las partes altas de cuenca, y con la cartografía 1:25.000 y 1:10.000 del IGAC para determinar los límites urbanos y rurales de las subcuencas del sistema. Para la delimitación más precisa de las cuencas en dicha zona, donde la morfología más plana y la presencia de infraestructura hace que la delimitación se dificulte, se completó la definición de cuencas después de visitas a campo e inventario de estructuras.

A partir de la discretización de cuencas anterior, se extraen los puntos más elevados de las áreas delimitadas en una capa Shape de polígonos y la altitud en los puntos de fluencia de las subcuencas a partir de análisis Raster con los MDTs. Mediante el uso del software ArcGIS y QGIS, se obtienen los resultados de áreas de cada cuenca, las longitudes de cauce principal, pendientes, desniveles y otros parámetros de forma que permiten el cálculo de los tiempos de concentración.

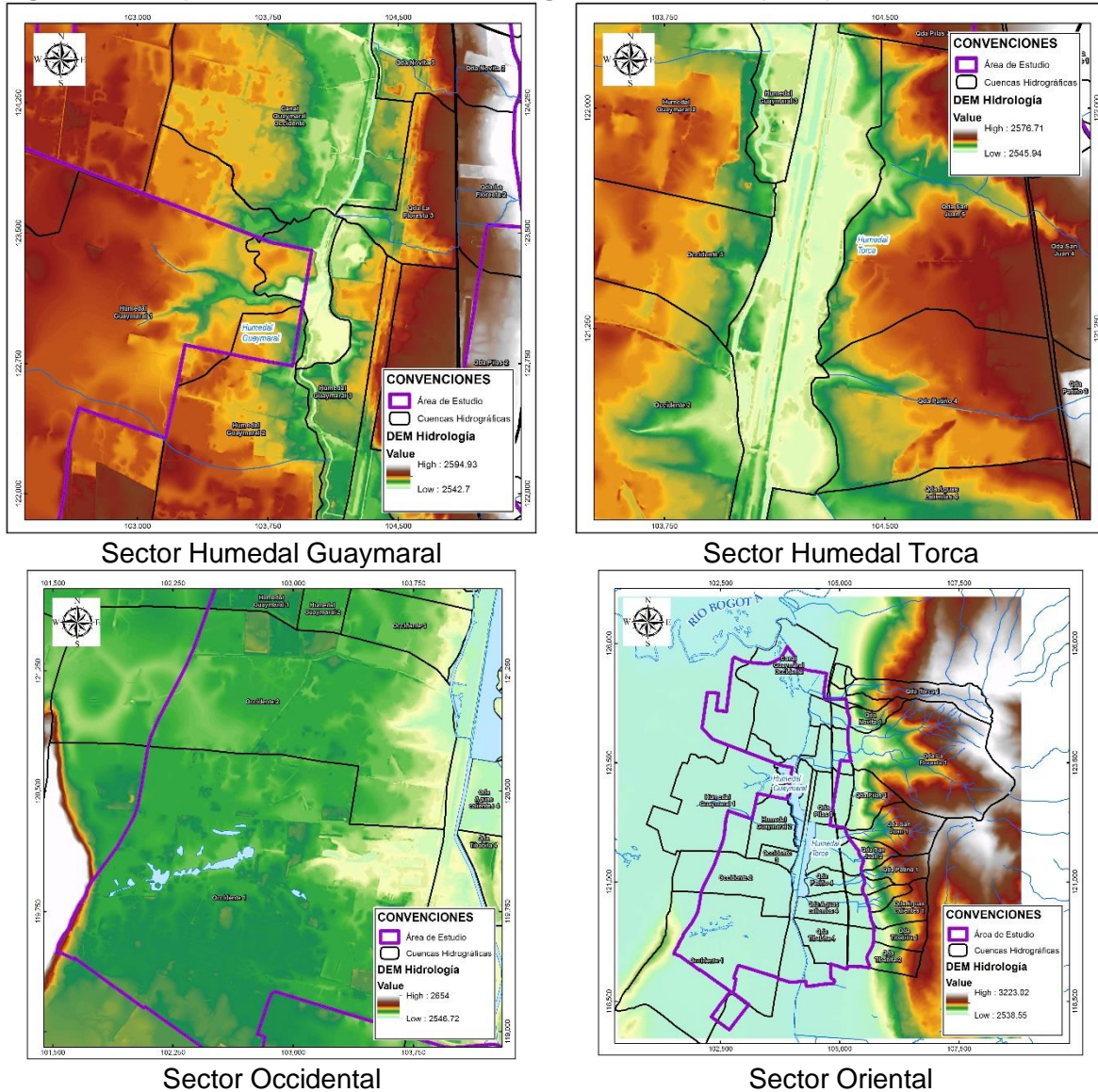
5.8.1.1 Criterios de Delimitación de cuencas hidrográficas

A partir de la información cartográfica oficial disponible a escala 1:10.000, el modelo digital de terreno construido a partir del levantamiento topobatemétrico, la información obtenida por medio tecnología LIDAR y las curvas de nivel del IDECA, se delimitaron las cuencas aferentes a los sitios de control definidos sobre las corrientes de agua asociadas al proyecto Lagos Torca, siguiendo el procedimiento presentado a continuación:

- Se inició la delimitación de la cuenca aferente garantizando que la divisoria de aguas corta perpendicularmente las curvas de nivel y pasa por los puntos de mayor nivel topográfico.
- Durante la delimitación de las cuencas, se aseguró que la divisoria topográfica siempre corta las curvas de nivel cuando éstas son convexas, desde abajo hacia arriba.
- Como regla principal de la delimitación de las cuencas aferentes se tuvo que la divisoria de agua no podía cruzar un drenaje a menos que fuera el sitio de control definido.
- Para las cuencas aferentes localizadas en las áreas urbanas, adicionalmente, se tuvo en cuenta la información de la red de aguas lluvias de la EAAB, para la determinación de las áreas aferentes.

En la Figura 105 se presenta el modelo digital del terreno, a partir del cual se calcularon los parámetros morfométricos de las subcuencas. En el Anexo 3 – Anexo Cartográfico 3.3 PDF 2. Cuencas hidrográficas DEM, se presenta el mapa detallado de las curvas de nivel y la delimitación de las cuencas.

Figura 105 Representación del Modelo Digital de Terreno (MDT)



Fuente: WSP, 2019

5.8.1.2 Parámetros Morfométricos

Conocer la forma de la cuenca de una manera precisa es de vital importancia ya que de esta depende el hidrograma de salida de las corrientes en estudio, particularmente aquellos que están asociados a eventos de avenidas máximas; por ello fue necesario conocer los parámetros morfométricos de las cuencas aferentes.

- **Parámetros asociados con el tamaño de la cuenca**

El área de la cuenca es probablemente la característica geomorfológica más importante en los estudios hidrológicos. Está definida como la proyección horizontal de toda el área

de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido, directa o indirectamente, a un mismo cauce natural.

La longitud (L) de la cuenca se define como la distancia horizontal entre el punto de salida y el punto aguas arriba más lejano sobre la divisoria de aguas, donde la tendencia general del cauce principal corte la línea de contorno de la cuenca.

El perímetro corresponde a la longitud de la línea de divorcio de la cuenca proyectada en un plano horizontal. Es un parámetro importante, pues en conexión con el área permite deducir diferentes parámetros asociados con la forma de la cuenca. Usualmente este parámetro físico es simbolizado por la letra mayúscula P.

El ancho se define como la relación entre el área (A) y la longitud de la cuenca (L) y se designa por la letra B (Zavoianu, 1985), de forma que:

$$B = A / L$$

Aquellas cuencas que presentan valores menores a uno presentan un área más larga que ancha, obedeciendo a una forma más alargada, que la de aquellas donde la proporción entre largo y ancho de la cuenca, está inclinada hacia la segunda dimensión, directamente relacionada con la forma redondeada, determinada en el Coeficiente de Compacidad. Igualmente, este índice permite hacer inferencia a la dinámica rápida o lenta del agua en los drenajes y su potencial erosivo o de arrastre.

- **Parámetros asociados con la forma de la cuenca**

Dada la importancia de la configuración de las cuencas, se trata de cuantificar las características de forma por medio de índices o coeficientes, los cuales relacionan el movimiento del agua y las respuestas de la cuenca a tal movimiento (hidrógrafa). Una cuenca tiende a ser alargada si el factor de forma tiende a cero, mientras que su forma es redonda, en la medida que el Factor de Forma tiende a uno. Este factor, como los otros que se utilizan en este análisis, son un referente para establecer la dinámica esperada de la escorrentía superficial de la cuenca, teniendo en cuenta que aquellas cuencas con formas alargadas tienden a presentar un flujo de agua más veloz, a comparación de las cuencas redondeadas, logrando una evacuación del agua de la cuenca más rápida, mayor desarrollo de energía cinética en el arrastre de sedimentos hacia el nivel de base, principalmente.

La forma de la cuenca afecta los hidrogramas de caudales máximos, por lo que se han realizado numerosos esfuerzos para tratar de cuantificar este efecto por medio de un valor numérico. Horton sugirió un factor adimensional de forma R_f (Factor de Forma), calculado a partir de área superficial (A) y el largo de la cuenca (L_{wshd}), como índice de la forma de una cuenca así:

$$R_f = \frac{A}{L_{wshd}}$$

El coeficiente de compacidad está definido como la relación entre el perímetro P y el perímetro de un círculo que contenga la misma área A de la cuenca hidrográfica:

$$K = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Cuanto más irregular sea la cuenca mayor será su coeficiente de compacidad. Una cuenca circular posee el coeficiente mínimo, igual a uno. Hay mayor tendencia a las crecientes en la medida que este número sea próximo a la unidad (Monsalve Sáenz, 1999).

- **Parámetros asociados con el relieve de la cuenca**

Los parámetros asociados con el relieve de la cuenca presentan una gran influencia sobre la respuesta hidrológica antes eventos de precipitación, ya que determinan la energía potencial disponible en la cuenca (Zavoianu, 1985).

La pendiente promedio del cauce principal está relacionado directamente con la velocidad media de la escorrentía y su poder de arrastre, así como de la erosión de la cuenca. La elevación promedio del cauce de una cuenca tiene especial interés en zonas montañosas pues puede dar una idea de la climatología de la región, con base en un patrón general climático de la zona. La elevación promedio está referida al nivel del mar.

Coeficiente de Masividad, (Km), define el tipo de relieve de montaña, relaciona la elevación media de la cuenca con su superficie; se dimensiona en este documento en m/Km².

$$K_m = \frac{H_{mean}}{A}$$

Dónde:

H_{mean} : Altura media de la cuenca (m.s.n.m)

A: Área de la cuenca (km²)

La Tabla 15, presenta la clasificación del coeficiente de masividad, Km. Los valores bajos de Km representan cuencas montañosas y valores altos, representan cuencas planas.

Tabla 15 Coeficiente de Masividad (Km)

| RANGOS DE Km | CLASE DE MASIVIDAD |
|--------------|-------------------------|
| 0 - 35 | Muy Montañosa |
| 35 - 70 | Montañosa |
| >70 | Moderadamente Montañosa |

Fuente: (Universidad del Valle, 2010).

Pendiente media del cauce (S)

La pendiente media de un cauce generalmente se considera como el desnivel existente entre el punto más alto y el más bajo del tramo de estudio, dividido por la longitud horizontal del mismo.

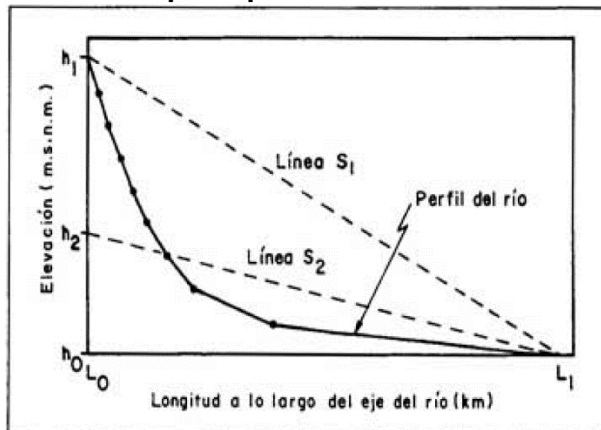
$$S = \frac{C_{mayor} - C_{menor}}{L_t}$$

Dónde:

C_{mayor} : Cota mayor en m.s.n.m.
 C_{menor} : Cota menor en m.s.n.m.
 L_t : Longitud total del cauce en metros.

Sin embargo, la pendiente media ponderada es un valor más razonable para considerar. Para calcular su valor se traza una línea, tal que el área comprendida entre esa línea y los ejes coordenados sea igual a la comprendida entre la curva del perfil del río y dichos ejes (Monsalve Sáenz, 1999). Se estima a partir del perfil longitudinal del cauce principal de las cuencas definidas, en la Figura 106 se aprecia que la pendiente así definida, representa más adecuadamente la pendiente del cauce natural, en el Anexo 2 Análisis de Caudales 2.1 Parámetros Morfométricos, se presenta la estimación de las pendientes ponderadas de los cauces.

Figura 106 Pendiente del cauce principal



Fuente: (Monsalve Sáenz, 1999).

La pendiente media ponderada se determinó a partir del perfil longitudinal del cauce principal, en primer lugar, se determinó el área bajo la curva del perfil, calculando el área por cada abscisa asemejando el área a la de un trapecio, el área total la componen la suma de las áreas de todos los trapecios.

$$A_i = (h_j + h_{j+1}) * \frac{(x_{j+1} - x_j)}{2}$$

Dónde:

A_i : Área del trapecio i
 h_j : Cota sobre el nivel del mar de la abscisa j del perfil longitudinal
 h_{j+1} : Cota sobre el nivel del mar de la abscisa j+1 del perfil longitudinal

x_{j+1} : Abscisa j+1 del perfil longitudinal

x_j : Abscisa j del perfil longitudinal

Posteriormente, se identifica la intersección en el eje de las ordenadas de la recta que genera la misma área bajo la curva hallada anteriormente, igualando el área total a la de un trapecio, de la siguiente manera:

$$A_T = L * \frac{H_2 + H_0}{2}$$

Donde:

A_T : Área total bajo el perfil longitudinal del cauce principal

H_2 : Intersección de las ordenadas de la línea S2 (ver Figura 106)

H_0 : Cota mínima del cauce principal

L : Longitud del cauce principal

Dado que la única incógnita corresponde a la intersección (H_2), es posible hallar la pendiente de esta recta, la cual corresponde a la pendiente media ponderada del cauce:

$$S_2 = \frac{(H_2 - H_0)}{L}$$

Donde:

S_2 : Pendiente media ponderada

H_2 : Intersección sobre el eje de las ordenadas de la línea S2

H_0 : Cota mínima del cauce principal

L : Longitud del cauce principal

En la Tabla 16 se presentan los valores de los parámetros morfométricos de cada una de las cuencas que conforman el sistema a partir de los cuales se calcula la Pendiente media ponderada, y en la Tabla 17 se presentan los parámetros asociados a la forma de la cuenca.

Tabla 16 Parámetros morfométricos de las subcuencas del sistema Torca-Guaymaral

| UNIDAD HIDROGRÁFICA | ÁREA | PERÍMETRO | LONGITUD CAUCE | ANCHO MEDIO | LONGITUD CUENCA | ALTURA MEDIA | ALTURA MÁXIMA | ALTURA MÍNIMA | PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE |
|----------------------------|--------------------|-----------|----------------|-------------|-----------------|--------------|---------------|---------------|---------------------------|
| | [km ²] | [km] | [km] | [km] | [km] | (m.s.n.m) | (m.s.n.m) | (m.s.n.m) | % |
| Quebrada La Floresta 1 | 5.702 | 10.275 | 3.672 | 2.296 | 3.359 | 2900.815 | 3215.16 | 2562.91 | 10.3% |
| Quebrada La Floresta 2 | 0.342 | 2.711 | 0.583 | 1.008 | 0.379 | 2561.288 | 2572.10 | 2554.86 | 1.3% |
| Quebrada La Floresta 3 | 0.294 | 2.241 | 0.579 | 0.605 | 0.543 | 2552.581 | 2559.08 | 2543.27 | 1.8% |
| Quebrada La Floresta 4 | 0.186 | 2.092 | 0.868 | 0.364 | 0.734 | 2552.514 | 2558.08 | 2543.99 | 1.1% |
| Quebrada Aguas calientes 1 | 0.705 | 3.975 | 0.845 | 0.609 | 1.345 | 2790.588 | 3008.75 | 2564.31 | 29.9% |
| Quebrada Aguas calientes 2 | 0.293 | 2.535 | 0.438 | 0.386 | 0.960 | 2720.460 | 2890.35 | 2563.12 | 30.2% |
| Quebrada Aguas calientes 3 | 0.306 | 2.396 | 0.456 | 0.675 | 0.433 | 2558.388 | 2570.81 | 2551.98 | 1.1% |
| Quebrada Aguas calientes 4 | 0.625 | 3.346 | 1.042 | 0.620 | 1.084 | 2552.000 | 2557.61 | 2547.90 | 0.3% |
| Quebrada Torca 1 | 1.259 | 7.283 | 3.496 | 0.389 | 3.098 | 2994.596 | 3218.67 | 2578.73 | 20.0% |
| Quebrada Torca 2 | 0.200 | 2.273 | 0.955 | 0.292 | 0.966 | 2739.129 | 2889.11 | 2575.91 | 34.2% |
| Quebrada Torca 3 | 0.023 | 0.902 | 0.251 | 0.071 | 0.372 | 2632.483 | 2740.46 | 2569.88 | 49.8% |
| Quebrada Torca 4 | 0.137 | 1.643 | 0.350 | 0.374 | 0.358 | 2578.555 | 2623.63 | 2558.15 | 5.6% |
| Quebrada Novita 1 | 0.443 | 3.405 | 1.197 | 0.454 | 1.273 | 2726.716 | 2973.00 | 2565.50 | 18.2% |
| Quebrada Novita 2 | 0.161 | 1.622 | 0.570 | 0.456 | 0.391 | 2561.213 | 2570.05 | 2554.45 | 1.6% |
| Quebrada Novita 3 | 0.287 | 2.248 | 0.646 | 0.663 | 0.564 | 2551.225 | 2558.60 | 2543.00 | 1.9% |
| Quebrada Pilas 1 | 0.836 | 4.152 | 0.955 | 1.250 | 1.053 | 2695.245 | 2943.68 | 2565.05 | 28.4% |
| Quebrada Pilas 2 | 0.417 | 3.158 | 0.405 | 1.196 | 0.410 | 2561.522 | 2570.52 | 2555.52 | 1.7% |
| Quebrada Pilas 3 | 0.465 | 3.106 | 0.599 | 1.090 | 0.415 | 2556.885 | 2564.70 | 2549.14 | 1.0% |
| Quebrada Pilas4 | 0.392 | 4.023 | 0.899 | 1.079 | 0.516 | 2550.741 | 2555.48 | 2544.84 | 0.7% |
| Quebrada San Juan 1 | 1.299 | 5.305 | 1.815 | 1.113 | 2.008 | 2879.967 | 3120.03 | 2569.76 | 20.4% |
| Quebrada San Juan 2 | 0.368 | 2.991 | 0.741 | 0.548 | 0.750 | 2701.860 | 2924.97 | 2563.89 | 44.9% |
| Quebrada San Juan 3 | 0.064 | 1.085 | 0.238 | 0.315 | 0.202 | 2563.028 | 2571.27 | 2556.88 | 3.4% |
| Quebrada San Juan 4 | 0.251 | 2.018 | 0.592 | 0.706 | 0.442 | 2560.948 | 2575.73 | 2553.00 | 1.8% |
| Quebrada San Juan 5 | 0.538 | 3.507 | 0.532 | 0.892 | 0.503 | 2554.609 | 2564.71 | 2548.62 | 0.9% |
| Quebrada Patiño 1 | 0.595 | 3.627 | 1.277 | 0.601 | 1.407 | 2862.839 | 3092.05 | 2575.67 | 30.6% |
| Quebrada Patiño 2 | 0.153 | 1.880 | 0.565 | 0.231 | 0.645 | 2668.176 | 2810.34 | 2568.78 | 25.0% |

| UNIDAD HIDROGRÁFICA | ÁREA | PERÍMETRO | LONGITUD CAUCE | ANCHO MEDIO | LONGITUD CUENCA | ALTURA MEDIA | ALTURA MÁXIMA | ALTURA MÍNIMA | PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE |
|------------------------------|-------|-----------|----------------|-------------|-----------------|--------------|---------------|---------------|---------------------------|
| Quebrada Patiño 3 | 0.154 | 1.706 | 0.458 | 0.421 | 0.403 | 2566.223 | 2585.66 | 2555.77 | 3.4% |
| Quebrada Patiño 4 | 0.386 | 2.699 | 0.812 | 0.529 | 0.869 | 2554.151 | 2558.07 | 2548.52 | 1.2% |
| Quebrada Tibabita 1 | 0.539 | 3.366 | 1.065 | 0.510 | 1.114 | 2745.429 | 2922.85 | 2565.00 | 23.2% |
| Quebrada Tibabita 2 | 0.567 | 3.209 | 0.965 | 0.531 | 1.088 | 2741.236 | 2926.39 | 2567.40 | 32.5% |
| Quebrada Tibabita 3 | 0.404 | 2.693 | 0.598 | 0.836 | 0.481 | 2560.537 | 2575.02 | 2554.92 | 1.1% |
| Quebrada Tibabita 4 | 0.808 | 3.877 | 0.934 | 0.861 | 0.995 | 2553.783 | 2561.22 | 2548.56 | 0.7% |
| Canal Torca Occidental_Sub12 | 3.654 | 10.477 | 2.340 | 1.828 | 2.822 | 2571.350 | 2679.09 | 2553.45 | 0.2% |
| Occidente 1_1 | 2.554 | 7.565 | 2.389 | 1.347 | 2.499 | 2562.286 | 2677.54 | 2547.79 | 0.1% |
| Occidente 1_2 | 1.507 | 7.079 | 2.292 | 0.893 | 2.183 | 2554.808 | 2561.08 | 2547.16 | 0.6% |
| Occidente 2 | 2.470 | 6.801 | 2.447 | 1.020 | 2.522 | 2554.836 | 2610.37 | 2547.85 | 0.4% |
| Occidente 3 | 1.833 | 6.217 | 2.144 | 0.962 | 2.057 | 2554.634 | 2559.91 | 2548.06 | 0.6% |
| Occidente 3-1 | 0.178 | 1.982 | 0.355 | 0.524 | 0.367 | 2553.028 | 2556.27 | 2547.35 | 0.9% |
| Humedal Guaymaral 3 | 0.150 | 1.569 | 0.389 | 0.372 | 0.422 | 2551.021 | 2554.00 | 2546.07 | 2.1% |
| Humedal Guaymaral 2 | 0.396 | 2.696 | 0.843 | 0.482 | 0.870 | 2551.899 | 2556.00 | 2546.88 | 0.9% |
| Humedal Guaymaral 1_1 | 2.032 | 7.612 | 0.874 | 1.155 | 1.512 | 2554.592 | 2559.17 | 2551.39 | 0.0% |
| Humedal Guaymaral 1_2 | 0.455 | 0.977 | 0.977 | 0.717 | 0.976 | 2552.023 | 2554.99 | 2546.87 | 0.5% |
| Canal Guaymaral Occidente 1 | 1.215 | 5.320 | 1.490 | 0.900 | 1.390 | 2546.400 | 2565.03 | 2541.74 | 0.51% |
| Canal Guaymaral Occidente 2 | 1.082 | 4.563 | 1.447 | 0.934 | 1.199 | 2550.884 | 2555.07 | 2542.90 | 0.44% |
| Canal Guaymaral Occidente 3 | 0.524 | 3.432 | 1.436 | 0.386 | 1.277 | 2550.218 | 2554.90 | 2542.66 | 0.83% |
| Oriental 1 | 0.055 | 1.287 | 0.198 | 0.347 | 0.270 | 2594.012 | 2631.31 | 2576.16 | 0.04% |
| Oriental 2 | 0.128 | 1.475 | 0.285 | 0.455 | 0.271 | 2579.040 | 2623.98 | 2559.55 | 0.05% |
| Canal Torca Oriental 2 | 0.253 | 2.504 | 0.865 | 0.837 | 0.398 | 2550.782 | 2554.04 | 2547.20 | 0.1% |
| Canal Torca Oriental_sub1 | 3.889 | 12.010 | 4.217 | 1.162 | 4.867 | 2703.306 | 3094.93 | 2550.65 | 4.9% |
| Canal Torca Oriental_sub2 | 3.705 | 9.236 | 3.444 | 1.065 | 3.360 | 2690.383 | 3055.44 | 2550.02 | 6.0% |
| Canal Torca Oriental_sub3 | 3.172 | 8.810 | 3.677 | 1.071 | 3.363 | 2703.429 | 2998.11 | 2550.03 | 6.6% |
| Canal Torca Oriental_sub4 | 3.301 | 9.234 | 3.005 | 1.121 | 3.238 | 2652.471 | 2878.53 | 2550.04 | 2.3% |
| Canal Torca Oriental_sub5 | 1.111 | 7.501 | 2.432 | 0.415 | 2.741 | 2647.315 | 2891.18 | 2550.04 | 2.5% |

| UNIDAD HIDROGRÁFICA | ÁREA | PERÍMETRO | LONGITUD CAUCE | ANCHO MEDIO | LONGITUD CUENCA | ALTURA MEDIA | ALTURA MÁXIMA | ALTURA MÍNIMA | PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE |
|----------------------------|-------|-----------|----------------|-------------|-----------------|--------------|---------------|---------------|---------------------------|
| Canal Torca Oriental_sub6 | 1.133 | 6.571 | 3.057 | 0.750 | 2.281 | 2597.670 | 2892.50 | 2548.45 | 2.8% |
| Canal Torca Oriental_sub7 | 0.374 | 3.386 | 1.432 | 0.471 | 1.047 | 2552.194 | 2556.65 | 2549.00 | 0.4% |
| Canal Torca Oriental_sub8 | 0.253 | 2.811 | 0.646 | 0.570 | 0.529 | 2552.706 | 2555.50 | 2546.86 | 0.4% |
| Canal Torca Oriental_sub9 | 0.737 | 4.317 | 0.896 | 1.032 | 0.645 | 2553.546 | 2556.71 | 2547.40 | 1.1% |
| Canal Torca Oriental_sub10 | 0.770 | 4.086 | 0.866 | 0.541 | 1.084 | 2554.946 | 2557.17 | 2548.86 | 0.2% |
| Canal Torca Oriental_sub11 | 0.957 | 4.044 | 1.194 | 0.835 | 1.226 | 2555.004 | 2557.01 | 2549.06 | 0.4% |

Fuente: WSP, 2019.

Tabla 17 Parámetros morfométricos asociados a la forma de las subcuencas del sistema Torca-Guaymaral

| UNIDAD HIDROGRÁFICA | COEFICIENTE DE FORMA | ÍNDICE DE ALARGAMIENTO | COEFICIENTE DE COMPACIDAD (kc) | RELACIÓN DE ELONGACIÓN | COEFICIENTE DE MASIVIDAD |
|----------------------------|----------------------|------------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Quebrada La Floresta 1 | 0.68 | 1.46 | 1.21 | 0.80 | 508.78 |
| Quebrada La Floresta 2 | 2.66 | 0.38 | 1.31 | 1.74 | 7484.73 |
| Quebrada La Floresta 3 | 1.11 | 0.90 | 1.17 | 1.13 | 8688.62 |
| Quebrada La Floresta 4 | 0.50 | 2.02 | 1.37 | 0.66 | 13747.96 |
| Quebrada Aguas calientes 1 | 0.45 | 2.21 | 1.34 | 0.70 | 3959.81 |
| Quebrada Aguas calientes 2 | 0.40 | 2.49 | 1.32 | 0.64 | 9274.54 |
| Quebrada Aguas calientes 3 | 1.56 | 0.64 | 1.22 | 1.44 | 8372.09 |
| Quebrada Aguas calientes 4 | 0.57 | 1.75 | 1.19 | 0.82 | 4080.21 |
| Quebrada Torca 1 | 0.13 | 7.97 | 1.83 | 0.41 | 2378.08 |
| Quebrada Torca 2 | 0.30 | 3.31 | 1.43 | 0.52 | 13666.06 |
| Quebrada Torca 3 | 0.19 | 5.24 | 1.69 | 0.46 | 116026.11 |
| Quebrada Torca 4 | 1.04 | 0.96 | 1.25 | 1.17 | 18859.40 |
| Quebrada Novita 1 | 0.36 | 2.80 | 1.44 | 0.59 | 6148.67 |
| Quebrada Novita 2 | 1.17 | 0.86 | 1.14 | 1.16 | 15883.45 |
| Quebrada Novita 3 | 1.18 | 0.85 | 1.18 | 1.07 | 8889.02 |
| Quebrada Pilas 1 | 1.19 | 0.84 | 1.28 | 0.98 | 3223.28 |
| Quebrada Pilas 2 | 2.91 | 0.34 | 1.38 | 1.78 | 6136.00 |

| UNIDAD HIDROGRÁFICA | COEFICIENTE DE FORMA | ÍNDICE DE ALARGAMIENTO | COEFICIENTE DE COMPACIDAD (kc) | RELACIÓN DE ELONGACIÓN | COEFICIENTE DE MASIVIDAD |
|------------------------------|----------------------|------------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Quebrada Pilas 3 | 2.63 | 0.38 | 1.28 | 1.85 | 5495.71 |
| Quebrada Pilas4 | 2.09 | 0.48 | 1.81 | 1.37 | 6502.18 |
| Quebrada San Juan 1 | 0.55 | 1.80 | 1.31 | 0.64 | 2216.92 |
| Quebrada San Juan 2 | 0.73 | 1.37 | 1.39 | 0.91 | 7335.09 |
| Quebrada San Juan 3 | 1.56 | 0.64 | 1.21 | 1.41 | 40048.68 |
| Quebrada San Juan 4 | 1.60 | 0.63 | 1.13 | 1.28 | 10184.61 |
| Quebrada San Juan 5 | 1.77 | 0.56 | 1.35 | 1.65 | 4745.71 |
| Quebrada Patiño 1 | 0.43 | 2.34 | 1.33 | 0.62 | 4813.35 |
| Quebrada Patiño 2 | 0.36 | 2.79 | 1.35 | 0.69 | 17385.16 |
| Quebrada Patiño 3 | 1.05 | 0.96 | 1.23 | 1.10 | 16685.60 |
| Quebrada Patiño 4 | 0.61 | 1.64 | 1.23 | 0.81 | 6621.96 |
| Quebrada Tibabita 1 | 0.46 | 2.18 | 1.29 | 0.74 | 5094.59 |
| Quebrada Tibabita 2 | 0.49 | 2.05 | 1.20 | 0.78 | 4831.75 |
| Quebrada Tibabita 3 | 1.74 | 0.58 | 1.20 | 1.49 | 6345.67 |
| Quebrada Tibabita 4 | 0.87 | 1.16 | 1.22 | 1.02 | 3162.45 |
| Canal Torca Occidental_Sub12 | 0.65 | 1.54 | 1.55 | 0.76 | 703.76 |
| Occidente 1_1 | 0.54 | 1.86 | 1.33 | 0.72 | 1003.40 |
| Occidente 1_2 | 0.41 | 2.44 | 1.63 | 0.63 | 1694.80 |
| Occidente 2 | 0.40 | 2.47 | 1.22 | 0.70 | 1034.33 |
| Occidente 3 | 0.47 | 2.14 | 1.30 | 0.74 | 1393.70 |
| Occidente 3-1 | 1.43 | 0.70 | 1.33 | 1.30 | 14368.34 |
| Humedal Guaymaral 3 | 0.88 | 1.13 | 1.14 | 1.03 | 17022.00 |
| Humedal Guaymaral 2 | 0.55 | 1.80 | 1.21 | 0.82 | 6441.43 |
| Humedal Guaymaral 1_1 | 0.76 | 1.31 | 1.51 | 1.06 | 1257.29 |
| Humedal Guaymaral 1_2 | 0.73 | 1.36 | 0.41 | 0.78 | 5611.75 |
| Canal Guaymaral Occidente 1 | 0.65 | 1.54 | 1.36 | 0.89 | 2096.34 |
| Canal Guaymaral Occidente 2 | 0.78 | 1.28 | 1.24 | 0.98 | 2358.47 |

| UNIDAD HIDROGRÁFICA | COEFICIENTE DE FORMA | ÍNDICE DE ALARGAMIENTO | COEFICIENTE DE COMPACIDAD (kc) | RELACIÓN DE ELONGACIÓN | COEFICIENTE DE MASIVIDAD |
|-----------------------------|----------------------|------------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Canal Guaymaral Occidente 3 | 0.30 | 3.30 | 1.34 | 0.64 | 4869.41 |
| Oriental 1 | 1.29 | 0.78 | 1.55 | 0.98 | 47161.29 |
| Oriental 2 | 1.68 | 0.60 | 1.16 | 1.49 | 20087.55 |
| Canal Torca Oriental 2 | 2.10 | 0.48 | 1.40 | 1.42 | 10093.54 |
| Canal Torca Oriental_sub1 | 0.24 | 4.19 | 1.72 | 0.46 | 695.17 |
| Canal Torca Oriental_sub2 | 0.32 | 3.16 | 1.35 | 0.65 | 726.15 |
| Canal Torca Oriental_sub3 | 0.32 | 3.14 | 1.39 | 0.60 | 852.19 |
| Canal Torca Oriental_sub4 | 0.35 | 2.89 | 1.43 | 0.63 | 803.58 |
| Canal Torca Oriental_sub5 | 0.15 | 6.60 | 2.01 | 0.43 | 2381.82 |
| Canal Torca Oriental_sub6 | 0.33 | 3.04 | 1.74 | 0.53 | 2293.71 |
| Canal Torca Oriental_sub7 | 0.45 | 2.22 | 1.56 | 0.66 | 6829.65 |
| Canal Torca Oriental_sub8 | 1.08 | 0.93 | 1.58 | 1.07 | 10081.41 |
| Canal Torca Oriental_sub9 | 1.60 | 0.62 | 1.42 | 1.50 | 3464.62 |
| Canal Torca Oriental_sub10 | 0.50 | 2.00 | 1.31 | 0.91 | 3317.51 |
| Canal Torca Oriental_sub11 | 0.68 | 1.47 | 1.17 | 0.90 | 2670.97 |

Fuente: WSP, 2019.

5.8.1.3 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración, T_c , es el tiempo que toma la escorrentía para viajar desde el punto más lejano de la cuenca hasta el punto de salida de esta. Este tiempo puede obtenerse mediante fórmulas empíricas que tienen en cuenta parámetros como la pendiente del cauce principal, la diferencia de cotas entre el sitio más alto y el más bajo, el área y la pendiente media de la cuenca. En la Tabla 18 se presentan las expresiones utilizadas para el cálculo de los tiempos de concentración.

Tabla 18 Expresiones empleadas para el cálculo del tiempo de concentración

| MÉTODO | ECUACIÓN | PARÁMETROS |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Kirpich | $T_c = 0.000325 * \left(\frac{L^{0.77}}{S_0^{0.385}} \right)$ | Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce principal (m) So: Pendiente del canal en (m/m) |
| Témez | $T_c = 0.3 * \left(\frac{L}{S_0^{0.25}} \right)^{0.75}$ | Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce principal (Km) So: Diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente sobre L (%) |
| Pilgrim | $T_c = 0.76 * A^{0.385}$ | Tc: Tiempo de concentración (horas) A: Área de la cuenca (km ²) |
| Clark | $T_c = 0.335 * \left(\frac{A}{S_0^{0.5}} \right)^{0.593}$ | Tc: Tiempo de concentración (horas) So: Pendiente del cauce (m/m) |
| California Culvert Practice | $T_c = \frac{0.87075 * L^3}{H^{3.85}}$ | Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce (km) H: Diferencia de alturas (m.s.n.m) |
| Passini | $T_c = \frac{0.108 * (A * L)^{\frac{1}{3}}}{S^{0.5}}$ | Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce (km) S: Pendiente del cauce (m/m) A: Área de la cuenca (km ²) |
| California Cuvert USBR | $T_c = 0.066 * \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77}$ | Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce (km) S: Pendiente del cauce (m/m) |
| Giandotti | $T_c = \frac{4 * \sqrt{A} + 1.5 * L}{25.3 * \sqrt{L * S_0}}$ | Tc: Tiempo de concentración (horas) L: Longitud del cauce (km) S: Pendiente del cauce (m/m) A: Área de la cuenca (km ²) |

Fuente: (Chow & Maidment, Hidrología Aplicada, 1994).

La pendiente media (S_0) se estimó a partir de la pendiente ponderada del cauce principal de la cuenca, como se explicó en una sección anterior.

Teniendo en cuenta las anteriores expresiones, se realizó el cálculo del tiempo de concentración para cada cuenca, con todas las formulaciones empíricas presentadas en la Tabla 18. Para estimar el tiempo de concentración se consideró el promedio de los valores estimados por cada una de las metodologías consideradas, descartando aquellos valores que generaban un gran salto en la media y la desviación estándar. Los valores del tiempo de concentración considerados para el promedio fueron aquellos localizados dentro del intervalo ($\mu T - \sigma T$, $\mu T + \sigma T$), donde μT y σT son la media y la desviación estándar de los tiempos de concentración respectivamente, en la Tabla 19 se presenta el tiempo de concentración definido para las cuencas aferentes al sistema Torca – Guaymaral.

En el Anexo 2.6 Tiempos de Concentración, se presentan los cálculos realizados para la estimación de este parámetro morfométrico de las subcuencas de aporte al modelo hidrológico.

En términos de la hidrología de una cuenca, el tiempo de concentración representa el tiempo máximo que tardará la cuenca hidrográfica en contribuir a la escorrentía en el punto de fluencia. Un concepto relacionado, el tiempo de retardo (tlag), que corresponde al tiempo que tarda en ocurrir entre el inicio de la lluvia efectiva y el caudal pico del hidrograma unitario de escorrentía superficial. En general, entre menores sean los tiempos de retardo de una cuenca, mayores caudales se generarán.

Tabla 19 Tiempo de concentración

| NOMBRE CUENCA | TIEMPO CONCENTRACIÓN (Minutos) | | | | | | | | | |
|----------------------------|--------------------------------|-------|---------|-------|-----------------------------|---------|--------------|-----------|-------|-------|
| | Kirpich | Temex | Pilgrim | Clark | California Culvert Practice | Passini | Culvert USBR | Giandotti | TC | Tlag |
| Quebrada La Floresta 1 | 25.93 | 30.81 | - | - | 21.08 | 55.55 | 25.83 | 57.97 | 36.19 | 21.72 |
| Quebrada La Floresta 2 | 14.06 | 11.47 | 30.18 | 38.77 | 10.19 | 33.49 | 14.00 | - | 21.74 | 13.04 |
| Quebrada La Floresta 3 | 12.30 | 10.72 | 28.45 | 32.07 | 10.46 | 26.88 | 12.25 | - | 19.02 | 11.41 |
| Quebrada La Floresta 4 | 20.58 | 16.03 | 23.85 | 28.57 | 17.45 | 34.38 | 20.50 | - | 23.05 | 13.83 |
| Quebrada Aguas calientes 1 | 5.56 | 8.39 | - | 23.37 | 4.48 | 9.98 | 5.54 | 21.84 | 11.31 | 6.79 |
| Quebrada Aguas calientes 2 | 3.34 | 5.11 | - | 13.85 | 2.36 | 5.95 | 3.32 | 18.40 | 7.48* | 4.49 |
| Quebrada Aguas calientes 3 | 12.49 | 9.88 | 28.89 | 38.27 | 7.43 | 32.58 | 12.45 | - | 20.28 | 12.17 |
| Quebrada Aguas calientes 4 | 39.12 | 23.47 | 38.06 | 86.41 | 24.85 | 105.06 | 38.97 | - | 50.85 | 30.51 |
| Quebrada Torca 1 | 19.37 | 26.25 | - | 37.15 | 20.06 | 23.76 | 19.30 | 27.62 | 24.79 | 14.87 |
| Quebrada Torca 2 | 5.80 | 8.97 | - | 10.65 | 5.90 | 6.39 | 5.78 | 13.38 | 8.12* | 4.87 |
| Quebrada Torca 3 | 1.79 | 3.07 | - | 2.62 | 1.59 | 1.64 | 1.79 | 6.57 | 2.72* | 1.63 |
| Quebrada Torca 4 | 5.39 | 5.94 | 21.20 | 14.54 | 3.38 | 9.97 | 5.37 | - | 9.40* | 5.64 |
| Quebrada Novita 1 | 8.79 | 11.95 | - | 20.56 | 6.92 | 12.29 | 8.76 | 22.64 | 13.13 | 7.88 |
| Quebrada Novita 2 | 12.70 | 10.83 | 22.59 | 23.25 | 10.33 | 23.19 | 12.66 | - | 16.51 | 9.90 |
| Quebrada Novita 3 | 13.16 | 11.54 | 28.20 | 31.22 | 11.93 | 27.06 | 13.11 | - | 19.46 | 11.68 |
| Quebrada Pilas 1 | 6.23 | 9.28 | - | 26.25 | 5.49 | 11.28 | 6.20 | 23.17 | 12.56 | 7.53 |
| Quebrada Pilas 2 | 9.59 | 8.31 | 32.58 | 40.29 | 7.07 | 27.74 | 9.55 | - | 19.30 | 11.58 |
| Quebrada Pilas 3 | 15.70 | 12.23 | 33.96 | 49.81 | 10.95 | 42.04 | 15.64 | - | 25.76 | 15.46 |
| Quebrada Pilas 4 | 25.19 | 17.92 | 31.81 | 50.95 | 20.24 | 56.02 | 25.09 | - | 32.46 | 19.48 |
| Quebrada San Juan 1 | 11.61 | 15.99 | - | 37.62 | 9.98 | 19.11 | 11.56 | 28.39 | 19.18 | 11.51 |
| Quebrada San Juan 2 | 4.29 | 7.04 | - | 14.09 | 4.17 | 6.27 | 4.28 | 14.54 | 7.81* | 4.69 |

| NOMBRE CUENCA | TIEMPO CONCENTRACIÓN (Minutos) | | | | | | | | | |
|-------------------------------|--------------------------------|-------|---------|--------|-----------------------------|---------|--------------|-----------|--------|-------|
| | Kirpich | Temez | Pilgrim | Clark | California Culvert Practice | Passini | Culvert USBR | Giandotti | TC | Tlag |
| Quebrada San Juan 3 | 4.82 | 4.87 | 15.82 | 10.69 | 3.89 | 8.65 | 4.80 | - | 7.65* | 4.59 |
| Quebrada San Juan 4 | 12.49 | 10.89 | 26.80 | 29.22 | 9.33 | 25.66 | 12.44 | - | 18.12 | 10.87 |
| Quebrada San Juan 5 | 14.82 | 11.37 | 35.93 | 55.78 | 9.42 | 44.36 | 14.77 | - | 26.63 | 15.98 |
| Quebrada Patiño 1 | 7.57 | 11.38 | - | 20.98 | 6.81 | 10.68 | 7.54 | 18.96 | 11.99 | 7.19 |
| Quebrada Patiño 2 | 4.36 | 6.41 | - | 9.97 | 3.56 | 5.73 | 4.35 | 15.23 | 7.09* | 4.25 |
| Quebrada Patiño 3 | 7.96 | 7.94 | 22.18 | 17.97 | 6.24 | 14.41 | 7.93 | - | 12.09 | 7.26 |
| Quebrada Patiño 4 | 18.57 | 14.87 | 31.60 | 42.37 | 18.75 | 40.13 | 18.50 | - | 26.40 | 15.84 |
| Quebrada Tibabita 1 | 7.33 | 10.47 | - | 21.49 | 6.36 | 11.19 | 7.30 | 21.65 | 12.26 | 7.35 |
| Quebrada Tibabita 2 | 5.97 | 9.13 | - | 20.05 | 5.67 | 9.30 | 5.94 | 18.90 | 10.71 | 6.43 |
| Quebrada Tibabita 3 | 15.46 | 12.13 | 32.15 | 45.28 | 9.90 | 39.33 | 15.40 | - | 24.24 | 14.54 |
| Quebrada Tibabita 4 | 25.61 | 18.33 | 42.00 | 77.41 | 19.77 | 70.97 | 25.51 | - | 39.94 | 23.97 |
| Canal Torca Occidental_Sub1 2 | 84.13 | 46.17 | 75.10 | 274.67 | 23.62 | 298.22 | 83.81 | - | 126.53 | 75.92 |
| Occidente 1_1 | 112.49 | 53.59 | 65.42 | 274.42 | 23.89 | | 112.06 | - | 106.98 | 64.19 |
| Occidente 1_2 | 55.45 | 37.39 | 53.41 | 119.32 | 53.81 | 130.99 | 55.24 | - | 72.23 | 43.34 |
| Occidente 2 | 68.46 | 42.46 | 64.59 | 180.96 | 32.54 | 194.41 | 68.20 | - | 93.09 | 55.85 |
| Occidente 3 | 52.21 | 35.41 | 57.58 | 133.11 | 52.98 | 135.22 | 52.01 | - | 74.08 | 44.45 |
| Occidente 3-1 | 11.16 | 8.51 | 23.45 | 29.54 | 7.40 | 27.78 | 11.12 | - | 16.99 | 10.20 |
| Humedal Guaymaral 3 | 8.50 | 7.72 | 21.96 | 20.48 | 8.63 | 17.31 | 8.46 | - | 13.29 | 7.97 |
| Humedal Guaymaral 2 | 21.84 | 16.33 | 31.93 | 47.69 | 19.95 | 48.72 | 21.76 | - | 29.75 | 17.85 |
| Humedal Guaymaral 1_1 | 87.10 | 32.46 | 59.91 | 357.13 | 22.11 | 494.52 | 86.76 | - | 162.86 | 97.71 |
| Humedal Guaymaral 1_2 | 29.29 | 19.90 | 33.67 | 59.46 | 24.72 | 67.72 | 29.18 | - | 37.71 | 22.62 |
| Canal Guaymaral Occidente 2 | 42.39 | 27.61 | 47.00 | 104.71 | 33.29 | 112.47 | 42.23 | - | 58.53 | 35.12 |
| Canal Guaymaral Occidente 3 | 33.16 | 24.43 | 35.55 | 56.62 | 32.94 | 64.51 | 33.03 | - | 40.03 | 24.02 |
| Canal Torca Oriental 2 | 65.12 | 28.06 | 26.85 | 83.46 | 22.95 | 170.40 | 64.87 | - | 65.96 | 39.58 |
| Canal Torca Oriental_sub1 | 38.50 | 39.35 | 76.92 | - | - | 74.52 | 38.36 | 74.30 | 56.99 | 34.19 |
| Canal Torca Oriental_sub2 | 30.36 | 32.48 | 75.50 | - | - | 61.64 | 30.25 | 66.93 | 49.53 | 29.72 |
| Canal Torca Oriental_sub3 | 30.92 | 33.59 | 71.12 | - | - | 57.37 | 30.80 | 61.03 | 47.47 | 28.48 |
| Canal Torca Oriental_sub4 | 39.55 | 35.11 | 72.22 | - | - | 91.55 | 39.40 | - | 55.56 | 33.34 |

| NOMBRE CUENCA | TIEMPO CONCENTRACIÓN (Minutos) | | | | | | | | | |
|----------------------------|--------------------------------|-------|---------|--------|-----------------------------|---------|--------------|-----------|-------|-------|
| | Kirpich | Temez | Pilgrim | Clark | California Culvert Practice | Passini | Culvert USBR | Giandotti | TC | Tlag |
| Canal Torca Oriental_sub5 | 32.80 | 29.61 | 47.49 | 64.18 | - | 57.53 | 32.68 | - | 44.05 | 26.43 |
| Canal Torca Oriental_sub6 | 37.16 | 34.27 | 47.84 | 62.38 | - | 58.44 | 37.01 | - | 46.18 | 27.71 |
| Canal Torca Oriental_sub7 | 42.94 | 27.68 | 31.22 | 56.64 | 39.36 | 80.78 | 42.78 | - | 45.91 | 27.55 |
| Canal Torca Oriental_sub8 | 24.34 | 15.57 | 26.87 | 46.59 | 14.96 | 57.75 | 24.25 | - | 30.05 | 18.03 |
| Canal Torca Oriental_sub9 | 20.57 | 16.22 | 40.55 | 63.50 | 21.22 | 53.26 | 20.49 | - | 33.69 | 20.21 |
| Canal Torca Oriental_sub10 | 36.68 | 21.22 | 41.24 | 103.81 | 21.31 | 117.16 | 36.54 | - | 53.99 | 32.40 |
| Canal Torca Oriental_sub11 | 37.97 | 24.35 | 44.83 | 100.19 | 31.44 | 106.30 | 37.82 | - | 54.70 | 32.82 |

* Estos tiempos de concentración inferiores a lo mínimo recomendado en la Norma NS-085 se ajustaron en el modelo hidrológico a 10 minutos, por lo tanto para tlag se asignó un valor de 6 minutos.

Fuente: WSP 2019.

5.8.1.4 Hidrograma Unitario SCS

Este método de cálculo de la escorrentía máxima utiliza como información básica, el área de drenaje, la longitud del cauce principal, la pendiente del cauce, la precipitación bruta caída en la cuenca en estudio, su duración y el valor característico del suelo CN, de acuerdo con la clasificación definida por el U.S. S.C.S.

En esencia se pretende determinar un caudal pico específico o por unidad de lluvia neta (qp) en m³/s-cm de lluvia neta. Para este fin, se utilizó la metodología del Hidrograma Unitario, el cual, a través de un proceso lineal como lo es la convolución³, se hace la transformación de lluvia efectiva a escorrentía directa por el cauce. Uno de los métodos más utilizados para cuencas con tamaños similares a la de las cuencas de la zona del proyecto, es el Hidrograma Unitario Curvilíneo, desarrollado por el U.S. Soil Conservation Service.

Para determinar el tiempo de concentración se revisaron diferentes fórmulas empíricas, las cuales fueron evaluadas de acuerdo con su desarrollo y aplicación en diferentes tipos de cuencas. El Tiempo al pico, se mide desde el comienzo del hidrograma unitario en horas y está dado por la siguiente expresión:

$$T_p = \frac{t_r}{2} + t_l^4$$

Donde t_r es la duración de precipitación efectiva en horas y t_l es el tiempo de retardo que se puede expresar aproximadamente igual a 0.6T_c.

³ Corresponde a un operador matemático que transforma dos funciones en una tercera función que representa la magnitud en la que se superponen

⁴ Ibid

Ahora:

El caudal unitario máximo está dado por la expresión:

$$Q_p = 0.2083 A \frac{E}{T_p}^5$$

Dónde:

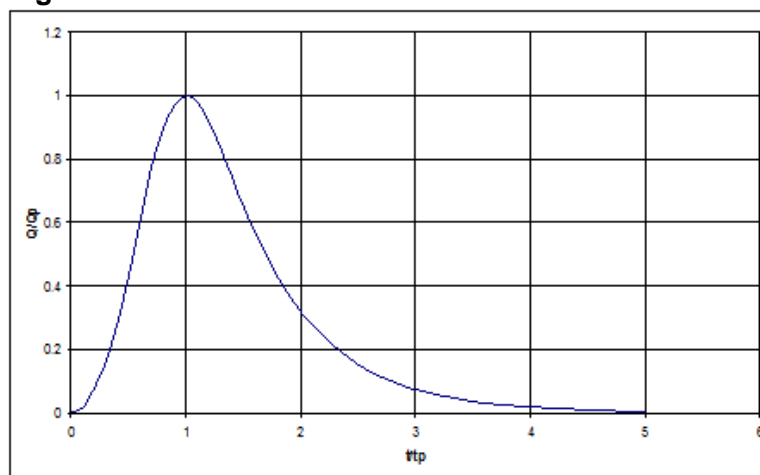
A: Área de la cuenca en Km²

E: Escorrimento efectivo en mm

T_p: Tiempo al pico en horas

Para convertir el hidrograma unitario triangular en curvilíneo se utilizó el hidrograma unitario adimensional desarrollado por el U. S. Soil Conservation Service (Figura 107). Para la determinación del hietograma sintético de la lluvia de diseño o sea la distribución de la profundidad de la lluvia en el tiempo, se obtuvieron las profundidades totales para diferentes períodos de retorno para cada cuenca aferente a los sitios de interés a partir de la regionalización de la precipitación máxima.

Figura 107 Hidrograma Unitario Adimensional del U.S.S.C.S.



Fuente: Ven te Chow, 1994

La precipitación efectiva (P_e), fue estimada utilizando el método del Soil Conservation Service de los EEUU, el cual se puede expresar de la siguiente manera:

$$P_e = \frac{\left(P - \frac{5080}{CN} + 50.8 \right)^2}{P + \frac{20320}{CN} - 203.2}$$

⁵ Fuente especificada no válida.

Dónde:

Pe: precipitación efectiva en mm.

P: precipitación de tormenta de diseño en mm.

CN: número de curva.

- **Método del Número de curva**

Para la determinación del número de curva (CN) fue necesario identificar los suelos hidrológicos y los usos del suelo para cada una de las cuencas delimitadas. A continuación, se describen los criterios de identificación de los factores mencionados anteriormente:

Suelos hidrológicos

El manual de drenaje para carreteras desarrollado por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) describe los suelos hidrológicos en las siguientes cuatro categorías de acuerdo con su potencial de escurrimiento:

- a. (Bajo potencial de escorrentía). Suelos que tienen alta tasa de infiltración incluso cuando estén muy húmedos. Consisten en arenas o gravas profundas, bien a excesivamente drenadas. Estos suelos tienen una alta tasa de transmisión de agua.
- b. (Moderadamente bajo potencial de escorrentía). Suelos con tasa de infiltración moderada cuando están muy húmedos. Suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados, suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas, y permeabilidad moderadamente lenta a moderadamente rápida. Son suelos con tasas de transmisión de agua moderadas.
- c. (Moderadamente alto potencial de escorrentía). Suelos con infiltración lenta cuando están muy húmedos. Consisten en suelos con un estrato que impide el movimiento del agua hacia abajo; suelos de texturas moderadamente finas a finas; suelos con infiltración lenta debido a sales o álcalis o suelos con niveles freáticos moderados. Esos suelos pueden ser pobremente drenados o bien a moderadamente bien drenados, con estratos de permeabilidad lenta a muy lenta a poca profundidad (50-100 cm).
- d. (Alto potencial de escorrentía). Suelos con infiltración muy lenta cuando están muy húmedos. Consisten en suelos arcillosos con alto potencial de expansión; suelos con nivel freático alto permanente; suelos con estrato arcilloso superficial; suelos con infiltración muy lenta debido a sales o álcalis y suelos poco profundos sobre material casi impermeable. Estos suelos tienen una tasa de transmisión de agua muy lenta.

Para determinar el tipo de suelo hidrológico, se realizó el análisis de las texturas de las unidades cartográficas de suelo definidas en la actualización del POMCA del río Bogotá (Huitaca, 2018), con base en el estudio detallado realizado en dicho informe, en la Figura 108 se presenta el resumen de las características principales de cada una de las unidades de suelo presentes en las unidades hidrográficas definidas (ver Figura 109), y su correspondiente clasificación de suelo hidrológico (ver , En el Anexo 3 – Anexo Cartográfico 3.3 PDF 3. Unidades de suelo, se presenta el mapa de detalle de las unidades de suelo.

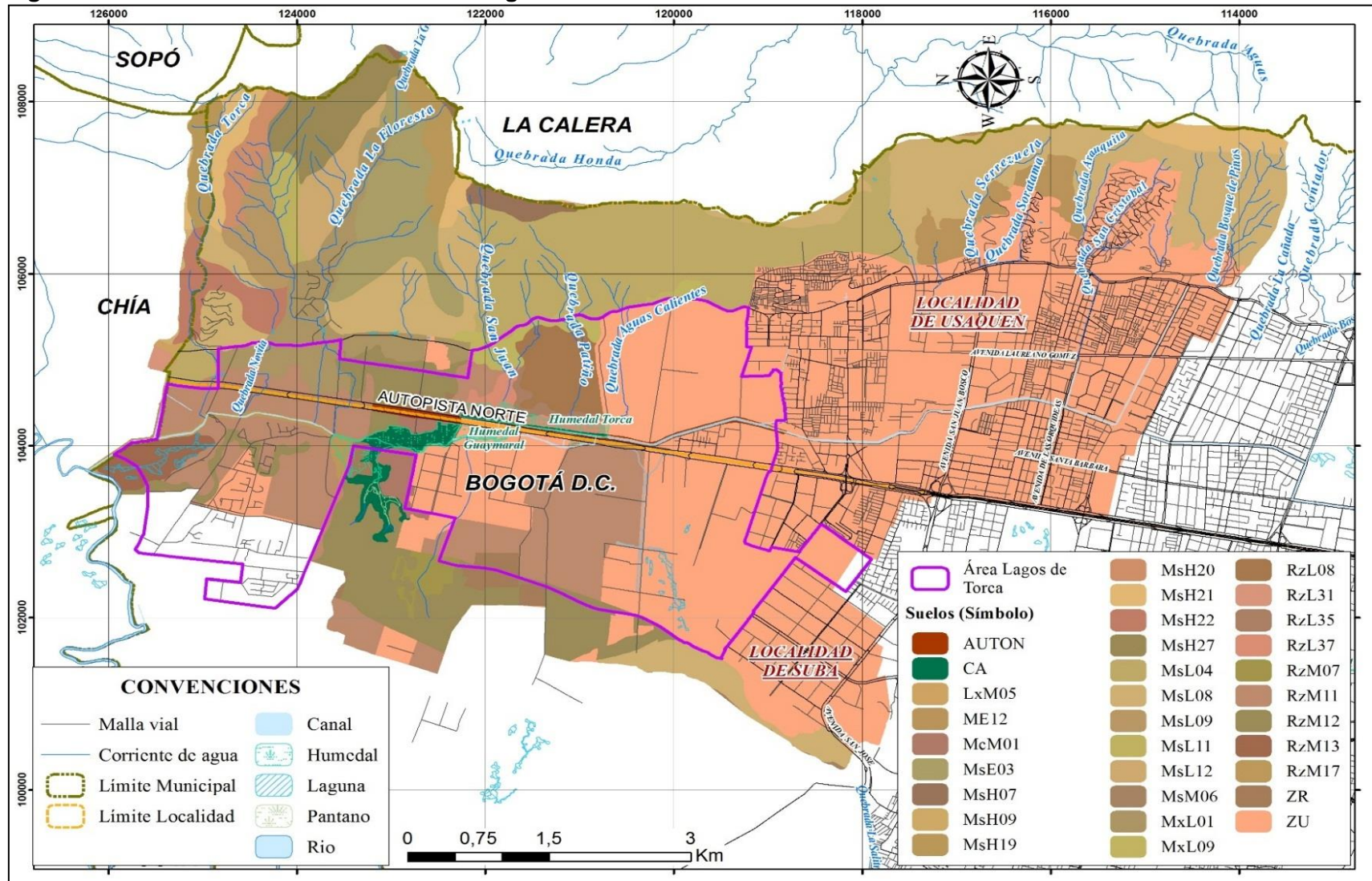
De acuerdo con este análisis, se determinó el suelo hidrológico para cada una de las cuencas, en el Anexo 2 – Análisis de Caudales – 2.2 Clasificación de Suelos, se presenta el reporte detallado de las unidades de suelo por cada una de las cuencas que conforman el sistema, así como el reporte por cuenca de tipo de suelo hidrológico.

Uso del Suelo

El uso del suelo se correlaciona principalmente a las coberturas de la tierra existentes en la cuenca hidrográfica de análisis, por tal razón para la identificación del uso del suelo en las cuencas aferentes se utilizó la cobertura de la tierra a escala 1:25.000 producto del POMCA del río Bogotá (Huitaca, 2018), el cual fue elaborado siguiendo la metodología Corine Land Cover del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, el cual se presenta en la Figura 110. En el Anexo 3 Cartográfico, 3.4 Pomca Río Bogotá, se incluyen en formato pdf de los planos empleados en este análisis. Este procedimiento incluye la fotointerpretación de la imagen digital llevada a cabo para el presente estudio y que se incorpora en el Anexo 3.5 Cartográfico; 3.5 Ortofoto Digital.

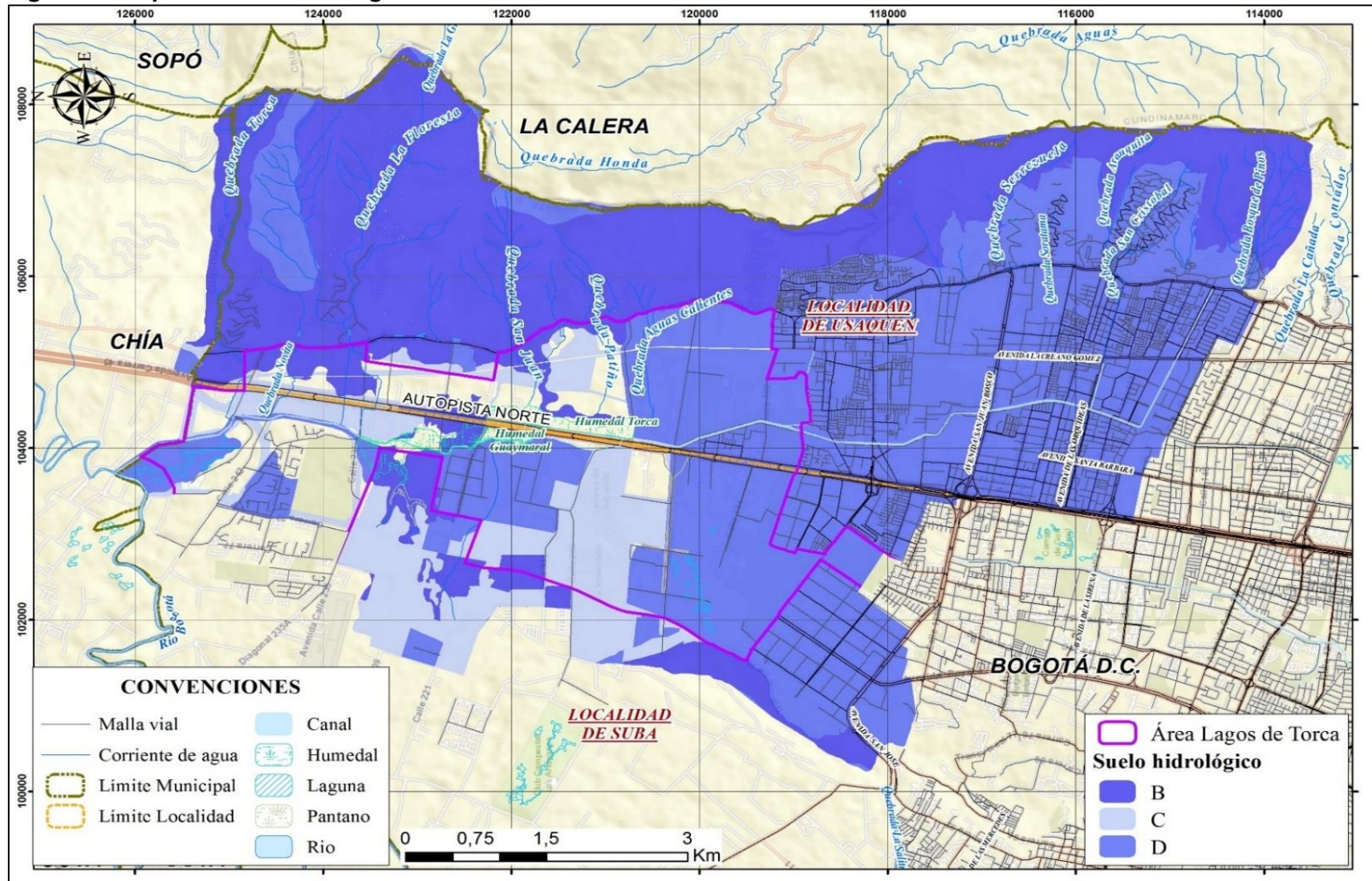
Así mismo, para la condición futura se tuvo en cuenta el Mapa de Usos proyectado para la Zona del Borde Norte, dentro del Decreto 088 de 2017 (Plano 12/21), que se muestra en la Figura 111, esto debido a que, hasta el momento del desarrollo de esta consultoría, la mayoría de los Planes Parciales aún no han definido la distribución del urbanismo interno de cada uno.

Figura 108 Unidades de suelo cuencas hidrográficas



Fuente: WSP, 2019.

Figura 109 Tipo de suelo hidrológico



Fuente: WSP, 2019.

Tabla 20 Unidades de suelo y tipo de suelo hidrológico

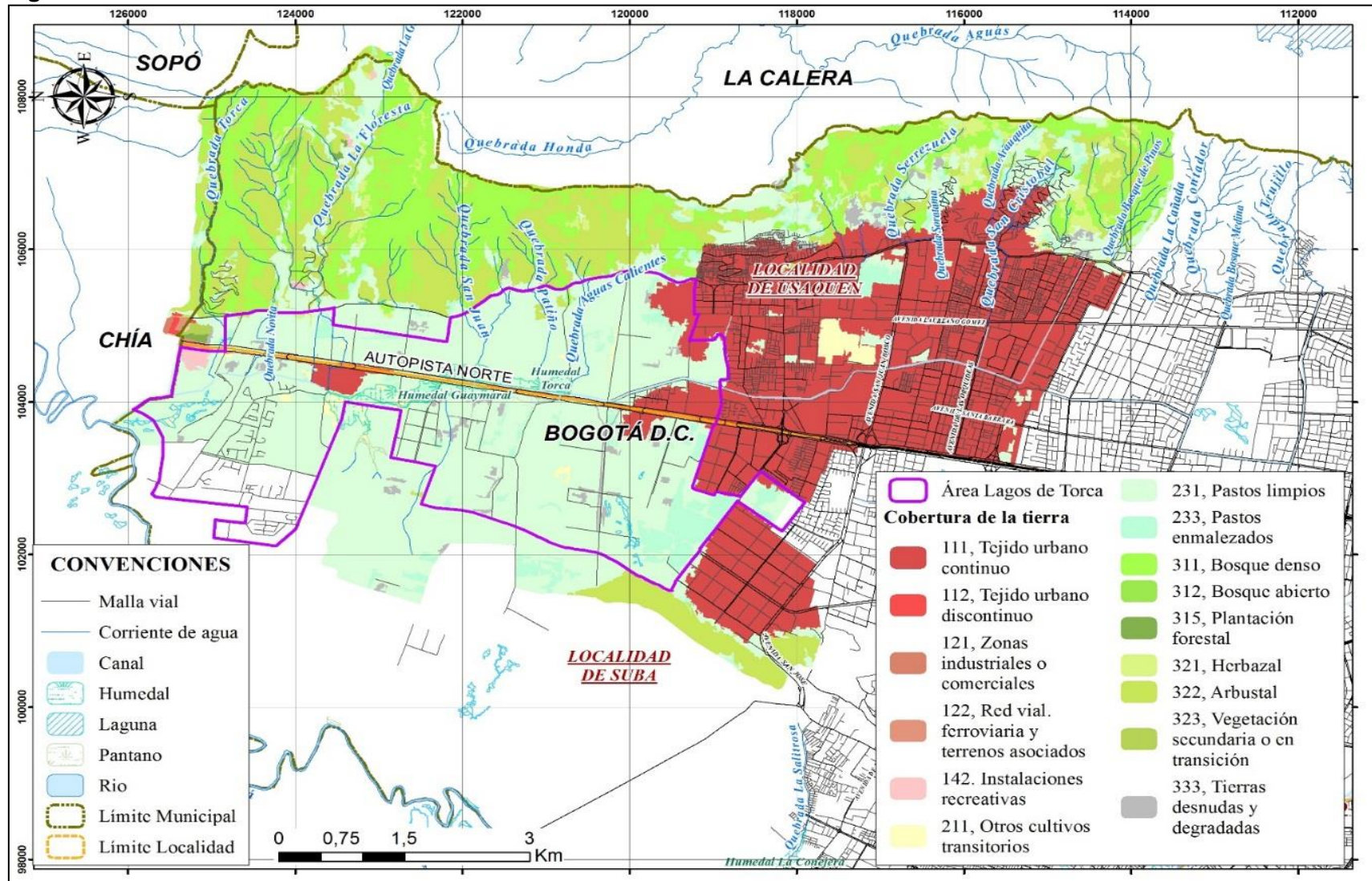
| PAISAJE Y AMBIENTE MORFOGENÉTICO | TIPO DE RELIEVE | MATERIAL PARENTAL | FORMA DEL TERRENO | CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS | UNIDAD DE SUELO | CLASE HIDROLÓGICA |
|------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------|
| Lomerío - Depositacional Coluvio Aluvial | Glacis de acumulación | Depósitos coluvio-aluviales mixtos con predominio de finos | Parte media | Suelos superficiales, limitado por arcillas endurecidas, texturas finas, bien drenados | LxM05 | C |
| Montaña - Depositacional Coluvial | | Depósitos heterométricos de origen coluvial | Plano inclinado | Suelos superficiales, bien drenados, de texturas medias | McM01 | B |
| Montaña - Estructural Erosional | Espinazos | Rocas sedimentarias tipo areniscas y arcillolitas | Escarpe | Misceláneo erosionado con inclusiones de afloramiento Rocoso | ME12 | D |
| | Cresones | Rocas sedimentarias tipo areniscas y conglomerados y cenizas volcánicas | Frente y Revés | Suelos superficiales, bien drenados, textura arenosa franca | MsE03 | B |
| | Espinazos | Rocas sedimentarias tipo areniscas y conglomerados | Revés | Afloramiento Rocoso | MsH07 | D |
| | | | Escarpe | Afloramiento Rocoso | MsH09 | D |
| | Crestones | Cenizas volcánicas sobre rocas sedimentarias tipo areniscas y conglomerados | Frente | Suelos superficiales, bien drenados, de texturas medias | MsH19 | B |
| | | | Escarpe | Suelos superficiales, bien drenados, de texturas medias | MsH20 | D |
| | | Cenizas volcánicas sobre rocas sedimentarias químicas carbonatadas | Revés | Son suelos moderadamente profundos, bien drenados, texturas medias | MsH21 | B |
| | | | Frente | Suelos superficiales, bien drenados, de texturas medias | MsH22 | B |
| | Cuestas | Cenizas volcánicas sobre rocas sedimentarias tipo areniscas y conglomerados | Frente y Revés | Suelos superficiales y profundos, bien drenados, de texturas moderadamente gruesas | MsH27 | B |
| | Espinazos | Cenizas volcánicas con sustrato de rocas sedimentarias no diferenciadas | Revés | Suelos profundos, bien drenados, texturas medias | MsL04 | B |
| Crestones | Cenizas volcánicas con sustrato de rocas | Revés | Suelos profundos, bien drenados, de texturas medias | MsL08 | B | |

| PAISAJE Y AMBIENTE MORFOGENÉTICO | TIPO DE RELIEVE | MATERIAL PARENTAL | FORMA DEL TERRENO | CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS | UNIDAD DE SUELO | CLASE HIDROLÓGICA |
|----------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------|
| | | sedimentarias no diferenciadas | | | | |
| | | Rocas sedimentarias no diferenciadas | Escarpe | Afloramiento Rocoso | MsL09 | D |
| | Cuestas | Cenizas volcánicas sobre rocas sedimentarias tipo arcillolitas y areniscas | Revés | Suelos profundos, bien drenados, de texturas moderadamente gruesas | MsL11 | B |
| | | | Frente | Suelos profundos, bien drenados, de texturas medias | MsL12 | B |
| | Crestones | Rocas sedimentarias no diferenciadas | Frente | Suelos superficiales y profundos, excesivamente drenados, de texturas finas | MsM06 | D |
| Montaña - Depositacional Coluvio Aluvial | Glacis de acumulación | Cenizas volcánicas con influencia de material coluvio aluviales | Plano inclinado | Suelos profundos, bien drenados, moderadamente finos | MxL01 | B |
| | | Cenizas volcánicas sobre depósitos heterométricos de origen coluvio - aluvial | Cuerpo | Suelos profundos a superficiales, bien drenados, de texturas medias | MxL09 | B |
| Planicie - Depositacional Fluvio Lacustre | Terraza Nivel 2 | Aluviones medios y cenizas volcánicas | Plano | Suelos profundos de texturas medias y moderadamente finas | RzL08 | C |
| | Terraza Nivel 1 | Sedimentos muy finos | Depresión | Suelos superficiales, pobremente drenados, texturas muy finas | RzL31 | D |
| | | Sedimentos gruesos y medios sobre gruesos | Talud | Suelos profundos de texturas moderadamente gruesas, bien drenados | RzL35 | B |
| | Plano de Inundación | Sedimentos finos | Cubeta de Desborde | Suelos muy superficiales, muy pobremente drenados, texturas finas | RzL37 | C |
| Planicie - Depositacional Depositacional Fluvio Lacustre | Terraza Nivel 2 | Depósitos de cenizas volcánicas sobre arcillas fluvio lacustres | Plano | Suelos moderadamente profundos, texturas medias, bien drenados | RzM07 | B |
| | Terraza Nivel 1 | Sedimentos medios y finos con capas discontinuas de cenizas volcánicas | Plano y Talud | Suelos profundos, bien drenados, texturas contrastadas | RzM11 | C |
| | | Sedimentos medios con sustrato fino | Plano y Talud | Suelos moderadamente profundos, moderadamente bien | RzM12 | C |

| PAISAJE Y AMBIENTE MORFOGENÉTICO | TIPO DE RELIEVE | MATERIAL PARENTAL | FORMA DEL TERRENO | CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS | UNIDAD DE SUELO | CLASE HIDROLÓGICA |
|----------------------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------|
| | | | | drenados, texturas contrastadas | | |
| | Plano de Inundación | Sedimentos muy finos | Cubeta de Desborde | Suelos superficiales, de texturas finas y muy finas, pobremente drenados | RzM13 | D |
| | | | Cubeta de Decantación | Suelos muy superficiales y superficiales, pobremente drenados, texturas muy finas y medias, Inundables | RzM17 | D |
| Autonorte | | | | | AUTON | D |
| Cuerpo de agua | | | | | CA | |
| Zonas de relleno | | | | | ZR | B |
| Zonas urbanas | | | | | ZU | D |

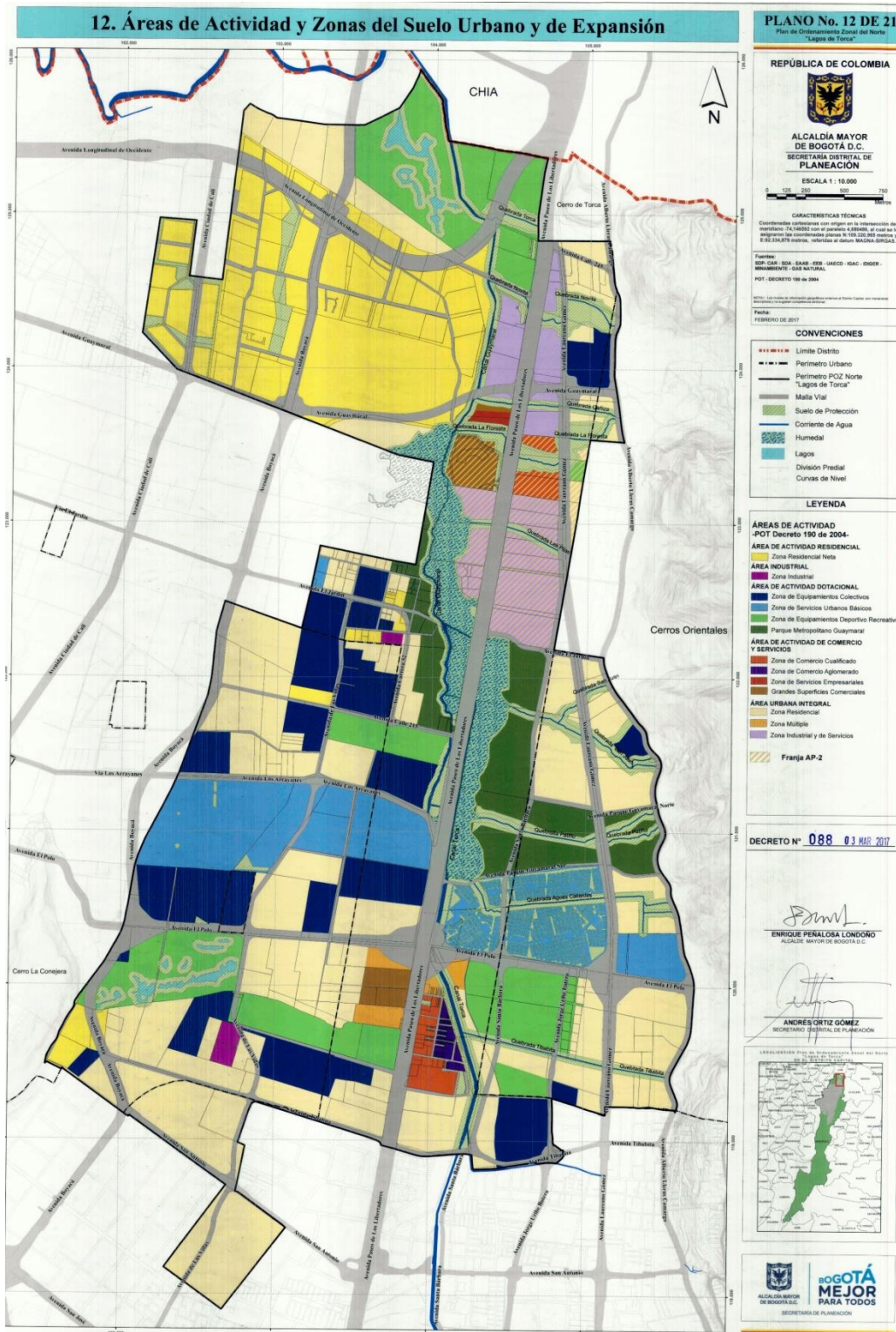
Fuente: WSP, 2019, con base en POMCA río Bogotá, 2018.

Figura 110 Coberturas del suelo condiciones actuales



Fuente: WSP 2019 a partir de información POMCA Río Bogotá 2018.

Figura 111 Mapa de coberturas y usos proyectados para el Borde Norte, Decreto 088 de 2017.



Fuente: SPD, Decreto 088 de 2017.

Determinación número de curva

Identificados los suelos hidrológicos y las coberturas de la tierra con su condición hidrológica respectiva y la humedad antecedente, para cada una de las cuencas a modelar hidrológicamente se procedió a determinar el número de curva a partir de la Tabla 27, Tabla 28, Tabla 29 .

Humedad Antecedente

Para analizar la humedad antecedente del suelo se realizó el análisis de la precipitación 5 días previos a los eventos de tormentas más representativos de las estaciones del área de estudio, a continuación se presenta la cuantificación con de la condición de humedad antecedente de acuerdo al criterio establecido en la literatura (Chow & Maidment, Hidrología Aplicada, 1994) (ver Tabla 21).

Tabla 21 Clasificación de clases antecedentes de humedad (AMC) para el método de las 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: (Chow & Maidment, Hidrología Aplicada, 1994)

Para los eventos de precipitación seleccionados en el análisis de distribución espacio-temporal llevado a cabo previamente, se verificaron los eventos de lluvia previos, de donde se determinó la altura de precipitación para los cinco días anteriores, para luego clasificarse dentro de Grupos AMC definidos en la Tabla 21.

Para este análisis se tomaron un total de 75 eventos en las cinco estaciones de registro empleadas, como se ilustra en la Tabla 22 a la Tabla 26.

Tabla 22 Humedad Antecedente estación La Caro

| Fecha | 03/03/2014 | 18/07/2008 | 07/11/2006 | 23/10/2005 | 01/11/2008 |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| P Total | 52.10 | 72.8 | 60.80 | 55.6 | 52.6 |
| Día | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) |
| 1 | 2.5 | 6.8 | 0 | 0 | 1 |
| 2 | 0 | 5.3 | 0.5 | 0 | 1.3 |
| 3 | 12.4 | 0.1 | 0.5 | 0.2 | 0.1 |
| 4 | 6.3 | 0.6 | 0 | 0.2 | 0 |
| 5 | 5.7 | 12.9 | 0 | 8.9 | 0 |
| Total | 26.9 | 25.7 | 1 | 9.3 | 2.4 |
| Estación Inactiva | CII | CII | CI | CI | CI |
| Estación Activa | CI | CI | CI | CI | CI |
| Fecha | 22/09/2000 | 8/11/1994 | 18/03/1999 | 20/01/2008 | 5/10/2008 |
| P Total | 51.3 | 48.8 | 48.2 | 47.7 | 47.1 |

| Fecha | 03/03/2014 | 18/07/2008 | 07/11/2006 | 23/10/2005 | 01/11/2008 |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Día | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) |
| 1 | 0 | 16 | 1.1 | 0 | 3.6 |
| 2 | 1.5 | 0 | 0.1 | 0.5 | 0.1 |
| 3 | 0.1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0.2 | 1.5 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0.4 | 0 | 22.8 | 0 | 17.9 |
| Total | 2.2 | 17.5 | 24 | 0.5 | 21.6 |
| Estación Inactiva | CI | CII | CII | CI | CII |
| Estación Activa | CI | CI | CI | CI | CI |
| Fecha | 26/05/1997 | 22/04/1990 | 24/05/2008 | 18/08/2017 | 7/09/2004 |
| P Total | 46.3 | 46 | 42.1 | 41.9 | 41.7 |
| Día | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) |
| 1 | 0.3 | 11.9 | 0.1 | 0.2 | 0.1 |
| 2 | 2 | 0.1 | 12.6 | 0 | 0 |
| 3 | 0.1 | 0 | 5.3 | 0.8 | 6.7 |
| 4 | 0 | 0 | 4.9 | 5.5 | 0.8 |
| 5 | 0 | 10.5 | 32.2 | 0 | 0 |
| Total | 2.4 | 22.5 | 55.1 | 6.5 | 7.6 |
| Estación Inactiva | CII | CII | CII | CI | CI |
| Estación Activa | CI | CI | CI | CI | CI |

Fuente: WSP 2019, con base en Información EAAB 2019.

Tabla 23 Humedad Antecedente estación La Conejera

| Fecha | 19/10/2009 | 25/11/2006 | 17/10/1990 | 09/11/2010 | 09/10/2017 |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| P Total | 67.7 | 67.5 | 61.3 | 59.5 | 59 |
| Día | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) |
| 1 | 37.2 | 0 | 1.2 | 0 | 0 |
| 2 | 1.5 | 0 | 0.4 | 6.8 | 0 |
| 3 | 0 | 13.6 | 0 | 2.4 | 0.2 |
| 4 | 0 | 0 | 0.3 | 7.8 | 0.1 |
| 5 | 6.3 | 0.7 | 0 | 1.5 | 0 |
| Total | 45 | 14.3 | 1.9 | 18.5 | 0.3 |
| Estación Inactiva | CIII | CII | CI | CII | CI |
| Estación Activa | CII | CI | CI | CI | CI |
| Fecha | 15/10/1997 | 1/10/2013 | 27/03/2017 | 18/03/2012 | 1/02/1999 |
| P Total | 58.5 | 58.3 | 57.8 | 50.4 | 48.4 |
| Día | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) |
| 1 | 1.5 | 1.7 | 0.3 | 0 | 6.7 |
| 2 | 0 | 0 | 10.5 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 18.7 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0.3 | 4.5 | 5.1 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 19.8 | 8.6 | 0 |

| Fecha | 19/10/2009 | 25/11/2006 | 17/10/1990 | 09/11/2010 | 09/10/2017 |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Total | 1.5 | 2 | 53.8 | 13.7 | 6.7 |
| Estación Inactiva | CI | CI | CII | CII | CI |
| Estación Activa | CI | CI | CI | CI | CI |
| Fecha | 6/11/2013 | 30/04/2006 | 11/04/2012 | 8/04/2008 | 18/11/2016 |
| P Total | 47.7 | 46 | 45.8 | 45.4 | 45 |
| Día | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) |
| 1 | 0 | 0.3 | 20.4 | 0.1 | 0.8 |
| 2 | 0 | 15.3 | 9.5 | 0.6 | 10.7 |
| 3 | 0 | 3.6 | 0 | 0.1 | 0.2 |
| 4 | 11.1 | 0 | 1.5 | 0.7 | 7.8 |
| 5 | 1.6 | 2.5 | 18.4 | 12 | 0.6 |
| Total | 12.7 | 21.7 | 49.8 | 13.5 | 20.1 |
| Estación Inactiva | CII | CII | CII | CII | CII |
| Estación Activa | CI | CI | CI | CI | CI |

Fuente: WSP 2019, con base en Información EAAB 2019.

Tabla 24 Humedad Antecedente estación Serrezuela

| Fecha | 01/12/2003 | 06/11/2013 | 30/05/2016 | 10/12/2014 | 19/10/1990 |
|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| P Total | 91.2 | 77.7 | 74.3 | 66.2 | 66 |
| Día | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) |
| 1 | 0 | 0 | 10.2 | 1 | 0.2 |
| 2 | 0 | 0 | 1.2 | 0.9 | 0.3 |
| 3 | 0.1 | 2.4 | 1 | 6.9 | 1.9 |
| 4 | 0.2 | 10.9 | 9.6 | 0 | 16.1 |
| 5 | 4.9 | 7 | 0.6 | 3.1 | 0.2 |
| Total | 5.2 | 20.3 | 22.6 | 11.9 | 18.7 |
| Estación Inactiva | CI | CII | CII | CI | CII |
| Estación Activa | CI | CI | CI | CI | CI |
| Fecha | 11/01/1999 | 7/03/2017 | 14/10/2009 | 21/11/1998 | 19/10/2009 |
| P Total | 65 | 64.6 | 62.4 | 61.7 | 61.2 |
| Día | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) |
| 1 | 0.2 | 0 | 0 | 0.1 | 62.4 |
| 2 | 0 | 0 | 0.7 | 0.4 | 5.1 |
| 3 | 16.9 | 0 | 11.4 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 1.9 | 2 | 0 | 0 |
| 5 | 0.3 | 0.8 | 0.1 | 7.5 | 0 |
| Total | 17.4 | 2.7 | 14.2 | 8 | 67.5 |
| Estación Inactiva | CII | CI | CII | CI | CII |
| Estación Activa | CI | CI | CI | CI | CI |
| Fecha | 14/01/1997 | 12/10/2012 | 29/01/1994 | 26/03/2004 | 1/05/2011 |
| P Total | 58 | 57.9 | 56.5 | 56.3 | 56.3 |
| Día | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) |

| Fecha | 01/12/2003 | 06/11/2013 | 30/05/2016 | 10/12/2014 | 19/10/1990 |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 0.2 | 4.9 | 0.2 | 0 | 0 |
| 2 | 18.3 | 0.1 | 0.1 | 0 | 0 |
| 3 | 6 | 0 | 0.1 | 1.3 | 2.4 |
| 4 | 2.4 | 4.5 | 0.2 | 4.2 | 0 |
| 5 | 13.5 | 0.3 | 1.3 | 0.4 | 5.2 |
| Total | 40.4 | 9.8 | 1.9 | 5.9 | 7.6 |
| Estación Inactiva | CII | CI | CI | CI | CI |
| Estación Activa | CI | CI | CI | CI | CI |

Fuente: WSP 2019, con base en Información EAAB 2019.

Tabla 25 Humedad Antecedente estación Usaquén

| Fecha | 07/03/2017 | 09/11/2006 | 16/04/2014 | 10/12/2017 | 04/12/2011 |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| P Total | 73.2 | 68.8 | 66.5 | 66 | 62.7 |
| Día | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) |
| 1 | 0 | 8.5 | 0 | 0 | 9 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 9.4 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6.5 |
| 4 | 0.7 | 62.3 | 0.2 | 0 | 18.9 |
| 5 | 0 | 4.9 | 2.1 | 0.4 | 0.7 |
| Total | 0.7 | 75.7 | 2.3 | 0.4 | 44.5 |
| Estación Inactiva | CI | CIII | CI | CI | CIII |
| Estación Activa | CI | CIII | CI | CI | CII |
| Fecha | 17/11/1966 | 7/11/2006 | 14/09/1940 | 27/04/1979 | 6/11/2013 |
| P Total | 72 | 62.3 | 68.3 | 62 | 61.6 |
| Día | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) |
| 1 | 2 | 18.5 | 0 | 12.5 | 0 |
| 2 | 0 | 9.8 | 0 | 1.1 | 0 |
| 3 | 0 | 8.5 | 0 | 0.2 | 2.8 |
| 4 | 0 | 0 | 49.3 | 4.7 | 18 |
| 5 | 27.1 | 0 | 2.4 | 10.6 | 22.9 |
| Total | 29.1 | 36.8 | 51.7 | 29.1 | 43.7 |
| Estación Inactiva | CII | CII | CII | CII | CII |
| Estación Activa | CI | CI | CI | CI | CI |
| Fecha | 8/04/2002 | 1/11/2016 | 13/04/2006 | 20/11/2014 | 2/05/2010 |
| P Total | 61.5 | 60.1 | 59.6 | 58.3 | 58.2 |
| Día | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 3.5 | 4.2 |
| 2 | 0 | 11.3 | 4.1 | 0.5 | 0.6 |
| 3 | 0 | 0.7 | 16.8 | 0 | 0.1 |
| 4 | 8.6 | 0 | 12.7 | 1.9 | 5.4 |
| 5 | 0 | 0.2 | 11.4 | 2.2 | 0.3 |
| Total | 8.6 | 12.2 | 45 | 8.1 | 10.6 |

| Fecha | 07/03/2017 | 09/11/2006 | 16/04/2014 | 10/12/2017 | 04/12/2011 |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Estación Inactiva | CI | CI | CII | CI | CI |
| Estación Activa | CI | CI | CI | CI | CI |

Fuente: WSP 2019, con base en Información EAAB 2019.

Tabla 26. Humedad Antecedente estación Cerro Suba

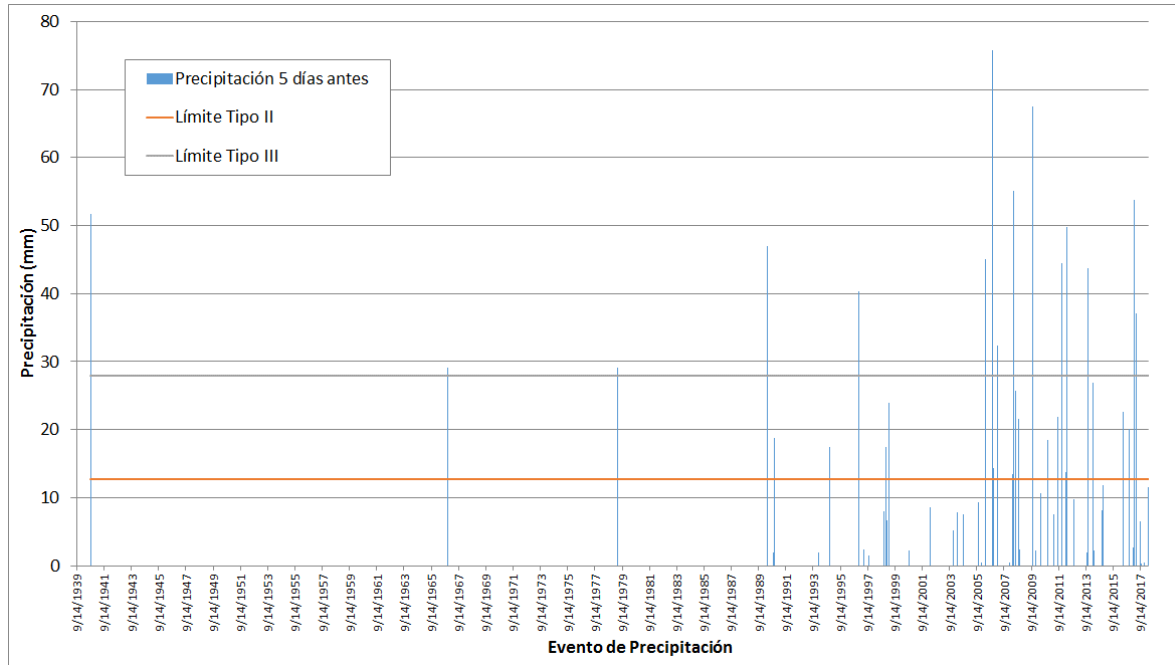
| Fecha | 26/03/2004 | 31/03/1990 | 4/05/1990 | 25/12/2009 | 14/10/2009 |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| P Total | 73.2 | 60.7 | 58 | 52.1 | 51.4 |
| Día | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) |
| 1 | 0 | 0 | 2.8 | 0 | 0 |
| 2 | 6.8 | 0 | 10 | 0 | 0.1 |
| 3 | 0.7 | 0 | 0 | 0 | 20.1 |
| 4 | 0.4 | 0 | 5.4 | 0 | 3.7 |
| 5 | 0 | 0 | 28.7 | 2.3 | 0.6 |
| Total | 7.9 | 0 | 46.9 | 2.3 | 24.5 |
| Estación Inactiva | CI | CI | CII | CI | CII |
| Estación Activa | CI | CI | CI | CI | CI |
| Fecha | 23/08/2011 | 2/04/2018 | 7/05/2017 | 23/03/2007 | 3/01/2006 |
| P Total | 51 | 49.5 | 47.3 | 44.9 | 44.3 |
| Día | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) | P (mm) |
| 1 | 0.2 | 0.9 | 6.3 | 0 | 0.5 |
| 2 | 11.9 | 0.1 | 6 | 0 | 0 |
| 3 | 2 | 5.2 | 16.7 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 5.4 | 4 | 25.9 | 0 |
| 5 | 7.8 | 0 | 4.1 | 6.4 | 0 |
| Total | 21.9 | 11.6 | 37.1 | 32.3 | 0.5 |
| Estación Inactiva | CII | CI | CII | CII | CI |
| Estación Activa | CI | CI | CI | CI | CI |
| Fecha | 24/02/1993 | 3/05/2016 | 20/05/2006 | 30/03/1994 | 8/03/2006 |
| P Total | 44.1 | 44 | 43.9 | 43 | 42.1 |
| Día | P (mm) | P (mmba) | P (mm) | P (mm) | P (mm) |
| 1 | 0 | 1.8 | 0 | 0 | 0.3 |
| 2 | 0 | 0 | 5.2 | 0 | 2 |
| 3 | 0 | 0 | 6.5 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0.1 | 31 | 9.8 |
| 5 | 0 | 0 | 5.8 | 0 | 6.5 |
| Total | 0 | 1.8 | 17.6 | 31 | 18.6 |
| Estación Inactiva | CI | CI | CII | CII | CII |
| Estación Activa | CI | CI | CI | CI | CI |

Fuente: WSP 2019, con base en Información EAAB 2019.

En la Figura 112 se presenta la distribución de la altura de precipitación durante los 5 días previos a los eventos máximos y la comparación con los límites de precipitación para las

condiciones de humedad antecedente. De esta se observa que el 47.1% de los eventos corresponden a una AMC tipo I, el 28.6% a una AMC tipo II y el 24.3% a una AMC tipo III.

Figura 112 Distribución de valores de precipitación antecedente para eventos seleccionados



Fuente: WSP, 2019

Teniendo en cuenta este análisis, se aprecia que la condición de humedad antecedente predominante es la AMC=I, sin embargo, considerando que en algunos casos se presenta una condición de humedad antecedente de III y II, para el desarrollo del estudio hidrológico se selecciona la condición AMC=II, con el fin de no subestimar ni sobreestimar los valores del número de curva.

Tabla 27 Numero de Curva (CN) condición antecedente AMC=II, Áreas Naturales

| DESCRIPCIÓN Y TIPO DE COBERTURA | CONDICIÓN HIDROLÓGICA | NÚMERO DE CURVA PARA GRUPOS DE SUELOS HIDROLÓGICOS | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------|----|----|----|
| | | A | B | C | D |
| Pastos, forraje para pastoreo ¹ | Mala | 68 | 79 | 86 | 89 |
| | Regular | 49 | 69 | 79 | 84 |
| | Buena | 39 | 61 | 74 | 80 |
| Prados continuos, protegidos de pastoreo, y generalmente segados para heno | --- | 30 | 58 | 71 | 78 |
| Maleza mezclada con pasto de semilla con la maleza como principal elemento ² | Mala | 48 | 67 | 77 | 83 |
| | Regular | 35 | 56 | 70 | 77 |
| | Buena | 30 ³ | 48 | 65 | 73 |
| Combinación de bosques y pastos (huertas o granjas con árboles) ⁴ | Mala | 57 | 73 | 82 | 86 |
| | Regular | 43 | 65 | 76 | 82 |
| | Buena | 32 | 58 | 72 | 79 |
| Bosques ⁵ | Mala | 45 | 66 | 77 | 83 |
| | Regular | 36 | 60 | 73 | 79 |
| | Buena | 30 | 55 | 70 | 77 |
| Predios de granjas, construcciones, veredas, caminos y lotes circundantes | --- | 59 | 74 | 82 | 86 |

Fuente: (INVIAS, 2011)

Tabla 28 Numero de Curva (CN) condición antecedente AMC=II, Áreas Urbanas

| TIPO DE COBERTURA Y CONDICIÓN HIDROLÓGICA | % PROMEDIO ÁREAS IMPERMEABLES ¹ | NUMERO DE CURVAS PARA GRUPOS DE SUELOS HIDROLÓGICOS | | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----|----|----|
| | | A | B | C | D |
| Áreas urbanas totalmente desarrolladas (vegetación ya establecida): | | | | | |
| Espacios abiertos (prados, parques, campos de golf, cementerios, etc.) ² | | | | | |
| Condición pobre (menos del 50% cubierto de pasto) | | 68 | 79 | 86 | 89 |
| Condición regular (del 50% al 75% cubierto de pasto) | | 49 | 69 | 79 | 84 |
| Condición buena (más del 75% cubierto de pasto) | | 39 | 61 | 74 | 80 |
| Áreas Impermeables: | | | | | |
| Parqueaderos pavimentados, techos, autopistas, etc. (excluyendo derecho de vía) | | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Calles y caminos: | | | | | |
| Pavimentados | | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Pavimentados; zanjas abiertas (incluyendo derecho de vía) | | 83 | 89 | 92 | 93 |
| Grava (incluyendo derecho de vía) | | 76 | 85 | 89 | 91 |
| Tierra (incluyendo derecho de vía) | | 72 | 82 | 87 | 89 |
| Áreas desiertas urbanas: | | | | | |
| Paisajes desérticos naturales (solamente áreas permeables) ³ | | 63 | 77 | 85 | 88 |
| Paisajes desérticos artificiales (barreras impermeables de maleza, arbustos de desierto con 1 a 2 pulg de diámetro; Cubierta de arena o grava y orillas de áreas húmedas) | | 96 | 96 | 96 | 96 |
| Áreas urbanas: | | | | | |
| Comercial y de negocios | 85 | 89 | 92 | 94 | 95 |
| Industrial | 72 | 81 | 88 | 91 | 93 |
| Áreas residenciales por promedio del tamaño del lote: | | | | | |
| 1/8 de acre o menos (506 m ² o menos) | 65 | 77 | 85 | 90 | 92 |
| 1/4 acre (1012 m ²) | 38 | 61 | 75 | 83 | 87 |
| 1/3 acre (1350 m ²) | 30 | 57 | 72 | 81 | 86 |
| 1/2 acre (2025 m ²) | 25 | 54 | 70 | 80 | 85 |
| 1 acre (4050 m ²) | 20 | 51 | 68 | 79 | 84 |
| 2 acre (8100 m ²) | 12 | 46 | 65 | 77 | 82 |
| Áreas urbanas desarrolladas: | | | | | |
| Áreas permeables conformadas (solamente áreas permeables, sin vegetación) | | 77 | 86 | 91 | 94 |

Fuente: (INVIAS, 2011)

Tabla 29 Numero de Curva (CN) condición antecedente AMC=II, Áreas Cultivadas

| COBERTURA | | CONDICIÓN HIDROLÓGICA | GRUPO DE SUELOS | | | |
|---------------------------------------------------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------|----|----|----|
| USO DE LA TIERRA | TRATAMIENTO O PRÁCTICA | | A | B | C | D |
| | | | NÚMERO DE CURVA | | | |
| Rastrojo | Hileras Rectas | --- | 77 | 86 | 91 | 94 |
| Cultivos en hileras | Hileras Rectas | Mala | 72 | 81 | 88 | 91 |
| | | Buena | 67 | 78 | 85 | 89 |
| | Curvas de nivel | Mala | 70 | 79 | 84 | 88 |
| | | Buena | 65 | 75 | 82 | 86 |
| | Curvas de nivel y terrazas | Mala | 66 | 74 | 80 | 82 |
| | | Buena | 62 | 71 | 78 | 81 |
| Cultivos en hileras estrechas | Hileras rectas | Mala | 65 | 76 | 84 | 88 |
| | | Buena | 63 | 75 | 83 | 87 |
| | Curvas de nivel | Mala | 63 | 74 | 82 | 85 |
| | | Buena | 61 | 73 | 81 | 84 |
| | Curvas de nivel y terrazas | Mala | 61 | 72 | 79 | 82 |
| | | Buena | 59 | 70 | 78 | 81 |
| Leguminosas en ¹ hileras estrechas o forraje en rotación | Hileras rectas | Mala | 66 | 77 | 85 | 89 |
| | | Buena | 58 | 72 | 81 | 85 |
| | Curvas de nivel | Mala | 64 | 75 | 83 | 85 |
| | | Buena | 55 | 69 | 78 | 83 |
| | Curvas de nivel y terrazas | Mala | 63 | 73 | 80 | 83 |
| | | Buena | 51 | 67 | 76 | 80 |

Fuente: (INVIAS, 2011).

La fotointerpretación del área de las cuencas aferentes a la vía permite diferenciar entre los usos que se proponen en la tabla, a los que se les asignó la equivalencia a los determinados en el Manual de Drenaje para carreteras del INVIAS (INVIAS, 2009), según los niveles de cobertura cuya correspondencia con las coberturas del proyecto se señala en la Tabla 30 .

Tabla 30 Equivalencia de coberturas según niveles del Manual de Drenajes de INVIAS

| CLASIFICACIÓN DE COBERTURA | TABLA PARA CLASIFICACIÓN (MANUAL (INVIAS)) | NIVEL 1 | NIVEL 2 | DESCRIPCIÓN |
|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Industrial | Tabla 2.14 | Áreas Urbanas | Industrial | - |
| Invernaderos | Tabla 2.14 | Áreas Impermeables | Parqueaderos pavimentados, techos, autopistas, etc. | - |
| Mosaico de pastos, cultivos, arbolado y urbano disperso | Tabla 2.14 | Áreas residenciales por promedio de tamaño del lote | 2 acre (8100 m ²) | Grandes lotes de urbanizaciones campestres con construcciones espaciadas, cierto grado de arborización y praderas. |
| Urbano | Tabla 2.14 | Áreas residenciales por promedio de | 1/8 acre (506 m ² o menos) | Áreas de alta densidad de construcciones residenciales. |

| CLASIFICACIÓN DE COBERTURA | TABLA PARA CLASIFICACIÓN (MANUAL (INVIAS)) | NIVEL 1 | NIVEL 2 | DESCRIPCIÓN |
|--------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | tamaño del lote | | |
| Vías y parqueaderos asfaltados | Tabla 2.14 | Áreas Impermeables | Calles y caminos pavimentados | - |
| Bosque | Tabla 2.14 | Bosques | Condición Buena | Bosques protegidos del pastoreo, y el suelo adecuadamente cubierto por humus vegetal |
| Cuerpos de agua | Tabla 2.16 | - | - | Cuerpos de agua representados en espejo natural o artificial, en estructuras colectoras y de transporte pluvial |
| Cultivos | Tabla 2.15 | Cultivos en hileras estrechas, rectas | Condición hidrológica buena | |
| Pastos | Tabla 2.16 | Pastos, forraje para pastoreo | Condición hidrológica regular: 50-75% cubierto y pastoreo no intensivo | |
| Pastos Arbolados | Tabla 2.16 | Combinación de bosques y pastos (huertas o granjas con árboles) | Condición hidrológica regular | Baja pendiente y poca cobertura de bosques |
| Suelo Desnudo | Tabla 2.14 | Áreas impermeables | Caminos de tierra | |

Fuente: WSP, 2019

De la equivalencia anterior se obtuvo un número de curva definido para cada combinación de clase de suelo hidrológico y cobertura que se consigna en la Tabla 31 .

Tabla 31 Asignación del número de curva para condición II según usos del suelo

| CLASIFICACIÓN DE USO | GRUPO HIDROLÓGICO DE SUELO | | | |
|---------------------------------------------------------|----------------------------|----|----|----|
| | A | B | C | D |
| Mosaico de pastos, cultivos, arbolado y urbano disperso | 64 | 65 | 77 | 82 |
| Pastos | 49 | 69 | 79 | 84 |
| Urbano | 77 | 85 | 90 | 92 |
| Vías y parqueaderos pavimentadas/os | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Pastos arbolados | 32 | 58 | 72 | 79 |
| Vías destapadas o suelo desnudo | 72 | 82 | 87 | 89 |
| Bosque | 30 | 55 | 70 | 77 |
| Cultivos | 63 | 75 | 83 | 87 |

Fuente: WSP, 2019

El número de curva para condición hidrológica II fue asignado a cruces entre tipo agrológico de suelo y cobertura para determinar el valor único de cada unidad de cruce.

El proceso subsiguiente consiste en llevar a cabo el “álgebra de mapas” que consiste en realizar una asignación espacial de los valores establecidos para cada factor determinante del CN, según lo establecido en la literatura y específicamente en la Norma NS-085 de la EAAB, de donde se extrae la Tabla 32 que relaciona los valores de CN en relación con la correspondiente cobertura y el tipo de suelo hidrológico.

Tabla 32 Número de curva (CN) recomendados para zonas urbanas

| Tipo de cobertura y condición hidrológica | | Área impermeable promedio | Números de curva para cada tipo de suelos | | | |
|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|----|----|----|
| | | | A | B | C | D |
| Espacios abiertos | Cobertura pobre (cobertura de pastos < 50%) | | 68 | 79 | 86 | 89 |
| | Cobertura parcial (cobertura de pastos de 50% a 75%) | | 49 | 69 | 79 | 84 |
| | Cobertura buena (cobertura de pastos > 75%) | | 39 | 61 | 74 | 80 |
| Áreas impermeables | Parqueaderos, techos, zonas pavimentadas, entre otros. | | 98 | 98 | 98 | 98 |
| Calles y carreteras | Andenes pavimentados y sumideros | | 98 | 98 | 98 | 98 |
| | Zanjas o diques pavimentados | | 83 | 89 | 92 | 93 |
| | Zona cubierta de gravas | | 76 | 85 | 89 | 91 |
| | Zona cubierta de arenas o polvo | | 72 | 82 | 87 | 89 |
| Zonas urbanas | Zonas comerciales y de negocios | 85% | 89 | 92 | 94 | 95 |
| | Zona industrial | 75% | 81 | 88 | 91 | 93 |
| Zonas residenciales (por tamaño del lote) | 500 m ² o menos | Mínimo 70% | 77 | 85 | 90 | 92 |
| | Mayores a 500 m ² | 38% | 61 | 75 | 83 | 87 |
| Áreas urbanas permeables en desarrollo y sin vegetación | | | 77 | 86 | 91 | 94 |

Fuente: NS-085, adaptado de URBAN STORMWATER HYDROLOGY, Kibler, 1982

Este cruce fue realizado a partir de herramientas de sistemas de información geográfica (ArcGIS). En el Anexo 2 Análisis de Caudales – 2.3 Coberturas de suelos, se presenta la intersección entre las capas de suelos coberturas y condición hidrológica, y se realiza la asignación del número de curva a cada una de estas unidades con respecto a las cuencas. Teniendo el cuadro de asignación de número de curva según usos del suelo (Tabla 31) y el cuadro de condición hidrológica de los suelos (Tabla 20) se procede a realizar el cruce entre ambos en formato Shape, de tal manera que para cada uso del suelo se determina el número de curva en función de la clase agrológica de éste y, por tanto, de la condición hidrológica del suelo. Dicho cruce se realiza en el software SIG, ArcGIS 10.4.1, mediante la intersección de las tablas de atributos. La Tabla 31 expone los números de curva que se utilizan para cada cruce Suelo Agrológico/Cobertura y en la Tabla 32 se presenta la asignación de valores de CN a cada una de las subcuencas que forman parte del sistema hídrico.

El procedimiento de asignación del CN a cada cuenca tiene en cuenta lo establecido en la Norma NS-085, según la cual para áreas de drenaje que incluyan sub-áreas con números de curva diferentes, el valor de CN representativo del área debe calcularse como el promedio ponderado con las respectivas áreas, mediante la ecuación:

$$CN = \frac{(\sum CN * A)}{\sum A}$$

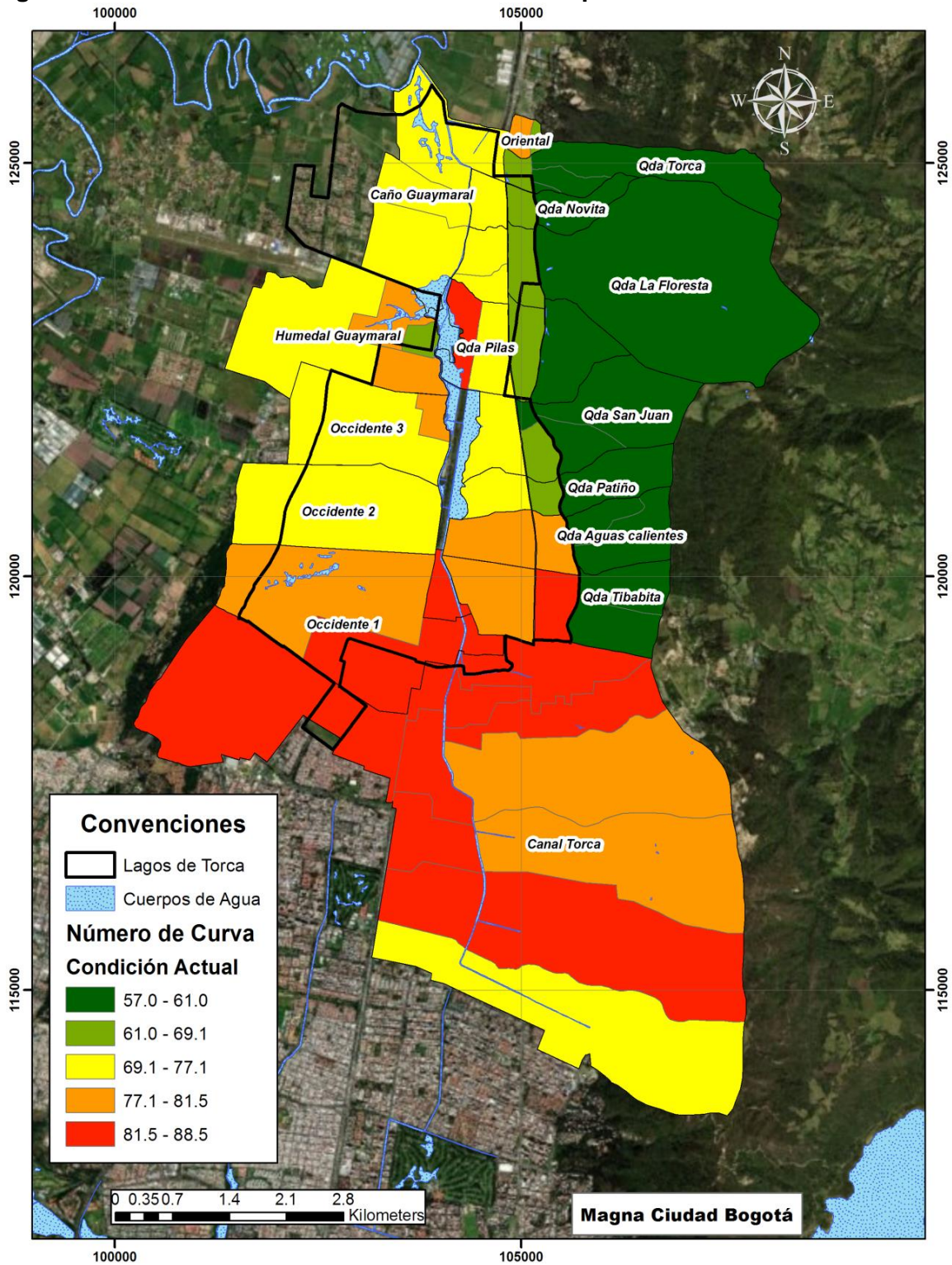
Dónde:

CN = Número de curva.

A = Área tributaria de drenaje (ha).

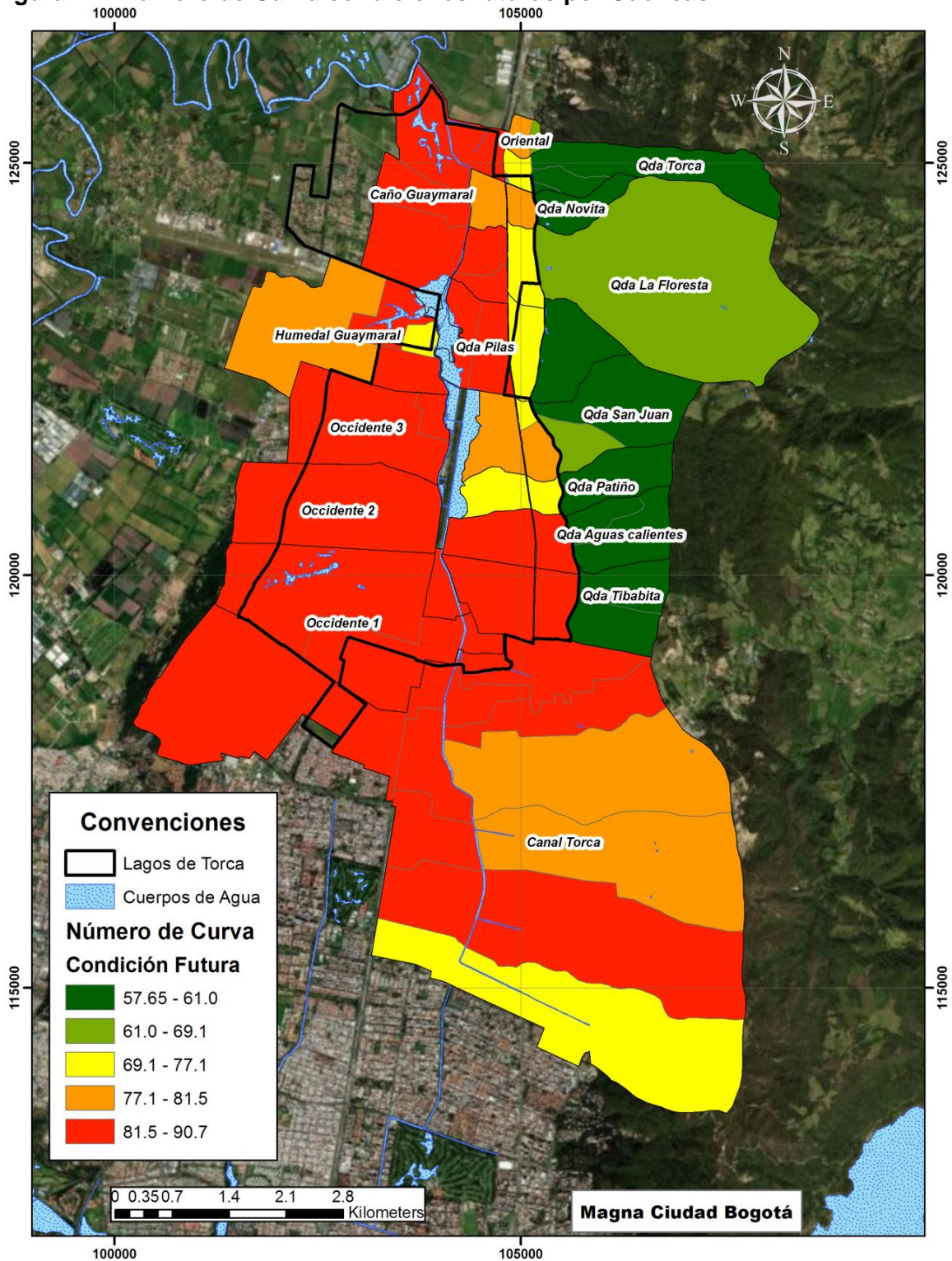
La determinación del CN para las cuencas de drenaje evaluadas dentro de la Actualización del Plan Maestro de Alcantarillado del Borde Norte, es decir para la estimación de los sistemas troncales de drenaje pluvial, se recomienda sea llevada a cabo con el empleo de los coeficientes de escorrentía estimados en el presente estudio. Al momento de llevar a cabo los desarrollos urbanísticos particulares, este análisis deberá especificarse según los tipos de cobertura del suelo previstas al interior de cada agrupación o uso previsto. Para el nivel del Plan Zonal, la estimación futura de la condición de escurrimiento, se efectuó con base en las coberturas previstas por el Decreto 088 de 2017 (Plano 12/21) y que se mostró en la Figura 111 del presente documento.

Figura 113 Número de Curva condiciones actuales por Cuencas



Fuente: WSP, 2019, a partir de información POMCA Río Bogotá 2018.

Figura 114 Número de Curva condiciones futuras por Cuencas



Fuente: WSP, 2019, a partir de información POMCA Río Bogotá 2018.

Tabla 33 Asignación del número de curva CN para condición II según usos del suelo

| Cuenca | CN Actual | CN Futuro |
|-----------------------------|------------------|------------------|
| Torca Occidental | 88.16 | 88.16 |
| Torca_sub1 | 77.49 | 77.49 |
| Torca_sub2 | 86.56 | 86.56 |
| Torca_sub3 | 80.00 | 80.00 |
| Torca_sub4 | 81.00 | 81.00 |
| Torca_sub5 | 85.80 | 85.80 |
| Torca_sub6 | 89.84 | 89.84 |
| Torca_sub7 | 93.66 | 93.66 |
| Torca_sub8 | 93.51 | 93.51 |
| Torca_sub9 | 94.00 | 94.00 |
| Torca_sub10 | 94.00 | 94.00 |
| Torca_sub11 | 94.00 | 94.00 |
| Guaymaral Occidente 1 | 77.00 | 84.00 |
| Canal Guaymaral Occidente 2 | 75.00 | 87.00 |
| Canal Guaymaral Occidente 3 | 77.00 | 87.00 |
| Humedal Guaymaral 1-1 | 74.00 | 78.92 |
| Humedal Guaymaral 1-2 | 81.06 | 85.00 |
| Humedal Guaymaral 2 | 80.21 | 84.48 |
| Humedal Guaymaral 3 | 67.00 | 72.77 |
| Occidente 1_1 | 77.98 | 81.00 |
| Occidente 1_2 | 80.00 | 80.00 |
| Occidente 2 | 75.00 | 81.74 |
| Occidente 3 | 74.00 | 82.24 |
| Occidente 3-1 | 81.00 | 85.45 |
| Qda Aguas calientes 1 | 59.06 | 59.06 |
| Qda Aguas calientes 2 | 58.95 | 59.00 |
| Qda Aguas calientes 3 | 79.00 | 82.51 |
| Qda Aguas calientes 4 | 80.05 | 83.72 |
| Qda La Floresta 1 | 59.89 | 61.31 |
| Qda La Floresta 2 | 62.80 | 76.59 |
| Qda La Floresta 3 | 76.44 | 84.69 |
| Qda La Floresta 4 | 76.08 | 84.69 |
| Qda Novita 1 | 57.60 | 58.00 |
| Qda Novita 2 | 64.36 | 78.05 |
| Qda Novita 3 | 76.87 | 81.11 |
| Qda Patiño 1 | 58.15 | 58.15 |
| Qda Patiño 2 | 58.25 | 58.25 |
| Qda Patiño 3 | 67.86 | 72.43 |

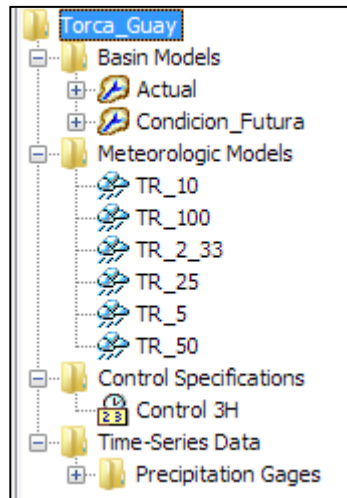
| Cuenca | CN Actual | CN Futuro |
|-----------------|-----------|-----------|
| Qda Patiño 4 | 73.76 | 76.90 |
| Qda Pilas 1 | 58.53 | 59.00 |
| Qda Pilas 2 | 68.76 | 75.14 |
| Qda Pilas 3 | 71.72 | 85.89 |
| Qda Pilas 4 | 84.81 | 87.16 |
| Qda San Juan 1 | 57.55 | 58.00 |
| Qda San Juan 2 | 59.46 | 61.06 |
| Qda San Juan 3 | 61.00 | 72.11 |
| Qda San Juan 4 | 69.12 | 79.40 |
| Qda San Juan 5 | 71.23 | 77.80 |
| Qda Tibabita 1 | 58.12 | 59.36 |
| Qda Tibabita 2 | 57.71 | 60.69 |
| Qda Tibabita 3 | 86.52 | 87.63 |
| Qda Tibabita 4 | 81.48 | 86.00 |
| Qda Torca 1 | 57.00 | 57.00 |
| Qda Torca 2 | 58.91 | 60.92 |
| Qda Torca 3 | 57.84 | 58.16 |
| Qda Torca 4 | 63.34 | 72.21 |
| Torca Oriental2 | 88.47 | 88.47 |

Fuente: WSP, 2019

5.8.2 Estructuración del modelo Hec HMS

El software HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) fue desarrollado por el US Army Corps of Engineers para simular procesos lluvia-escorrentía en una gran variedad de tipos de cuencas (por lo cual permite elegir entre varios métodos de cálculo). La herramienta separa las componentes del ciclo hidrológico en las características morfométricas de la cuenca y meteorológicas de la cuenca, dejando abierta la posibilidad de hacer la modelación agregada, semi-distribuida o distribuida.

La representación de las características morfométricas de la cuenca permite crear los siguientes elementos:



Fuente: WSP a partir de modelo HEC-HMS 4.2, 2019.

5.8.2.1 Modelo Topológico

El modelo topológico visto desde un punto de vista funcional se entiende como la capa de información en la cual se almacenan las relaciones entre los distintos elementos que la componen. Dentro del estudio de una cuenca, el modelo topológico es el encargado de representar tanto las subcuencas generadoras de escorrentía, las direcciones del flujo, los tránsitos de caudal, los puntos de confluencia entre 2 o más flujo.

Dentro del espacio de trabajo que provee HEC-HMS, este da la opción de construir un modelo topológico a partir de los siguientes componentes:

- 1) **Subcuencas:** Usado para representar una cuenca física.
- 2) **Canal de drenaje (Reach):** Usado para transitar caudales.
- 3) **Reservorios:** Usado para modelar al detención y atenuación de un hidrograma causado por un embalse o estanque de detención.
- 4) **Puntos de confluencia de flujos (Junction):** Usado para combinar flujos de caudal provenientes aguas arriba de la unión.
- 5) **Puntos de divergencia de flujo:** Usado para modelar el flujo que sale del canal principal.
- 6) **Fuentes:** Usado para introducir flujo dentro de una cuenca.
- 7) **Sumideros:** Usado para representar una salida física de la cuenca.

Una vez creadas los componentes de subcuencas y canales de drenaje, se asigna a cada una el método deseado para el cálculo de los efectos del dosel, la superficie, escorrentías, flujo base, enrutamiento y pérdidas. Los métodos de cálculo implementados para el modelo del sistema Torca – Guaymaral para el método de perdidas corresponde al Número de Curva del Soil conservation Service (SCS), este método requiere de la asignación de un número de curva (CN) ponderado para toda la cuenca y un porcentaje de área impermeable, el cual debe ser asignado únicamente si se excluye algún porcentaje de la cuenca para el cálculo agregado del número de curva. De acuerdo con las características específicas de las cuencas que conforman el sistema, se decide calcular el Número de Curva (CN) para cada una de las cuencas considerando la totalidad

de la superficie de las cuencas, por lo cual, las áreas duras presentes en el área, se consideraron como parte del cálculo de este coeficiente.

La incorporación del factor de impermeabilidad de la cuenca dentro del modelo hidrológico (*impervious*), se tuvo en cuenta dentro del mismo valor del coeficiente CN que incorpora variables determinantes como la cobertura del suelo, la humedad antecedente y el tipo agrológico del suelo, especialmente para las áreas que presentan coberturas naturales. Para las áreas de futuro desarrollo el coeficiente de impermeabilización de igual manera se relaciona con el CN, asignando a las zonas con coberturas impermeables, los valores recomendados por la Norma NS-085 de la EAAB (Tabla 32), a partir de la información de usos y cobertura proyectada por el Decreto 088 de 2017 (Plano 12/21) y que se muestra en la Figura 111. De esta manera el valor asignado al modelo Hec-HMS tiene un porcentaje del 0%.

Para el método de transformación, se seleccionó el hidrograma unitario del SCS, el cual requiere la asignación del tiempo de retardo en minutos para cada una de las cuencas, el cual es calculado en función del tiempo de concentración estimado. Con respecto al tránsito por los canales se seleccionó el método de Onda Cinemática, el cual requiere información de la geometría del canal con respecto a la sección transversal, la longitud, la pendiente y el coeficiente de rugosidad de Manning. Es de aclarar que el tránsito hidrológico modelado mediante HEC-HMS, es un método aproximado que no tiene en cuenta todas la totalidad de las características hidráulicas del sistema, así como los desbordes de los canales, las cuales si están contempladas de manera precisa en el modelo hidráulico bidimensional HEC-RAS, al contar con una topografía de detalle y los métodos de cálculo adecuados para dicha tarea, por tal razón es de esperar una diferencia de los hidrogramas transitados por ambos modelos. Es así como los hidrogramas presentados en el documento corresponderán a los generados a partir del modelo de simulación hidráulica.

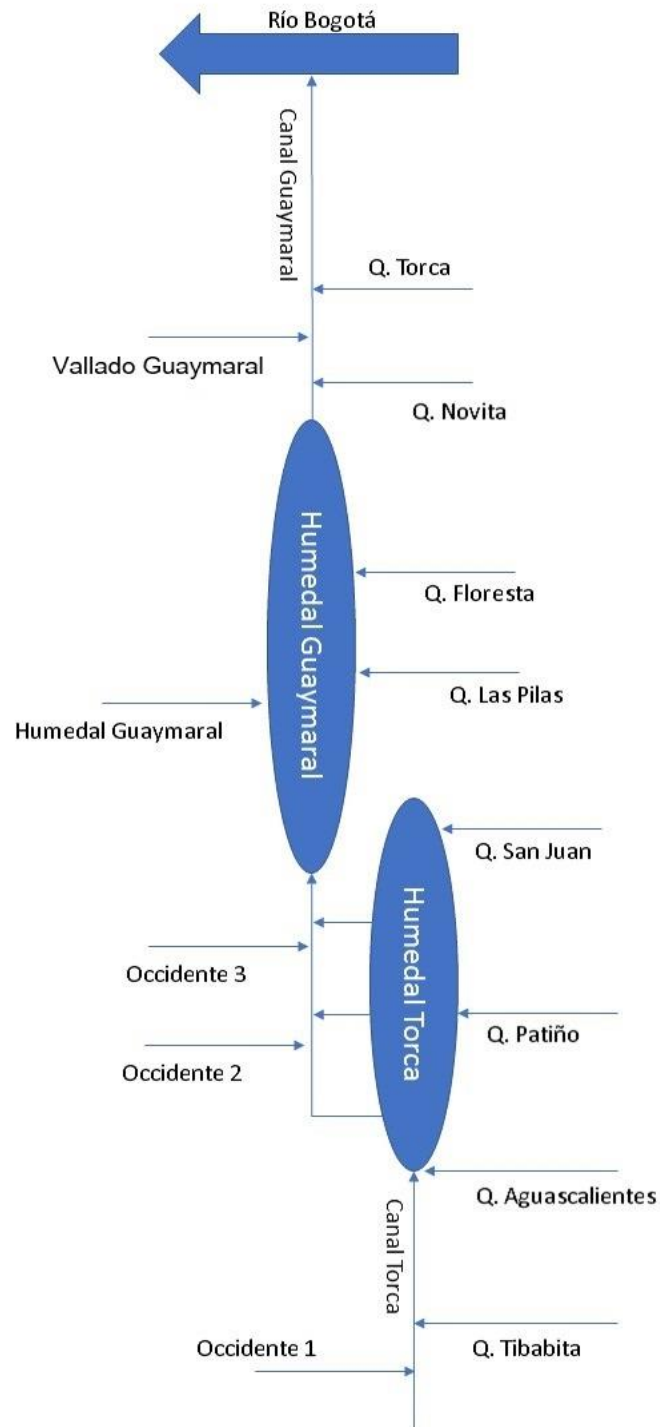
En cuanto al hietograma de distribución temporal de la precipitación, se definió con un intervalo de 5 minutos como el indicado en la Figura 32, mientras para la generación del hidrograma al interior del modelo HecHMS, se estableció un Δt de 1 minuto. Se evaluaron los caudales generados por el modelo para diferentes escenarios modificando el intervalo de tiempo de simulación, adoptando finalmente el menor intervalo de tiempo posible en el modelo Hec-HMS, que además genera los mayores caudales pico instantáneos. Este Δt asignado como lapso de la interpolación del hidrograma, es inferior al mínimo recomendado para las cuencas con menor T_c , estimados por las formulaciones aplicadas.

Las subcuencas de cada una de las cuencas de las quebradas que descienden de los cerros orientales, se subdividieron bajo criterios morfológicos del perfil del cauce principal y las divisorias geográficas, tales como la Carrera 7^a, la vía férrea o la Autopista Norte.

Con respecto a los almacenamientos de agua, se crearon los componentes denominados *reservorios*, tanto para el Humedal en el sector de Torca como en Guaymaral, como para cuerpos de agua independientes, que se conectan a través de las tres estructuras que atraviesan la Autopista Norte y en el box culvert de la Calle 235 (vía a Guaymaral). Así mismo se ingresa la curva de almacenamiento estimada a partir de la batimetría para sector del humedal. Estas curvas de capacidad se presentan en el Anexo 4, 4.2 Curvas de capacidad de humedales.

La Figura 115 presenta el modelo conceptual de drenaje de sistema hídrico Torca-Guaymaral.

Figura 115 Conceptualización general de drenaje del sistema Torca-Guaymaral



Fuente: WSP, 2019.

5.8.2.2 Modelo meteorológico

El modelo meteorológico es el encargado de las variables climatológicas que rigen la cuenca de estudio, principalmente la precipitación, al tratarse de una modelación para la estimación de caudales máximos, es decir, en respuesta a un evento específico de tormenta. Para el ingreso de datos de precipitación se introducen al modelo los hietogramas de diseño previamente estimados en la sección correspondiente al análisis de precipitación del presente documento. Para la modelación se plantearon los modelos meteorológicos correspondientes a cada uno de los periodos de retorno analizados.

5.8.2.3 Especificación de la corrida

Una vez seleccionados todos los métodos de cálculo referente a los componentes de la subcuenca, el paso a seguir es especificar la ventana de cálculo del modelo, así como el intervalo de presentación de los resultados. A partir de esta configuración y considerando las condiciones topológicas y los modelos meteorológicos, se crean los escenarios de corrida para cada uno de los periodos de retorno analizados.

La estructura fisiográfica de la cuenca basada en la red fluvial es el punto de partida de este modelo hidrológico. Para ello hay que establecer, por una parte, las superficies generadoras de hidrogramas de escorrentía (sistemas hidrológicos o subcuencas), y, por otra, las unidades o sistemas hidráulicos por los que circulan dichos hidrogramas (cauces, embalses, etc.).

La información de partida para determinar este modelo estructurado de subcuencas y canales ha sido la red hídrica, así como el Modelo de Elevación Digital MED generado para la totalidad del proyecto y que se conforma de la información topográfica convencional, batimetrías, Lidar y Modelo de Elevación Satelital, trabajado con el Sistema de Información Geográfico SIG ArcGis de ESRI. El proceso seguido es el siguiente:

- Determinar el contorno de la cuenca objeto de estudio a partir del MDT mencionado y considerando el punto definido por elementos característicos de las subcuencas, tales como la Carrera Séptima, la Vía Férrea, la Autopista Norte o las desembocaduras en los humedales Torca, Guaymaral o en los canales de los mismos nombres.
- Delimitación de las subcuencas atendiendo a distintos criterios:
- Se parte de las subcuencas establecidas en el sistema hídrico que forma parte de los corredores hídricos definidos en el Decreto 088 de 2017.
- Cada una de estas subcuencas se subdivide a su vez en otras de superficie similar, dividiendo los tramos de cauce en tramos de longitud parecida, o según los elementos que característicos que las delimitan, como los descritos en una consideración anterior.
- El sistema Humedal Torca - Guaymaral, tiene un sistema de control constituido por la Autopista Norte y las obras de drenaje que la interceptan para dar continuidad al flujo de agua del humedal.

En la Tabla 34 se presenta el resumen de los parámetros morfométricos al modelo de simulación hidrológica.

Tabla 34 Resumen de parámetros morfométricos del sistema Torca-Guaymaral

| CUENCA | SUBCUENCA | Área (Km2) | CN Actual | CN Futuro | TC (min) | Tlag (min) |
|---------------------------|-----------------------------|------------|-----------|-----------|----------|------------|
| Canal Torca | Torca Occidental | 3.654 | 88.16 | 88.16 | 126.53 | 75.92 |
| | Torca_sub1 | 3.889 | 77.49 | 77.49 | 56.99 | 34.19 |
| | Torca_sub2 | 3.705 | 86.56 | 86.56 | 49.53 | 29.72 |
| | Torca_sub3 | 3.172 | 80.00 | 80.00 | 47.47 | 28.48 |
| | Torca_sub4 | 3.301 | 81.00 | 81.00 | 55.56 | 33.34 |
| | Torca_sub5 | 1.1106 | 85.80 | 85.80 | 44.05 | 26.43 |
| | Torca_sub6 | 1.1325 | 89.84 | 89.84 | 46.18 | 27.71 |
| | Torca_sub7 | 0.3734 | 93.66 | 93.66 | 45.91 | 27.55 |
| | Torca_sub8 | 0.253 | 93.51 | 93.51 | 30.05 | 18.03 |
| | Torca_sub9 | 0.7364 | 94.00 | 94.00 | 33.69 | 20.21 |
| | Torca_sub10 | 0.7695 | 94.00 | 94.00 | 53.99 | 32.40 |
| Torca_sub11 | 0.957 | 94.00 | 94.00 | 54.70 | 32.82 | |
| Canal Guaymaral Occidente | Guaymaral Occidente 1 | 1.2147 | 77.00 | 84.00 | 28.96 | 17.38 |
| | Canal Guaymaral Occidente 2 | 1.082 | 75.00 | 87.00 | 58.53 | 35.12 |
| | Canal Guaymaral Occidente 3 | 0.5233 | 77.00 | 87.00 | 40.03 | 24.02 |
| Humedal Guaymaral | Humedal Guaymaral 1-1 | 2.0302 | 74.00 | 78.92 | 162.86 | 97.71 |
| | Humedal Guaymaral 1-2 | 0.4544 | 81.06 | 85.00 | 37.71 | 22.62 |
| | Humedal Guaymaral 2 | 0.396 | 80.21 | 84.48 | 29.75 | 17.85 |
| | Humedal Guaymaral 3 | 0.15 | 67.00 | 72.77 | 13.29 | 7.97 |
| Occidente 1 | Occidente 1_1 | 2.554 | 77.98 | 81.00 | 106.98 | 64.19 |
| | Occidente 1_2 | 1.5062 | 80.00 | 80.00 | 72.23 | 43.34 |
| Occidente 2 | Occidente 2 | 2.4681 | 75.00 | 81.74 | 93.09 | 55.85 |
| Occidente 3 | Occidente 3 | 1.833 | 74.00 | 82.24 | 16.67 | 10.00 |
| | Occidente 3-1 | 0.178 | 81.00 | 85.45 | 14.67 | 8.80 |
| Quebrada Aguas Calientes | Qda Aguas calientes 1 | 0.7042 | 59.06 | 59.06 | 16.67 | 10.00 |
| | Qda Aguas calientes 2 | 0.2931 | 58.95 | 59.00 | 10.00 | 6.00 |
| | Qda Aguas calientes 3 | 0.3053 | 79.00 | 82.51 | 20.28 | 12.17 |
| | Qda Aguas calientes 4 | 0.625 | 80.05 | 83.72 | 50.85 | 30.51 |
| Quebrada La Floresta | Qda La Floresta 1 | 5.702 | 59.89 | 61.31 | 36.19 | 21.72 |
| | Qda La Floresta 2 | 0.3419 | 62.80 | 76.59 | 21.74 | 13.04 |
| | Qda La Floresta 3 | 0.2975 | 76.44 | 84.69 | 19.02 | 11.41 |
| | Qda La Floresta 4 | 0.188 | 76.08 | 84.69 | 23.05 | 13.83 |
| Quebrada Novita | Qda Novita 1 | 0.4431 | 57.60 | 58.00 | 13.13 | 7.88 |
| | Qda Novita 2 | 0.1611 | 64.36 | 78.05 | 16.51 | 9.90 |
| | Qda Novita 3 | 0.287 | 76.87 | 81.11 | 19.46 | 11.68 |
| Quebrada | Qda Patiño 1 | 0.5943 | 58.15 | 58.15 | 11.99 | 7.19 |

| CUENCA | SUBCUENCA | Área (Km ²) | CN Actual | CN Futuro | TC (min) | Tlag (min) |
|-------------------|-----------------|-------------------------|-----------|-----------|----------|------------|
| Patiño | Qda Patiño 2 | 0.1534 | 58.25 | 58.25 | 10.00 | 6.00 |
| | Qda Patiño 3 | 0.1537 | 67.86 | 72.43 | 12.09 | 7.26 |
| | Qda Patiño 4 | 0.3854 | 73.76 | 76.90 | 26.40 | 15.84 |
| Quebrada Pilas | Qda Pilas 1 | 0.8355 | 58.53 | 59.00 | 12.56 | 7.53 |
| | Qda Pilas 2 | 0.4171 | 68.76 | 75.14 | 19.30 | 11.58 |
| | Qda Pilas 3 | 0.4649 | 71.72 | 85.89 | 25.76 | 15.46 |
| | Qda Pilas 4 | 0.3972 | 84.81 | 87.16 | 32.46 | 19.48 |
| Quebrada San Juan | Qda San Juan 1 | 1.298 | 57.55 | 58.00 | 19.18 | 11.51 |
| | Qda San Juan 2 | 0.3681 | 59.46 | 61.06 | 10.00 | 6.00 |
| | Qda San Juan 3 | 0.0639 | 61.00 | 72.11 | 10.00 | 6.00 |
| | Qda San Juan 4 | 0.2513 | 69.12 | 79.40 | 18.12 | 10.87 |
| | Qda San Juan 5 | 0.5379 | 71.23 | 77.80 | 26.63 | 15.98 |
| Canal Tibabita | Qda Tibabita 1 | 0.5384 | 58.12 | 59.36 | 12.26 | 7.35 |
| | Qda Tibabita 2 | 0.5667 | 57.71 | 60.69 | 10.71 | 6.43 |
| | Qda Tibabita 3 | 0.4032 | 86.52 | 87.63 | 24.24 | 14.54 |
| | Qda Tibabita 4 | 0.8069 | 81.48 | 86.00 | 39.94 | 23.97 |
| Quebrada Torca | Qda Torca 1 | 1.2582 | 57.00 | 57.00 | 24.79 | 14.87 |
| | Qda Torca 2 | 0.2003 | 58.91 | 60.92 | 10.00 | 6.00 |
| | Qda Torca 3 | 0.0227 | 57.84 | 58.16 | 10.00 | 6.00 |
| | Qda Torca 4 | 0.1366 | 63.34 | 72.21 | 10.00 | 6.00 |
| Torca Oriental2 | Torca Oriental2 | 0.436 | 88.47 | 88.47 | 65.96 | 39.58 |

Fuente: WSP, 2019.

En la Figura 116 se presenta la esquematización del modelo de simulación en Hec-HMS para el sistema Torca – Guaymaral, considerando la agregación generada por la simultaneidad del evento de precipitación. Es de tener en cuenta que a pesar de que este modelo tiene la capacidad de realizar el tránsito a través de los cuerpos de agua que generan almacenamiento, estos se evaluarán desde el modelo de simulación hidráulico, dado empleo de simulación de flujo en 2D que será aplicado en este caso.

El producto de este proceso lluvia – escorrentía serán los hidrogramas de creciente de cada cuenca, insumos que ingresarán la modelo de simulación hidráulica y en el caso específico de la cuenca del canal Torca, la más grande del sistema, siguiendo las especificaciones de la Norma NS-085 y la Normas NS-163.

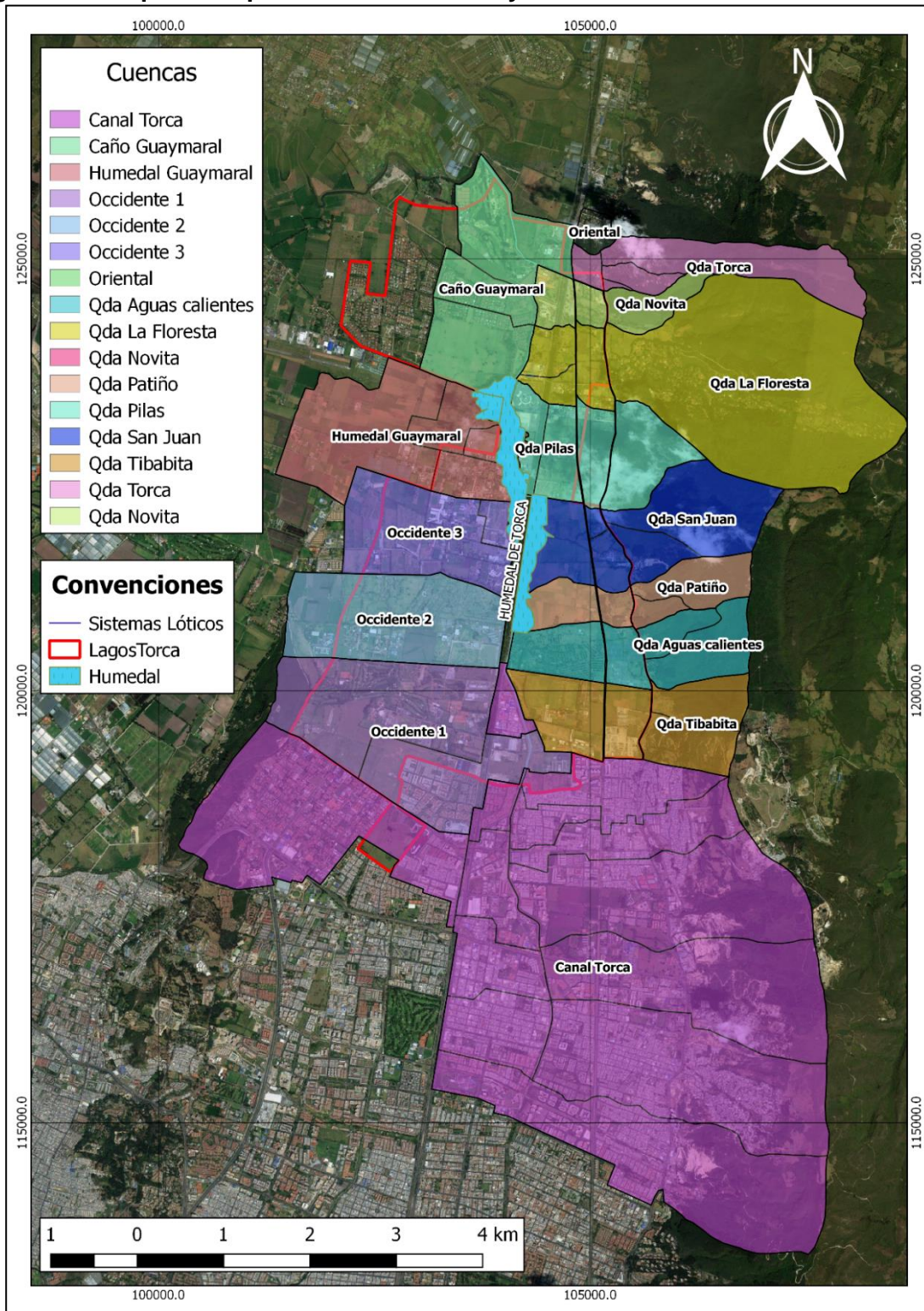
5.8.3 Resultados

5.8.3.1 Caudales máximos Instantáneos

Para la estructuración del modelo hidrológico de la zona de estudio y las cuencas que la componen, se implementó el software HEC-HMS, el cual es un modelo de uso libre y ampliamente evaluado a nivel nacional e internacional, que 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, nodos, fuentes y sumideros). Entre los múltiples procedimientos hidrológicos disponibles en HEC-HMS para transformar la precipitación en escorrentía, en este estudio, por su parsimonia y buen desempeño en análisis anteriores, 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 precipitación de excesos en escorrentía directa.

En la Figura 117 se presenta el esquema de las cuencas hidrográficas que conforma el sistema y en el Anexo 3 – Anexo cartográfico 3.3 PDF 1. Cuencas hidrográficas, se presenta el mapa de detalle de las cuencas y su interrelación con los humedales. En el Anexo 2 Análisis de Caudales – 2.4 Modelo HEC – HMS, se presenta el modelo hidrológico de HEC – HMS desarrollado.

Figura 117 Esquema espacial de las cuencas y humedales



Fuente: WSP, 2019.

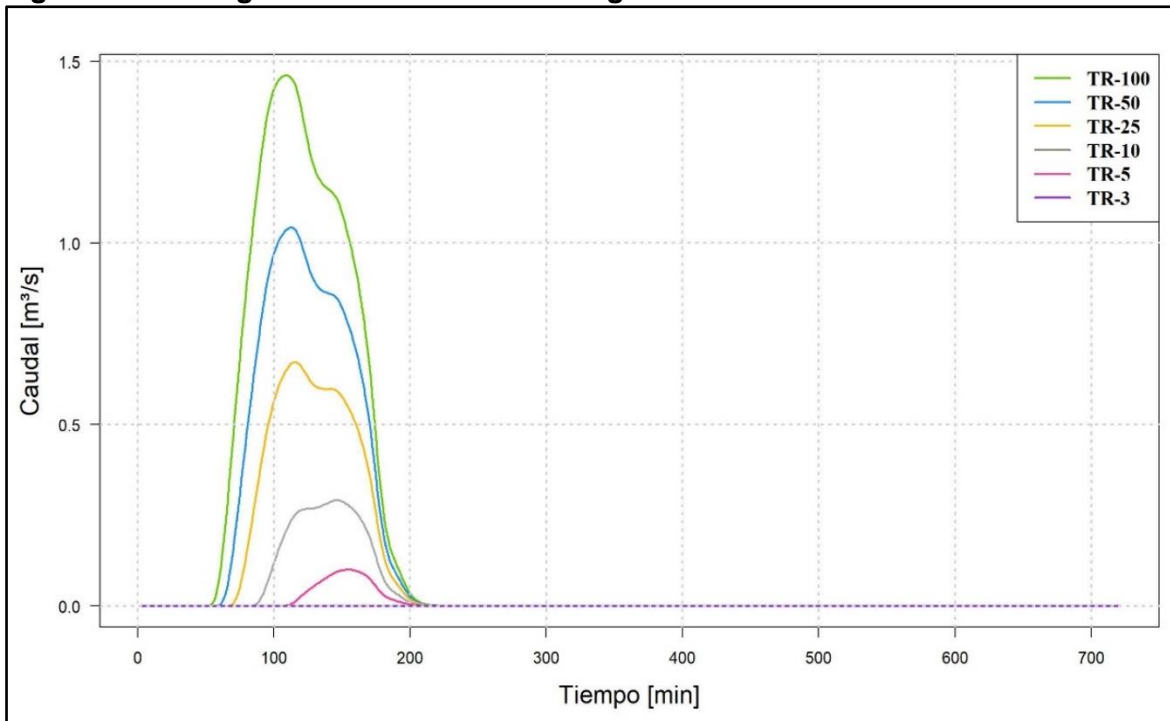
5.8.3.2 Hidrogramas

Las lluvias sobre el sistema de los humedales Torca – Guaymaral se consideraron en forma espacial, realizando el ejercicio de interpolación de los valores de precipitación para las diferentes tormentas analizadas, ejercicio en el que se evidenció, tal como lo concluyo en su momento INGETEC en su Estudio de Tormentas (INGETEC, 2015), que la precipitación en el área de estudio no presenta un patrón elíptico: *“Durante el análisis espacial de las tormentas consideradas en el estudio, se detectaron eventos con distribuciones espaciales dispersas, difícilmente representables mediante isoyetas elípticas”* (INGETEC, 2015). En la Figura 35 se presenta la distribución espacial de las tormentas con precipitaciones más altas registradas en las diferentes estaciones en el área de estudio, con base en este ejercicio que se detalla en el numeral 5.2 del presente estudio, se realizó la estimación de los valores de precipitación sobre las diferentes áreas de cada una de las cuencas que conforman el sistema.

5.8.3.2.1 Condición Actual

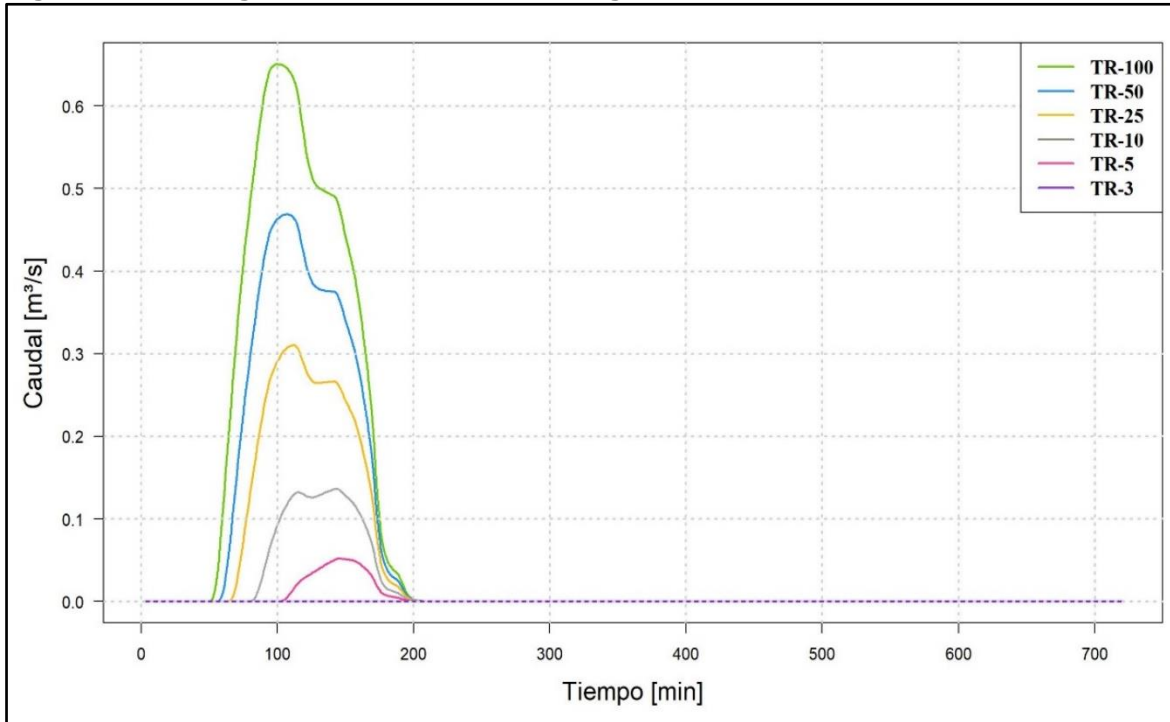
Se denomina Condición Actual al escenario que contempla la cobertura y uso del suelo que tiene la zona en este momento, al cual se le ha aplicado un evento de precipitación con un Tr de 100 años. En la Figura 118 a la Figura 159 se presentan los hidrogramas de creciente para las cuencas de la zona de estudio, en la condición actual.

Figura 118 Hidrograma cuenca Quebrada Aguascalientes Subcuenca AGC-7M1



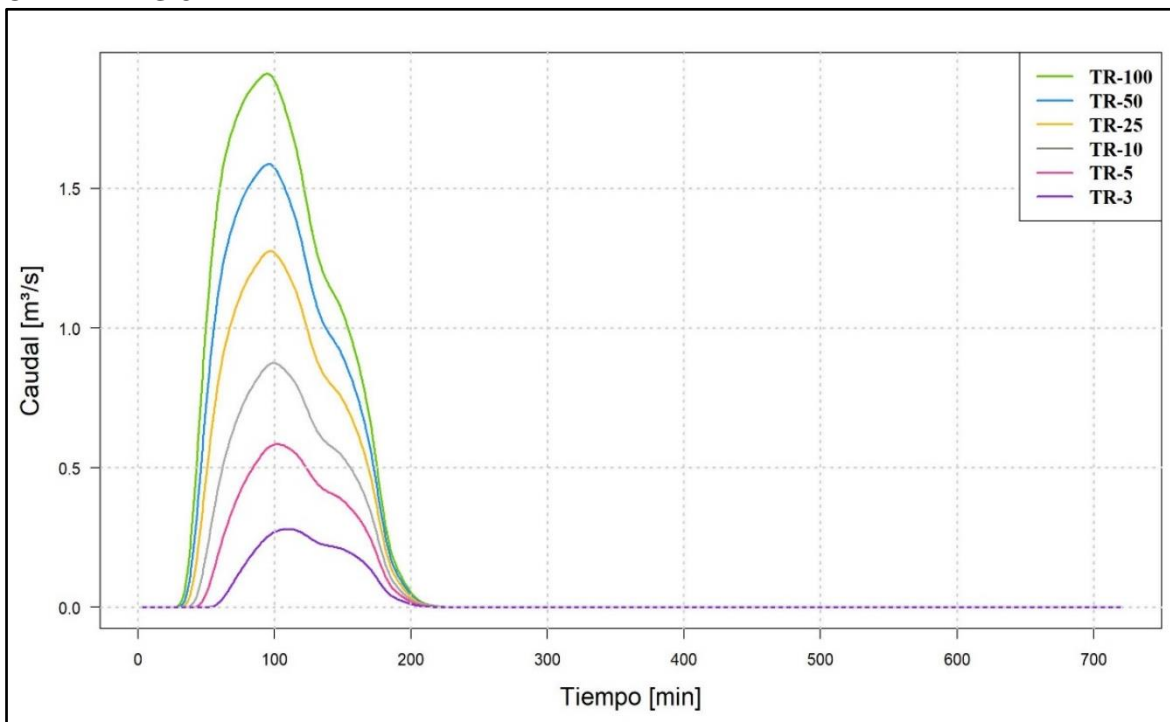
Fuente: WSP, 2019.

Figura 119 Hidrograma cuenca Quebrada Aguascalientes Subcuenca AGC-7M2



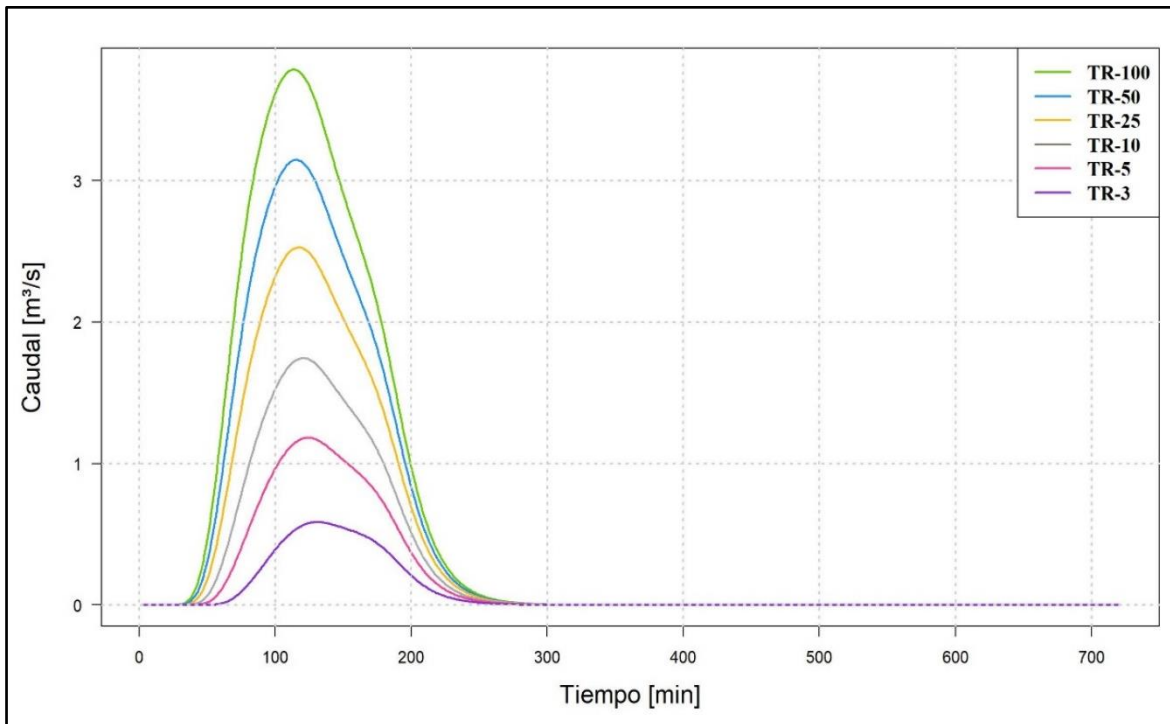
Fuente: WSP, 2019.

Figura 120 Hidrograma cuenca Quebrada Aguascalientes Subcuenca AGUAS CALIENTES 3



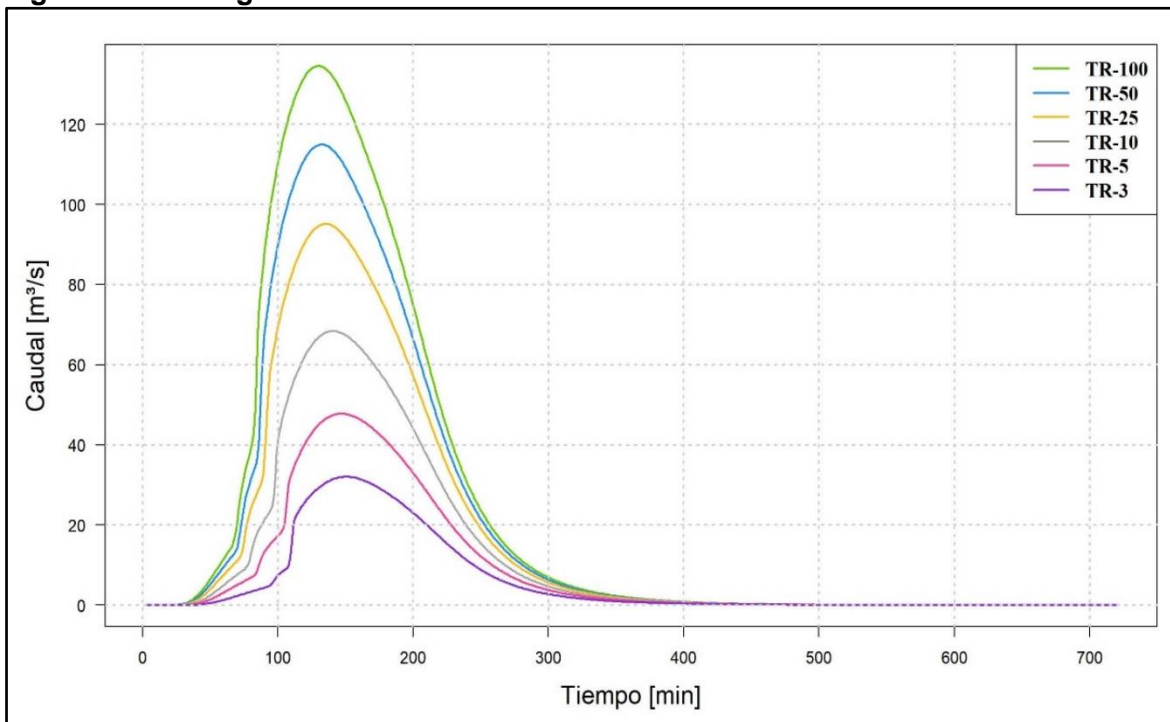
Fuente: WSP, 2019.

Figura 121 Hidrograma cuenca Quebrada Aguascalientes Subcuenca AGUAS CALIENTES 4



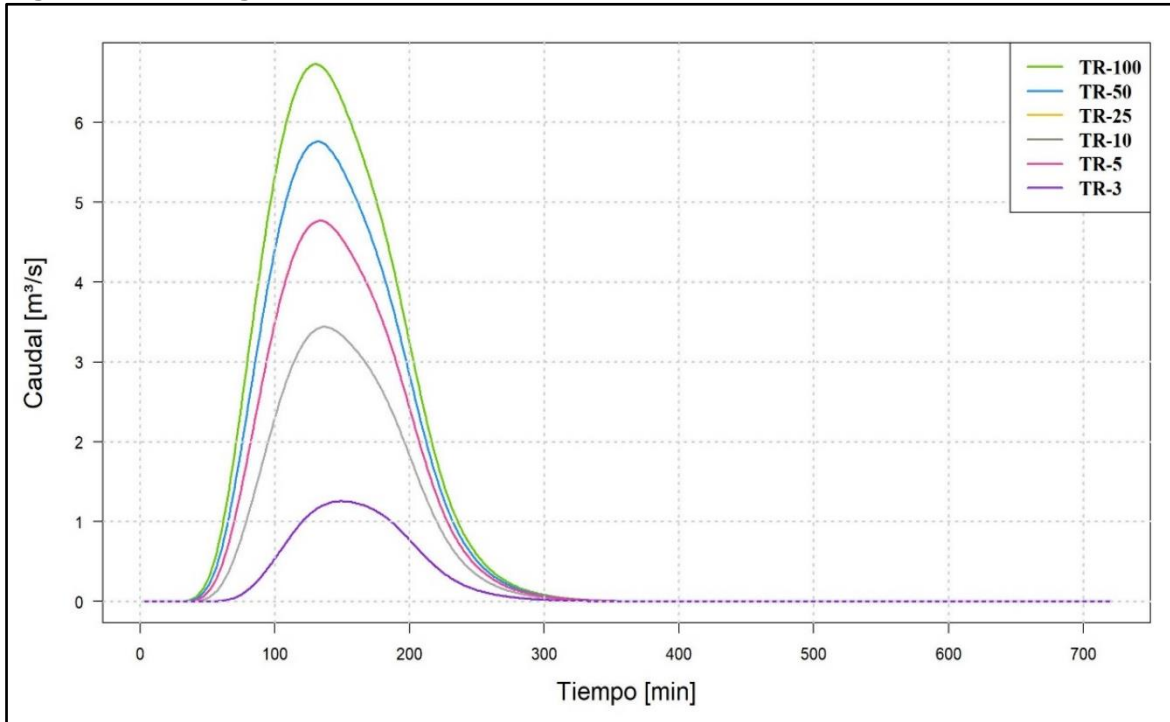
Fuente: WSP, 2019.

Figura 122 Hidrograma cuenca Canal Torca Subcuenca CANAL TORCA 1



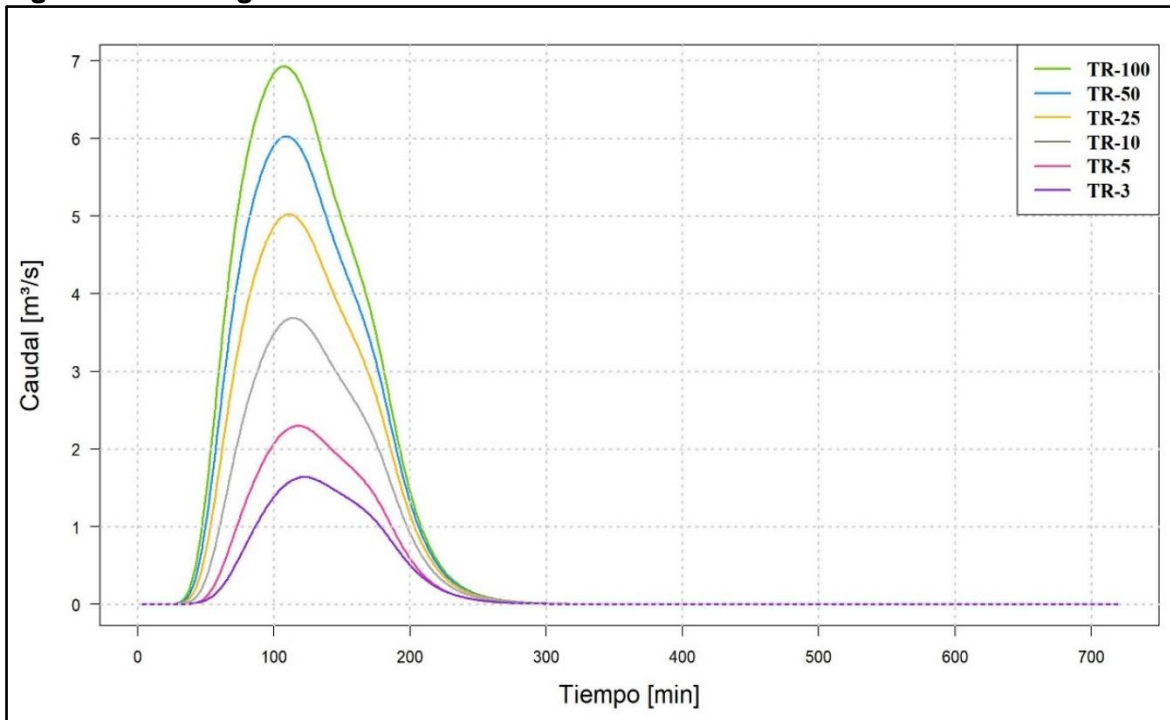
Fuente: WSP, 2019.

Figura 123 Hidrograma cuenca Canal Torca Subcuenca CANAL TORCA 2



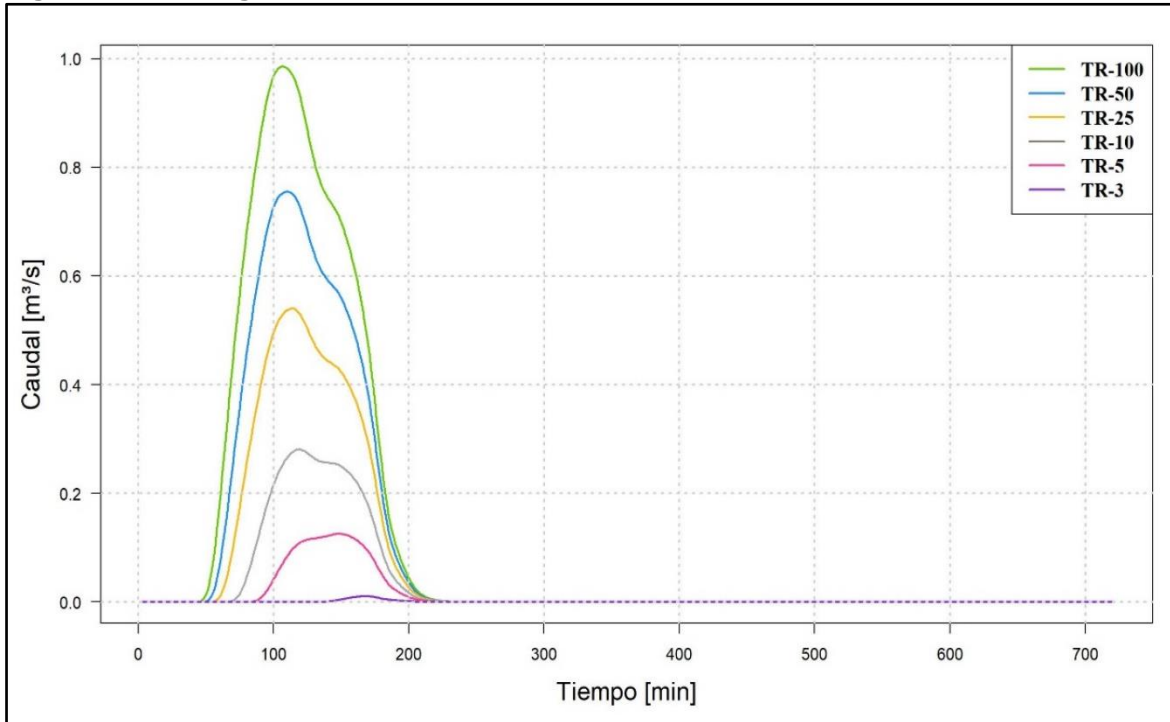
Fuente: WSP, 2019.

Figura 124 Hidrograma cuenca Canal Torca Subcuenca CANAL TORCA 3



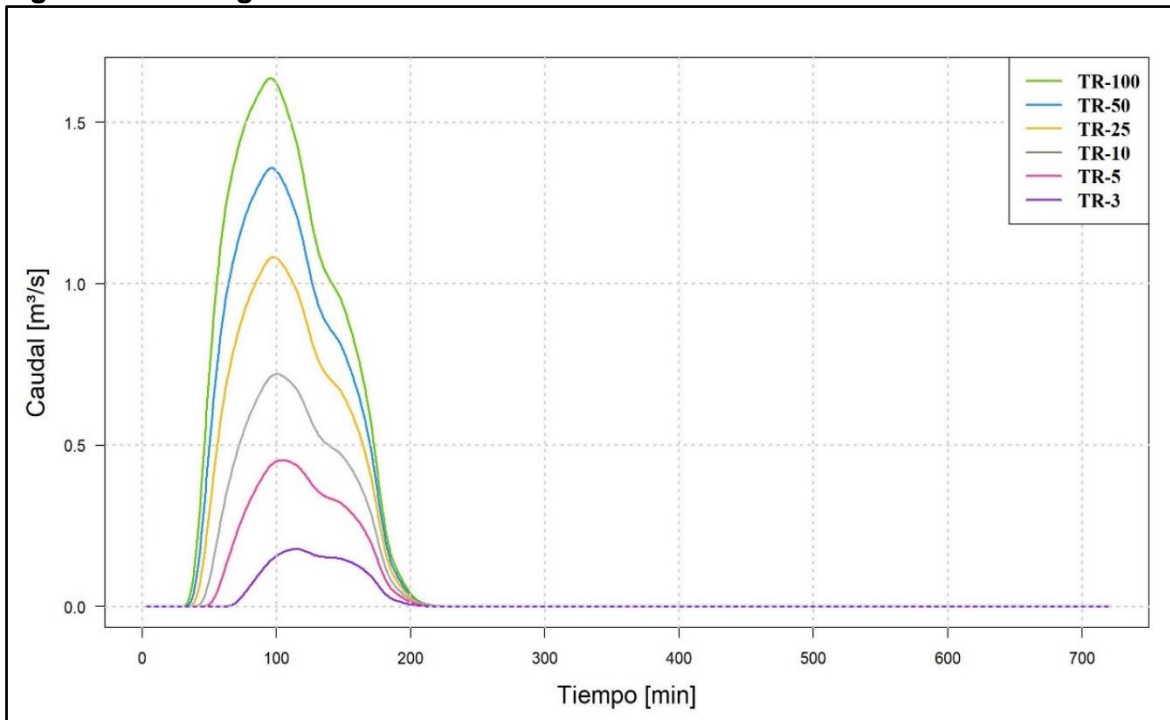
Fuente: WSP, 2019.

Figura 125 Hidrograma cuenca Quebrada La Floresta Subcuenca FLO1



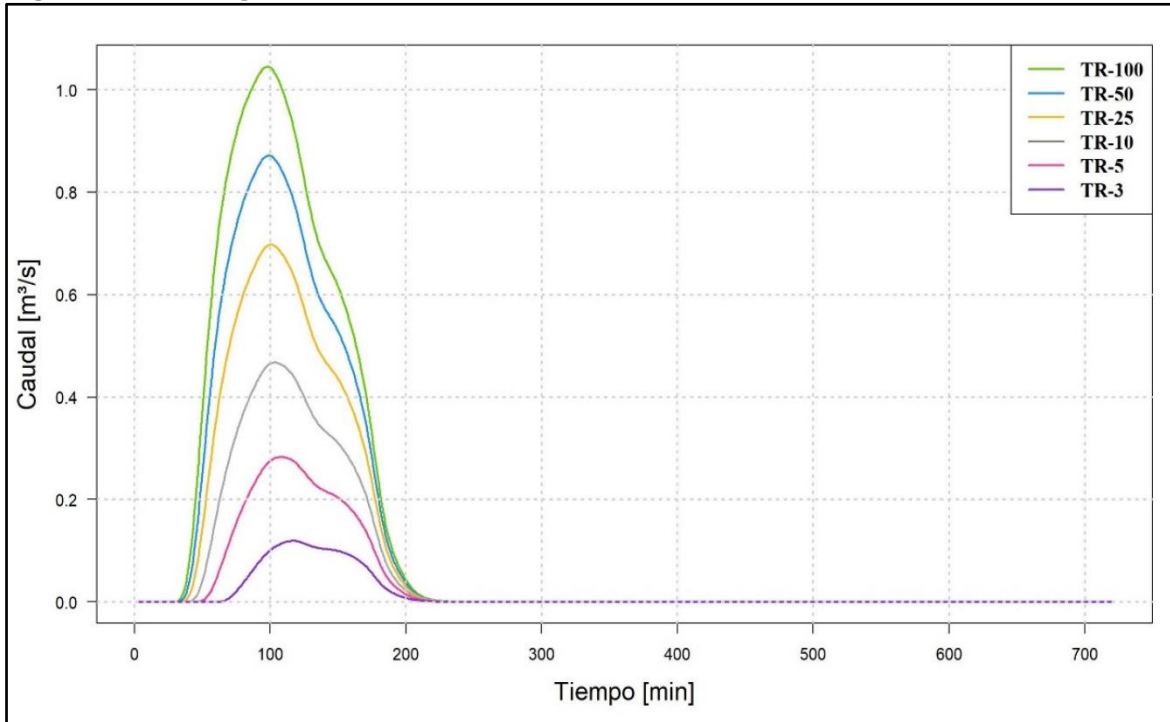
Fuente: WSP, 2019.

Figura 126 Hidrograma cuenca Quebrada La Floresta Subcuenca FLORESTA 3



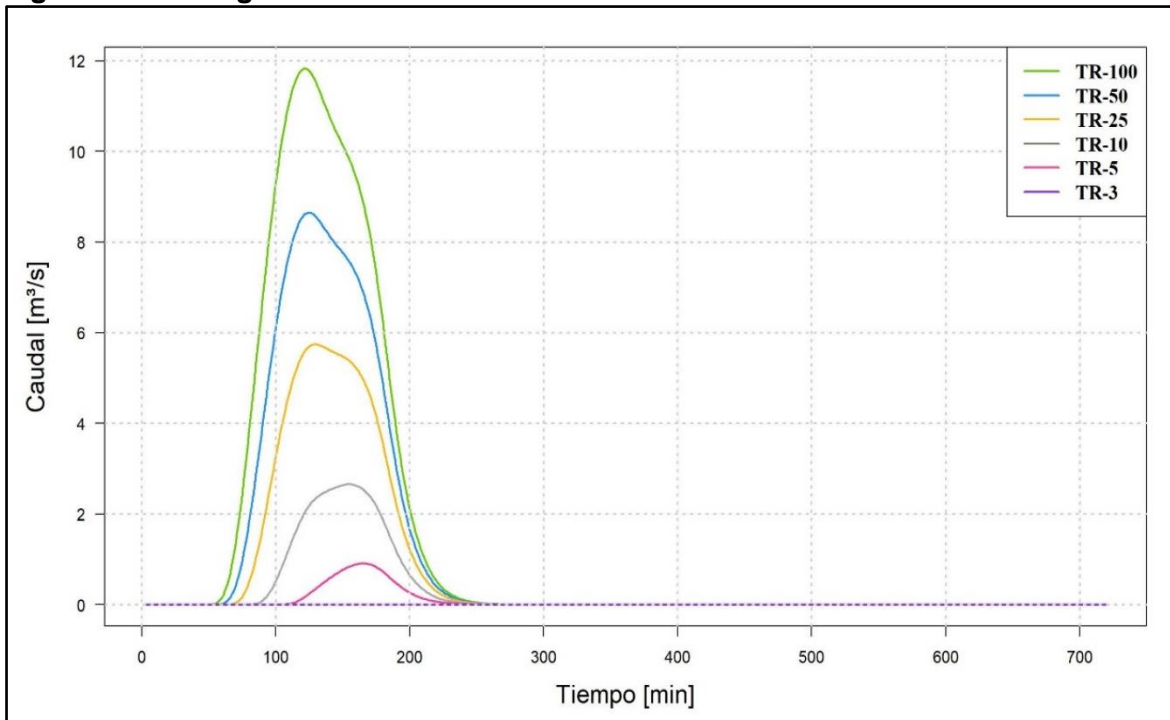
Fuente: WSP, 2019.

Figura 127 Hidrograma cuenca Quebrada La Floresta Subcuenca FLORESTA 4



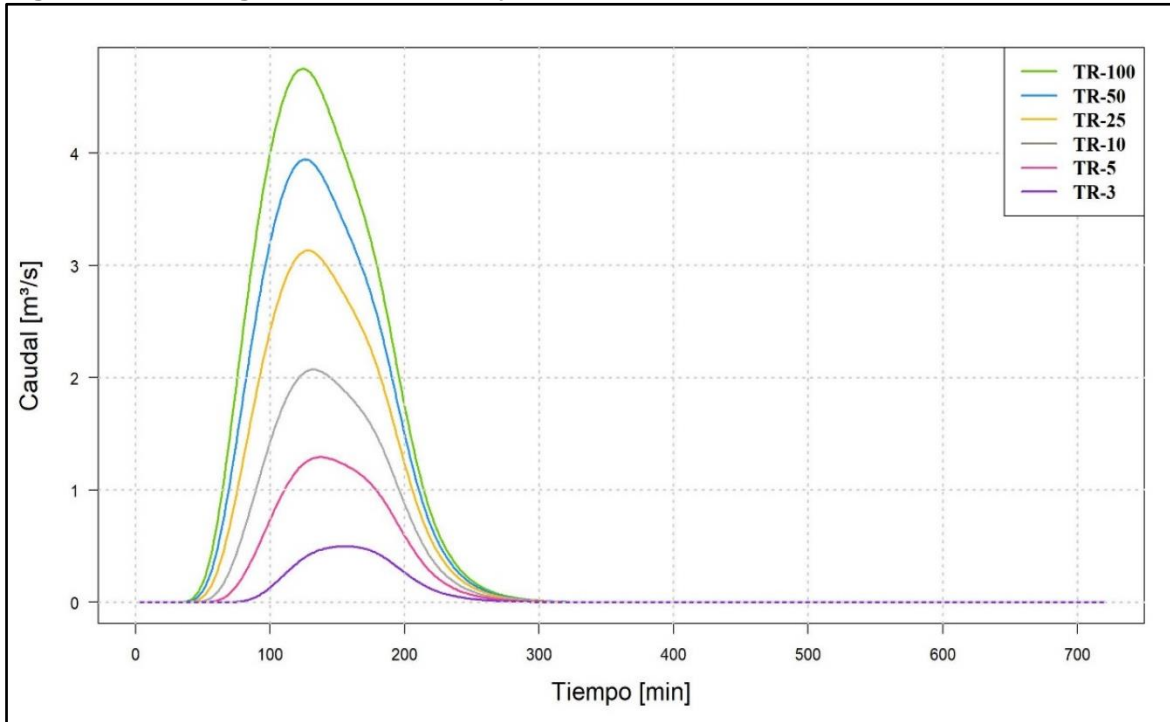
Fuente: WSP, 2019.

Figura 128 Hidrograma cuenca Quebrada La Floresta Subcuenca FLO 7M1



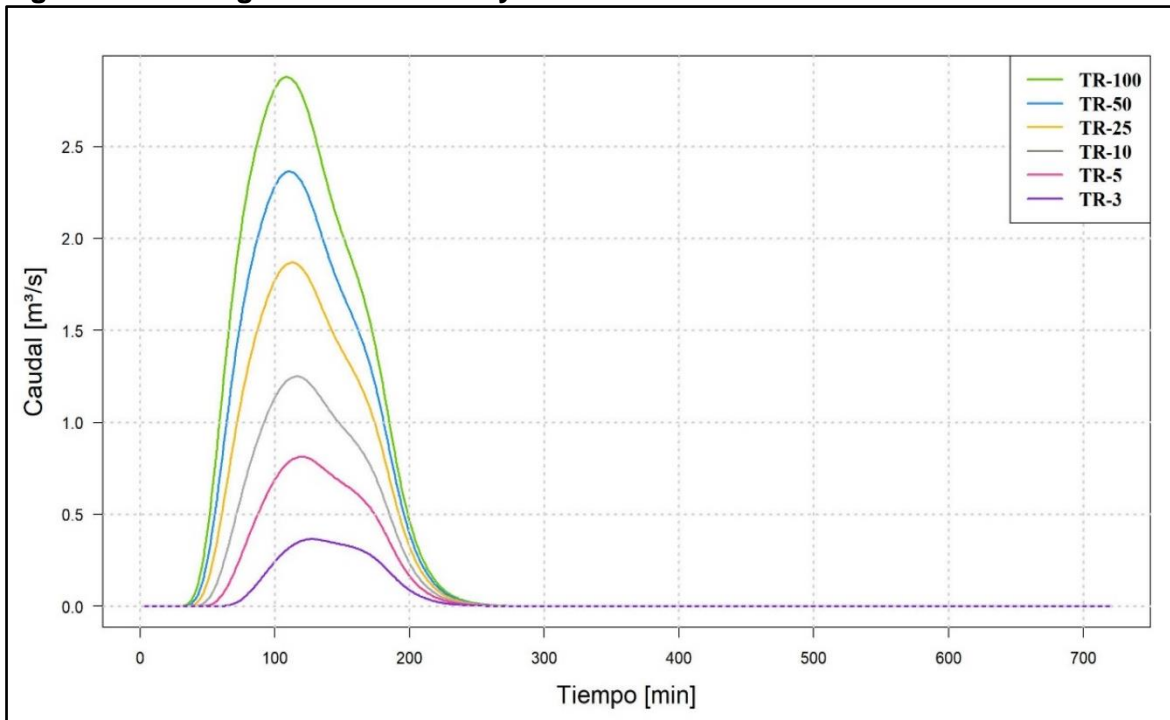
Fuente: WSP, 2019.

Figura 129 Hidrograma cuenca Guaymaral Subcuenca GUAY2



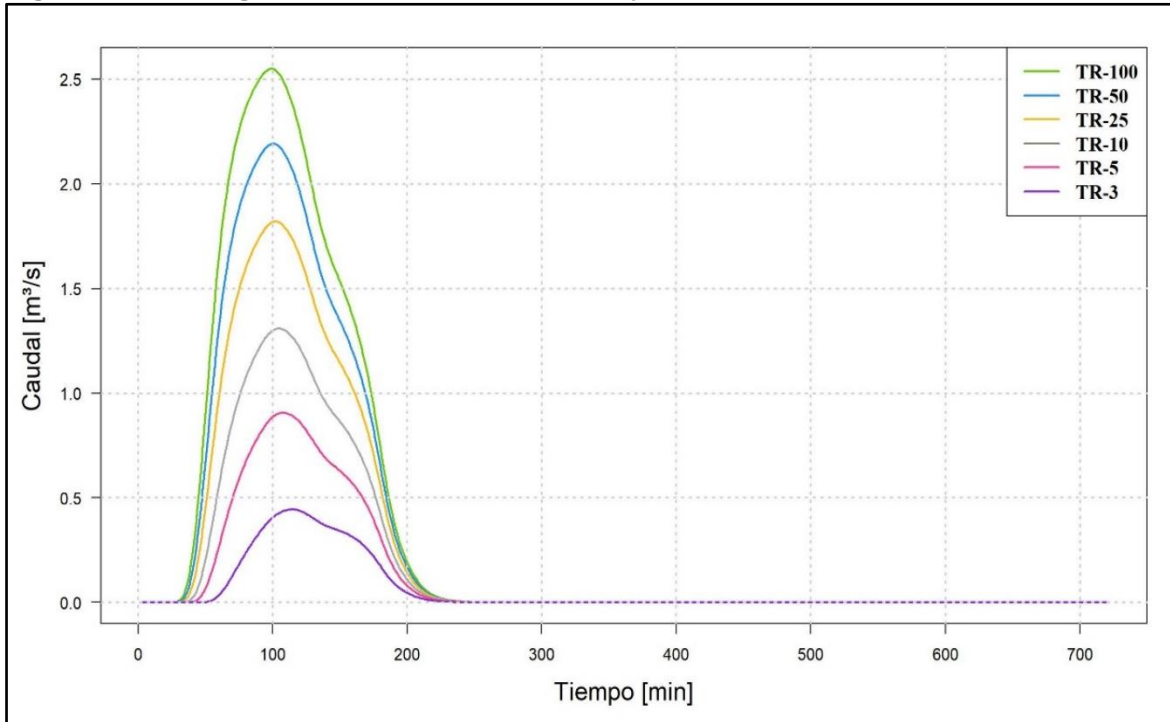
Fuente: WSP, 2019.

Figura 130 Hidrograma cuenca Guaymaral Subcuenca GUAY3



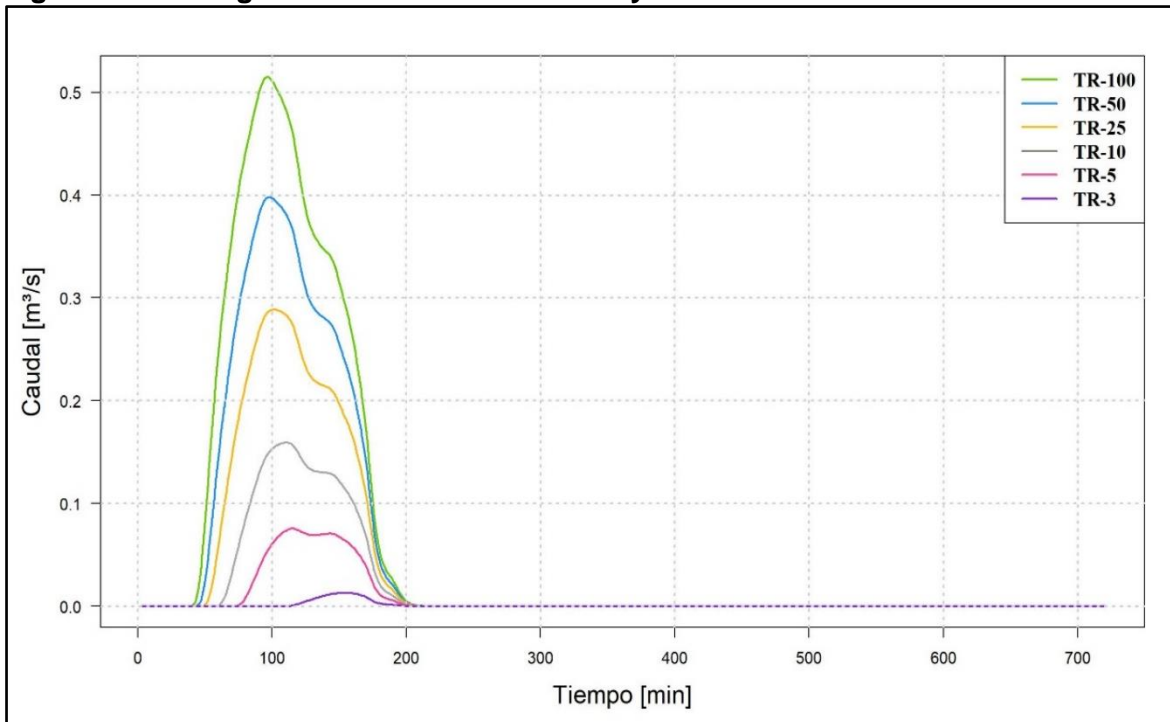
Fuente: WSP, 2019.

Figura 131 Hidrograma cuenca Humedal Guaymaral Subcuenca HG2



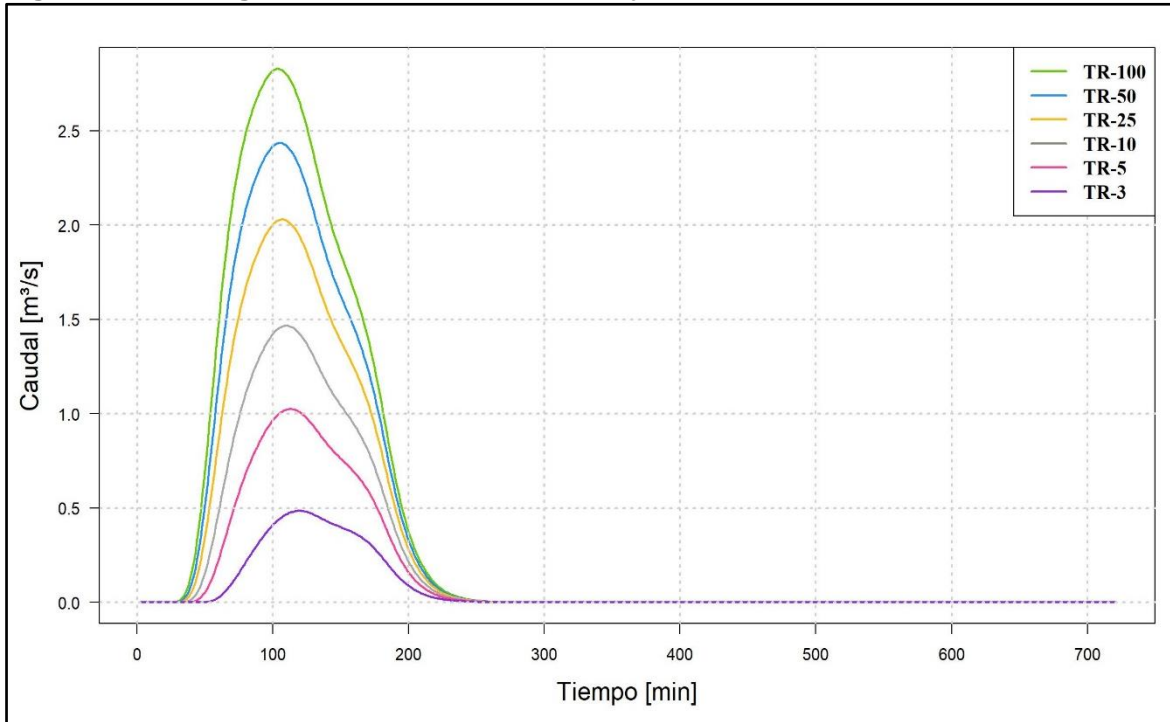
Fuente: WSP, 2019.

Figura 132 Hidrograma cuenca Humedal Guaymaral Subcuenca HG3



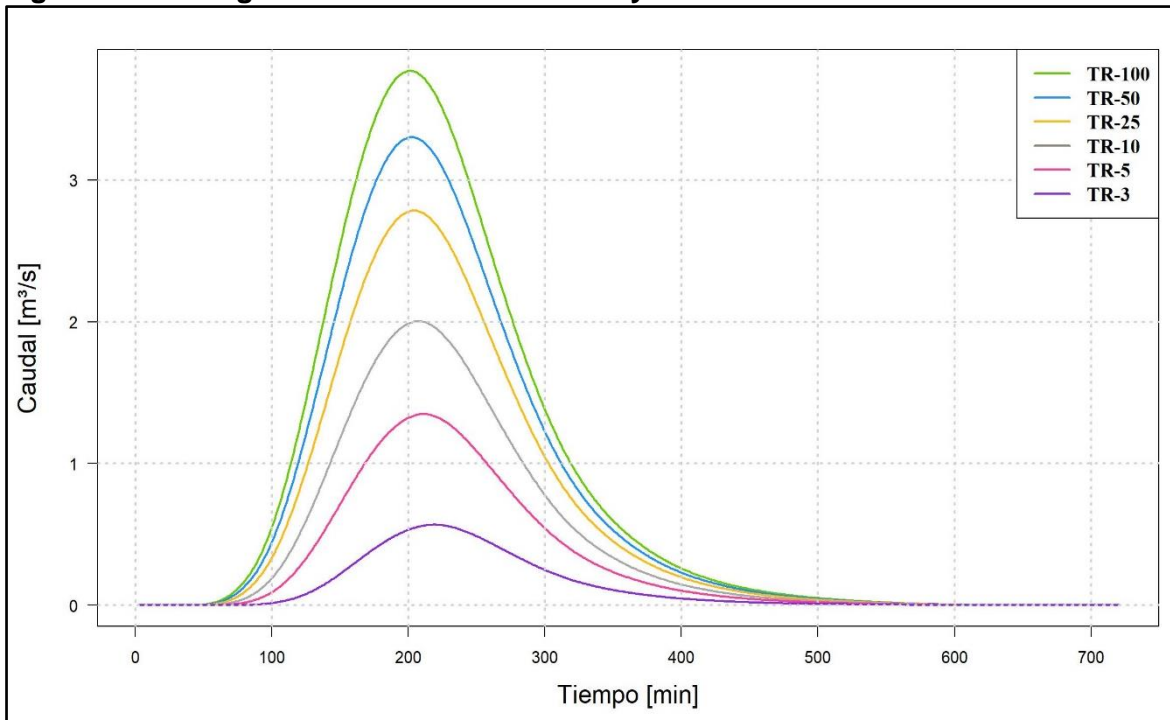
Fuente: WSP, 2019.

Figura 133 Hidrograma cuenca Humedal Guaymaral Subcuenca HGUAY 1-2



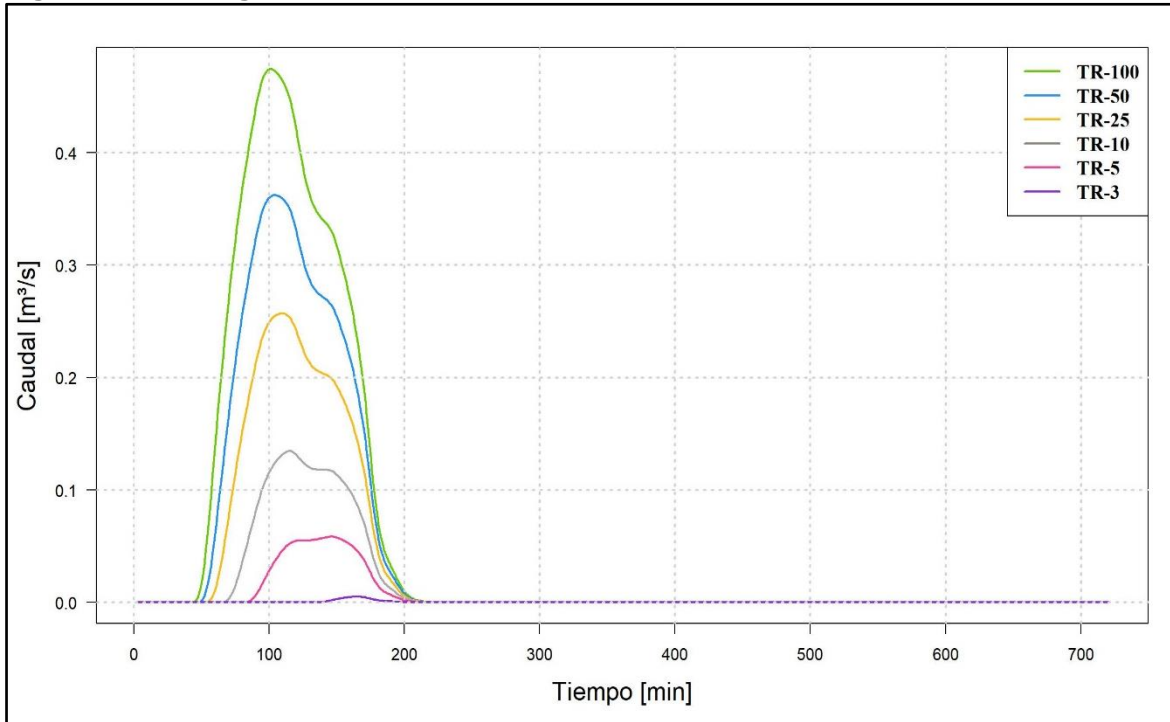
Fuente: WSP, 2019.

Figura 134 Hidrograma cuenca Humedal Guaymaral Subcuenca HGUAY 1-1



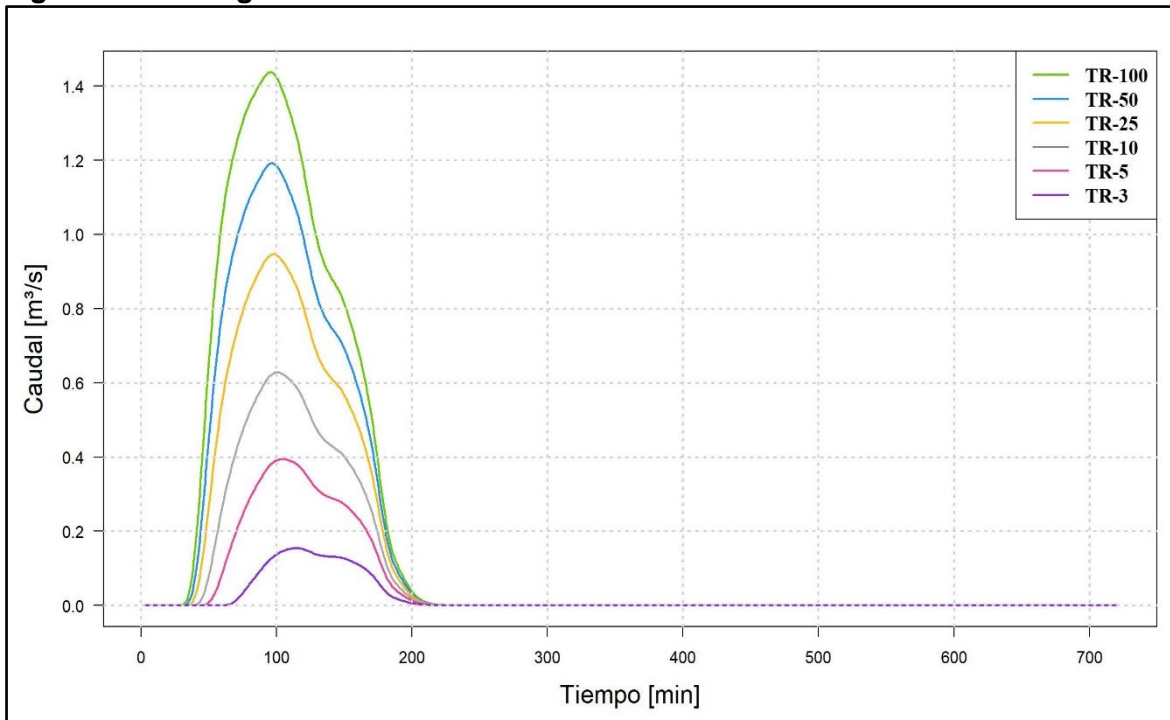
Fuente: WSP, 2019.

Figura 135 Hidrograma cuenca Quebrada N3vita Subcuenca NOVITA 2



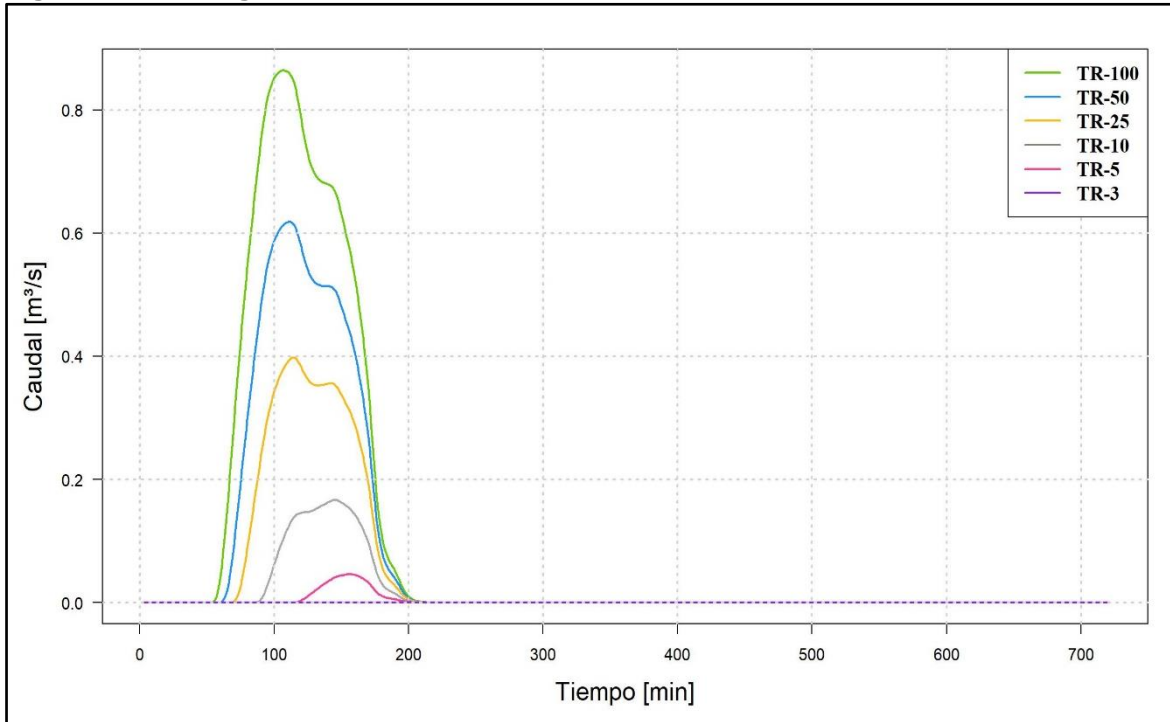
Fuente: WSP, 2019.

Figura 136 Hidrograma cuenca Quebrada N3vita Subcuenca NOVITA 3



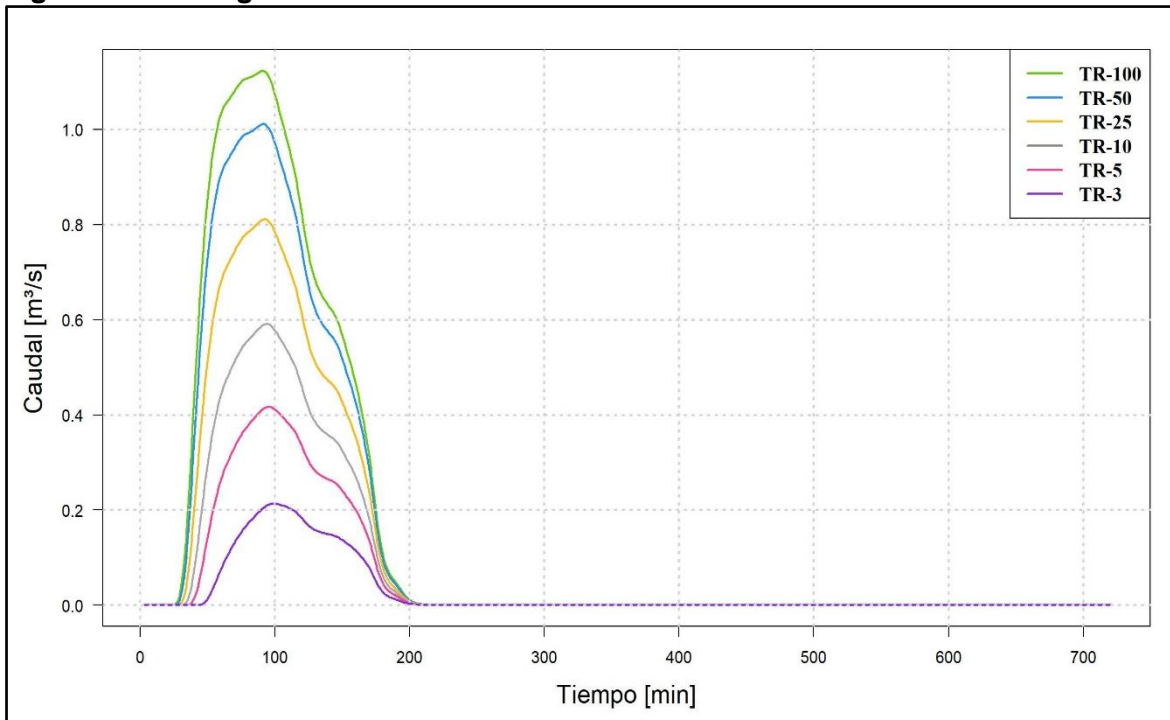
Fuente: WSP, 2019.

Figura 137 Hidrograma cuenca Quebrada N6vita Subcuenca NOV 7M1



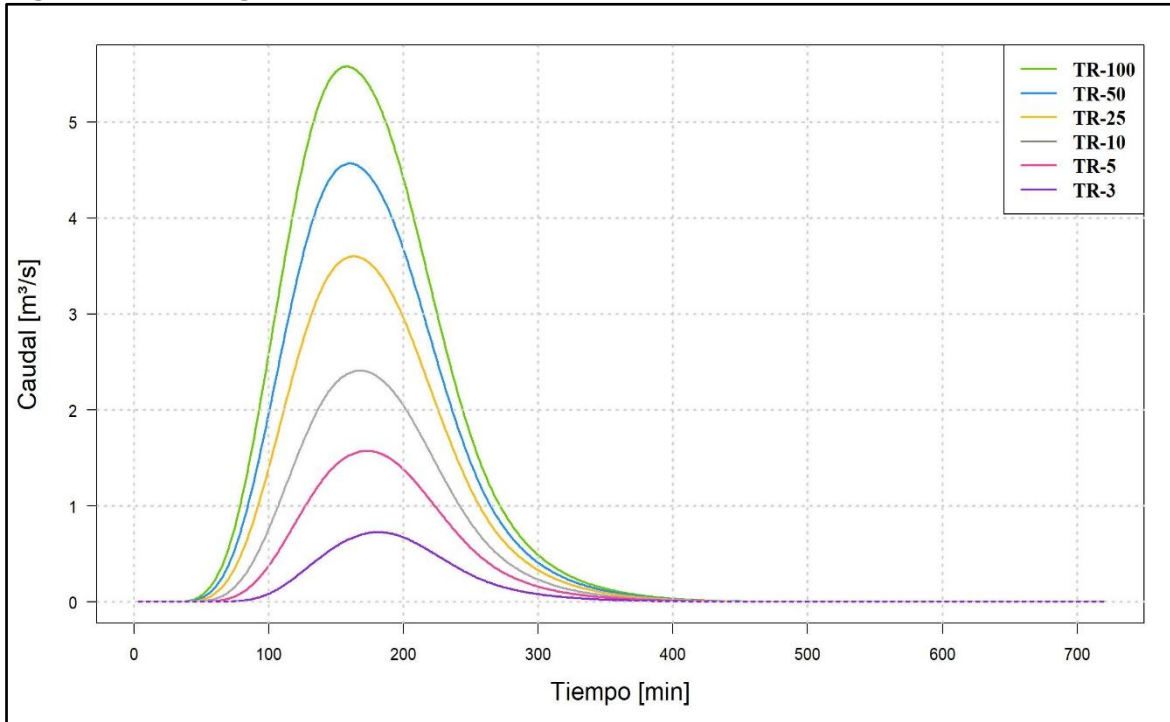
Fuente: WSP, 2019.

Figura 138 Hidrograma cuenca Occidente Subcuenca OCC3-1



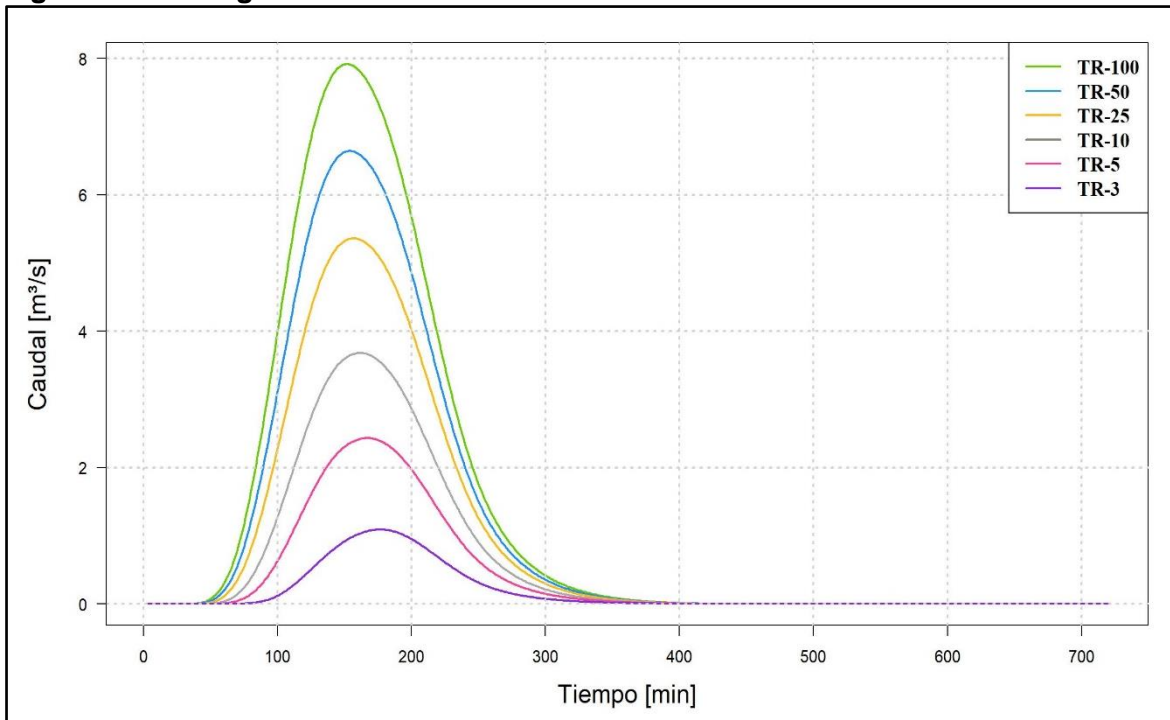
Fuente: WSP, 2019.

Figura 139 Hidrograma cuenca Occidente Subcuenca OCCIDENTE 1-1



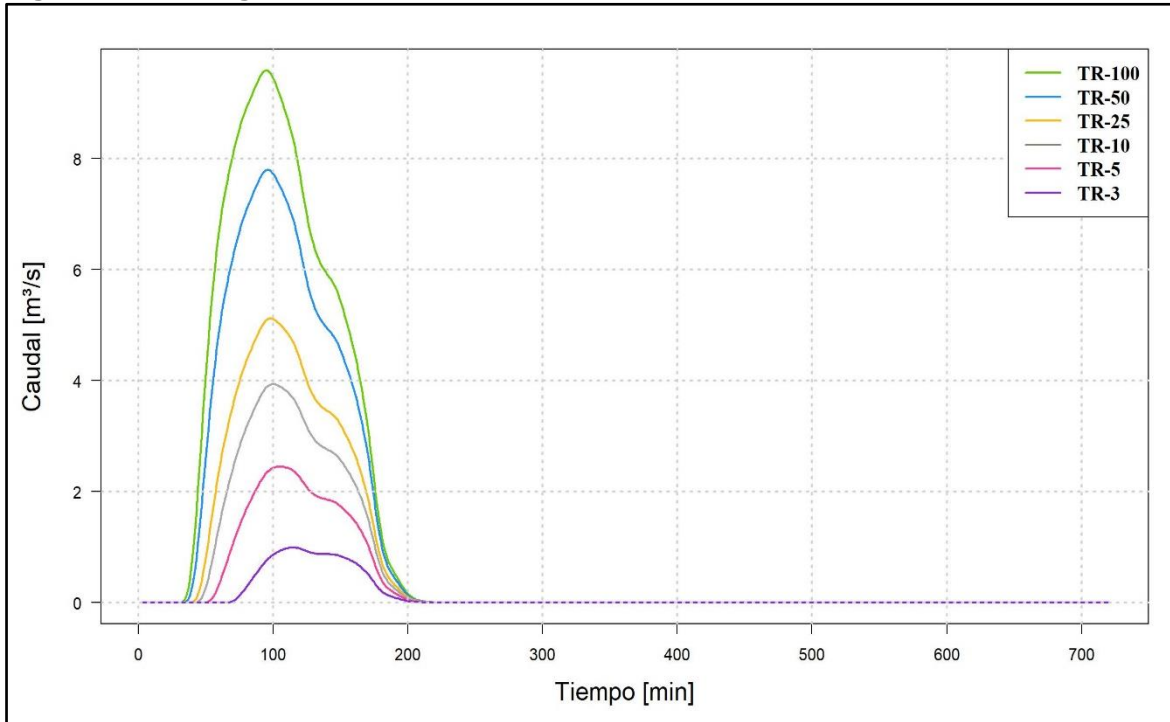
Fuente: WSP, 2019.

Figura 140 Hidrograma cuenca Occidente Subcuenca OCC 2



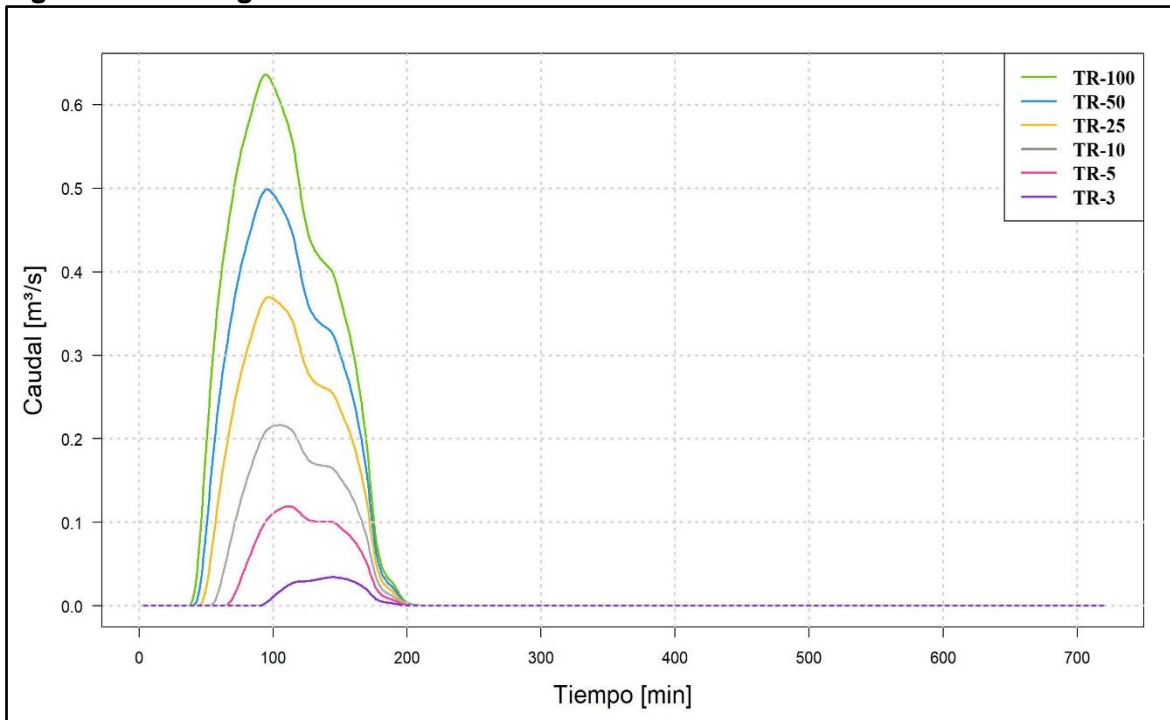
Fuente: WSP, 2019.

Figura 141 Hidrograma cuenca Occidente Subcuenca OCC 3



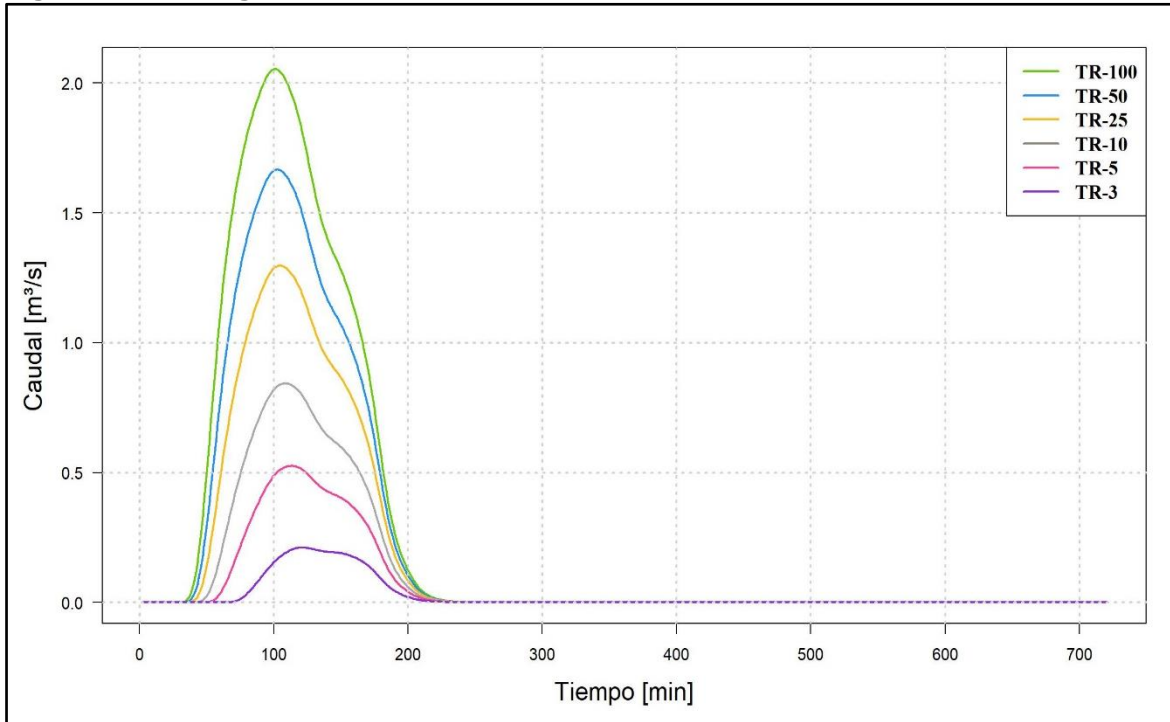
Fuente: WSP, 2019.

Figura 142 Hidrograma cuenca Patiño Subcuenca PATINO 3



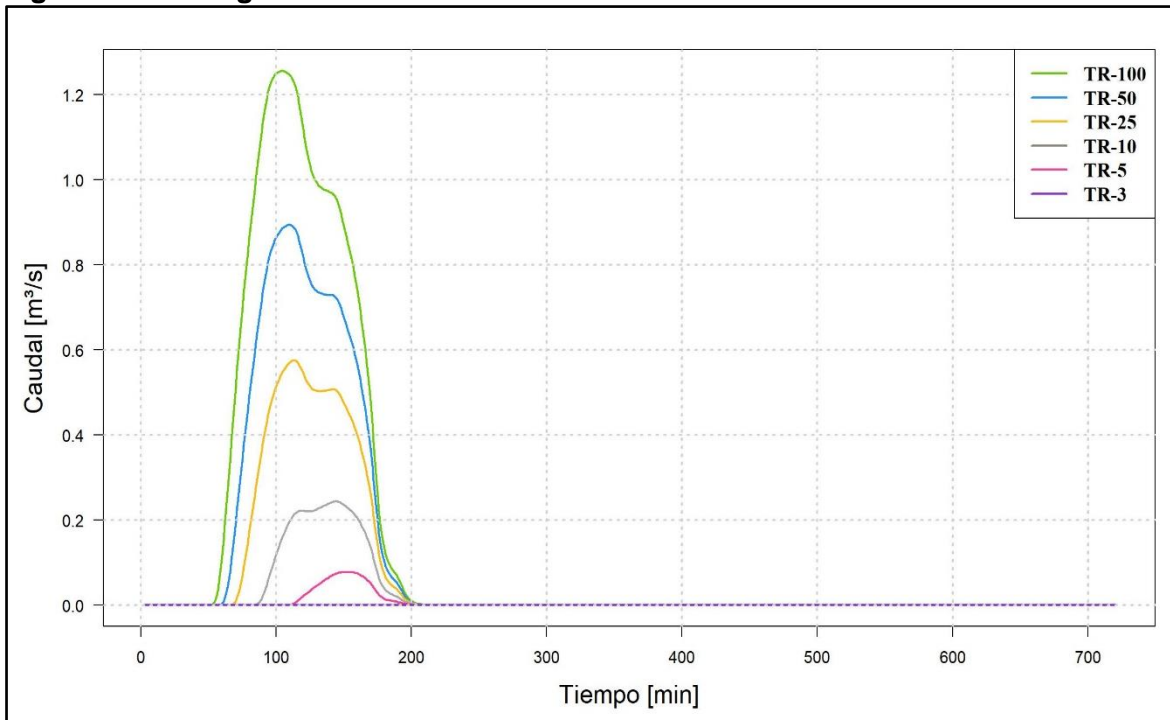
Fuente: WSP, 2019.

Figura 143 Hidrograma cuenca Patiño Subcuenca PATINO 4



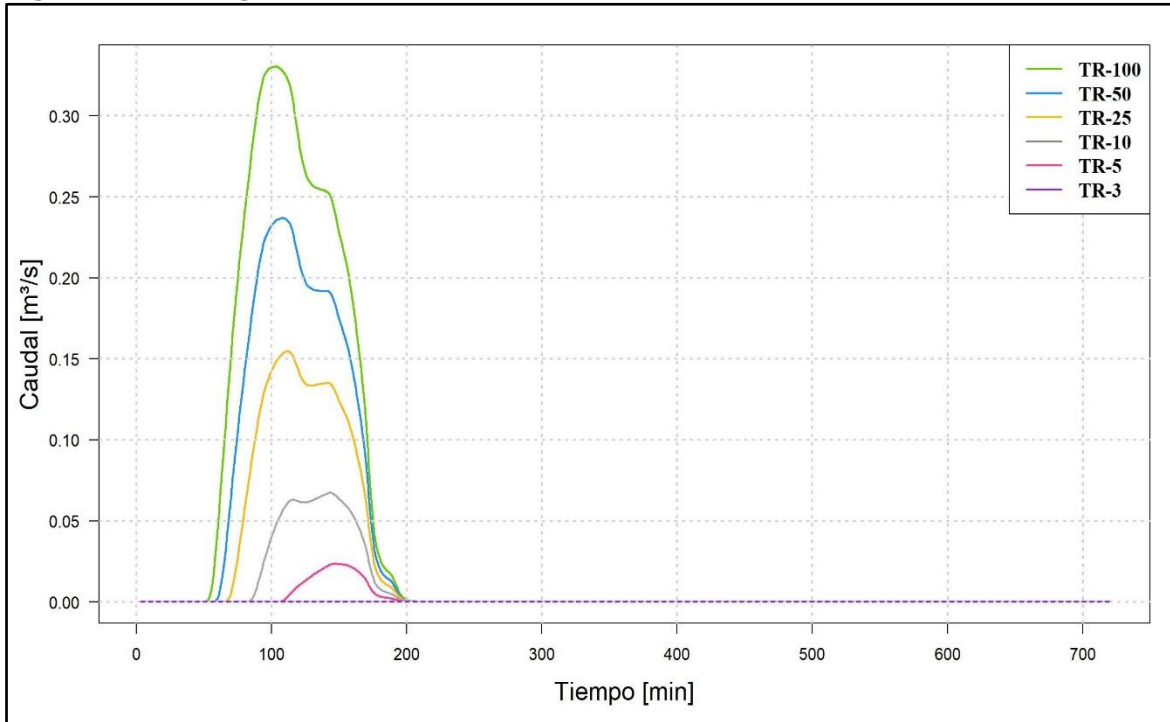
Fuente: WSP, 2019.

Figura 144 Hidrograma cuenca Patiño Subcuenca PAT 7M1



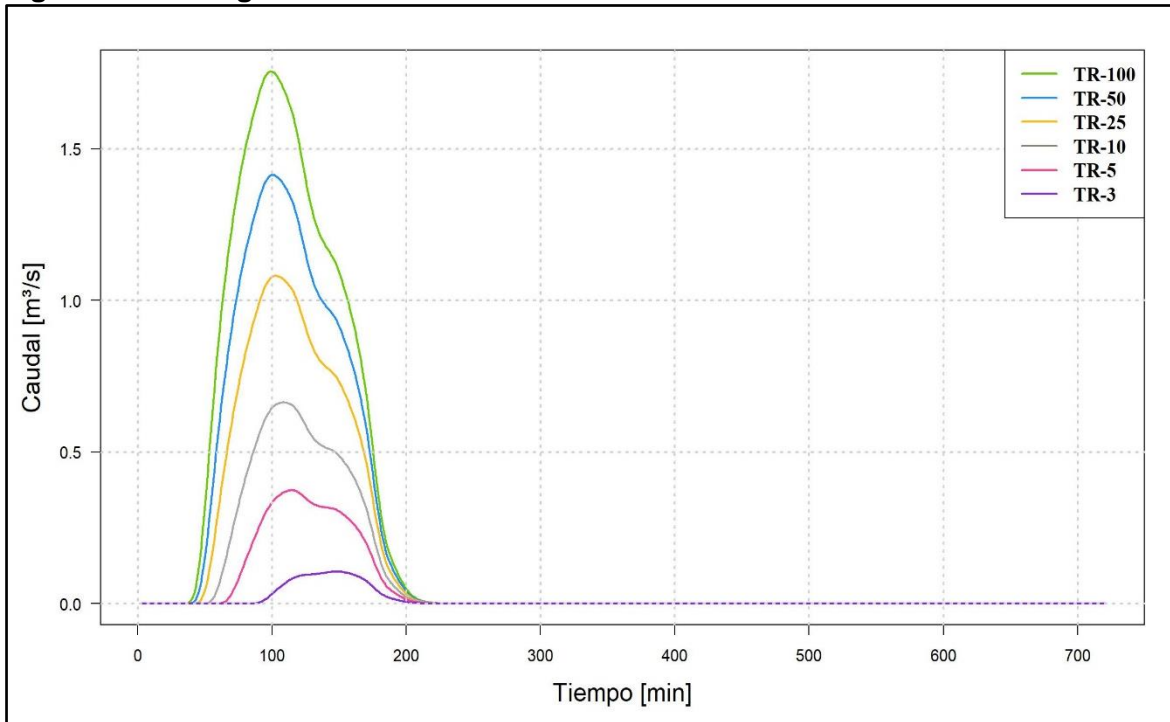
Fuente: WSP, 2019.

Figura 145 Hidrograma cuenca Patiño Subcuenca PAT 7M2



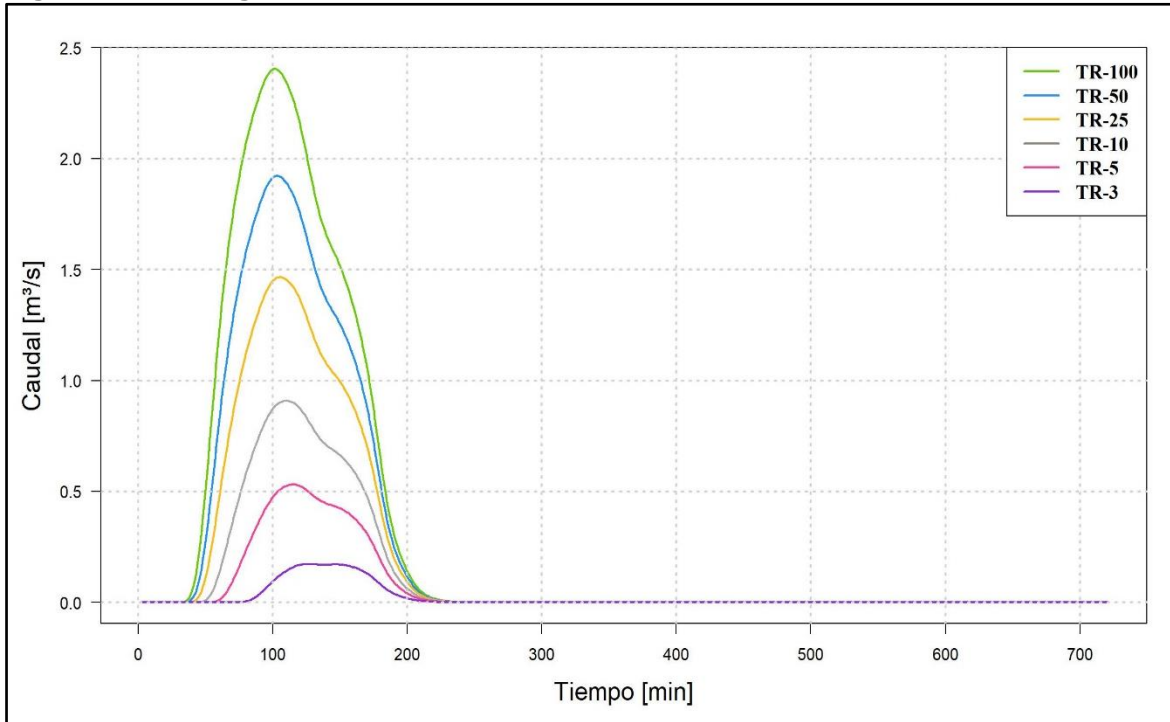
Fuente: WSP, 2019.

Figura 146 Hidrograma cuenca Quebrada Las Pilas Subcuenca PILAS 2



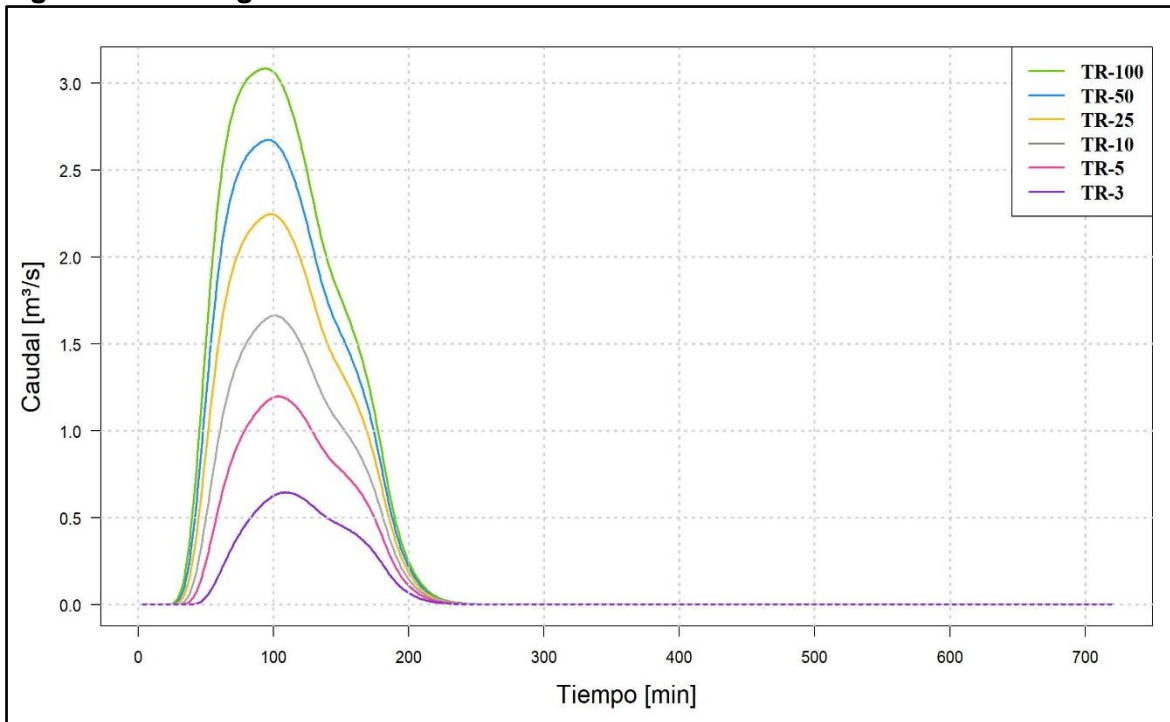
Fuente: WSP, 2019.

Figura 147 Hidrograma cuenca Quebrada Las Pilas Subcuenca PILAS 3



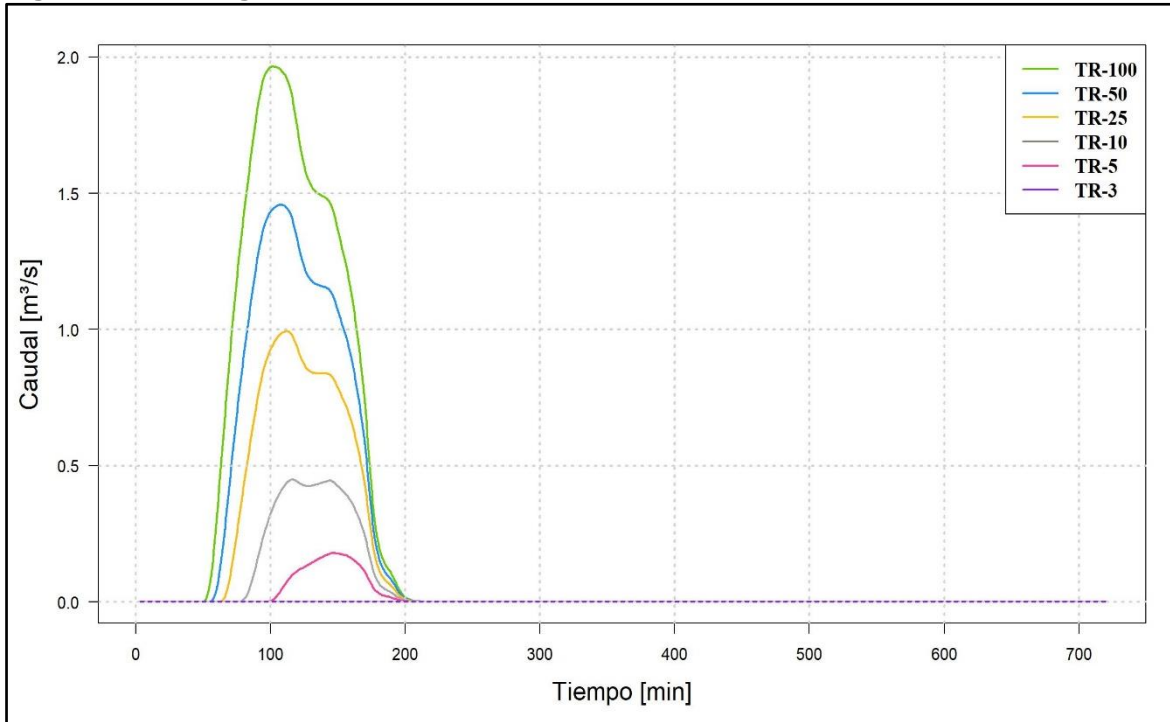
Fuente: WSP, 2019.

Figura 148 Hidrograma cuenca Quebrada Las Pilas Subcuenca PILAS 4



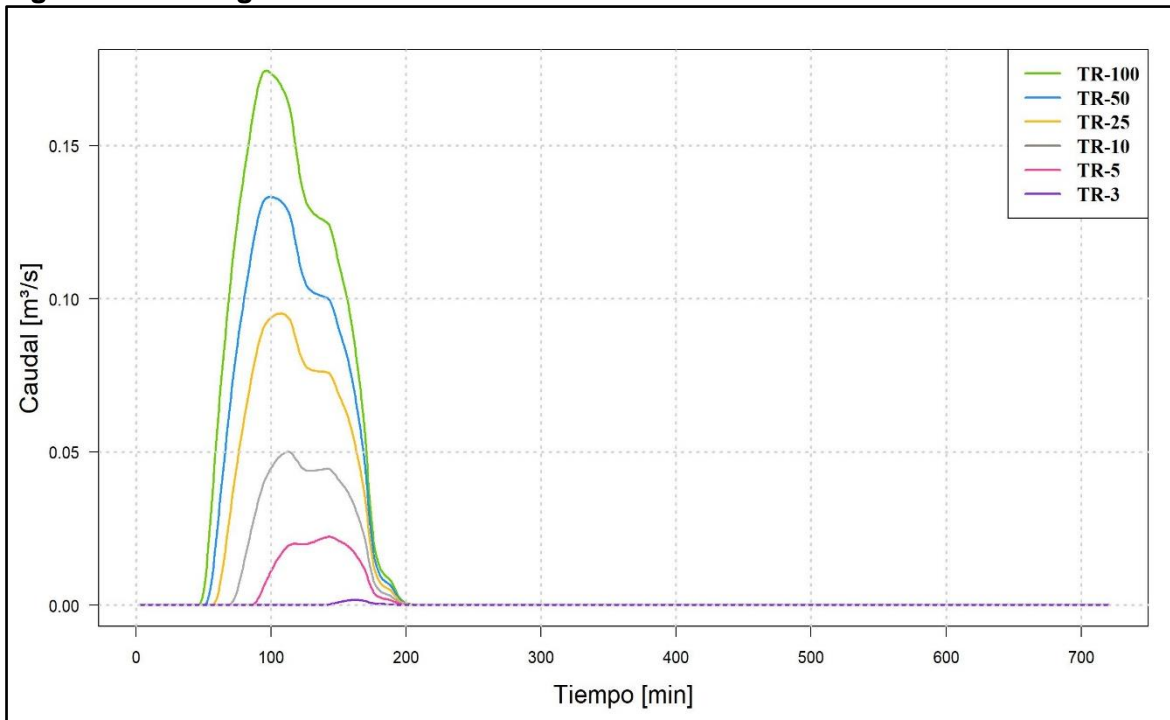
Fuente: WSP, 2019.

Figura 149 Hidrograma cuenca Quebrada Las Pilas Subcuenca PIL 7M1



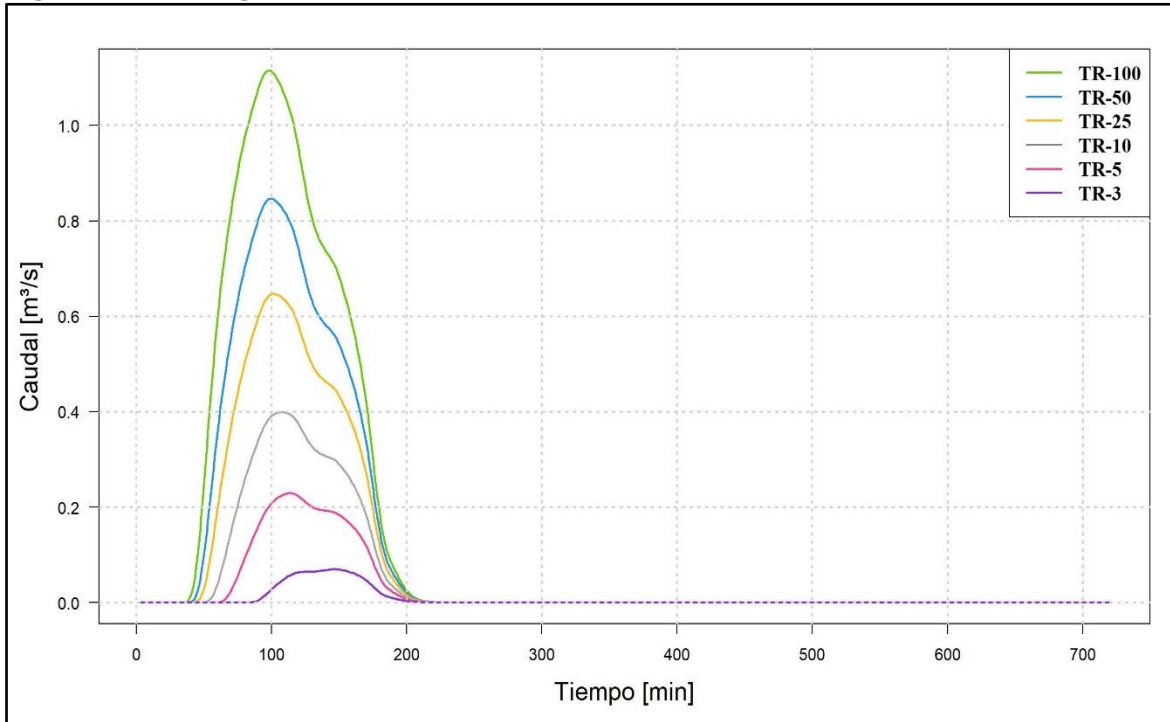
Fuente: WSP, 2019.

Figura 150 Hidrograma cuenca Quebrada San Juan Subcuenca SAN JUAN 3



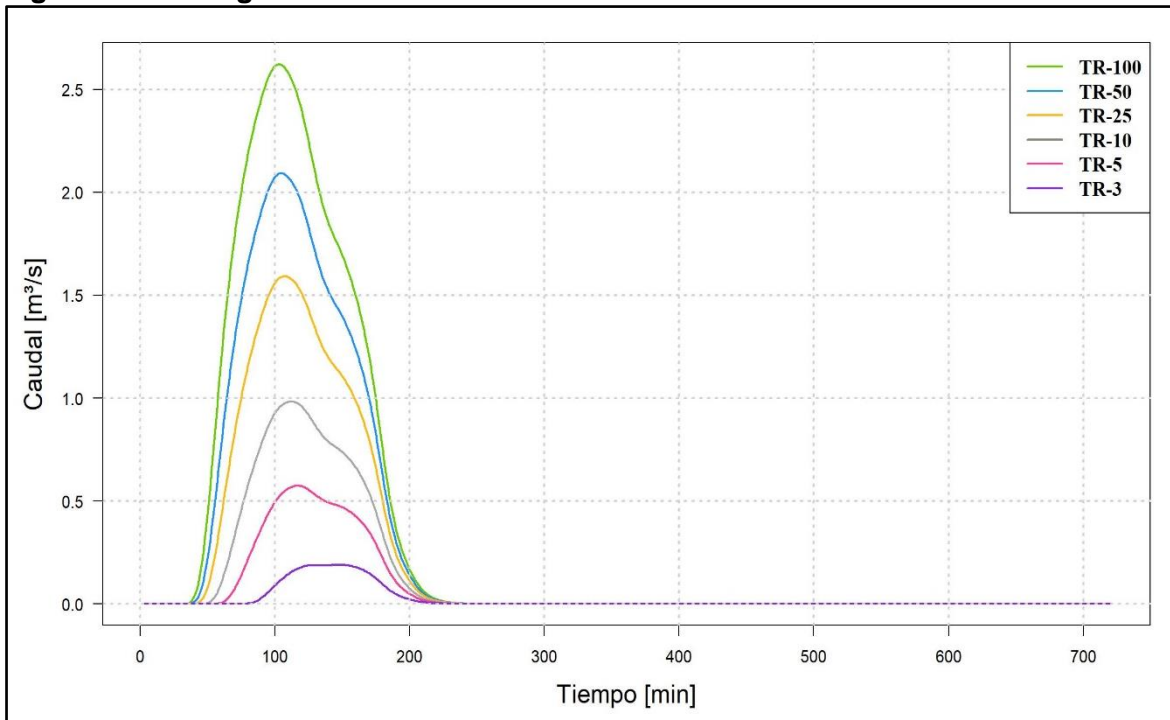
Fuente: WSP, 2019.

Figura 151 Hidrograma cuenca Quebrada San Juan Subcuenca SAN JUAN 4



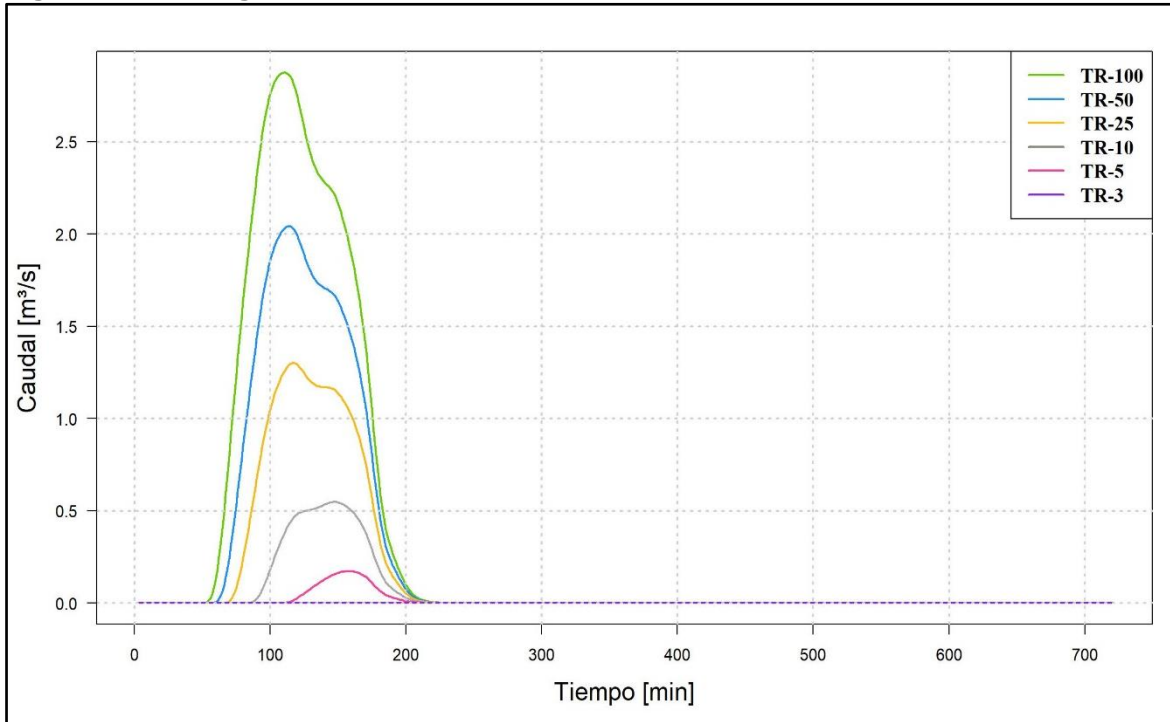
Fuente: WSP, 2019.

Figura 152 Hidrograma cuenca Quebrada San Juan Subcuenca SAN JUAN 5



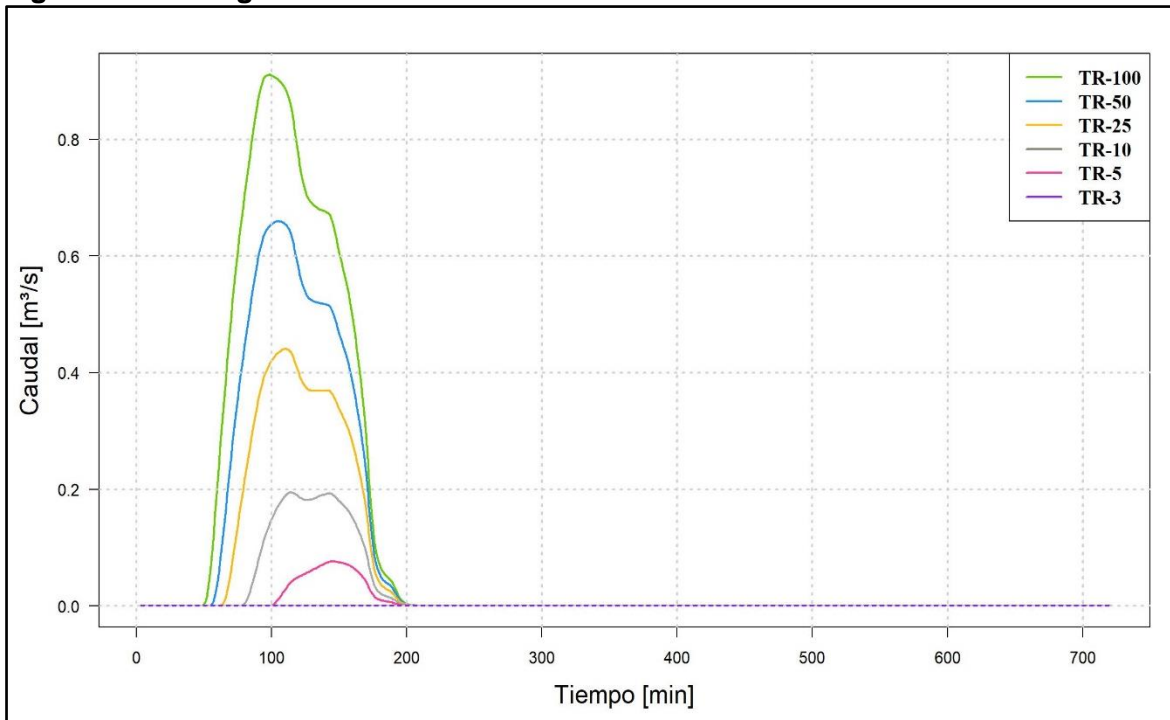
Fuente: WSP, 2019.

Figura 153 Hidrograma cuenca Quebrada San Juan Subcuenca SAN 7M1



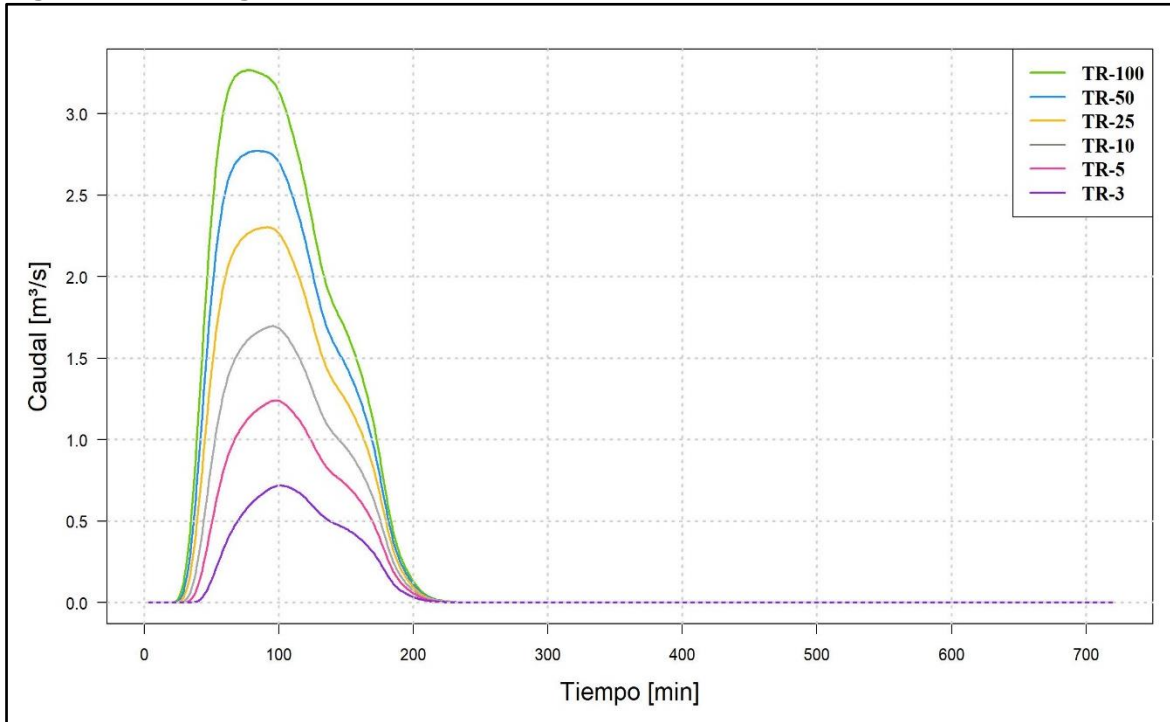
Fuente: WSP, 2019.

Figura 154 Hidrograma cuenca Quebrada San Juan Subcuenca SAN 7M2



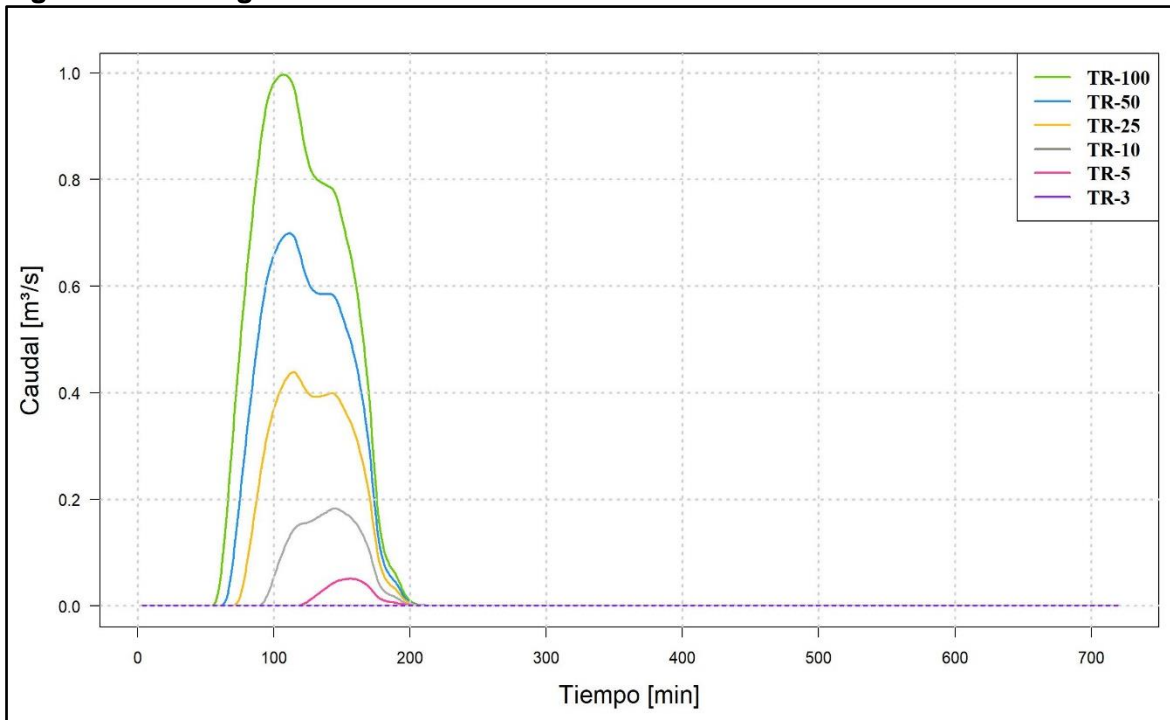
Fuente: WSP, 2019.

Figura 155 Hidrograma cuenca Quebrada Tibabita Subcuenca TBT1



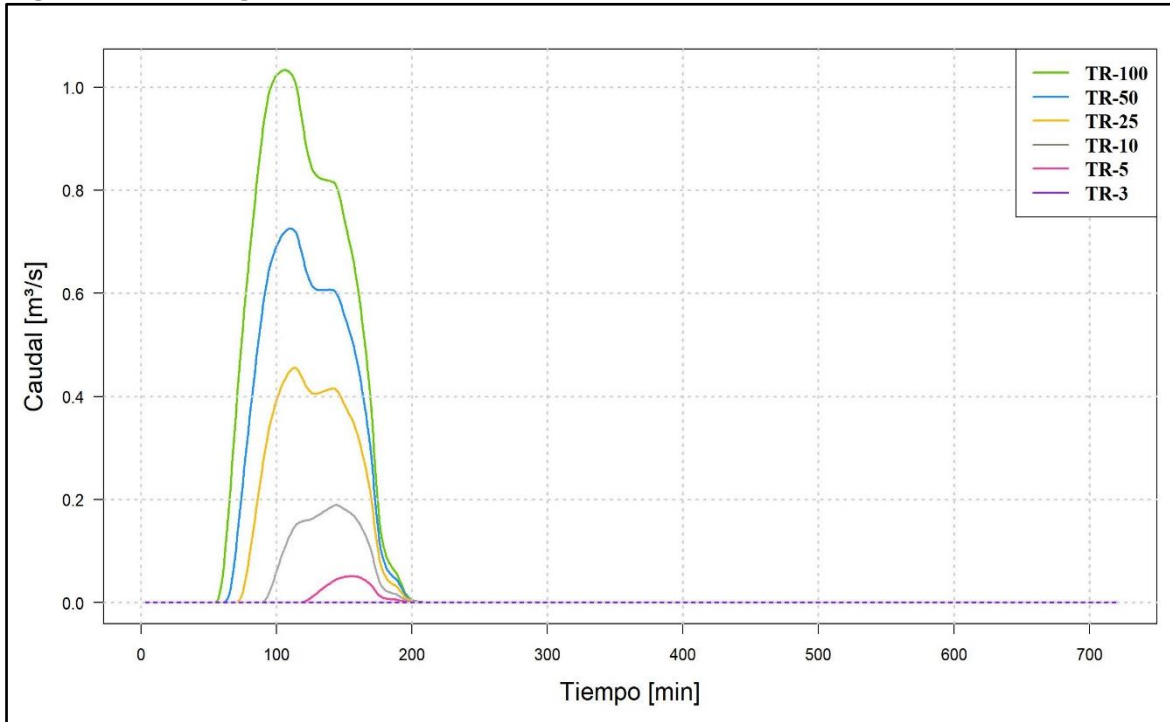
Fuente: WSP, 2019.

Figura 156 Hidrograma cuenca Quebrada Tibabita Subcuenca TBT 7M1



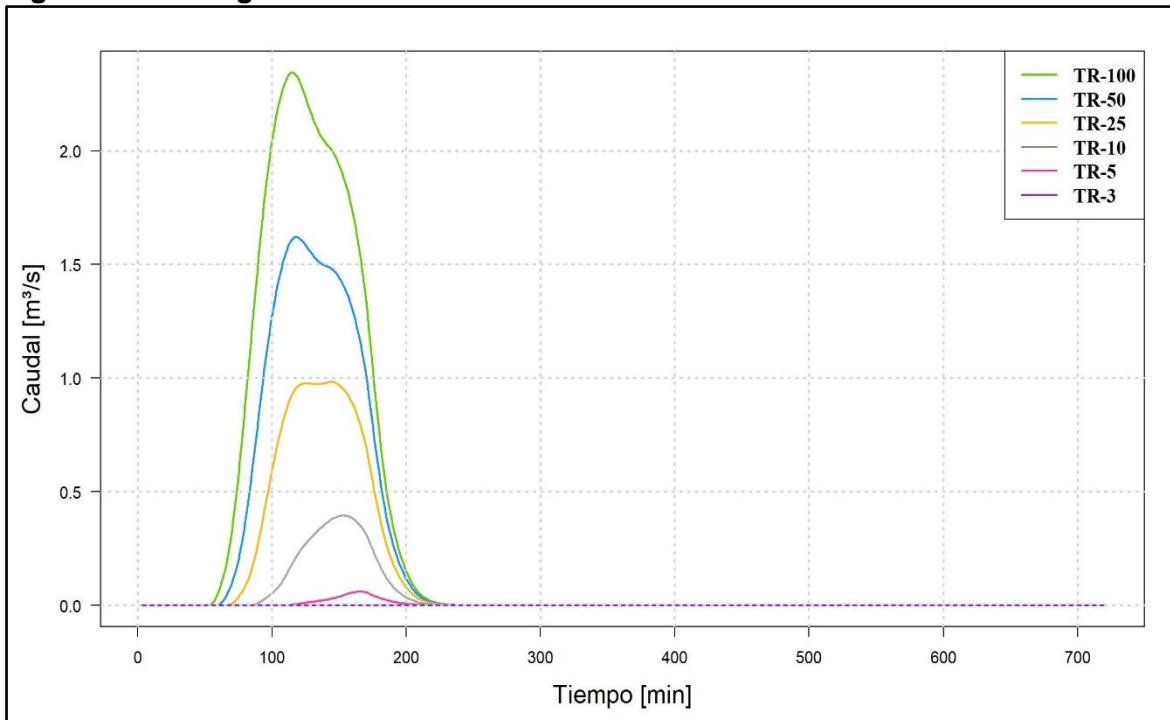
Fuente: WSP, 2019.

Figura 157 Hidrograma cuenca Quebrada Tibabita Subcuenca TBT 7M2



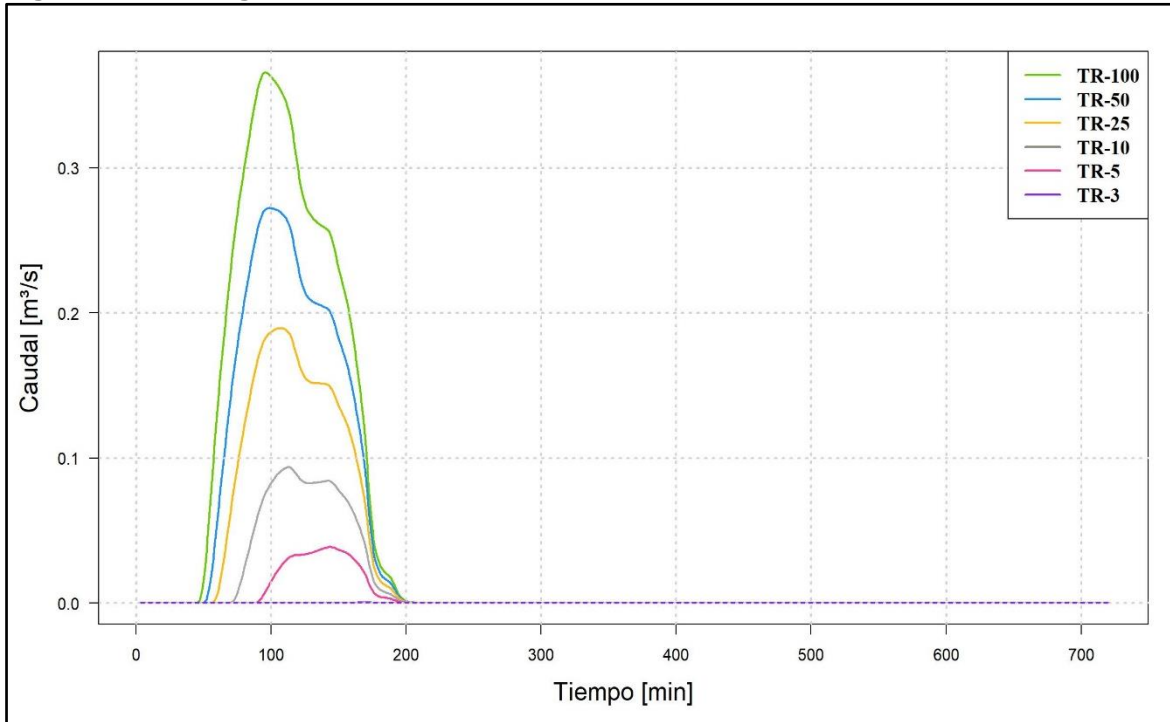
Fuente: WSP, 2019.

Figura 158 Hidrograma cuenca Quebrada Torca Subcuenca TOR1



Fuente: WSP, 2019.

Figura 159 Hidrograma cuenca Quebrada Torca Subcuenca TORCA4



Fuente: WSP, 2019.

De acuerdo con los resultados obtenidos de los hidrogramas unitarios del SCS, en la Tabla 35 se presentan los caudales pico para cada una de las cuencas analizadas en los diferentes periodos de retorno, para la condición Actual. En el Anexo 2 Análisis de Caudales, 2.5 Hidrogramas de crecientes, se presenta la información original procesada para la condición actual del proyecto.

Tabla 35 Caudales máximos para la Condición Actual

| ID CUENCA | CAUDALES (m3/s) - PERIODOS DE RETORNO | | | | | |
|-------------------|---------------------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|
| | 3 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 |
| AGC_7M1 | 0.010 | 0.100 | 0.292 | 0.673 | 1.043 | 1.461 |
| AGC_7M2 | 0.010 | 0.052 | 0.137 | 0.310 | 0.469 | 0.651 |
| AGUAS_CALIENTES_3 | 0.280 | 0.585 | 0.875 | 1.276 | 1.587 | 1.911 |
| AGUAS_CALIENTES_4 | 0.586 | 1.183 | 1.745 | 2.528 | 3.147 | 3.785 |
| CANAL_TORCA_1 | 32.038 | 47.789 | 68.394 | 95.124 | 114.960 | 134.540 |
| CANAL_TORCA_2 | 1.255 | 4.770 | 3.439 | 4.770 | 5.761 | 6.730 |
| CANAL_TORCA_3 | 1.641 | 2.300 | 3.690 | 5.023 | 6.029 | 6.930 |
| FLO1 | 0.010 | 0.125 | 0.281 | 0.540 | 0.755 | 0.986 |
| FLO_7M1 | 0.178 | 0.453 | 0.720 | 1.083 | 1.359 | 1.636 |
| FLORESTA3 | 0.119 | 0.283 | 0.468 | 0.698 | 0.872 | 1.046 |
| FLORESTA4 | 0.010 | 0.910 | 2.657 | 5.743 | 8.648 | 11.827 |

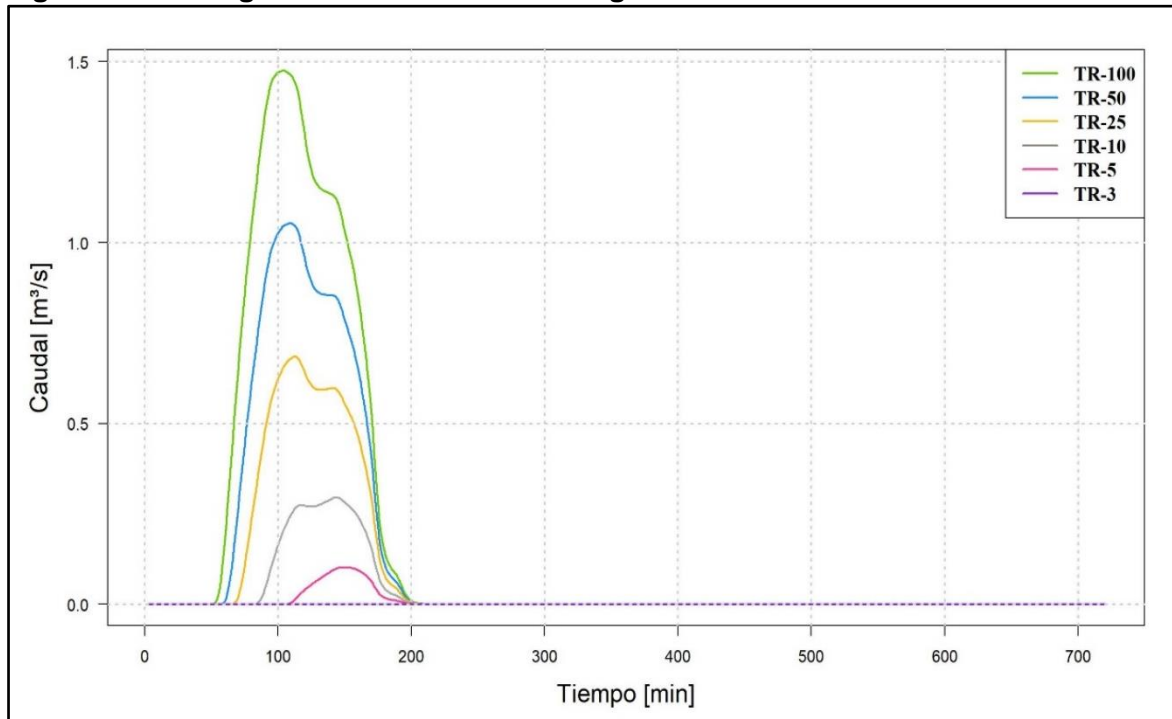
| ID CUENCA | CAUDALES (m3/s) - PERIODOS DE RETORNO | | | | | |
|---------------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 3 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 |
| GUAY2 | 0.499 | 1.293 | 2.074 | 3.134 | 3.946 | 4.753 |
| GUAY3 | 0.365 | 0.814 | 1.250 | 1.868 | 2.363 | 2.878 |
| HG2 | 0.444 | 0.906 | 1.309 | 1.821 | 2.192 | 2.550 |
| HG3 | 0.013 | 0.076 | 0.159 | 0.289 | 0.398 | 0.515 |
| HGUAY_1-2 | 0.485 | 1.024 | 1.467 | 2.030 | 2.437 | 2.829 |
| HGUAY_1_1 | 0.568 | 1.349 | 2.004 | 2.785 | 3.302 | 3.770 |
| NOVITA_2 | 0.005 | 0.059 | 0.135 | 0.257 | 0.362 | 0.475 |
| NOVITA_3 | 0.155 | 0.395 | 0.628 | 0.947 | 1.192 | 1.437 |
| NOV_7M1 | 0.010 | 0.046 | 0.167 | 0.398 | 0.619 | 0.864 |
| OCC3_1 | 0.213 | 0.417 | 0.591 | 0.811 | 1.012 | 1.123 |
| OCC_2 | 0.726 | 1.574 | 2.410 | 3.601 | 4.568 | 5.579 |
| OCC_3 | 1.091 | 2.434 | 3.681 | 5.363 | 6.644 | 7.920 |
| OCCIDENTE_1-1 | 0.996 | 2.451 | 3.936 | 5.120 | 7.801 | 9.592 |
| PATINO_3 | 0.034 | 0.119 | 0.216 | 0.370 | 0.499 | 0.636 |
| PATINO_4 | 0.212 | 0.526 | 0.843 | 1.298 | 1.668 | 2.055 |
| PAT_7M1 | 0.010 | 0.078 | 0.245 | 0.576 | 0.894 | 1.256 |
| PAT_7M2 | 0.010 | 0.023 | 0.067 | 0.155 | 0.237 | 0.330 |
| PILAS_2 | 0.106 | 0.374 | 0.664 | 1.082 | 1.414 | 1.756 |
| PILAS_3 | 0.172 | 0.532 | 0.909 | 1.466 | 1.923 | 2.405 |
| PILAS_4 | 0.646 | 1.199 | 1.665 | 2.248 | 2.675 | 3.085 |
| PIL_7M1 | 0.000 | 0.179 | 0.449 | 0.995 | 1.458 | 1.966 |
| SANJUAN_3 | 0.002 | 0.022 | 0.050 | 0.095 | 0.133 | 0.174 |
| SANJUAN_4 | 0.070 | 0.229 | 0.399 | 0.647 | 0.847 | 1.116 |
| SANJUAN_5 | 0.190 | 0.575 | 0.984 | 1.593 | 2.093 | 2.623 |
| SAN_7M1 | 0.010 | 0.173 | 0.549 | 1.302 | 2.042 | 2.875 |
| SAN_7M2 | 0.010 | 0.076 | 0.195 | 0.440 | 0.660 | 0.911 |
| TBT1 | 0.718 | 1.241 | 1.696 | 2.303 | 2.770 | 3.266 |
| TBT_7M1 | 0.010 | 0.051 | 0.183 | 0.439 | 0.699 | 0.997 |
| TBT_7M2 | 0.010 | 0.052 | 0.189 | 0.455 | 0.726 | 1.033 |
| TOR1 | 0.010 | 0.061 | 0.396 | 0.984 | 1.621 | 2.346 |
| TORCA4 | 0.010 | 0.039 | 0.094 | 0.190 | 0.272 | 0.366 |

Fuente: WSP, 2019.

5.8.3.2.2 Condición Futura

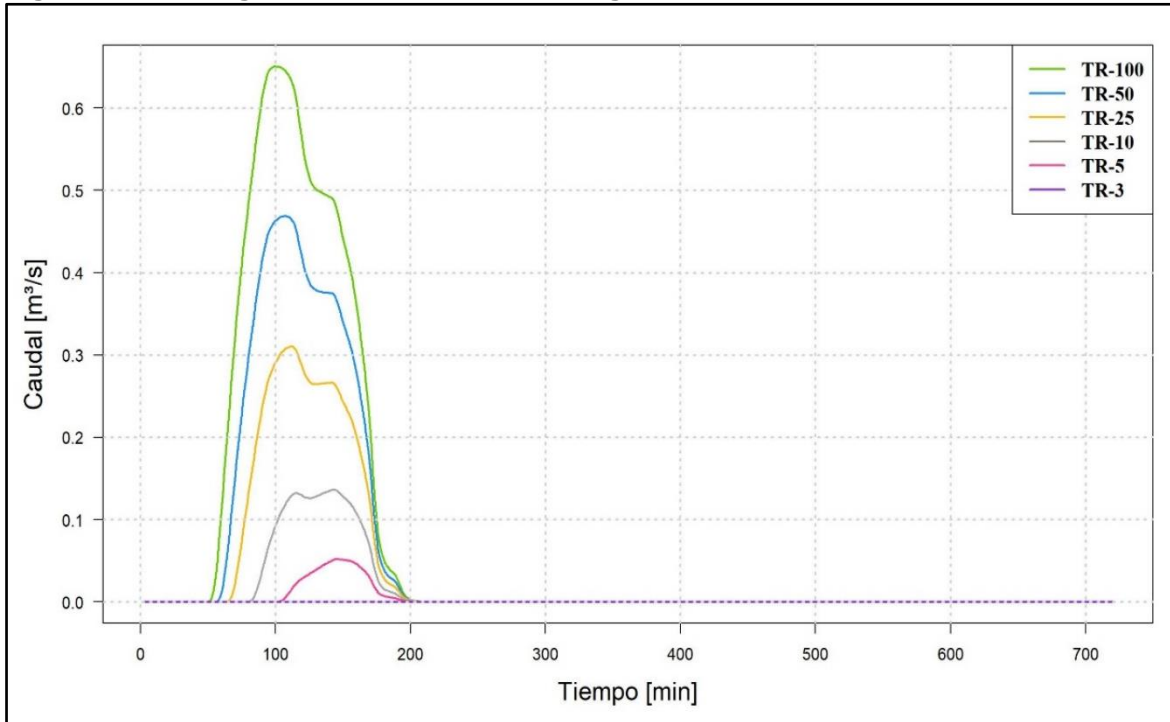
Se denomina Condición Futura al escenario que contempla la cobertura y uso del suelo que se proyecta para la zona, según los desarrollos urbanísticos planteados y las coberturas especificadas por el Decreto 088 de 2017, al cual se le ha aplicado un evento de precipitación con un Tr de 100 años. En la Figura 160 a la Figura 201 se presentan los hidrogramas obtenidos por el método del SCS, para diferentes periodos de retorno, para las cuencas de drenaje en la Condición Futura.

Figura 160 Hidrograma cuenca Quebrada Aguascalientes Subcuenca AGC-7M1



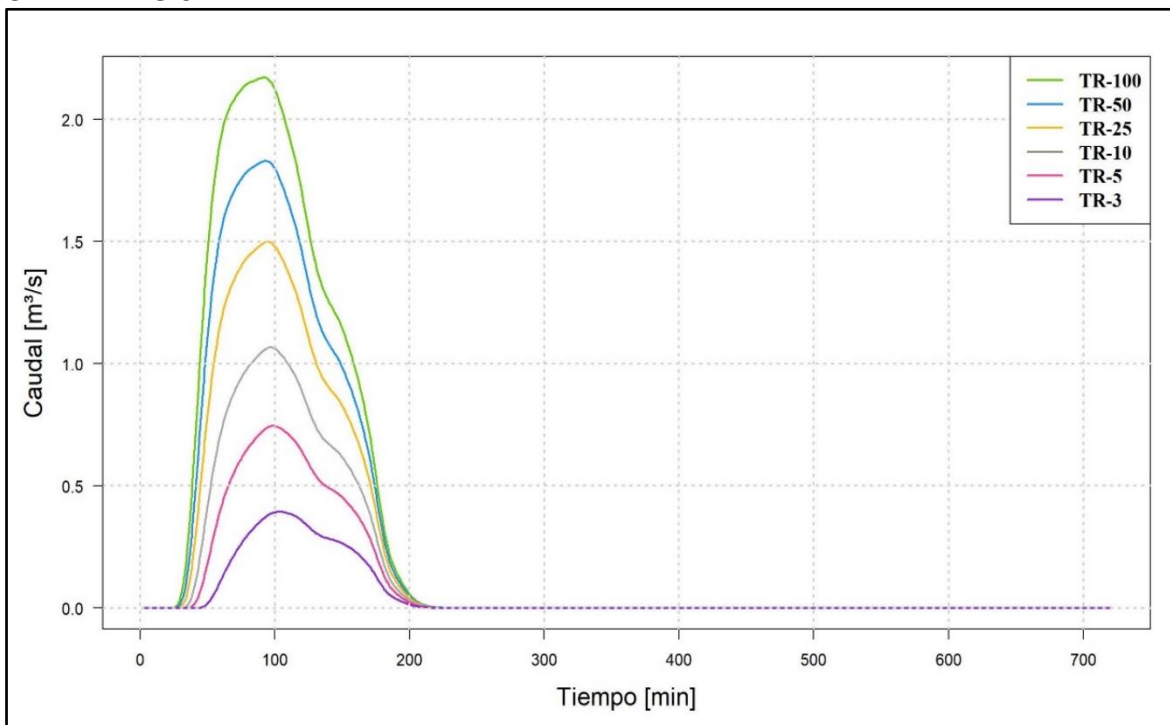
Fuente: WSP, 2019.

Figura 161 Hidrograma cuenca Quebrada Aguascalientes Subcuenca AGC-7M2



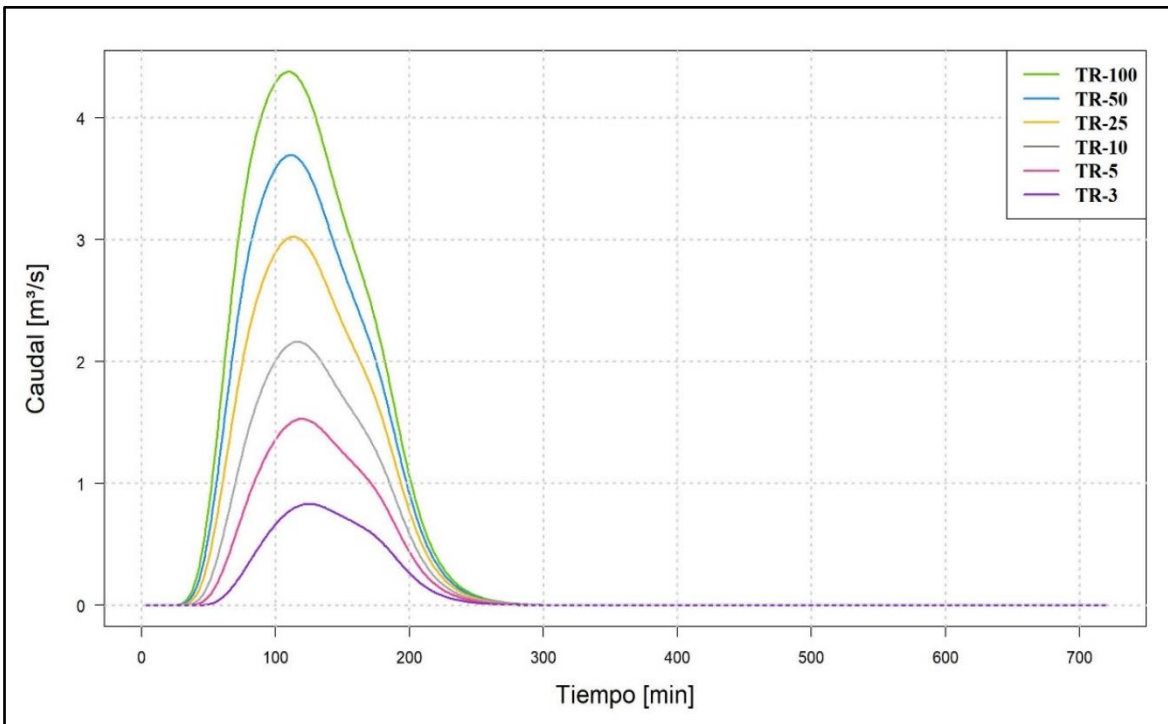
Fuente: WSP, 2019.

Figura 162 Hidrograma cuenca Quebrada Aguascalientes Subcuenca AGUAS CALIENTES 3



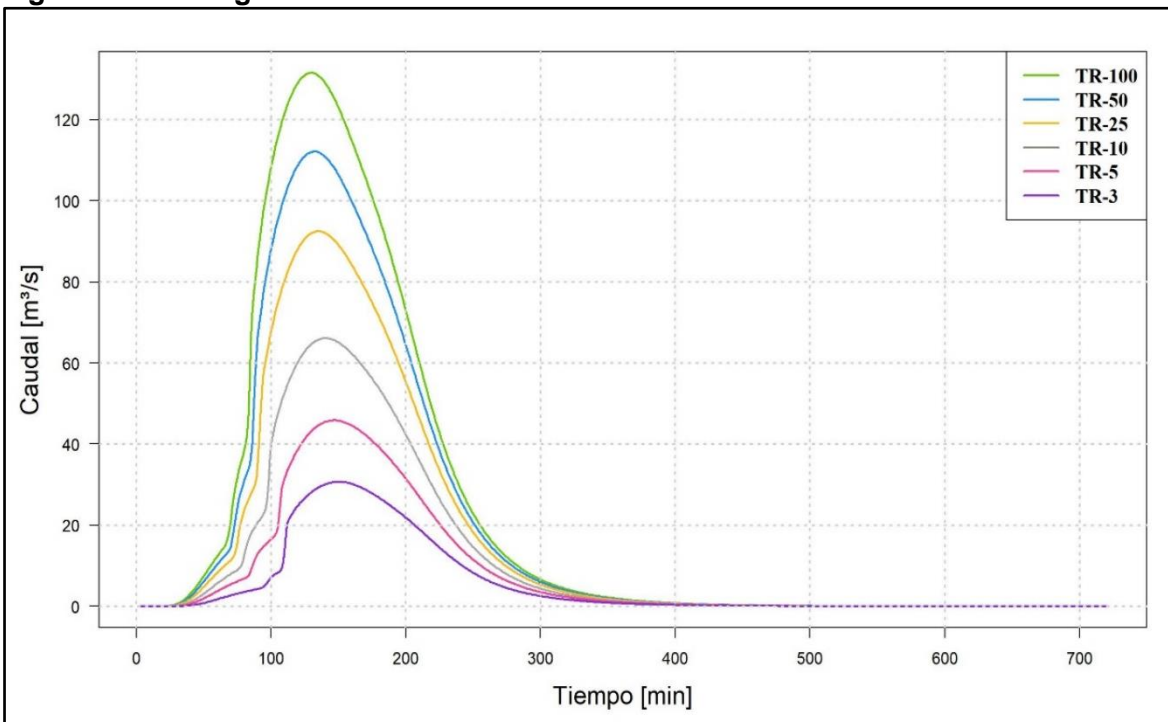
Fuente: WSP, 2019.

Figura 163 Hidrograma cuenca Quebrada Aguascalientes Subcuenca AGUAS CALIENTES 4



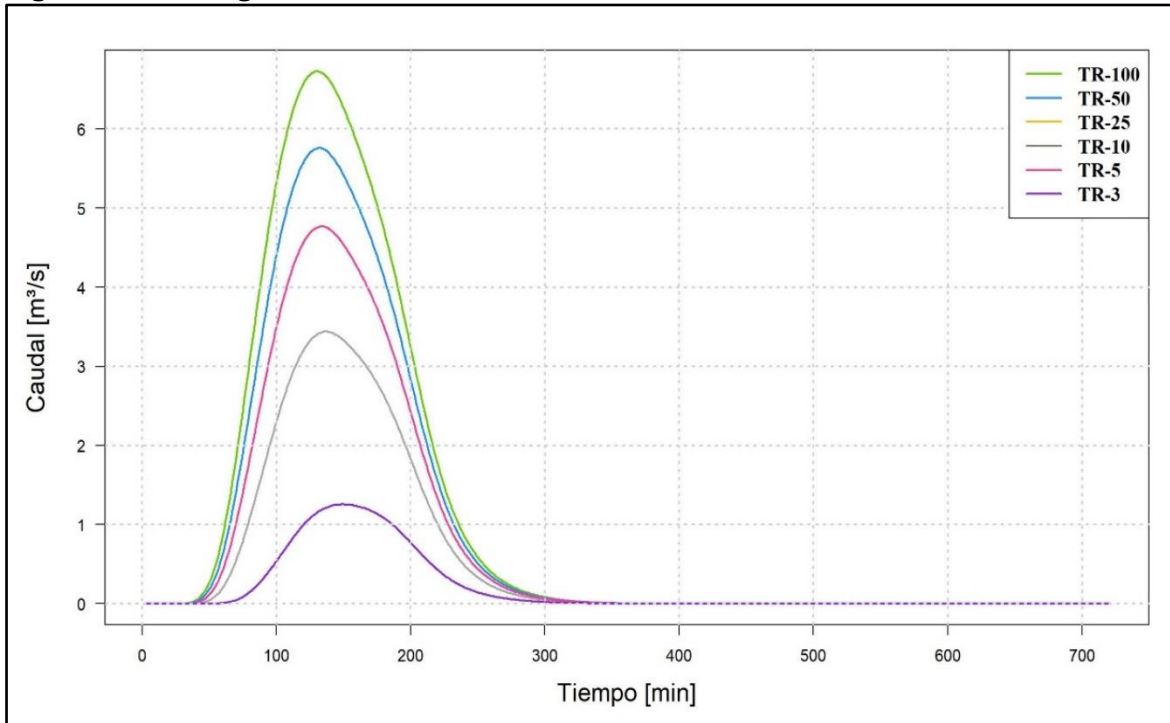
Fuente: WSP, 2019.

Figura 164 Hidrograma cuenca Canal Torca Subcuenca CANAL TORCA 1



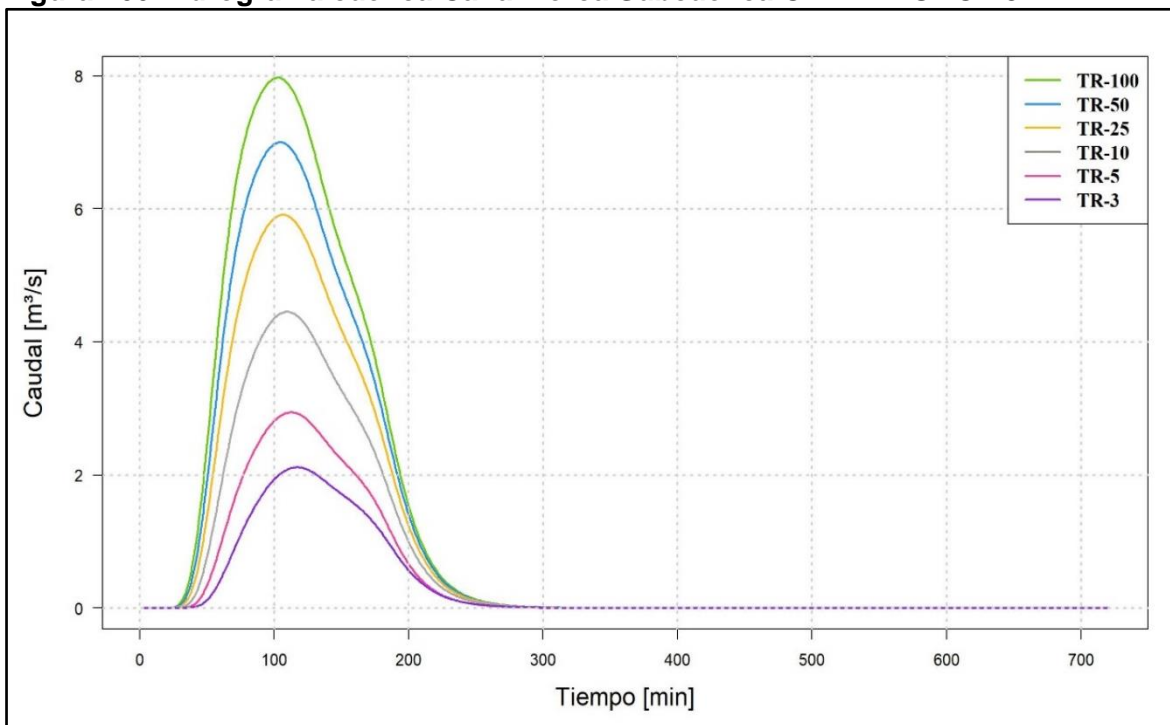
Fuente: WSP, 2019.

Figura 165 Hidrograma cuenca Canal Torca Subcuenca CANAL TORCA 2



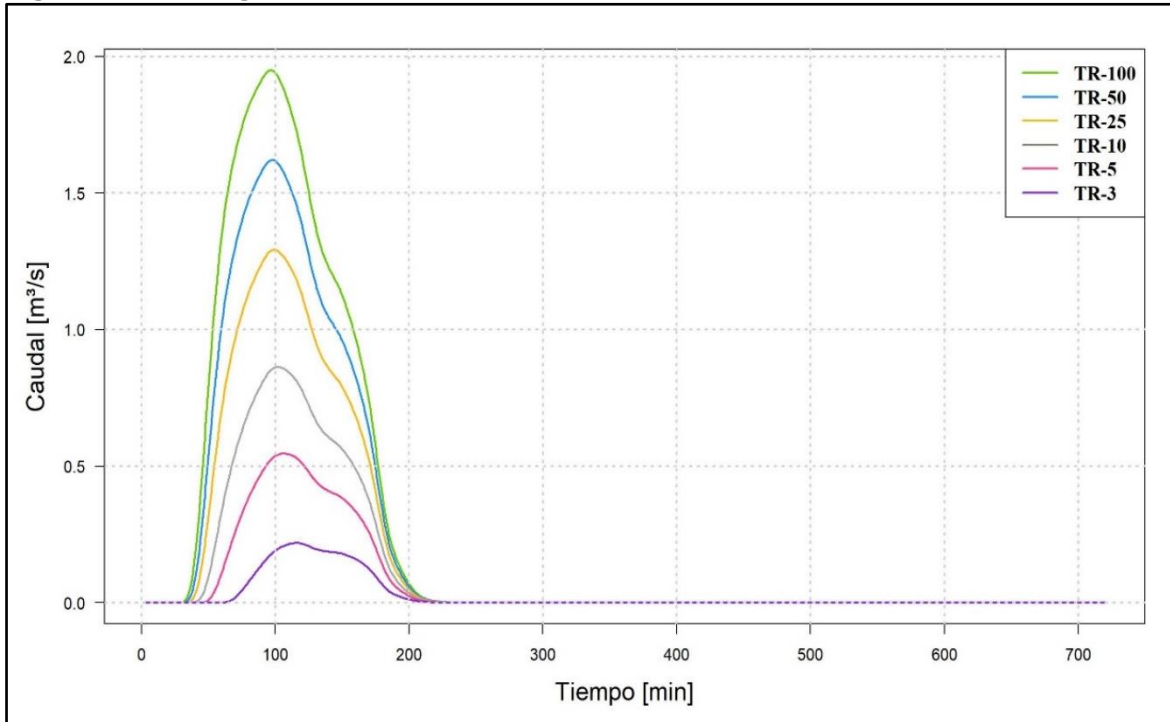
Fuente: WSP, 2019.

Figura 166 Hidrograma cuenca Canal Torca Subcuenca CANAL TORCA 3



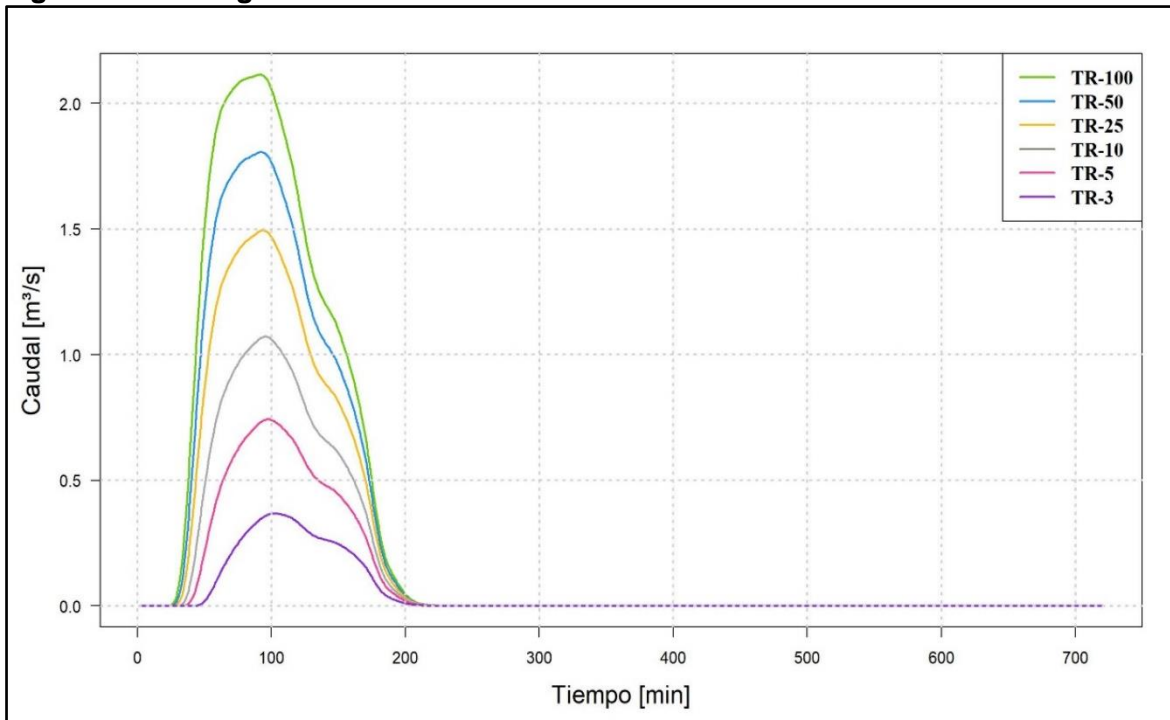
Fuente: WSP, 2019.

Figura 167 Hidrograma cuenca Quebrada La Floresta Subcuenca FLO1



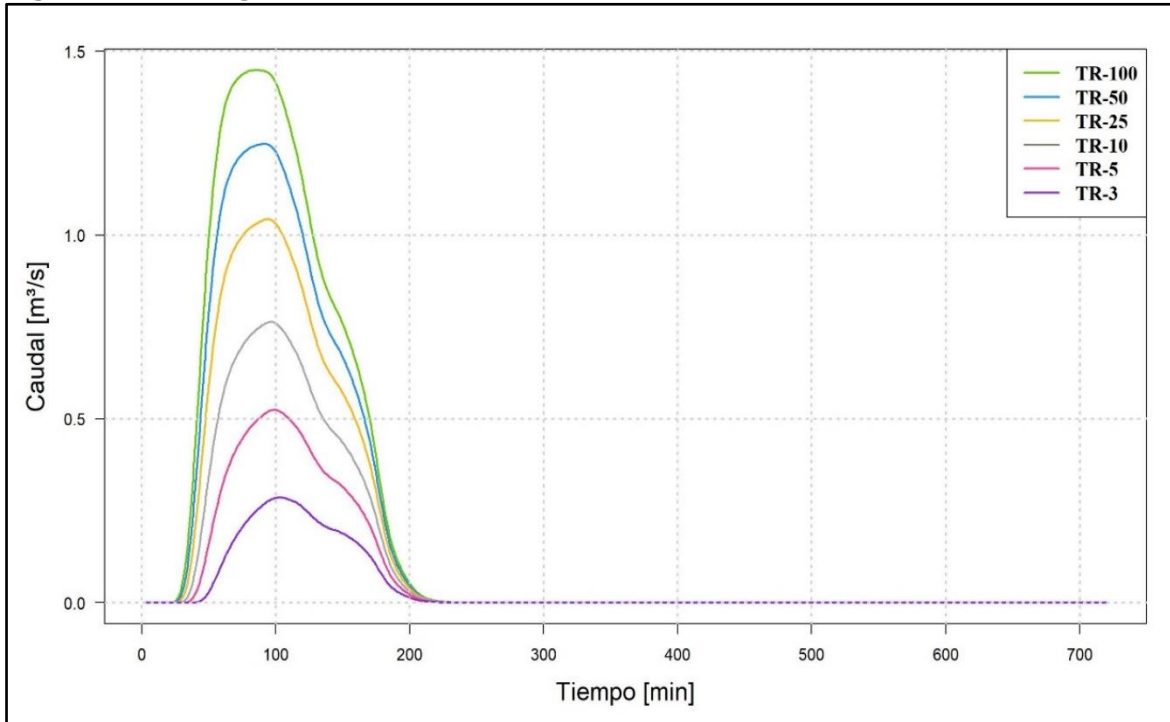
Fuente: WSP, 2019.

Figura 168 Hidrograma cuenca Quebrada La Floresta Subcuenca FLORESTA 3



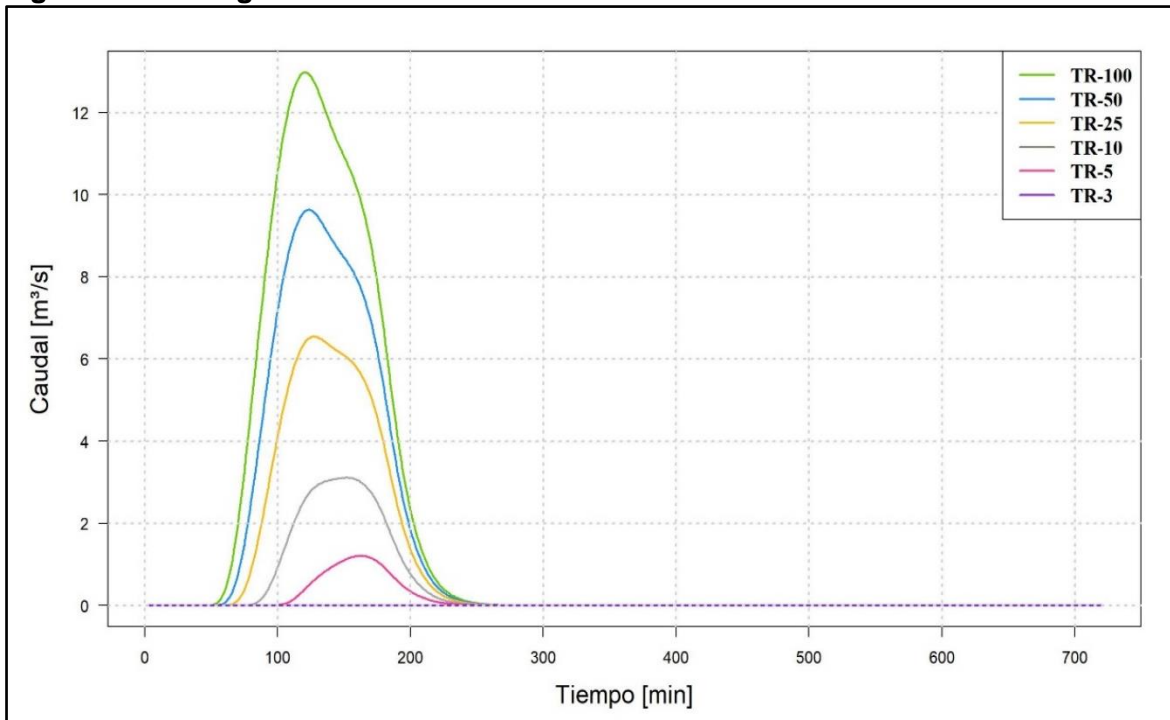
Fuente: WSP, 2019.

Figura 169 Hidrograma cuenca Quebrada La Floresta Subcuenca FLORESTA 4



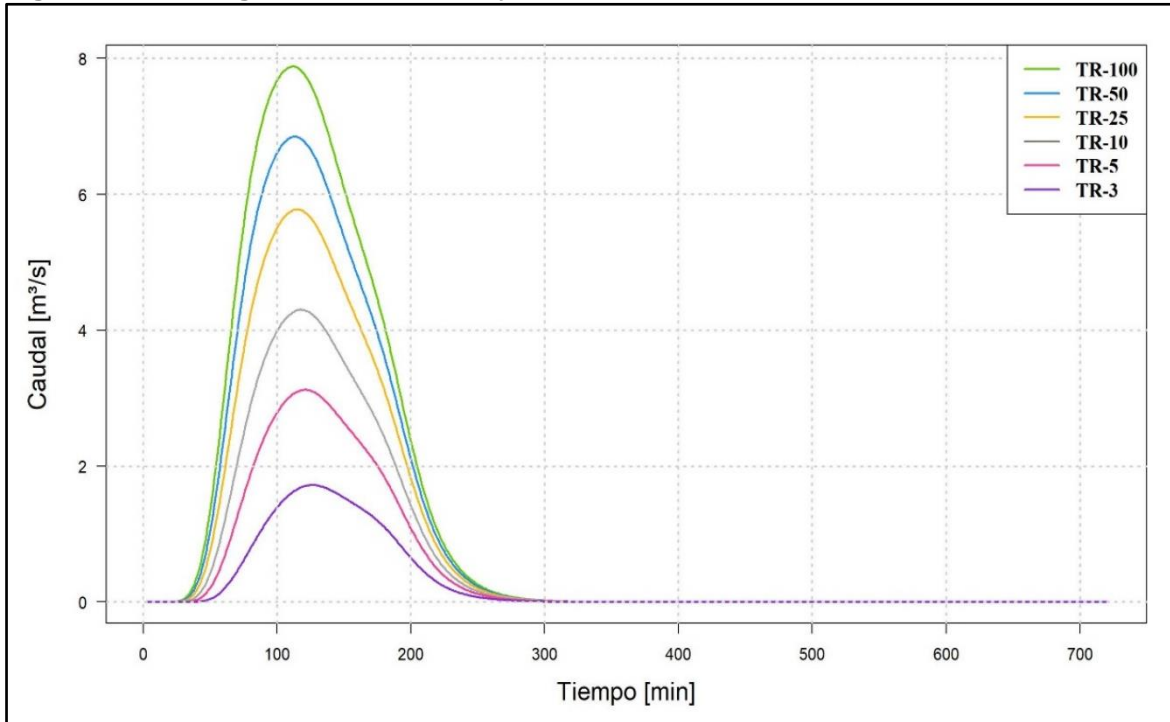
Fuente: WSP, 2019.

Figura 170 Hidrograma cuenca Quebrada La Floresta Subcuenca FLO 7M1



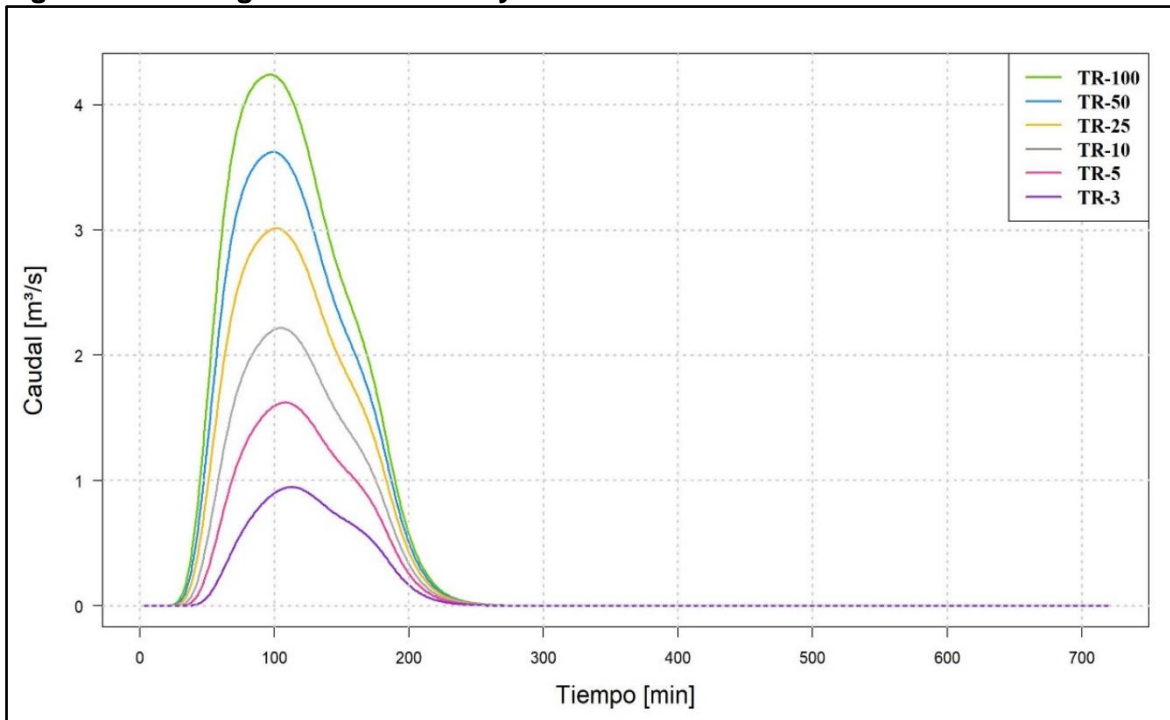
Fuente: WSP, 2019.

Figura 171 Hidrograma cuenca Guaymaral Subcuenca GUAY2



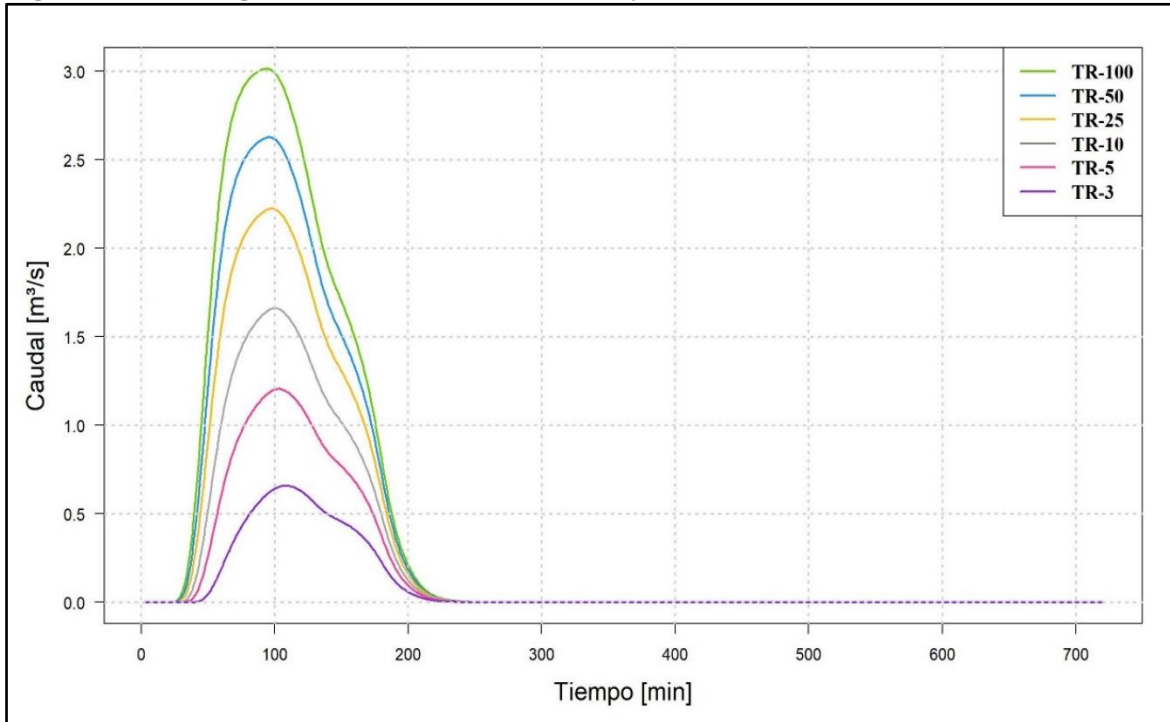
Fuente: WSP, 2019.

Figura 172 Hidrograma cuenca Guaymaral Subcuenca GUAY3



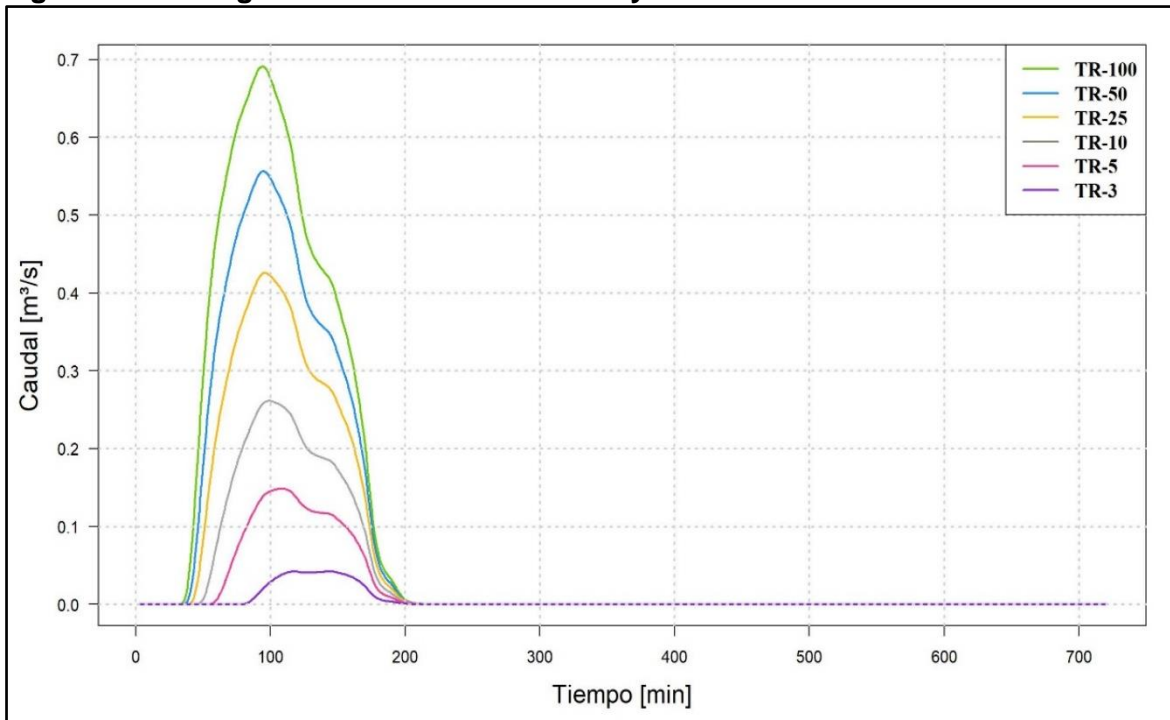
Fuente: WSP, 2019.

Figura 173 Hidrograma cuenca Humedal Guaymaral Subcuenca HG2



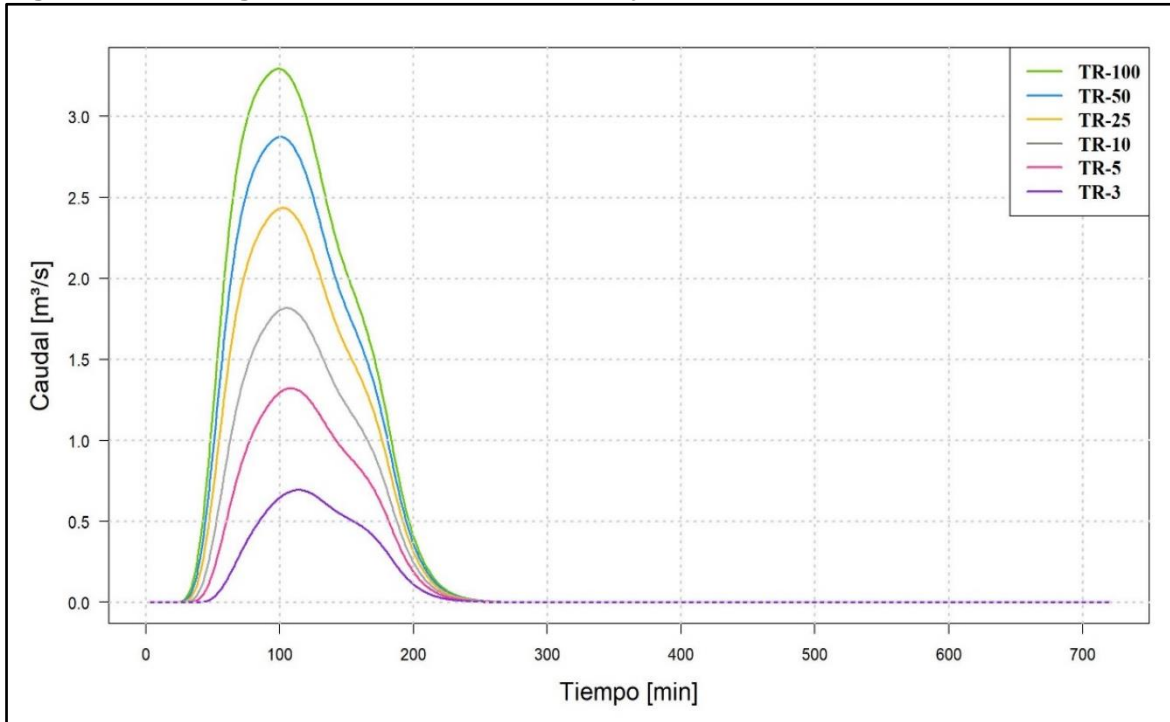
Fuente: WSP, 2019.

Figura 174 Hidrograma cuenca Humedal Guaymaral Subcuenca HG3



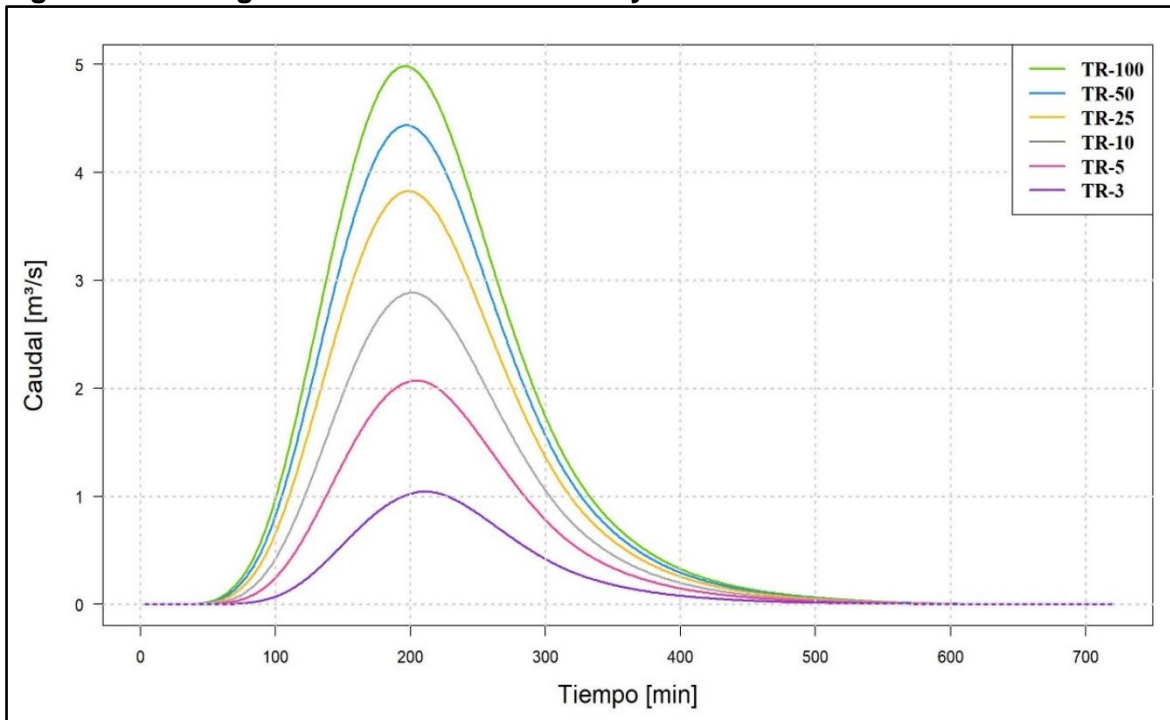
Fuente: WSP, 2019.

Figura 175 Hidrograma cuenca Humedal Guaymaral Subcuenca HGUAY 1-2



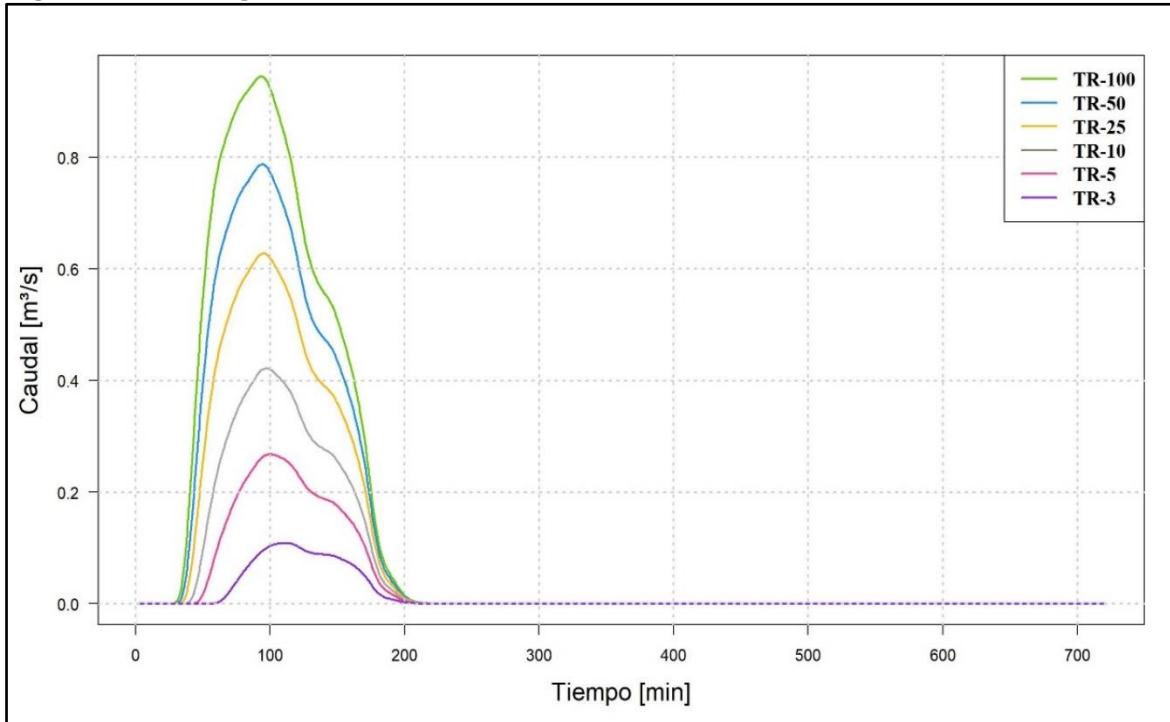
Fuente: WSP, 2019.

Figura 176 Hidrograma cuenca Humedal Guaymaral Subcuenca HGUAY 1-1



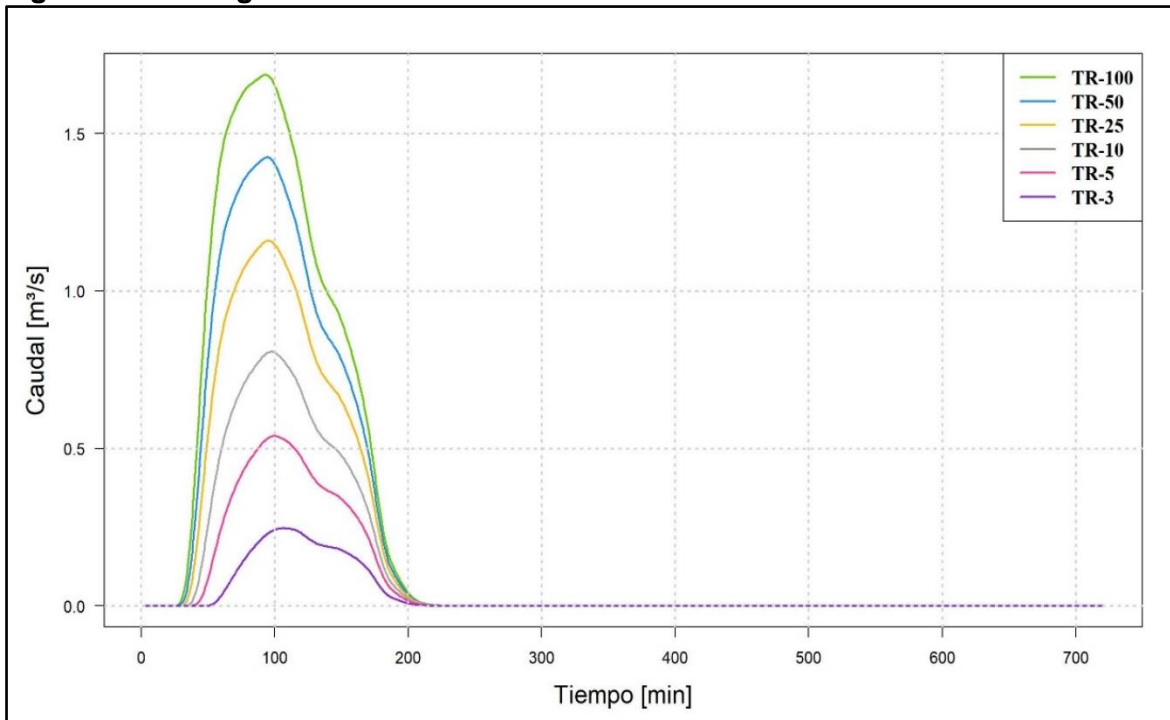
Fuente: WSP, 2019.

Figura 177 Hidrograma cuenca Quebrada N3vita Subcuenca NOVITA 2



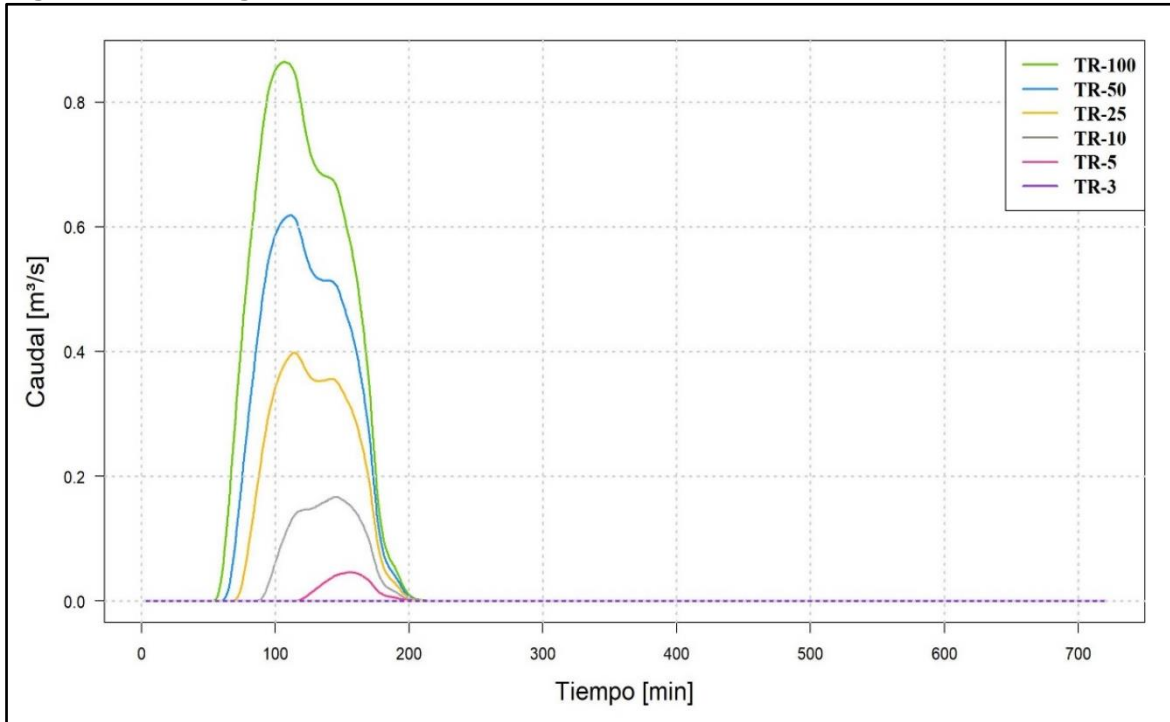
Fuente: WSP, 2019.

Figura 178 Hidrograma cuenca Quebrada N3vita Subcuenca NOVITA 3



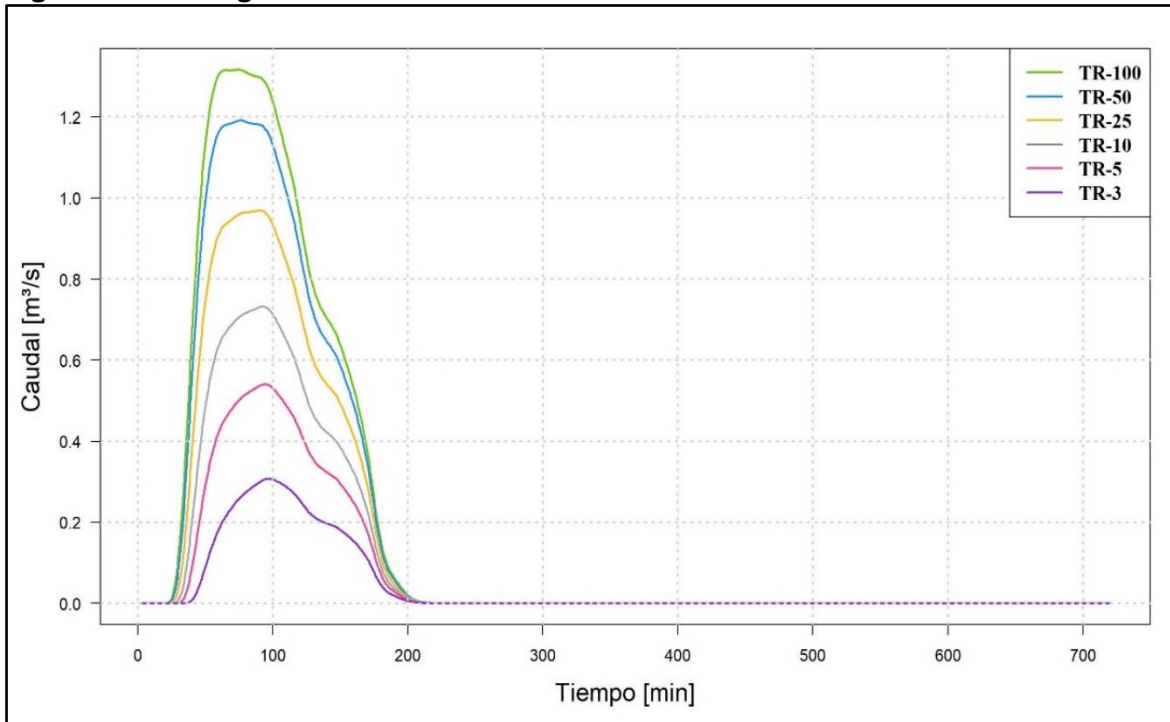
Fuente: WSP, 2019.

Figura 179 Hidrograma cuenca Quebrada N6vita Subcuenca NOV 7M1



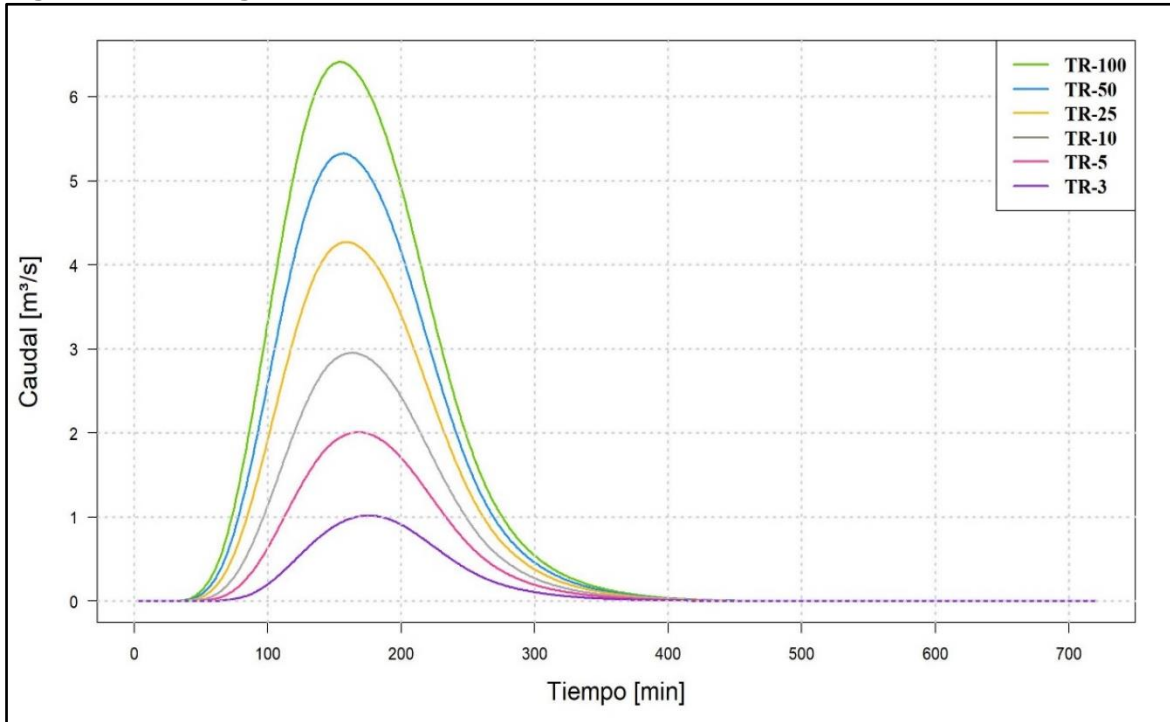
Fuente: WSP, 2019.

Figura 180 Hidrograma cuenca Occidente Subcuenca OCC3-1



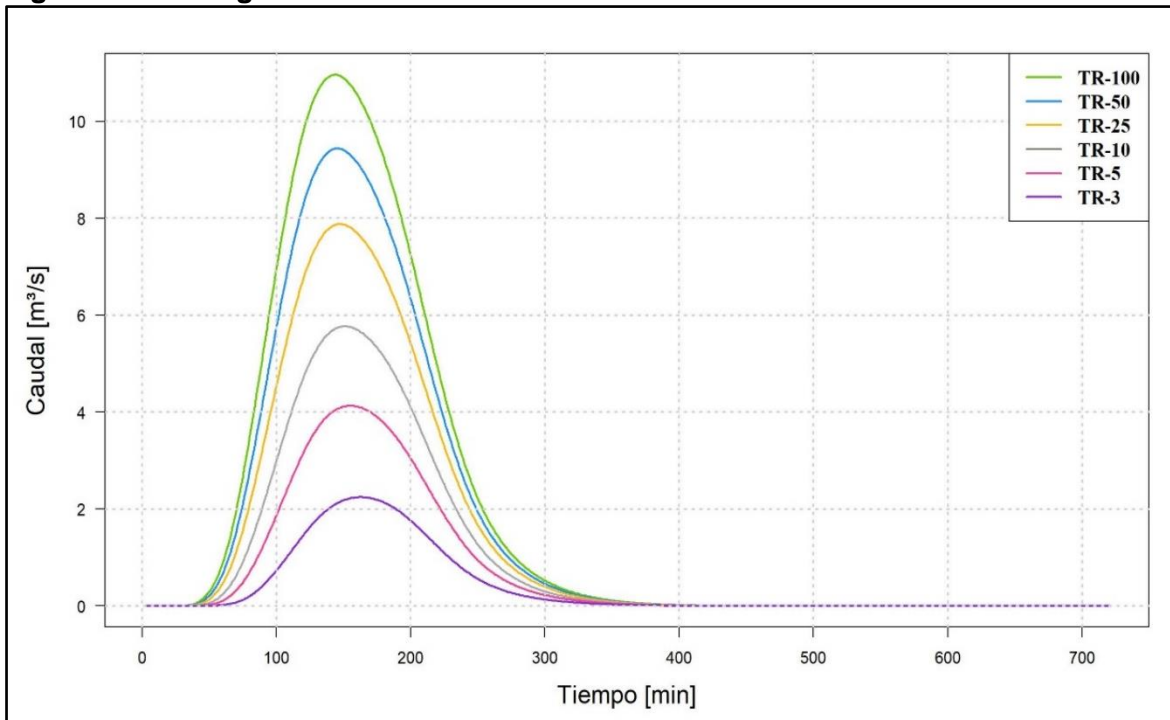
Fuente: WSP, 2019.

Figura 181 Hidrograma cuenca Occidente Subcuenca OCCIDENTE 1-1



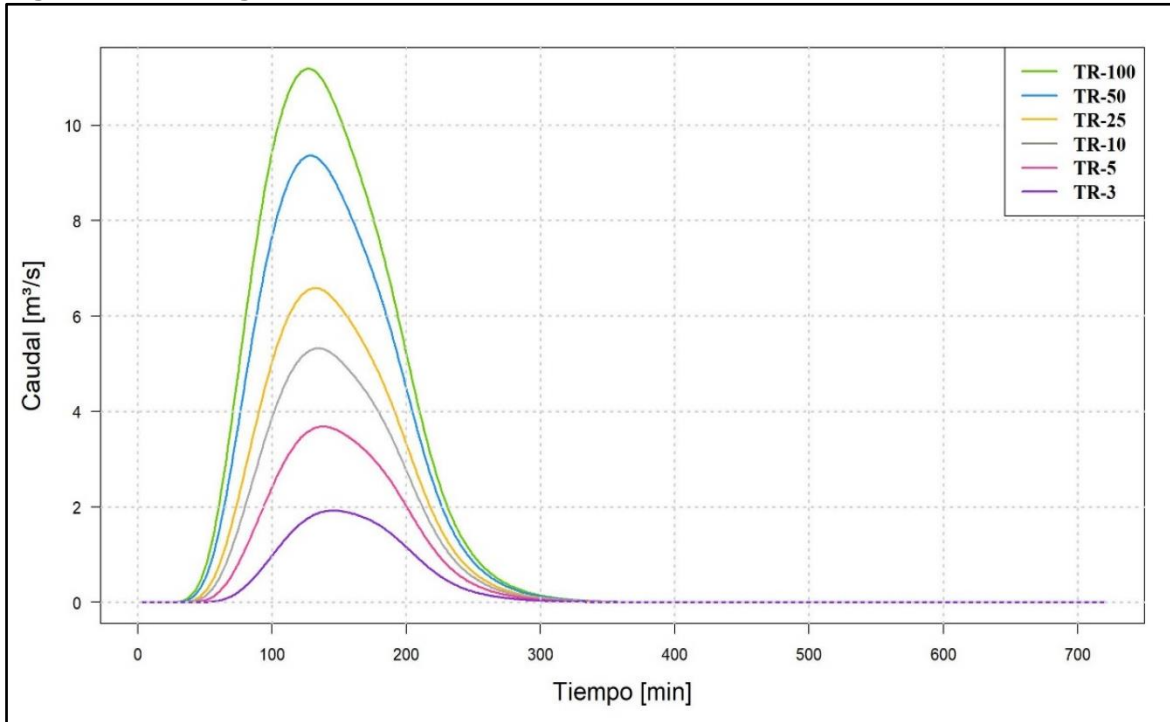
Fuente: WSP, 2019.

Figura 182 Hidrograma cuenca Occidente Subcuenca OCC 2



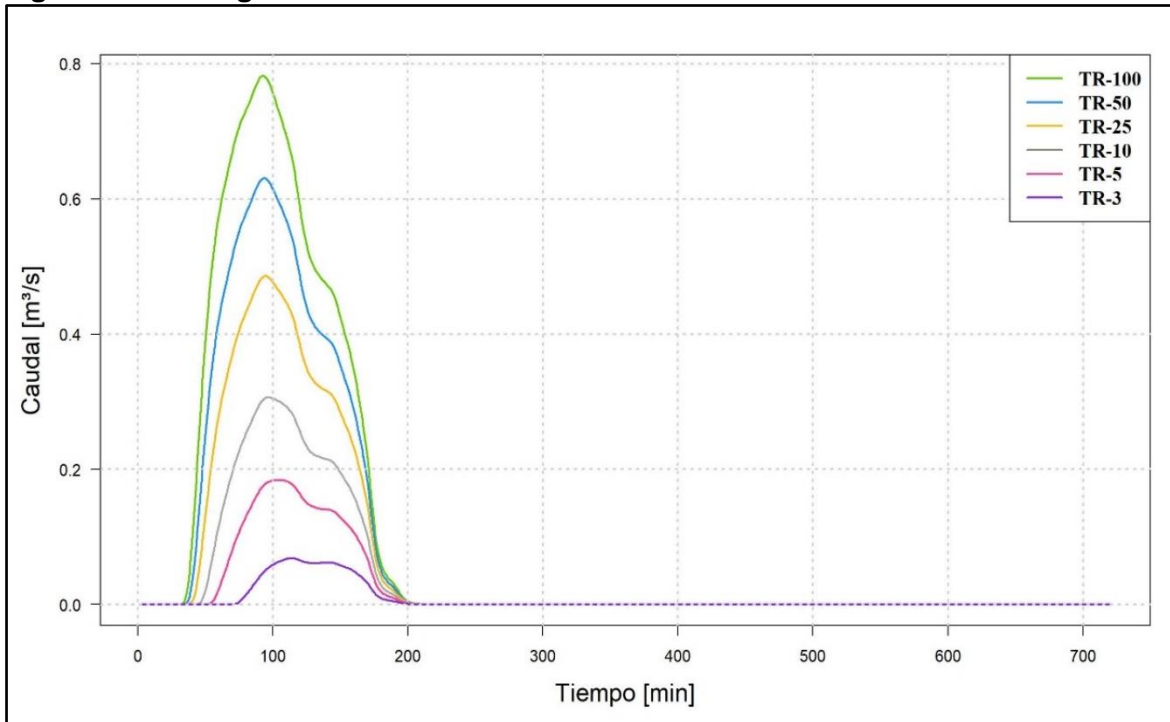
Fuente: WSP, 2019.

Figura 183 Hidrograma cuenca Occidente Subcuenca OCC 3



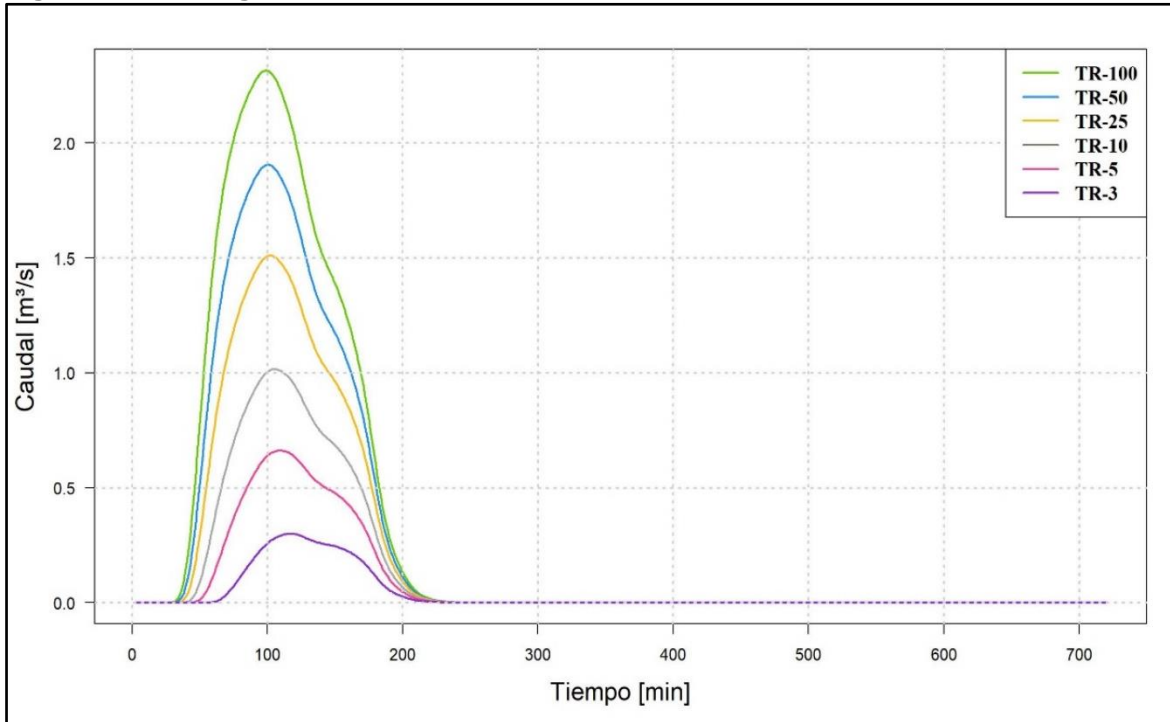
Fuente: WSP, 2019.

Figura 184 Hidrograma cuenca Patiño Subcuenca PATINO 3



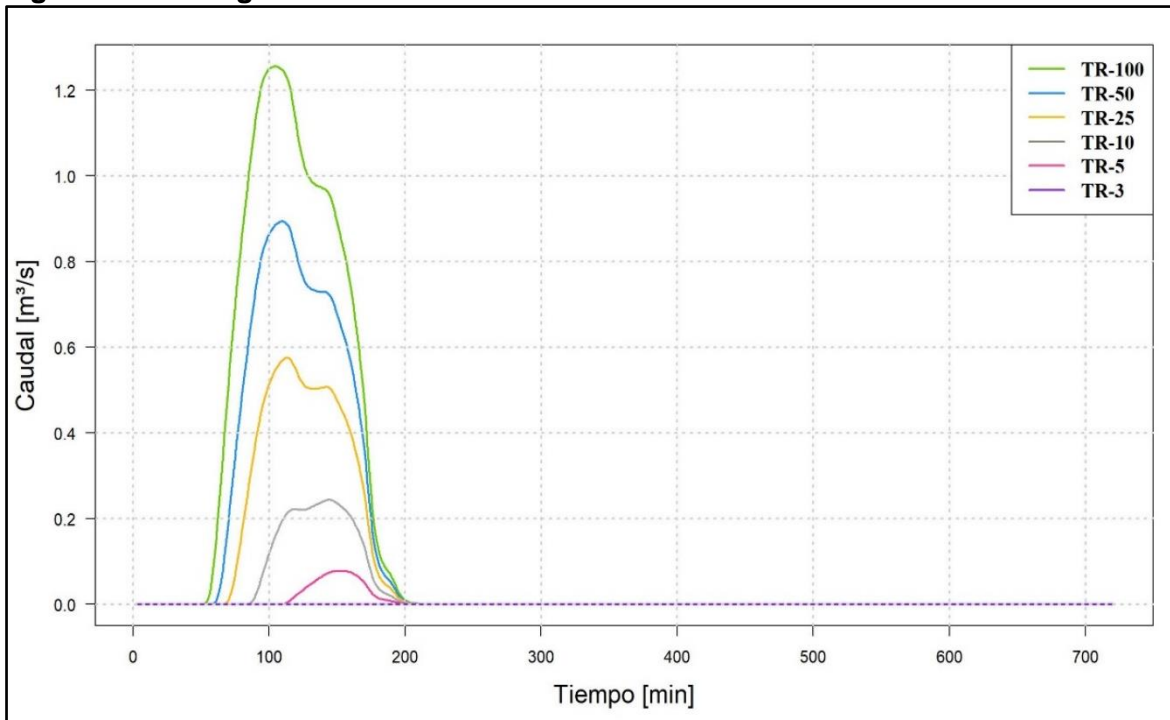
Fuente: WSP, 2019.

Figura 185 Hidrograma cuenca Patiño Subcuenca PATINO 4



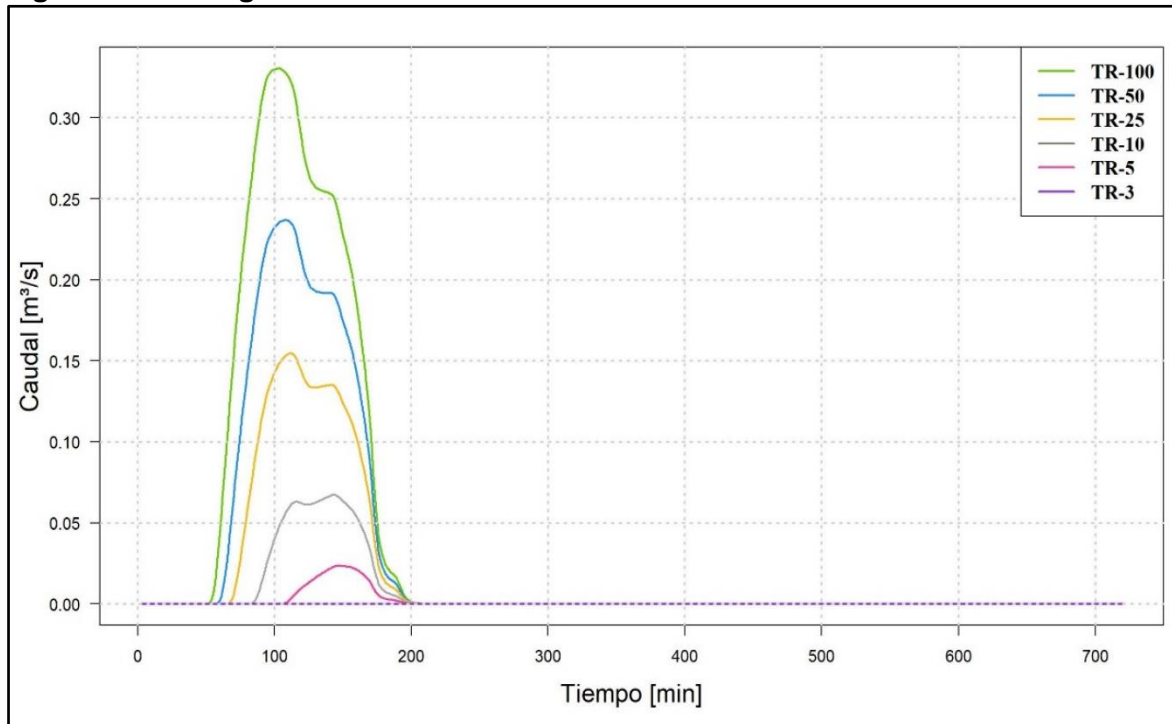
Fuente: WSP, 2019.

Figura 186 Hidrograma cuenca Patiño Subcuenca PAT 7M1



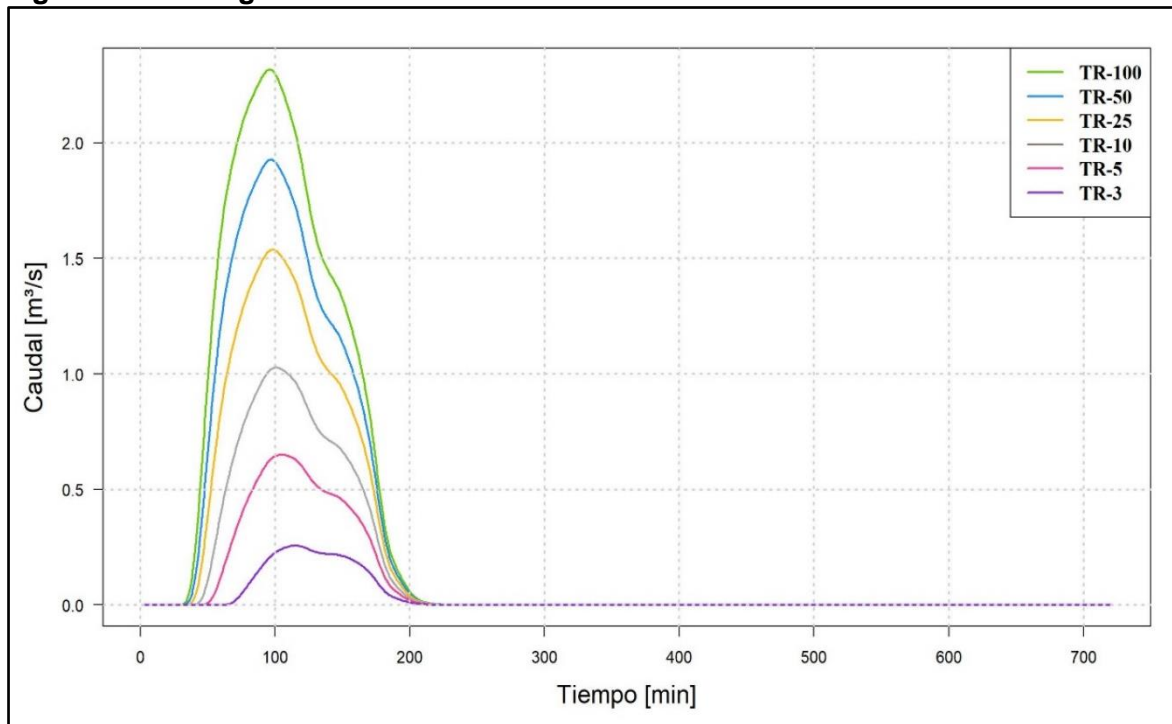
Fuente: WSP, 2019.

Figura 187 Hidrograma cuenca Patiño Subcuenca PAT 7M2



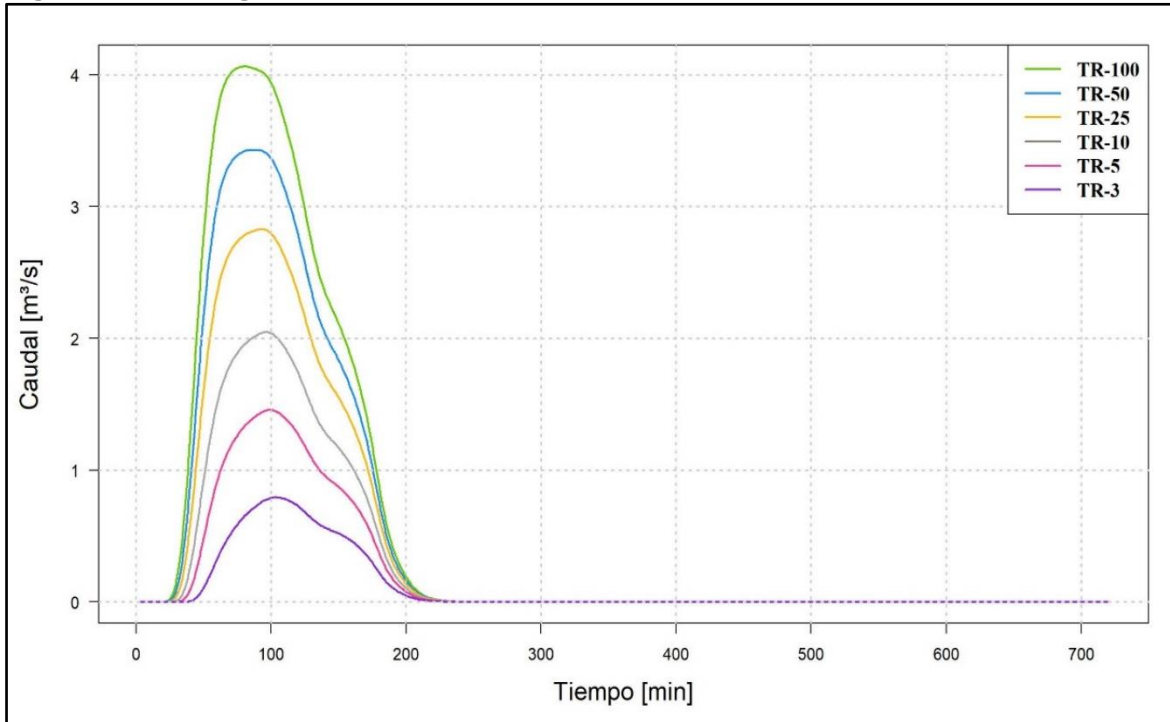
Fuente: WSP, 2019.

Figura 188 Hidrograma cuenca Quebrada Las Pilas Subcuenca PILAS 2



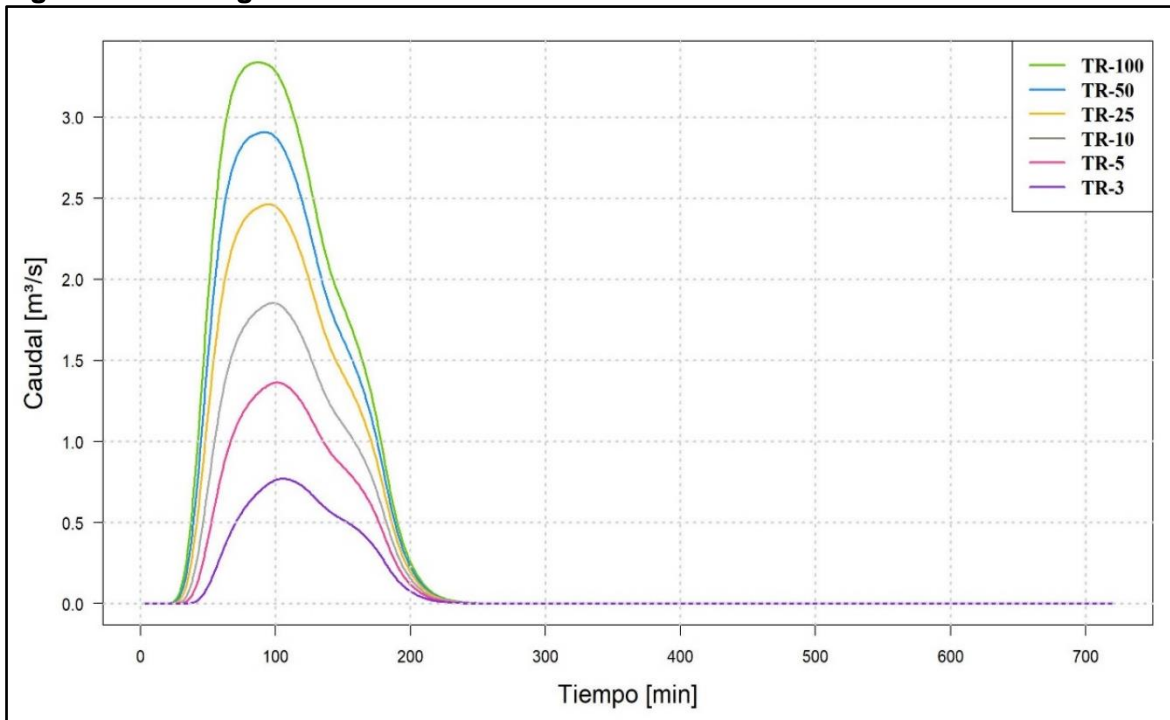
Fuente: WSP, 2019.

Figura 189 Hidrograma cuenca Quebrada Las Pilas Subcuenca PILAS 3



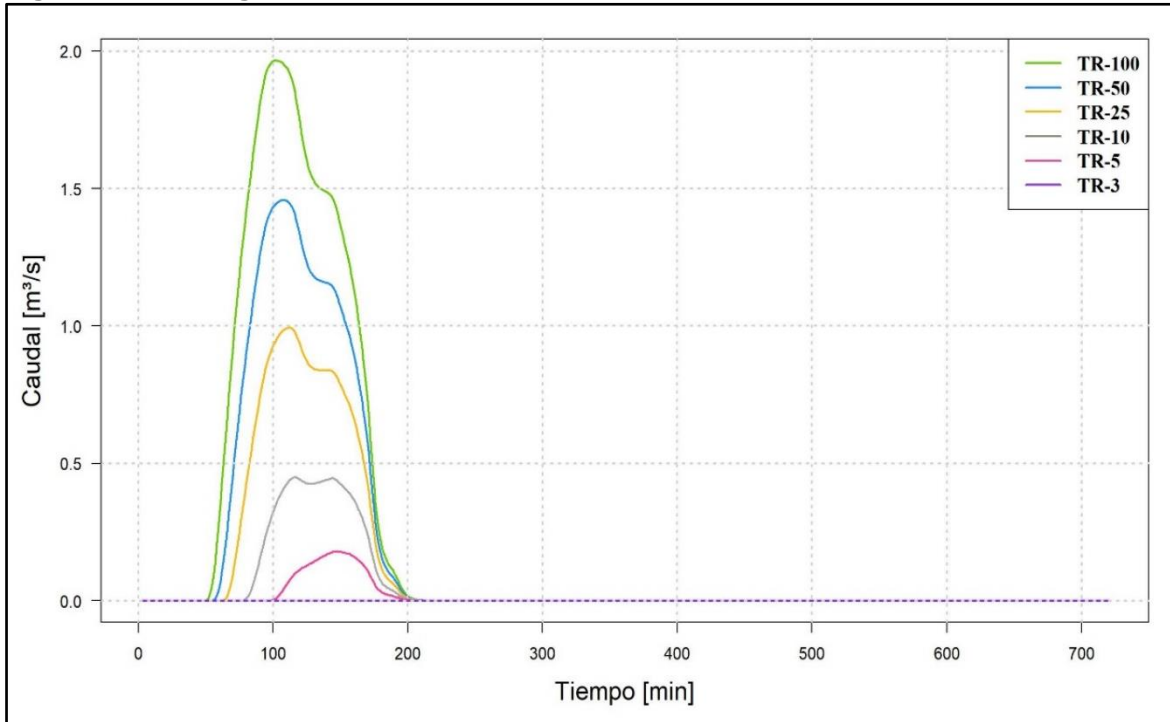
Fuente: WSP, 2019.

Figura 190 Hidrograma cuenca Quebrada Las Pilas Subcuenca PILAS 4



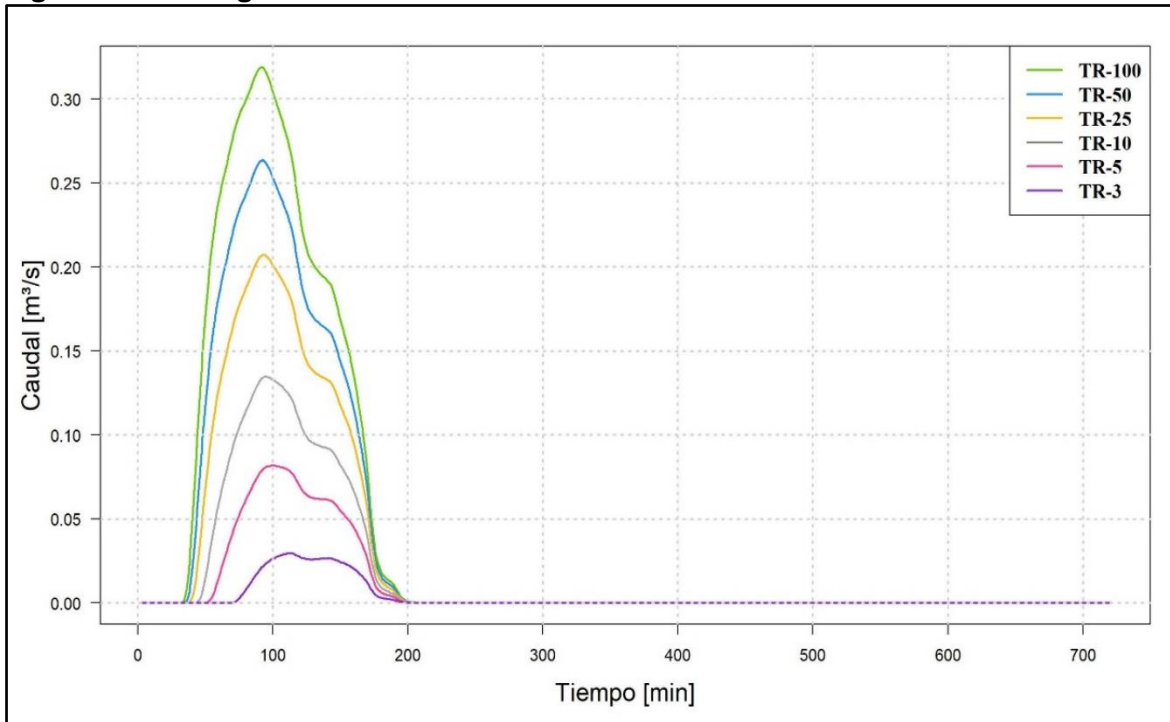
Fuente: WSP, 2019.

Figura 191 Hidrograma cuenca Quebrada Las Pilas Subcuenca PIL 7M1



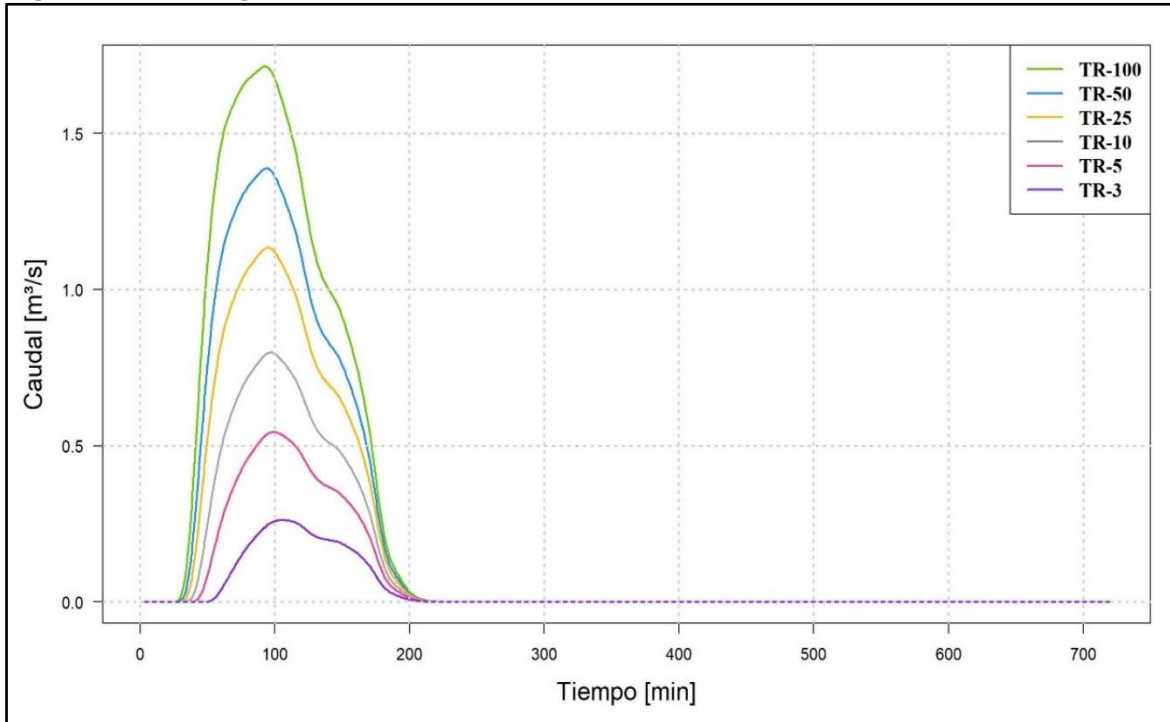
Fuente: WSP, 2019.

Figura 192 Hidrograma cuenca Quebrada San Juan Subcuenca SAN JUAN 3



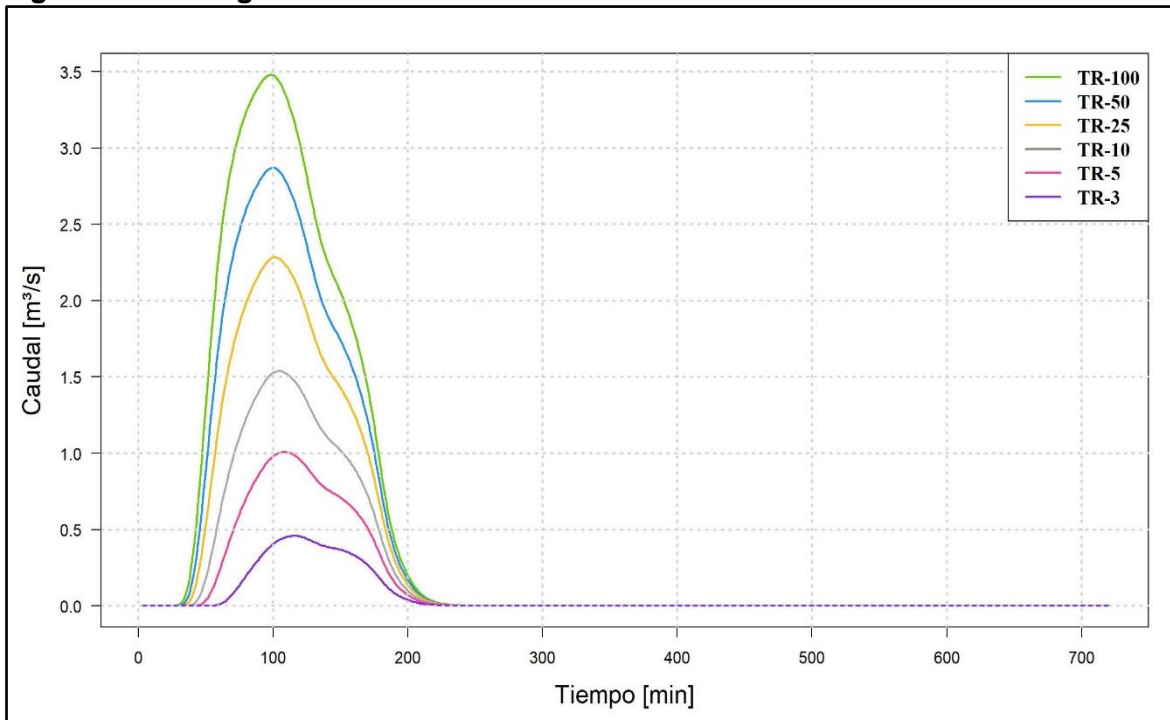
Fuente: WSP, 2019.

Figura 193 Hidrograma cuenca Quebrada San Juan Subcuenca SAN JUAN 4



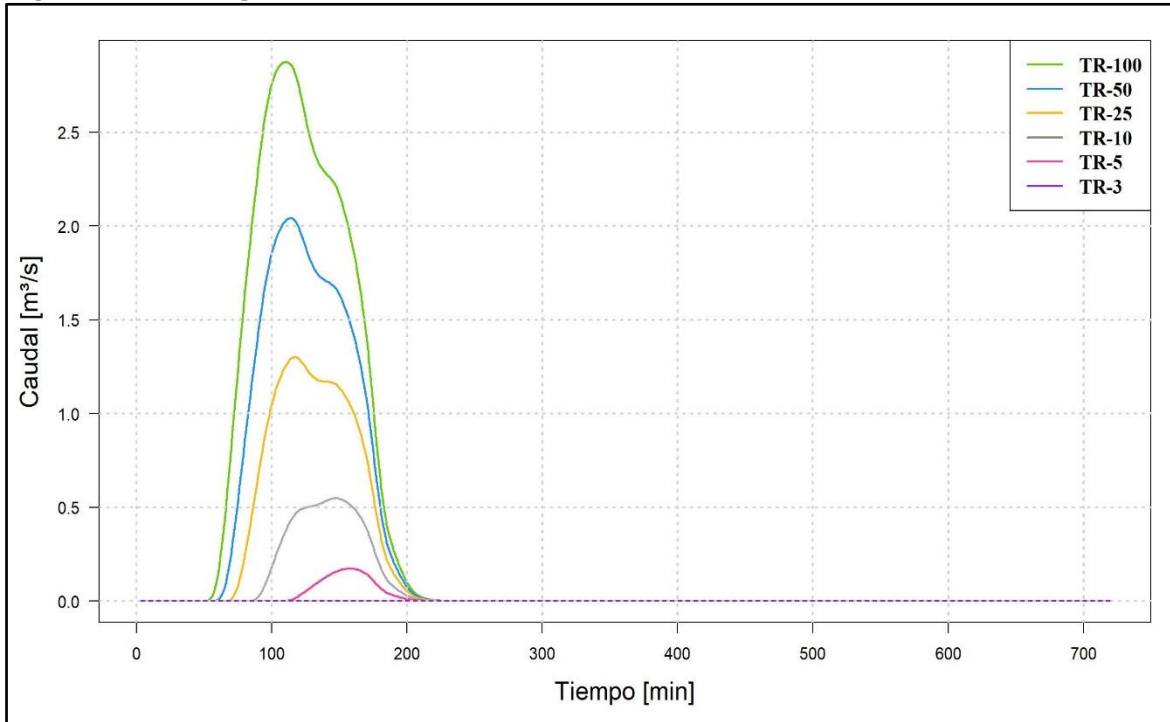
Fuente: WSP, 2019.

Figura 194 Hidrograma cuenca Quebrada San Juan Subcuenca SAN JUAN 5



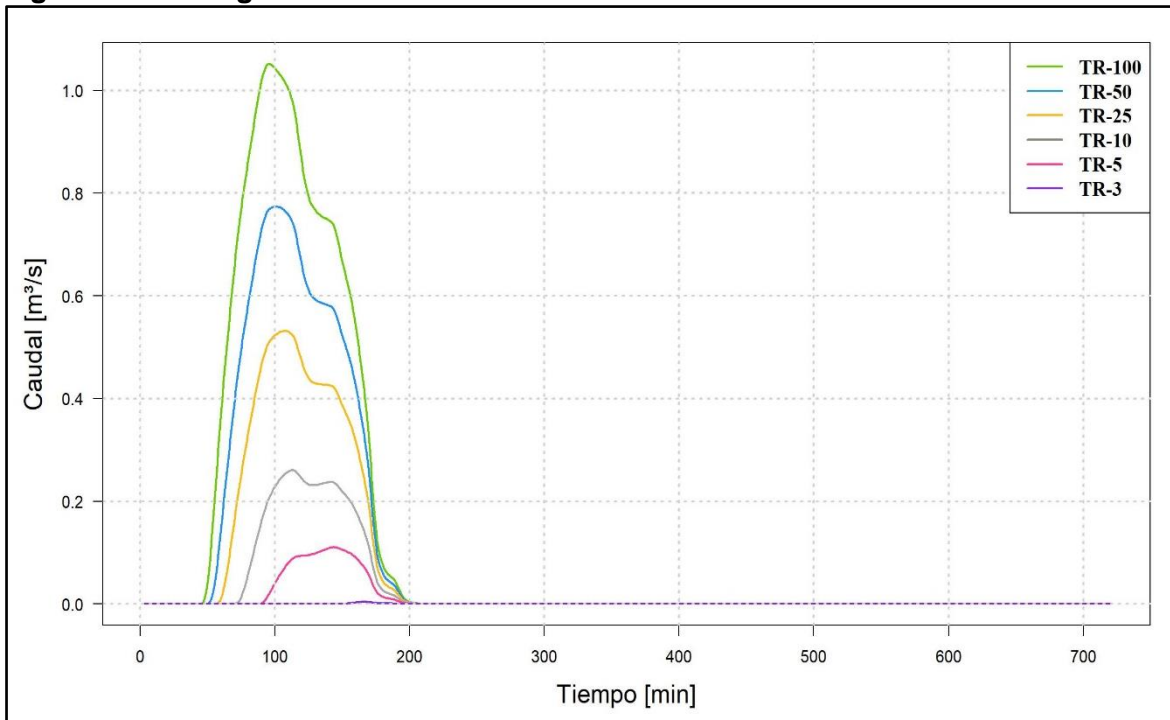
Fuente: WSP, 2019.

Figura 195 Hidrograma cuenca Quebrada San Juan Subcuenca SAN 7M1



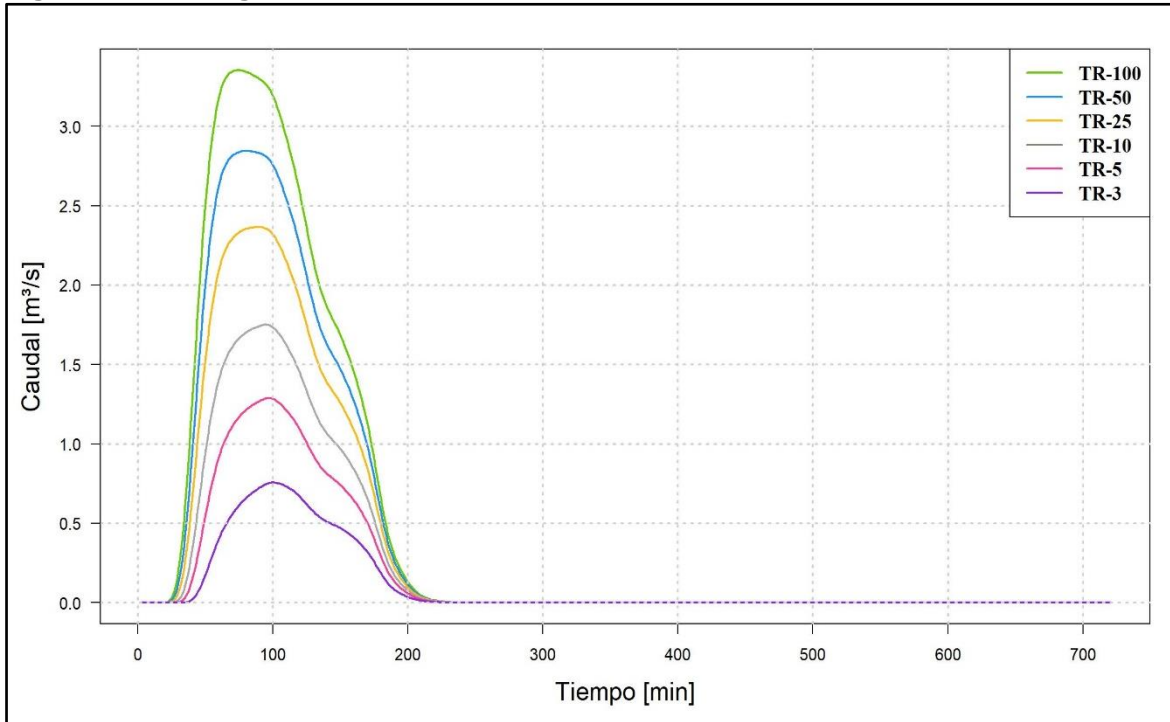
Fuente: WSP, 2019.

Figura 196 Hidrograma cuenca Quebrada San Juan Subcuenca SAN 7M2



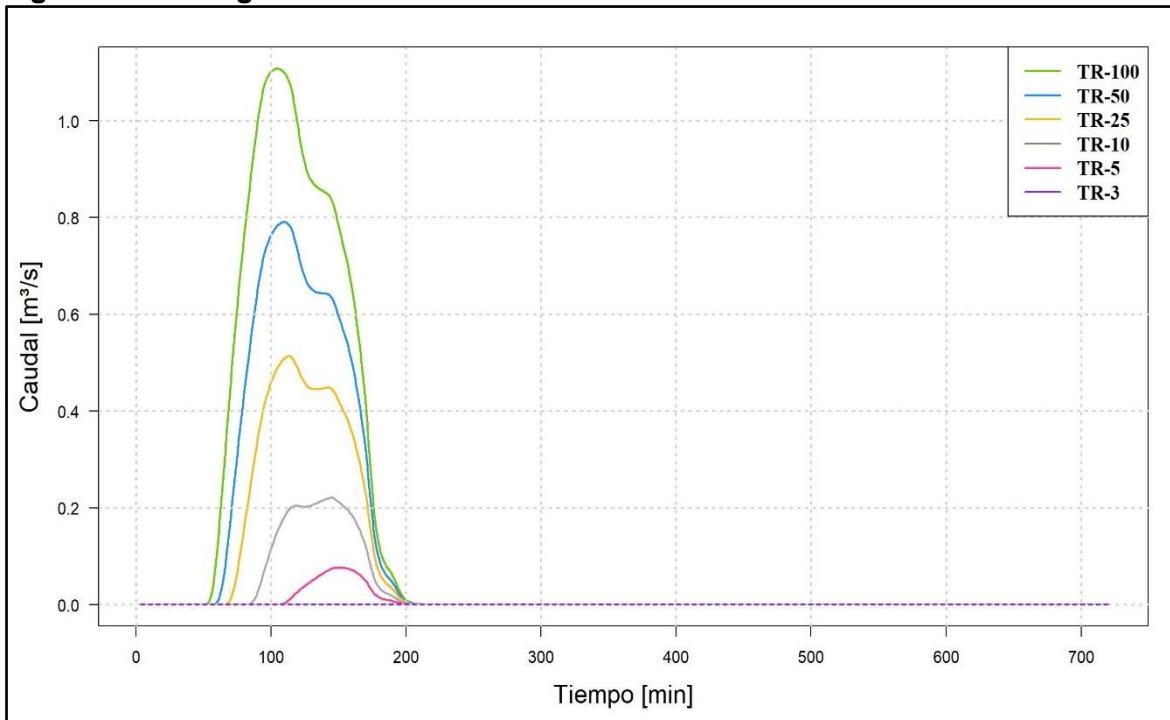
Fuente: WSP, 2019.

Figura 197 Hidrograma cuenca Quebrada Tibabita Subcuenca TBT1



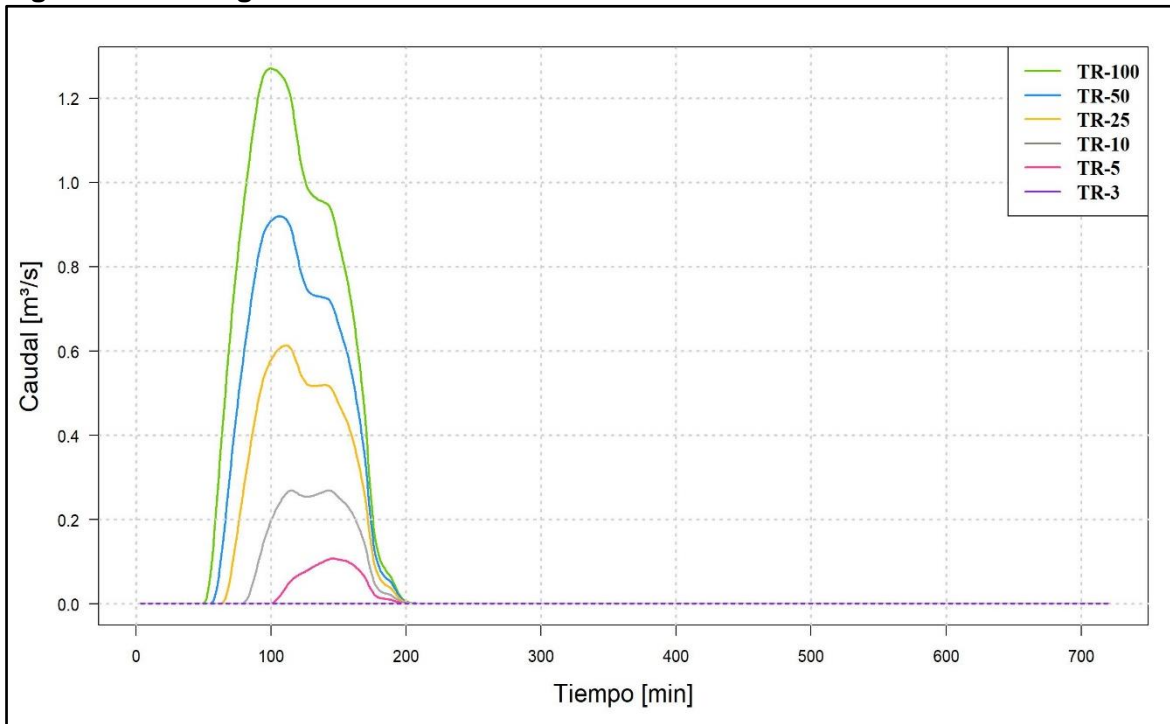
Fuente: WSP, 2019.

Figura 198 Hidrograma cuenca Quebrada Tibabita Subcuenca TBT 7M1



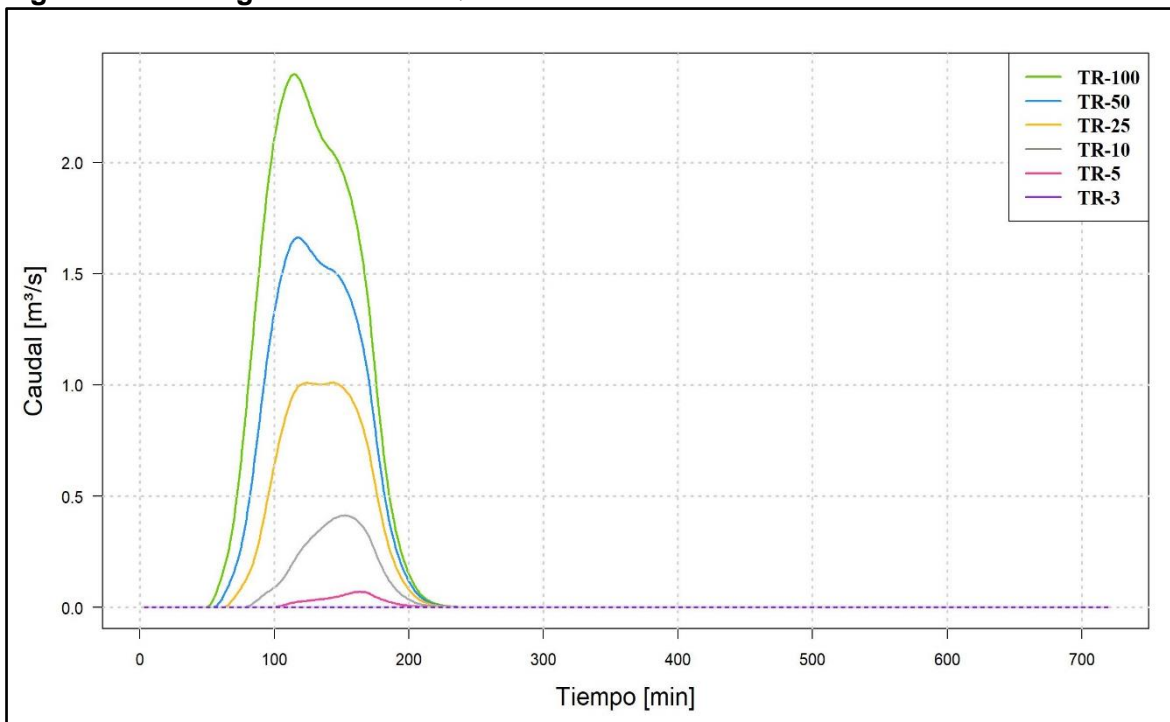
Fuente: WSP, 2019.

Figura 199 Hidrograma cuenca Quebrada Tibabita Subcuenca TBT 7M2



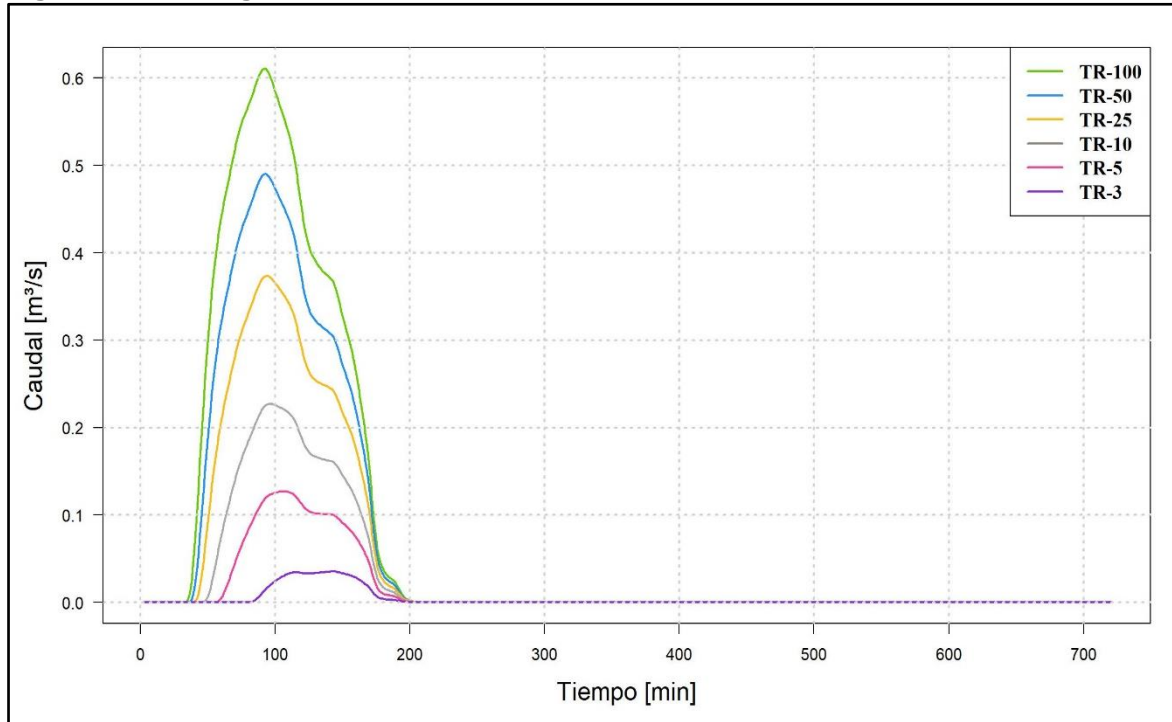
Fuente: WSP, 2019.

Figura 200 Hidrograma cuenca Quebrada Torca Subcuenca TORCA1



Fuente: WSP, 2019.

Figura 201 Hidrograma cuenca Quebrada Torca Subcuenca TORCA4



Fuente: WSP, 2019.

De acuerdo con los resultados obtenidos de los hidrogramas unitarios del SCS, en la Tabla 36 se presentan los caudales pico para cada una de las cuencas analizadas en los diferentes periodos de retorno, para la condición futura. Los hidrogramas presentados son los generados en cada una de las subcuencas en las que se subdividieron todas las cuencas del sistema hídrico Torca-Guaymaral y que corresponden a los que serán ingresados en el modelo de simulación hidráulico, con el objeto de que sea a través de que se realice el tránsito a través de los ejes de drenaje principal de cada cuenca.

Tabla 36 Caudales máximos para la Condición Futura

| ID CUENCA | CAUDALES (m3/s) - PERIODOS DE RETORNO | | | | | |
|-------------------|---------------------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|
| | 3 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 |
| AGC_7M1 | 0.010 | 0.102 | 0.296 | 0.685 | 1.054 | 1.475 |
| AGC_7M2 | 0.010 | 0.052 | 0.137 | 0.310 | 0.469 | 0.651 |
| AGUAS_CALIENTES_3 | 0.394 | 0.746 | 1.067 | 1.499 | 1.831 | 2.171 |
| AGUAS_CALIENTES_4 | 0.833 | 1.530 | 2.164 | 3.024 | 3.694 | 4.378 |
| CANAL_TORCA_1 | 30.714 | 45.871 | 66.122 | 92.508 | 112.140 | 131.550 |
| CANAL_TORCA_2 | 1.255 | 4.770 | 3.439 | 4.770 | 5.761 | 6.730 |
| CANAL_TORCA_3 | 2.116 | 2.940 | 4.453 | 5.914 | 7.001 | 7.973 |
| FLO1 | 0.218 | 0.546 | 0.863 | 1.293 | 1.621 | 1.949 |
| FLO_7M1 | 0.368 | 0.743 | 1.072 | 1.494 | 1.806 | 2.114 |

| ID CUENCA | CAUDALES (m3/s) - PERIODOS DE RETORNO | | | | | |
|---------------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | 3 | 5 | 10 | 25 | 50 | 100 |
| FLORESTA3 | 0.286 | 0.524 | 0.764 | 1.043 | 1.248 | 1.448 |
| FLORESTA4 | 0.010 | 1.206 | 3.110 | 6.546 | 9.634 | 12.978 |
| GUAY2 | 1.721 | 3.123 | 4.302 | 5.778 | 6.849 | 7.882 |
| GUAY3 | 0.948 | 1.623 | 2.219 | 3.013 | 3.622 | 4.239 |
| HG2 | 0.659 | 1.206 | 1.662 | 2.225 | 2.628 | 3.015 |
| HG3 | 0.042 | 0.149 | 0.261 | 0.426 | 0.556 | 0.691 |
| HGUAY_1-2 | 0.694 | 1.322 | 1.818 | 2.436 | 2.874 | 3.295 |
| HGUAY_1_1 | 1.044 | 2.072 | 2.886 | 3.826 | 4.437 | 4.983 |
| NOVITA_2 | 0.109 | 0.268 | 0.422 | 0.628 | 0.787 | 0.945 |
| NOVITA_3 | 0.246 | 0.540 | 0.807 | 1.160 | 1.425 | 1.687 |
| NOV_7M1 | 0.010 | 0.046 | 0.167 | 0.398 | 0.619 | 0.864 |
| OCC3_1 | 0.308 | 0.541 | 0.733 | 0.969 | 1.192 | 1.317 |
| OCC_2 | 1.017 | 2.008 | 2.953 | 4.270 | 5.323 | 6.412 |
| OCC_3 | 2.243 | 4.130 | 5.769 | 7.880 | 9.440 | 10.961 |
| OCCIDENTE_1-1 | 1.923 | 3.684 | 5.324 | 6.588 | 9.360 | 11.181 |
| PATINO_3 | 0.069 | 0.184 | 0.307 | 0.486 | 0.631 | 0.782 |
| PATINO_4 | 0.300 | 0.662 | 1.016 | 1.511 | 1.906 | 2.317 |
| PAT_7M1 | 0.010 | 0.078 | 0.245 | 0.576 | 0.894 | 1.256 |
| PAT_7M2 | 0.010 | 0.023 | 0.067 | 0.155 | 0.237 | 0.330 |
| PILAS_2 | 0.257 | 0.650 | 1.028 | 1.538 | 1.928 | 2.318 |
| PILAS_3 | 0.793 | 1.458 | 2.048 | 2.829 | 3.430 | 4.064 |
| PILAS_4 | 0.771 | 1.364 | 1.854 | 2.463 | 2.907 | 3.337 |
| PIL_7M1 | 0.010 | 0.179 | 0.449 | 0.995 | 1.458 | 1.966 |
| SANJUAN_3 | 0.030 | 0.082 | 0.135 | 0.207 | 0.263 | 0.319 |
| SANJUAN_4 | 0.262 | 0.544 | 0.799 | 1.134 | 1.388 | 1.715 |
| SANJUAN_5 | 0.459 | 1.007 | 1.538 | 2.284 | 2.871 | 3.480 |
| SAN_7M1 | 0.010 | 0.173 | 0.549 | 1.302 | 2.042 | 2.875 |
| SAN_7M2 | 0.004 | 0.111 | 0.261 | 0.531 | 0.774 | 1.051 |
| TBT1 | 0.756 | 1.289 | 1.751 | 2.365 | 2.847 | 3.354 |
| TBT_7M1 | 0.010 | 0.076 | 0.221 | 0.514 | 0.791 | 1.108 |
| TBT_7M2 | 0.010 | 0.107 | 0.269 | 0.613 | 0.920 | 1.271 |
| TOR1 | 0.010 | 0.070 | 0.413 | 1.011 | 1.663 | 2.396 |
| TORCA4 | 0.035 | 0.127 | 0.227 | 0.374 | 0.490 | 0.611 |

Fuente: WSP, 2019.

En el Anexo 2 Análisis de Caudales, 2.5 Hidrogramas de crecientes, se presenta la información original procesada para la condición futura del proyecto.

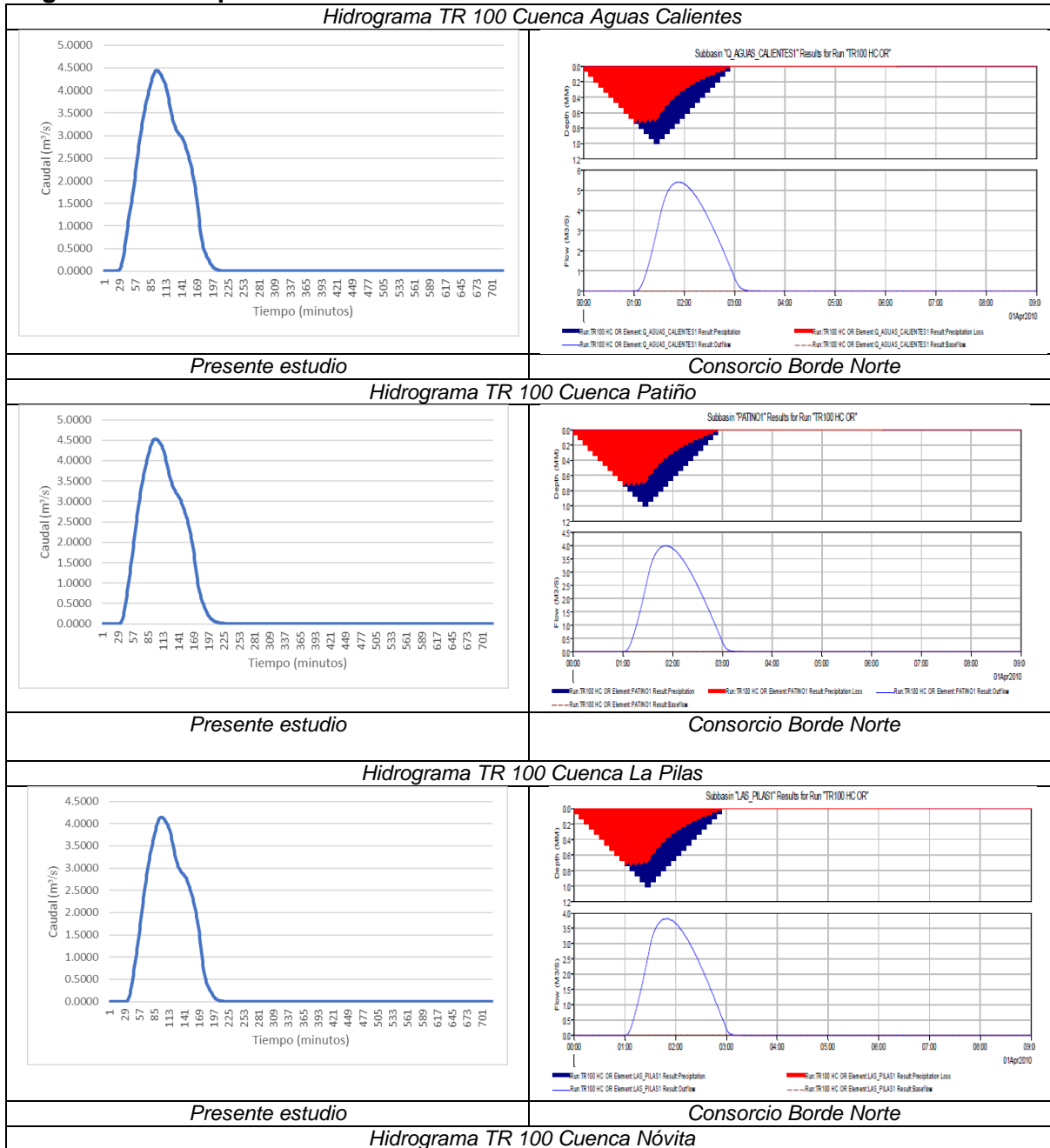
Las estimaciones del caudal de la Tabla anterior resultan de los cálculos realizados a partir del modelo de distribución temporal y espacial de la precipitación desarrollado para Lagos de Torca, es decir en un área total de 5709 ha y que corresponde al efecto generado por un evento de precipitación con un período de retorno de 100 años distribuido en esta área de drenaje. Es de aclarar que estos valores de caudal no podrán ser semejantes a los que se lleguen a obtener de manera independiente en cada cuenca de drenaje, a partir de eventos con duración inferior.

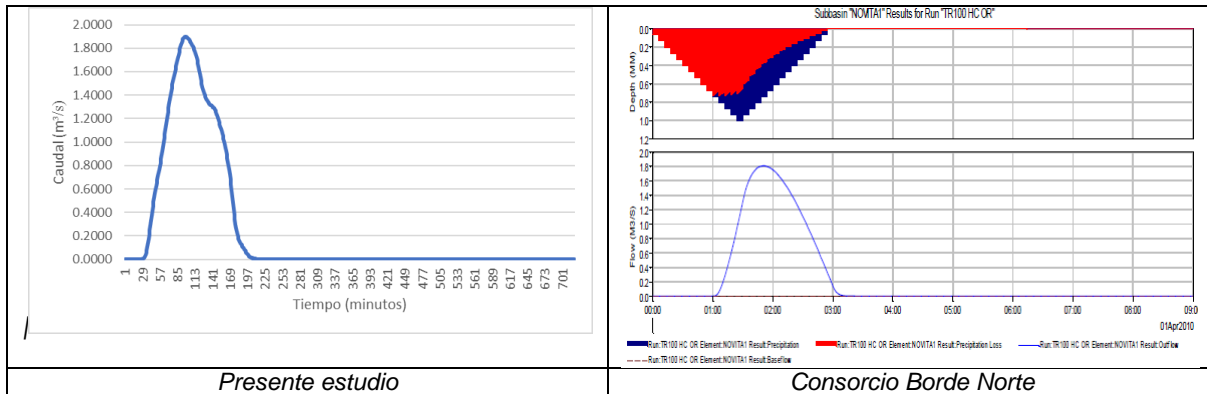
En la Figura 202 se presenta la comparación de los hidrogramas estimados en los estudios del Consorcio Borde Norte del año 2009, con los estimados en la presente consultoría, de donde se colige que hay una escasa variación entre los dos, debido posiblemente a la forma de distribución de la lluvia, que difiere por la forma en la manera de estimarse para esta consultoría, con base en estudios específicos para eventos de precipitación de la zona de estudio.

Para el caso de la quebrada Aguas Calientes, en el actual análisis se ha estimado un caudal pico de 3.78 m³/s mientras que el valor calculado en el estudio anterior es de 5.3 m³/s. Para la subcuenca de la quebrada Patiño el caudal pico estimado en ese estudio es de 4.0 m³/s, comparado con los 4.50 m³/s calculados por esta consultoría. En la subcuenca de la quebrada Las Pilas el caudal de 3.74 m³/s estimado por esta consultoría es prácticamente igual al estimado por el POZ Norte, en el cual el valor del caudal pico fue de 3.75 m³/s. En la cuenca de la quebrada Nóvita, el caudal estimado previamente fue de 1.80 m³/s, que es casi igual con los 1.78 m³/s, estimados mediante el procedimiento de esta consultoría.

Las variaciones o no entre los dos procedimientos se deben principalmente a que en la presente consultoría se llevó a cabo la simulación de un evento hidrológico general en toda la cuenca y que por su extensión sigue patrones de distribución espacial y temporal como los aquí presentados, mientras que para el caso de los estimados en el estudio del POZ Norte, la estimación de las crecientes se llevó a cabo a partir de las curvas IDF de la EAAB, distribuidas en hidrogramas teóricos y aplicados a cada subcuenca de manera independiente.

Figura 202. Comparación de caudales con estudios del Consorcio Borde Norte

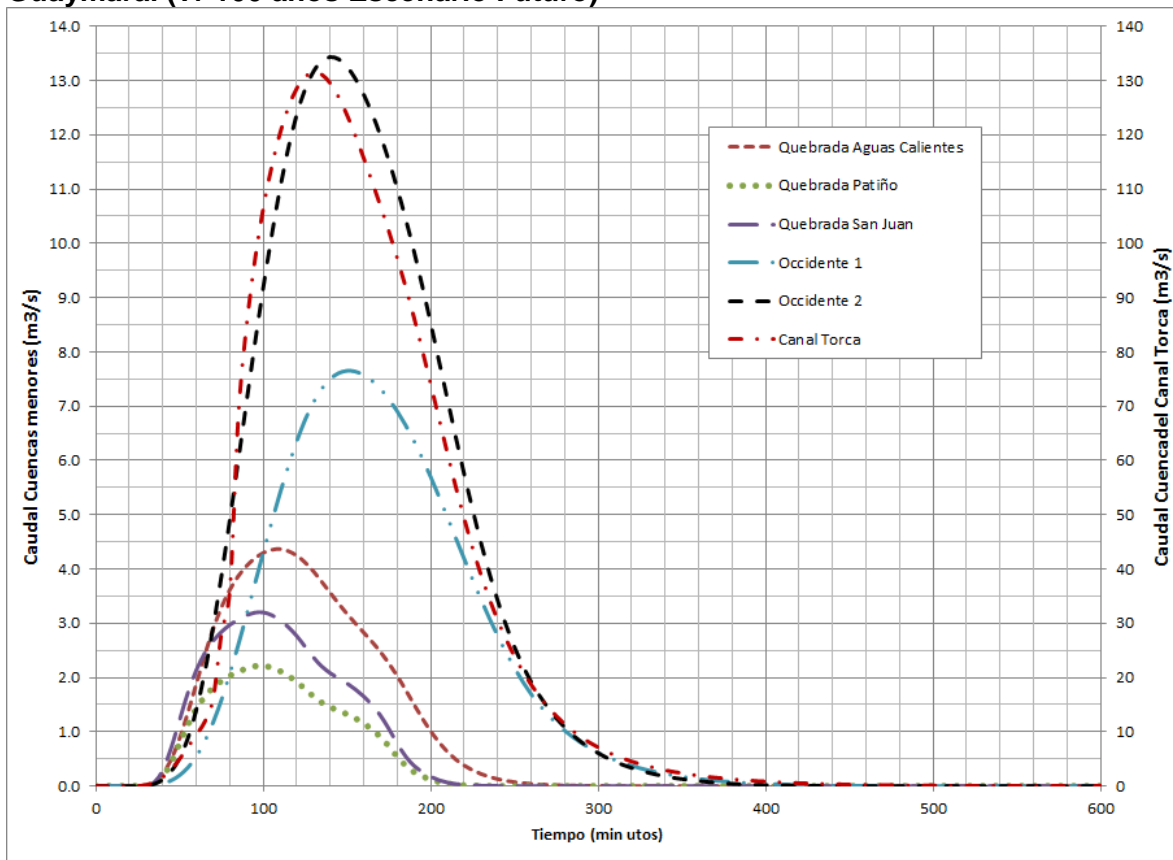




Fuente: WSP, 2019.

En la Figura 203 se presenta la comparación de los hidrogramas estimados para el Escenario futuro, con un período de recurrencia de Tr 100 años, en donde se muestra la gran diferencia que existen entre los aportes de la cuenca del Canal Torca, correspondería a un total del 64% en una ponderación aritmética de los caudales ingresados al sistema hídrico.

Figura 203. Hidrogramas de creciente en las subcuencas del sistema Torca-Guaymaral (Tr 100 años Escenario Futuro)



Fuente: WSP, 2019.

Es de resaltar que la cuenca del Canal Torca a pesar de que es la que mayor aporte genera al sistema de humedales Torca-Guaymaral, en la condición futura el incremento es de solamente el 4.3% en la condición futura, lo cual se debe a la condición de saturación que prácticamente tiene esta cuenca.

En la Tabla 37 se presenta la relación de los incrementos del caudal de la condición actual a la condición futura, para el evento hidrológico de Tr100 años. Al final el incremento promedio ponderado en toda la cuenca, una vez se encuentre implementado todo el desarrollo de Lagos de Torca, será del 1.48%, con respecto a la condición actual.

Tabla 37 Incremento en porcentaje, de los caudales de la condición actual y la condición futura

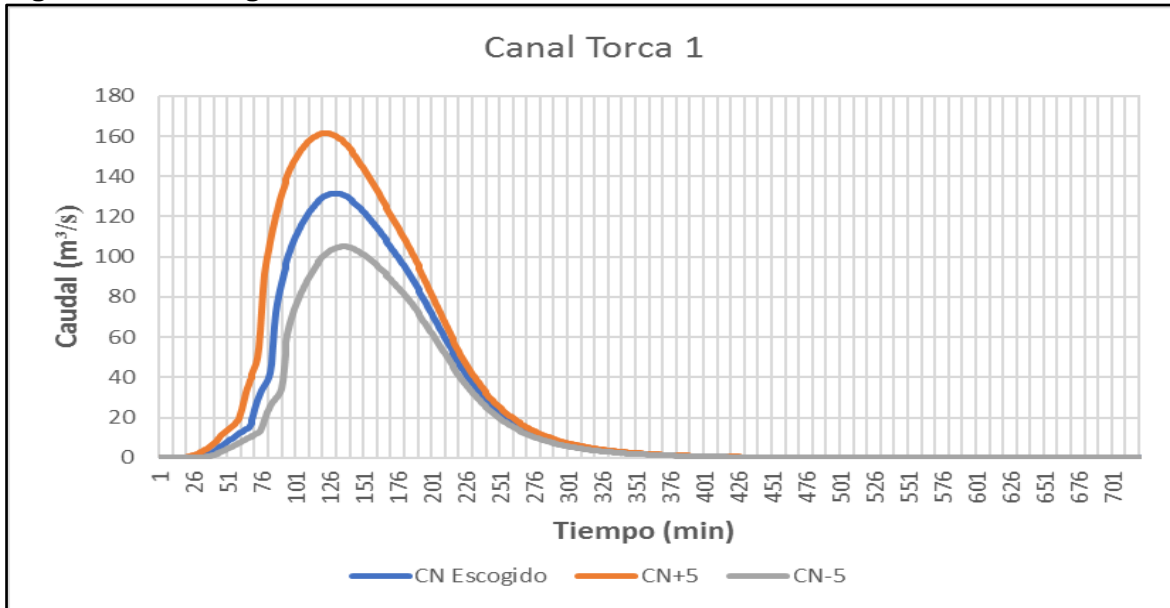
| QUEBRADA/SUB-CUENCA | PORCENTAJE DE INCREMENTO DEL CAUADL PICO | AREA DE LA CUENCA | % DE PARTICIPACION PONDERADA |
|--------------------------|------------------------------------------|-------------------|------------------------------|
| Q. Aguas Calientes | 7.60% | 1.929 | 0.26% |
| Canal Torca | 4.30% | 23.309 | 1.76% |
| Q. La Floresta | 43.80% | 6.524 | 5.01% |
| Afl. Directo Guaymaral 1 | 56.60% | 4.061 | 4.03% |
| Afl. Directo Guaymaral 2 | 26.20% | 4.481 | 2.06% |
| Afl. Directo Guaymaral 3 | 24.30% | 0.546 | 0.23% |
| Q. Nóvita | 38.80% | 0.891 | 0.61% |
| Afl. Directo Guaymaral 4 | 30.10% | 2.487 | 1.31% |
| Afl. Directo Guaymaral 5 | 21.80% | 3.004 | 1.15% |
| Q. Patiño | 8.90% | 1.288 | 0.20% |
| Q. Pilas | 27.30% | 2.11 | 1.01% |
| Q. San Juan | 36.90% | 2.52 | 1.63% |
| Q. Tibabita | 12.30% | 2.318 | 0.50% |
| Q. Torca | 34.50% | 1.619 | 0.98% |
| Total | | 57.087 | 1.48% |

Fuente: WSP, 2019

5.8.4 Análisis de sensibilidad del modelo HEC-HMS

Con el fin de realizar un análisis de sensibilidad del modelo hidrológico HEC-HMS, se calcularon los hidrogramas resultantes para 5 cuencas para el periodo de retorno de 100 años y condiciones futuras, modificando el valor del Numero de Curva obtenido en el análisis, aumentando y disminuyendo el valor en 5 unidades, teniendo en cuenta que este parámetro es el más sensible del modelo (Valcárel G., 2016). En la Figura 204. se presentan los hidrogramas resultantes obtenidos para la cuenca Canal Torca 1, la de mayor aporte al sistema, para la condición del CN obtenido por el análisis, se obtiene un caudal máximo de 131.55 m³/s, para la condición de CN disminuido 5 unidades se obtiene un caudal de 105.08 m³/s que corresponde a una disminución del 20.12% y para la condición de CN aumentado se obtiene un caudal de 161.46 m m³/s, que corresponde a un aumento del 22.73%.

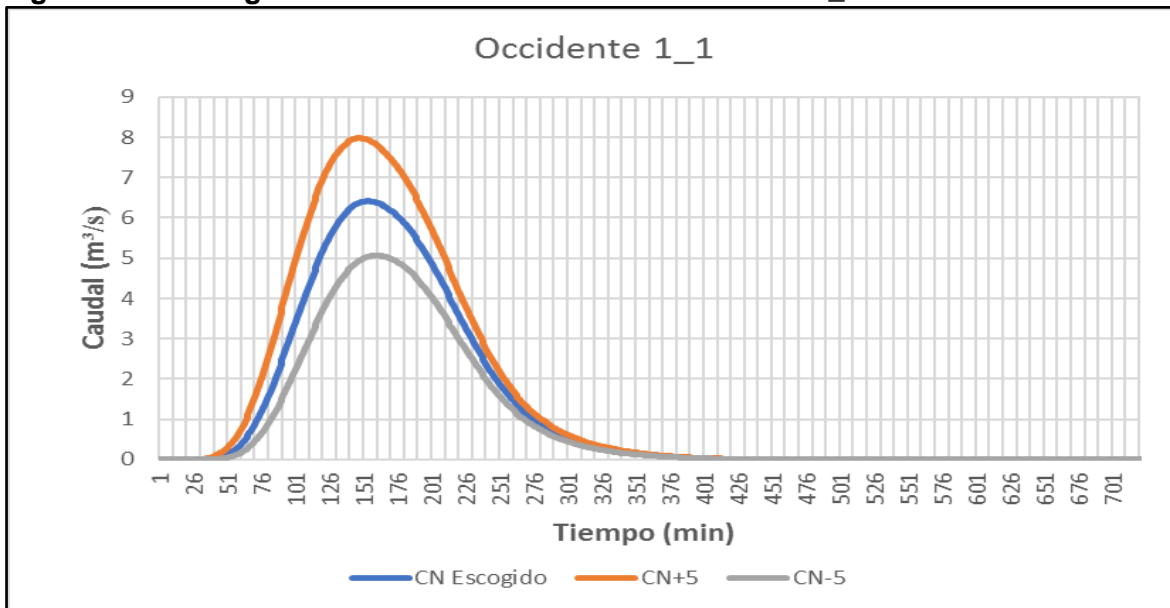
Figura 204. Hidrogramas TR100 Futuro cuenca Canal torca 1



Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

En la Figura 205 se presentan los hidrogramas resultantes obtenidos para la cuenca Occidente 1_1, para la condición del CN obtenido por el análisis, se obtiene un caudal máximo de 6.4 m³/s, para la condición de CN disminuido 5 unidades se obtiene un caudal de 5.06 m³/s que corresponde a una disminución del 21.04% y para la condición de CN aumentado se obtiene un caudal de 7.97 m³/s, que corresponde a un aumento del 24.4%.

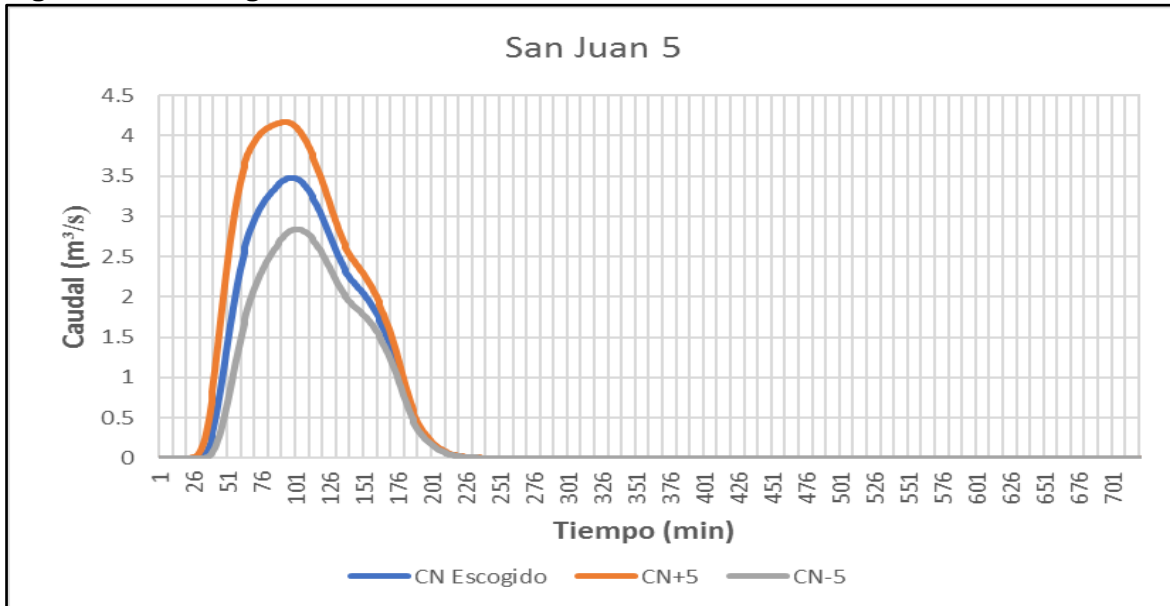
Figura 205. Hidrogramas TR100 Futuro cuenca Occidente 1_1



Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

En la Figura 206. se presentan los hidrogramas resultantes obtenidos para la cuenca San Juan 5, para la condición del CN obtenido por el análisis, se obtiene un caudal máximo de $3.48 \text{ m}^3/\text{s}$, para la condición de CN disminuido 5 unidades se obtiene un caudal de $2.84 \text{ m}^3/\text{s}$ que corresponde a una disminución del 18.36% y para la condición de CN aumentado se obtiene un caudal de $4.16 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde a un aumento del 19.8%.

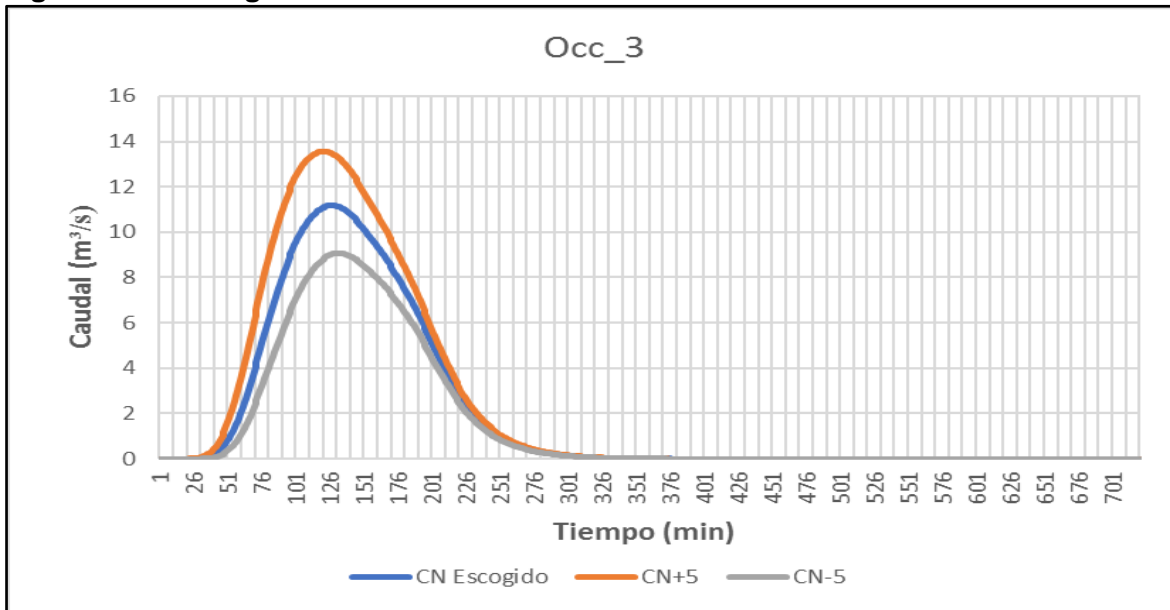
Figura 206. Hidrogramas TR100 Futuro cuenca San Juan 5



Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

En la Figura 207. se presentan los hidrogramas resultantes obtenidos para la cuenca Occ_3, para la condición del CN obtenido por el análisis, se obtiene un caudal máximo de $11.18 \text{ m}^3/\text{s}$, para la condición de CN disminuido 5 unidades se obtiene un caudal de $9.07 \text{ m}^3/\text{s}$ que corresponde a una disminución del 18.87% y para la condición de CN aumentado se obtiene un caudal de $13.57 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde a un aumento del 21.34%.

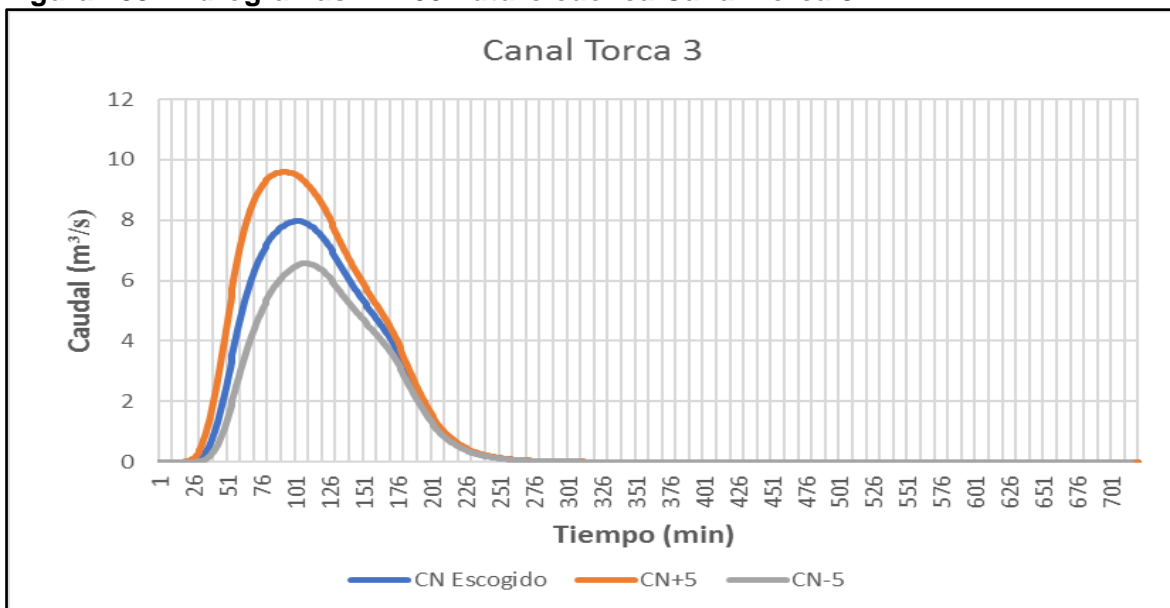
Figura 207. Hidrogramas TR100 Futuro cuenca Occ_3



Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

En la Figura 208. se presentan los hidrogramas resultantes obtenidos para la cuenca Canal Torca 3, para la condición del CN obtenido por el análisis, se obtiene un caudal máximo de 7.97 m³/s, para la condición de CN disminuido 5 unidades se obtiene un caudal de 6.56 m³/s que corresponde a una disminución del 17.6% y para la condición de CN aumentado se obtiene un caudal de 9.58 m³/s, que corresponde a un aumento del 20.26%.

Figura 208. Hidrogramas TR100 Futuro cuenca Canal Torca 3



Fuente: WSP a partir de datos EAAB, 2019.

En general la variación del CN muestra una diferenciación en la determinación de los caudales de este sistema hídrico, esto porque después de aumentar el CN en cinco unidades se sobreestima el caudal pico en un poco más del 20%. En cambio, si el CN se reduce en este mismo número de unidades respecto al CN inicial, el cambio porcentual en el caudal pico, no supera el 20%; aspecto que hace a este parámetro sumamente sensible.

5.8.5 Calibración del Modelo

Dentro de los alcances solicitados por los Términos de Referencia de esta consultoría, está la de realizar la calibración del modelo hidrológico e hidráulico, a partir de registros valores observados de precipitación y en este caso de los valores de caudal derivados de los niveles obtenidos de las estaciones limnimétricas instaladas por el proyecto. El periodo de análisis considerado corresponde a los eventos de mayor nivel registrado en las corrientes, que cuenten con la información pluviográfica correspondiente, a partir de estaciones de precipitación de la EAAB.

En el Anexo 7 del presente documento se hace el desarrollo de la metodología para la calibración y validación de los resultados encontrados a partir de la aplicación de los modelos teóricos de hidrología e hidráulica aplicados en este documento, para la cuenca del sistema Torca-Guaymaral, la cual carece de información detallada sobre sus comportamientos hidrológicos en el marco de la relación precipitación - escorrentía.

5.8.5.1 Modelo hidrológico

En resumen, el procedimiento llevado a cabo desarrolló las siguientes etapas:

- Recopilación de la información relacionada con los aspectos más relevantes de la simulación hidrológica llevada a cabo para la condición teórica simulada inicialmente, por medio de los programas HEC-HMS y HEC-RAS, y de las características morfológicas e hidrológicas que ayudan a satisfacer las necesidades de cálculo, calibración y validación de cada modelo.
- Selección de los mayores eventos de precipitación registrados en las estaciones de estudio. Para el análisis se seleccionaron aguaceros con precipitación registrada en los pluviogramas mayor a 10 mm. Esta información fue suministrada por los pluviógrafos de las estaciones de la EAAB, que de igual manera se relacionan en los anexos del documento en mención.
- Generación de la distribución temporal del evento a partir de los hietogramas de las tormentas de cada evento en cada una de las estaciones de precipitación, creando un hietograma unitario para cada evento seleccionado.
- A partir de las curvas de distribución espacial se procede a realizar la distribución espacial del evento para cada cuenca de drenaje bajo el evento. De esta manera se obtiene el volumen total de precipitación que será incluido en el modelo de simulación, que para el caso emplea el software Hec-HMS, de manera similar como se empleó para la generación del modelo hidrológico teórico inicial. Luego, a partir de los

hietogramas unitarios generados de las tormentas registradas en el evento se generó un hietograma unitario envolvente de la tormenta.

- La precipitación espacial obtenida en cada evento se distribuyó en el área de cada una de las cuencas mediante el hietograma unitario obtenido para cada tormenta, obteniendo la precipitación de cada subcuenca para cada uno de los eventos, mediante la función de análisis espacial de QGIS.
- A partir de la precipitación de cada evento obtenida en cada subcuenca y con el hietograma unitario de cada tormenta, se generó un hidrograma del evento para cada subcuenca, los cuales fueron los datos de entrada para generar un modelo de escorrentía de cada tormenta en Hec-HMS.
- En la determinación de la curva de calibración de caudales para las corrientes que fueron objeto de medición se llevaron a cabo una serie de aforos a lo largo del período de la consultoría, con el objeto de generarla, con miras de igual modo, para llevar a cabo la calibración hidráulica e hidrológica del sistema hídrico.
- Con el objetivo de calibrar el modelo de escorrentía elaborado en Hec-HMS se ingresaron los datos de caudal medidos en las corrientes principales para cada uno de estos eventos, a partir de las curvas de calibración generadas para las estaciones de medición de niveles. Se empleó el método Nelder-Mead como el algoritmo de optimización. Este método numérico busca minimizar la función objetivo. La función objetivo dentro de este proceso de calibración es la escorrentía generada, y los parámetros a optimizar fueron el número de curva y la abstracción inicial.
- Se realizó la optimización de los parámetros número de curva CN y abstracción inicial para las tormentas escogidas de 9 días por cuatro métodos de optimización: Error cuadrático medio, suma de errores absolutos, error porcentual en volumen y Error cuadrático medio ponderado en el tiempo.

En el Anexo 7 se presentan el documento de detalle de los procesos llevados a cabo, así como los resultados numéricos, gráficos y modelos hidrológicos elaborados para la calibración.

5.8.5.2 Modelo hidráulico

La calibración del modelo hidráulico es el ajuste de los parámetros de un modelo, como la rugosidad y los coeficientes de las estructuras hidráulicas, de modo que reproduzca los datos observados con una precisión aceptable.

El mayor problema de la calibración de modelos hidráulicos es la inconsistencia, es decir, el modelo reproducirá un evento, pero no otro. Se buscará identificar los errores e inconsistencias en los datos de entrada e identificar posibles cambios geomorfológicos en el sistema. Dada la complejidad del sistema se plantea realizar la calibración de los coeficientes de rugosidad de Manning, para cada una de las quebradas que cuentan con los registros de niveles adecuados, por separado en modelos hidráulicos unidimensionales.

Los pasos seguidos para el desarrollo de esta actividad se resumen de la siguiente manera:

- A partir de los registros de medición de caudales en cada una de las estaciones de aforo, se evidenció que los datos tomados a partir de los aforos, durante la temporada de medición, solamente se registraron valores para la zona de caudales mínimos y medios, sin que se hayan logrado aforar caudales altos, que son los que se emplearían para la calibración del modelo hidrológico e hidráulico. Por esta razón, el análisis de la obtención de la curva de calibración empleó un método combinado, basado en los datos que se registraron para la parte baja de la curva, con un modelamiento hidráulico teórico para la zona alta de curva, a partir de las batimetrías llevadas a cabo en cada uno de los cauces.
- El modelamiento hidráulico para generar la curva de calibración se hizo asumiendo un grupo de caudales máximos para las condiciones actuales de los cauces y con el empleo del programa HecRAS 1D.
- Los registros de medición de niveles de agua en los cauces de las cuencas seleccionadas, se acopió a lo largo del período de análisis de la consultoría, con lo cual se obtienen registros minutales entre el mes de abril hasta el mes de agosto de 2019.
- La observación de los resultados, mostró que existe una alta variabilidad entre los resultados modelados comparados con los obtenidos en los eventos hidrológicos seleccionados. Esta variabilidad se evidencia tanto para los caudales pico de los eventos hidrológicos o por el contrario para los volúmenes del evento.
- Para la cuenca del Canal Torca, por ejemplo, se muestra que la deficiencia en los datos tanto de precipitación como de aforos, para la generación de curvas de calibración de caudales, conlleva a una apreciable variabilidad entre los resultados esperados, al momento de comparar un evento de precipitación con la respuesta hidrológica medida aguas abajo.

En el Anexo 7 se presentan el documento de detalle de los procesos llevados a cabo, así como los resultados numéricos, gráficos y modelos hidráulicos elaborados para la calibración.

5.8.5.3 Conclusiones

- Los resultados de las campañas de aforo realizados a lo largo del período de duración de la presente consultoría, indican que será necesario en el futuro, continuar con las jornadas de manera sistemática, con el objeto e incrementar el número de registros con miras a la complementación y/o validación de la curva de calibración de caudales, para realizar la posterior calibración de los modelos hidrológicos e hidráulico de las cuencas y los cauces de las quebradas de estudio.

- El procedimiento de calibración llevado a cabo para las cuencas monitoreadas dentro de esta consultoría, muestra que la deficiencia en los datos tanto de precipitación como de aforos, para la generación de curvas de calibración de caudales, conlleva a una apreciable variabilidad entre los resultados esperados, al momento de comparar un evento de precipitación con la respuesta hidrológica medida aguas abajo.
- La mejora en los resultados, debe implicar la extensión del período de toma de datos, especialmente los referentes a los aforos y que de alguna manera se logren llevar a cabo la toma de registros de caudal durante los eventos hidrológicos de creciente o lluvia intensa al interior de la cuenca, con lo cual será posible tener datos para completar la curva de calibración de caudales. Los tomados durante esta consultoría solo llegaron a representar la zona baja de estas curvas, por lo que se recurrió a establecer una curva de calibración teórica utilizando la información topográfica y batimétrica de los cauces monitoreados.
- La fase de validación del modelo hidrológico no se llevó a cabo debido a que la calibración no fue exitosa, al no generar un modelo que pueda reproducir otro tipo de eventos distintos a los seleccionados para la fase de calibración.
- Es recomendable la implementación de estaciones de medición meteorológica dentro de la cuenca Torca Guaymaral, que complementen la red de monitoreo de precipitación y climatológico, que la EAAB tiene en este sector de la Sabana de Bogotá, dado que los datos empleados para el presente análisis, se hicieron a partir de registros de estaciones alejadas del centroide de la cuenca. De esta manera se podrá disminuir la dispersión de la distribución de los eventos de precipitación, sea esta temporal o espacialmente.
- Una vez las actividades de reconfiguración de quebradas se lleven a cabo, se recomienda realizar la reinstalación de las estaciones de registro de niveles que fueron instaladas durante esta consultoría, permitiendo que se hagan lecturas en la zona baja de la cuenca, previa a la desembocadura al Humedal Torca-Guaymaral o al Camal Guaymaral. Para la zona de piedemonte, hacia la Carrera Séptima, se recomiendan hacer monitoreos de sedimentos, con el objeto de establecer las tasas de aporte de material de arrastre desde la cuenca alta y establecer el comportamiento sedimentológico de los cauces en la zona plana de las cuencas, así como las posibles tasas de azolve en el cuerpo del humedal.

6 ESTUDIOS HIDRÁULICOS

6.1 DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES

6.1.1 Selección del modelo de simulación

La modelación hidráulica parte de diferentes aproximaciones al flujo de agua en la naturaleza (unifásico, bifásico, unidimensional, bidimensional, tridimensional, permanente, no permanente), que simplifican las ecuaciones físicas que lo modelan, cuya resolución permite estimar parámetros tales como profundidad, velocidad y energía (Instituto Geológico y Minero de España, 2008).

La primera decisión que se toma cuando se pretende desarrollar un modelo hidráulico de inundaciones es el tipo de modelo a utilizar. Existen diferentes tipos de modelos según la complejidad espacial de las ecuaciones que soluciona el mismo: unidimensionales, bidimensionales y tridimensionales (1D, 2D, 3D). Para el presente estudio, a manera de actualización del modelo elaborado por el Estudio del Plan Maestro del Borde Norte del año 2009 y como requerimiento del Anexo Técnico de esta consultoría, se seleccionó uno de tipo Bidimensional, mediante el uso del software HecRas 2D v5.05 desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, cuyo uso se ha extendido a nivel mundial, además de que es de acceso libre.

Luego de seleccionar el tipo de modelo y el programa computacional a utilizar, se procede con la esquematización del modelo (resolución espacial y temporal, esquematización de las edificaciones y otra infraestructura tales como puentes, alcantarillas, jarillones, etc.). Los procedimientos para la toma de esta información se describirán más adelante.

6.1.2 Modelo digital de terreno -MDT)

Es necesario tener un número adecuado de secciones que definan precisamente la geometría de los cauces de quebradas, canales, humedales y de las llanuras de inundación para evitar la producción de errores al momento de aplicar el modelo de simulación. Se comprueba que todas las estructuras hidráulicas hayan sido descritas e incorporadas de forma precisa. Esta actividad incluye revisar que los desbordamientos laterales se han modelado adecuadamente (levees, áreas inefectivas, estructuras laterales).

Esta geometría se importó a HecRAS 2D en forma de una red irregular de elementos finitos, en la cual se discretiza el terreno en una malla no estructurada, que se ajusta mejor para modelamiento en hidráulica fluvial.

6.1.3 Rugosidades

En HecRAS 2D la resistencia al flujo se asigna a partir del coeficiente de rugosidad de Manning. Para esto se dispone de un archivo de usos de suelo generado anteriormente en formato ArGis que contiene la distribución de los coeficientes de rugosidad. Para importarlo al modelo se lo realiza desde el menú "Datos>Rugosidad>Asignación automática". Este menú abre una ventana de selección en donde se puede elegir el archivo. Cuando se asigna los coeficientes de Manning a través de un archivo tipo shape.

Para el caso de la cuenca Torca-Guaymaral, se realizó la asignación según el tipo de cobertura o el revestimiento de los cauces principales de flujo.

6.1.4 Condiciones de borde

Se continua con el ingreso de las condiciones iniciales y de contorno para ejecutar el módulo hidrodinámico.

- Condiciones Iniciales.

Se refiere al estado del modelo al inicio de la simulación y se debe asignar a todo el dominio. Es posible escoger entre asignar un calado o una cota de agua. Para el modelo desarrollado se empezó la simulación con un nivel preexistente en el sistema hídrico, mediante la incorporación de un hidrograma previo a todo el sistema. Esto con el objeto de generar un nivel de almacenamiento previo y de esta manera reducir la capacidad de almacenamiento de los humedales; de manera conservadora, se considera la ocurrencia de eventos hidrológicos previos que ocupan parte de la zona de amortiguación de los humedales.

- Condiciones de contorno.

Se deben establecer en los bordes de la malla, que para el caso corresponden a los límites de las cuencas definidas al inicio en la morfometría.

- Condiciones de contorno de entrada.

Para asignar la entrada de un flujo en el modelo, se lo puede hacer ingresando un caudal total, en cada sitio de ingreso definido por la morfometría del modelo hidrológico. Para cada uno de los casos se define un régimen subcrítico, como condición de partida del modelo de simulación.

Para el caso de estudio se asumió régimen crítico/subcrítico y a partir del menú de datos en las Condiciones de contorno se establecieron los bordes de la malla los caudales a simular que se obtuvieron en el aparte de Hidrología, ingresado mediante un Hidrograma.

- Condiciones de contorno de salida.

Al igual que para la entrada, para asignar las condiciones de salida, se establecieron las condiciones de flujo. Dado que el régimen se espera sea subcrítico, fue necesario fijar parámetros adicionales, que en este caso corresponde a una condición de cota en el río Bogotá.

6.1.5 Limitaciones del modelo

Algunas de las limitaciones que presenta esta nueva versión del programa son:

- Con respecto a la generación de mallas en 2D, no existen suficientes herramientas automatizadas para generar una malla computacional 2D detallada. Es cierto que existen herramientas para modificar y editar la geometría de la malla, pero esto lo

debe hacer el usuario de forma manual, lo que lo puede convertir en un proceso largo y tedioso proceso para grandes mallas.

- La generación de estructuras hidráulicas dentro de un área 2D, también es un proceso poco flexible y que es muy laborioso para el usuario.
- No se puede realizar una simulación de calidad de agua dentro de un área 2D.
- No se pueden utilizar las capacidades de modelación de puentes de Hec-Ras dentro de un área 2D.

6.1.6 Esquema de la modelación

6.1.6.1 Flujo no permanente, flujo no uniforme

El flujo no uniforme responde a la variación de la lámina de agua en la dirección de movimiento del fluido. Por su parte, el flujo uniforme se desarrolla en condiciones muy especiales, en las cuales la lámina de agua no recibe perturbaciones y el flujo se encuentra sobre una estructura de pendiente constante y no presenta controles del flujo como vertederos, descargas libres o compuertas, este flujo es muy difícil de encontrar en los distintos cuerpos de agua. Contrario al flujo uniforme se encuentra el flujo no uniforme, conformado por los flujos rápidamente variado y gradualmente variado, los cuales contemplan todas las perturbaciones de flujo en un cuerpo de agua y representan dichas condiciones por medio de perfiles de flujo. El esquema de modelación seleccionado es el flujo no uniforme, este tipo de flujo es el único que se encuentra disponible en el software de modelación HEC-RAS.

La clasificación del flujo en permanente o no permanente obedece a la utilización del tiempo como variable. El flujo es permanente si los parámetros de flujo, tales como la velocidad y profundidad de lámina de agua entre otros, no cambian con respecto al tiempo; es decir, en una sección del canal en todos los tiempos los parámetros de flujo permanecen constantes.

Si los parámetros cambian con respecto al tiempo el flujo se denomina no permanente, es decir que para cada intervalo de tiempo se tienen condiciones distintas de profundidad, velocidad, caudal y otros parámetros de flujo para un mismo punto. El esquema seleccionado para la modelación es el flujo no permanente, que implica la inclusión de hidrogramas de flujo en vez de caudales constantes.

6.1.6.2 Modelo bidimensional (2D)

Los modelos unidimensionales son reconocidos por su exactitud en la predicción de parámetros hidráulicos en el cauce principal de ríos, sin embargo, presentan desventajas en el momento de predecir desbordamiento del caudal del cauce principal sobre las llanuras de inundación del mismo. En general los modelos unidimensionales presentan dificultados para predecir el flujo en cuerpos lénticos.

Es en modelos con áreas importantes de almacenamiento o de gran dispersión que los modelos bidimensionales (2D) presenta la mayor utilidad. Es por esto por lo que el marco de modelación seleccionado para presentar el intercambio de caudal entre los cauces principales (como las quebradas y los canales Torca y Guaymaral) y las áreas de almacenamiento (los humedales Torca y Guaymaral) es un modelo en dos dimensiones. El modelo seleccionado para el sistema Torca-Guaymaral es el modelo HEC-RAS en su versión 5.0.3.

Las ecuaciones de Navier-Stokes describen el movimiento de fluidos en tres dimensiones. En el contexto de modelación de inundaciones, se aplican algunas simplificaciones. Un conjunto simplificado de ecuaciones corresponde al de Aguas Poco Profundas. En el cual se asume flujo incompresible, de densidad uniforme y presión hidrostática, así como, el movimiento turbulento se aproxima utilizando la viscosidad de Eddy, también se asume que la escala de la longitud vertical es mucho más pequeña que la escala de la longitud horizontal, como consecuencia, la velocidad vertical es pequeña y a presión es hidrostática, lo que conduce a las ecuaciones que describen el modelo. La ecuación de conservación de masa es discretizada utilizando una técnica de volúmenes finitos.

Asumiendo que el flujo es incompresible, la forma diferencial de la ecuación de conservación de masa está dada por:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} + q = 0$$

Dónde t es el tiempo, u y v son los componentes de velocidad en la dirección x e y respectivamente y q termino de flujo, en forma vectorial, la ecuación toma la forma de:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot hV + q = 0$$

Dónde V=(u, v) es el vector de velocidad y el operador diferencial nabla (∇) es el vector de las derivadas parciales dadas por $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$.

Integrando sobre la región horizontal con el vector normal n, y utilizando el teorema de divergencia de Gauss, se obtiene la forma integral de la ecuación:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} d\Omega + \iint_S V \cdot n dS + Q = 0$$

La región volumétrica Ω representa el espacio tridimensional ocupado por el fluido. Los limites laterales están dados por S. Se asume que Q representa cualquier flujo que cruce la superficie inferior (infiltración) o la superficie superior del agua del volumen (evapotranspiración o lluvia). El termino de flujo fuente/sumidero Q también es conveniente para representar otras condiciones de transferencia de masa hacia dentro, fuera o dentro del sistema, como estaciones de bombeo.

La ecuación de Navier-Stokes de momento vertical pueden ser utilizadas para justificar que la presión es casi hidrostática, En la ausencia de gradientes de presión baroclínica (densidad variable), influencia de viento y presiones no hidrostáticas, un promedio vertical de la ecuación de momento es adecuada. Los términos de velocidad y derivada verticales pueden ser despreciados. De esta manera se obtienen las ecuaciones de aguas poco profundas:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} + v_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - c_f u + f v$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} + v_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - c_f v + f u$$

Donde u y v son las velocidades en dirección cartesiana, g es la aceleración gravitacional, v_t es el coeficiente horizontal de la viscosidad de Eddy, c_f es el coeficiente de fricción de fondo, R es el radio hidráulico y f es el parámetro de Coriolis. El lado izquierdo de la ecuación contiene los términos de aceleración, el lado derecho representa las fuerzas internas y externas actuando en el fluido.

6.1.6.3 Ras Mapper

RAS Mapper es una herramienta implementada en la última versión de HEC-RAS 2D, con la intención de mostrar los resultados de la modelización hidráulica, principalmente de representar la planicie de inundación que ocasionaría el desborde del curso de agua principal. Asimismo, las tareas básicas, que se desarrollan en RAS Mapper son:

- Definición del sistema de referencia espacial de trabajo

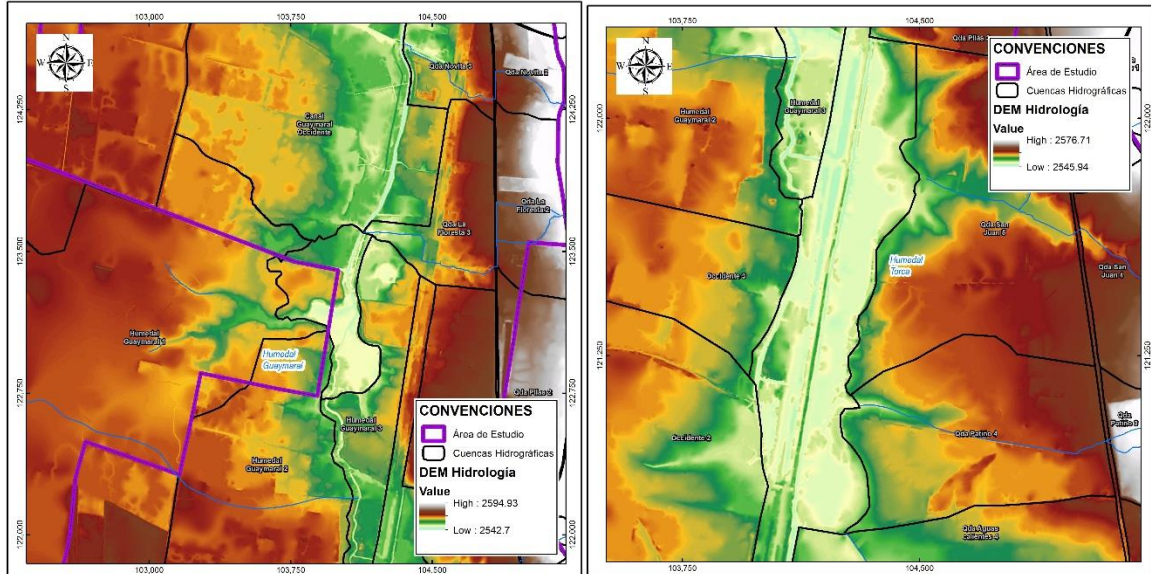
La primera actividad para dar inicio a la modelación en dos dimensiones, es la georreferenciación del modelo a trabajar. Esta tarea se logra en RAS Mapper, a través de la herramienta Set Projection for Project. Para poder georreferenciar el modelo, el programa trabaja los archivos de extensión “*.prj” (ESRI projection file), vinculados con la base datos que contiene el software ArcGIS.

- Generación del modelo digital de terreno (MDT)

Los formatos reconocidos por el programa son: Floating Grid Point (*.flt), GeoTIFF (*.tif), ESRI grid files, y otros. Cualquiera de los formatos elegidos serán convertirlos en formato GeoTIFF (*.tif), el cual será comprimido para permitir un menor espacio de almacenamiento y mayor rapidez en la velocidad de cómputo al momento de generar mapas de inundación.

Para crear un terreno, se debe ir la opción *Tools>create a new terrain*. Una vez en esta ventana, se debe cargar el archivo que contenga la información del terreno de la zona que se está estudiando. El resultado es la visualización del terreno de la Figura 209, en el cual puede apreciar el relieve y la forma de esta zona.

Figura 209. Visualización del MDT en Ras Mapper de HecRas 2d



Fuente: WSP, 2019

En el Anexo 5 Información topográfica, 5.1 Bases topográficas, se presenta la información original procesada a partir de los levantamientos topobatimétricos y de lidar llevados a cabo para el proyecto. En el Anexo 5.2 Planos, se muestran los planos en Planta y Perfil de la totalidad de los cuerpos de agua (Humedales, canales y quebradas) del proyecto. Para mayores detalles procedimentales y de proceso de información se puede recurrir al Producto 2 Topografía, del presente estudio.

6.2 RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Como información recopilada referente a los estudios hidráulicos, se obtuvo información topográfica, información de inventarios de estructuras transversales e información secundaria correspondiente a estudios previos. Estas fuentes se describen a continuación.

6.2.1 Información de campo

La información de campo recolectada para el sistema Torca-Guaymaral se compone de un levantamiento topográfico para la totalidad del polígono de Lagos de Torca), por un inventario de alcantarillas y por la ejecución de apiques y visitas de campo sobre el sector de estudio. Cada uno de estos componentes se expone en los numerales que acontecen.

6.2.1.1 Topografía

Para conocer las condiciones topográficas del terreno se realizó la recopilación de información primaria de la zona de estudio por medio de un número de levantamientos topográficos que caracterizaron la zona, que tenía por objeto:

- Efectuar levantamiento topográfico y batimétrico mediante secciones transversales.
- Efectuar toma de información referente a lodos en cada cuerpo de agua.
- Materializar y posicionar deltas de poligonal.
- Generar MDT a partir de las lecturas realizadas en campo.

Los levantamientos realizados abarcaron las siguientes zonas y metodologías:

- Levantamiento Lidar: Para las áreas llanas de la zona de estudio
- Levantamiento topográfico convencional: Para las zonas de cauces y detalles
- Levantamiento batimétrico: para Humedales y cuerpos de agua

El amarre de georeferenciación se llevó a cabo a partir del punto IGAC BGT30, desde donde se desprenden circuitos de nivelación hacia la RED GPS propia del proyecto LAGOS DE TORCA, el traslado de cota se dividió en 2 componentes; el primero consta del chequeo de cota geométrica de la RED GEODÉSICA Contrato 1388 IDU AV. BOYACÁ y el vértice IGAC BOGOTA-1 (punto que se tomó en cuenta para verificación y control), posteriormente se desprendieron los circuitos de nivelación hacia la red GPS Lagos de Torca.

Los parámetros generales del vuelo fotogramétrico y LIDAR planificado fueron los siguientes:

| | | |
|---------------------------------------------|-----|-----|
| - Altura de vuelo sobre el terreno (m) | | 346 |
| - Velocidad del vuelo (Km/h) | | 69 |
| - Ángulo de visión (°) | | 68 |
| - Densidad mínima de la nube LIDAR (pts/m2) | 20 | |
| - Ancho de faja (m) | 372 | |
| - GSD (Tamaño de pixel) (cm) | | 4 |
| - Recubrimiento longitudinal (%) | 70 | |
| - Recubrimiento transversal (%) | 50 | |

Los resultados Finales del Lidar Aerotransportado emplearon el método de correlación automática de imágenes en Agisoft Photoscan, el cual incluye un total de 2059 fotografías del proyecto. Como resultado de esta fase se obtuvieron los siguientes productos:

- 76 imágenes RGB, a resolución 4 cm Formato ECW.
- Fichero AUX de georreferenciación
- Curvas de Nivel cada 50 cm.
- MDT y nube de puntos para todo el Polígono de estudio.

Para los levantamientos topográficos especiales de Canales, Humedales, Quebradas, Cuerpos de Agua y Vallados, se empleó metodología convencional de planimetría y altimetría que incluye las batimétricas en las áreas de Humedales - Canales – Cuerpos de Agua, por medio de procedimientos como el levantamientos planimétricos - altimétricos y técnicas de levantamiento con GPS RTK (Figura 210).

Para el levantamiento topográfico de las quebradas de interés que se encuentran ubicados en la zona de la ciudad de Bogotá, entre el área de Guaymaral y el área de Torca, paralelo a la Autopista Norte, en la que se incluyen las quebradas Torca, Novita,

Cañiza, La Floresta, San Juan, Patiño, Aguas Calientes, Las Pilas y Tibabita, se tuvo en cuenta:

- Efectuar levantamiento topográfico y batimétrico mediante secciones transversales.
- Efectuar toma de información referente a lodos en cada cuerpo de agua.
- Materializar y posicionar deltas de poligonal.
- Generar MDT a partir de las lecturas realizadas en campo.

Figura 210. Levantamiento batimétrico de cauces y humedales del sistema hídrico



Fuente: WSP, 2019

En la toma de información de los puntos de terreno, detalles planimétricos y altimétricos mediante el método de radiación sencilla desde los deltas o puntos posicionados, se genera la nube de puntos equidistantes entre 5 y 10 metros dependiendo de las características del terreno, complementando además esta nube de puntos con las líneas de quiebre del terreno necesarias para la generación del modelo digital. De igual forma cada punto leído lleva una numeración consecutiva y un código predefinido que lo identifica y es registrado en la memoria del equipo. Para la toma del contorno y la profundidad de los bordes, se realizó un desplazamiento a pie o técnica de vadeo para poder definir los bordes del cuerpo de agua (Figura 211).

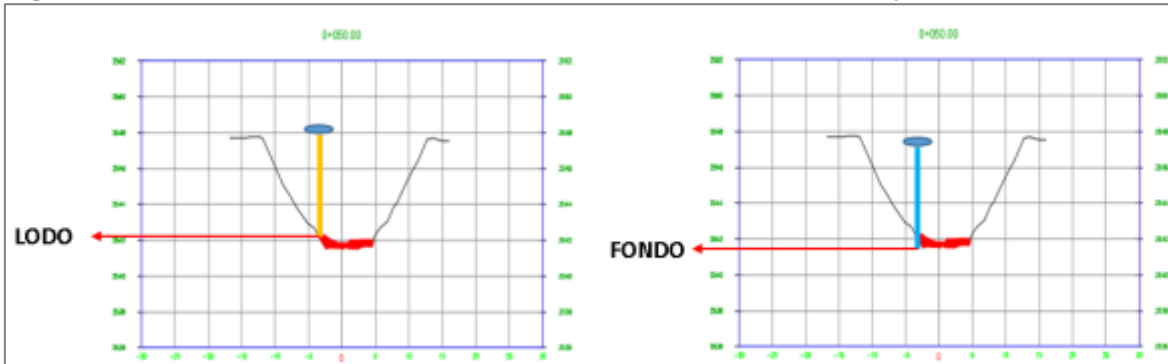
Figura 211. Detalle del levantamiento topográfico de detalles del sistema hídrico



Fuente: WSP, 2019

Dentro de la captura de información batimétrica, se realiza una medición de lodos; esta se realiza con la ayuda de un tope que se coloca en la parte final o punta del bastón, luego se sumerge el bastón en el cuerpo de agua hasta encontrar fondo, a este punto se le denomina lodo; posteriormente se saca el bastón del cuerpo de agua y se retira el accesorio o tope que se había colocado previamente, en la misma zona de la medición anterior se introduce el bastón sin el tope y se realiza una breve presión para atravesar los sedimentos que se encuentren en el fondo, a esta medición se le denomina fondo (Figura 212).

Figura 212. Detalle del levantamiento lodos en fondo de cauces y humedales



Fuente: WSP, 2019

Los detalles de estos levantamientos se presentan en el Producto 2. Topografía, que igualmente forma parte de los entregables de la presente consultoría.

6.2.1.2 Inventario de estructuras hidráulicas

Para poder realizar el diagnóstico de la situación actual del drenaje de la zona, se realizó un levantamiento de estructuras transversales a cargo de una comisión de topografía. Con el levantamiento de las estructuras se consolidó un inventario conformado por fichas en las cuales se registra la información encontrada acerca del proyecto, la información general, esquemas, fotografías e información acerca del estado de las estructuras.

Para la realización de estas fichas, se utilizó un formato de levantamiento de estructuras en donde se consignaba la mayor cantidad de información posible acerca de la estructura a levantar.

6.2.2 Información secundaria

Para la elaboración de este informe, fue necesario llevar a cabo la búsqueda, revisión y análisis de información secundaria, esto consiste en, bibliografía, estudios, trabajos.

La información secundaria usada para este informe fue básicamente:

- POZ Norte: FACTIBILIDAD TÉCNICA, AMBIENTAL, ECONÓMICA Y FINANCIERA PARA EL DESARROLLO DE LA INFRAESTRUCTURA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO SANITARIO Y SISTEMA DE DRENAJE PLUVIAL DEL BORDE

NORTE DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ – Contrato de consultoría No 1-02-25500-0626-2009; mayo 2011.

En el cual se revisaron con especial atención los subproductos:

- 4.1.3 Estudio hidrológico de carácter regional
 - 4.1.4 Modelo hidráulico
 - 5.1 Evaluación y selección de alternativas
 - 5.2 Diseño hidráulico y geométrico
- ACTUALIZACIÓN, REVISIÓN, COMPLEMENTACIÓN O EJECUCIÓN DE LOS DISEÑOS DE COLECTORES, INTERCEPTORES, REDES Y BOMBEO DEL SISTEMA DE ALCANTARILLADO; CANAL E INTERCEPTORES TORCA – EAAB - Compañía de Estudios e Interventorías CEI LTDA y Estudios Civiles y Sanitarios ESSERE LTDA, 1998.

Estos documentos se emplearon principalmente para realizar la comparación con las estimaciones llevadas a cabo con el proyecto en ejecución.

6.2.3 Humedal Torca-Guaymaral

Los cuerpos de aguas de tipo humedal, denominados como humedal Torca y humedal Guaymaral fueron considerados como un único sistema el cual consiste en un cuerpo léntico ubicado desde la calle 207 (donde inicia el humedal Torca) hasta la calle 235 (donde finaliza el humedal Guaymaral). Estos humedales presentan tres puntos de conexión principal, operados por la EAAB, localizados a lo largo de un tramo de aproximadamente 1500 m y que corresponden a box culverts los cuales conectan la parte inicial, media y final del humedal Torca con el canal Guaymaral.

Actualmente la cota de fondo del humedal se ha visto incrementada con el paso de los años debido a la sedimentación, producto de las altas cargas de sedimentos enviadas a través del Canal Torca y de la gran carga orgánica que representan estas aguas. Por ello se revisa la cota de fondo de los estudios posteriores realizados a este humedal, específicamente se revisan los estudios de POZ Norte: FACTIBILIDAD TÉCNICA, AMBIENTAL, ECONÓMICA Y FINANCIERA PARA EL DESARROLLO DE LA INFRAESTRUCTURA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO SANITARIO Y SISTEMA DE DRENAJE PLUVIAL DEL BORDE NORTE DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ, del año 2011. y el estudio denominado ELABORACIÓN DE LOS DISEÑOS DETALLADOS PARA LA ADECUACIÓN HIDRÁULICA Y RESTAURACIÓN ECOLÓGICA DE HUMEDAL TORCA de la EAAB del año 2002.

En estos documentos de encuentra la siguiente información:

- Cota de fondo del humedal (2002 – Realizado por Elías Romero Vega): 2545 msnm
- Cota de fondo del humedal (2011 – POZ Norte): 2546.2 msnm

Como se puede observar, la cota de fondo del humedal ha ido aumentando, lo cual indica que se está llevando a cabo procesos de sedimentación en el lugar, algo que puede afectar directamente con las inundaciones realizadas en el corredor de la Autopista Norte ya que su capacidad se ve disminuida cada vez más.

Por ello, tratamiento y posterior solución para evitar la sedimentación o posterior retiro de lodos del fondo del humedal se realizará por parte de la EAAB y la SDA, el cual es el ente regulador de dicho cuerpo de agua, así como de los afluentes o estructuras que vierten aguas hacia este (como el canal Torca) o salen aguas de este (canal Guaymaral).

6.3 MODELO HIDRÁULICO HEC-RAS 2D SISTEMA TORCA-GUAYMARAL

6.3.1 Generalidades

La modelización numérica de la hidrodinámica de ríos precisa del uso de la teoría hidráulica del flujo en lámina libre y de los métodos numéricos para resolver las ecuaciones de conservación. Dado que los modelos numéricos son una representación simplificada de la realidad, un aspecto fundamental de los modelos de flujo en ríos es la representación adecuada de la topografía del cauce y llanuras de inundación. Existen herramientas de modelización numérica que permiten realizar simulaciones con una aproximación unidimensional (1D), bidimensional (2D) o tridimensional (3D). En una modelación unidimensional lo habitual es considerar el río como una línea, con una serie de puntos de cálculo que son las secciones transversales, de manera que la geometría del cauce es una propiedad de cada punto de cálculo o sección. Por otro lado en una modelación bidimensional el río ya no se discretiza como una línea con una serie de secciones transversales, sino como una malla formada por una serie de celdas poligonales que representan la topografía del cauce y llanuras de inundación. Dicha malla puede ser regular o irregular, estructurada o no estructurada. La mayor flexibilidad para una buena representación de la geometría y contornos se suele conseguir con una malla irregular. Lo habitual es que las mallas estén formadas por triángulos o cuadriláteros.

6.3.2 Objetivo del modelo

La simulación tiene como propósitos principales encontrar la lámina de agua para la condición actual y futura sobre los humedales y cuerpos de agua aferentes, para distintos períodos de retorno, con el fin de establecer el sistema de drenaje apropiado para las zonas de futuro desarrollo de los Planes Parciales que conforman Lagos de Torca, así como también de la infraestructura vial relacionada con estos desarrollos.

6.3.3 Localización general del modelo

El modelo planteado para el sistema Torca-Guaymaral está delimitado a sur por la calle 201 o Avenida El Polo, en donde ingresa el hidrograma del Canal Torca, y al norte por el tramo final del canal Guaymaral, hasta la desembocadura en el río Bogotá. Al oriente está delimitado por la carrera séptima desde donde cruzan y se desarrollan las quebradas hasta llegar a los humedales Torca y Guaymaral o al canal Guaymaral directamente. El límite occidental está definido por los alcances del polígono de Lagos de Torca.

6.3.4 Descripción del sistema Torca Guaymaral

El sistema Torca Guaymaral está compuesto por subsistemas que drenan las aguas provenientes de las cuencas orientales a la carrera séptima y del área cubierta por el modelo.

6.3.5 Insumos generales para la modelación

Para la construcción del modelo se utilizaron los siguientes insumos:

- Levantamiento topográfico de detalle sobre los cuerpos de agua (humedales y quebradas). (Anexo 5 – Información topográfica).
- Hidrogramas de entrada para las quebradas incluidas en el modelo y para el canal Torca. Las quebradas contempladas son: Quebrada Aguas Calientes, Quebrada La Floresta, Quebrada Novita, Quebrada San Juan, Quebrada Patiño, Vallado Occidental (que ingresan al canal Guaymaral sobre la calle 209).
- Levantamiento de estructuras transversales (alcantarillas)

6.3.6 Estructuras existentes

Tal y como se explicó previamente, en la Autopista Norte existe un número de alcantarillas que cruzan la vía. Estas estructuras conservan sus dimensiones para el modelo que representa la condición hidráulica actual del sector y corresponden a las que se indican en la Tabla 38, así como las estructuras correspondientes a las quebradas del sector oriental del sistema.

Tabla 38 Listado de estructuras implementadas en el modelo

| ID OBRA | BASE (m) | ALTURA (m) | DIÁMETRO (m) | LONGITUD (m) | MAGNA CIUDAD BOGOTÁ | | DESCRIPCIÓN DEL SITIO |
|----------|----------|------------|--------------|--------------|---------------------|-----------|---------------------------------------------------------|
| | | | | | Este | Norte | |
| ALC_AGC | - | - | 0.6 | 18.25 | 105161.91 | 120582.47 | Cruce vía férrea Q. Aguas Calientes |
| ALC_SAN2 | - | - | 0.3 | 24.71 | 104961.78 | 121851.16 | Cruce vía férrea Q. San Juan, brazo derecho |
| ALGC_SAN | - | - | 1.5 | 10.59 | 105002.45 | 121626.11 | Cruce vía férrea Q. San Juan, brazo izquierdo |
| Box1 | 1 | 1 | - | 51.83 | 104248.84 | 119674.83 | Entrega Q. Tibabita a Canal Torca |
| Box3_1 | - | - | 0.6 | 16.4 | 104085.31 | 120829.01 | Cruce Canal Torca No. 1 Autonorte Oriente |
| Box3_2 | - | - | 0.6 | 17.53 | 104029.12 | 120841.97 | Cruce Canal Torca No. 1 Autonorte Occidente |
| Box4 | 2 | 1.5 | - | 99.18 | 104230.55 | 121859.49 | Cruce Canal Torca No. 2 Autonorte |
| Box5 | 6 | 3 | - | 28.13 | 104134.26 | 123608.81 | Calle 235 con Canal Guaymaral |
| Box6 | - | - | 2.2 | 23.01 | 104338.30 | 124593.24 | Calle 242 con Canal Guaymaral, Acceso a predios Mazuera |
| Box6 | - | - | 2.2 | 23.3 | 104341.56 | 124591.50 | Calle 242 con Canal Guaymaral, Acceso a predios Mazuera |
| Box6 | - | - | 2.2 | 23.92 | 104345.15 | 124590.08 | Calle 242 con Canal Guaymaral, Acceso a predios Mazuera |
| BOX7 | 15 | 4 | - | 4.8 | 104372.28 | 124943.28 | Calle 245 Acceso a Club Guaymaral |
| Box8 | 3 | 1.5 | - | 97.09 | 104296.68 | 122253.78 | Cruce Canal Torca No. 3 Autonorte |
| Box_2_1 | 2 | 1 | - | 20.56 | 103940.64 | 120281.29 | Cruce drenaje sobre Autonorte, Calle 201 Occidente |
| Box_2_1 | 2 | 1 | - | 19.44 | 103940.87 | 120279.24 | Cruce drenaje sobre Autonorte, Calle 201 Occidente |
| Box_2_2 | 2 | 1.5 | - | 30.99 | 103998.39 | 120276.68 | Cruce drenaje occidental sobre Autonorte, Calle 201 |
| Box_2_2 | 2 | 1.5 | - | 29.81 | 103997.81 | 120274.37 | Cruce drenaje occidental sobre Autonorte, Calle 201 |
| BOX_FLO1 | 1.5 | 3 | - | 18.14 | 104533.28 | 123436.35 | Cruce Q. La Floresta Autonorte costado oriental |
| BOX_FLO2 | 1.5 | 3 | - | 16.67 | 104459.98 | 123447.88 | Cruce Q. La Floresta Autonorte costado occidental |
| BOX_FLO3 | 2 | 1.2 | - | 14.99 | 104535.01 | 123927.95 | Cruce Q. La Cañiza Autonorte costado occidental |
| BOX_FLO4 | - | - | 0.6 | 14.39 | 104490.60 | 123652.23 | Cruce Q. La Cañiza Autonorte costado occidental |
| BOX_FLO5 | 2 | 2 | - | 34.26 | 104493.70 | 123442.40 | Cruce Q. La Floresta Autonorte Separador central |
| BOX_NOV | 0.6 | 1.2 | - | 12.61 | 104831.41 | 124307.16 | Cruce vía férrea Q. Nóvita |
| BOX_PIL1 | 1.5 | 2 | - | 24.42 | 104466.04 | 122994.74 | Cruce Q. Pilas Autonorte, costado oriental |
| BOX_PIL2 | 1.5 | 2 | - | 21.23 | 104388.14 | 123008.12 | Cruce Q. Pilas Autonorte, costado occidental |

| ID OBRA | BASE (m) | ALTURA | DIÁMETRO | LONGITUD | MAGNA CIUDAD BOGOTÁ | | DESCRIPCIÓN DEL SITIO |
|-------------|----------|--------|----------|----------|---------------------|-----------|----------------------------------------------------------|
| BOX_PIL3 | 1.5 | 2 | - | 35.87 | 104426.18 | 123001.20 | Cruce Q. Pilas Autonorte, separador central |
| BOX_TOR1 | 3.5 | 1.2 | - | 33.47 | 104741.44 | 124903.87 | Cruce Q. Torca Autonorte, costado oriental |
| BOX_TOR2 | 3.5 | 1.2 | - | 18.41 | 104670.81 | 124923.86 | Cruce Q. Torca Autonorte, costado occidental |
| Can_TORc_25 | - | - | 1 | 10.81 | 104304.65 | 121963.25 | Cruce de canal Torca, acceso a predio oriental |
| Gocc1_3 | - | - | 0.5 | 20.83 | 104251.08 | 125162.78 | Cruce de vallado bajo vía, predio Mazuera |
| Gocc1_4 | - | - | 1 | 12.77 | 104380.64 | 125441.50 | Cruce de vallado bajo vía, predio Mazuera |
| Gocc_2507 | - | - | 1 | 8.84 | 104276.84 | 123928.40 | Cruce No. 1 drenaje sur de San Simón a Canal Guaymaral |
| Gocc_25_3 | - | - | 1 | 8.63 | 104368.45 | 124390.48 | Cruce No. 1 drenaje norte de San Simón a Canal Guaymaral |
| Nov08_1 | 3.2 | 2.4 | - | 45.99 | 104638.65 | 124369.71 | Cruce separador central Q. Nóvita |
| NOv08_2 | 3.1 | 1.5 | - | 18.37 | 104607.99 | 124381.92 | Cruce calzada occidental Q. Nóvita |
| Nov08_3 | - | - | 0.8 | 83.85 | 104592.80 | 124425.13 | Cruce via de acceso a parqueadero, Q. Nóvita |
| NOv2_25 | 3 | 2 | - | 28.35 | 104622.67 | 124501.86 | Cruce afluente Q. Nóvita, Autonorte costado occidental |
| Nov_25 | 2.9 | 1.7 | - | 19.6 | 104676.75 | 124344.98 | Cruce Q. Nóvita, Autonorte costado occidental |
| Pat_Sanj_25 | - | - | 0.4 | 4.86 | 105064.14 | 121244.33 | Cruce longitudinal a vía férrea, Afl. Q. San Juan |
| QAgc | - | - | 0.5 | 4.37 | 105375.90 | 120390.95 | Cruce via de acceso predio, afl. Q. Aguas Calientes |
| QGocc | - | - | 1 | 8.51 | 104250.30 | 123930.38 | Cruce No. 2 drenaje sur de San Simón a Canal Guaymaral |
| QGocc3 | - | - | 1 | 10.19 | 104334.78 | 124383.77 | Cruce No. 2 drenaje norte de San Simón a Canal Guaymaral |
| QGuay2 | - | - | 1 | 31.02 | 104020.50 | 120897.19 | Cruce afluente a Canal Guaymaral, Vía Arrayanes |
| QGuay3 | - | - | 1 | 18.5 | 104061.72 | 122343.02 | Cruce Canal Guaymaral, Calle 222 |
| QNov | 2.5 | 2.5 | - | 12.89 | 104387.29 | 124570.95 | Cruce Q. Nóvita, bajo vía de acceso a Mazuera |
| QSNJ | - | - | 1 | 11.06 | 104991.02 | 121624.17 | Cruce bajo vía férrea, Q. San Juan brazo izquierdo |
| QTorc | - | - | 1 | 35.57 | 104341.12 | 124992.92 | Cruce de vallado bajo vía, predio Mazuera |
| Q_AGC | - | - | 1 | 20.34 | 104326.78 | 120596.80 | Cruce vía interna JDP, Q. Aguas Calientes |
| Q_AGC2 | - | - | 1 | 22.39 | 105070.03 | 120574.13 | Cruce vía interna JDP, Q. Aguas Calientes |
| Q_Flo | - | - | 1 | 33.53 | 104836.45 | 123421.36 | Cruce bajo vía férrea Q. La Floresta |
| Q_Pat | - | - | 1 | 6.13 | 104631.62 | 120995.63 | Cruce Q. Patiño No. 1, interior de predio |

| ID OBRA | BASE (m) | ALTURA | DIÁMETRO | LONGITUD | MAGNA CIUDAD BOGOTÁ | | DESCRIPCIÓN DEL SITIO |
|----------|----------|--------|----------|----------|---------------------|-----------|--------------------------------------------------|
| Q_Pat2 | - | - | 1 | 6.47 | 104462.84 | 121024.94 | Cruce Q. Patiño No. 2, interior de predio |
| Sanj_25 | - | - | 0.25 | 16.69 | 105062.03 | 121217.64 | Cruce Q. San Juan vía férrea |
| Sanj_3 | - | - | 0.9 | 53.07 | 105170.48 | 121536.05 | Cruce bajo cancha Rosario Campestre, Q. San Juan |
| Tb_Tor25 | - | - | 0.6 | 226.93 | 104545.49 | 124969.36 | Cruce bajo cancha de la Q. Torca - Colsubsidio |
| TIB | - | - | 0.5 | 7.91 | 104899.30 | 119536.24 | Cruce de Q. Tibabita, vía interna de predio |

Fuente: WSP, 2019.

6.3.7 Condiciones de borde

6.3.7.1 Niveles en río Bogotá

Para la modelación hidráulica del sistema Torca-Guaymaral, se consideraron dos tipos de niveles en el río Bogotá, como elemento controlador del flujo a la llegada; el primero es el correspondiente al nivel máximo en el Río, para la condición de diseño, valor que fue suministrado por la Corporación Autónoma Regional del Río Bogotá CAR y cuyo valor corresponde a 2546.66 msnm. (Ver Anexo 4). Se aclara que en el sitio de descarga al Río Bogotá no existen estructuras que controlen el flujo desde el canal Guaymaral, como se muestra en la Figura 213.

Figura 213. Detalle del sitio de desembocadura del Canal Guaymaral al Río Bogotá



Fuente: WSP, 2019.

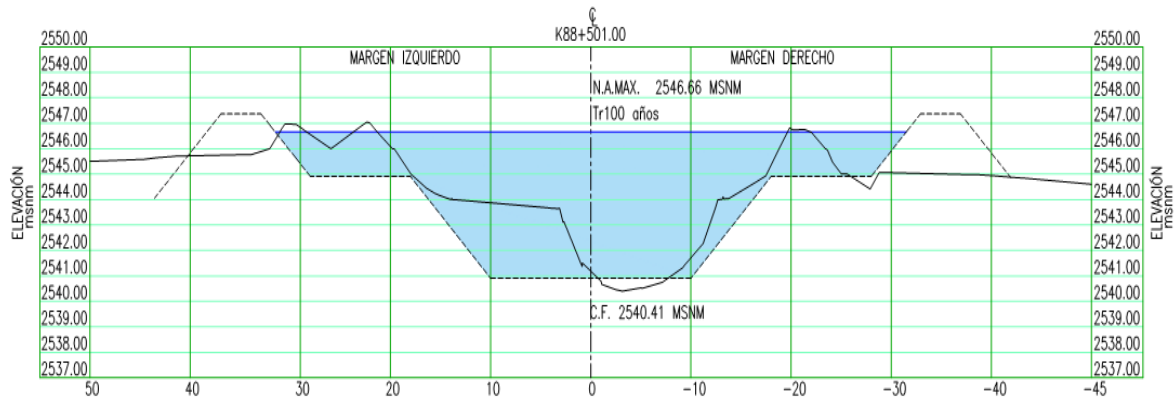
La sección reconfigurada del Río Bogotá es la que se presenta en la Figura 214 que muestra las condiciones actuales del perfil batimétrico del río y el proyectado, a partir del cual se realizó el modelamiento hidráulico del sistema Torca – Guaymaral.

Vale la pena indicar que los modelamientos hidráulicos tuvieron en cuenta la nivelación llevada a cabo por esta consultoría para el proyecto y la levantada para el Río Bogotá en la zona de la desembocadura del sistema hídrico Torca-Guaymaral. Por otro lado, el nivel de control de borde del Río Bogotá, reportado por la CAR para este sitio y basado en el sistema de georreferenciación de Proyecto de Adecuación Hidráulica del Río Bogotá, fue de 2546.66 msnm, para el nivel del río Bogotá, para la creciente de diseño. Con el objeto de conservar el mismo sistema de georreferenciación, esta consultoría procedió a realizar el amarre topográfico del sistema CAR en la zona en cuestión. El resultado de este procedimiento dio como resultado que la diferencia de niveles entre los dos sistemas es de +0.12 m (+12 cm), lo cual significa que, a la cota de control de borde indicada antes, se debe sumar este valor. De esta manera la cota de control de borde en el río Bogotá es 2546.78 msnm.

Actualmente el río Bogotá cuenta con un Jarillón que se encuentra sobre la cota 2546.97 msnm, mientras que la cota de diseño prevista por las obras de adecuación del río, es la

2547.37 msnm, para esta zona en la desembocadura del sistema Torca- Guaymaral, lo que significa un borde libre de 0.71 m.

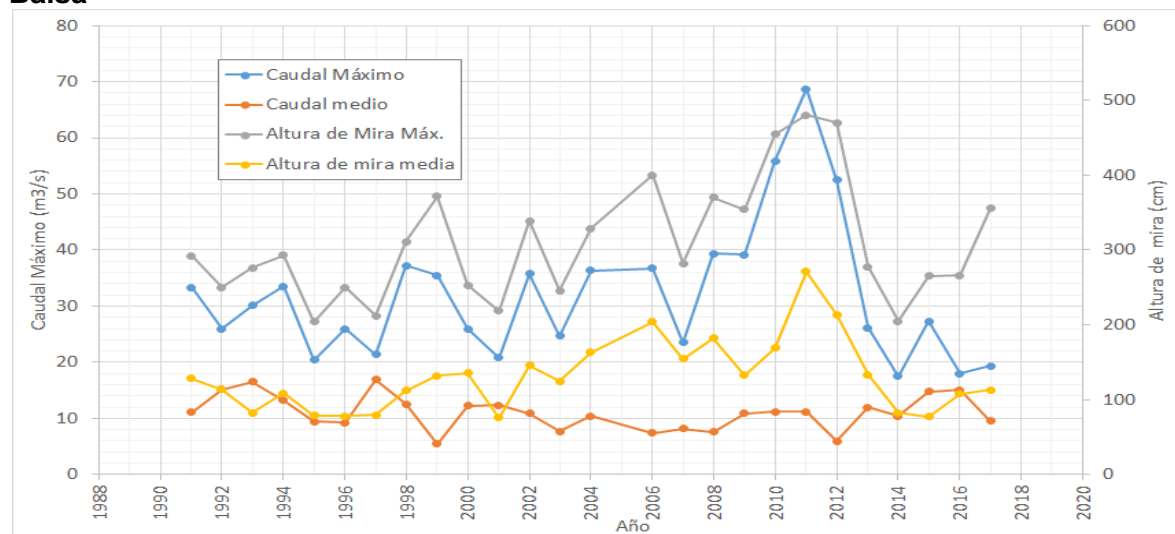
Figura 214. Detalle de la sección actual y proyectada del río Bogotá, sitio de desembocadura del canal Guaymaral



Fuente: CAR, 2017.

Con referencia a los eventos máximos generados en el río Bogotá en la Figura 215 se presentan los registros históricos de niveles y caudales en la estación La Balsa, localizada aguas abajo del sitio de la desembocadura del canal Guaymaral. Estos reportes evidencian que durante los años 2010 y 2011 evidentemente se presentaron altos niveles en el río, así como flujo a través de este, lo cual no es consecuente con los registros de precipitación reportados en las estaciones de la zona de la cuenca del sistema Torca – Guaymaral. Lo anterior da a entender que los eventos ocurridos en las dos cuencas, la cuenca alta del río Bogotá y la cuenca Torca, no fueron sincrónicos y que los niveles altos del canal Guaymaral, en la zona de la desembocadura, corresponderían a los controles ejercidos por el nivel del río Bogotá.

Figura 215. Registros históricos de niveles y caudales en el río Bogotá, estación La Balsa



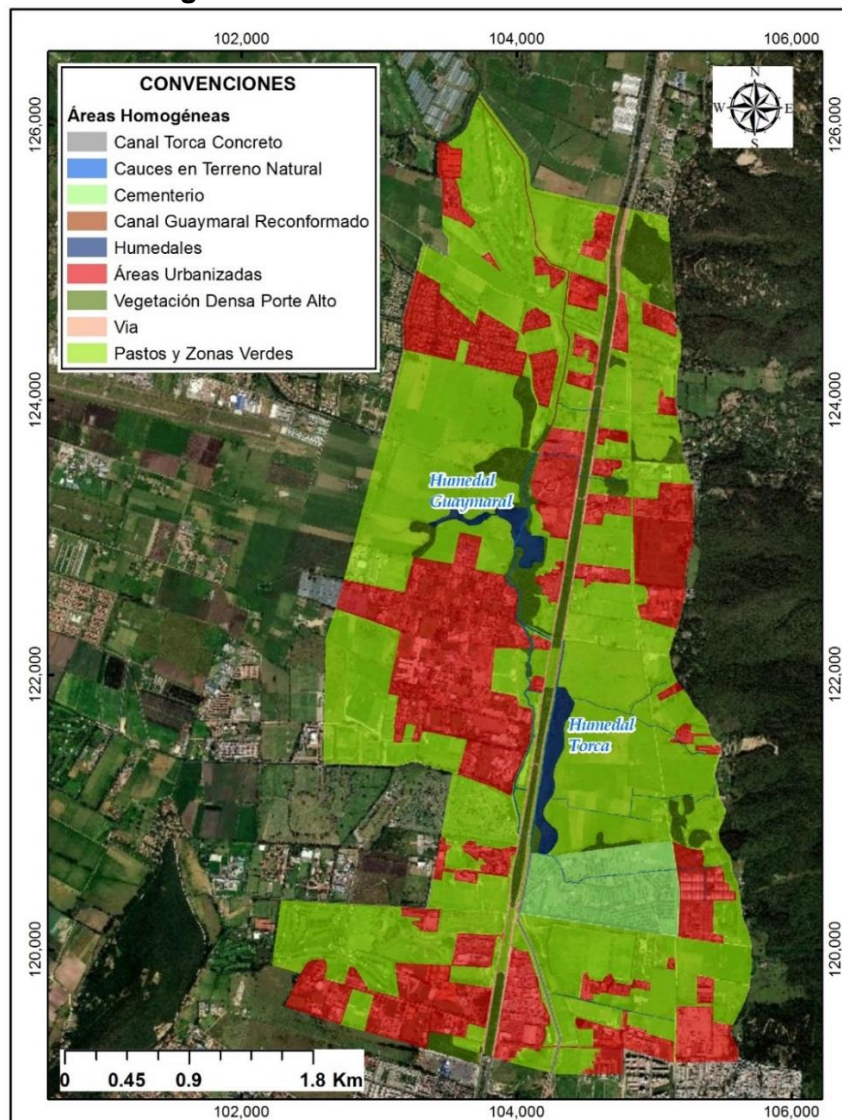
Fuente: CAR, WSP, 2019

6.3.7.2 Rugosidad de Manning

Para definir la rugosidad en la superficie de modelación se utilizó el coeficiente propuesto por Manning, teniendo como referencia áreas o zonas homogéneas (ver Figura 216) identificados a partir del ortofotomosaico capturado para el presente estudio y de las visitas de campo realizadas entre marzo y junio del 2019.





Los coeficientes de rugosidad de Manning (n) fueron asignados a cada una de las áreas anteriormente ilustradas, teniendo en cuenta los valores propuestos en la *Tabla 5-6* de (Chow, Hidraulica de Canales Abiertos, 1994). A continuación, en la se presentan los n de Manning asignados:




Figura 216. Áreas Homogéneas – Condición Actual






Fuente: WSP, 2019.

Tabla 39 Coeficientes de Rugosidad Asignados

| SECTOR | DETALLE FOTOGRÁFICO | COEFICIENTE DE RUGOSIDAD ASIGNADO (n DE MANNING) | |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------|
| Canal Torca en material concreto |  | B-2.c2 | 0.015 |
| Humedal Torca |  | D-2.c1 | 0.05 |
| Canal Guaymaral Reconformado actual |  | D-1.a1 | 0.025 |
| Humedal Guaymaral, sector bajo |  | D-2.a1 | 0.05 |

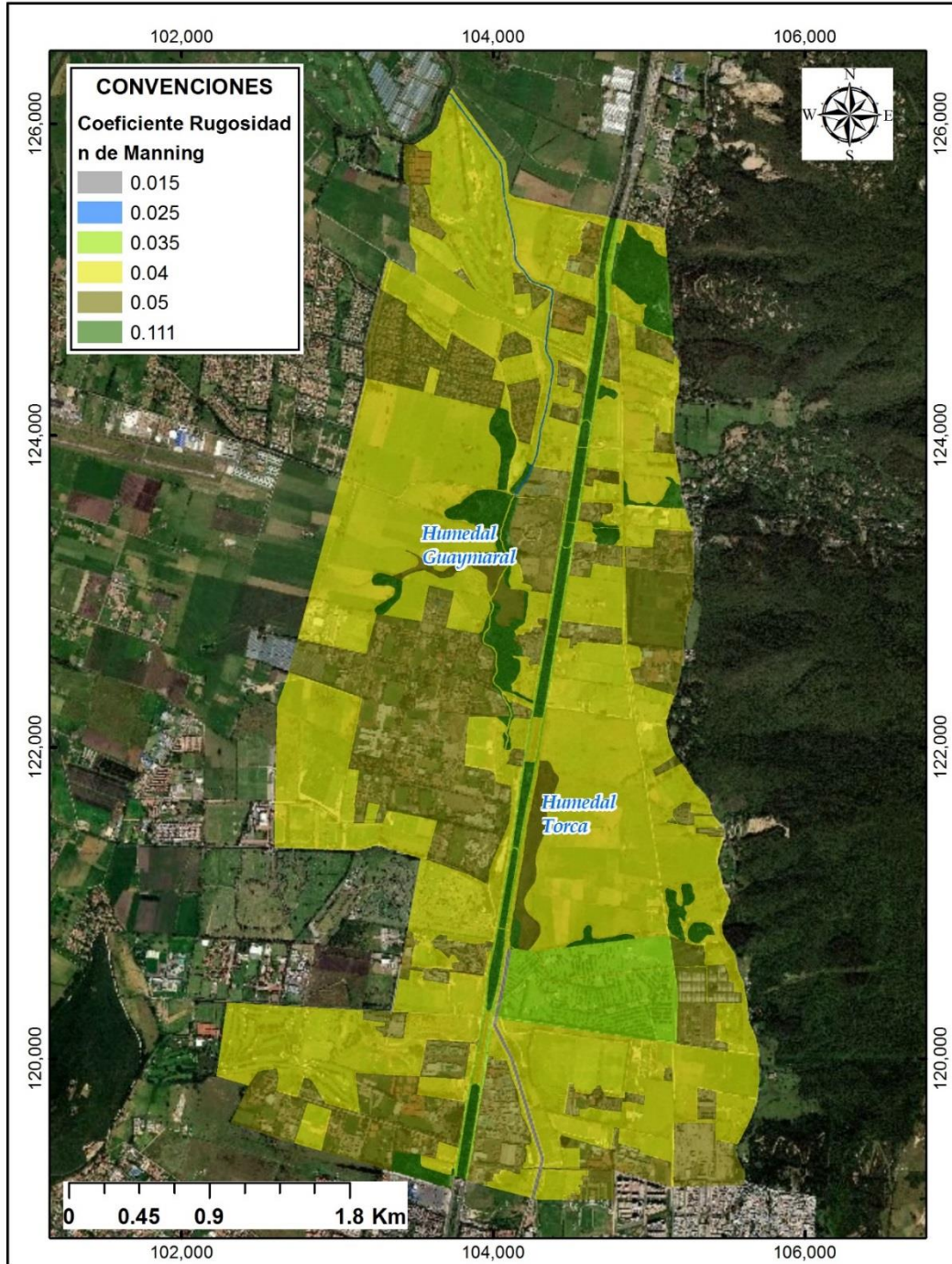
| SECTOR | DETALLE FOTOGRÁFICO | COEFICIENTE DE RUGOSIDAD ASIGNADO (n DE MANNING) | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------|
| <p>Cauces en terrenos natural (quebradas Orientales, Canal Torca y Guaymaral)</p> |  | D-1.a2 | 0.04 |
| <p>Pastos y áreas verdes en áreas de transición de los humedales.</p> |  | D-2.a2 | 0.04 |
| <p>Vegetación Densa de porte alto, en zona de planicies de inundación de humedales Torca y Guaymaral.</p> |  | D-2.d5 | 0.111 |

| SECTOR | DETALLE FOTOGRÁFICO | COEFICIENTE DE RUGOSIDAD ASIGNADO (n DE MANNING) | |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------|
| Vías |  | N.A | 0.015 |
| Cementerios |  | D-2.a1 | 0.035 |
| Áreas Urbanizadas |  | N.A | 0.05* |

*Este valor incorpora los elementos de espacio público, zonas verdes, equipamiento urbano y superficie de vías.
Fuente: WSP, 2019.

En la Figura 216 se puede observar la distribución espacial del coeficiente de rugosidad en la condición actual.

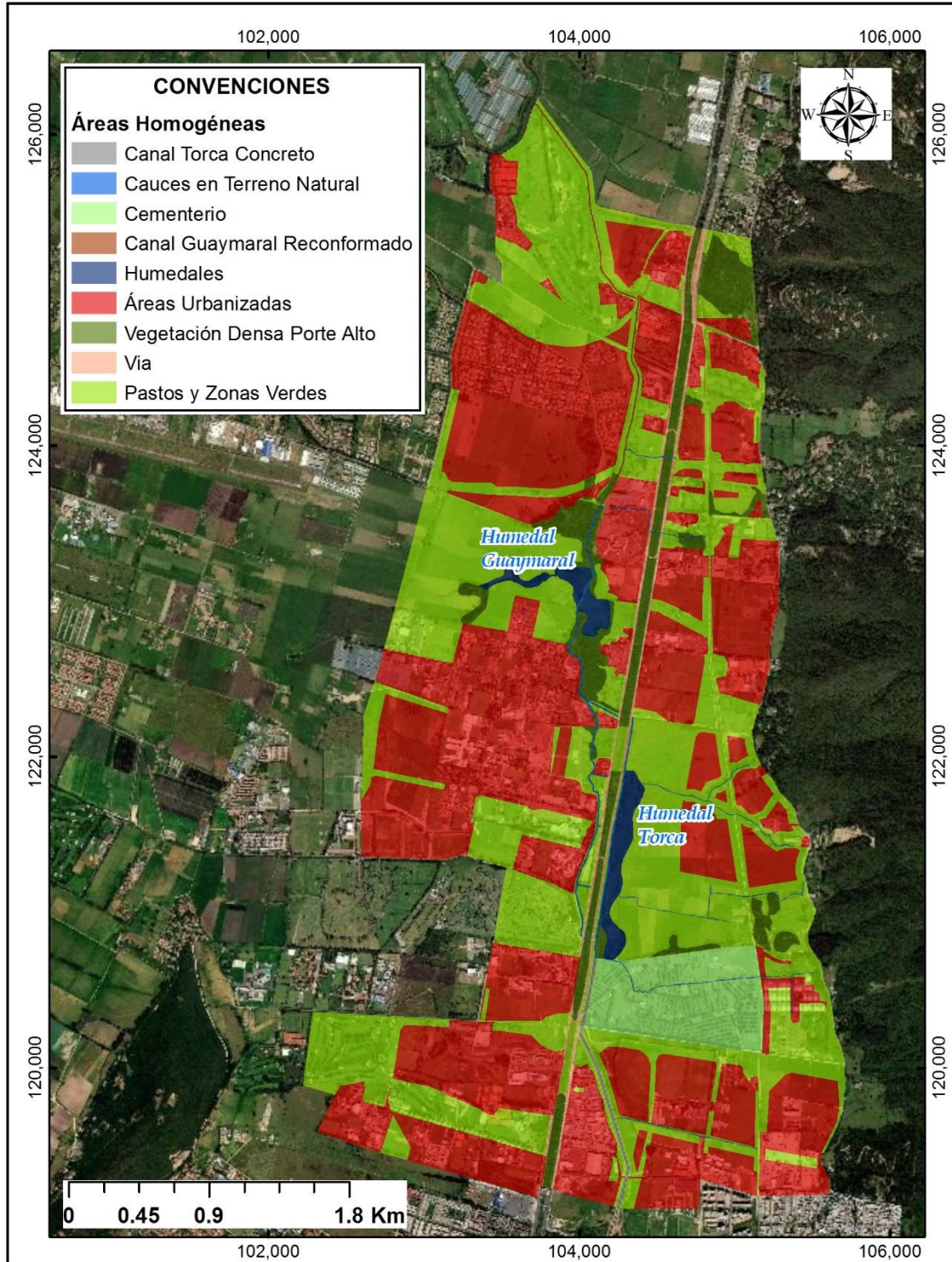
Figura 217. Distribución de la rugosidad de Manning – Condición Actual



Fuente: WSP, 2019.

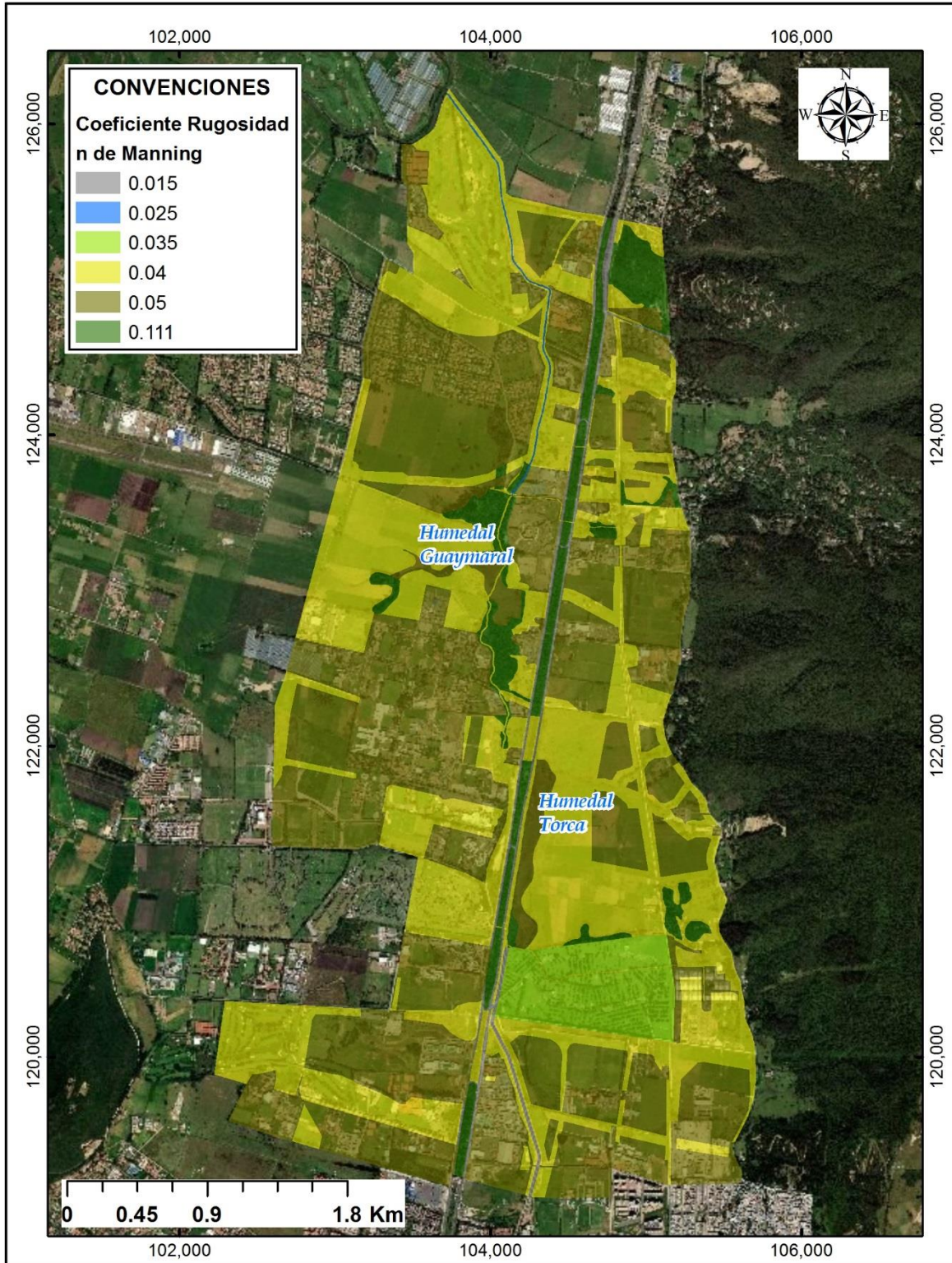
Así mismo, teniendo en cuenta los cambios en las coberturas y/o usos del suelo esperados por la implementación de los planes parciales (ver Figura 218), se actualizaron los coeficientes de rugosidad de Manning obteniendo la superficie presentada en la Figura 219.

Figura 218. Áreas Homogéneas – Condición Futura



Fuente: WSP, 2019.

Figura 219. Distribución de la rugosidad de Manning – Condición Futura



Fuente: WSP, 2019.

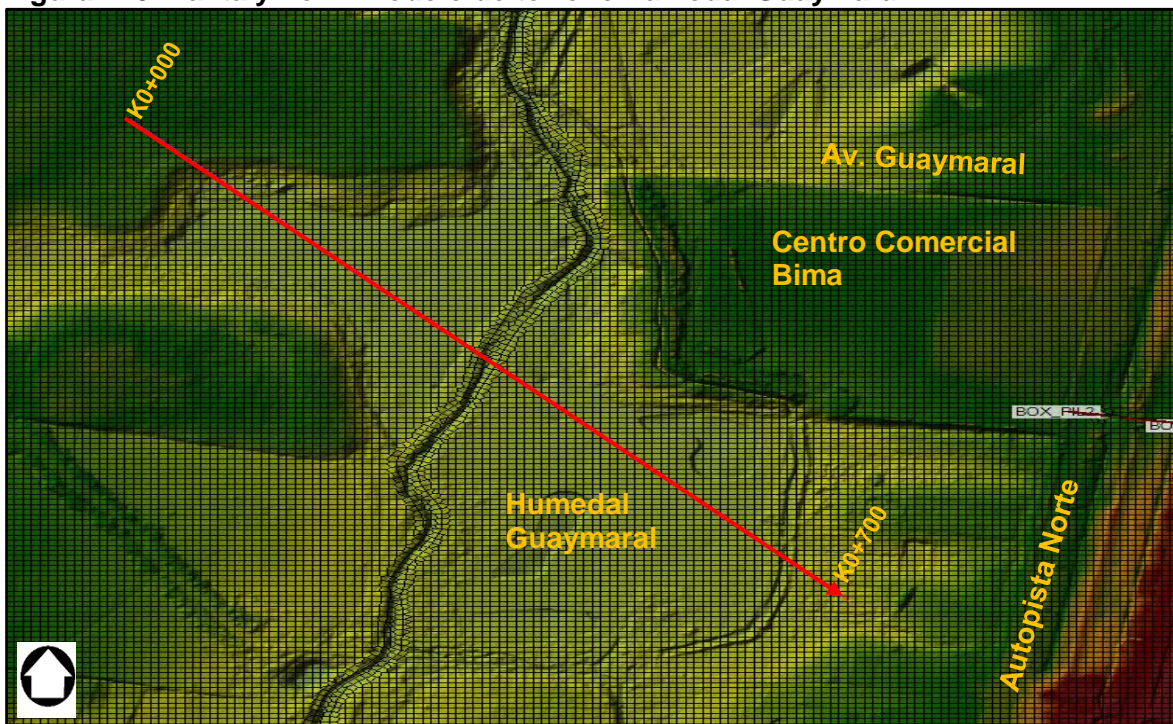
6.3.7.3 Condiciones de almacenamiento inicial

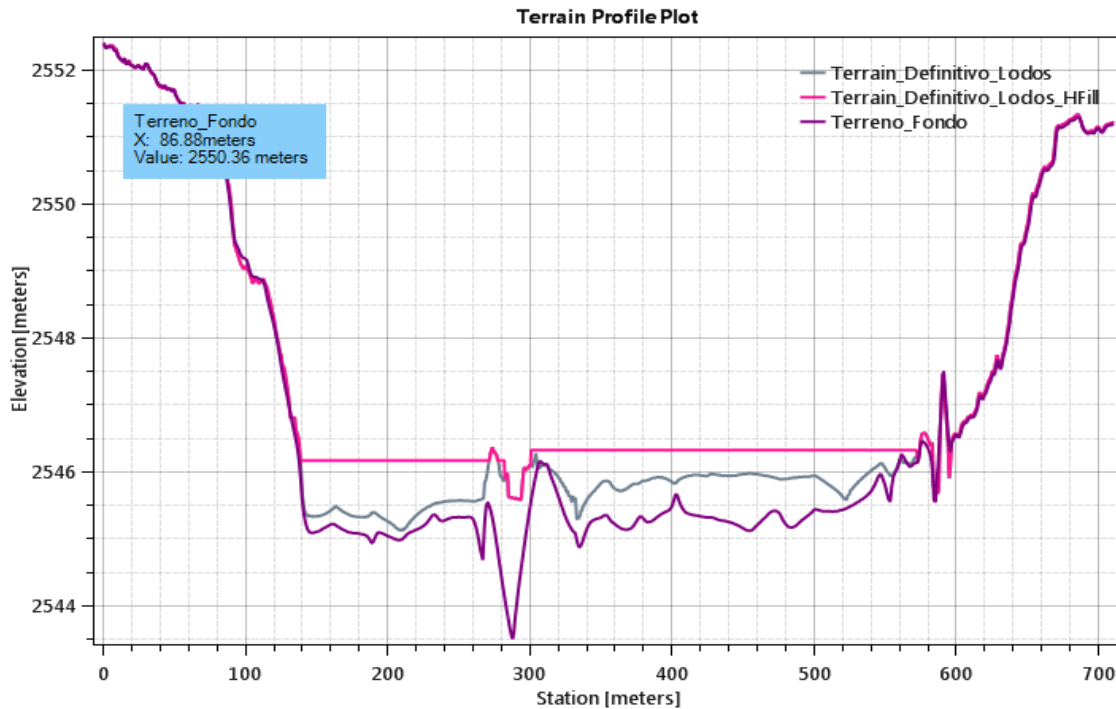
Para tener en cuenta el efecto de las lluvias antecedentes dentro del modelo de inundaciones, se ha considerado la presencia de un espesor de sedimentos, que eleva el nivel del fondo del sistema en los canales y humedales, y por otro lado un nivel básico de inundación precedente en los vasos de los humedales.

Con respecto al nivel de agua de almacenamiento inicial en los vasos de los humedales Torca Guaymaral, se llevó a cabo una modificación del modelo de terreno original elevando la cota de fondo, hasta una lámina de agua correspondiente a la altura desbordamiento del canal principal, tanto en el sector Torca al oriente, como en el sector Guaymaral al occidente. En la Figura 220 se presenta el esquema planta y perfil de una sección del canal Guaymaral, en donde se evidencia la diferencia del modelo de terreno original con respecto al modelo de terreno que tiene en cuenta el almacenamiento inicial, con el cual fueron ejecutadas las simulaciones; en la Figura 221. se presenta el mismo esquema en una sección del humedal Torca.

En estas figuras de igual manera se indica el perfil de lodos identificado durante el levantamiento batimétrico de cuerpos de agua (canales y humedales), el cual presenta variaciones entre 0.15 m hasta 1.10 m. La metodología de estimación del nivel de sedimentos se describió en la sección 6.1.1.1 Topografía, de este documento y se presenta en las carteras y planos del Producto 2 de la consultoría.

Figura 220 Planta y Perfil modelo de terreno humedal Guaymaral

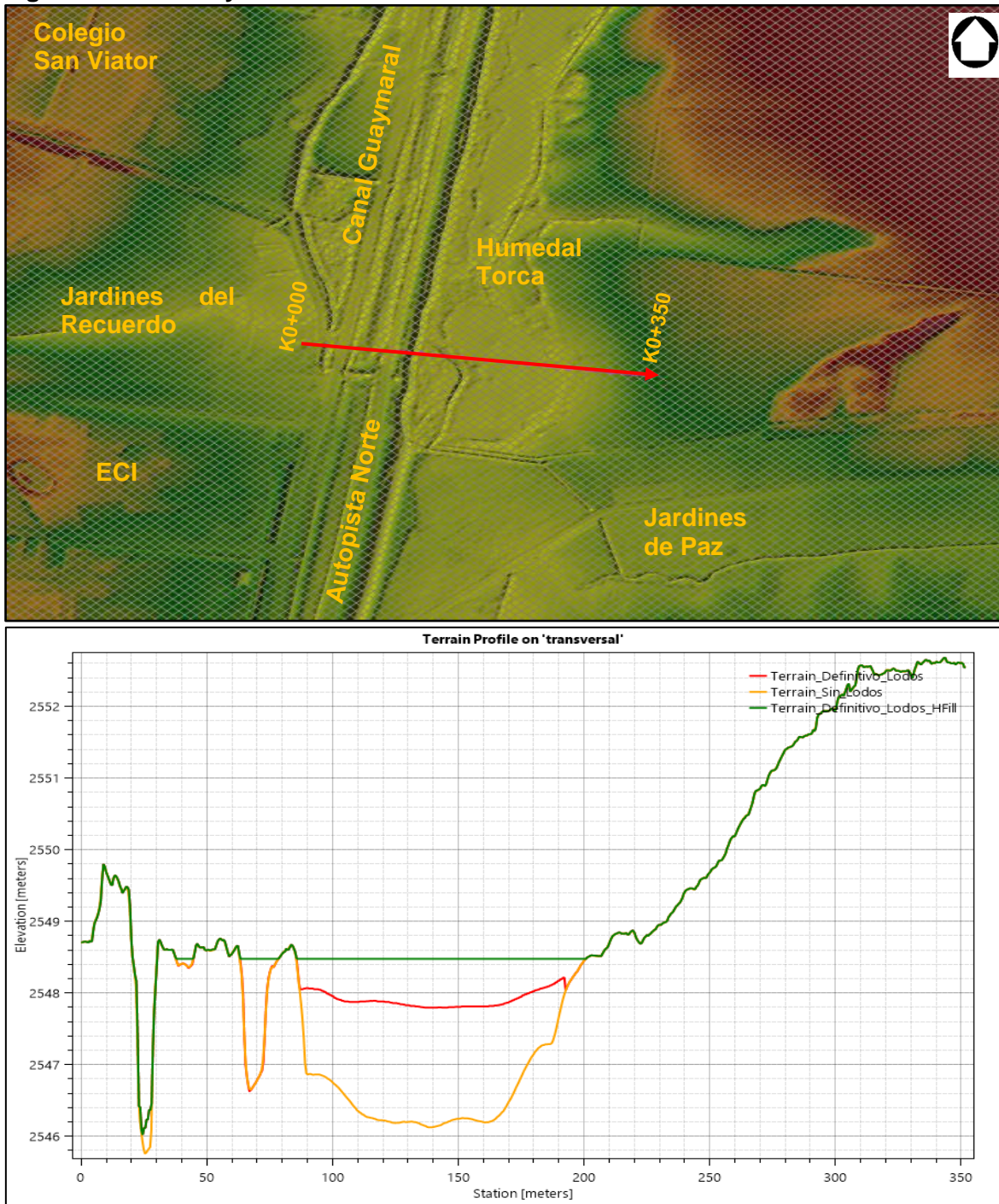




Fuente: WSP a partir de modelo HEC-RAS, 2019.

En el interior del humedal en cada sector se destacan rasgos morfológicos de interés, como la presencia de elevaciones en el sector de Torca (Figura 221), en la que distribución de los sedimentos del fondo varía con la profundidad mostrando la formación a manera de islas vegetadas que desde el punto de vista ecológico tendrán una valor de conectividad al momento de realizar las propuestas de restauración geomorfológica del humedal y por lo tanto podrán convertirse en punto de partida para las acciones que dentro del Plan de Manejo Ambiental se propongan para el Humedal.

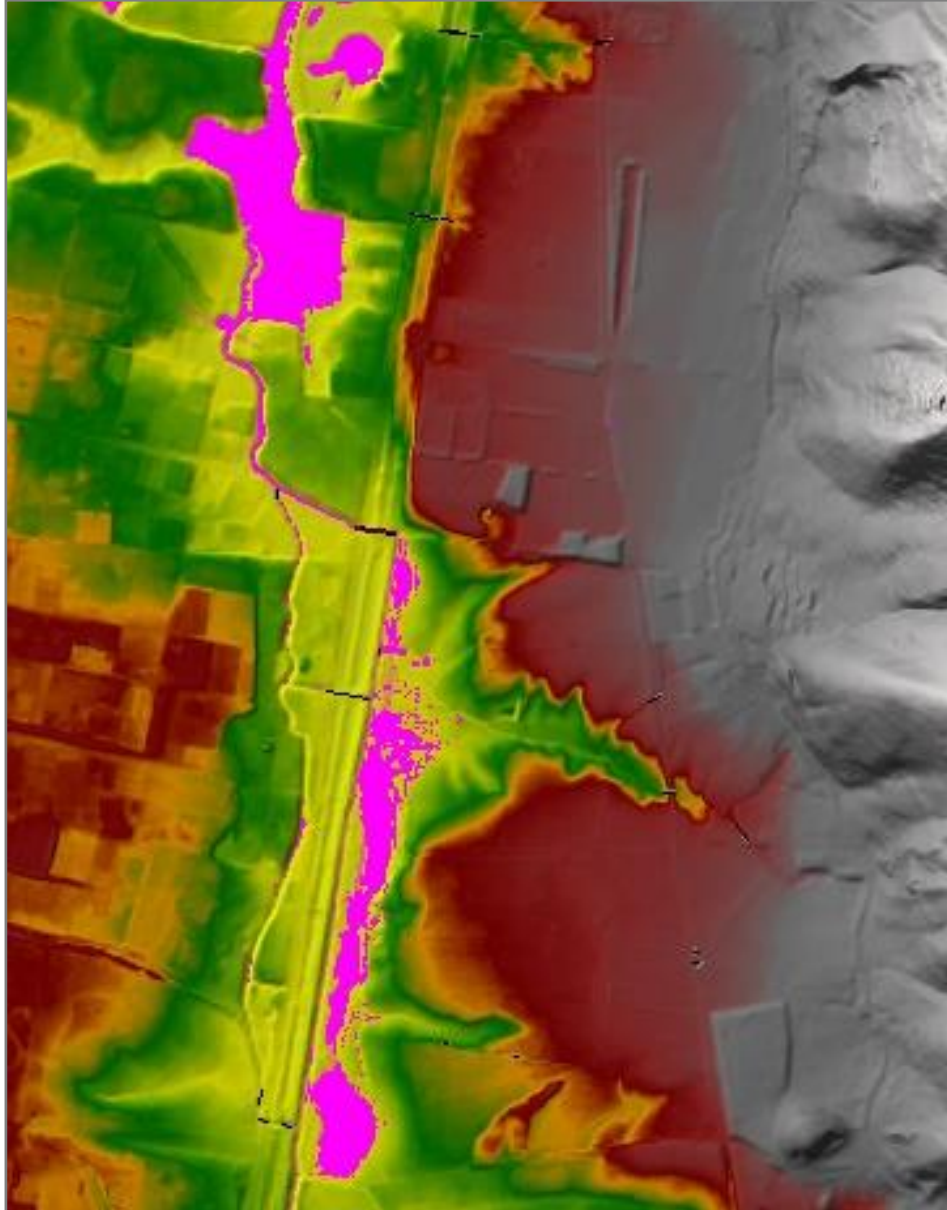
Figura 221. Planta y Perfil modelo de terreno humedal Torca



Fuente: WSP a partir de modelo HEC-RAS, 2019.

Un procedimiento alternativo, consistió en la incorporación de un hidrograma de un volumen tal que efectuase el llenado inicial del vaso de cada sector de humedal, hasta el punto de desborde establecido como límite del “embalse muerto” como se ilustra en la Figura 222.

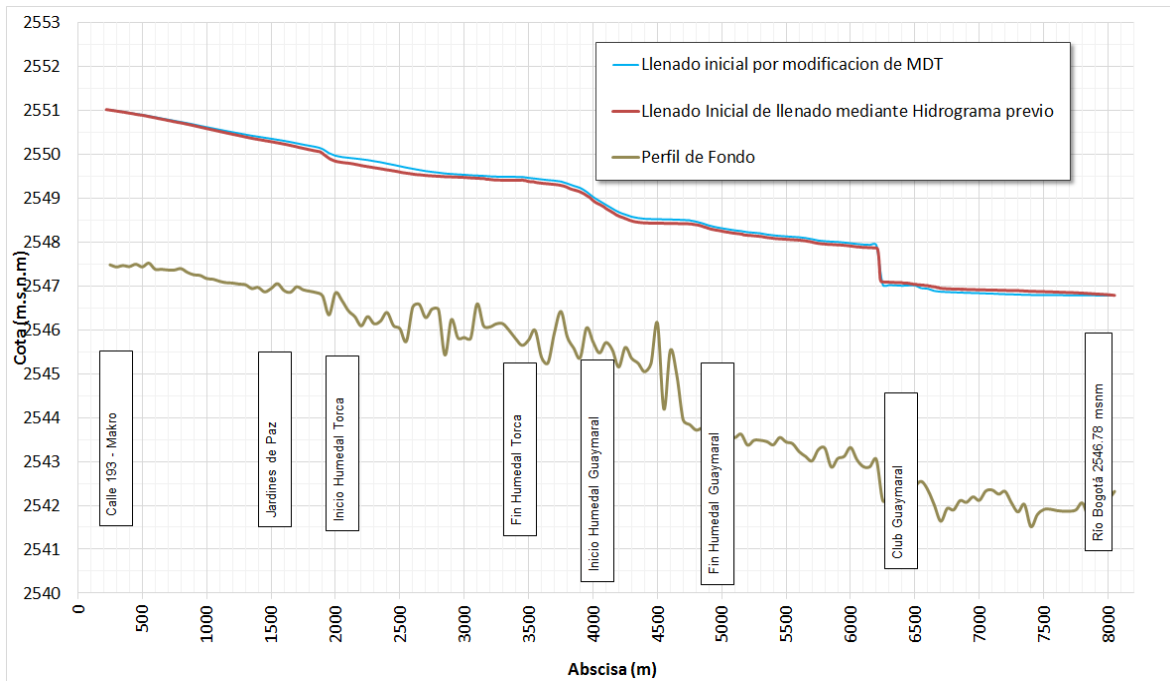
Figura 222. Conformación de nivel de embalsamiento previo en los humedales



Fuente: WSP a partir de modelo HEC-RAS, 2019.

La comparación de los resultados para los dos procedimientos, son los que se muestran a manera de perfil en la Figura 223, en la cual la diferencia máxima alcanzada entre los dos niveles en el humedal, es de máximo 15 cm en el sector Torca y de 10 cm en el Humedal Guaymaral, siendo más alto para el caso de la modificación del MDT.

Figura 223. Comparación de niveles mediante dos procedimientos de análisis del embalse inicial en el humedal



Fuente: WSP a partir de modelo HEC-RAS, 2019.

6.3.8 Construcción del modelo

6.3.8.1 Topografía y modelo digital de elevaciones (DEM)

Como modificación a la topografía levantada se propone la adecuación del terreno en el humedal Guaymaral. Esta consiste en la recuperación de los terrenos que han sido rellenados para construcción y que hacen parte del humedal; se establecieron como límites para esta recuperación el fondo del canal Guaymaral. De modo que se reprodujo la superficie de manera que representara el terreno recuperado y el paso de las estructuras existentes en esta zona.

6.3.8.2 Generación de la malla (tamaño de celda)

Para la estructuración del modelo se definió un tamaño de celda de 5 m para la conformación de la malla 2D, en algunos sectores se definieron regiones de refinamiento de 2.5 m, con el fin de obtener resultados más precisos. Estos tamaños son, sin embargo, conservadores debido a que igualmente dan un buen detalle de la topografía. En el modelo HEC-RAS 2D cada celda toma la información del terreno debajo de ella para procesar datos o curvas de elevación vs volumen de almacenamiento, vs perímetro mojado, vs área y vs rugosidad; con dicha información el modelo computa la relación e intercambio de caudal entre celdas adyacentes.

6.3.8.3 Delimitación de cauces (Breaklines)

La delimitación de cauces en la malla de HEC RAS 2D se logra con el uso de las breaklines, que tienen la finalidad de refinar la malla y alinear los bordes de las celdas a estas líneas. De esta manera, si las breaklines se ubican sobre el borde de los cauces, se permite asegurar que el caudal no abandone el cauce y se vierta hacia las llanuras de inundación hasta que sea superada la mayor elevación de la celda, es decir la elevación del borde del cauce.

Por lo anterior, se ubicaron breaklines sobre cada uno de los cauces del modelo; entre los cuales se destacan el canal Torca, las quebradas de la zona y algunos canales y cunetas menores. Así mismo, se ubicaron breaklines sobre las vías principales que funcionan como una barrera para el flujo.

6.3.8.4 Hidrogramas de entrada y condiciones de frontera

En el modelo HEC-RAS 2D, tanto las condiciones de frontera ya sean para entrada o para la salida se ingresan mediante SA/2D Área BC Lines. En el modelo se tuvieron en cuenta entradas de flujo no permanente (hidrogramas) y una condición de salida en la entrega del canal Guaymaral.

Los hidrogramas utilizados para la modelación fueron obtenidos a partir de los modelos hidrológicos explicados en la Sección 5 del presente informe. Se obtuvieron así hidrogramas de cada una de las quebradas y del canal Torca para un periodo de retorno de 100 años y para las condiciones actual y futura.

Una condición particular de los hidrogramas es que comparten el tiempo de caudal máximo en el modelo, es decir que sin importar la ubicación en la cual cada hidrograma entra al sistema, todos los caudales máximos de cada hidrograma ingresan en el modelo casi en el mismo instante de tiempo.

Los hidrogramas utilizados en ambas condiciones se presentan en los documentos Anexo 2. Análisis de Caudales.

6.3.9 Parámetros de simulación

6.3.9.1 Tiempo de simulación

El tiempo en que se llevó a cabo la simulación se seleccionó de acuerdo con la duración de las crecientes calculadas en las quebradas y el canal Torca. De acuerdo con los tiempos de los hidrogramas de crecientes seleccionados, las cuales se explicaron en el Capítulo 3. Conforme con los hidrogramas de creciente y teniendo en cuenta el tiempo en que se transitan dichos hidrogramas para poder obtener información de flujo no permanente en la salida del sistema Torca-Guaymaral se seleccionó un tiempo de simulación de 24 horas, con el objeto de observar el proceso de recesión del hidrograma dentro del sistema hídrico.

6.3.9.2 Intervalo de tiempo para la simulación

El intervalo de simulación es uno de los parámetros más importantes para garantizar la estabilidad de modelo. Existen relaciones como el número de Courant y el de Peclet que buscan que el flujo en la simulación sea lo más semejante al flujo real y por lo tanto no se presente resultados inesperados o incoherentes (inestabilidades).

En general, estas relaciones están en función del tiempo de modelación y del tamaño del elemento, en este caso el tamaño de la celda. Por lo anterior, una vez seleccionado el tamaño de la celda en la creación de la malla, se debe seleccionar un paso de tiempo que se ajuste Δx seleccionado.

6.3.9.3 Estabilidad del modelo

6.3.9.3.1 Número de Courant

El número de Courant relaciona la velocidad de modelación y la velocidad de flujo expresado como la celeridad de la onda. La condición de Courant es por lo tanto un cociente entre las velocidades, y su valor es estable cuando se obtiene un cociente igual o inferior a 1.

$$C = \frac{V\Delta T}{\Delta X} \leq 1$$

Donde,

C= Número de Courant

V= velocidad de propagación o celeridad de la onda (m/s)

ΔX (m) = tamaño del elemento en el espacio o tamaño promedio de la celda en la malla

ΔT (s) = Tiempo de modelación, tamaño del paso de tiempo

Sin embargo, de acuerdo con la documentación de modelo HEC-RAS 2D, cuando se realizan corridas del modelo bajo las ecuaciones de la onda difusiva, es posible manejar números de Courant hasta de 3 obteniendo resultados estables. Mientras que cuando se realizan corridas con las ecuaciones de Saint-Venant completas se obtienen resultados más precisos, pero más inestables, haciendo más estricta la consecución de un número de Courant menor o igual a 1. Para la modelación del sistema Torca-Guaymaral se seleccionó el esquema de ecuaciones de la onda difusiva, siendo así más permisivos con la condición de Courant y seleccionando para el modelo un número de Courant =2. De este modo, transformando la ecuación de Courant para establecer el valor del número adimensional y determinar el paso de tiempo se tiene:

$$\Delta T = \frac{C * \Delta X}{V}$$

Donde,

C= Número de Courant

V= velocidad de propagación o celeridad de la onda (m/s)

ΔX (m) = tamaño del elemento en el espacio o tamaño promedio de la celda en la malla

ΔT (s) = Tiempo de modelación, tamaño del paso de tiempo

Los valores seleccionados para el cálculo del tiempo de modelación son los siguientes.

$$C = 2$$

$\Delta X = 5$ (tamaño promedio de las celdas en las cercanías a cuerpos de agua)

$V = 1\text{m/s}$ (velocidad promedio de flujo en la red) s

Con estas consideraciones se obtiene un tiempo de modelación de 10 segundos para conseguir estabilidad.

$$\Delta T = 10\text{s}$$

6.3.9.3.2 Time slicing

Se utilizó la opción time slicing que consiste en dividir el intervalo de tiempo en intervalos más cortos cuando el cálculo de una celda en un tiempo determinado ha superado un número de iteraciones dado. En este caso se utilizó la opción una vez se han superado 5 iteraciones y el resultado no ha sido encontrado.

6.3.9.4 Ingreso de hidrogramas iniciales

La incorporación de la hidrología al modelo de simulación hidráulico se llevó a cabo mediante la función BC Lines, mediante la cual se hace la localización espacial de los aportes de caudal, a manera de hidrogramas, al tránsito bidimensional del modelo hidráulico. En la Tabla 40 se presenta las BC Lines del modelo hidráulico, mientras que en la Figura 224 se indican su presenta la localización en el modelo de simulación.

Tabla 40. Localización de BC Lines de ingreso al modelo hidráulico

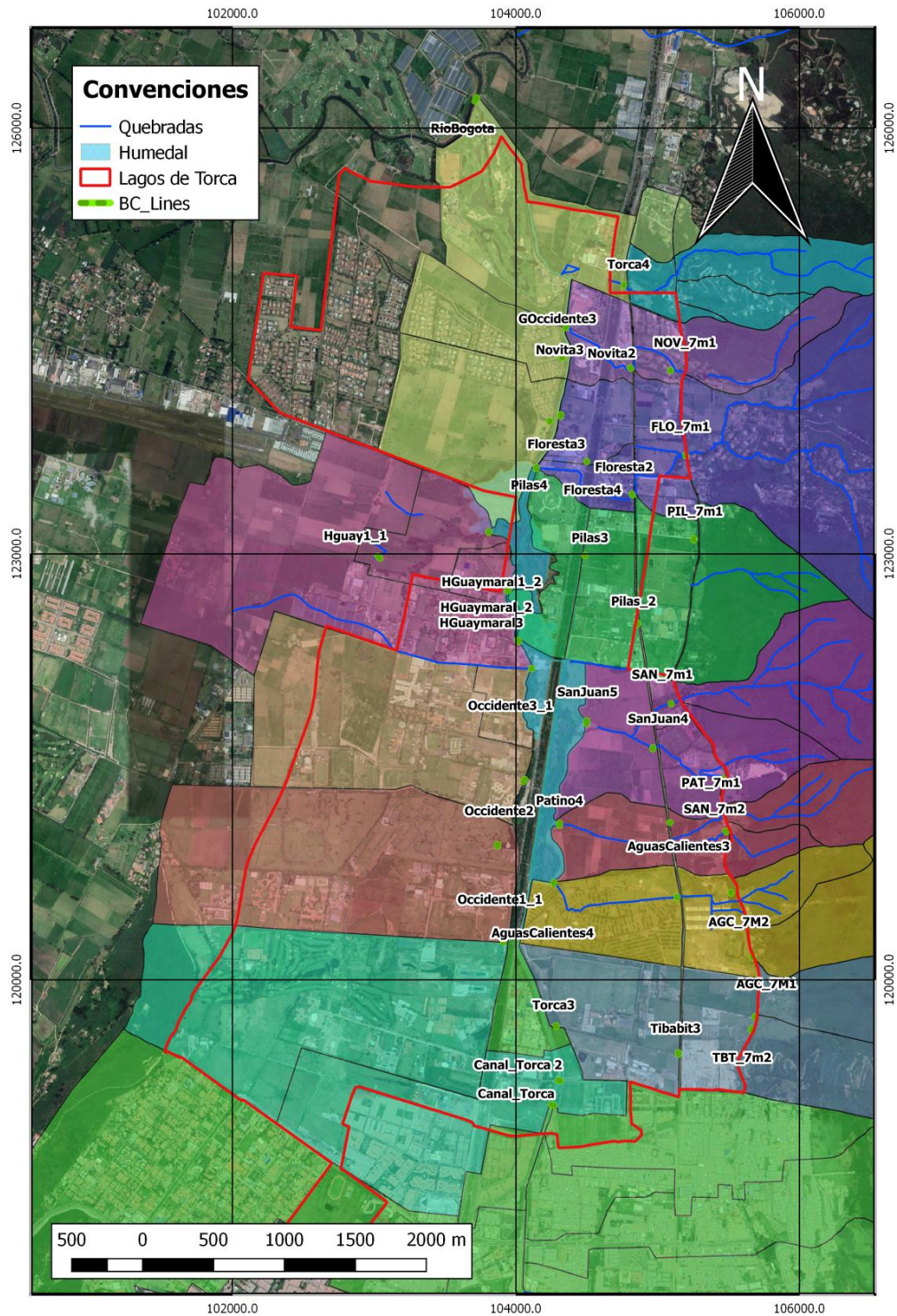
| NOMBRE | CONEXIÓN | COORDENADAS | |
|-----------------|----------|-------------|------------|
| | | ESTE | NORTE |
| Canal_Torca | Internal | 104,250.68 | 119,120.59 |
| Canal_Torca | Internal | 104,267.07 | 119,115.50 |
| Tibabit3 | Internal | 105,145.48 | 119,488.10 |
| Tibabit3 | Internal | 105,146.82 | 119,476.28 |
| AguasCalientes3 | Internal | 105,136.56 | 120,583.72 |
| AguasCalientes3 | Internal | 105,136.40 | 120,578.54 |
| Patino3 | Internal | 105,086.98 | 121,107.78 |
| Patino3 | Internal | 105,083.02 | 121,107.32 |
| SanJuan3 | Internal | 104,946.25 | 121,849.57 |
| SanJuan3 | Internal | 104,951.87 | 121,844.05 |
| SanJuan4 | Internal | 104,965.88 | 121,635.91 |
| SanJuan4 | Internal | 104,963.99 | 121,625.72 |
| Pilas_2 | Internal | 104,854.21 | 122,516.84 |
| Pilas_2 | Internal | 104,856.06 | 122,505.72 |
| Floresta2 | Internal | 104,818.69 | 123,422.29 |
| Floresta2 | Internal | 104,821.38 | 123,413.35 |
| RioBogota | External | 103,709.79 | 126,189.01 |
| RioBogota | External | 103,721.33 | 126,214.61 |
| Occidente1_1 | Internal | 103,910.35 | 120,270.58 |

| NOMBRE | CONEXIÓN | COORDENADAS | |
|-----------------|----------|-------------|------------|
| | | ESTE | NORTE |
| Occidente1_1 | Internal | 103,910.83 | 120,264.37 |
| AguasCalientes4 | Internal | 104,265.98 | 120,678.74 |
| AguasCalientes4 | Internal | 104,267.60 | 120,686.01 |
| Patino4 | Internal | 104,307.34 | 121,102.81 |
| Patino4 | Internal | 104,307.34 | 121,088.68 |
| Occidente2 | Internal | 103,870.34 | 120,952.61 |
| Occidente2 | Internal | 103,869.86 | 120,941.62 |
| Occidente3 | Internal | 104,052.94 | 121,396.76 |
| Occidente3 | Internal | 104,061.95 | 121,412.54 |
| SanJuan5 | Internal | 104,498.78 | 121,825.40 |
| SanJuan5 | Internal | 104,498.18 | 121,804.40 |
| Occidente3_1 | Internal | 104,109.10 | 122,190.35 |
| Occidente3_1 | Internal | 104,110.65 | 122,193.05 |
| HGuaymaral_2 | Internal | 104,008.11 | 122,394.60 |
| HGuaymaral_2 | Internal | 104,018.47 | 122,383.73 |
| HGuaymaral3 | Internal | 103,938.96 | 122,739.20 |
| HGuaymaral3 | Internal | 103,947.07 | 122,749.14 |
| HGuaymaral1_2 | Internal | 103,807.80 | 123,150.66 |
| HGuaymaral1_2 | Internal | 103,807.34 | 123,158.75 |
| Pilas4 | Internal | 104,140.98 | 123,600.30 |
| Pilas4 | Internal | 104,144.78 | 123,609.45 |
| GOccidente2 | Internal | 104,237.24 | 123,932.33 |
| GOccidente2 | Internal | 104,239.61 | 123,936.87 |
| Floresta3 | Internal | 104,314.75 | 123,969.26 |
| Floresta3 | Internal | 104,316.68 | 123,981.82 |
| GOccidente3 | Internal | 104,325.41 | 124,384.73 |
| GOccidente3 | Internal | 104,325.80 | 124,381.46 |
| Novita3 | Internal | 104,351.24 | 124,591.71 |
| Novita3 | Internal | 104,356.21 | 124,609.76 |
| Pilas3 | Internal | 104,487.54 | 122,991.80 |
| Pilas3 | Internal | 104,486.00 | 122,986.32 |
| Canal_Torca 2 | Internal | 104,298.41 | 119,292.41 |
| Canal_Torca 2 | Internal | 104,311.89 | 119,287.25 |
| Torca3 | Internal | 104,283.16 | 119,678.38 |
| Torca3 | Internal | 104,284.08 | 119,670.87 |
| Floresta4 | Internal | 104,500.32 | 123,648.45 |
| Floresta4 | Internal | 104,499.37 | 123,653.18 |
| Novita2 | Internal | 104,803.74 | 124,311.96 |
| Novita2 | Internal | 104,811.23 | 124,306.13 |
| Torca4 | Internal | 104,761.50 | 124,895.67 |

| NOMBRE | CONEXIÓN | COORDENADAS | |
|-------------------|----------|-------------|------------|
| | | ESTE | NORTE |
| Torca4 | Internal | 104,760.90 | 124,893.00 |
| Hguay1_1 | Internal | 103,023.57 | 122,985.49 |
| Hguay1_1 | Internal | 103,040.65 | 122,969.96 |
| TBT_7m2 | Internal | 105,658.74 | 119,644.22 |
| TBT_7m2 | Internal | 105,662.45 | 119,655.17 |
| TBT_7m1 | Internal | 105,686.92 | 119,733.88 |
| TBT_7m1 | Internal | 105,688.15 | 119,743.71 |
| AGC_7M2 | Internal | 105,517.07 | 120,611.98 |
| AGC_7M2 | Internal | 105,516.03 | 120,615.89 |
| AGC_7M1 | Internal | 105,667.65 | 120,157.77 |
| AGC_7M1 | Internal | 105,665.80 | 120,161.19 |
| PAT_7M2 | Internal | 105,478.55 | 121,048.12 |
| PAT_7M2 | Internal | 105,483.21 | 121,042.48 |
| PAT_7m1 | Internal | 105,451.42 | 121,197.96 |
| PAT_7m1 | Internal | 105,453.66 | 121,192.29 |
| SAN_7m2 | Internal | 105,456.42 | 121,403.65 |
| SAN_7m2 | Internal | 105,460.77 | 121,418.87 |
| SAN_7m1 | Internal | 105,093.00 | 121,946.74 |
| SAN_7m1 | Internal | 105,094.48 | 121,941.67 |
| PIL_7m1 | Internal | 105,253.64 | 123,108.32 |
| PIL_7m1 | Internal | 105,253.11 | 123,097.58 |
| FLO_7m1 | Internal | 105,196.96 | 123,695.47 |
| FLO_7m1 | Internal | 105,198.00 | 123,689.64 |
| NOV_7m1 | Internal | 105,165.09 | 124,293.24 |
| NOV_7m1 | Internal | 105,165.82 | 124,285.68 |
| Base_Torca_Sur | Internal | 104,164.28 | 120,726.62 |
| Base_Torca_Sur | Internal | 104,205.95 | 120,955.08 |
| Base_Torca_Centro | Internal | 104,215.27 | 120,995.07 |
| Base_Torca_Centro | Internal | 104,347.28 | 121,979.58 |
| Base_Torca_Norte | Internal | 104,345.41 | 121,987.54 |
| Base_Torca_Norte | Internal | 104,359.45 | 122,234.72 |

Fuente: WSP, 2019.

Figura 224 Localización de BC Lines en el modelo de simulación hidráulico



Fuente: WSP, 2019.

6.3.10 Escenarios de simulación

Como se expuso anteriormente la simulación se realiza para el área de estudio del proyecto de la Autopista Norte; sin embargo, es necesario precisar que se contemplan diferentes escenarios de simulación en los cuales se plantean la situación actual de funcionamiento del sistema hídrico y la situación futura, con los desarrollos urbanos previstos para este sector de la ciudad. Los escenarios contemplados fueron los siguientes:

6.3.10.1 Escenario Condición actual

La condición actual representa el terreno actual, el área seleccionada corresponde al levantamiento topográfico realizado sobre la localización general del modelo y comprende el tránsito por las quebradas, canales y vallados que ingresan al sistema Torca-Guaymaral.

Los humedales representan almacenamientos en el sistema y están separados por las calzadas oriental y occidental de la Autopista Norte, su capacidad de almacenamiento está determinada por la elevación de los puntos topográficos levantados en el sector, correspondientes a los extremos del humedal y el jarillón ubicado al oriente de la Autopista Norte entre la calzada oriental y el canal Torca.

La conexión de los humedales Torca y Guaymaral se realiza por medio de tres estructuras tipo box-culvert que atraviesan las calzadas oriental y occidental de la Autopista Norte en sentido oriente-occidente. Estas estructuras se han convertido en un control sobre el flujo de un humedal al otro, condicionando el caudal que entra al humedal Guaymaral y aumentando el almacenamiento y por lo tanto la lámina de agua sobre el humedal y Canal Torca. El canal Guaymaral se extiende desde la salida del Humedal Guaymaral hasta su entrega al río Bogotá.

6.3.10.2 Condición futura

La condición futura del modelo está construida sobre la base de la condición actual. Las diferencias que presentan entre sí son la implementación de desarrollos de urbanismo que cambian las condiciones de la cobertura, entre ellas, la de impermeabilización que genera caudales de respuesta a eventos de precipitación, mayores a los de la condición actual. En este escenario no se han contemplado adecuaciones hidráulicas y/o geomorfológicas del sistema de drenaje. Estos escenarios serán tratados en el informe de Alternativas de drenaje (Producto 7).

Considera las condiciones morfológicas actuales del humedal, canales y cauces de quebradas, incorporando la modificación de la cobertura del suelo por la aparición de los urbanismos planteados para toda el área de Lagos de Torca, es decir hay un cambio en las condiciones de la impermeabilización de la zona. Para este caso se ha considerado solamente el evento hidrológico de Tr 100 años.

6.3.10.3 Escenario Canal Guaymaral

Este escenario considera el no desborde por el canal Guaymaral, mediante la implementación teórica de un Jarillón sobre la margen izquierda del canal que evite el desborde sobre esta zona del sistema y que permitirá observar el incremento de los niveles en el sistema, con miras a establecer las condiciones futuras de una posible adecuación del canal y de requerimientos de confinamiento en los cuerpos de agua lénticos.

6.3.10.4 Escenario Río Bogotá

Este escenario corresponde a la suposición de un rompimiento del Jarillón izquierdo del río Bogotá en inmediaciones del club Guaymaral que genere un ingreso de agua desde el río hacia el sistema hídrico Torca-Guaymaral. El objeto de este planteamiento, es observar la condición catastrófica de un evento de rotura en el Jarillón a la vez que el evento hidrológico con Tr100 años de recurrencia, ocurre al interior de la cuenca.

En el Anexo 4. “Modelo hidráulico” se presentan los resultados del modelo hidráulico bidimensional para los escenarios descritos.

6.3.11 Generación de resultados

6.3.11.1 Mapas de resultados

Los resultados que se presentan, dado el interés que conllevan, corresponden a los del escenario futuro; el escenario actual puede verificarse en el Anexo 3. Anexo Cartográfico 3.3 PDF 8. Inundación condición Actual y 9. Inundación condición futura.

6.3.11.1.1 Profundidad de lámina de agua

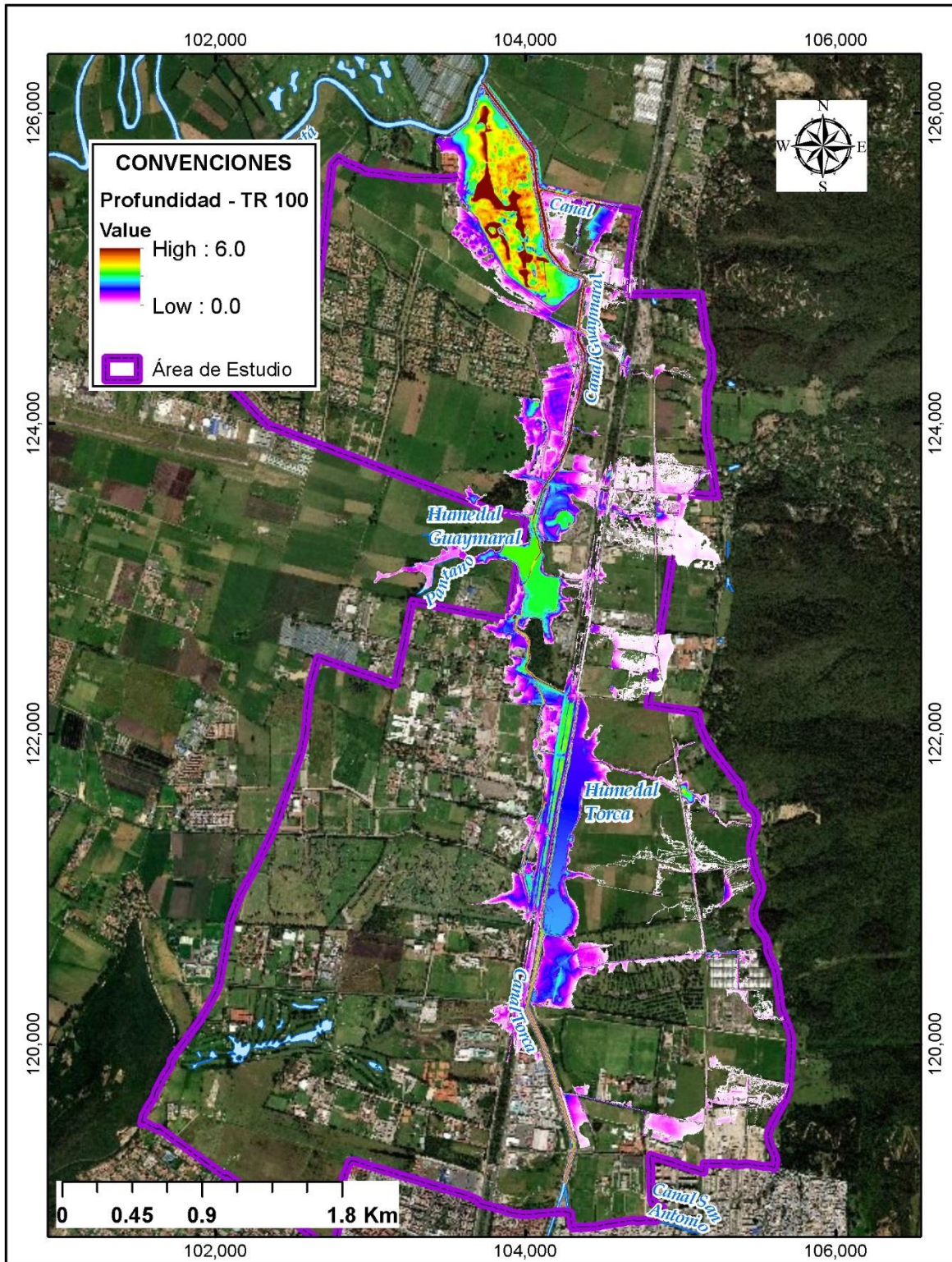
Los mapas se presentan como imagen del RAS Mapper y como archivo Raster para ser visualizado en software GIS. En la Figura 225 y la Figura 228 se presentan los resultados de modelamiento hidráulico en imágenes cromáticas que muestran la variabilidad de la profundidad del agua para el escenario de modelación de condición futura para periodo de retorno de 100 años..

6.3.11.1.2 Elevación de la lámina de agua

Se exportaron los mapas de profundidad de lámina de agua para los tiempos de relevancia en el sistema. Los mapas se presentan como imagen del RAS Mapper y como archivo Raster para ser visualizado en software GIS.

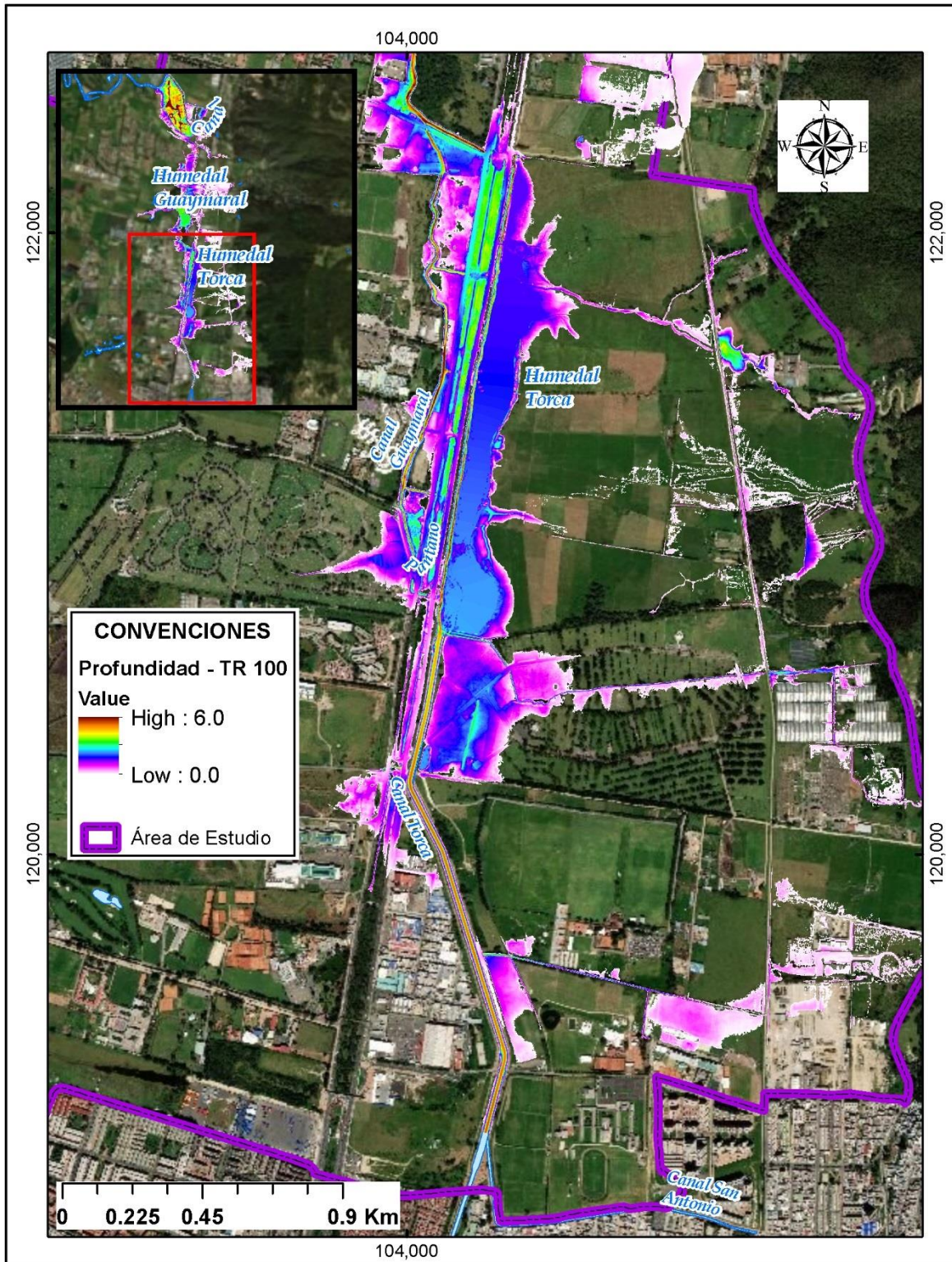
En el Anexo 3 Anexo Cartográfico 3.3 PDF 8. Inundación condición actual y 9. Inundación condición futura, se presentan los mapas de inundación para la condición actual y la futura.

Figura 225 Representación general del modelo de inundaciones del Sistema Hídrico Torca Guaymaral – Tr100 Condición Futura.



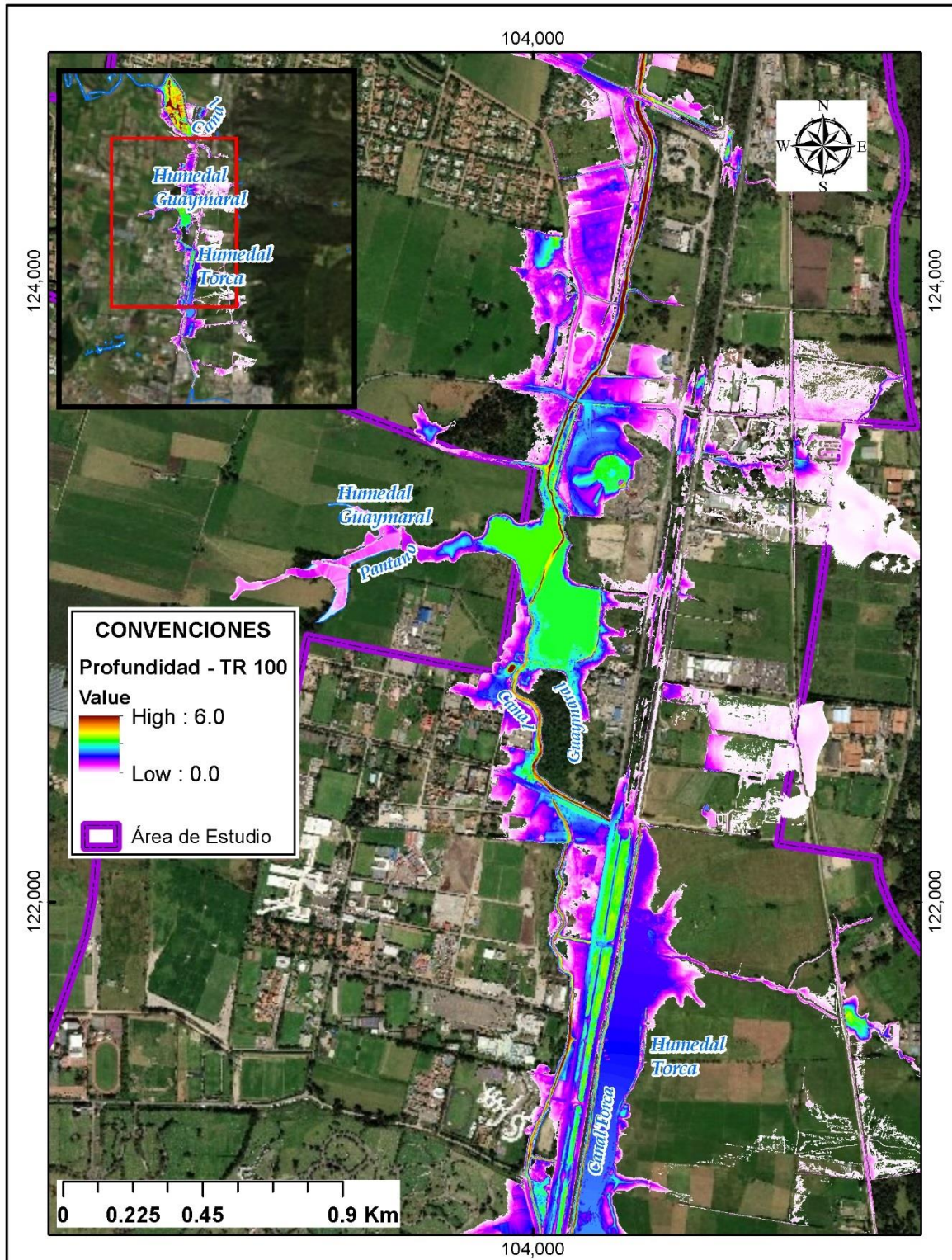
Fuente: WSP, 2019.

Figura 226 Representación del modelo de inundaciones del Sistema Hídrico Torca Guaymaral – Sector Sur Tr100 Condición Futura.



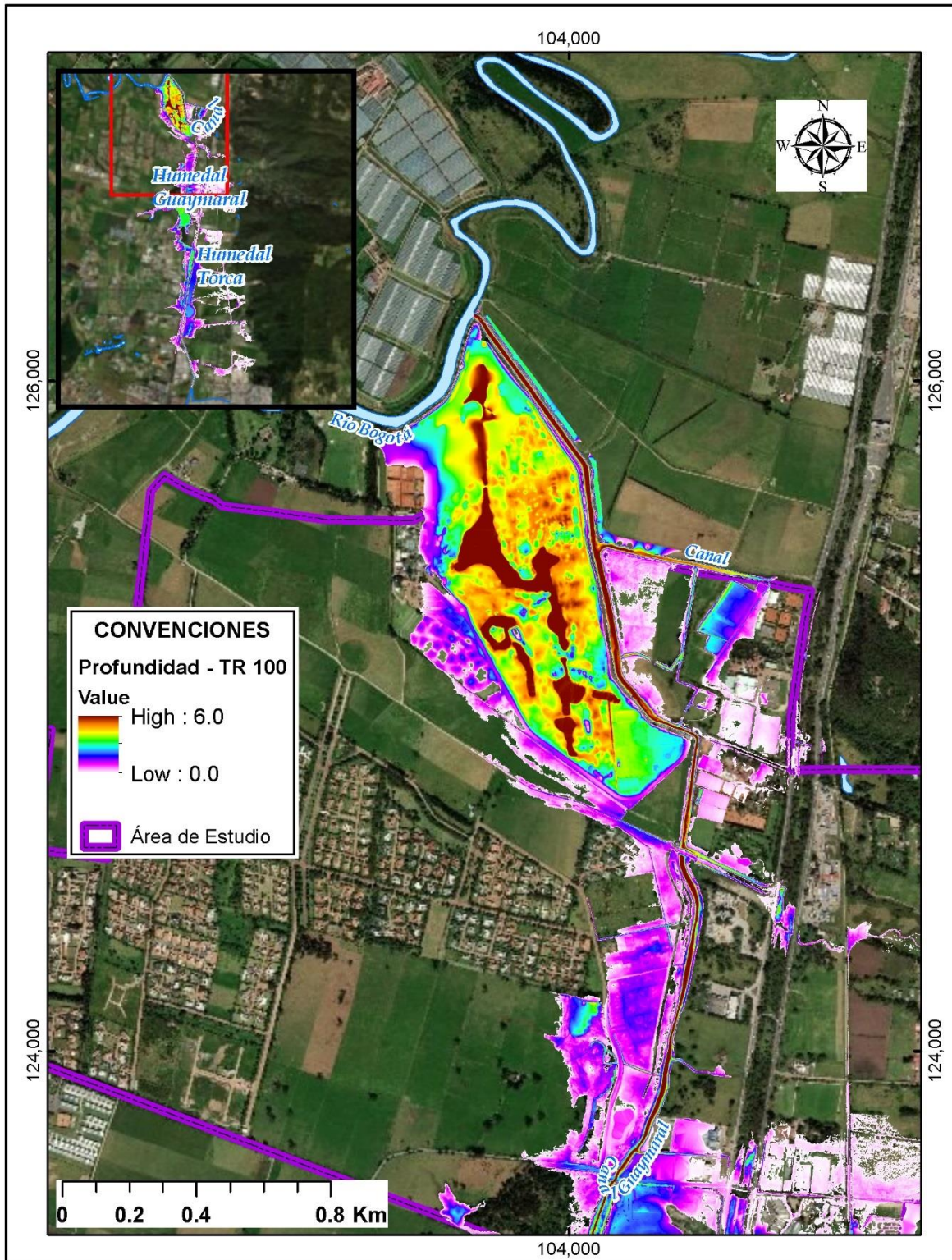
Fuente: WSP, 2019.

Figura 227 Representación del modelo de inundaciones del Sistema Hídrico Torca Guaymaral – Sector Central Tr100 Condición Futura.



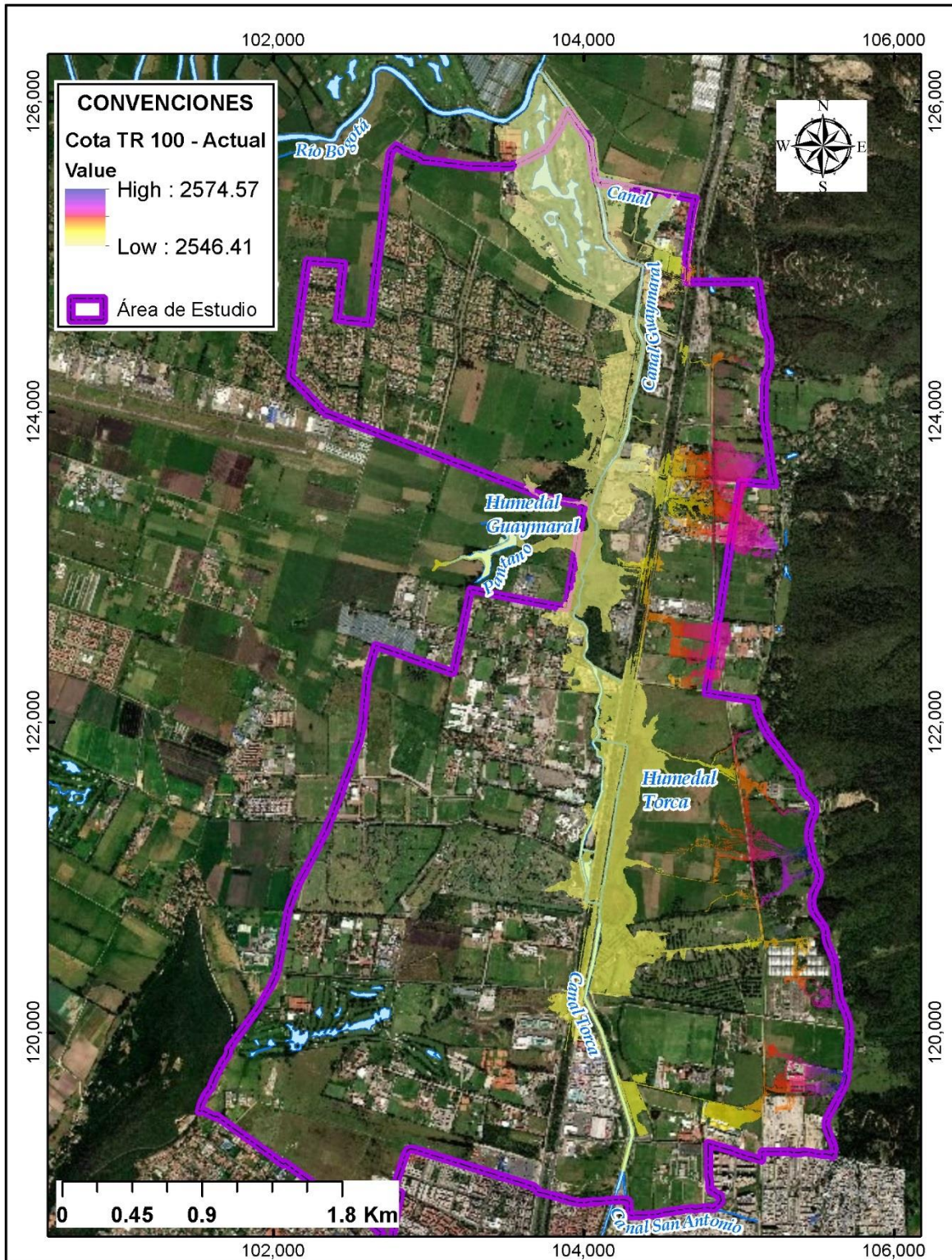
Fuente: WSP, 2019.

Figura 228 Representación del modelo de inundaciones del Sistema Hídrico Torca Guaymaral – Sector Norte Tr100 Condición Futura.



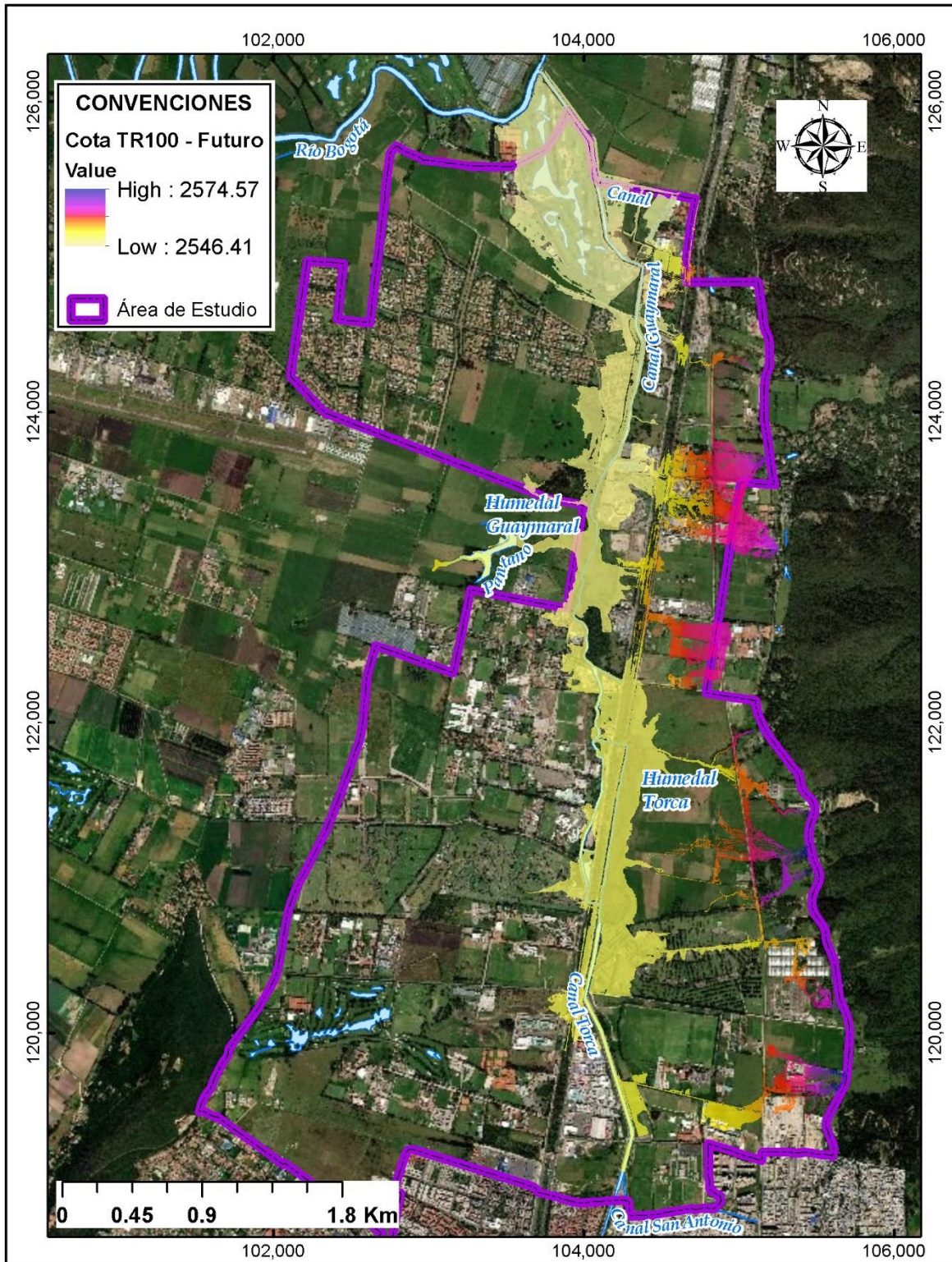
Fuente: WSP, 2019.

Figura 229 Representación general de la elevación del nivel del agua del Sistema Hídrico Torca Guaymaral – Tr 100, Condición Actual



Fuente: WSP, 2019.

Figura 230 Representación general de la elevación del nivel del agua del Sistema Hídrico Torca Guaymaral – Tr100 Condición Futura



Fuente: WSP, 2019.

6.3.12 Presentación y análisis de resultados

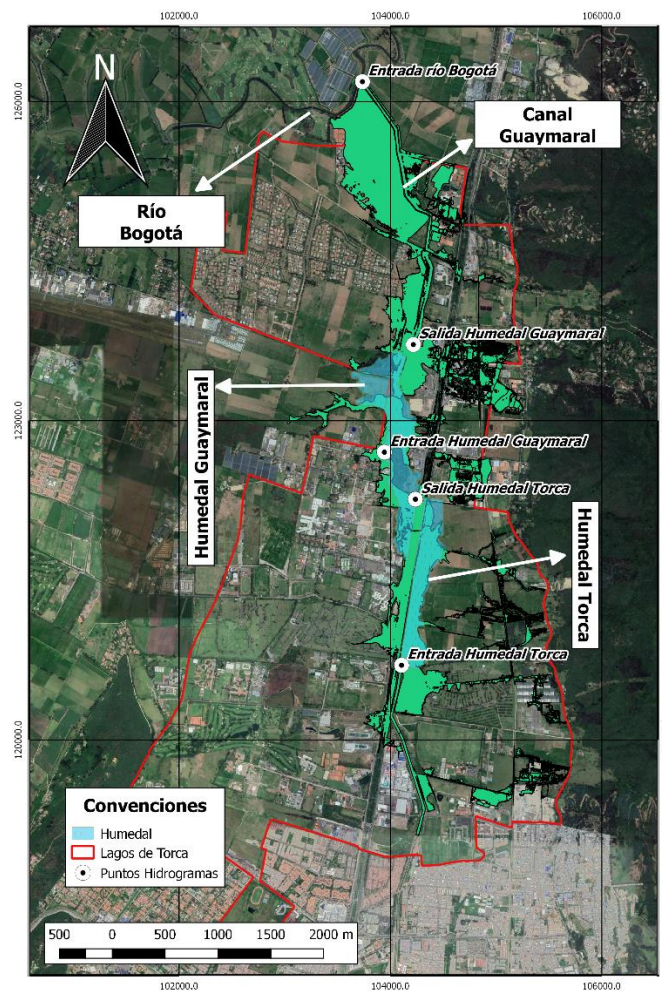
6.3.12.1 Hidrogramas de caudal

Se generaron hidrogramas de caudal en los puntos de comparación de las condiciones actual y futura. Los sitios seleccionados son:

- La entrada al Humedal Torca, ubicado actualmente en la calle 202 (1)
- La salida de la primera área de almacenamiento del humedal Torca (2)
- La salida de la totalidad del Humedal Guaymaral (3)
- Sobre el canal Guaymaral en el último tramo, antes de hacer la desembocadura al río Bogotá (4)

En la Figura 231 se presentan la localización de los sitios de obtención de hidrogramas.

Figura 231 Localización de sitios de obtención de hidrogramas – Escenario Futuro Tr100.



Fuente: WSP, 2019.

6.3.12.2 Perfil hidráulico

Con el objeto de evidenciar el comportamiento de la lámina de agua para diferentes escenarios de probabilidad de ocurrencia en los eventos hidrológicos, se han transitado crecientes con períodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años, para la condición actual y de 100 año para la condición futura.

Los modelamientos realizados en cuanto al tiempo de simulación en el cual se alcanza la lámina máxima sobre el humedal Torca, es posible apreciar que, tanto para la condición actual como para la condición futura, el nivel máximo del humedal Torca se alcanza en el primer sector de este y en un instante de tiempo en el cual los humedales Torca y Guaymaral no se han alcanzado su máxima capacidad producto de las crecientes ingresadas. Esto es debido a que la condición de lámina máxima se alcanza en el primer sector del humedal puesto que es en este punto en el cual se da la confluencia del hidrograma proveniente del Canal Torca.

En la Figura 232 se aprecia que existe una diferencia de niveles de aproximadamente un metro entre las elevaciones de lámina de agua de ambos humedales. Esta condición es provocada por el control que supone una estructura de conexión insuficiente entre ambos humedales; y desde el punto de vista hidráulico sería indeseable debido a que promueve el aumento de lámina de agua sobre el humedal Torca con respecto al humedal Guaymaral, aunque por otro lado permite el control de los flujos que acceden al sector occidental.

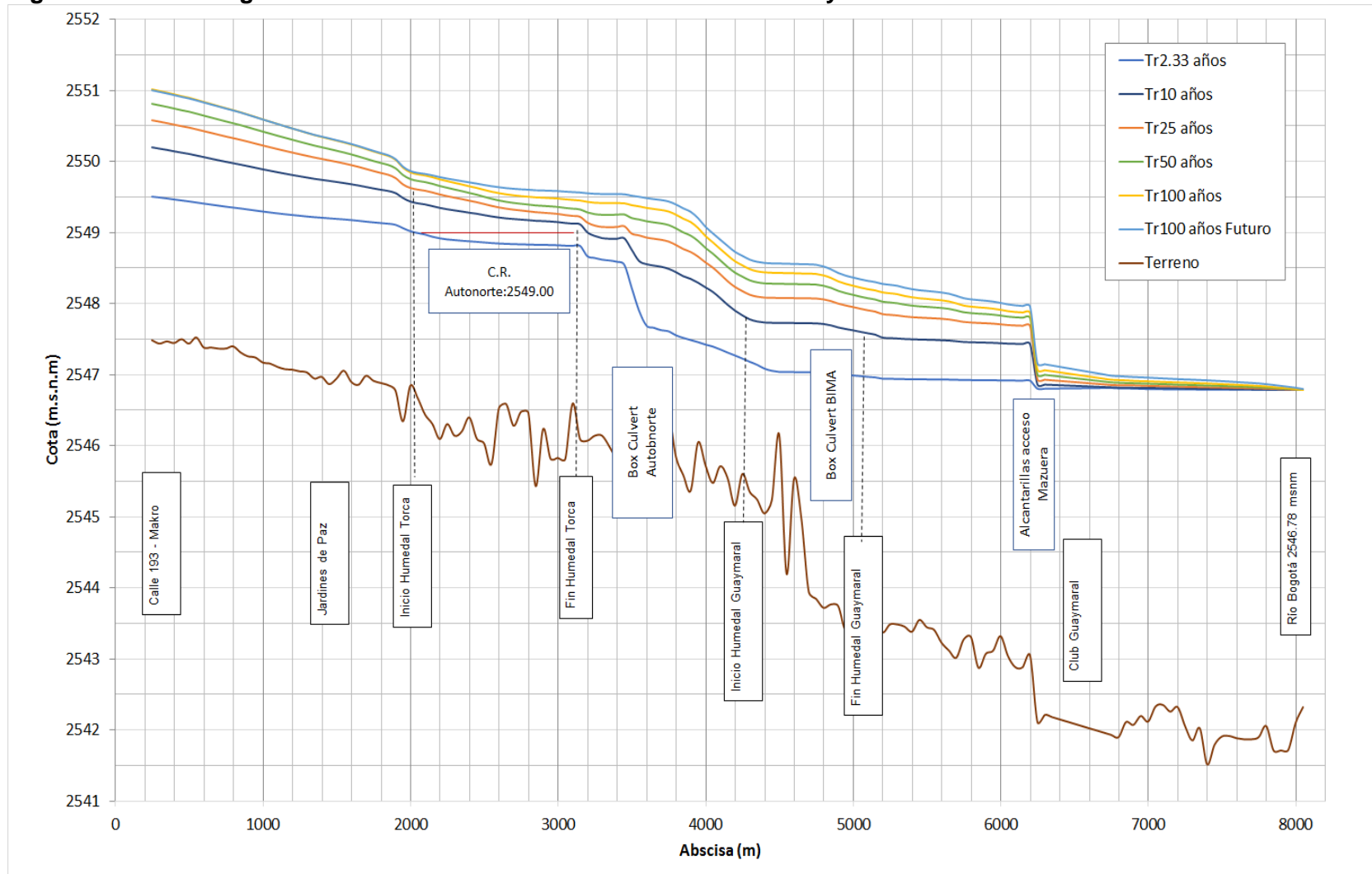
De igual manera en la Tabla 41 se presenta el perfil hidráulico indicando cada período de retorno y condición de simulación, a lo largo del sistema hídrico, iniciando a la altura de Makro (Abscisa K0+250, Calle 193) y terminando en el Río Bogotá (Abscisa K8+050).

Las alternativas de manejo del drenaje evaluarán las condiciones de favorabilidad o no de estas estructuras de cruce, con miras a garantizar niveles de agua ecosistémicos en el cuerpo del humedal. El incremento de los niveles para el Tr100 entre la condición actual y la condición futura para este mismo período de retorno, es de máximo 10 cm, lo cual es un indicador de que el incremento en caudales, no tiene variación que genere una alteración drástica en el comportamiento de los niveles del sistema hídrico.

Como se observa, las velocidades son bajas para el modelo en general oscilando entre 0.5 y 2m/s en su mayoría. Se presentan algunos picos de velocidad en la parte superior de las quebradas, sin embargo, no son representativos para el modelo. Esto permite corroborar la condición de estabilidad basada en el número de Courant adoptada, debido a que para el cálculo de estabilidad se seleccionó una velocidad de flujo promedio de 1m/s.

Así, para las celdas que presentan velocidades mayores a 1m/s su condición de estabilidad no se verá afectada gracias a la opción Time Slicing seleccionada; la cual fracciona el paso del tiempo cuando se alcanza un número de iteraciones definido y por lo tanto reducirá también el número de Courant.

Figura 232 Perfil longitudinal de inundaciones del Sistema Torca – Guaymaral



Fuente: WSP, 2019.

Tabla 41. Perfil hidráulico del Sistema Torca – Guaymaral

| Abscisa (m) | Coordenada | | Condición Actual | | | | | Condición Futura Tr100 años Futuro msnm | Cota Fondo de Canal msnm |
|----------------|------------|-----------|------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| | | | Tr2.33 años | Tr10 años | Tr25 años | Tr50 años | Tr100 años | | |
| | X-Value | Y-Value | msnm | msnm | msnm | | msnm | | |
| 250 | 104262.24 | 119139.16 | 2549.51 | 2550.21 | 2550.58 | 2550.81 | 2551.01 | 2551.00 | 2547.47 |
| 300 | 104275.68 | 119187.32 | 2549.50 | 2550.19 | 2550.56 | 2550.79 | 2550.99 | 2550.98 | 2547.46 |
| 350 | 104289.12 | 119235.48 | 2549.49 | 2550.17 | 2550.54 | 2550.77 | 2550.97 | 2550.96 | 2547.49 |
| 400 | 104302.39 | 119283.69 | 2549.47 | 2550.15 | 2550.52 | 2550.75 | 2550.94 | 2550.93 | 2547.47 |
| 450 | 104314.02 | 119332.27 | 2549.46 | 2550.13 | 2550.50 | 2550.72 | 2550.92 | 2550.91 | 2547.48 |
| 500 | 104309.16 | 119381.17 | 2549.44 | 2550.11 | 2550.48 | 2550.70 | 2550.89 | 2550.89 | 2547.45 |
| 550 | 104294.25 | 119428.89 | 2549.43 | 2550.09 | 2550.45 | 2550.67 | 2550.87 | 2550.86 | 2547.45 |
| 600 | 104279.76 | 119476.74 | 2549.41 | 2550.07 | 2550.43 | 2550.65 | 2550.84 | 2550.83 | 2547.39 |
| 650 | 104265.26 | 119524.60 | 2549.40 | 2550.05 | 2550.40 | 2550.62 | 2550.81 | 2550.80 | 2547.36 |
| 700 | 104250.70 | 119572.43 | 2549.38 | 2550.02 | 2550.38 | 2550.59 | 2550.78 | 2550.77 | 2547.37 |
| 750 | 104235.04 | 119619.91 | 2549.37 | 2550.00 | 2550.35 | 2550.56 | 2550.75 | 2550.74 | 2547.32 |
| 800 | 104219.37 | 119667.40 | 2549.36 | 2549.98 | 2550.33 | 2550.54 | 2550.72 | 2550.72 | 2547.30 |
| 850 | 104204.96 | 119715.27 | 2549.34 | 2549.96 | 2550.31 | 2550.51 | 2550.69 | 2550.69 | 2547.25 |
| 900 | 104190.68 | 119763.19 | 2549.33 | 2549.94 | 2550.28 | 2550.48 | 2550.66 | 2550.66 | 2547.27 |
| 950 | 104176.40 | 119811.11 | 2549.32 | 2549.92 | 2550.25 | 2550.45 | 2550.62 | 2550.62 | 2547.23 |
| 1000 | 104162.13 | 119859.03 | 2549.30 | 2549.90 | 2550.23 | 2550.42 | 2550.59 | 2550.59 | 2547.19 |
| 1050 | 104147.10 | 119906.71 | 2549.29 | 2549.88 | 2550.20 | 2550.39 | 2550.56 | 2550.56 | 2547.16 |
| 1100 | 104131.88 | 119954.34 | 2549.28 | 2549.85 | 2550.18 | 2550.36 | 2550.53 | 2550.53 | 2547.10 |
| 1150 | 104116.67 | 120001.97 | 2549.26 | 2549.83 | 2550.15 | 2550.34 | 2550.49 | 2550.49 | 2547.08 |
| 1200 | 104094.90 | 120046.90 | 2549.25 | 2549.82 | 2550.13 | 2550.31 | 2550.46 | 2550.46 | 2547.07 |
| 1250 | 104072.15 | 120091.42 | 2549.24 | 2549.80 | 2550.10 | 2550.28 | 2550.43 | 2550.43 | 2547.02 |
| 1300 | 104049.40 | 120135.95 | 2549.23 | 2549.78 | 2550.08 | 2550.25 | 2550.40 | 2550.40 | 2547.00 |
| 1350 | 104027.00 | 120180.65 | 2549.22 | 2549.76 | 2550.06 | 2550.22 | 2550.37 | 2550.37 | 2546.93 |
| 1400 | 104014.94 | 120227.05 | 2549.21 | 2549.75 | 2550.04 | 2550.20 | 2550.34 | 2550.35 | 2547.39 |
| 1450 | 104024.87 | 120276.05 | 2549.21 | 2549.73 | 2550.02 | 2550.18 | 2550.32 | 2550.32 | 2547.66 |
| 1500 | 104034.81 | 120325.06 | 2549.20 | 2549.72 | 2550.00 | 2550.15 | 2550.29 | 2550.30 | 2547.09 |
| 1550 | 104044.78 | 120374.05 | 2549.19 | 2549.70 | 2549.97 | 2550.13 | 2550.27 | 2550.27 | 2547.04 |
| 1600 | 104055.11 | 120422.97 | 2549.18 | 2549.69 | 2549.95 | 2550.10 | 2550.24 | 2550.24 | 2547.05 |
| 1650 | 104065.44 | 120471.89 | 2549.17 | 2549.67 | 2549.92 | 2550.07 | 2550.21 | 2550.21 | 2547.10 |
| 1700 | 104073.91 | 120521.17 | 2549.16 | 2549.65 | 2549.90 | 2550.04 | 2550.17 | 2550.18 | 2547.14 |
| 1750 | 104082.26 | 120570.47 | 2549.15 | 2549.63 | 2549.87 | 2550.01 | 2550.14 | 2550.15 | 2547.07 |
| 1800 | 104090.60 | 120619.77 | 2549.14 | 2549.61 | 2549.84 | 2549.98 | 2550.11 | 2550.12 | 2546.99 |
| 1850 | 104099.56 | 120668.95 | 2549.13 | 2549.59 | 2549.81 | 2549.95 | 2550.08 | 2550.09 | 2547.02 |
| 1900 | 104106.80 | 120718.33 | 2549.11 | 2549.56 | 2549.77 | 2549.91 | 2550.02 | 2550.03 | 2546.77 |
| 1950 | 104102.56 | 120768.02 | 2549.07 | 2549.49 | 2549.68 | 2549.81 | 2549.91 | 2549.93 | 2546.61 |
| 2000 | 104109.42 | 120817.49 | 2549.02 | 2549.44 | 2549.63 | 2549.75 | 2549.85 | 2549.86 | 2547.59 |
| 2050 | 104115.26 | 120867.06 | 2549.00 | 2549.42 | 2549.61 | 2549.73 | 2549.82 | 2549.84 | 2546.02 |
| 2100 | 104123.35 | 120916.38 | 2548.98 | 2549.40 | 2549.59 | 2549.71 | 2549.80 | 2549.82 | 2547.01 |
| 2150 | 104135.80 | 120964.71 | 2548.95 | 2549.38 | 2549.56 | 2549.69 | 2549.78 | 2549.80 | 2546.28 |
| 2200 | 104141.77 | 121014.27 | 2548.92 | 2549.35 | 2549.54 | 2549.66 | 2549.75 | 2549.78 | 2546.16 |
| 2250 | 104150.20 | 121063.55 | 2548.91 | 2549.33 | 2549.51 | 2549.63 | 2549.72 | 2549.76 | 2546.30 |
| 2300 | 104157.90 | 121112.91 | 2548.90 | 2549.32 | 2549.49 | 2549.61 | 2549.70 | 2549.74 | 2546.11 |
| 2350 | 104165.22 | 121162.33 | 2548.89 | 2549.30 | 2549.47 | 2549.58 | 2549.68 | 2549.72 | 2546.13 |
| 2400 | 104175.81 | 121211.03 | 2548.88 | 2549.28 | 2549.45 | 2549.56 | 2549.65 | 2549.70 | 2546.46 |

| Abscisa (m) | Coordenada | | Condición Actual | | | | | Condición Futura Tr100 años Futuro msnm | Cota Fondo de Canal msnm |
|----------------|------------|-----------|------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| | | | Tr2.33 años | Tr10 años | Tr25 años | Tr50 años | Tr100 años | | |
| | X-Value | Y-Value | msnm | msnm | msnm | | msnm | msnm | |
| 2450 | 104182.16 | 121260.55 | 2548.87 | 2549.27 | 2549.43 | 2549.53 | 2549.63 | 2549.69 | 2546.23 |
| 2500 | 104190.56 | 121309.72 | 2548.86 | 2549.25 | 2549.40 | 2549.51 | 2549.60 | 2549.67 | 2546.12 |
| 2550 | 104197.54 | 121359.10 | 2548.86 | 2549.23 | 2549.38 | 2549.48 | 2549.58 | 2549.65 | 2545.78 |
| 2600 | 104204.48 | 121408.49 | 2548.85 | 2549.22 | 2549.35 | 2549.45 | 2549.55 | 2549.64 | 2546.48 |
| 2650 | 104212.51 | 121457.64 | 2548.84 | 2549.20 | 2549.34 | 2549.43 | 2549.54 | 2549.62 | 2546.80 |
| 2700 | 104217.29 | 121507.06 | 2548.84 | 2549.19 | 2549.32 | 2549.42 | 2549.52 | 2549.61 | 2546.42 |
| 2750 | 104226.37 | 121556.13 | 2548.84 | 2549.19 | 2549.31 | 2549.41 | 2549.51 | 2549.61 | 2546.41 |
| 2800 | 104239.80 | 121604.04 | 2548.83 | 2549.18 | 2549.30 | 2549.40 | 2549.50 | 2549.60 | 2546.43 |
| 2850 | 104247.94 | 121653.19 | 2548.83 | 2549.17 | 2549.29 | 2549.38 | 2549.49 | 2549.59 | 2545.70 |
| 2900 | 104258.96 | 121701.76 | 2548.83 | 2549.16 | 2549.28 | 2549.38 | 2549.49 | 2549.59 | 2546.35 |
| 2950 | 104269.10 | 121750.41 | 2548.83 | 2549.16 | 2549.27 | 2549.37 | 2549.48 | 2549.59 | 2546.25 |
| 3000 | 104279.19 | 121799.29 | 2548.83 | 2549.15 | 2549.26 | 2549.36 | 2549.48 | 2549.58 | 2545.70 |
| 3050 | 104283.12 | 121848.48 | 2548.82 | 2549.14 | 2549.25 | 2549.35 | 2549.47 | 2549.57 | 2545.96 |
| 3100 | 104293.95 | 121896.45 | 2548.82 | 2549.13 | 2549.23 | 2549.34 | 2549.46 | 2549.57 | 2546.59 |
| 3150 | 104302.03 | 121945.72 | 2548.82 | 2549.12 | 2549.22 | 2549.33 | 2549.45 | 2549.56 | 2546.27 |
| 3200 | 104309.94 | 121995.01 | 2548.67 | 2549.01 | 2549.14 | 2549.28 | 2549.43 | 2549.55 | 2546.02 |
| 3250 | 104317.93 | 122044.23 | 2548.65 | 2548.96 | 2549.10 | 2549.26 | 2549.42 | 2549.54 | 2546.05 |
| 3300 | 104327.28 | 122093.13 | 2548.62 | 2548.92 | 2549.08 | 2549.25 | 2549.42 | 2549.54 | 2546.20 |
| 3350 | 104335.18 | 122142.14 | 2548.61 | 2548.92 | 2549.08 | 2549.25 | 2549.41 | 2549.54 | 2546.04 |
| 3400 | 104343.54 | 122191.22 | 2548.59 | 2548.92 | 2549.08 | 2549.25 | 2549.41 | 2549.54 | 2545.77 |
| 3450 | 104346.35 | 122240.01 | 2548.55 | 2548.92 | 2549.09 | 2549.26 | 2549.41 | 2549.54 | 2545.69 |
| 3500 | 104296.85 | 122247.00 | | | 2548.99 | 2549.21 | 2549.39 | 2549.52 | 2548.91 |
| 3550 | 104247.24 | 122253.18 | 2547.90 | 2548.60 | 2548.96 | 2549.19 | 2549.37 | 2549.50 | 2547.88 |
| 3600 | 104204.56 | 122278.32 | 2547.69 | 2548.56 | 2548.93 | 2549.16 | 2549.35 | 2549.48 | 2547.33 |
| 3650 | 104160.44 | 122300.87 | 2547.66 | 2548.54 | 2548.91 | 2549.14 | 2549.33 | 2549.47 | 2547.13 |
| 3700 | 104116.58 | 122324.47 | 2547.63 | 2548.52 | 2548.90 | 2549.13 | 2549.32 | 2549.46 | 2545.90 |
| 3750 | 104072.69 | 122348.17 | 2547.61 | 2548.49 | 2548.87 | 2549.11 | 2549.30 | 2549.44 | 2546.43 |
| 3800 | 104035.63 | 122380.03 | 2547.55 | 2548.44 | 2548.83 | 2549.06 | 2549.25 | 2549.39 | 2545.77 |
| 3850 | 104002.55 | 122414.18 | 2547.52 | 2548.39 | 2548.77 | 2549.00 | 2549.20 | 2549.34 | 2545.57 |
| 3900 | 104015.79 | 122456.44 | 2547.49 | 2548.35 | 2548.73 | 2548.96 | 2549.15 | 2549.29 | 2545.37 |
| 3950 | 104020.29 | 122503.34 | 2547.46 | 2548.30 | 2548.66 | 2548.88 | 2549.06 | 2549.20 | 2546.44 |
| 4000 | 104021.66 | 122552.22 | 2547.42 | 2548.23 | 2548.58 | 2548.79 | 2548.95 | 2549.08 | 2545.78 |
| 4050 | 104019.97 | 122601.37 | 2547.39 | 2548.17 | 2548.51 | 2548.71 | 2548.86 | 2548.99 | 2545.41 |
| 4100 | 103992.15 | 122641.57 | 2547.35 | 2548.08 | 2548.41 | 2548.61 | 2548.77 | 2548.90 | 2545.70 |
| 4150 | 103948.91 | 122665.77 | 2547.31 | 2547.99 | 2548.32 | 2548.52 | 2548.68 | 2548.81 | 2545.58 |
| 4200 | 103940.71 | 122710.62 | 2547.27 | 2547.90 | 2548.24 | 2548.44 | 2548.60 | 2548.73 | 2545.26 |
| 4250 | 103965.85 | 122751.96 | 2547.23 | 2547.84 | 2548.18 | 2548.38 | 2548.54 | 2548.67 | 2545.55 |
| 4300 | 103980.70 | 122797.85 | 2547.18 | 2547.78 | 2548.13 | 2548.33 | 2548.49 | 2548.62 | 2545.34 |
| 4350 | 103983.41 | 122847.45 | 2547.14 | 2547.75 | 2548.10 | 2548.30 | 2548.46 | 2548.59 | 2545.28 |
| 4400 | 104002.69 | 122893.38 | 2547.08 | 2547.73 | 2548.08 | 2548.29 | 2548.44 | 2548.57 | 2544.96 |
| 4450 | 103989.59 | 122939.18 | 2547.05 | 2547.73 | 2548.08 | 2548.28 | 2548.44 | 2548.56 | 2545.17 |
| 4500 | 104006.59 | 122983.83 | 2547.04 | 2547.73 | 2548.08 | 2548.28 | 2548.43 | 2548.56 | 2544.64 |
| 4550 | 104027.20 | 123028.92 | 2547.03 | 2547.73 | 2548.08 | 2548.28 | 2548.43 | 2548.56 | 2544.15 |
| 4600 | 104042.05 | 123075.57 | 2547.03 | 2547.73 | 2548.08 | 2548.28 | 2548.43 | 2548.56 | 2545.56 |
| 4650 | 104065.67 | 123119.10 | 2547.03 | 2547.73 | 2548.08 | 2548.27 | 2548.43 | 2548.55 | 2544.89 |

| Abscisa (m) | Coordenada | | Condición Actual | | | | | Condición Futura Tr100 años Futuro msnm | Cota Fondo de Canal msnm |
|----------------|------------|-----------|------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| | | | Tr2.33 años | Tr10 años | Tr25 años | Tr50 años | Tr100 años | | |
| | X-Value | Y-Value | msnm | msnm | msnm | | msnm | msnm | |
| 4700 | 104094.58 | 123159.59 | 2547.03 | 2547.72 | 2548.07 | 2548.27 | 2548.42 | 2548.55 | 2543.95 |
| 4750 | 104090.16 | 123207.32 | 2547.03 | 2547.72 | 2548.07 | 2548.27 | 2548.42 | 2548.54 | 2543.81 |
| 4800 | 104080.58 | 123255.21 | 2547.03 | 2547.71 | 2548.06 | 2548.25 | 2548.40 | 2548.52 | 2543.79 |
| 4850 | 104062.88 | 123301.27 | 2547.02 | 2547.69 | 2548.04 | 2548.22 | 2548.36 | 2548.48 | 2543.78 |
| 4900 | 104048.41 | 123347.38 | 2547.00 | 2547.66 | 2548.00 | 2548.18 | 2548.32 | 2548.43 | 2543.66 |
| 4950 | 104054.47 | 123396.92 | 2546.99 | 2547.64 | 2547.97 | 2548.15 | 2548.28 | 2548.39 | 2543.43 |
| 5000 | 104069.07 | 123444.46 | 2546.99 | 2547.63 | 2547.95 | 2548.13 | 2548.25 | 2548.36 | 2543.66 |
| 5050 | 104085.16 | 123491.80 | 2546.98 | 2547.60 | 2547.93 | 2548.10 | 2548.23 | 2548.34 | 2543.64 |
| 5100 | 104101.92 | 123538.82 | 2546.97 | 2547.58 | 2547.91 | 2548.08 | 2548.21 | 2548.32 | 2543.58 |
| 5150 | 104118.61 | 123585.84 | 2546.96 | 2547.56 | 2547.89 | 2548.06 | 2548.19 | 2548.30 | 2543.64 |
| 5200 | 104145.60 | 123627.28 | 2546.94 | 2547.52 | 2547.85 | 2548.03 | 2548.16 | 2548.27 | 2543.43 |
| 5250 | 104172.62 | 123669.14 | 2546.94 | 2547.51 | 2547.84 | 2548.02 | 2548.15 | 2548.26 | 2543.48 |
| 5300 | 104203.90 | 123707.59 | 2546.94 | 2547.51 | 2547.83 | 2548.01 | 2548.14 | 2548.25 | 2543.48 |
| 5350 | 104229.48 | 123750.21 | 2546.93 | 2547.50 | 2547.82 | 2547.99 | 2548.11 | 2548.22 | 2543.45 |
| 5400 | 104246.12 | 123797.20 | 2546.93 | 2547.50 | 2547.81 | 2547.97 | 2548.09 | 2548.20 | 2543.35 |
| 5450 | 104265.70 | 123843.18 | 2546.93 | 2547.49 | 2547.80 | 2547.96 | 2548.08 | 2548.19 | 2543.54 |
| 5500 | 104281.60 | 123890.43 | 2546.93 | 2547.49 | 2547.80 | 2547.96 | 2548.07 | 2548.18 | 2543.51 |
| 5550 | 104290.21 | 123939.66 | 2546.93 | 2547.49 | 2547.79 | 2547.95 | 2548.06 | 2548.17 | 2543.48 |
| 5600 | 104299.24 | 123988.79 | 2546.93 | 2547.48 | 2547.79 | 2547.94 | 2548.05 | 2548.15 | 2543.27 |
| 5650 | 104305.12 | 124038.41 | 2546.93 | 2547.48 | 2547.78 | 2547.93 | 2548.03 | 2548.14 | 2543.25 |
| 5700 | 104319.13 | 124086.32 | 2546.93 | 2547.47 | 2547.76 | 2547.91 | 2548.01 | 2548.11 | 2543.20 |
| 5750 | 104331.71 | 124134.68 | 2546.92 | 2547.46 | 2547.74 | 2547.88 | 2547.98 | 2548.07 | 2543.26 |
| 5800 | 104342.97 | 124183.22 | 2546.92 | 2547.46 | 2547.73 | 2547.87 | 2547.96 | 2548.06 | 2543.04 |
| 5850 | 104352.94 | 124232.16 | 2546.92 | 2547.45 | 2547.73 | 2547.86 | 2547.95 | 2548.05 | 2542.98 |
| 5900 | 104361.35 | 124281.44 | 2546.92 | 2547.45 | 2547.72 | 2547.85 | 2547.94 | 2548.04 | 2542.95 |
| 5950 | 104370.57 | 124330.57 | 2546.92 | 2547.45 | 2547.72 | 2547.85 | 2547.93 | 2548.02 | 2543.16 |
| 6000 | 104380.23 | 124379.45 | 2546.92 | 2547.44 | 2547.71 | 2547.83 | 2547.92 | 2548.01 | 2542.97 |
| 6050 | 104384.33 | 124429.06 | 2546.92 | 2547.44 | 2547.70 | 2547.82 | 2547.90 | 2547.99 | 2542.92 |
| 6100 | 104372.92 | 124477.35 | 2546.91 | 2547.43 | 2547.69 | 2547.81 | 2547.89 | 2547.97 | 2542.87 |
| 6150 | 104351.22 | 124522.37 | 2546.91 | 2547.43 | 2547.69 | 2547.80 | 2547.88 | 2547.96 | 2542.91 |
| 6200 | 104337.74 | 124569.84 | 2546.91 | 2547.43 | 2547.68 | 2547.80 | 2547.87 | 2547.96 | 2542.98 |
| 6250 | 104342.67 | 124619.26 | 2546.80 | 2546.86 | 2546.93 | 2547.01 | 2547.08 | 2547.15 | 2542.23 |
| 6300 | 104348.68 | 124668.78 | 2546.80 | 2546.86 | 2546.93 | 2547.00 | 2547.07 | 2547.14 | 2542.17 |
| 6350 | 104357.10 | 124718.02 | 2546.80 | 2546.86 | 2546.93 | 2546.99 | 2547.06 | 2547.13 | 2542.20 |
| 6400 | 104362.59 | 124767.48 | 2546.80 | 2546.85 | 2546.92 | 2546.99 | 2547.05 | 2547.12 | 2542.16 |
| 6450 | 104369.45 | 124816.91 | 2546.81 | 2546.86 | 2546.93 | 2546.99 | 2547.04 | 2547.11 | 2542.32 |
| 6500 | 104375.04 | 124866.59 | 2546.84 | 2546.89 | 2546.95 | 2547.01 | 2547.03 | 2547.10 | 2542.25 |
| 6550 | 104383.15 | 124915.78 | 2546.98 | 2547.04 | 2547.11 | 2547.15 | 2547.16 | 2547.16 | 2542.40 |
| 6600 | 104358.70 | 124951.24 | 2547.09 | 2547.07 | 2547.06 | 2547.07 | 2547.07 | 2547.08 | 2542.34 |
| 6650 | 104311.67 | 124967.42 | 2546.83 | 2546.84 | 2546.88 | 2546.92 | 2546.95 | 2547.00 | 2542.03 |
| 6700 | 104264.81 | 124983.48 | 2546.84 | 2546.82 | 2546.86 | 2546.90 | 2546.94 | 2546.99 | 2541.91 |
| 6750 | 104227.70 | 125015.71 | 2546.81 | 2546.82 | 2546.85 | 2546.89 | 2546.93 | 2546.98 | 2542.02 |
| 6800 | 104199.56 | 125057.01 | 2546.80 | 2546.82 | 2546.85 | 2546.89 | 2546.93 | 2546.98 | 2541.95 |
| 6850 | 104168.40 | 125096.12 | 2546.80 | 2546.81 | 2546.85 | 2546.88 | 2546.92 | 2546.97 | 2542.20 |
| 6900 | 104145.51 | 125139.64 | 2546.80 | 2546.81 | 2546.85 | 2546.88 | 2546.92 | 2546.96 | 2542.20 |

| Abscisa (m) | Coordenada | | Condición Actual | | | | | Condición Futura Tr100 años Futuro msnm | Cota Fondo de Canal msnm |
|----------------|------------|-----------|------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| | | | Tr2.33 años | Tr10 años | Tr25 años | Tr50 años | Tr100 años | | |
| | X-Value | Y-Value | msnm | msnm | msnm | | msnm | | |
| 6950 | 104141.14 | 125189.22 | 2546.80 | 2546.81 | 2546.85 | 2546.88 | 2546.91 | 2546.96 | 2542.25 |
| 7000 | 104135.64 | 125238.53 | 2546.79 | 2546.81 | 2546.84 | 2546.88 | 2546.91 | 2546.95 | 2542.13 |
| 7050 | 104125.30 | 125287.44 | 2546.79 | 2546.81 | 2546.84 | 2546.87 | 2546.91 | 2546.95 | 2542.37 |
| 7100 | 104115.74 | 125336.50 | 2546.79 | 2546.81 | 2546.84 | 2546.87 | 2546.90 | 2546.94 | 2542.38 |
| 7150 | 104105.32 | 125385.35 | 2546.79 | 2546.81 | 2546.84 | 2546.87 | 2546.90 | 2546.94 | 2542.30 |
| 7200 | 104094.65 | 125434.10 | 2546.79 | 2546.81 | 2546.83 | 2546.86 | 2546.90 | 2546.93 | 2542.27 |
| 7250 | 104082.56 | 125482.55 | 2546.79 | 2546.80 | 2546.83 | 2546.86 | 2546.89 | 2546.93 | 2542.02 |
| 7300 | 104073.21 | 125531.47 | 2546.79 | 2546.80 | 2546.83 | 2546.86 | 2546.89 | 2546.93 | 2541.99 |
| 7350 | 104069.08 | 125581.27 | 2546.79 | 2546.80 | 2546.82 | 2546.85 | 2546.89 | 2546.92 | 2542.18 |
| 7400 | 104063.62 | 125630.94 | 2546.79 | 2546.80 | 2546.82 | 2546.85 | 2546.88 | 2546.92 | 2541.72 |
| 7450 | 104057.77 | 125680.60 | 2546.78 | 2546.80 | 2546.82 | 2546.85 | 2546.88 | 2546.91 | 2541.77 |
| 7500 | 104052.92 | 125730.31 | 2546.78 | 2546.80 | 2546.82 | 2546.84 | 2546.87 | 2546.90 | 2541.94 |
| 7550 | 104030.64 | 125774.16 | 2546.78 | 2546.80 | 2546.82 | 2546.84 | 2546.87 | 2546.90 | 2541.93 |
| 7600 | 104000.59 | 125814.13 | 2546.78 | 2546.79 | 2546.81 | 2546.84 | 2546.86 | 2546.89 | 2541.89 |
| 7650 | 103972.28 | 125855.33 | 2546.78 | 2546.79 | 2546.81 | 2546.83 | 2546.86 | 2546.89 | 2541.86 |
| 7700 | 103943.18 | 125895.99 | 2546.78 | 2546.79 | 2546.81 | 2546.83 | 2546.85 | 2546.88 | 2541.91 |
| 7750 | 103913.88 | 125936.51 | 2546.78 | 2546.79 | 2546.81 | 2546.82 | 2546.85 | 2546.87 | 2541.89 |
| 7800 | 103884.47 | 125976.94 | 2546.78 | 2546.79 | 2546.80 | 2546.82 | 2546.84 | 2546.86 | 2542.01 |
| 7850 | 103854.66 | 126017.09 | 2546.78 | 2546.79 | 2546.80 | 2546.81 | 2546.83 | 2546.85 | 2541.73 |
| 7900 | 103824.86 | 126057.23 | 2546.78 | 2546.79 | 2546.80 | 2546.81 | 2546.82 | 2546.84 | 2541.77 |
| 7950 | 103795.39 | 126097.62 | 2546.78 | 2546.79 | 2546.79 | 2546.80 | 2546.81 | 2546.83 | 2541.80 |
| 8000 | 103766.07 | 126138.12 | 2546.78 | 2546.78 | 2546.79 | 2546.79 | 2546.80 | 2546.81 | 2542.12 |
| 8050 | 103737.46 | 126179.06 | 2546.78 | 2546.78 | 2546.78 | 2546.78 | 2546.78 | 2546.79 | 2542.80 |

Fuente: WSP, 2019.

El perfil hidráulico simulado para la condición topográfica actual, muestra que el control ejercido por el río Bogotá se extiende hasta el sitio de cruce de la vía de acceso a los predios de Mazuera, a la altura de la calle 242, lugar en el cual existe una obra que ejerce control del flujo hacia aguas arriba.

6.3.12.3 Comportamiento de los humedales

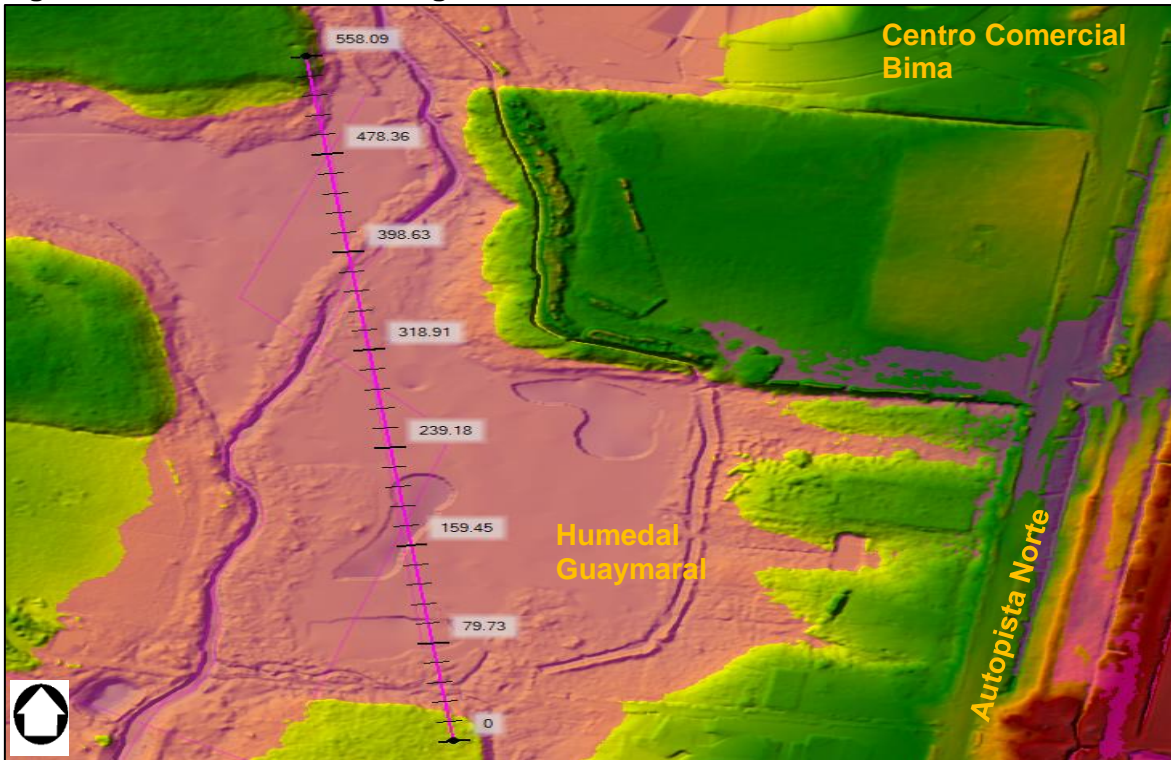
Con el objeto de establecer las condiciones de funcionamiento de los humedales, en relación con su capacidad de almacenamiento y flujo del agua en su interior, a se presenta el análisis del comportamiento hidráulico de los humedales Torca y Guaymaral, teniendo en cuenta las condiciones resultantes del periodo de retorno de 100 años para las condiciones Actual y Futura,

6.3.12.3.1 Humedal Guaymaral

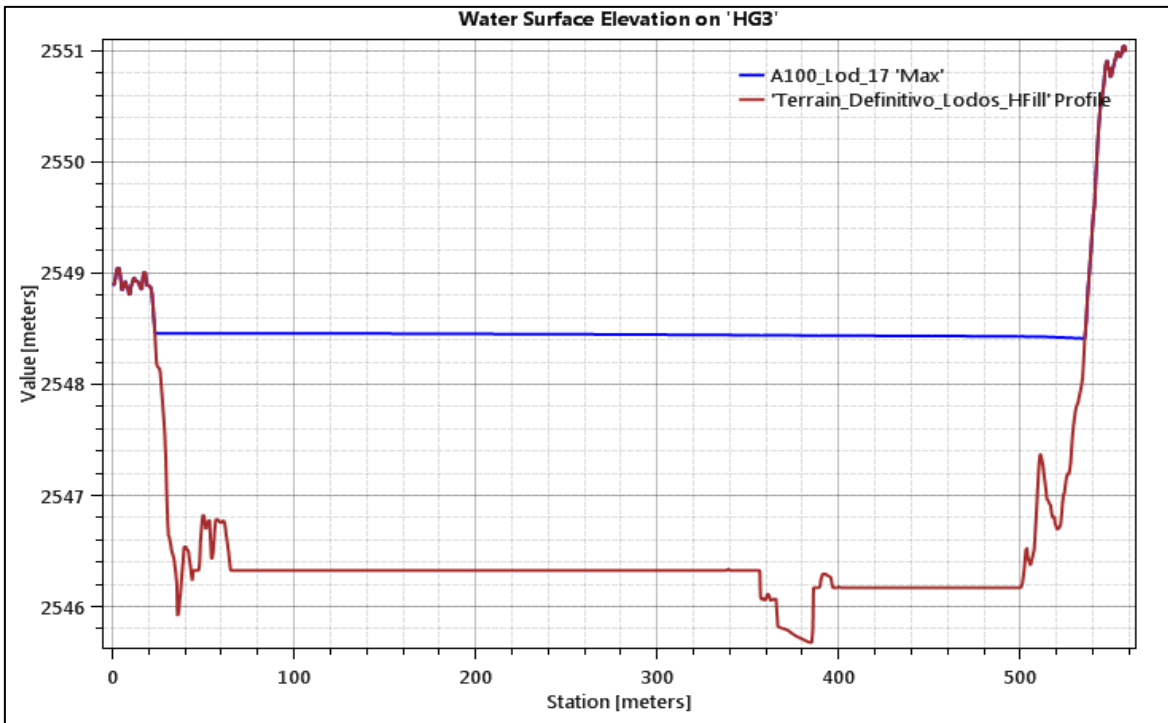
En la Figura 233 se presenta la vista en planta de la cota máxima de elevación para el periodo de retorno de 100 años para la condición actual, así como el perfil hidráulico longitudinal, en el cual se aprecia la cota máxima 2548.46 m.s.n.m., constante a lo largo del humedal, el cual se indica al costado derecho de la imagen. En la Figura 234 se presenta el detalle del modelo de terreno y la sección transversal de la entrada del canal

Guaymaral al Humedal, donde se aprecia que en la parte alta del humedal se conserva una configuración de canal, en donde se presenta un gradiente hidráulico generado por el régimen hidráulico del canal que alcanza a transmitirse a esta zona del humedal, al momento del desborde sobre esta margen. Este sector del humedal deberá ser objeto de una reconfiguración y recuperación del vaso para asegurar el almacenamiento requerido.

Figura 233 Perfil hidráulico longitudinal

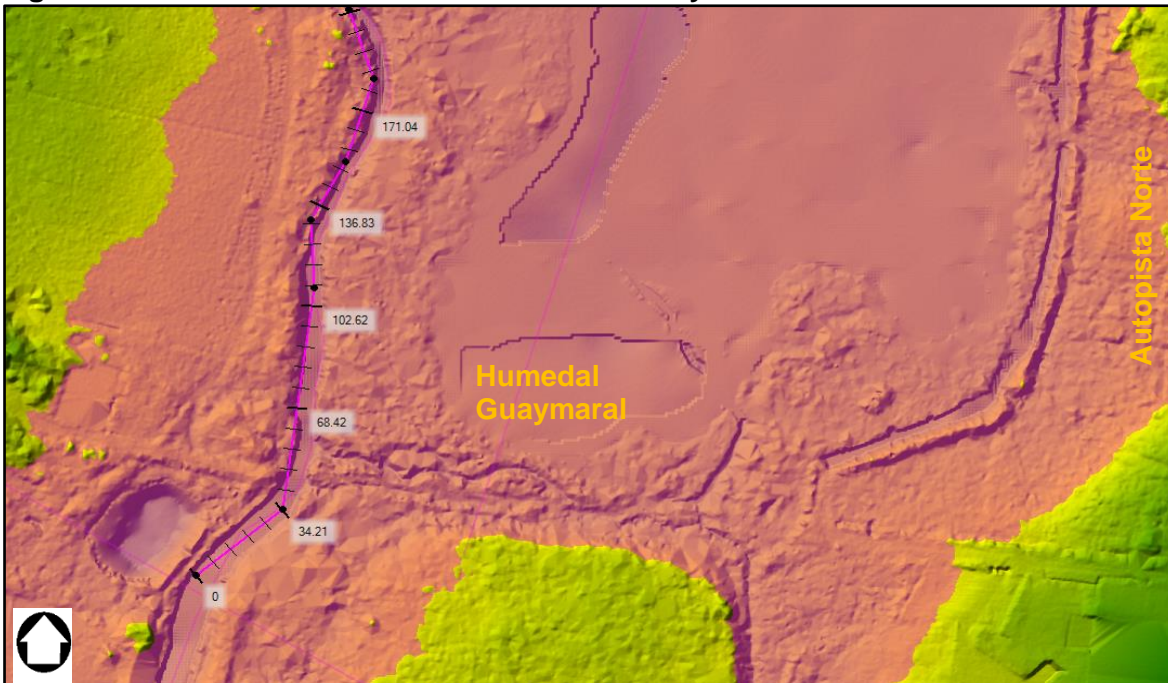


Fuente: WSP, a partir de modelo HEC-RAS 5.05.,2019.



Fuente: WSP, a partir de modelo HEC-RAS 5.05.,2019.

Figura 234 Modelo de terreno inicio humedal Guaymaral

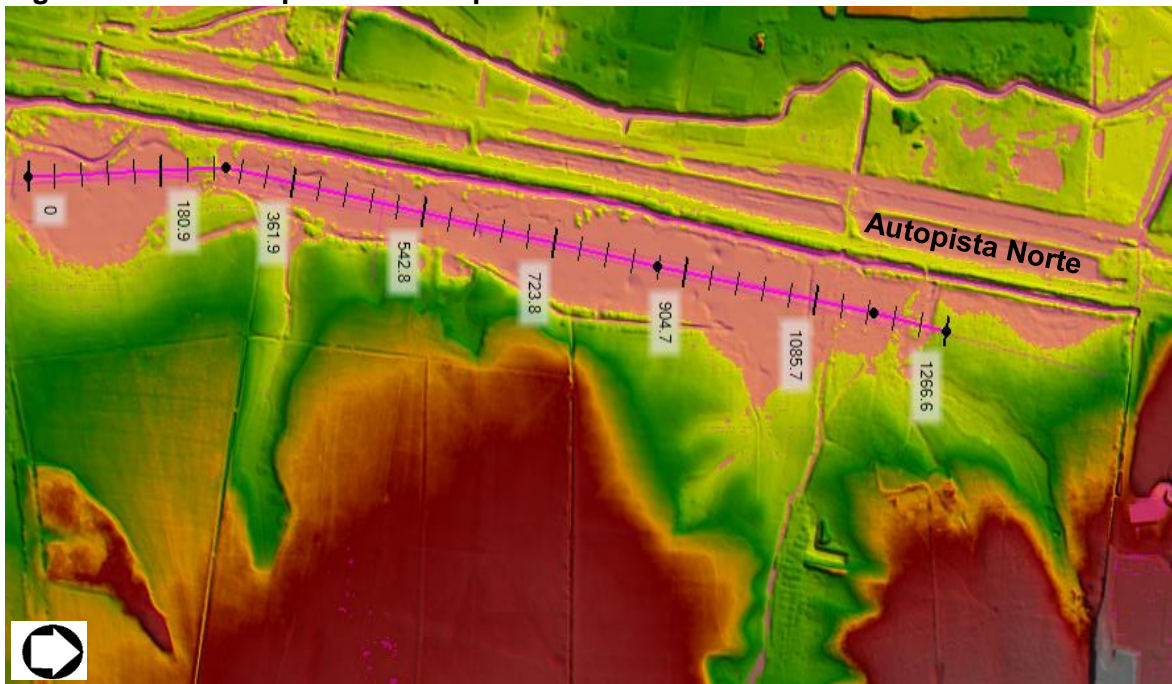


Fuente: WSP, a partir de modelo HEC-RAS 5.05.,2019.

6.3.12.3.2 Humedal Torca

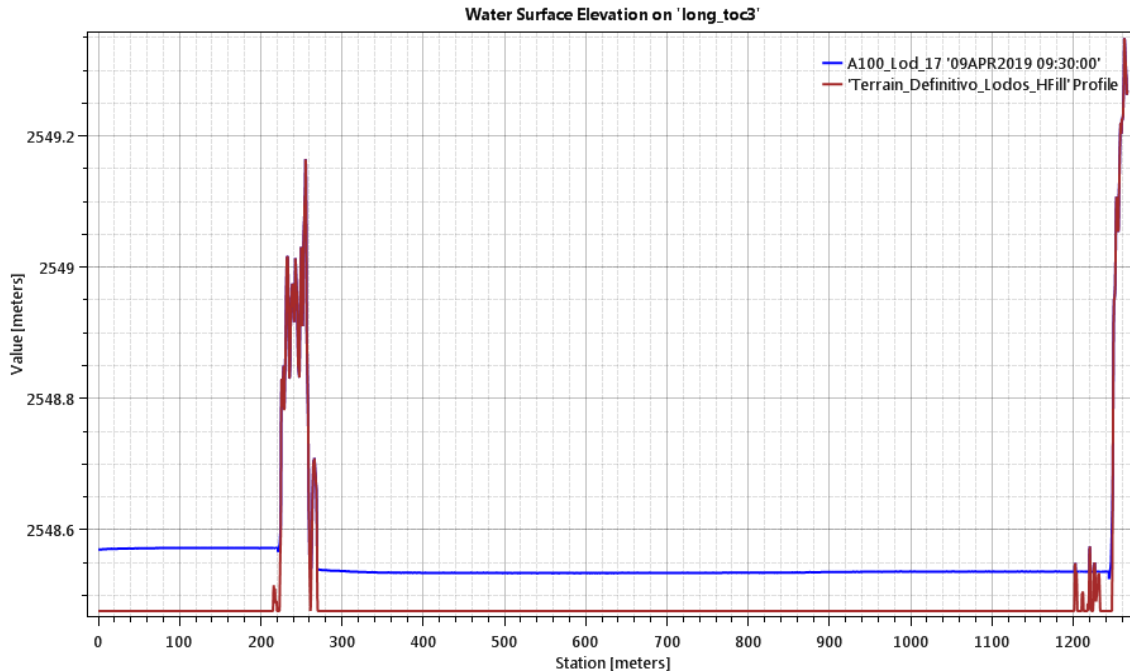
El comportamiento del humedal Torca se ve condicionado por el canal Torca, tan pronto se sobrepasa la cota del dique de la margen derecha; en la Figura 235 se presenta la vista en planta del humedal trazado por donde se tomará el perfil a lo largo del cuerpo del humedal Torca. En la Figura 236 se muestra el perfil longitudinal para el momento en el cual no se hay conexión entre el canal y el humedal, de la que se aprecia la elevación constante de la lámina de agua a lo largo del perfil longitudinal. Adicionalmente de acuerdo con la topografía de detalle, se aprecia que el humedal está conformado por dos vasos que presentan cotas de llenado diferentes. Este sector del humedal también deberá ser objeto de acciones de reconfiguración con el fin de mejorar sus condiciones de amortiguación de inundaciones que requiere este sector de la ciudad.

Figura 235 Trazado para toma de perfil hidráulico en el humedal Torca



Fuente: WSP, a partir de modelo HEC-RAS 5.05.,2019.

Figura 236 Perfil hidráulico longitudinal del Humedal Torca



Fuente: WSP, a partir de modelo HEC-RAS 5.05.,2019.

6.3.12.3.3 Tránsito de humedales a través del método de la Piscina Nivelada

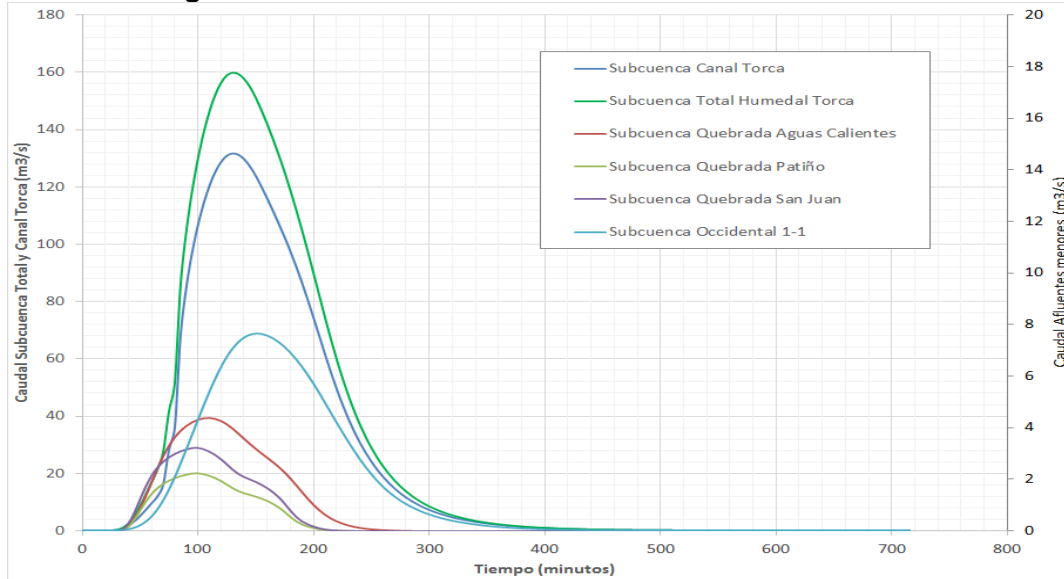
Por otro lado, si se considera a los humedales como sistemas de almacenamiento pleno, se llevó a cabo el procedimiento clásico de tránsito de crecientes a través de embalses, mediante el Método de la Piscina Nivelada, en la cual se considera que el cuerpo del embalse, en este caso del Humedal, se encuentra lleno. Para este análisis se tiene en cuenta el hidrograma de entrada al cuerpo de agua, la curva de capacidad y los elementos de control o estructuras de salida, que para el caso del humedal Torca, se constituyen las obras de drenaje transversal bajo la Autopista Norte, teniendo en cuenta que existe la posibilidad de desborde por encima de la rasante de esta, condición que igualmente se considera como un elemento más de descarga (vertedero). En la Figura 237 se muestra la representación de los hidrogramas que hacen ingreso a este sector del Humedal, de acuerdo con los análisis de precipitación llevados para la totalidad de la cuenca y que se presentaron en el Capítulo 3. Esta figura muestra que a pesar de que los picos de los eventos en cada subcuenca se encuentran desfasados, la forma general del hidrograma total conserva la definida para la subcuenca del canal Torca, que corresponde al mayor aporte de estas aferencias.

En el Anexo 4. Modelo hidráulico, 4.4 Tránsitos Piscina Nivelada se incluyen las memorias de cálculo de los tránsitos.

El hidrograma contemplado en este análisis corresponde a la suma de los hidrogramas obtenidos mediante el programa HecHMS (sección 5.8.2.2 Hidrogramas) de las subcuencas del Canal Torca, las quebradas Aguas Calientes, Patiño, San Juan ingresando por el costado oriental, y de los subsistemas Occidental 1-1 y Occidental 2,

ingresando por el costado occidental a este sector del Humedal. Para esta condición el caudal de entrada máximo es de 160.0 m³/s.

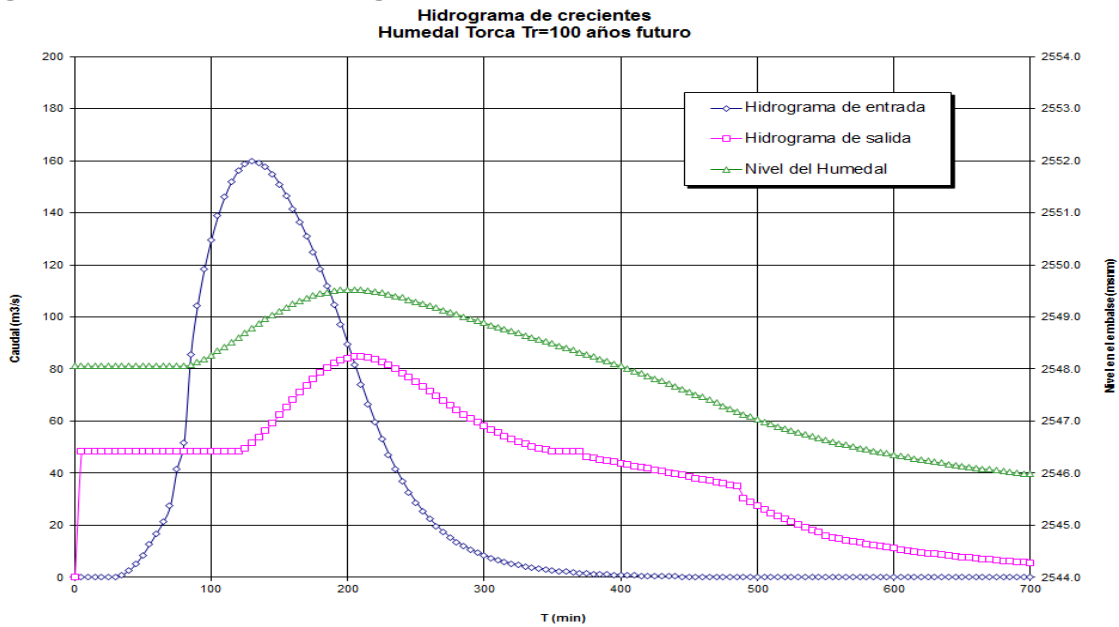
Figura 237 Hidrogramas de caudal de afluentes al Humedal Torca – Tr100 años



Fuente: WSP, 2019.

El resultado de este análisis se presenta en la Figura 238 que indica el tránsito estimado para el humedal Torca mediante el procedimiento de la Piscina Nivelada.

Figura 238 Tránsito de hidrograma en el Humedal Torca – Tr100 años



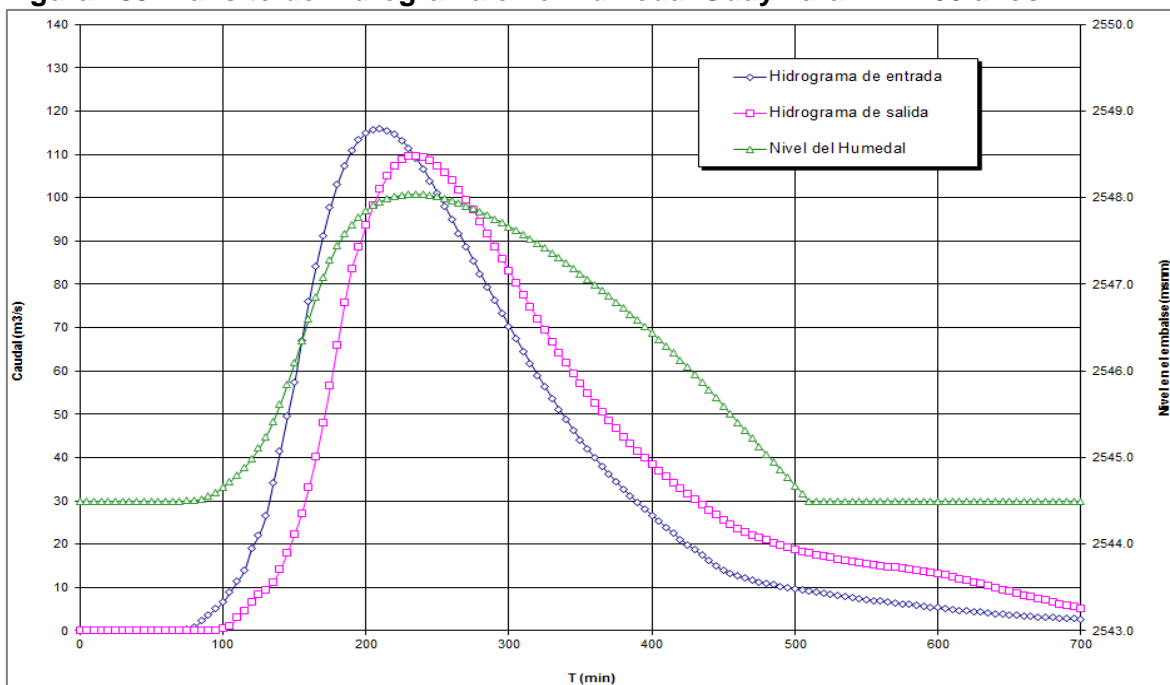
Fuente: WSP, 2019.

Es de aclarar que, para la simulación mediante este procedimiento, no se contemplan los hidrogramas generados a través del Modelo HecRAS, debido a que los reportados por este, ya tienen en cuenta un efecto de tránsito a través de cada cauce, además de las salidas flujo en los desbordes.

De la Figura anterior se observa que la elevación máxima alcanzada en el humedal Torca es la 2549.53 msnm, bastante similar a la generada a través del modelo hidráulico bidimensional (2549.50 msnm, como valor medio).

Para el caso del Humedal Guaymaral, el tránsito de crecientes es el indicado en la Figura 239, en el cual se observa que el valor máximo del nivel alcanzado durante un evento con Tr100 años es de 2548.04 msnm, que es inferior al estimado a través del modelo hidráulico bidimensional (2548.50 msnm como valor medio).

Figura 239 Tránsito de hidrograma en el Humedal Guaymaral – Tr100 años



Fuente: WSP, 2019.

6.3.12.4 Amortiguamiento de los humedales

6.3.12.4.1 Sistema actual

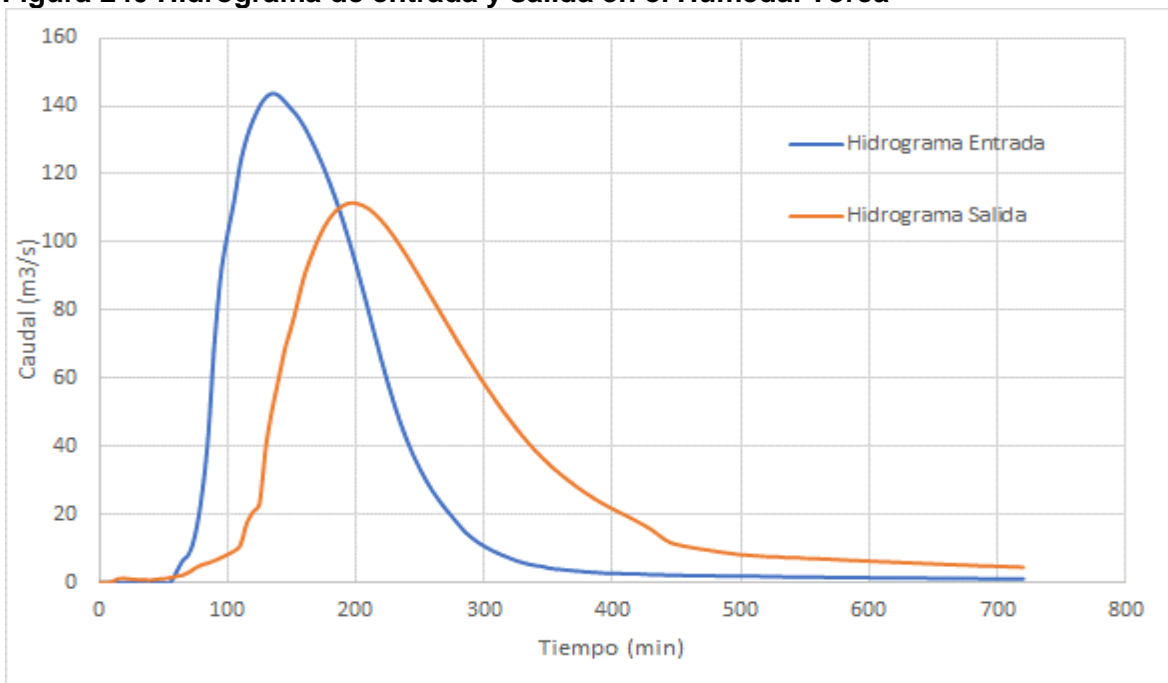
La evaluación geomorfológica de los humedales, que en detalle se analiza en el Producto 3 de esta Consultoría, presenta como principal problemática a la ocurrencia de rellenos y depósito de escombros con el fin de nivelar el suelo para aumentar el área apta para construir o realizar actividades agropecuarias, aunado a las acciones de la canalización y modificación de los cauces natural de las quebradas, que han obstruido y o redireccionado el flujo de agua hacia el humedal, generado control en el flujo de los sedimentos a través del cuerpo de agua léntico.

Estos fenómenos han generado la disminución en el área del humedal debido al depósito de rellenos para utilizar los terrenos en usos agropecuarios, institucionales, recreativas y residenciales, principalmente. Se ha alterado la morfología original, la cual mantiene el sistema hídrico en equilibrio y repercute en el medio biótico.

Las quebradas presentan canalizaciones que modifican su dinámica natural propiciando inundaciones en temporadas invernales y modificando los procesos de erosión y sedimentación propios del sistema. La canalización, además, aumenta el transporte de sedimentos y otros residuos sólidos depositándolos en las zonas topográficamente más bajas e interfiriendo con la conectividad entre las quebradas y el humedal disminuyendo el aporte hídrico a este último.

Para establecer la condición actual de amortiguamiento del Humedal Torca y Guaymaral, se procedió a generar hidrogramas en el sitio de salida de cada uno de estos cuerpos de agua. De esta manera en la Figura 240 se representa el correspondiente al Humedal Torca, en el costado oriental de la Autopista Norte, en el cual se evidencia la capacidad de amortiguación del vaso actual, aun con las condiciones de sedimentación que este presenta, además de su extensión espacial.

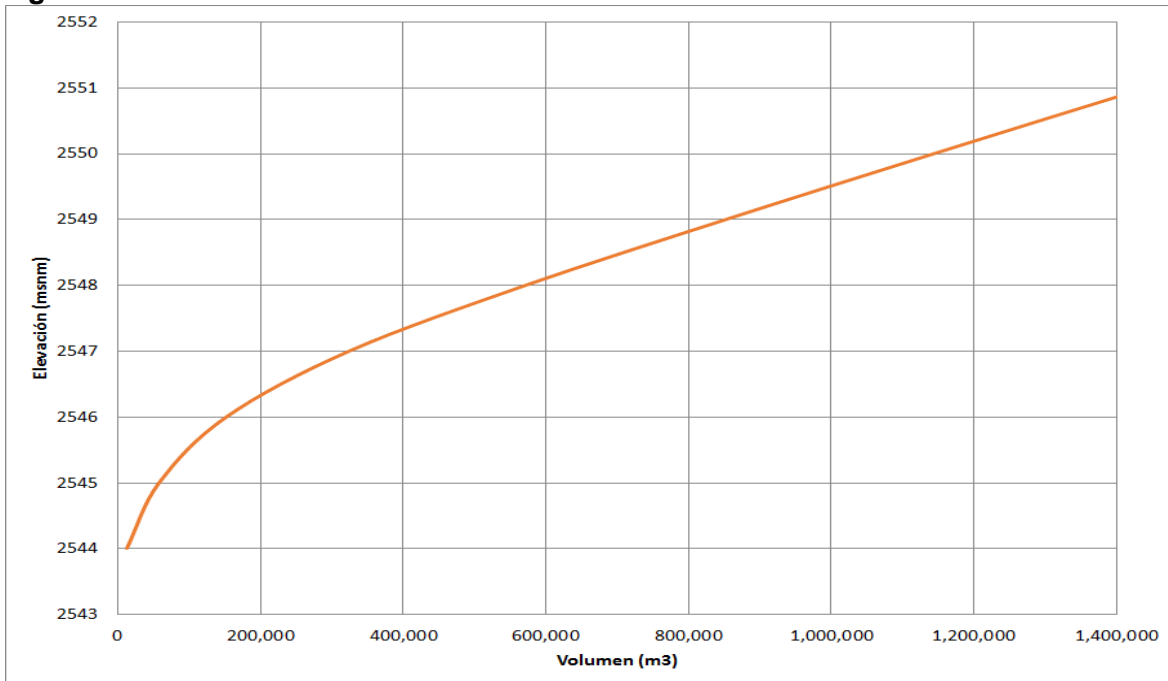
Figura 240 Hidrograma de entrada y salida en el Humedal Torca



Fuente: WSP, 2019.

La curva de capacidad de almacenamiento del Humedal Torca es la que se muestra en la Figura 241.

Figura 241 Curva de almacenamiento del Humedal Torca

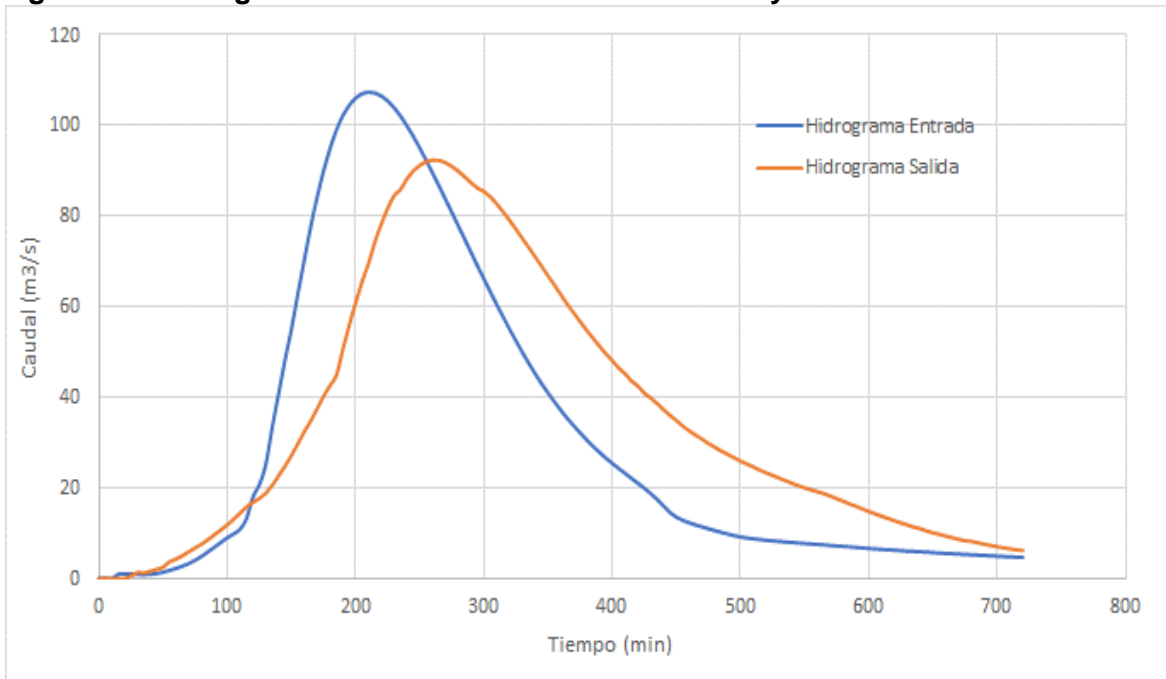


Fuente: WSP, 2019.

El volumen de amortiguación estimado para el Humedal Torca, a partir de las dos curvas es de aproximadamente 444.271 m³.

En cuanto al sector Guaymaral del humedal, el hidrograma mostrado en la Figura 242 indica que los picos un almacenamiento en la zona inundable de este humedal, representado por la atenuación en el pico de la creciente a la salida de este. Este comportamiento de las curvas de los hidrogramas de entrada y salida explican la escasa capacidad de almacenamiento que tiene este sector del Humedal.

Figura 242 Hidrograma de caudales en el Humedal Guaymaral

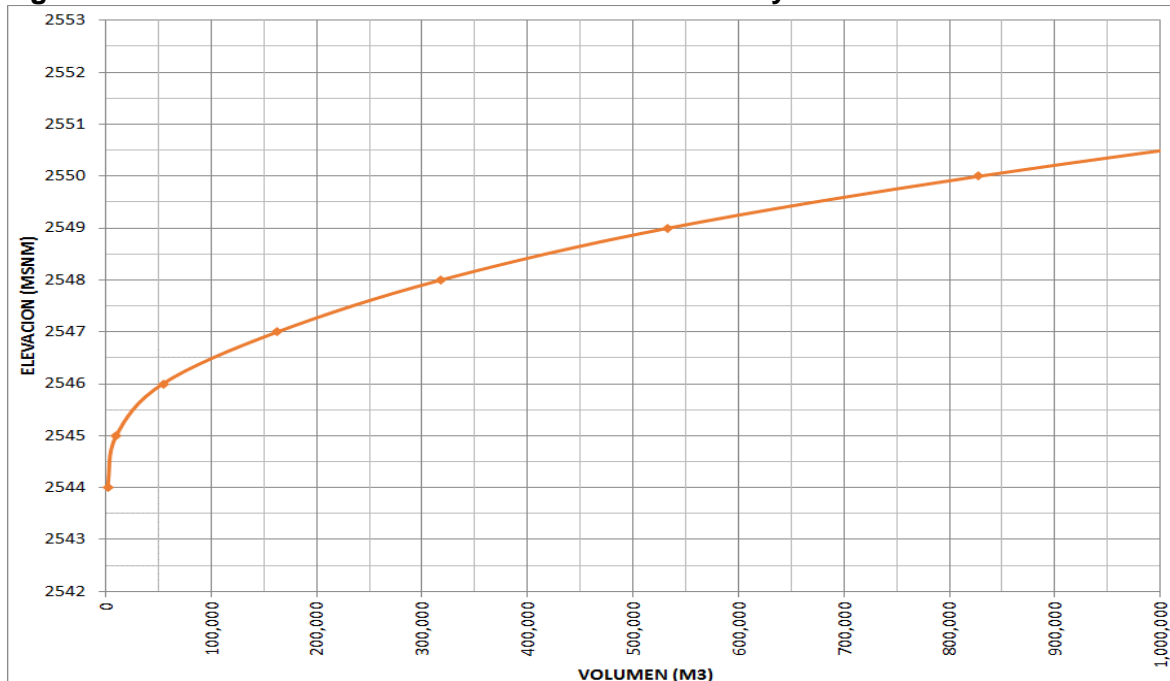


Fuente: WSP, 2019.

La función de retención que tiene el humedal en este sector ha sido rebasada debido a la disposición intencional de los rellenos en las zonas que circundan el humedal, lo que implica una acumulación de materiales tóxicos, la reducción del volumen de almacenamiento de agua y del área de exposición o espejo de agua, que altera la condición ecosistémica natural del humedal.

La curva de capacidad de almacenamiento del Humedal Guaymaral es la que se muestra en la Figura 243.

Figura 243 Curva de almacenamiento del Humedal Guaymaral



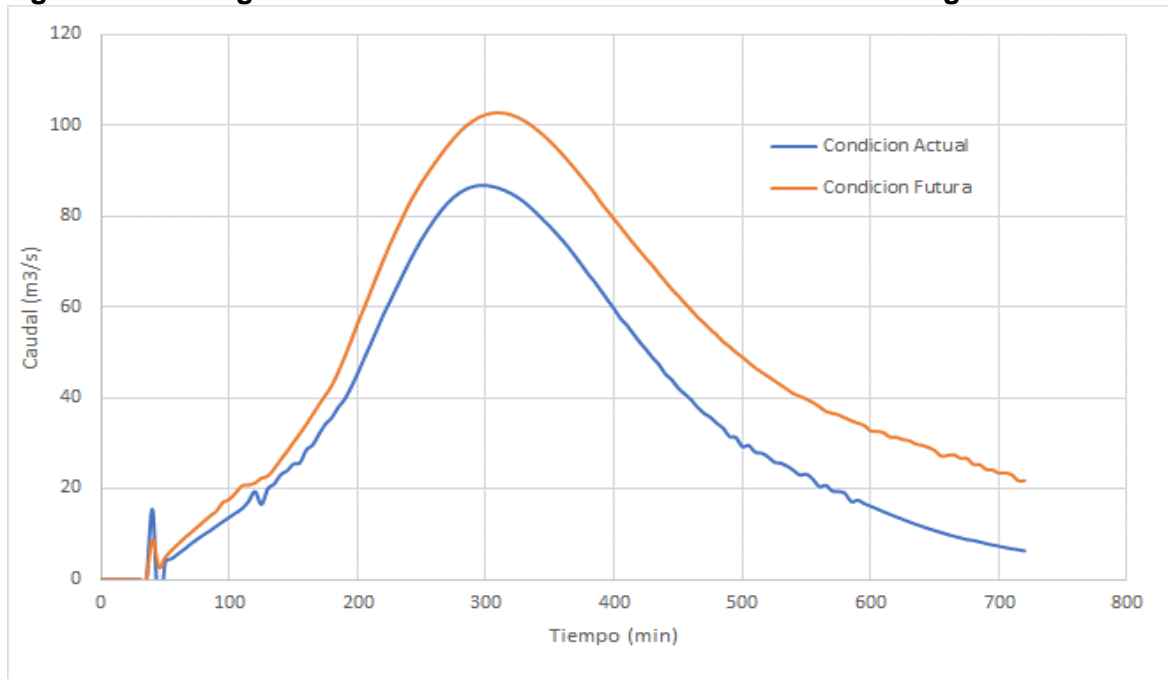
Fuente: WSP, 2019.

Para el caso del Humedal Guaymaral y según las alteraciones a su capacidad que se han descrito previamente, la capacidad de amortiguamiento actual es de solo 233.262 m³.

Ahora, con respecto a la entrega de la creciente al Río Bogotá, en la Figura 244 se presentan los hidrogramas de entrega desde el sistema Torca-Guaymaral a través del canal Guaymaral, para la condición actual y futura, y que como resultado de la urbanización que se prevé, hay un evidente aumento en los caudales de creciente. De esta figura se obtiene que el caudal pico de entrada al río Bogotá que ha sido tránsito a través del sistema hídrico es de 86.8 m³/s para la condición actual y de 102.8 m³/s, para la condición futura.

Todos los hidrogramas presentados corresponden a los generados mediante el modelo de simulación hidráulico HecRAS 2D, que incorporan el efecto del tránsito de los caudales generados desde HechMS a través de todo el sistema hídrico Torca-Guaymaral, que incluye las quebradas, canales y humedales, así como las zonas inundables aferentes a cada uno de estos.

Figura 244 Hidrograma de caudales en la desembocadura al Río Bogotá



Fuente: WSP, 2019.

A pesar de este incremento, y como se observó en el perfil de flujo para todos los escenarios modelados, inclusive aquel que tiene como condición de control el nivel máximo del Río Bogotá (2546.78 msnm) para la condición de proyecto de adecuación, no muestran una gran influencia de los niveles del río en el comportamiento hidráulico de la zona en estudio. Este remanso se extiende aproximadamente hasta el puente de acceso al Club Guaymaral, con lo cual el canal Guaymaral opera sin control o en condición de Flujo Normal, a partir de este sitio hacia aguas arriba.

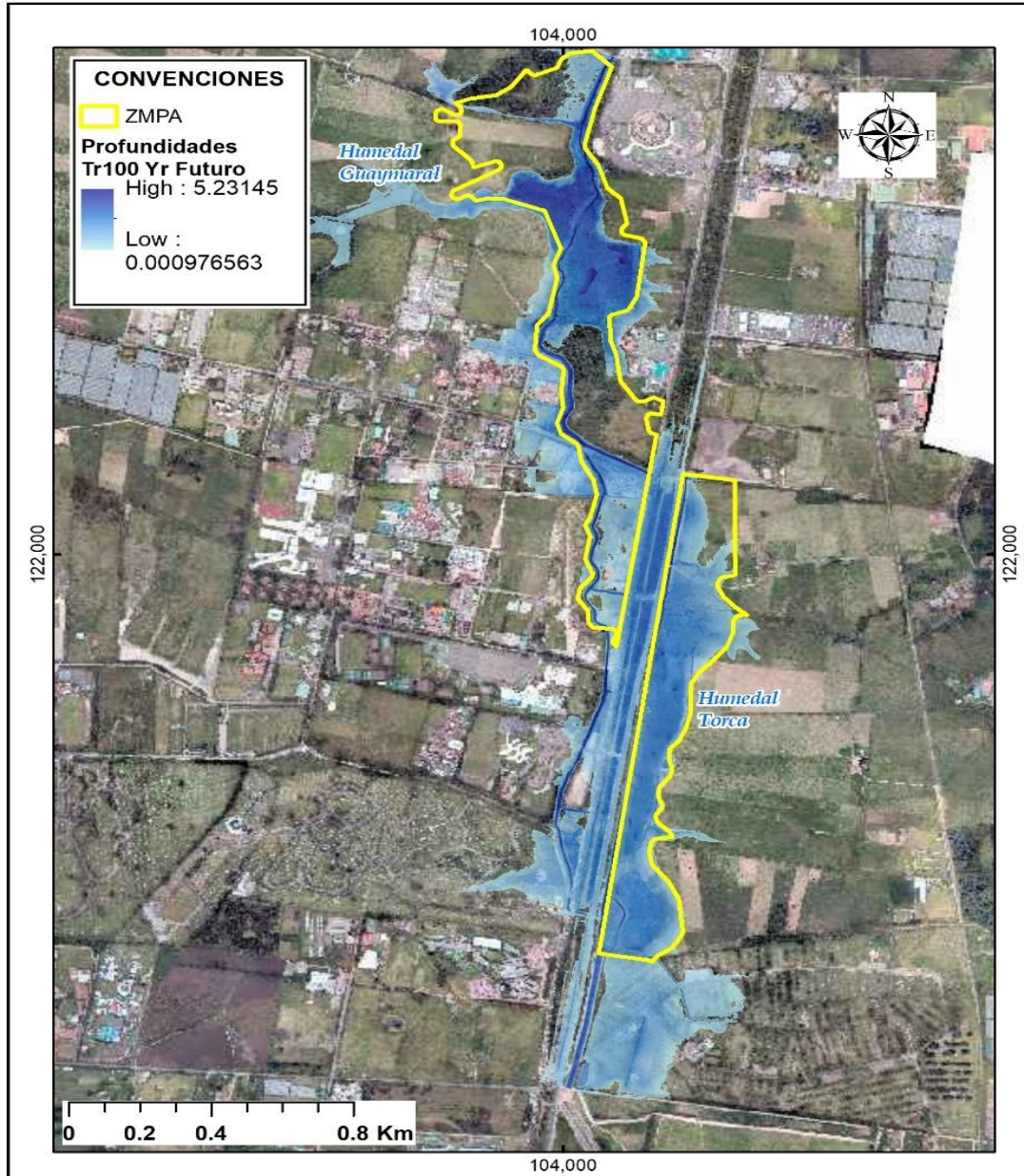
6.3.12.4.2 Estimación del volumen de almacenamiento requerido

Para la determinación del volumen de almacenamiento de agua requerido se partió de los niveles de inundación para el evento de creciente con Tr de 100 años. Mediante técnicas de análisis espacial de ArcGis, se estimó el volumen total de agua que tiene el evento para la lámina total de inundación generada, que incluye los dos sectores del humedal y la altura de desborde de las quebradas Aguas Calientes, Patiño y San Juan. En este escenario el volumen asciende a **1.275.392** m³. Por otro lado, se ha calculado el volumen de agua que en la actualidad reciben los humedales, (almacenamiento actual) hasta el límite normativo definido hasta el momento, es decir el agua que reposaría sobre el área de los humedales. Este volumen es de **828.696** m³, con lo cual el volumen que se requiere almacenar dentro de esta misma área es la diferencia entre los dos valores anteriores; es decir un volumen de **446.695** m³. Este volumen deberá inicialmente, garantizarse dentro de zonas que en la actualidad están dentro de la ZMPA delimitada por la SDA para los dos sectores del Humedal.

La estimación de los volúmenes de desbordamiento, se utilizaron los resultados de profundidad obtenidos de la modelación hidráulica bidimensional en Hec-RAS 5.0.5, mediante técnicas de análisis espacial de ArcGis, como se describe a continuación:

Como primer paso para el cálculo de volúmenes, se delimitó el área inundable asociada a los humedales y se recortó el ráster de profundidades en cada periodo de retorno, obteniendo una superficie como la que se presenta de ejemplo en la Figura 245.

Figura 245. Profundidad Inundación Humedales



Fuente: WSP, 2019.

A partir de las superficies de profundidad de inundación recortadas al área asociada a los humedales en cada uno de los periodos de retorno mencionados y haciendo uso de la herramienta Surface Volumen de la extensión 3DAnalyst del programa computacional ARCGIS 10.5.1 se calculó el total de agua que debería ser almacenado y su extensión, encontrando los resultados que se presentan en la Tabla 42.

Tabla 42. Volumen por almacenar en los humedales

| EVENTO HIDROLÓGICO | ÁREA DE INUNDACIÓN (m ²) | VOLUMEN POR ALMACENAR (m ³) |
|--------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|
| Funcional | 330,882 | 271,392 |
| Tr 2.33 Actual | 451.318 | 381.165 |
| Tr 10 Actual | 691.645 | 691.305 |
| Tr 25 Actual | 826.452 | 895.416 |
| Tr 50 Actual | 912.962 | 1.045.278 |
| Tr 100 Actual | 970.458 | 1.179.519 |
| Tr 100 Futuro | 1.003.761 | 1.275.392 |

Fuente: WSP, 2019.

Identificado el volumen por almacenar en los humedales, el siguiente paso fue determinar cuánto de ese *volumen* es almacenado por la ZMPA, ya que la cantidad allí reportada se considera el volumen controlado y el excedente el desbordado; para esto se limitó la información de profundidades, tal como se presenta de ejemplo en la Figura 247, obteniendo los resultados que se presentan en la Tabla 43.

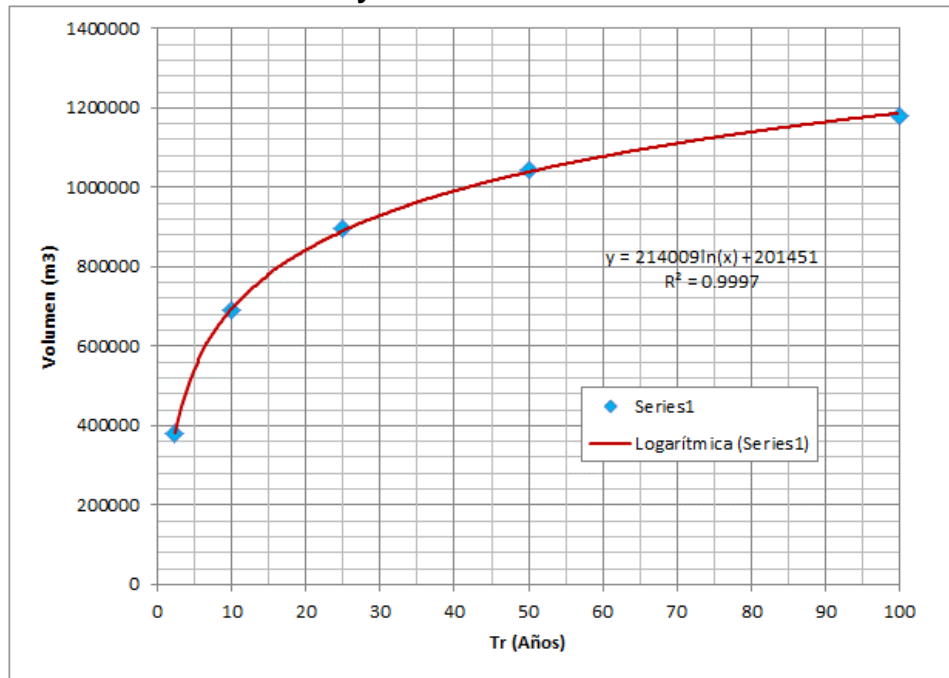
Tabla 43. Volumen Almacenamiento ZMPA y Desbordamiento

| EVENTO | ÁREA DE INUNDACIÓN DENTRO DE ZMPA (m ²) | VOLUMEN POR ALMACENAR EN ZMPA (m ³) | VOLUMEN DESBORDADO (m ³) |
|------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Tr 2.33 años | 343,496 | 322,239 | 58,926 |
| Tr 10 años | 418,586 | 519,846 | 171,459 |
| Tr 25 años | 457,058 | 630,243 | 265,173 |
| Tr 50 años | 487,648 | 708,412 | 336,866 |
| Tr 100 años Condición actual | 508,338 | 776,645 | 402,874 |
| Tr 100 años Condición Futura | 521,750 | 828,696 | 446,695 |

Fuente: WSP, 2019.

A partir de los datos de volumen de almacenamiento para cada período de retorno, se buscó establecer el período de retorno para el cual el sistema hídrico funciona sin generar desbordamientos en los sectores del humedal Torca o Guaymaral, para lo cual se procedió a generar una curva de regresión con los datos de la Tabla 42, como se ilustra en la Figura 246, de la cual se evidencia que para un volumen en el evento hidrológico de 271.392 m³, el período de retorno o la frecuencia funcional del sistema sin desbordes es de solo 1.38 años.

Figura 246. Curva de regresión para volúmenes de almacenamiento y períodos de retorno en el humedal Torca-Guaymaral

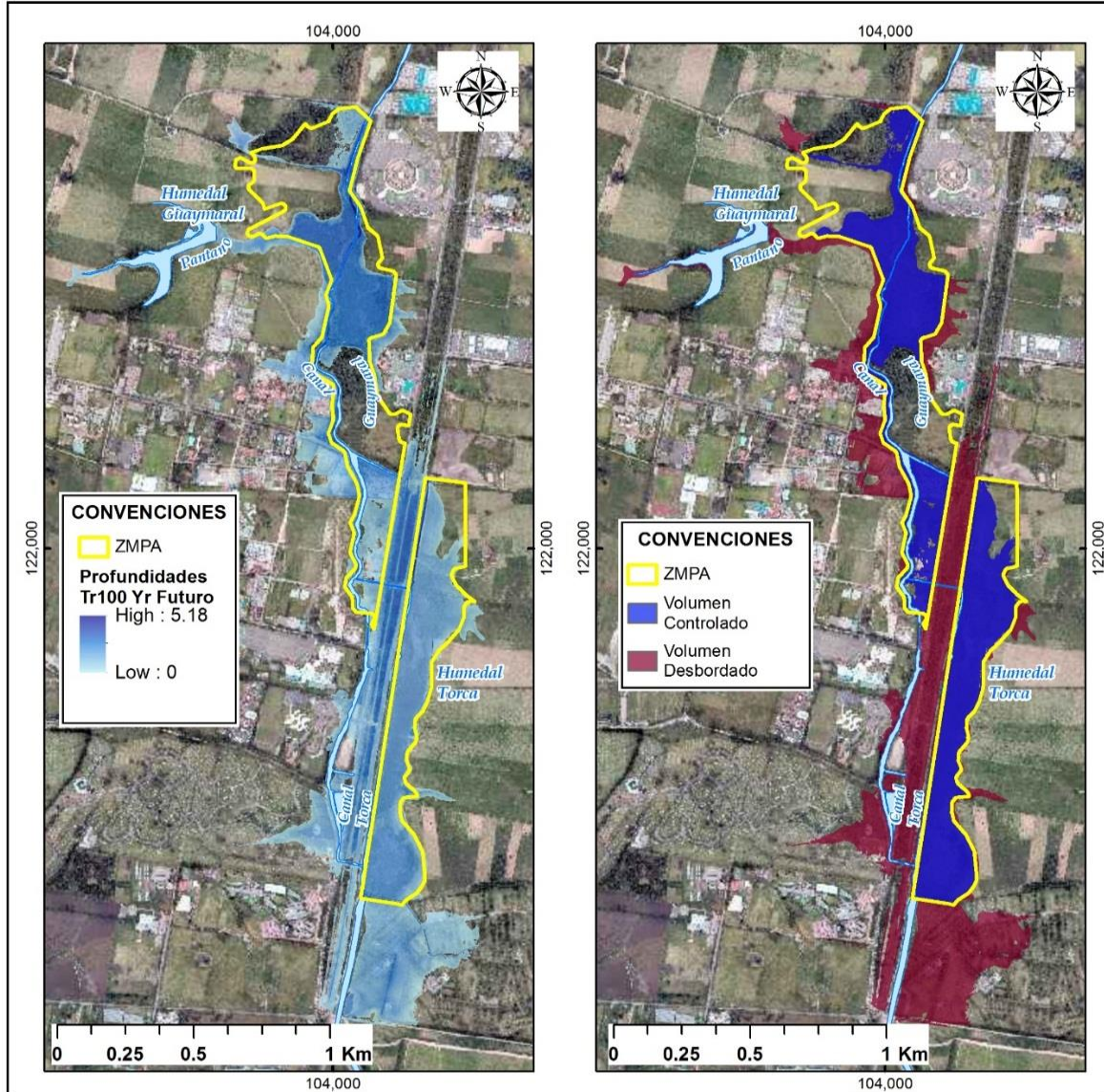


Fuente: WSP, 2019.

Ahora, al realizar la comparación con el procedimiento de estimación de los volúmenes de almacenamiento a partir de los hidrogramas de entrada y salida mostrados en la Figura 240 y la Figura 242, según los cuales el almacenamiento total del sistema es de 677.533 m³, difiere con los 828.696 m³ estimados mediante el procedimiento explicado en esta sección. Esto tiene explicación en razón a que dado a que el sistema hídrico del humedal funciona de una manera muy irregular, es decir tiene varios puntos de ingreso de agua y de la misma manera en sus efluentes o descargas, controladas o no que, además de los diversos sitios en los que se presenta desbordamiento, impiden tener un confinamiento real del cuerpo del humedal y por lo tanto realizar una cuantificación acertada del volumen real de almacenamiento, mediante procedimientos convencionales de cálculo.

En el momento de realizar las propuestas de reconfiguración del humedal, se podrá llegar a tener un sistema con mejor control y su operación llegaría a parecerse al de un embalse con entradas y salidas de caudal definidas, momento en el cual podrán verificarse los niveles que alcanzaría el humedal y de esta manera que las estimaciones de volúmenes mediante los dos procedimientos, se asemejen.

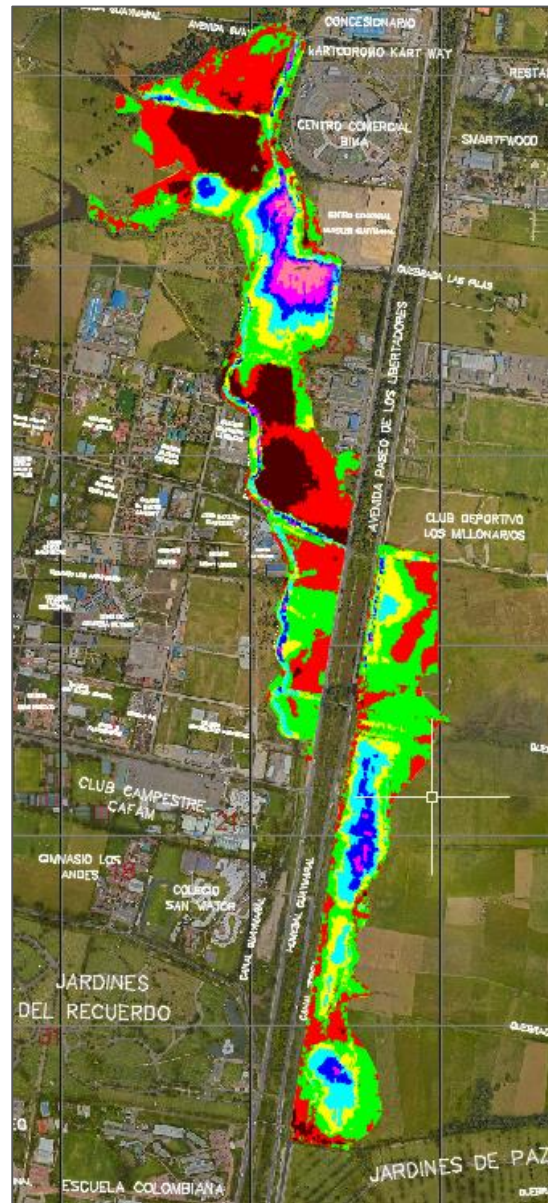
Figura 247. Superposición de áreas de ZMPA del Humedal y las áreas de desborde







Fuente: WSP, 2019.

Dentro de los análisis de geomorfología y dinámica de la zona, así como desde el punto de vista de coberturas y las visitas de inspección realizadas por esta Consultoría, se identificaron algunas áreas aptas para la adecuación, reconfiguración o rehabilitación del cuerpo de agua del humedal. La determinación de las zonas aptas para este tipo de adecuación partió de la evaluación de las condiciones topográficas y morfológicas que tiene el humedal en la actualidad, para lo cual se empleó la información de los levantamientos topográficos y batimétricos en los dos sectores del humedal. De esta manera se puede llegar a generar un esquema como el que se muestra en la Figura 248, en el cual se indican los gradientes de elevaciones que tiene el humedal a partir del nivel medio del agua actual. Los valores negativos corresponden a la altura de rellenos, mientras que los positivos son los niveles de profundidad que alcanza el humedal, por debajo del nivel medio.

Figura 248. Mapa de variación de elevaciones dentro del Humedal Torca-Guaymaral

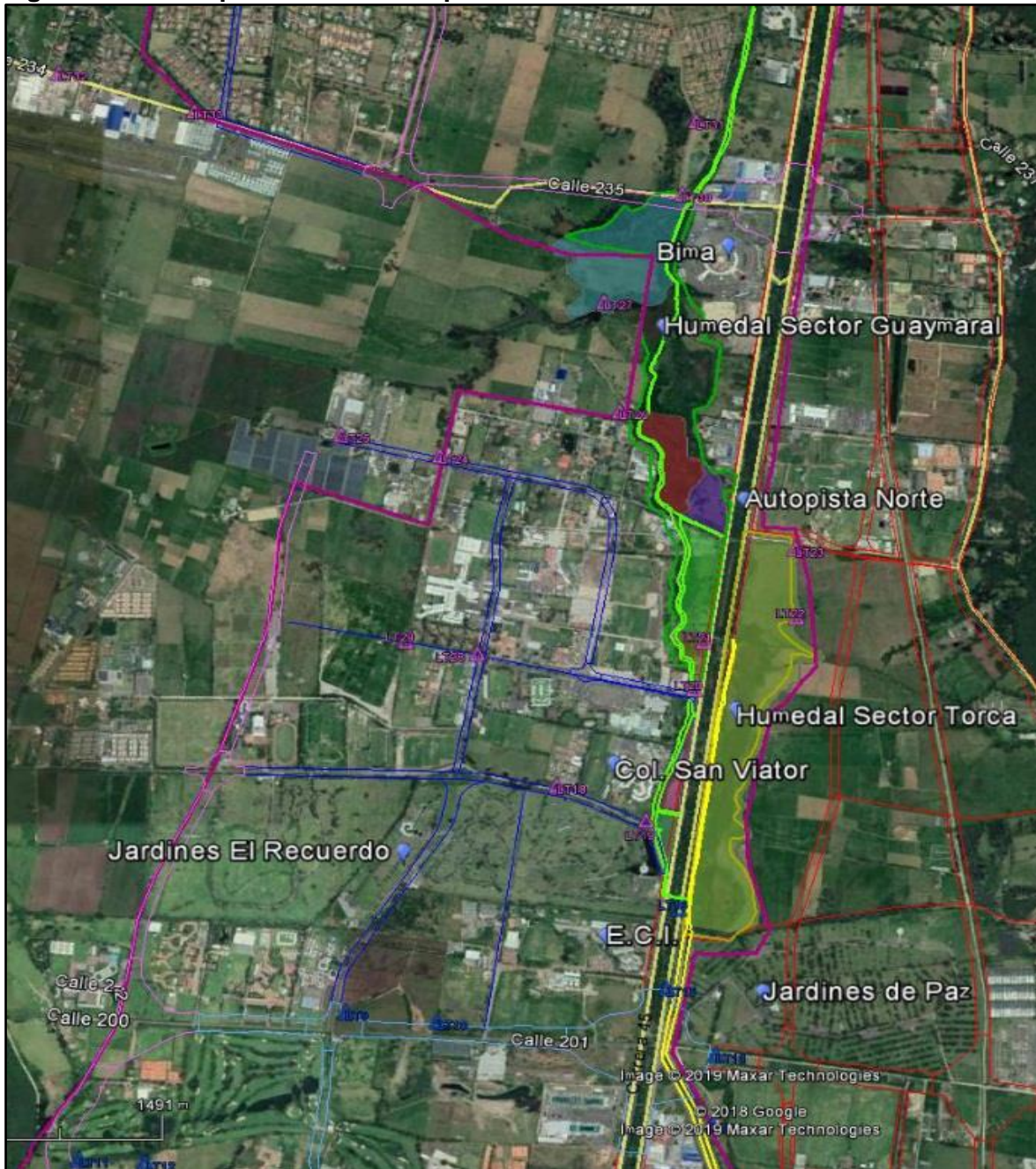


| Altura sobre nivel medio | | Convención de color |
|--------------------------|--------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Mínima | Máxima | |
| -5.0 | 1.0 |  |
| -1.0 | 0.0 |  |
| 0.0 | 1.0 |  |
| 1.0 | 2.0 |  |
| 2.0 | 3.0 |  |
| 3.0 | 4.0 |  |
| 4.0 | 5.0 |  |
| 5.0 | 6.0 |  |

Fuente: WSP, 2019.

De la Figura anterior se observa la existencia de zonas en el humedal que han sido sujetas a rellenos y que corresponden a las indicadas con los colores rojo y marrón, las cuales podrían ser objeto de intervención para recuperación de la capacidad de almacenamiento del humedal en esas áreas. Estas áreas, en la actualidad muestran que corresponden a sectores en los cuales el humedal ha sufrido alteraciones a su morfología, las cuales se han identificado como se ilustra en la Figura 249, diferenciadas por colores.

Figura 249 Áreas preseleccionadas para reconfiguración de humedales

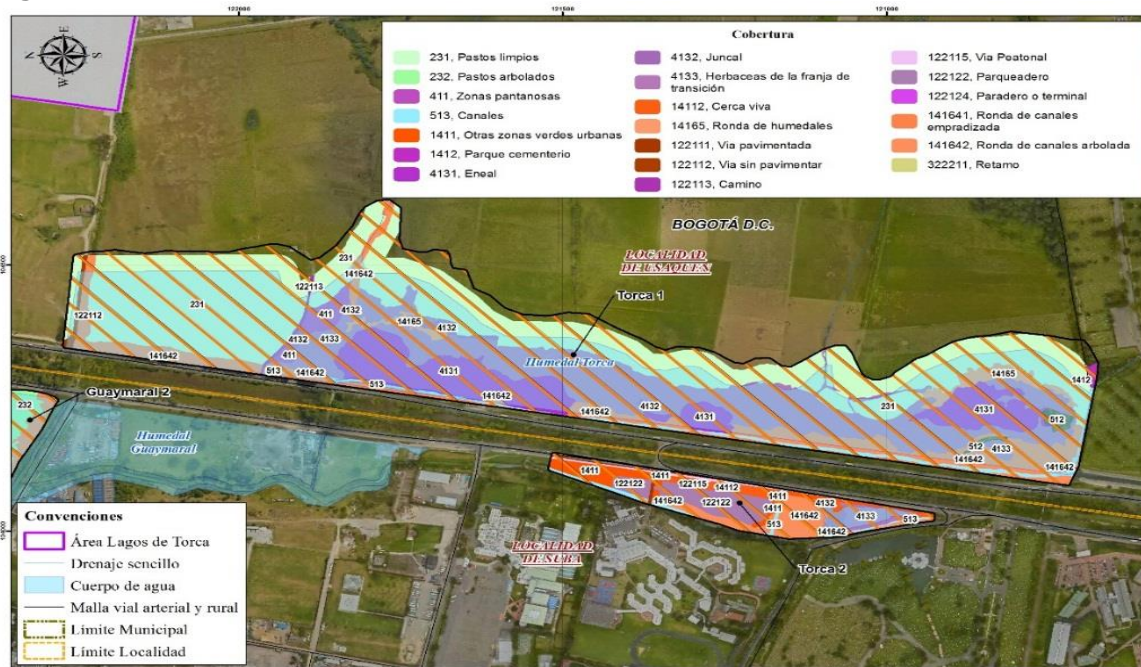


Fuente: WSP, 2019.

La definición de estas áreas se hizo teniendo en cuenta las condicionantes establecidas en el Decreto 088 de 2017, acerca de que las intervenciones se llevarán a cabo dentro de los límites de la ZMPA establecidos normativamente por la SDA y definidas en el Decreto 190 de 2004, como estructura Ecológica Principal.

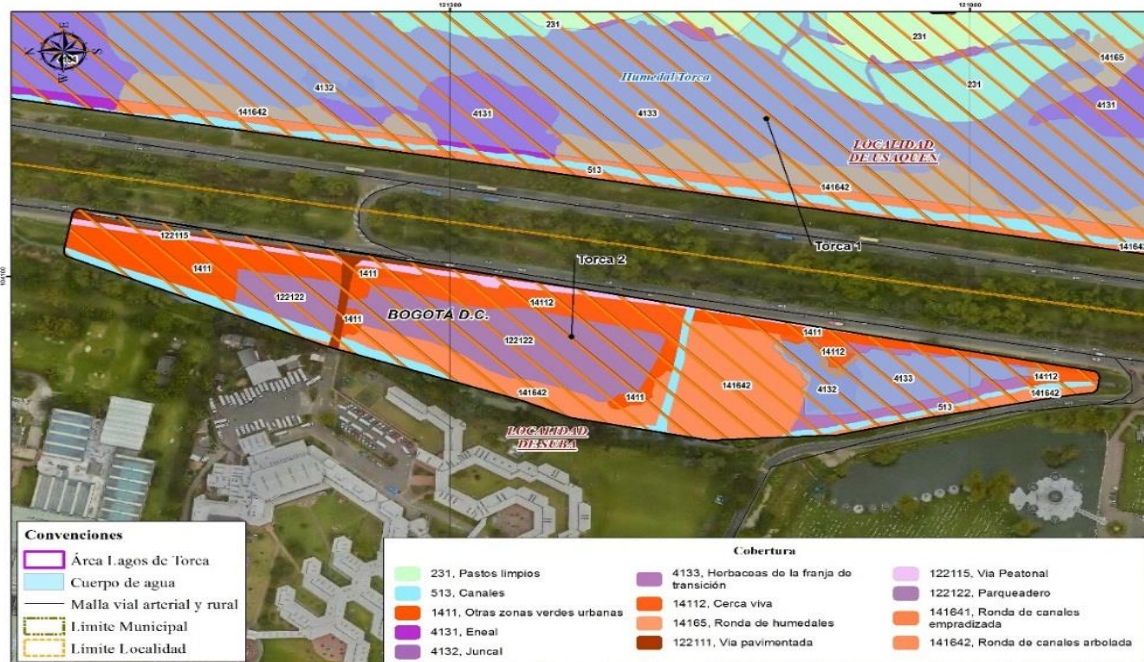
Con el objeto de establecer la posibilidad de intervención se realizaron los mapas de cobertura de estas áreas, con los resultados que se muestran en la Figura 250 a la Figura 255.

Figura 250 Coberturas de suelo en el Humedal, sector Torca



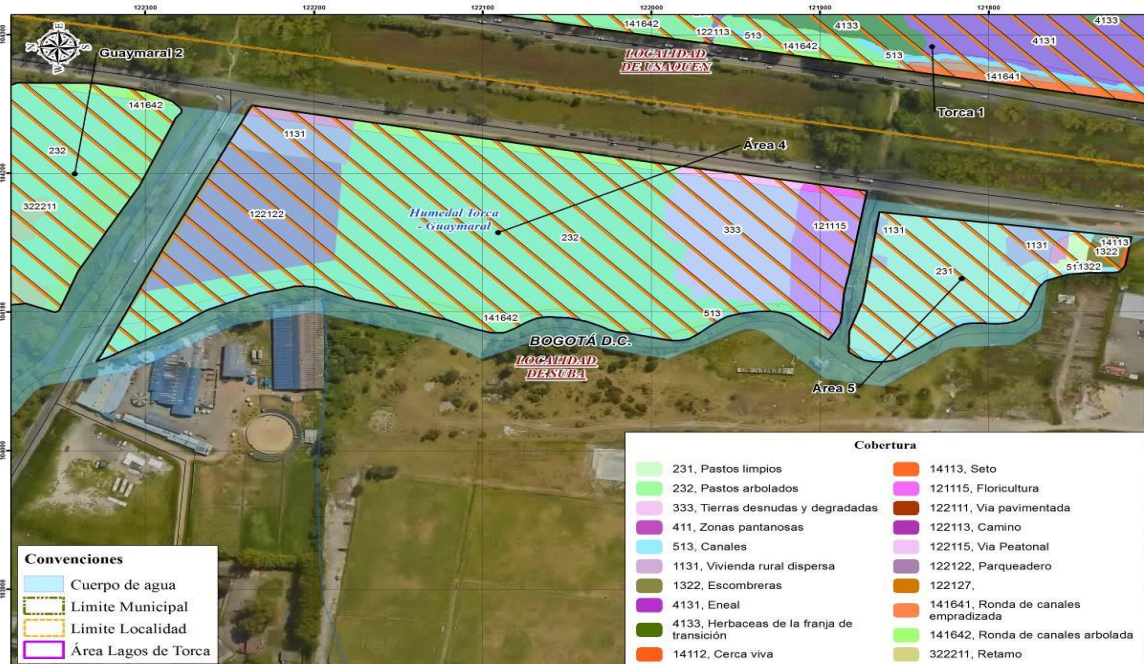
Fuente: WSP, 2019.

Figura 251 Coberturas de suelo en el Humedal, sector Guaymaral (San Viator)



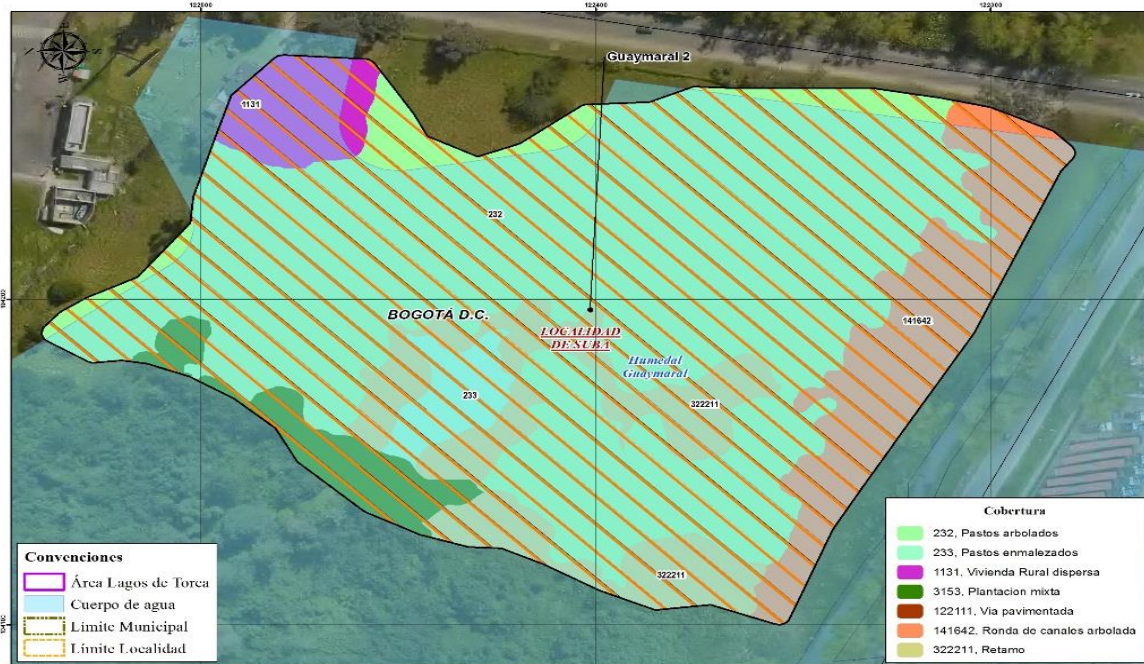
Fuente: WSP, 2019.

Figura 252 Coberturas de suelo en el Humedal, Guaymaral Sector 3



Fuente: WSP, 2019.

Figura 253 Coberturas de suelo en el Humedal, sector Guaymaral (Autopista Norte)



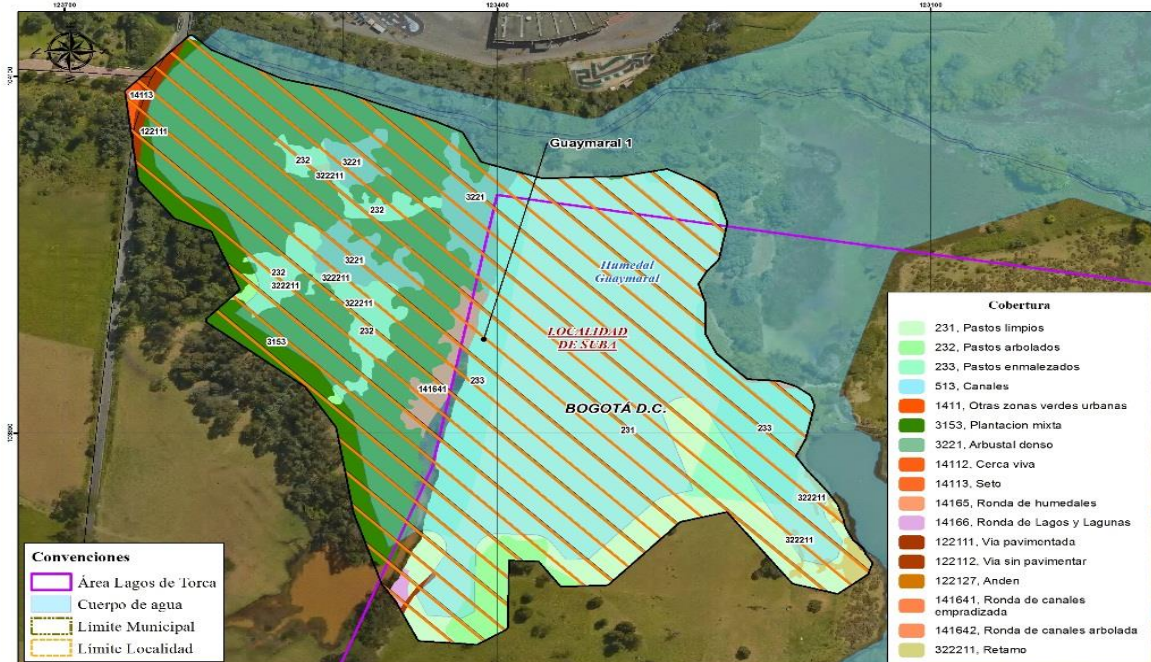
Fuente: WSP, 2019.

Figura 254 Coberturas de suelo en el Humedal, sector Torca



Fuente: WSP, 2019.

Figura 255 Coberturas de suelo en el Humedal, Guaymaral, Sector 6



Fuente: WSP, 2019.

El análisis detallado de estas áreas como zonas disponibles para la recuperación de la capacidad de almacenamiento del humedal, fueron objeto de estudios específicos dentro del aparte de Restauración ecológica que esta Consultoría propone para los cuerpos hídricos de la cuenca (Producto 5), en la cual se definieron las áreas efectivas que podrán ser objeto de intervención, considerando las restricciones de uso, cobertura y función ecológica que en la actualidad cumplen estas zonas del Humedal.

Teniendo en cuenta que es posible tener una deficiencia en la capacidad de almacenamiento del sistema Torca-Guaymaral, una de las posibilidades que se deberá analizar en las alternativas de drenaje será la de evitar la llegada a estos cuerpos lénticos, de parte del caudal de las crecientes, conduciéndola hacia el Río Bogotá de manera directa, a gravedad o mediante el empleo de sistema de bombeo en caso de requerirse.

Como se observa, las áreas contempladas se distribuyen a lo largo de toda la delimitación de la ZMPA del cuerpo del Humedal, lo que podrá significar que al final, todas estas zonas no puedan intervenir, según lo determine como posible el componente ecosistémico. Es así que, en el escenario más crítico de restauración, será necesario realizar la contención de los excesos de agua y la posible elevación de niveles de agua en el sistema, mediante elementos que garanticen el control del desborde lateral, tanto para el humedal como para el canal Guaymaral, principalmente.

La cuantificación de los volúmenes máximos aprovechables en las áreas identificadas es el que se muestra en la Tabla 44.

Tabla 44. Volúmenes de excavación total y útiles en las áreas de reconfiguración preseleccionadas

| SECTOR | VOLUMEN DE CORTE TOTAL | VOLUMEN ÚTIL TOTAL MÁXIMO |
|----------------------|------------------------|---------------------------|
| | m3 | m3 |
| Sector 1 | 521.877 | 396.296 |
| Sector 2 | 46.234 | 23.892 |
| Sector 3 | 77.916 | 43.228 |
| Sector 4 | 119.712 | 54.599 |
| Sector 5 | 79.808 | 36.400 |
| Sector 6 | 437.355 | 165.445 |
| Volumen Total | 1.282.903 | 719.859 |

Fuente: WSP, 2019.



6.3.12.5 Análisis de Puntos críticos del sistema hídrico – Condición actual



A partir de los resultados del modelamiento hidrodinámico del sistema hídrico Torca – Guaymaral, se procedió a realizar una evaluación diagnóstica de los sitios que presentan conflicto por desbordamientos de quebradas y humedales, con los resultados que se muestran en la Tabla 41.

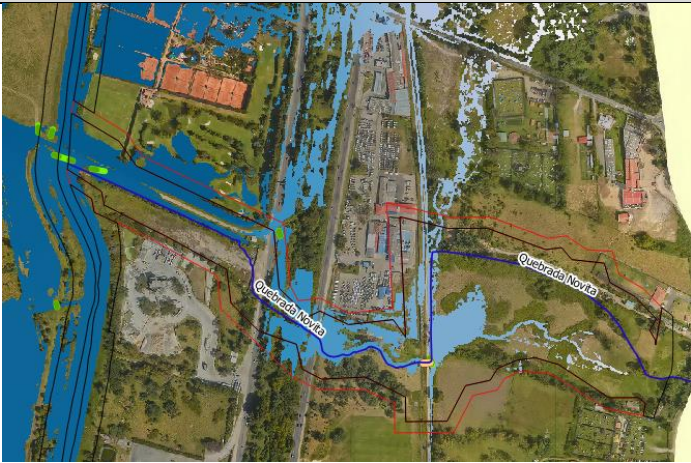
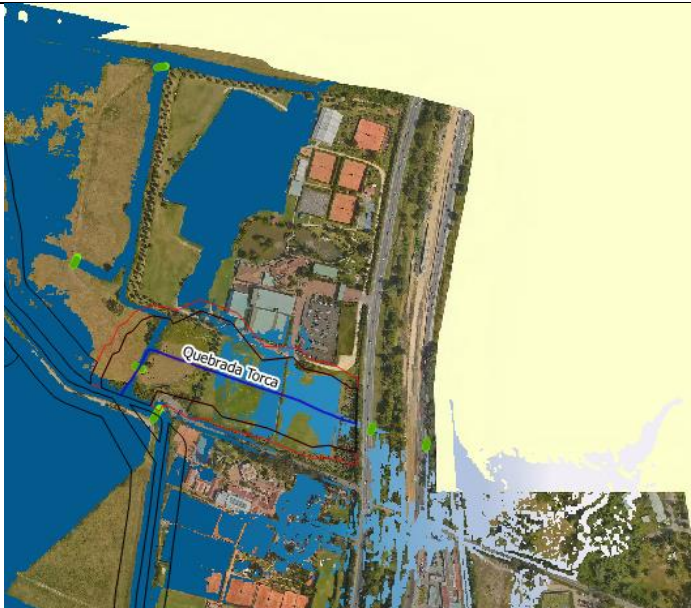
Las propuestas de obras de cruce requeridas se analizan y definen conjuntamente con las de reconfiguración de humedales y quebradas, se presentan en el Producto 7.

Tabla 45. Descripción de funcionamiento hídrico de sitios críticos en el sistema Torca- Guaymaral



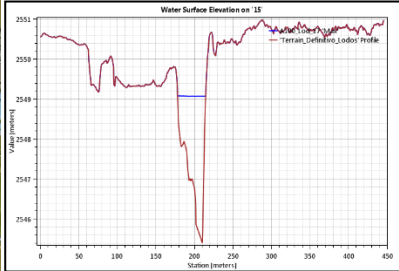
| SITIO | DESCRIPCIÓN | DETALLE | RECOMENDACIÓN PRELIMINAR |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Quebrada Tibabita | <p>Se observa que la parte alta de la cuenca de la quebrada Tibabita presenta una alteración de su red de drenaje, que tampoco sigue la delimitación de corredor hídrico definido por la SDA. Sobre el cruce de la Vía Férrea, se evidencia falta de obras de cruce apropiadas y aguas abajo de esta, falta de capacidad hidráulica. En la llegada al canal Torca la estructura de entrega no tiene suficiente capacidad lo que genera un represamiento en la margen derecha de este canal.</p> |  | <p>Reconformación del canal actual en el Tramo comprendido entre la Vía férrea y el canal Torca. Entre la Carrera Séptima y la Vía Férrea se debe verificar la posibilidad de realinderamiento. Verificar la necesidad de obras de cruce.</p> |
| Quebrada Aguas Calientes | <p>Entre la Carrera 7a y la Vía Férrea se observa que a pesar de que la lámina de inundación sigue los trazados de la red de drenaje, los canales actuales no tienen la capacidad suficiente evidenciado por los desbordamientos de las márgenes. El costado suroriental indica la necesidad de implementar un eje de drenaje que permita el desagüe de la zona que está siendo inundada actualmente, lo que incluso, representa un riesgo para la subestación eléctrica. Aguas abajo de la vía férrea se hace evidente la falta de capacidad en la sección hidráulica actual, a pesar de que esta zona conserva un buen estado de mantenimiento del cauce actual. En la entrega del humedal, igualmente se evidencia la falta de capacidad de la sección transversal y de sus obras de</p> |  | <p>Requiere la adecuación de las obras de cruce y conformación de sección para evitar desbordamientos.</p> |

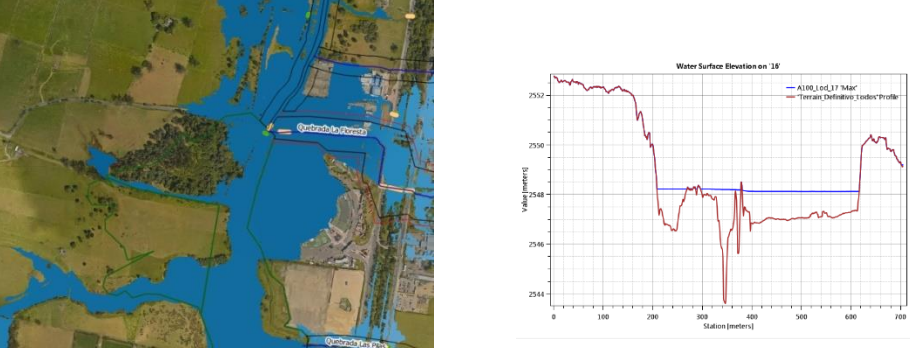
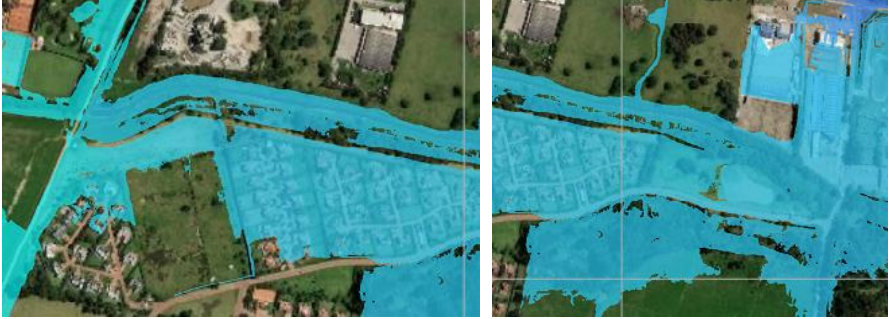

| SITIO | DESCRIPCIÓN | DETALLE | RECOMENDACIÓN PRELIMINAR |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Quebrada Patiño | <p>cruce.</p> <p>Aguas arriba de la vía férrea, se aprecia la obstrucción de los cauces naturales de la cuenca de la quebrada Patiño, debido a rellenos antrópicos y falta de obras de cruce, tal como se observa en la imagen, lo que genera la falta de continuidad del drenaje y que el flujo de agua se comporte de manera caótica.</p> <p>Aguas abajo de la vía férrea el agua fluye siguiendo la morfología del terreno, que demarca el trazado original del cauce de la quebrada, permitiendo inferir que el cauce delimitado por la SDA, se convierte en un alivio de los desbordes del cauce original, mas no constituiría el cauce principal.</p> <p>Los caudales aportados de la quebrada El Perro, son originados probablemente por el trasvase de la quebrada Patiño.</p> |  | <p>Reconformación del canal actual en el Tramo comprendido entre la Vpía Férrea y el canal Torca. Entre la Carrera Séptima y la Vía Férrea se debe verificar la posibilidad de realinderamiento. Se requiere la implementación de obras de cruce bajo la vía férrea, para evitar el trasvase de la cuenca.</p> |
| Quebrada San Juan | <p>Se aprecia la capacidad insuficiente de las obras de cruce de la vía férrea, generando represamientos importantes y trasvases aguas arriba.</p> <p>Las zonas inundables siguen los trazados definidos por la SDA.</p> |  | <p>Reconformación del canal actual en el brazo izquierdo aguas debajo de la vía férrea. Entre la Carrera Séptima y la vía férrea se requiere de obras de confinamiento de la zona inundable.</p> |

| SITIO | DESCRIPCIÓN | DETALLE | RECOMENDACIÓN PRELIMINAR |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Quebrada Las Pilas | <p>La zona inundable se presenta por la falta de obras y canalización al interior de los predios que permitan el adecuado drenaje del área.</p> <p>Aguas arriba de la vía férrea, la quebrada Pilas se ve contralada por el pondaje construido en la hacienda La Gloria, lo que impide el drenaje natural aguas abajo de la vía férrea.</p> |  | <p>Se requiere la implementación de obras de cruce bajo la vía férrea, para dar continuidad al drenaje de la cuenca alta. Se requiere de la configuración de un nuevo canal.</p> <p>En el tramo final de la quebrada entre la Autopista Norte y el humedal Guaymaral se evidencia la necesidad de obras hidráulicas que permitan la continuidad del flujo.</p> |
| Quebrada La Floresta | <p>Se aprecia la necesidad de obras de cruce en la vía férrea.</p> <p>Aguas abajo de la vía férrea se presenta un déficit de la red de drenaje que permita el adecuado alivio de las crecientes.</p> <p>Aguas debajo de la Autopista Norte el canal es insuficiente, así como la obra de entrega al canal Guaymaral.</p> |  | <p>La totalidad del cauce principal de la quebrada requiere de la conformación de un canal que contenga la creciente máxima. De igual manera se requieren obra de cruce adecuadas sobre la Vía férrea, así como la adecuación de las obras existentes para el cruce de la Autopista Norte.</p> |

| SITIO | DESCRIPCIÓN | DETALLE | RECOMENDACIÓN PRELIMINAR |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Quebrada Novita | <p>El drenaje principal definido por la SDA corresponde a un desvío del cauce mas no al cauce original demarcado por la geomorfología del terreno.</p> <p>No se aprecia un cauce definido entre la vía férrea y la autopista, a pesar que hay obras que permiten la continuidad del drenaje entre la Autopista Norte y la desembocadura en el canal Guaymaral.</p> |  | <p>Requiere de la definición del canal de flujo principal, dado que en la actualidad, este no sigue el eje establecido por el alindamiento de la SDA. Se requiere de adecuación de las obras de captación y entrega en la Autopista Norte, así como un canal entre esta vía y la desembocadura en el canal Guaymaral.</p> |
| Quebrada Torca | <p>No se presenta un cauce definido aguas arriba de la vía férrea y al norte de la calle 245. La construcción de esta vía interrumpe el drenaje natural aguas abajo que originalmente la morfología muestra que su trazado fue en sentido nororiente - suroccidente, conformándose, en el pasado, como un afluente a la quebrada Novita.</p> <p>Aguas debajo de la Autopista Norte no se aprecia un cauce conformado, debido a que fue totalmente intervenido con una canalización cerrada.</p> |  | <p>Requiere de adecuaciones de las obras de cruce bajo la vía férrea y la Autopista Norte. Requiere restitución del canal entre la Autopista Norte y la desembocadura en el canal Guaymaral.</p> |

| SITIO | DESCRIPCIÓN | DETALLE | | RECOMENDACIÓN PRELIMINAR |
|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Canal Torca – aguas arriba humedal Torca</p> | <p>La capacidad hidráulica del canal Torca se encuentra en los límites de la capacidad de esta estructura hidráulica, tanto para la condición actual como la futura.</p> | | | <p>Se requiere evaluar la posibilidad de llevar a cabo un realce de las márgenes el canal, revestimiento de la zona alta el canal en tierra o el control de los flujos de aporte de caudal en este tramo del canal.</p> |
| <p>Canal Guaymaral – parte alta</p> | <p>El canal Guaymaral en entre el tramo comprendido entre la avenida Arrayanes hasta el sitio de confluencia con el canal Torca presenta una escasa capacidad hidráulica y un trazado con alta tortuosidad que generan amplias zonas inundables hacia la parte derecha del canal hasta la autopista Norte.</p> <p>La falta de confinamiento por el costado derecho implica desbordamiento hacia esta margen.</p> | | | <p>Requiere de la adecuación urgente del canal en el tramo comprendido entre el sector del cementerio Jardines del Recuerdo (Calle 209) y la Calle 224, donde inicial el Humedal.</p> |

| SITIO | DESCRIPCIÓN | DETALLE | RECOMENDACIÓN PRELIMINAR |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Zona baja humedal Torca | La lamina de inundación en algunos sectores de la zona baja del humedal Torca supera la delimitación de la ZMPA del humedal, lo requerirá confinamiento futuro o la ampliación de la capacidad del humedal. |  | <p>Existen áreas dentro de la ZMPA que pueden aprovecharse como zonas de inundación controlada. Verificar la posibilidad de incrementar la capacidad del vaso actual mediante obras de rehabilitación, conjuntamente al retiro de cobertura vegetal invasora y/o foránea.</p> <p>Promover acciones de contención de sedimentos en la zona de producción de estos (Cuenca Alta).</p> |
| Canal Guaymaral – desde la confluencia con el canal Torca hacia el humedal Guaymaral | Rellenos antrópicos han ocasionado que la inundación ocurra hacia la margen occidental del Canal. Estas áreas ocupadas, inhabilitan zonas dentro de la ZMPA del humedal que pueden llegar a ser restituidas para garantizar confinamiento de la inundación. |   | <p>Restitución del cuerpo del Humedal Guaymaral y por lo tanto de su capacidad de amortiguación de crecientes en esta zona. Verificar la posibilidad de incrementar la capacidad del vaso actual mediante obras de rehabilitación, conjuntamente al retiro de cobertura vegetal invasora y/o foránea.</p> <p>Verificar las obras de cruce existentes y la necesidad de su reemplazo.</p> <p>Promover acciones de contención de sedimentos en la zona de producción de estos (Cuenca Alta).</p> |

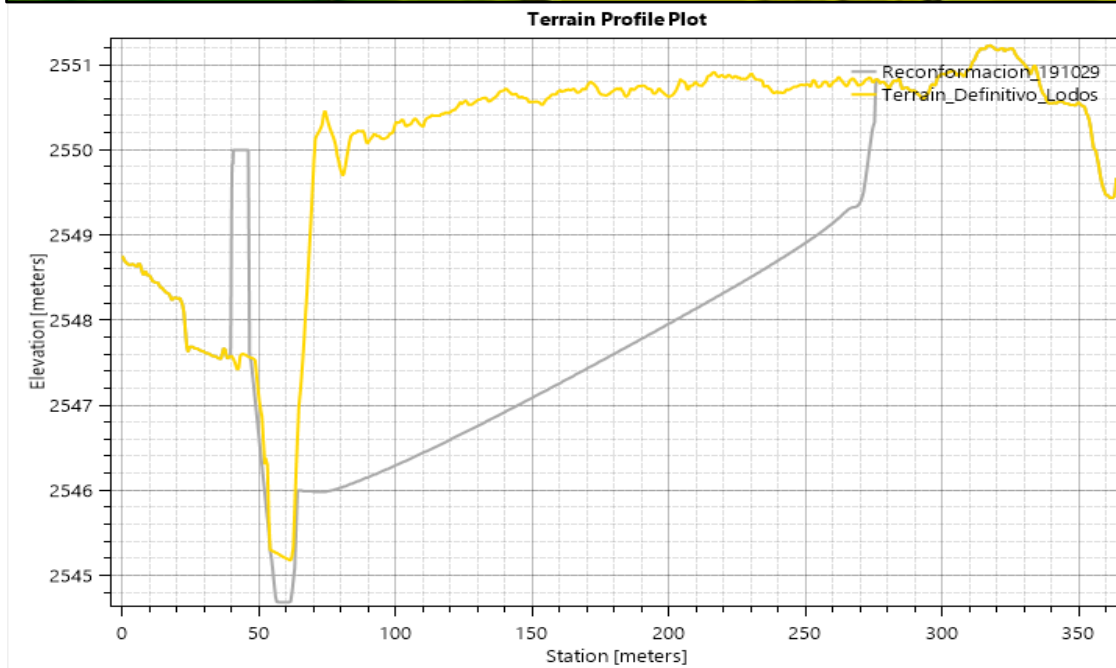
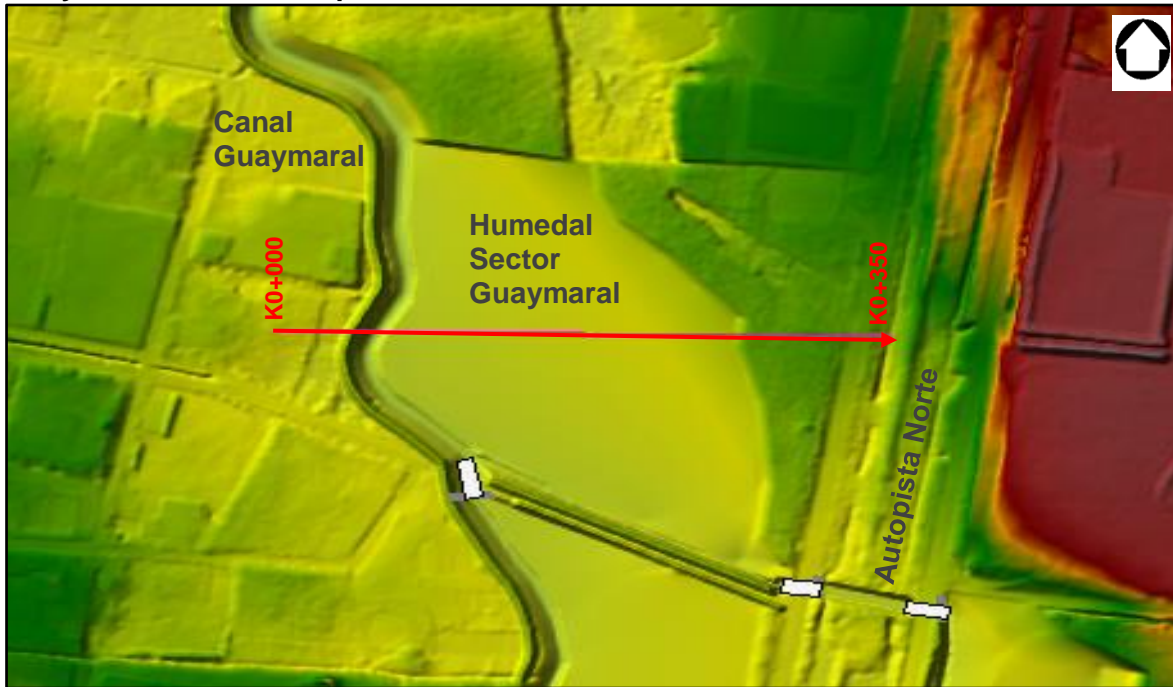
| SITIO | DESCRIPCIÓN | DETALLE | RECOMENDACIÓN PRELIMINAR |
|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Canal Guaymaral - Bima | Rellenos antrópicos fuerzan la lámina de inundación hacia el occidente, inhabilitando áreas dentro de la ZMPA del humedal que pueden llegar a ser restituidas para garantizar confinamiento de la inundación. |  | Restitución del cuerpo del Humedal Guaymaral y por lo tanto de su capacidad de amortiguación de crecientes en esta zona. Verificar la posibilidad de incrementar la capacidad del vaso actual mediante obras de rehabilitación, conjuntamente al retiro de cobertura vegetal invasora y/o foránea. |
| Canal Guaymaral – Sector San Simón | Se observa confinamiento adecuado del canal Guaymaral, aunque algunos sectores como San Simón, se identifican desbordamientos hacia la margen izquierda, unos debidos a la irregularidad de la cota máxima en el Jarillón de confinamiento y otros por descargas pluviales por debajo del nivel máximo de inundación. |  | Asegurar el confinamiento de la creciente en el Canal Guaymaral, mediante la adecuación del canal principal y/o la reconformación del jarillón existente que ha sido afectado por la falta de mantenimiento de este. Verificar obra de cruce existente. |
| Canal Guaymaral – Desemboca dura río Bogotá | El tramo del canal Guaymaral comprendido entre la entrada club Guaymaral hasta la desembocadura en el río Bogotá, presenta control hidráulico definido por la cota máxima de inundación del río Bogotá y los desbordamientos del canal están relacionados con este efecto. |  | Se requiere de la adecuación el canal y sus jarillones marginales, para lograr un confinamiento de los efectos de remanso del río Bogotá, durante los eventos de creciente de este último. |

Fuente: WSP, 2019.

6.3.12.5.1 Propuesta preliminar de adecuación de humedales

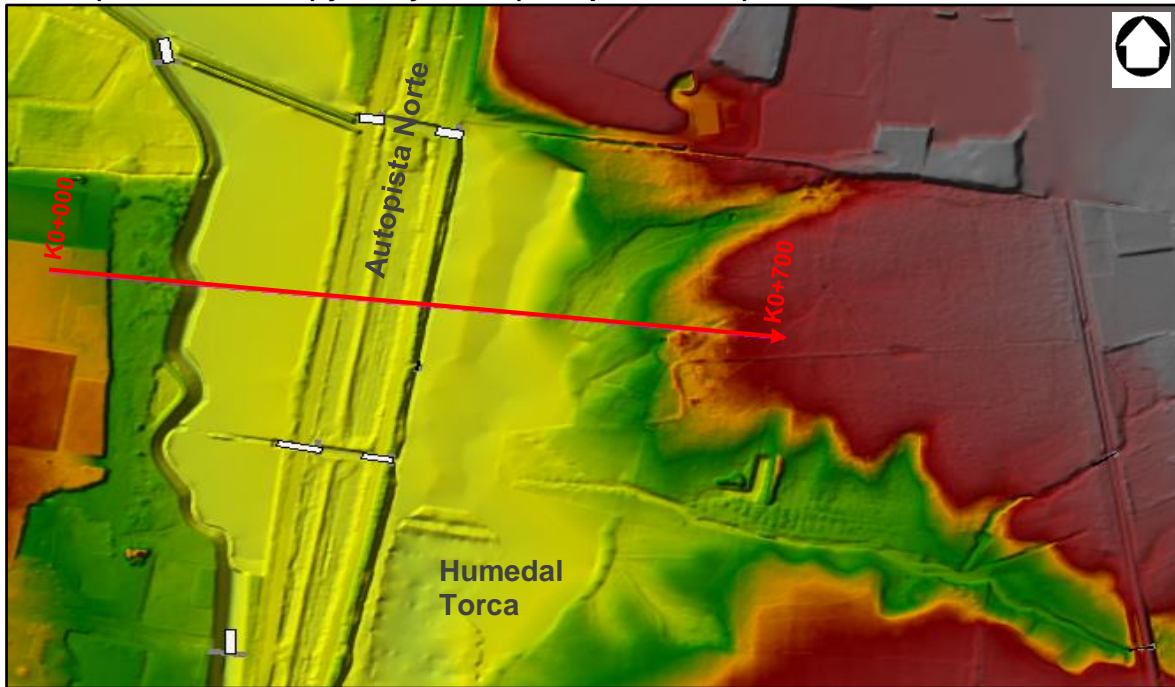
El Humedal Torca - Guaymaral, adicionalmente a lo descrito en la sección anterior, afronta una serie de problemas relacionados con: la fragmentación, por lo cual se disminuyó el tamaño del cuerpo de agua y su profundidad. Adicionalmente, gran parte del fragmento de Guaymaral fue rellenado o desecado por los procesos urbanísticos que se adelantaron en terrenos aledaños a la Autopista Norte; la sedimentación proveniente de la amplia cuenca de drenaje y las áreas abiertas adyacentes a los humedales con poca cobertura vegetal, hacen que los humedales estén en un proceso activo de colmatación, que continúa reduciendo su capacidad de almacenamiento de agua y de control de crecientes, aunado esto a la inapropiada disposición de residuos sólidos en sus zonas de ronda. Las adecuaciones que se proponen para la restauración del Humedal, está encaminada, desde el punto de vista de su función hidrológica, en la recuperación de la capacidad de amortiguamiento del Humedal, para los cual se presentan a continuación secciones de reconfiguración geomorfológica, Figura 256, Figura 257 y la Figura 258 para los dos sectores (Torca y Guaymaral).

Figura 256 Sección preliminar de adecuación geomorfológica del Humedal, sector Guaymaral, Tramo Autopista Norte.

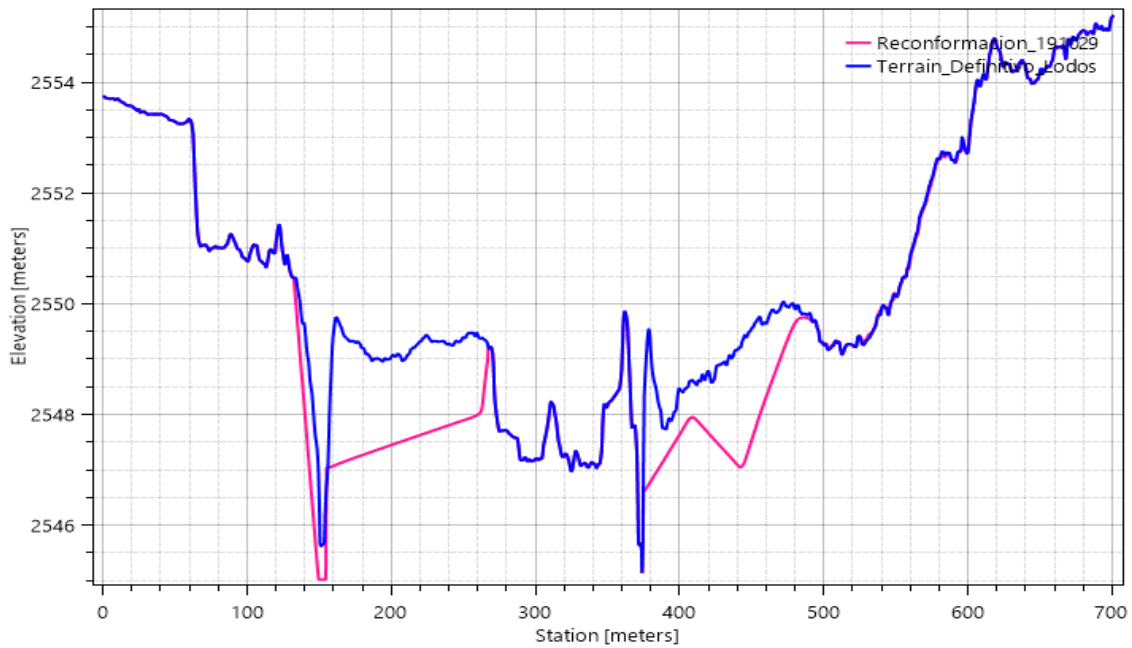


Fuente: WSP, 2019.

Figura 257 Sección preliminar de adecuación geomorfológica del Humedal, sectores Torca (cabecera norte) y Guaymaral (Autopista Norte)

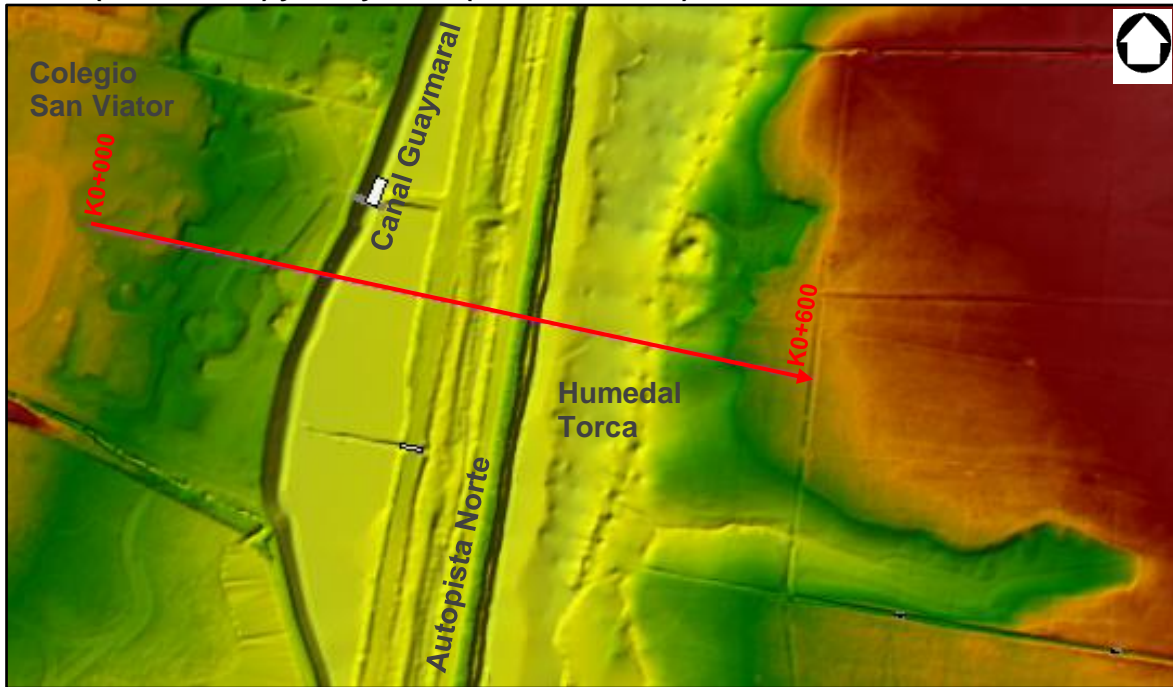


Terrain Profile Plot

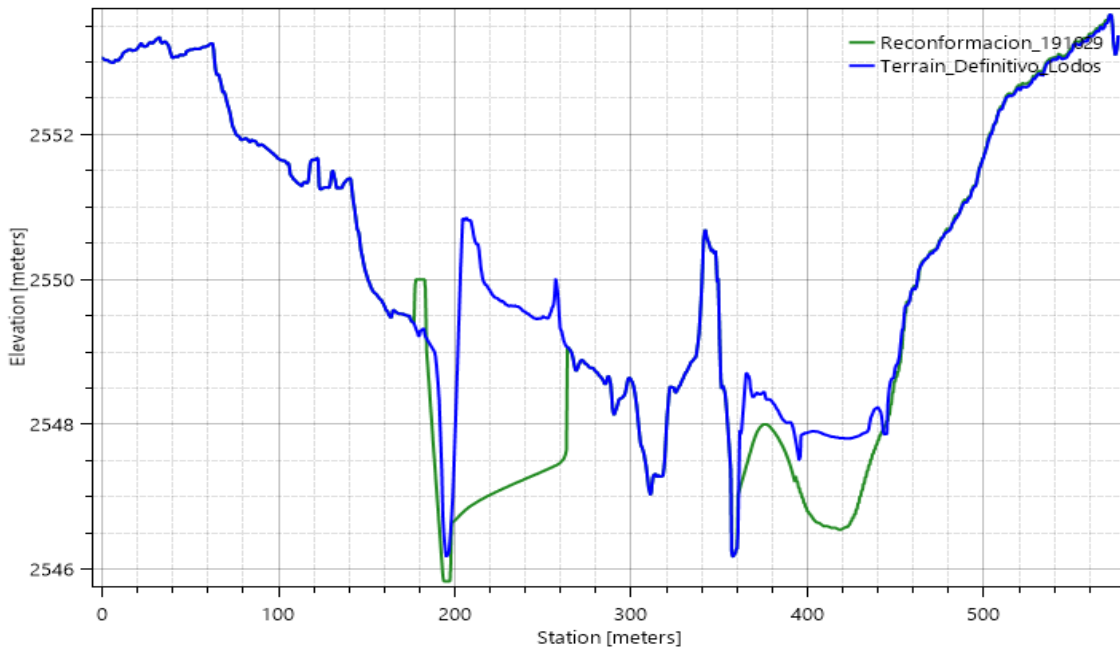


Fuente: WSP, 2019.

Figura 258 Sección preliminar de adecuación geomorfológica del Humedal, sectores Torca (zona media) y Guaymaral (Col. San Viator)



Terrain Profile Plot



Fuente: WSP, 2019.

En lo que respecta al drenaje para las zonas inmediatas en la parte posterior a la zona de confinamiento, corresponde a áreas de protección del cuerpo hídrico, las cuales forman parte del Parque Metropolitano Distrital Guaymaral, cuyo diseño debe promover el manejo de la escorrentía directa mediante SUDS o mediante canalizaciones hacia sectores más bajos donde se permita la descarga libre al canal Guaymaral o al Humedal.

En el (Anexo 3 – Anexo Cartográfico), numeral 3.6 “Propuesta Adecuación Hidrogeomorfológica” se presentan las propuestas de adecuación hidrogeomorfológica para el humedal, en el sector Torca y Guaymaral, a partir del detalle mostrado en las figuras anteriores del modelamiento hidráulico. La propuesta de manejo incorpora el manejo ecosistémico de cada franja de protección de la ZMPA y la zona de transición paisajística.

6.3.12.5.2 Propuesta preliminar de adecuación de quebradas (Alinderamiento)

En lo que respecta a las quebradas la delimitación o el acotamiento de las rondas hídricas deberá seguir los procedimientos establecidos en el Decreto 2245 de 2017, donde se establece que esta demarcación, no solamente tiene en cuenta el criterio hidrológico, si no que el criterio se orientará basándose en los atributos de funcionalidad de la corriente.

Los criterios parte de una consideración inicial de tipo geomorfológico en la cual se hace relevante la estructura del sistema fluvial, referidas a las dimensiones y forma del cauce, la forma y vegetación de las orillas y las riberas, el tipo de material en cauce y riberas, la tipología de flora y fauna acuática.

Entre los elementos clave del funcionamiento del sistema fluvial se tiene el régimen natural de flujo, el de sedimentos, la estabilidad de las orillas y los procesos de arrastre de biota y de regeneración de la vegetación riparia, la dinámica, estructura y composición del ecosistema acuático, y en particular de las comunidades de peces que dependen de los equilibrios en las interacciones entre el cauce y la ribera. La vegetación de ribera tiene una clara relación con la dinámica geomorfológica, en la medida que las características hidromorfológicas (e.g. geoformas y profundidades de la inundación) condicionan las dinámicas sucesionales vegetales y a su vez estas estructuras vegetales tienen impactos mecánicos en las propiedades del flujo y la dinámica de sedimentos (MADS, 2018⁶).

Dentro de los documentos que hacen parte del Producto 3 y Producto 5, se llevó a cabo el detalle de los estudios geomorfológicos y de dinámica fluvial multitemporal donde se lleva a cabo la identificación de la variación del ancho del cuerpo de agua para incluir toda la zona de dinámica natural del flujo de agua y sedimentos a lo largo del cauce de la quebrada. En dicho documento, de igual manera se hará un análisis específico de crecientes transitadas para el cauce de restauración propuesto, con base en el criterio del rasgo denominado "ancho a banca llena" que sería el espacio del cauce permanente y las zonas que se definirán como las áreas pelágicas o de eventual inundación confinada en el ancho de sección establecida en la actualidad por la SDA.

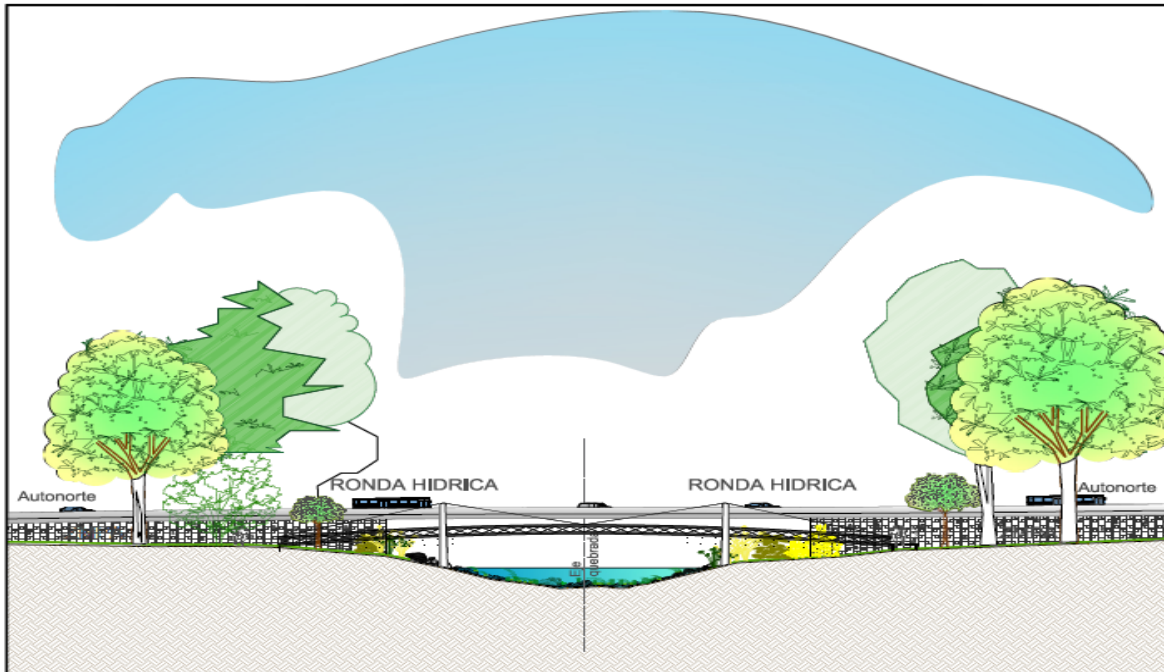
⁶ Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible MDS. Guía técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia, 2018.

En lo que respecta al análisis del componente ecosistémico, se analiza la funcionalidad de los corredores biológicos, en función de la altura de la vegetación existente y su relación con el cauce principal y las zonas de ocupación hídrica temporal. La medición de la franja que representa el componente ecosistémico se hará desde el cauce principal de la corriente y estará relacionada con la definición de los servicios ambientales que ofrecerá hoy y en el futuro, para las comunidades que se asentarán en esta zona de desarrollo de la Ciudad; o sean determinantes ambientales declarados, como es el caso de la Estructura Ecológica Principal establecida por el Decreto 190 de 2004, a la cual pertenecen todas las quebradas del presente estudio.

En la Figura 259 y la Figura 260 se presenta en planta como en perfil las áreas de reconformación hidrogeomorfológica y ecosistémica propuesta para las quebradas localizadas en la cuenca del sistema hídrico Torca – Guaymaral.

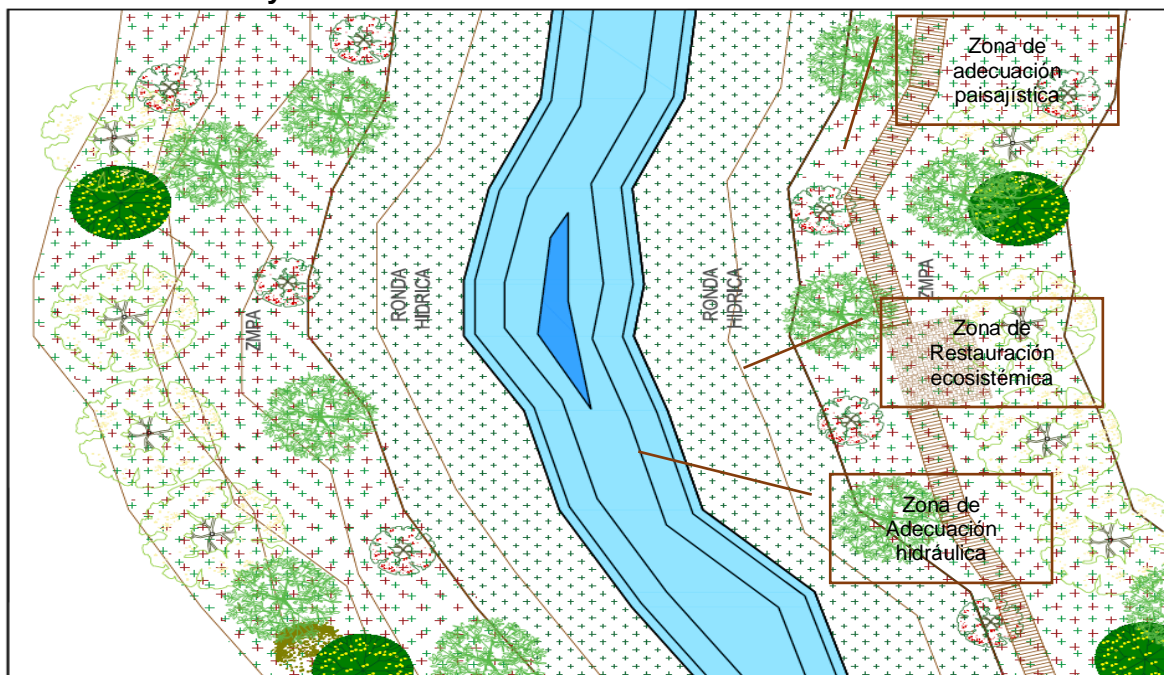
Así mismo en el (Anexo 3 – Anexo Cartográfico), numeral 3.6 “Propuesta Adecuación Hidrogeomorfológica” se presentan las propuestas de adecuación hidrogeomorfológica para las ZMPAS y Corredores de Ronda para las 9 quebradas que conforman esta zona de la cuenca de análisis, a partir del detalle mostrado en la Figura 260. En esta propuesta se incorpora el manejo ecosistémico de cada franja de protección y la zona de transición paisajística, al borde de cada corredor o ZMPA.

Figura 259 Sección típica de restauración hidráulica, geomorfológica y ecosistémica para las quebradas del sistema hídrico Torca – Guaymaral.



Fuente: WSP, 2019.

Figura 260 Planta general de restauración propuesta para las quebradas del sistema hídrico Torca - Guaymaral.

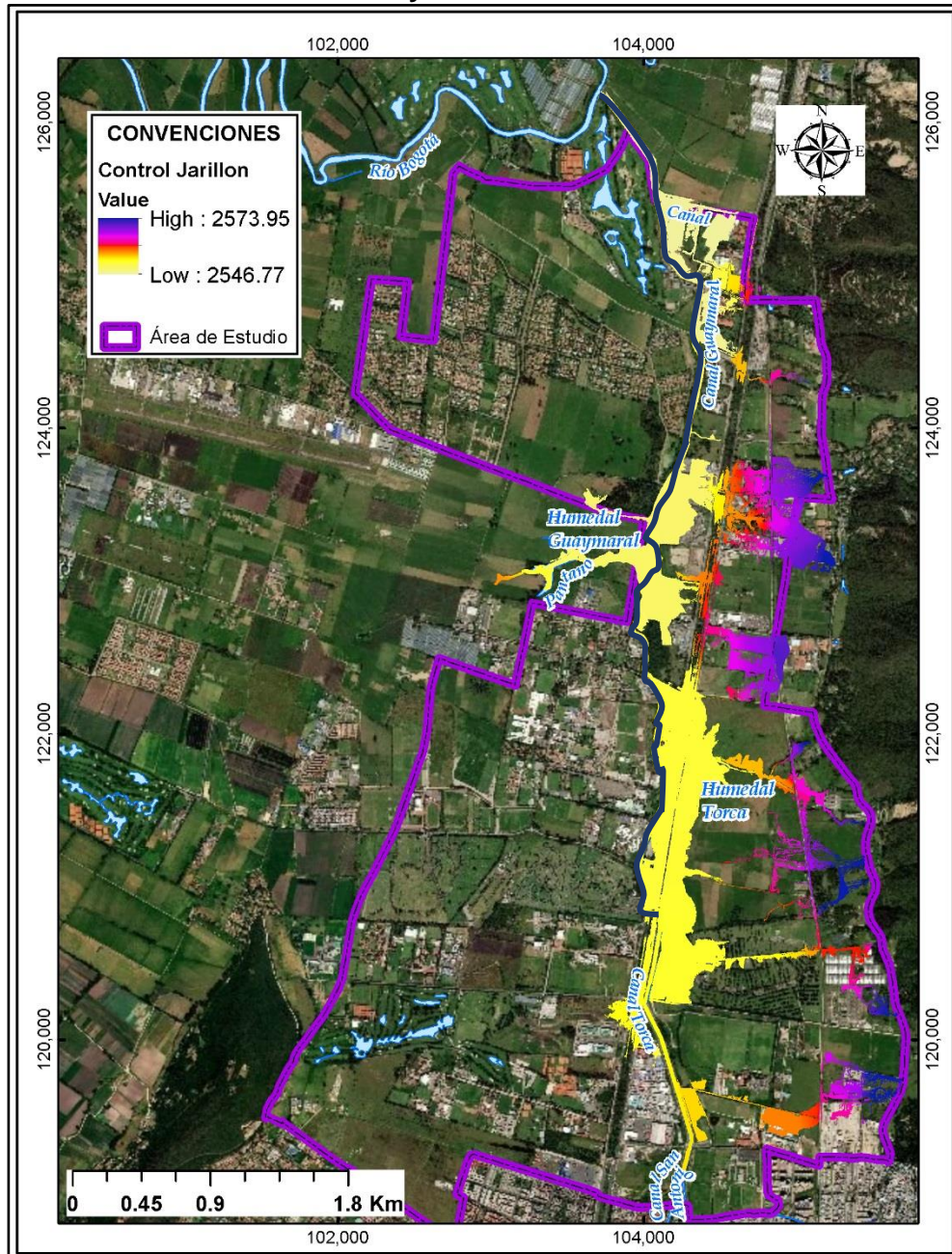


Fuente: WSP, 2019.

6.3.12.6 Escenario de confinamiento de la margen izquierda del canal Guaymaral

Para este escenario se planteó la conformación de un Jarillón a lo largo de la margen izquierda del canal Guaymaral, con el fin de evitar cualquier tipo de inundación en el costado occidental. En la Figura 261 se presenta el resultado de la cota de inundación, teniendo en cuenta esta consideración.

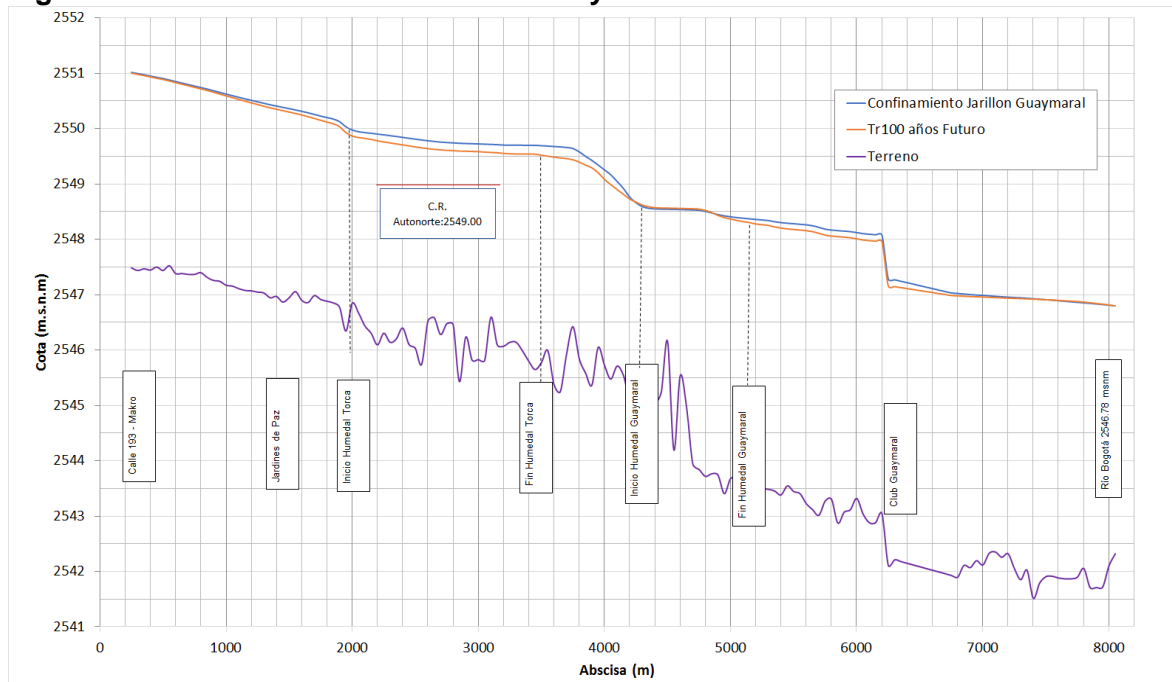
Figura 261 Confinamiento canal Guaymaral



Fuente: WSP, 2019.

El objetivo de este análisis es el de observar el comportamiento de los niveles de inundación del sistema, para un escenario hipotético de confinamiento total del canal Guaymaral, lo cual permitirá determinar cuál es la variación de los niveles de control, comparados con los que genera el sistema desbordado. En el perfil hidráulico que se ilustra en la Figura 262 representa la comparación de las condiciones descritas.

Figura 262 Perfil hidráulico del Canal Guaymaral – Escenario Tr100



Fuente: WSP, 2019.

De la Figura 262 se evidencia que, entre los dos escenarios, la variación máxima de los niveles de inundación en el sistema solo alcanza los 30 cm en algunos tramos del humedal en el sector de Torca y de 15 cm en el sector del humedal Guaymaral.

Bajo el escenario de la condición actual en el comportamiento de la lámina de inundación y la simulación del confinamiento en el canal Guaymaral, surge la necesidad de proponer la adecuación general de este canal en el tramo comprendido entre su origen a la altura de Jardines del Recuerdo hasta la desembocadura en el río Bogotá.

En el tramo inicial entre el origen y la salida del Humedal Guaymaral, en el sector de Bima, este canal tiene una conformación de trazado bastante irregular y de sinuosidad muy elevada que, aunada a la baja velocidad, han contribuido a la sedimentación y por lo tanto la disminución de la sección hidráulica.

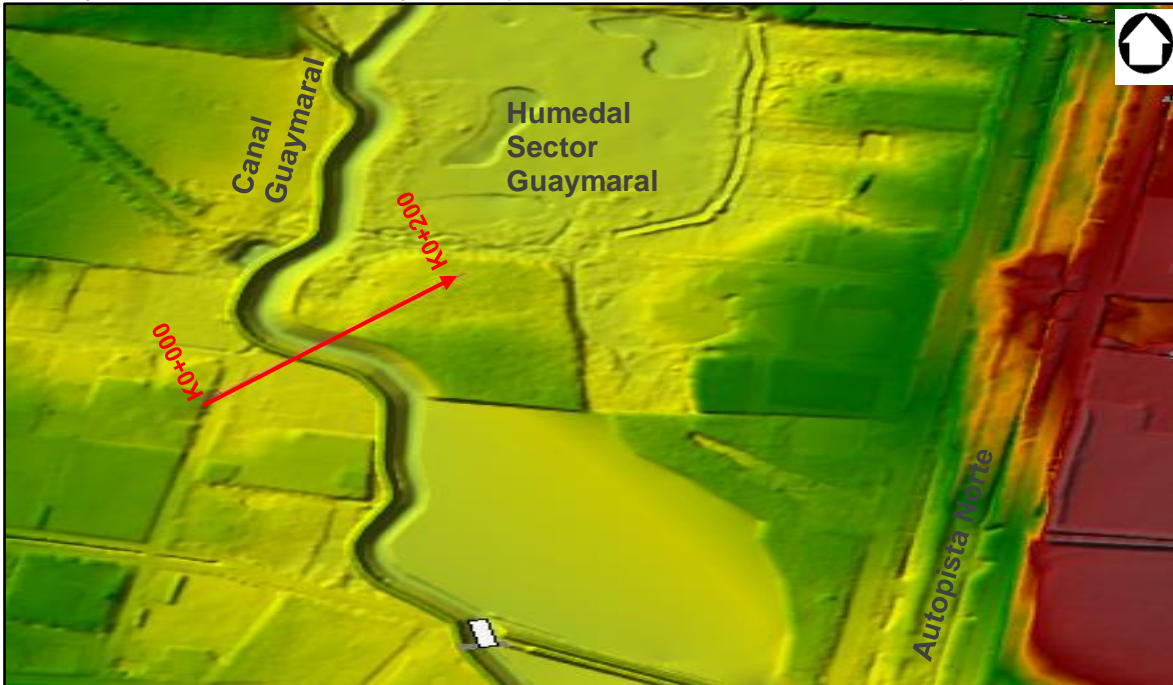
En la Figura 263 y la Figura 264 se presenta la sección transversal propuesta preliminarmente para esta adecuación geomorfológica e hidráulica del canal Guaymaral en el tramo comprendido entre su origen hasta la salida del Humedal, a la altura del Centro Comercial Bima. En la Figura 265 y la Figura 266 se muestra la propuesta de adecuación en el tramo comprendido entre el C.C. Bima y el Río Bogotá.

Figura 263 Localización de la zona de adecuación del canal y humedal, sector Guaymaral (Tramo Cementerios – C.C. Bima).

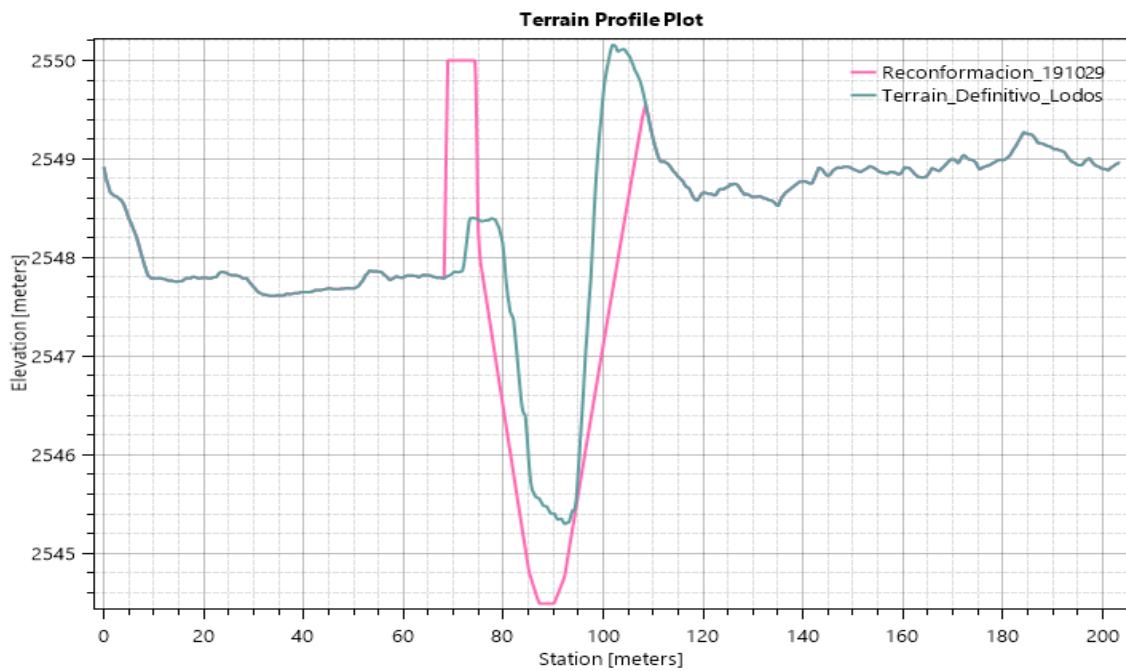


Fuente: WSP, 2019.

Figura 264 Detalle preliminar de la sección de modelamiento para adecuación del canal y humedal, sector Guaymaral (Tramo Cementerios – C.C. Bima).



Fuente: WSP, 2019.



Fuente: WSP, 2019.

Figura 265 Localización de la zona de adecuación del canal y humedal, sector Guaymaral (Tramo C.C. Bima – Río Bogotá).

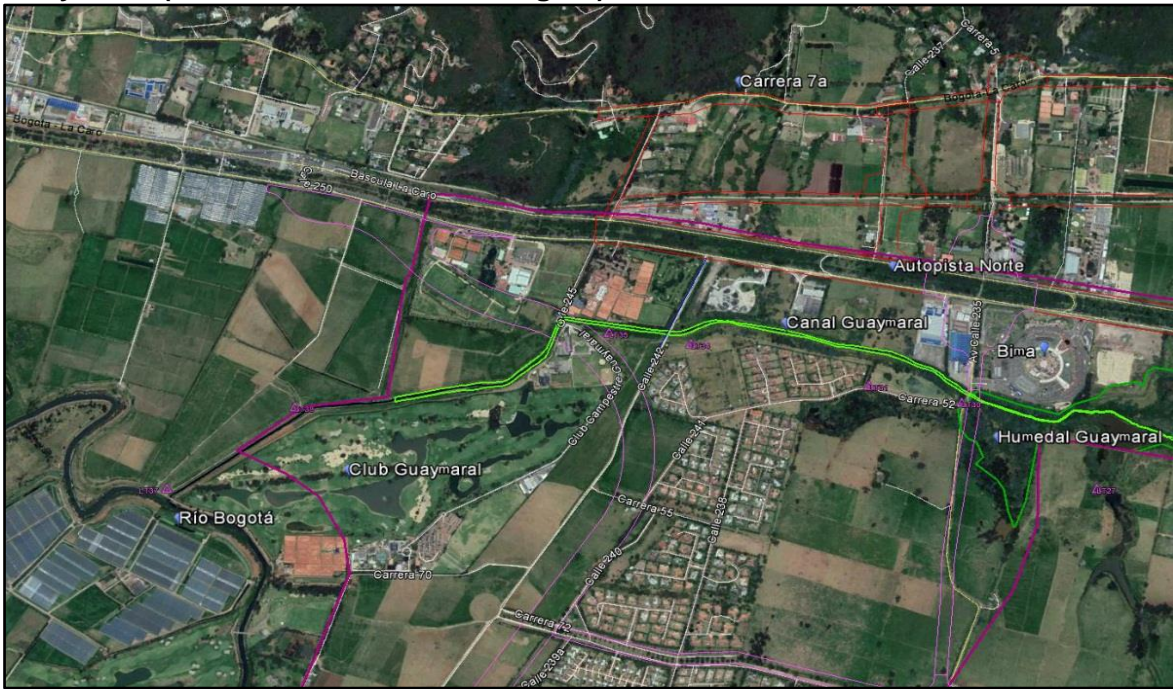
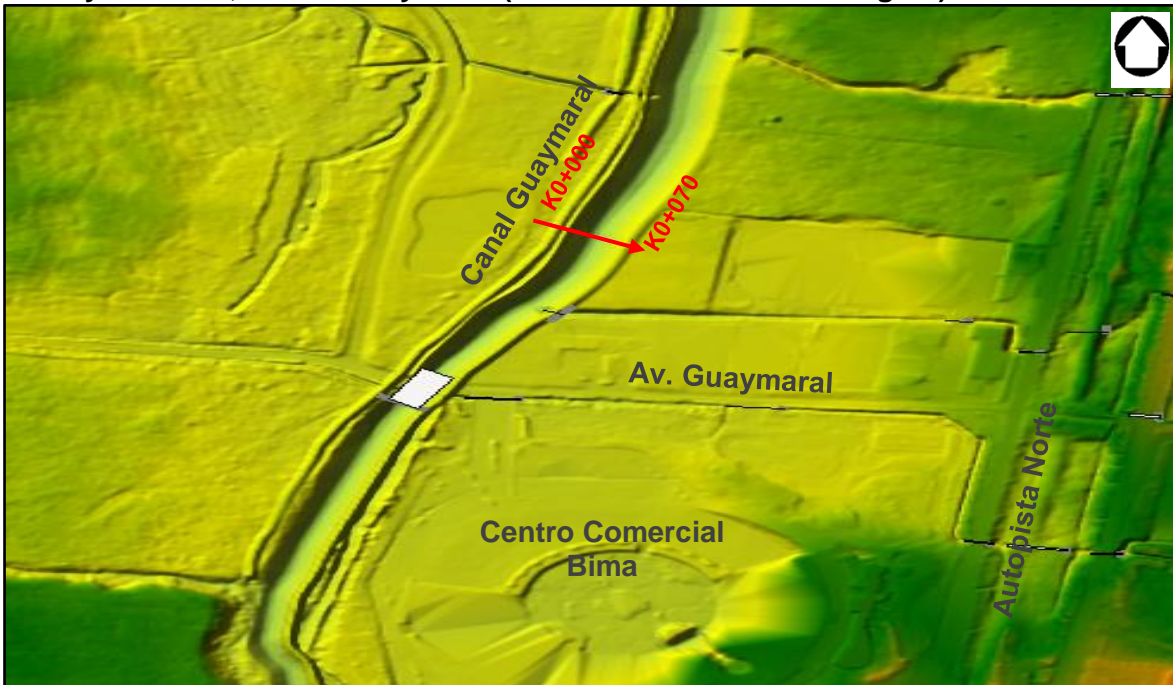
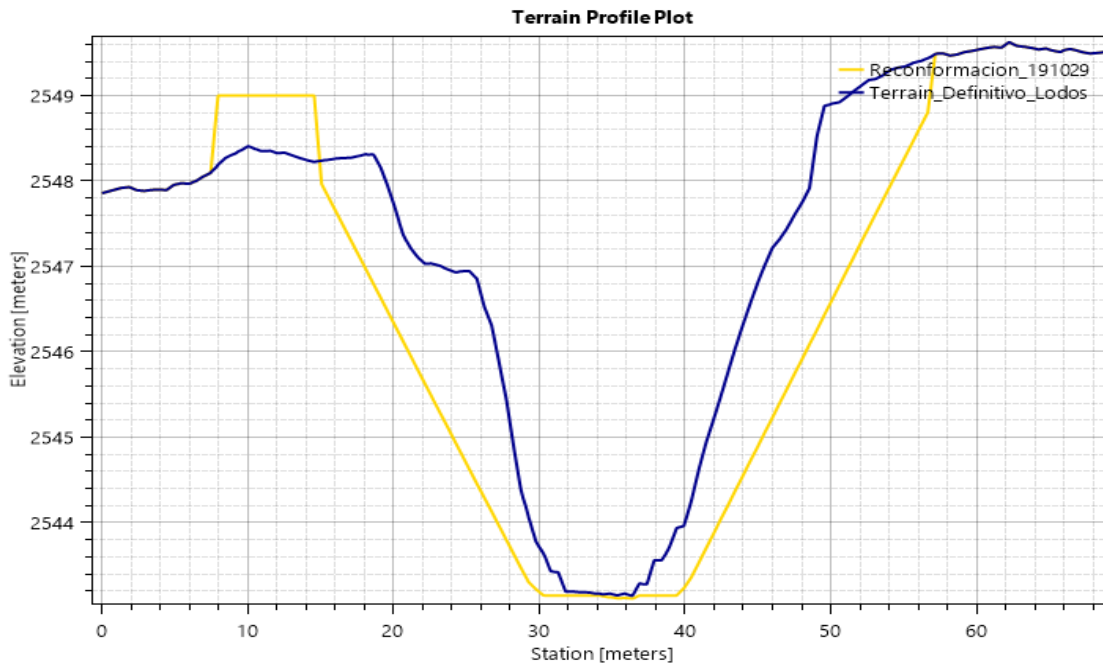


Figura 266 Detalle preliminar de la sección de modelamiento para adecuación del canal y humedal, sector Guaymaral (Tramo C.C. Bima – Río Bogotá).





Fuente: WSP, 2019.

El resumen de las características geométricas de la adecuación del canal Guaymaral, son las que se presentan en la Tabla 46.

Tabla 46. Secciones geométricas de prediseño del canal Guaymaral

| TRAMO | ABSCISA INICIAL | ABSCISA FINAL | SECCIÓN | BASE (m) | PENDIENTE (m/m) | Hmedia (m) | TALU D |
|-------|-----------------|---------------|-------------|----------|-----------------|------------|--------|
| 1 | K0+000 | K2+300 | Trapezoidal | 5 | 0.0002 | 4 | 1:4 |
| 2 | K2+300 | K5+920 | Trapezoidal | 10 | 0.0002 | 5 | 1:4 |

Fuente: WSP, 2019.

La propuesta de adecuación hidráulica del canal Guaymaral es la que se presenta en los Planos del (Anexo 3 – Anexo Cartográfico), numeral 3.6 “Propuesta Adecuación Hidrogeomorfológica”.

6.3.13 Consideraciones ambientales

Con miras a cumplir con los requerimientos establecidos en el decreto 088 de 2017, las acciones encaminadas a la restauración de los cuerpos de agua se definen a través de los siguientes determinantes básicos:

- Río Bogotá: La zona de ronda hidráulica (en adelante ZRH) del cauce del río Bogotá equivalente a 30 m y la zona de manejo y protección ambiental (en adelante ZMPA) es de 270 m constituyendo 300 m como zona total de protección ambiental para la cuenca media del río los cuales serán tenidos en cuenta para lo referido a las zonas de aptitud ambiental del Río Bogotá.

- Zonas de Amenaza y Riesgo del Río Bogotá en POMCA: La amenaza por inundación del Río Bogotá se categoriza en amenaza alta; es la zona delimitada por la línea de inundación producida por el desborde calculado para el caudal creciente de un periodo de retorno de 10 años. Amenaza media; está dada por una franja paralela al límite de la zona de amenaza alta que dependiendo de la legislación que se aplique puede tener 1.5 m en Bogotá y tiene un periodo de retorno de 10 a 100 años y la amenaza baja, la cual cuenta con un periodo de retorno igual o mayor a 100 años, estas categorías se encuentran sujetas a factores de mitigabilidad y no mitigabilidad.
- Humedal Torca-Guaymaral. La ZRH del Humedal Torca-Guaymaral será de 30 m y la ZMPA tiene un área aproximada de 83,58 Ha el humedal cuenta con 3 zonas de manejo a tener en cuenta frente a usos del suelo; Áreas de preservación y protección ambiental, Áreas de recuperación ambiental y Áreas de producción sostenible bajo condicionamientos ambientales específicos.
- Zona de Ronda Hidráulica de los Canales y Quebradas: Las ZRH y ZMPA de las quebradas Torca, Novita y Floresta se encuentran bajo coordenadas especiales establecidas normativamente, con relación a los cauces de los canales Torca y canal Guaymaral, quebradas San Juan, Morena, Patiño, La Francia y Aguas Calientes, Tibabita, Cañiza y las Pilas, la normatividad es insuficiente para el ajuste de coordenadas, en este caso se entienden previstos los 30 m legales de ZRH por lado y lado de los cauces como también la ZMPA contigua a la ronda reglamentaria.
- I.B. Acueducto y alcantarillado aplicado a tubería matriz del sector Tibitoc – Casablanc: La línea o tubería matriz de 78” de diámetro del tramo “Tibitoc - Casablanca” tiene una longitud de 31,451 Km, se encuentra localizada a lo largo de la Autopista Norte, desde el Club Rincón Grande hasta la calle 129, y siguiendo por esta calle hasta la avenida Boyacá, y luego por ésta hasta la calle 80, se tomará como Determinante Ambiental para cualquier intervención prevista en la Autopista Norte.
- Resolución 7142 de 2011. Por la cual se establecen y adoptan determinantes ambientales sobre la Estructura Ecológica Principal en suelo urbano de Bogotá, que establece el ámbito de aplicación, acciones a garantizar; oferta de bienes y servicios ambientales e integridad de la estructura ecológica principal. Dentro de este, en el Artículo 9 se establecen los criterios para Promover el Valor Ambiental del Sistema Hídrico en el Distrito Capital, a partir de observar los siguientes criterios:
 - Reducción de volúmenes de aguas contaminadas en los medios receptores.
 - Reducción del riesgo de inundaciones derivado de volúmenes y caudales punta de escorrentía.
 - Maximización de las superficies permeables con respecto de las impermeabilizadas.
 - Promoción del uso eficiente del agua haciendo énfasis en la utilización del agua lluvia.
 - Mejoramiento de la calidad de las aguas lluvias que descargarán a los ríos, quebradas, canales y humedales que constituyen los ejes de drenaje de la ciudad.

- Mejoramiento de la calidad paisajística de los elementos del sistema hídrico.
- Aprovechamiento de aguas lluvia para fines no potables, tales como riego de zonas verdes, comunes y antejardines, limpieza de áreas comunes, recarga de las cisternas de los inodoros, entre otros.

En el Producto 5 como en el Producto 7 de esta consultoría se hace una descripción detallada de cada una de las obras de adecuación propuestas para canales, quebradas y humedales, en donde igualmente se hará la inclusión de los modelos de la situación futura ajustado con las reconfiguraciones previstas para humedales y canales, así como también al desarrollo de estas Determinantes dentro de la propuesta de restauración del sistema hídrico. De todas maneras, en el (Anexo 3 – Anexo Cartográfico), numeral 3.6 “Propuesta Adecuación Hidrogeomorfológica” de este documento se presenta la versión preliminar que fue desarrollada en aquellos productos.

6.3.14 Análisis de amenaza por rotura del Jarillón del Río Bogotá

Con el objeto de tener en cuenta un escenario de falla en las características de confinamiento del río Bogotá, que genere un desbordamiento del flujo del río hacia la zona de Lagos de Torca, se llevó a cabo un análisis de la rotura hipotética del Jarillón del río Bogotá de la margen izquierda que colinda directamente con los predios del Club Guaymaral.

6.3.14.1 Planteamiento escenario de modelación

Aunque los diques son diseñados para resistir la presión del agua, ocasionalmente sufren fallas por diferentes razones, fallas de diseño o construcción. Cuando este tipo de eventos ocurren, el agua es repentinamente liberada y crea una onda de inundación más peligrosa que un evento de origen natural. Para este caso se ha considerado una abertura de una brecha con capacidad de evacuar el hidrograma de creciente de diseño en el río Bogotá. Este escenario se plantea como una posibilidad remota de la rotura del Jarillón, planteada en un punto sobre el Jarillón izquierdo cercano al área de estudio, para evidenciar la posible afectación de este fenómeno.

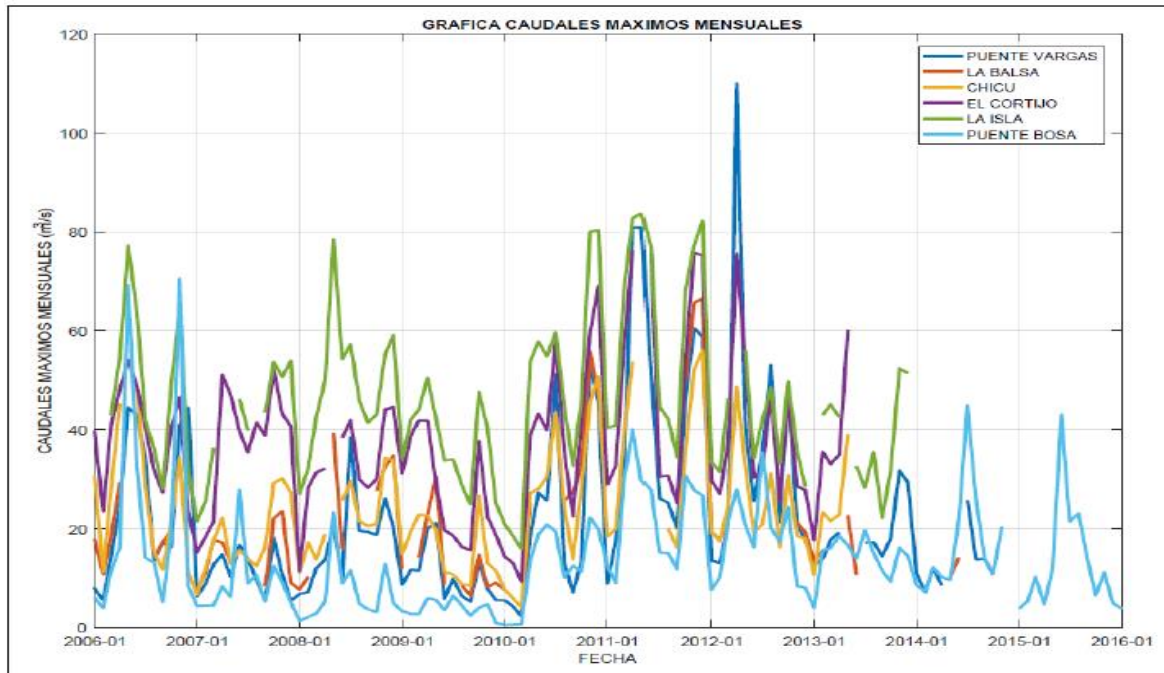
En este escenario se supone que el nivel del río, previo al rompimiento del jarillón, se encuentra en la cota 2546.78 msnm, que corresponde al nivel máximo del río para un evento con período de retorno de 100 años, que es la cota máxima del río Bogotá para la condición de diseño establecida en el proyecto de adecuación hidráulica del Río Bogotá.

Como estrategia de modelación del escenario más crítico, se indujo un hidrograma del río Bogotá correspondiente a un periodo de retorno de 100 años, en conjunción con los hidrogramas generados por el sistema Torca – Guaymaral para este mismo periodo de retorno, esto con el fin de obtener los mayores niveles de inundación en el área de estudio, es decir se ha supuesto que los dos eventos de creciente, tanto en el río como en el sistema Torca-Guaymaral, ocurren en el mismo momento. El caudal máximo establecido para el río Bogotá se tomó a partir del valor máximo registrado en las estaciones de la Sabana y que corresponde a la estación Puente Vargas, aguas debajo de la desembocadura de la cuenca Torca-Guaymaral (Figura 267) y reportados por el

IDIGER para el Proyecto de Actualización de componente de gestión del riesgo para la revisión ordinaria y actualización del Plan de Ordenamiento Territorial⁷

Para determinar el caudal de entrada en el río Bogotá, se procedió a realizar el análisis de frecuencias de la estación Puente Vargas, se evaluaron diferentes distribuciones de probabilidad, de las cuales se determinó que la distribución Log Pearson tipo II, era la que presentaba el mejor ajuste a los datos analizados, en la Tabla 47 se presentan los resultados obtenidos del análisis de frecuencias.

Figura 267 Caudales máximos mensuales registrados en las estaciones Puente Vargas, La Balsa, Chicú, El Cortijo, La Isla ubicadas en el río Bogotá (2006-2015)



Fuente: IDIGER, 2018.

⁷ IDIGER. Subdirección de Análisis de Riesgos y Efectos del Cambio Climático. Grupo de trabajo temático inundaciones. Proyecto Actualización Componente de Gestión del Riesgo para la Revisión Ordinaria y Actualización del Plan de Ordenamiento Territorial. Documento Técnico de Soporte. “Amenaza por Inundación en Perspectiva de Cambio Climático” Volumen 2. Bogotá, junio 25 de 2018.

Tabla 47. Análisis de frecuencias caudales máximos estación Pte. Vargas.

| Tr (años) | VALOR ESPERADO PARA CADA DISTRIBUCIÓN PARA CADA Tr | | | | | | Q m ³ /s |
|------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| | Normal m ³ /s | LogNormal m ³ /s | Exponencial m ³ /s | Pearson III m ³ /s | Log Pearson m ³ /s | Gumbel m ³ /s | |
| 2.3 | 36.3883 | 32.7773 | 31.0398 | 29.0883 | 31.1624 | 33.5359 | 31.16 |
| 3 | 40.4454 | 36.7656 | 35.1044 | 32.5426 | 34.4086 | 37.6018 | 34.41 |
| 5 | 47.0533 | 44.3267 | 43.3194 | 40.5188 | 41.1566 | 45.0932 | 41.16 |
| 10 | 54.1281 | 54.1537 | 54.4664 | 52.6828 | 51.1276 | 54.5064 | 51.13 |
| 25 | 61.6726 | 67.0447 | 69.2019 | 70.1384 | 66.388 | 66.3999 | 66.39 |
| 50 | 66.5464 | 76.9612 | 80.349 | 83.9861 | 79.9284 | 75.2233 | 79.93 |
| 100 | 70.9303 | 87.128 | 91.496 | 98.2066 | 95.5519 | 83.9815 | 95.55 |
| Pearson X² | 25.38 | 9.55 | 9.55 | 16.19 | 6.23 | 9.04 | 6.23 |

Fuente: WSP, adaptado de CAR 2019.

Ahora, para considerar la corrección caudales máximos anuales a caudales máximos instantáneos, se procedió a implementar el factor de corrección de Fuller, el cual se expresa de la siguiente manera:

$$F_f = 1 + \frac{2.66}{A^{0.3}}$$

Por medio de este factor de corrección se obtiene el caudal máximo instantáneo, así:

$$Q_{MI} = F_f * Q_{MA}$$

Dónde:

A: Área de la cuenca en Km².

Q_{MI} : Caudal máximo instantáneo.

Q_{MA} : Caudal máximo anual.

Para determinar este factor, se procedió a determinar el área de la cuenca del río Bogotá aferente a la estación Puente Vargas, la cual se presenta en la Figura 269, el área resultante corresponde a 1983.56 km², de acuerdo con esto el factor de corrección es:

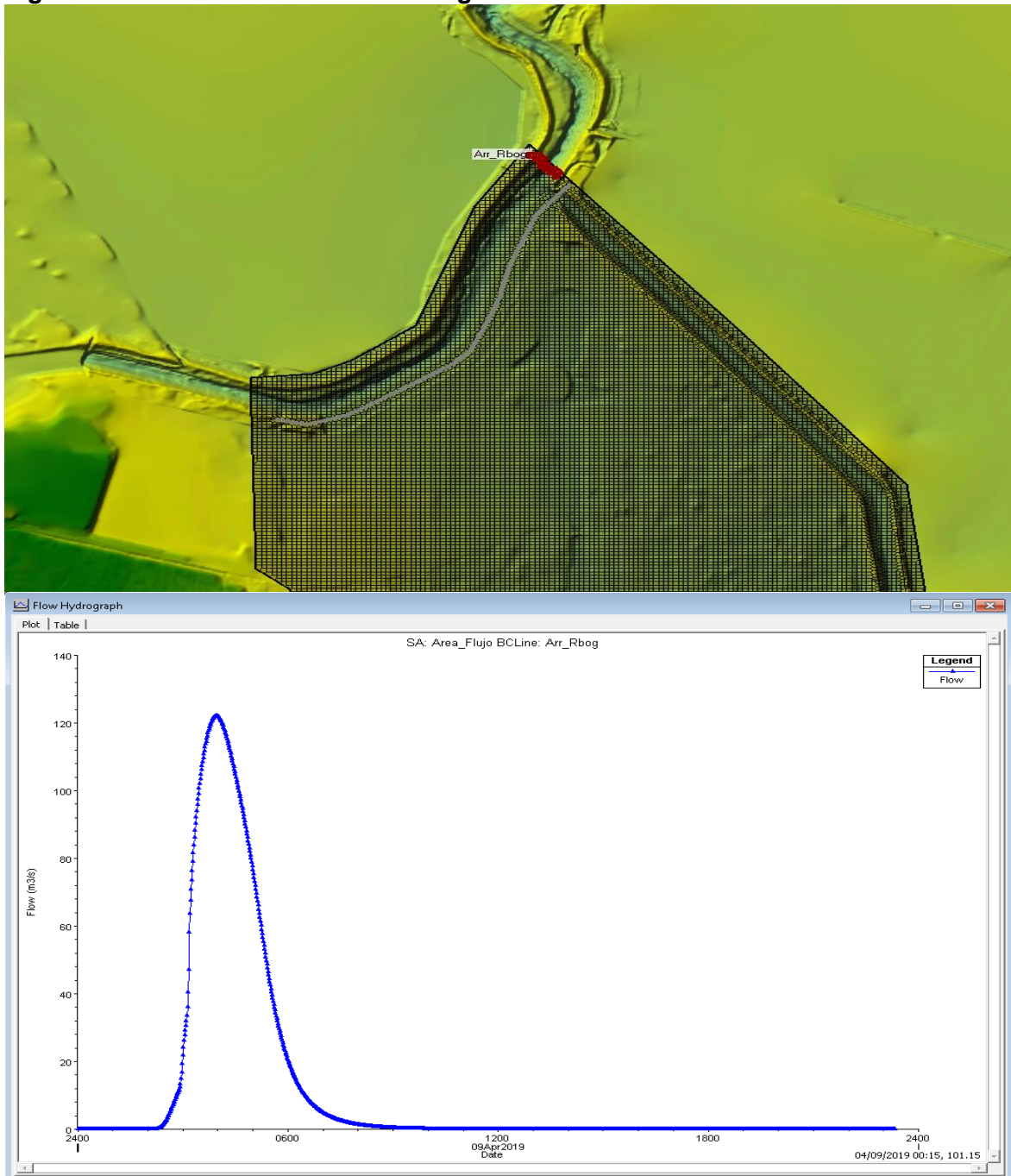
$$F_f = 1 + \frac{2.66}{1983.56^{0.3}} = 1.27$$

Por lo tanto, el caudal máximo instantáneo corresponde a:

$$Q_{MI} = 1.27 * 95.55 \frac{m^3}{s} = 121.60 \frac{m^3}{s}$$

El hidrograma introducido al modelo como la condición de borde aguas arriba del río Bogotá, adicional a la del nivel descrito previamente, se presenta en la Figura 268, con un caudal pico que ingresa a través de la brecha del Jarillón izquierdo, haciendo coincidir este momento, con el de la máxima inundación en el sistema Torca-Guaymaral. Este instante ocurre aproximadamente a la cuarta hora de la simulación. La forma del hidrograma corresponde a la forma general obtenida para el río Bogotá en el estudio de IDIGER.

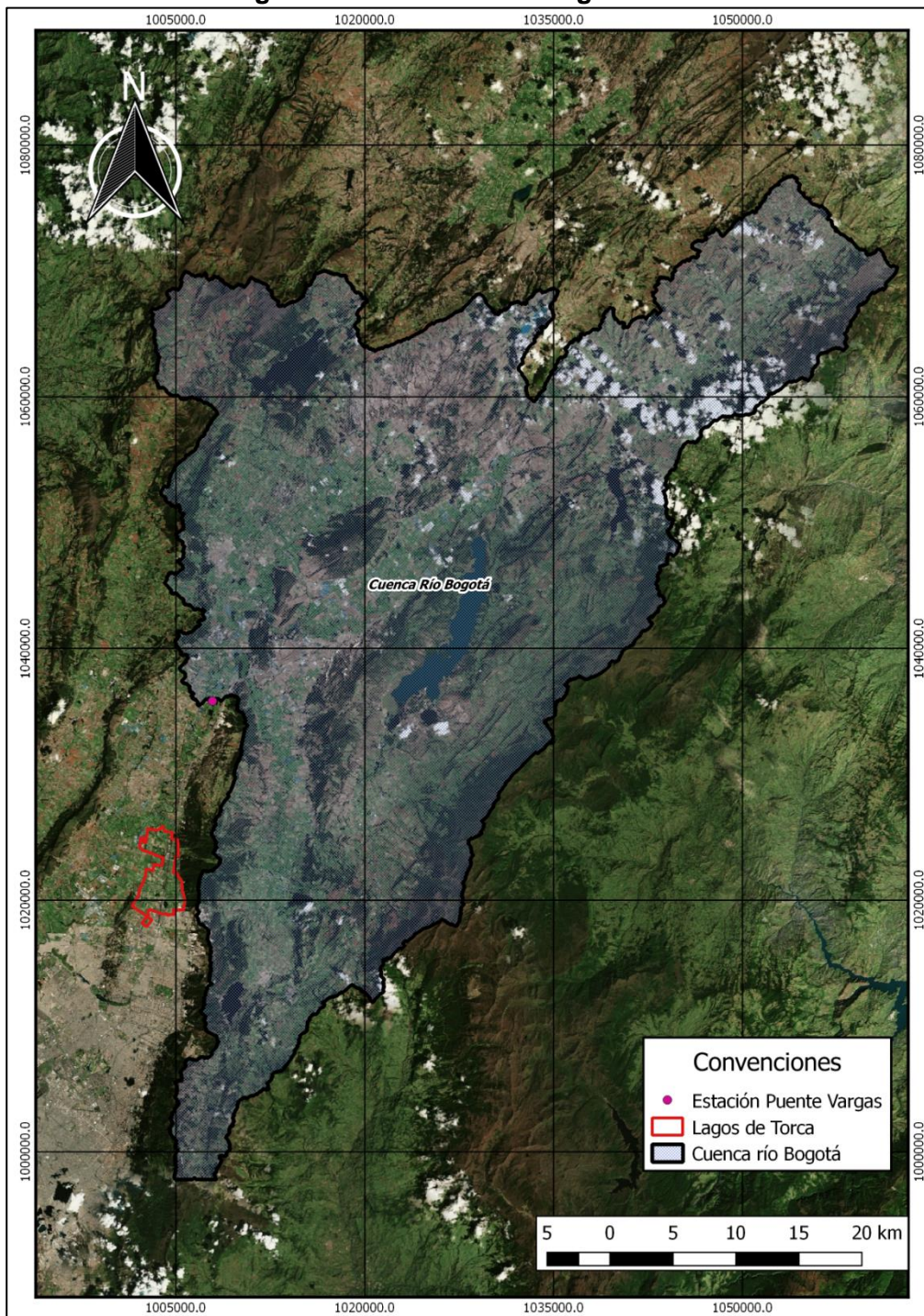
Figura 268 Condición de borde río Bogotá



Fuente: WSP 2019.

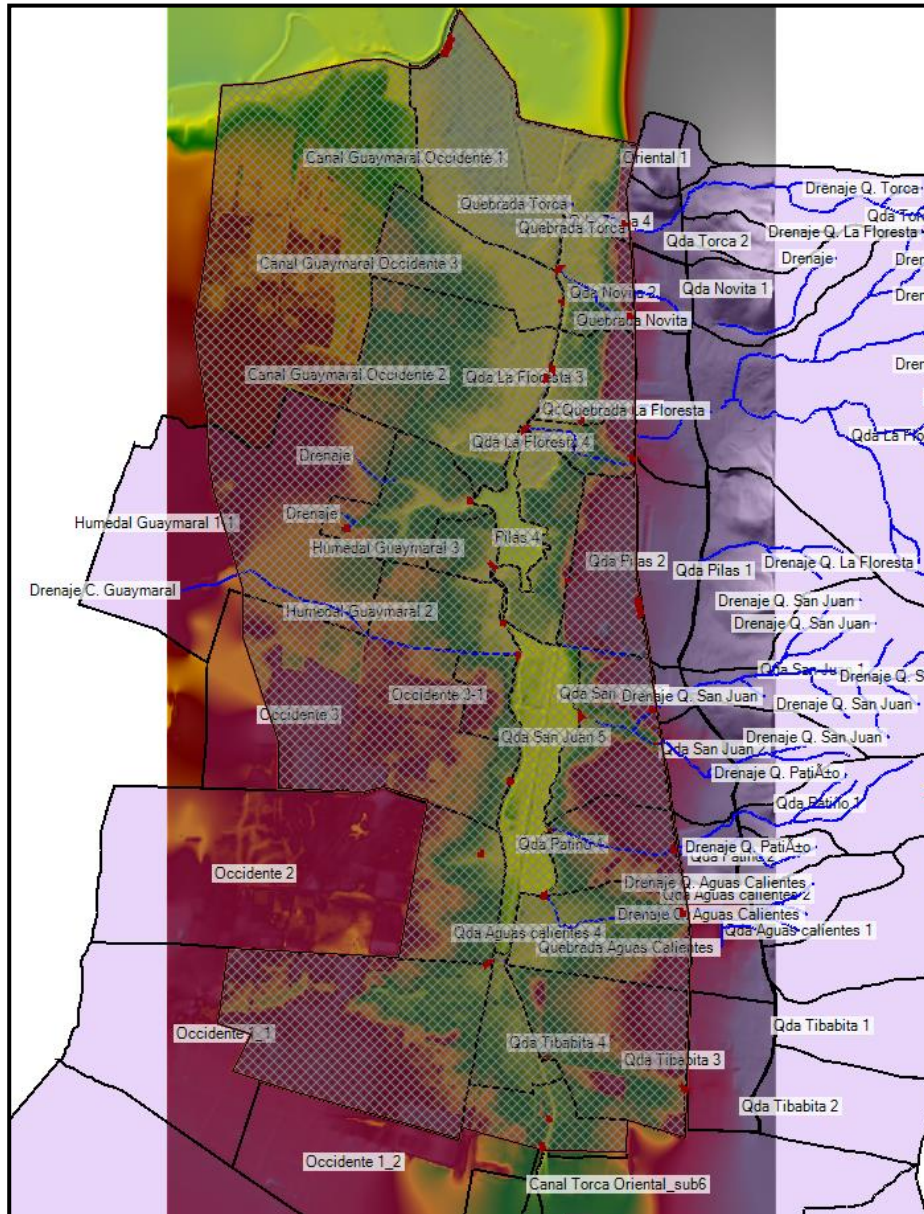
En la Figura 270 se presenta el área de simulación 2D para la modelación de inundación del sistema Torca – Guaymaral.

Figura 269 Cuenca río Bogotá estación Puente Vargas



Fuente: WSP, 2019.

Figura 270 Área de simulación 2D

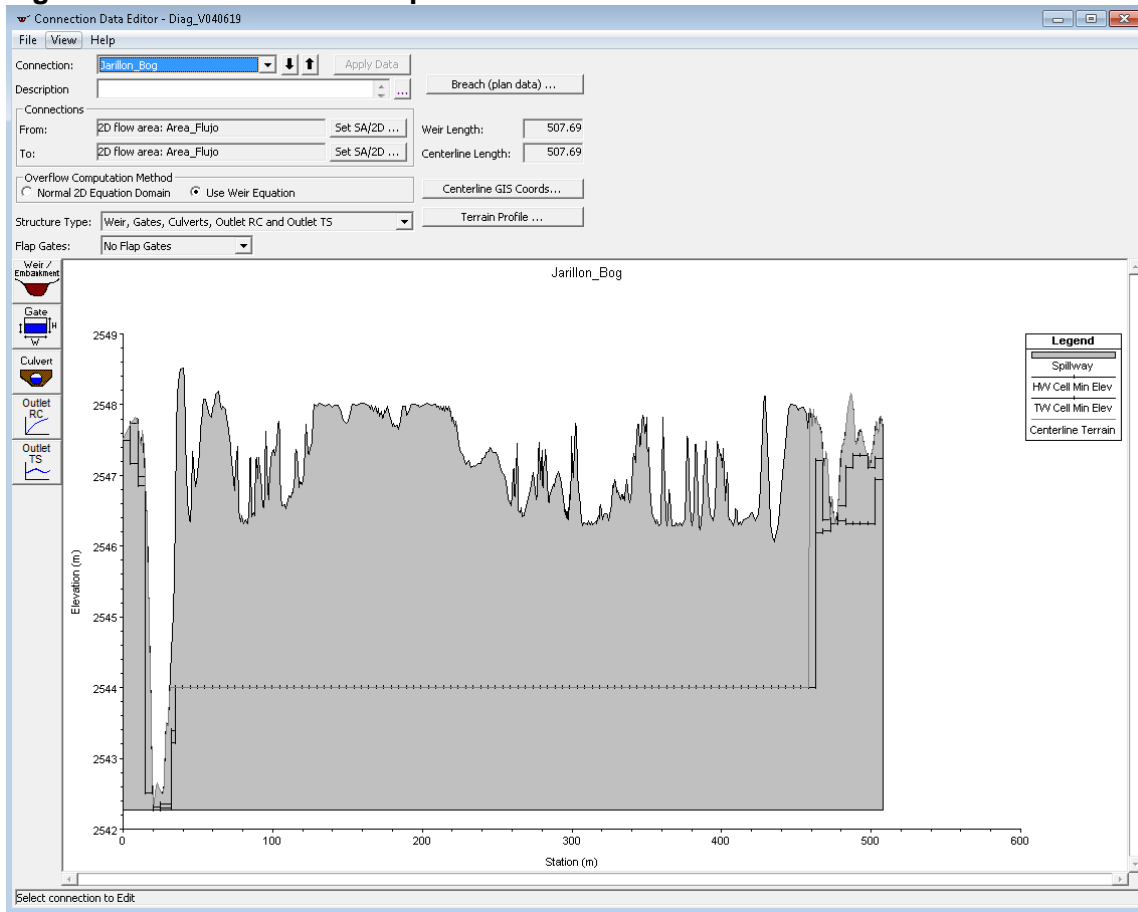


Fuente: WSP 2019.

6.3.14.2 Resultados obtenidos

Para la realización de la simulación de la rotura de dique del río Bogotá, se procedió a incorporar una conexión 2D, al área de flujo previamente definida, como se ilustra en la Figura 271.

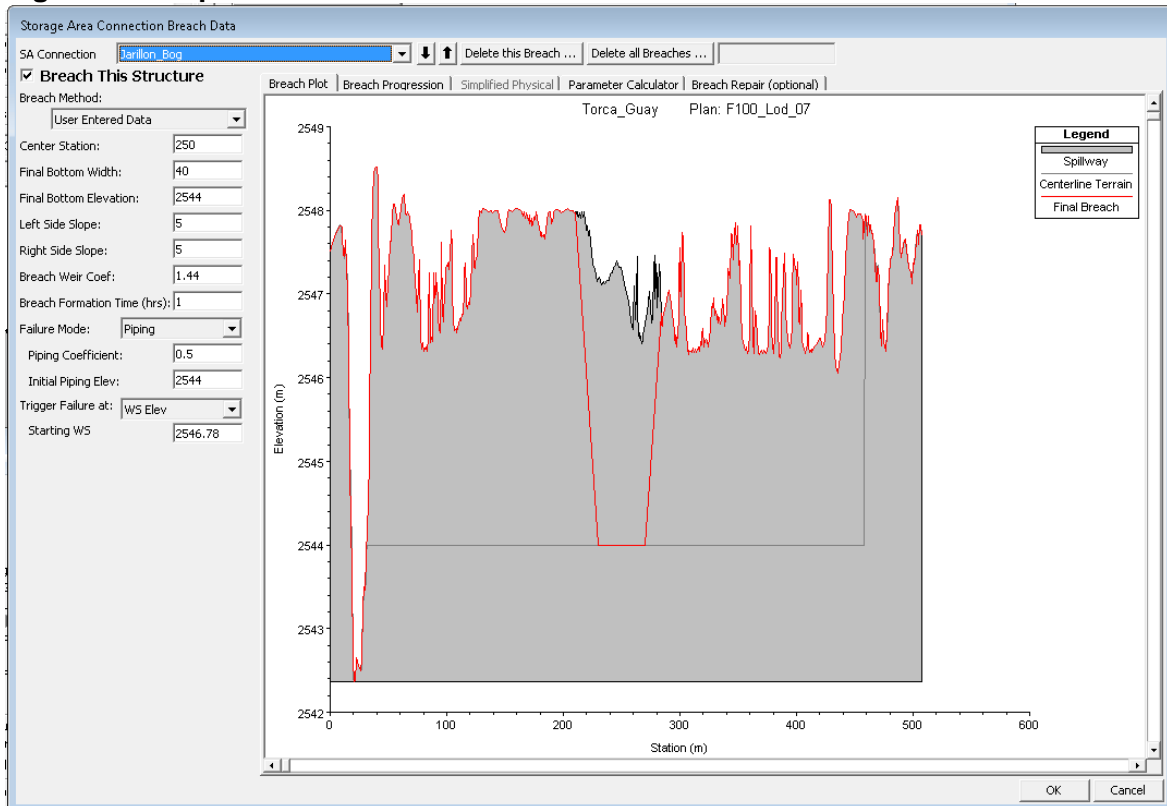
Figura 271 Conexión 2d – Dique



Fuente: WSP 2019.

En la Figura 272 se presentan los parámetros asociados a la configuración de la brecha en el dique oriental del río Bogotá. Con el fin de realizar una simulación más adecuada, se incluyó la información topobatemétrica del río Bogotá, en inmediaciones de la desembocadura del canal Guaymaral.

Figura 272 Representación brecha de rotura

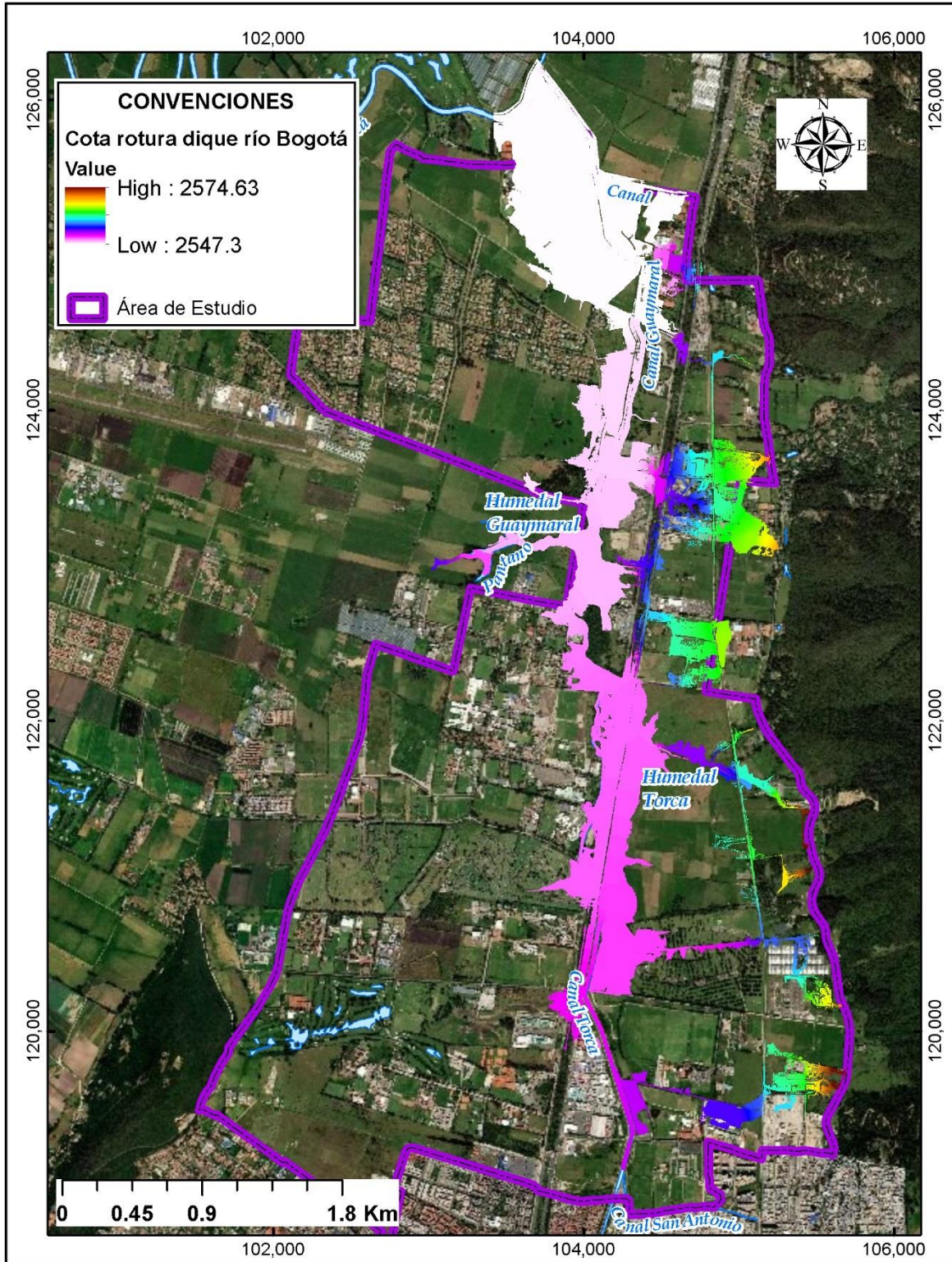


Fuente: WSP 2019.

6.3.14.3 Análisis de resultados

De acuerdo con los resultados obtenidos del escenario crítico, se obtiene una cota de inundación mayor a la obtenida solamente con los aportes tanto orientales como occidentales del sistema Torca – Guaymaral. En la Figura 273 se presenta la mancha de inundación resultante de este escenario de modelación y en la Figura 274 se presentas el perfil resultante comparado con el escenario de simulación que no tiene en cuentas la rotura del dique del río Bogotá. En la Figura 275 se presenta la comparación de los escenarios de simulación, en las cuales se aprecia un aumento del área de cubrimiento de la mancha de inundación considerando la rotura del dique del río Bogotá.

Figura 273 Área de inundación resultante

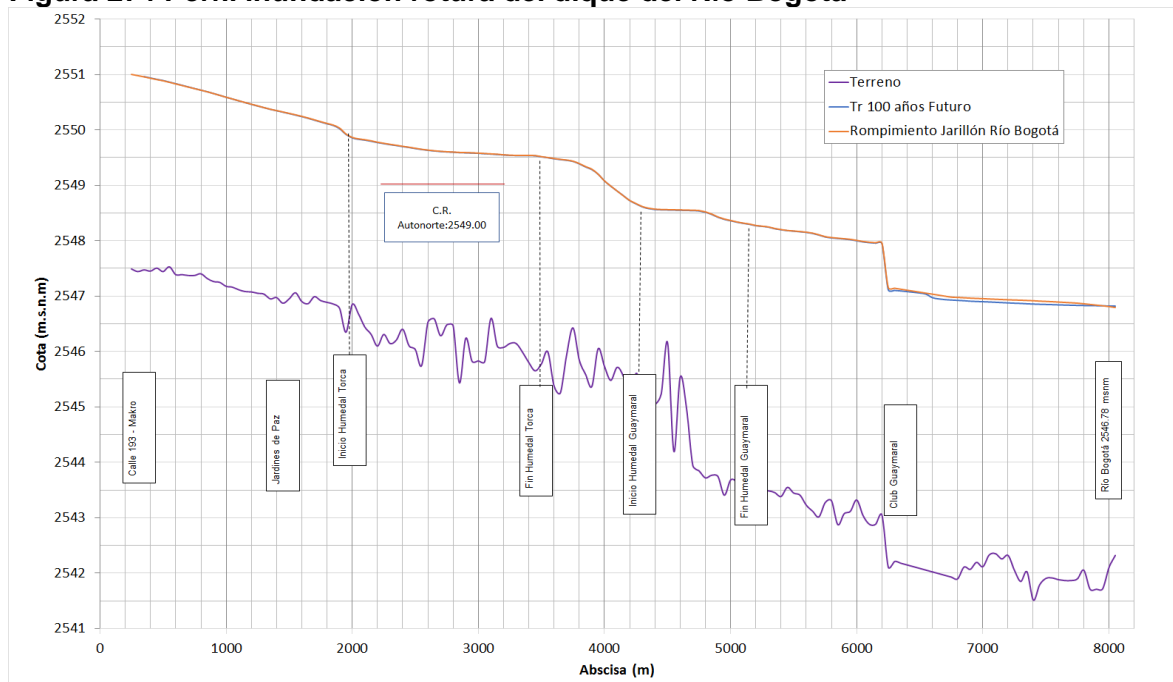


Fuente: WSP, 2019.

El comportamiento del perfil hidráulico del sistema muestra que en este escenario, la condición de borde generada por el Río Bogotá en la cota 2546.78 msnm, de igual manera sigue siendo el control de todo el sistema hacia aguas arriba, con lo cual el perfil prácticamente se superpone al generado por la creciente evaluada para el sistema Torca-Guaymaral, fluyendo hacia el río.

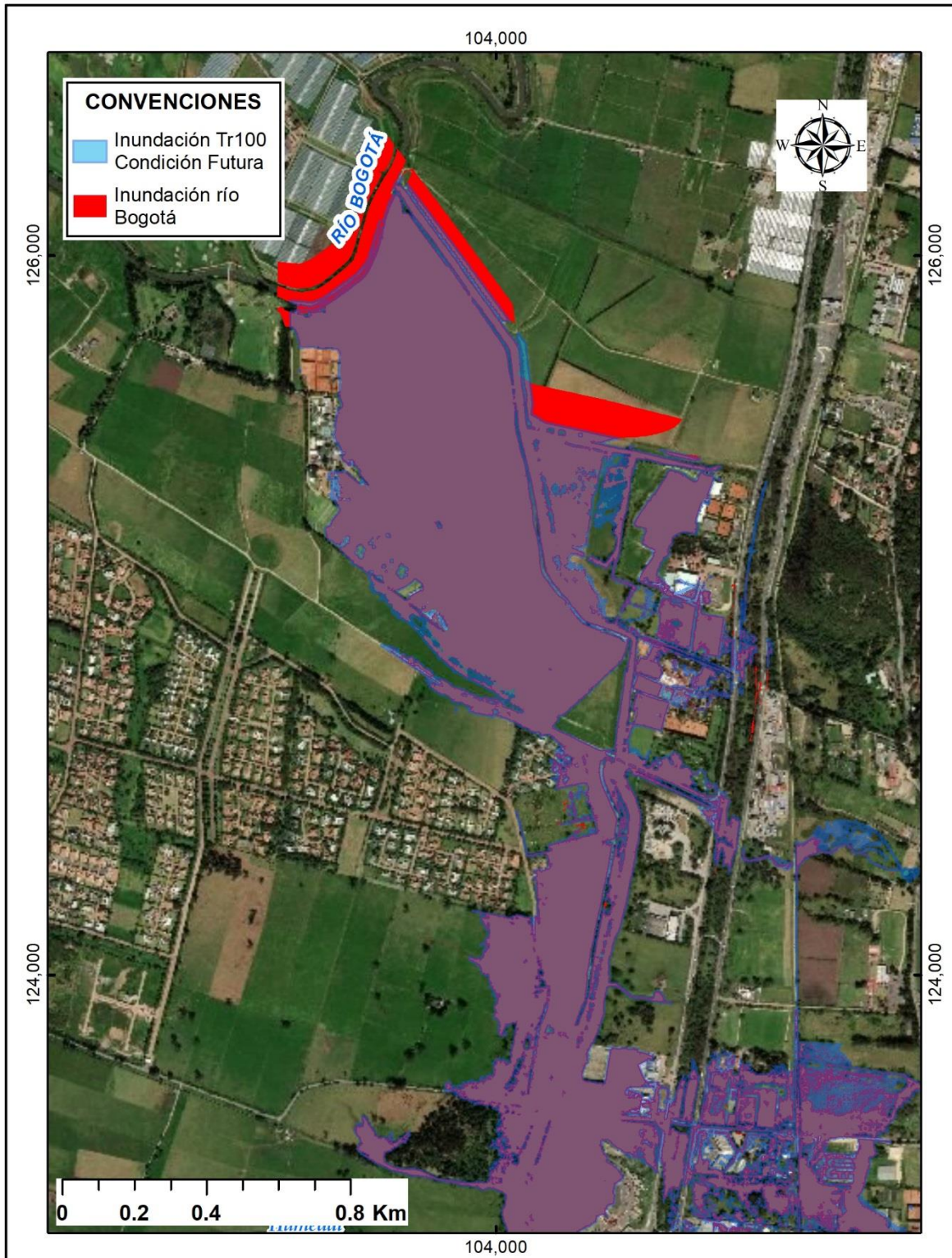
Las sobre elevaciones que este escenario genera alcanza los 7 cm, los ocurren en la zona más baja del sistema, es decir en el sector comprendido entre la vía de entrada al Club Guaymaral, hasta la desembocadura en el Río, que en área de inundación es como se presenta en la Figura 275.

Figura 274 Perfil inundación rotura del dique del Río Bogotá



Fuente: WSP, 2019.

Figura 275 Detalle comparación escenarios de inundación, (Tr100 años Futuro y Rotura Río Bogotá) – Vista en detalle.



Fuente: WSP, 2019.

La comparación de las áreas de inundación entre los escenarios contemplados, muestran los resultados que se indican en la Tabla 48, en la cual se indica las áreas abarcadas por la inundación.

Tabla 48. Áreas de inundación por escenarios, sistema Torca - Guaymaral

| ESCENARIO | ÁREA (km ²) |
|------------------------------------------------------------|-------------------------|
| TR10 Yr | 1.6656 |
| TR25 Yr | 1.8925 |
| TR50 Yr | 2.0740 |
| Actual Tr100 Yr | 2.2044 |
| Futuro Tr100 Yr | 2.2464 |
| Ruptura del jarillón del río Bogotá | 2.4193 |
| Implementación de jarillon izquierda en el Canal Guaymaral | 1.3627 |

Fuente: WSP, 2019.

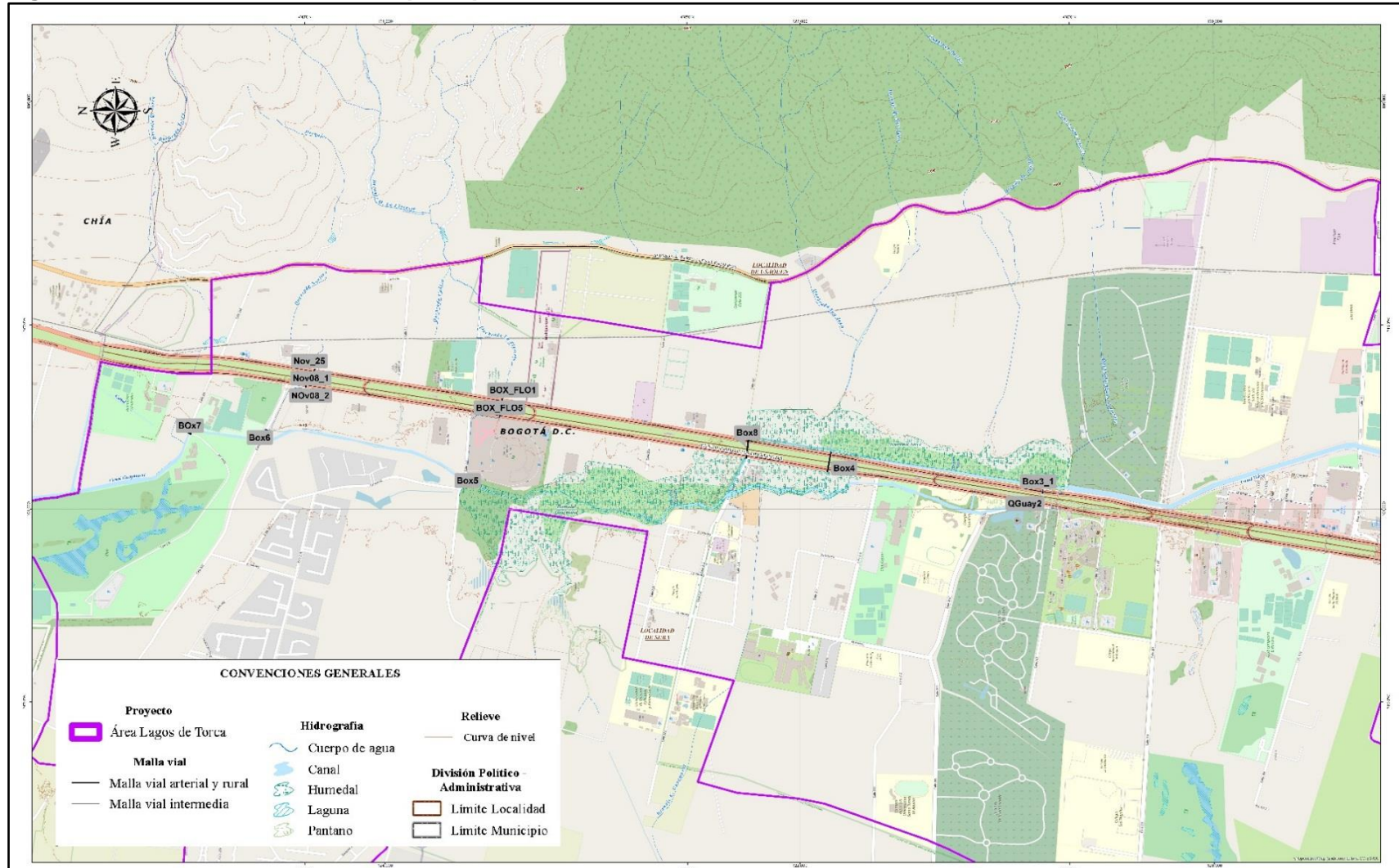
6.3.15 Análisis de estructuras

Con el objeto de verificar el comportamiento hidráulico de las estructuras principales existentes que se encuentran dentro del sistema hídrico Torca-Guaymaral, se llevó a cabo un análisis específico para cada una de estas estructuras y establecer los requerimientos de capacidad y su influencia en el comportamiento de la lámina de inundación del sistema. En la Figura 276 se presenta la localización general de cada estructura.

Teniendo en cuenta que la simulación hidrodinámica bidimensional incorpora el funcionamiento de las estructuras hidráulicas de cruce existentes en el sistema, la evaluación de la capacidad se realiza a partir de los niveles generados por el flujo a su paso por la obra, con lo cual se llega a estimar de mejor manera la operatividad real de su funcionamiento. La evaluación que se hace a partir del modelo de simulación es de tipo hidráulico y no contempla la verificación estructural y/o geotécnica.

Entre la Figura 277 a la Figura 337 se representan los resultados del modelamiento bidimensional y la localización de las obras existentes. En cada figura se indica el nivel del agua en términos de cota en cada una de las estructuras, así como el caudal que circula a través de cada una, las estructuras están identificadas con un ID único, que corresponde únicamente a un nombre arbitrario que no representa formas o dimensiones de las estructuras. De acuerdo con el análisis realizado, se evidencia que algunas de las estructuras que conforman el sistema tienen una capacidad insuficiente para el paso de los caudales generados por el sistema, inclusive en algunas ocasiones para periodos de retorno bajos (10 años), por otra parte, existen estructuras que funcionan adecuadamente inclusive para periodos de retorno de 100 años.

Figura 276 Estructuras hidráulicas principales del sistema



Fuente: WSP, 2019.

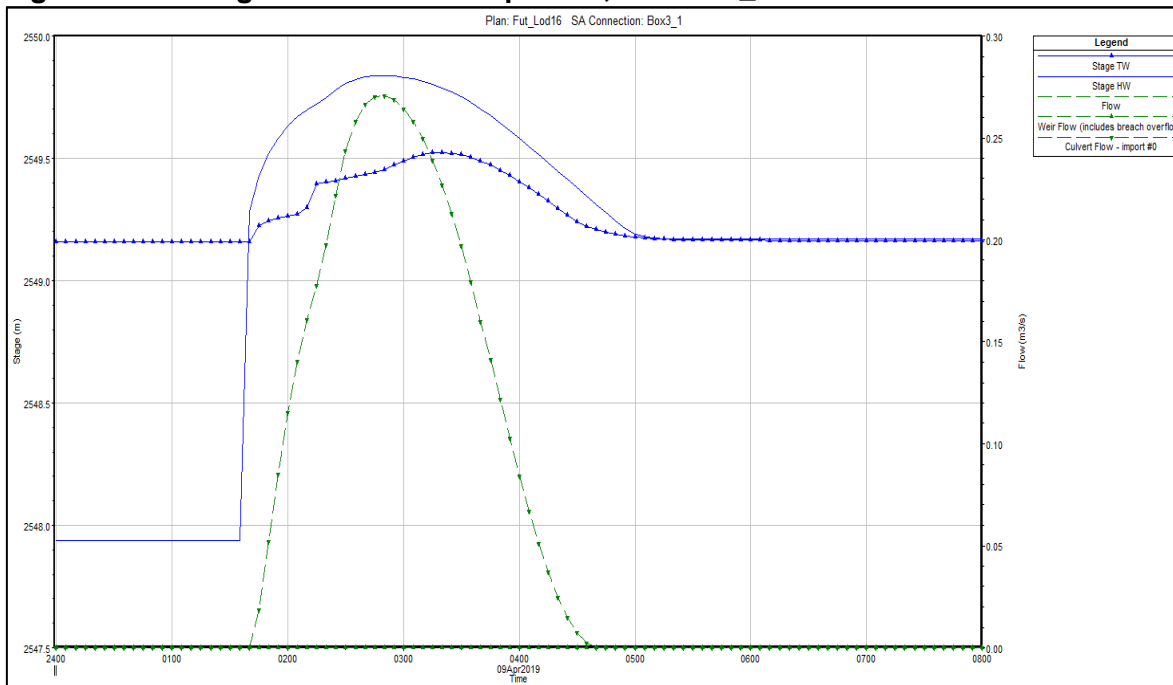
6.3.15.1 Período de retorno de 100 años

A continuación, se presenta el análisis de las principales estructuras considerando el escenario de simulación para los caudales de un periodo de retorno de 100 años.

6.3.15.1.1 Estructuras de cruce Autopista Norte

En la Figura 277 se presenta el comportamiento de la primera estructura que cruza la autopista norte, partiendo del sector sur del sistema, específicamente para el carril sur – norte, se aprecia que el caudal pico en esta estructura se presenta alrededor de las 2.8 horas de iniciada la simulación, con el consecuente aumento de lámina. La cota de rasante de la autopista es de 2550.3 m.s.n.m. El perfil presentado indica que aguas abajo existe un control hidráulico que presuriza la tubería sin que su capacidad de evacuación se aumente y de igual manera, sin llegar a sobrepasar la rasante de la vía. En la Figura 278 se presenta la cota máxima resultante de la simulación para un periodo de retorno de 100 años.

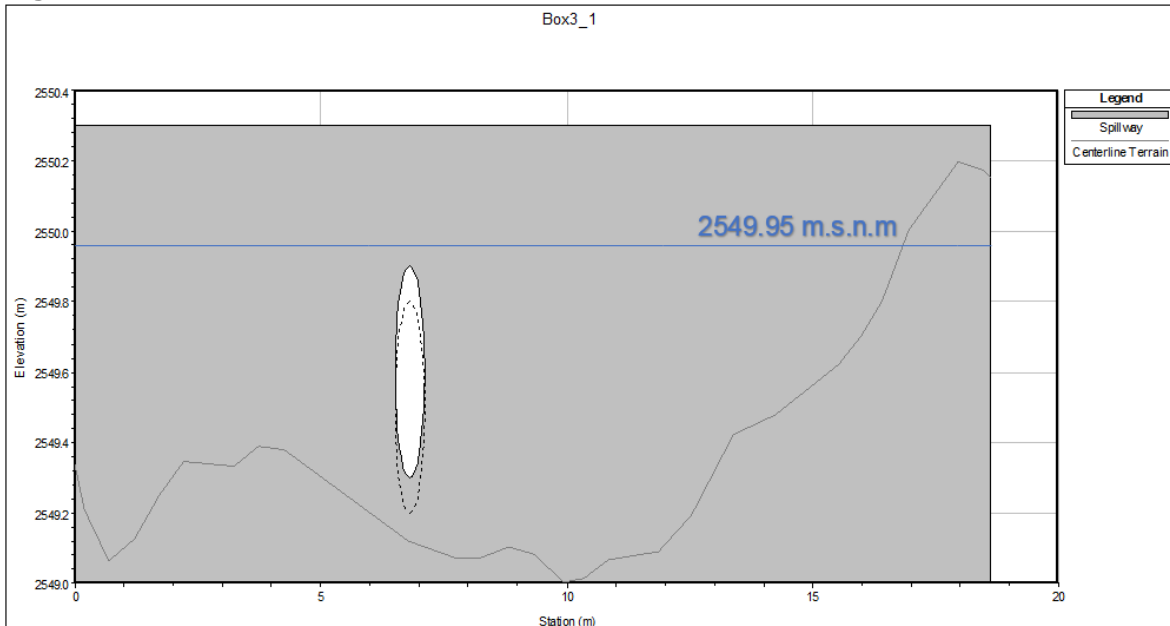
Figura 277 Hidrograma Alcantarilla $\phi=0.6m$, ID: Box3_1



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

En esta figura y las que indican la sección transversal de las obras existentes, se hace una indicación del conducto en la zona de toma de la sección y la proyección de la obra a la salida de la misma (línea punteada).

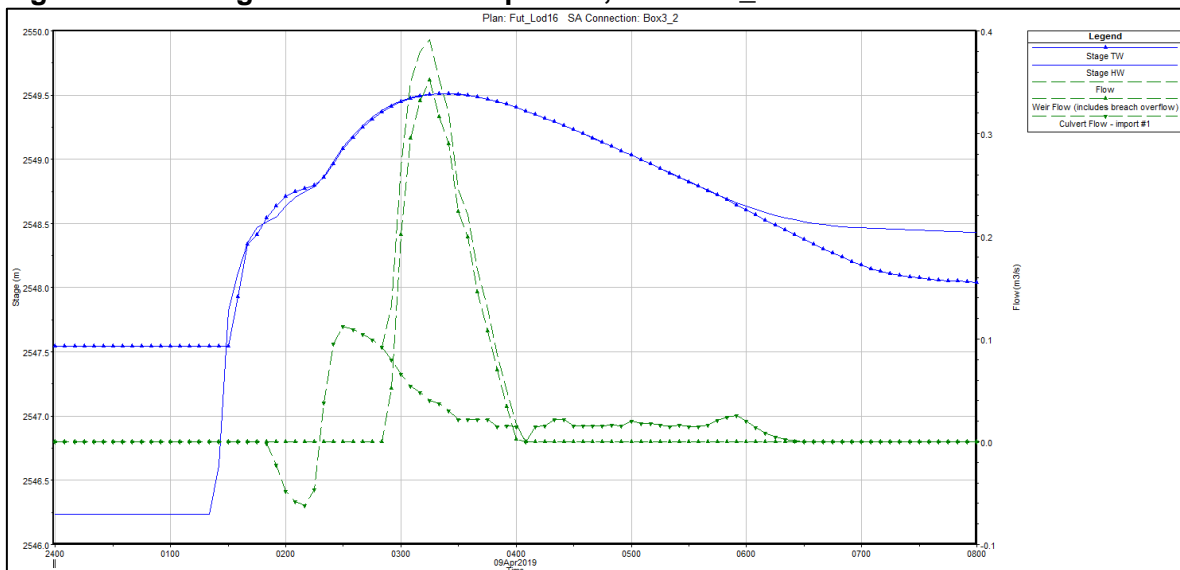
Figura 278 Sección transversal Alcantarilla $\phi=0.6\text{m}$, ID: Box3_1



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

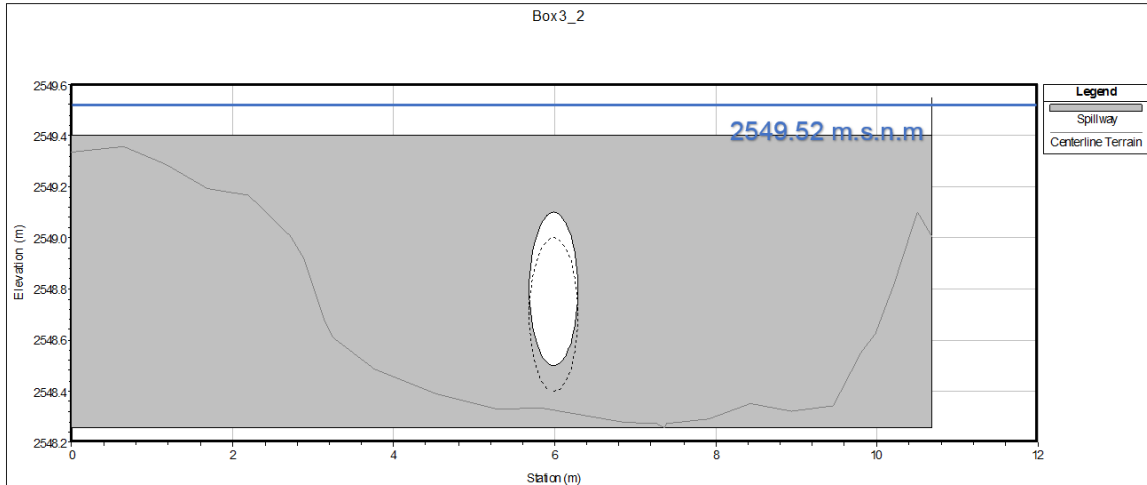
En la Figura 279 se presenta la primera estructura localizada sobre el carril norte – sur de la Autopista Norte, el caudal pico se presenta alrededor de las 3.2 horas de iniciada la simulación. La comunicación entre estas estructuras se da en el separador por medio de un canal abierto, tal como se aprecia en la Figura 281. La cota de rasante de la vía es de 2549.4 m.s.n.m. Los niveles del agua sobre la estructura están controlados por los niveles del canal Guaymaral aguas abajo, los cuales también superan la rasante de la vía (ver Figura 280).

Figura 279 Hidrograma Alcantarilla $\phi=0.6\text{m}$, ID: Box3_2



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

Figura 280 Sección transversal Alcantarilla $\phi=0.6\text{m}$, ID: Box3_2



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

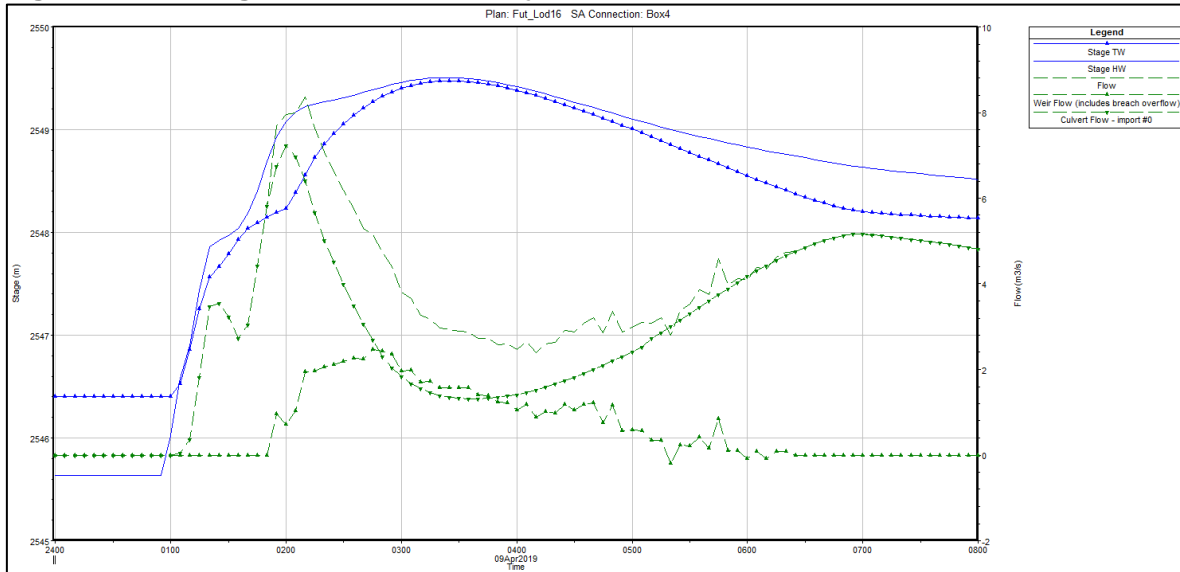
Figura 281 Vista en planta Estructuras ID_Box3_1 y Box3_2



Fuente: WSP, 2019.

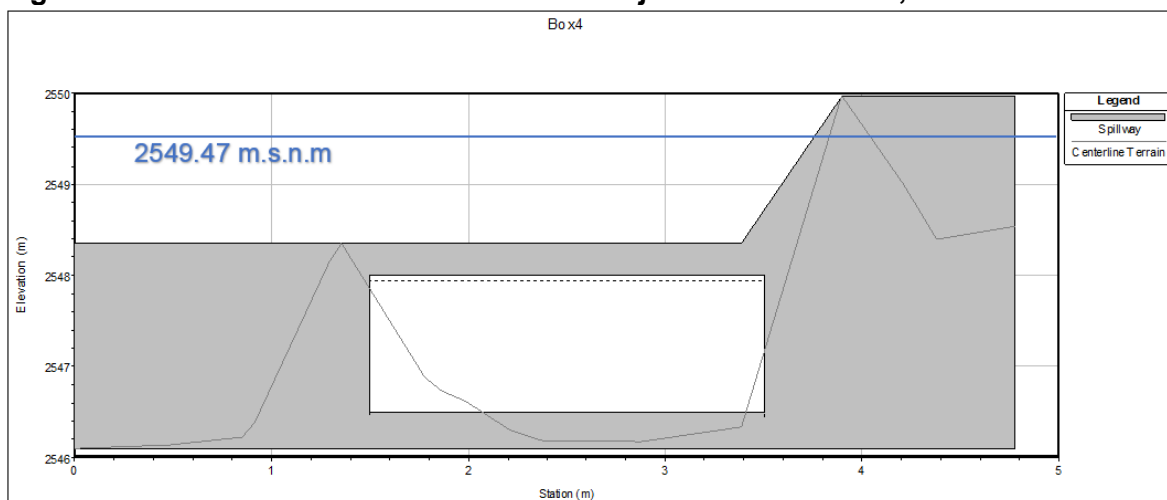
En la Figura 282 se presenta la segunda estructura que cruza la autopista norte desde el canal Torca hacia el canal Guaymaral, el caudal pico en esta estructura se presenta alrededor de las 2.2 horas de iniciada la simulación, en la Figura 284 se presenta la vista en planta de la estructura que cruza en su totalidad la autopista norte. La cota de rasante de la vía es de 2548.36 m.s.n.m., existe un control hidráulico aguas abajo por el canal Guaymaral, se aprecia que para el periodo de retorno de 100 años se supera la capacidad máxima de la estructura, el nivel sobrepasa la cota de rasante de la vía (ver Figura 283).

Figura 282 Hidrograma alcantarilla cajón de 2.0m x 1.5m, ID: Box4



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

Figura 283 Sección transversal alcantarilla cajón de 2.0m x 1.5m, ID: Box4



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

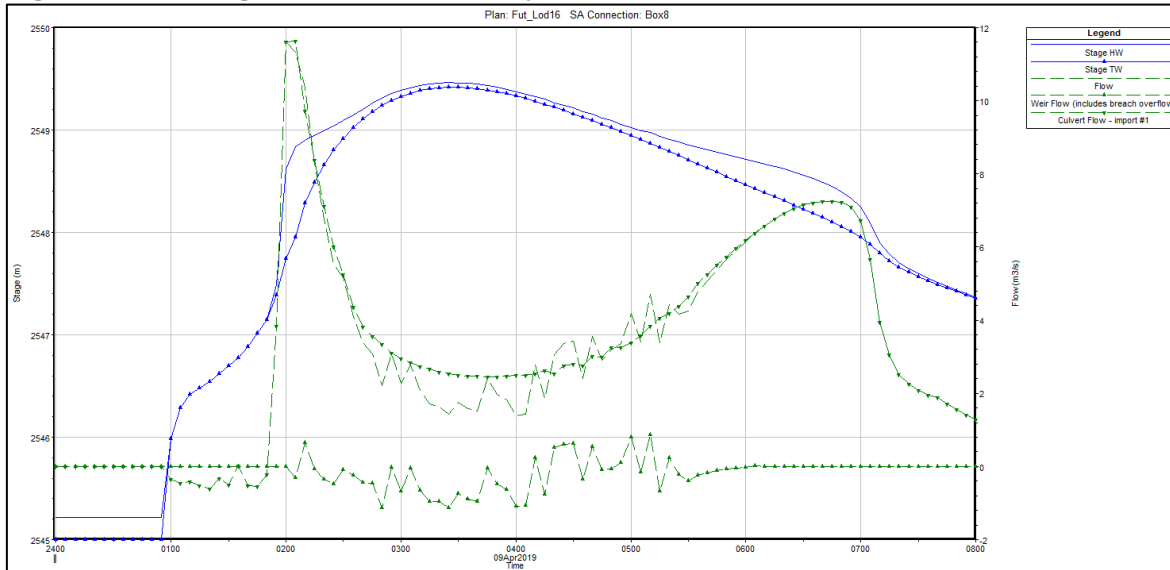
Figura 284 Vista en planta estructura ID: Box4



Fuente: WSP, 2019.

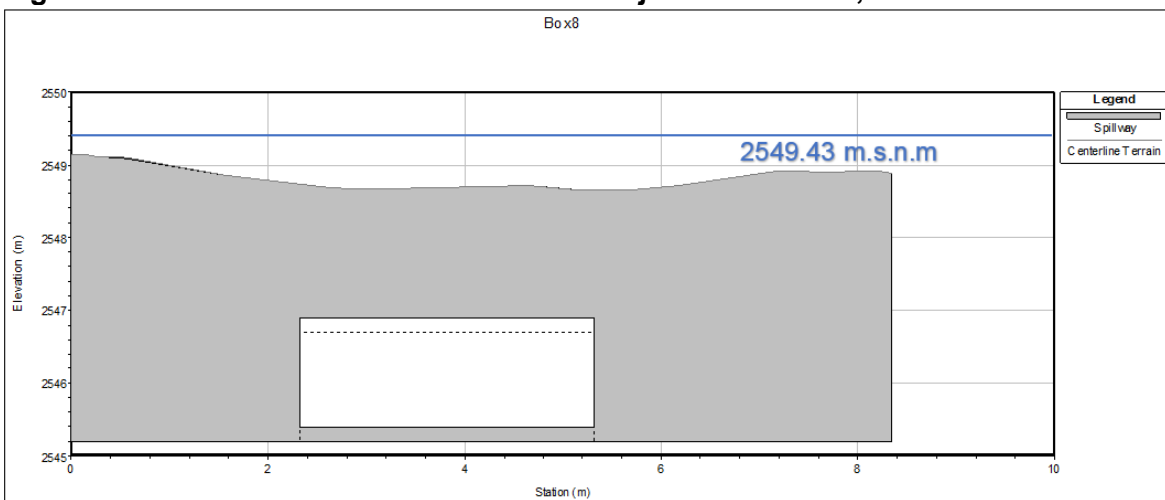
En la Figura 285 se presenta la última estructura que comunica directamente el sistema de humedales, identificada con el ID: Box8, el caudal pico se presenta a la segunda hora de iniciada la simulación, en la Figura 287 se presenta la vista en plana de esta estructura, que cruza en su totalidad a la autopista norte. La cota de rasante de la vía es de 2548.69 m.s.n.m., existe un control hidráulico aguas abajo por el canal Guaymaral, se aprecia que para el periodo de retorno de 100 años se supera la capacidad máxima de la estructura, el caudal sobrepasa la cota de rasante de la vía (ver Figura 286).

Figura 285 Hidrograma alcantarilla cajón 3.0m x 1.5m, ID: Box8



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

Figura 286 Sección transversal alcantarilla cajón 3.0m x 1.5m, ID: Box8



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

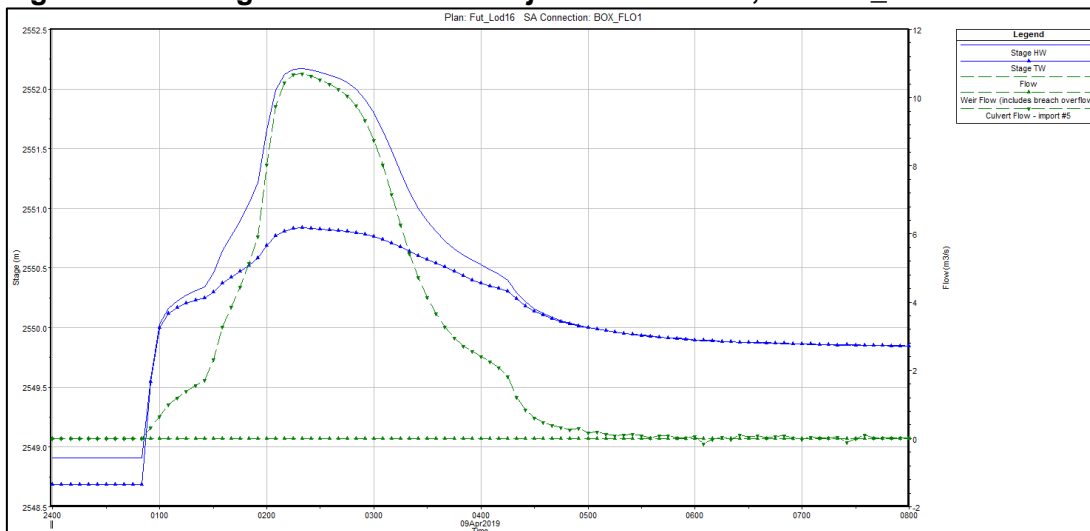
Figura 287 Vista en planta estructura ID: Box8



Fuente: WSP, 2019.

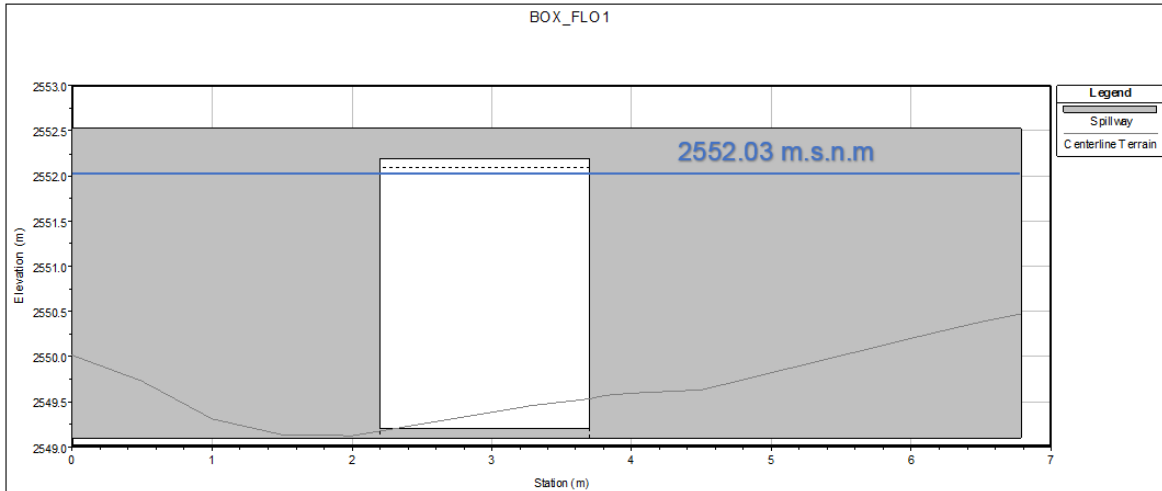
En la Figura 288, Figura 290 y Figura 292 se presentan las estructuras que permiten el cruce de la quebrada La Floresta por la autopista Norte, las cuales se presentan geográficamente en la Figura 294. Debido a la lámina de agua producida aguas abajo, para las estructuras Box_Flo2 y Box_Flo5 se presenta un flujo inverso. La cota de rasante de la estructura Box_Flo1 es de 2552.53 msnm, de la estructura Box_Flo2 es de 2552.0 msnm y de la estructura Box_Flo5 es de 2552.20 msnm, estas estructuras para el periodo de retorno de 100 años funcionan por debajo de su capacidad máxima (ver Figura 289, Figura 291 y Figura 293).

Figura 288 Hidrograma alcantarilla cajón 1.5m x 3.0 m, ID: Box_FLO1



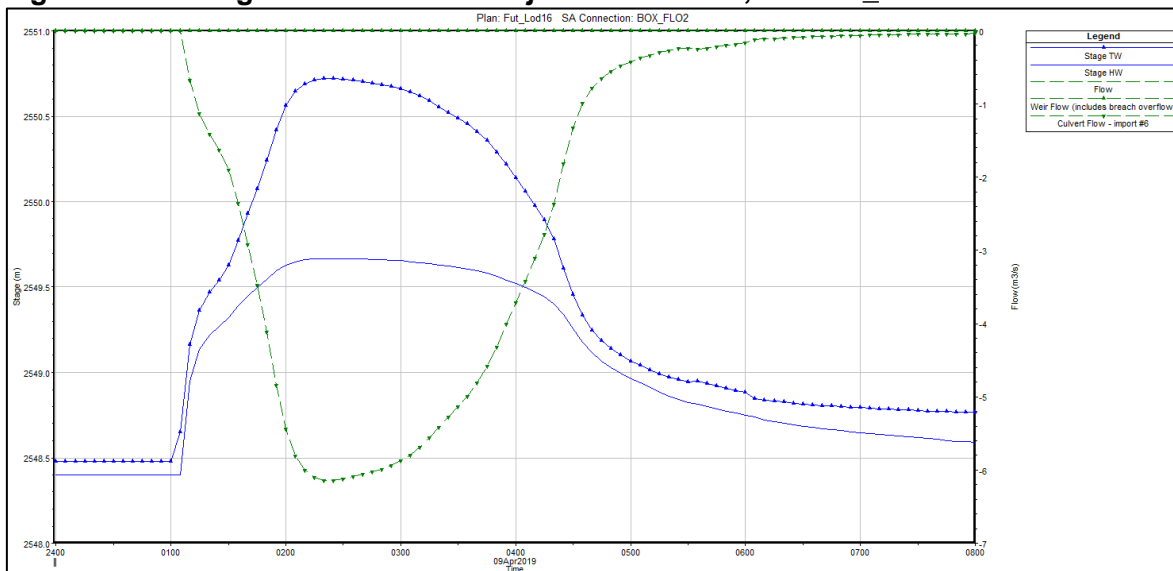
Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

Figura 289 Sección transversal alcantarilla cajón 1.5m x 3.0m, ID: Box_FLO1



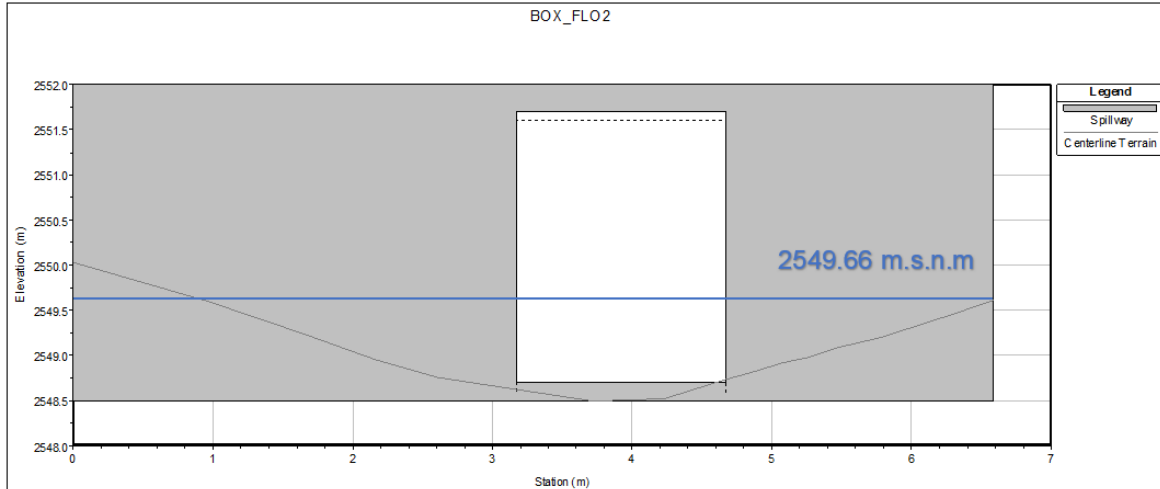
Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

Figura 290 Hidrograma alcantarilla cajón 1.5m x 3.0m, ID: Box_FLO2



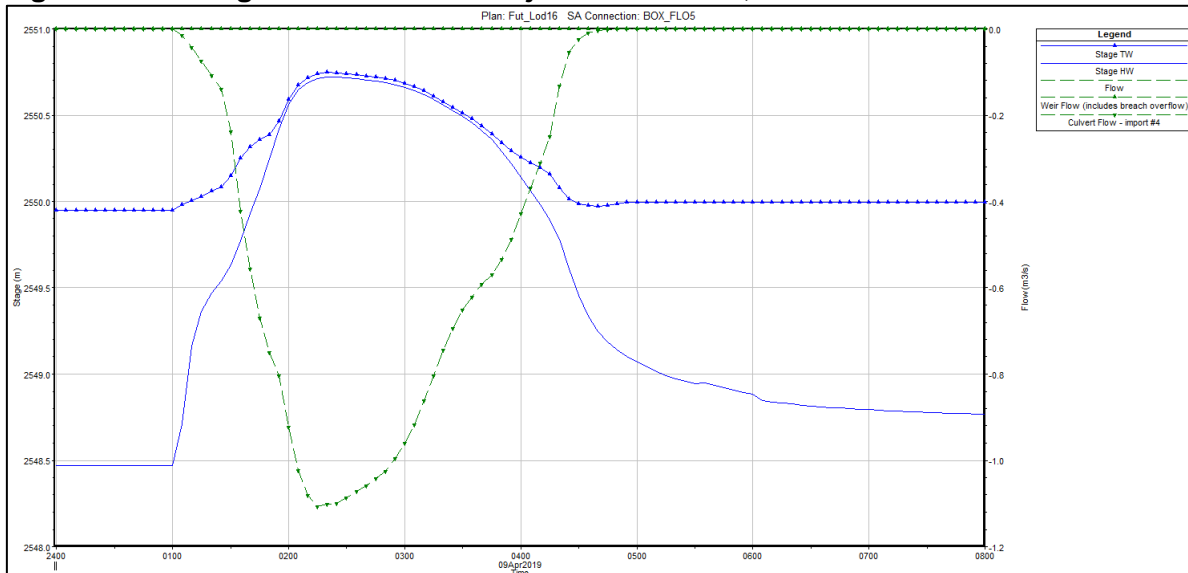
Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

Figura 291 Sección transversal alcantarilla cajón 1.5m x 3.0m, ID: Box_FLO2



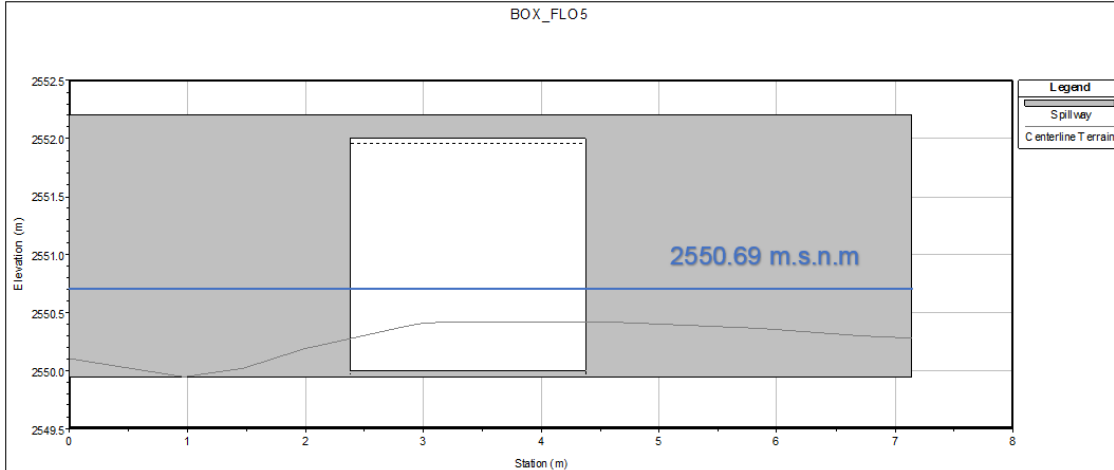
Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

Figura 292 Hidrograma alcantarilla cajón 2.0m x 2.0m, ID: Box_FLO5



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

Figura 293 Sección transversal alcantarilla cajón 2.0m x 2.0 m, ID: Box_FLO5



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

Figura 294 Vista en planta estructuras quebrada La Floresta

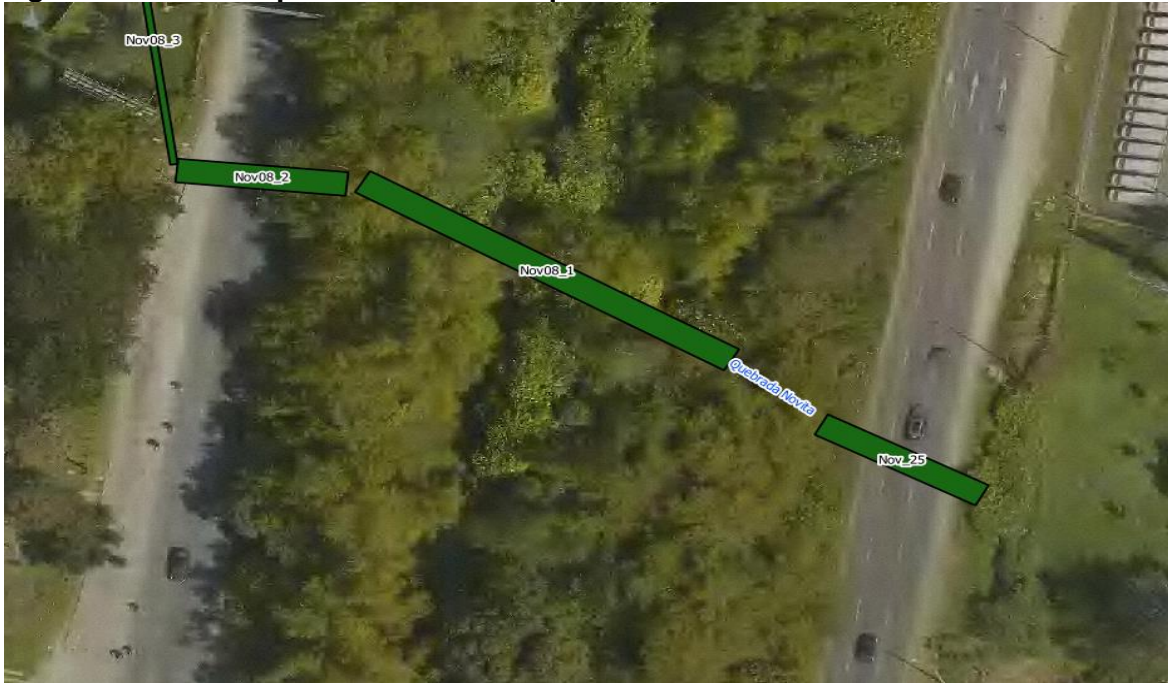


Fuente: WSP, 2019.

En la Figura 295 se presentan las estructuras que permiten el cruce de la quebrada La Novita por la autopista Norte. En la Figura 296 se presenta el hidrograma y los niveles alcanzados durante la simulación de la estructura identificada con el ID: Nov_25, en la Figura 297 se presenta la sección transversal y la cota máxima de la lámina de agua, en la cual se evidencia que no se alcanza a superar la capacidad máxima de la estructura. En la Figura 298 se presenta el hidrograma y los niveles alcanzados durante la simulación de la estructura identificada con el ID: Nov08_1, en la Figura 299 se presenta la sección

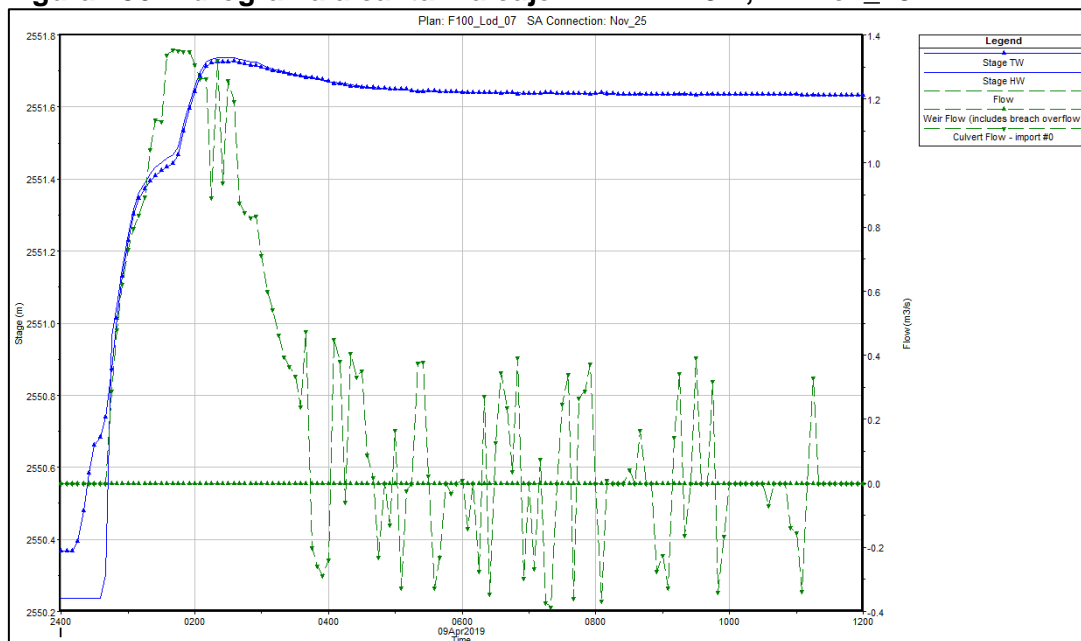
transversal y la cota máxima de la lámina de agua, en la cual se evidencia que no se alcanza a superar la capacidad máxima de la estructura.

Figura 295 Vista en planta estructuras quebrada Novita



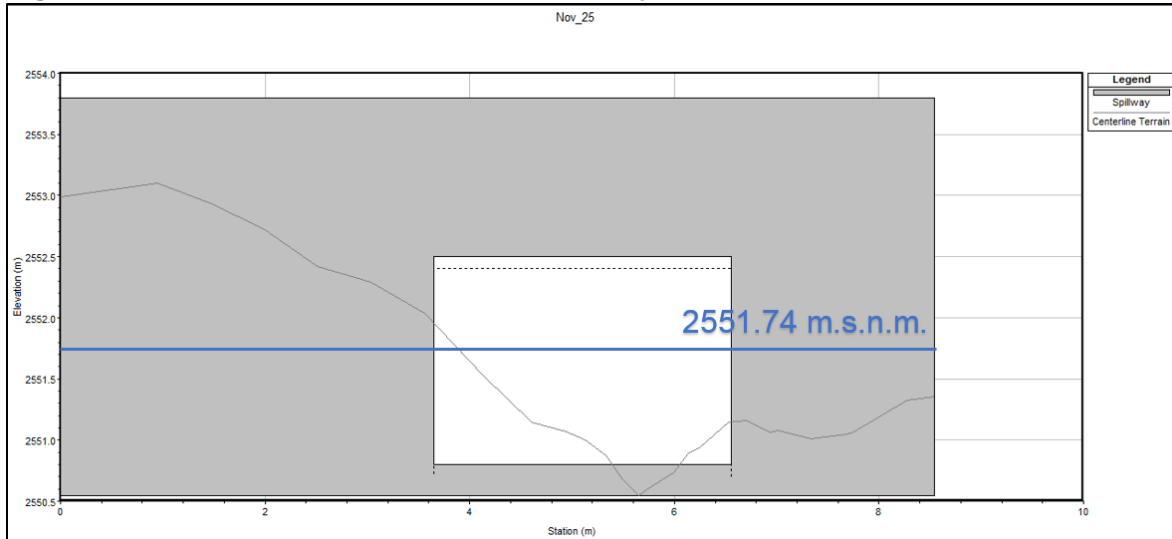
Fuente: WSP 2019.

Figura 296 Hidrograma alcantarilla cajón 1.7m x 2.9m, ID: Nov_25



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

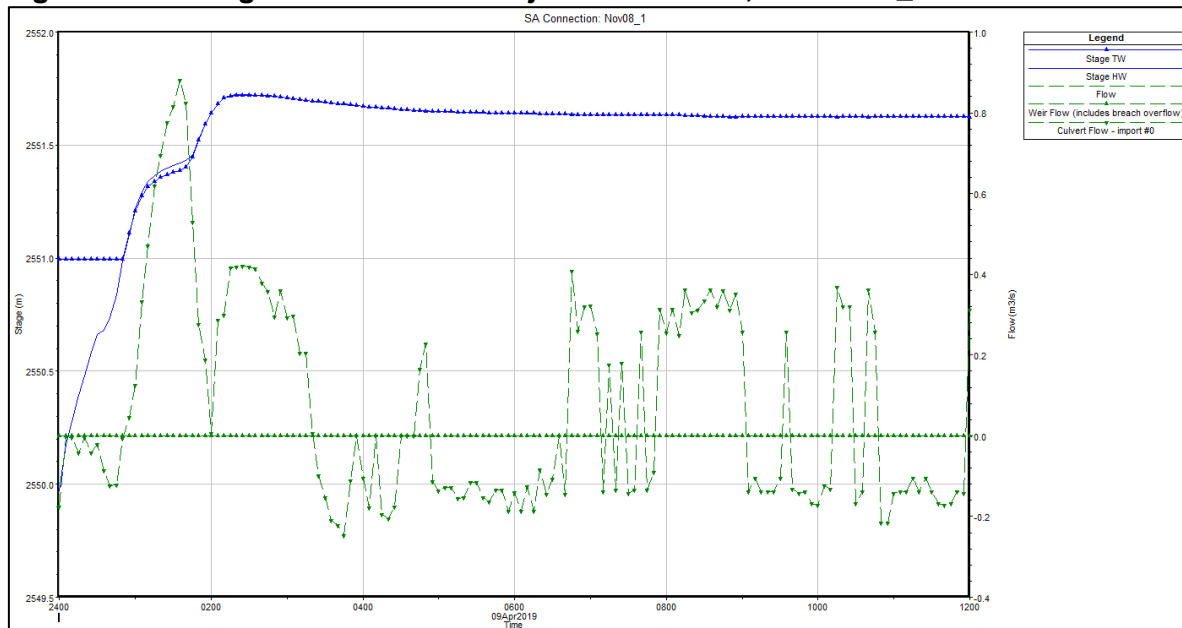
Figura 297 Sección transversal alcantarilla cajón 1.7m x 2.9m, ID: Nov_25



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

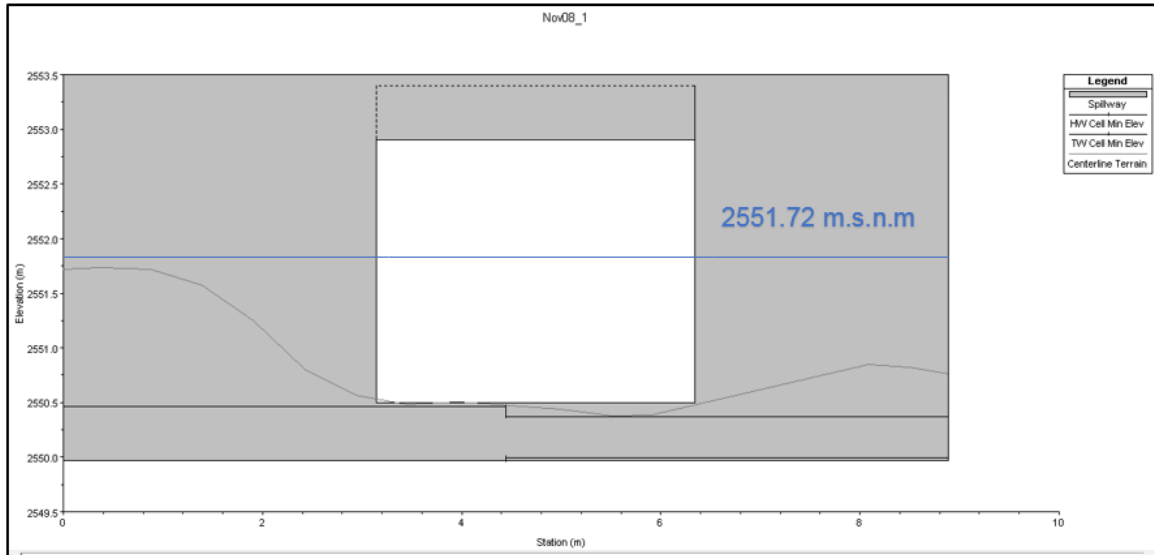
En la Figura 298 se presenta el hidrograma para la estructura identificada con el ID: Nov08_1, que corresponde a una alcantarilla de cajón de 3.2m de ancho por 2.4m de alto, la cota de rasante corresponde a 2553.5 m.s.n.m., en la Figura 299 se aprecia que la cota máxima para el periodo de retorno de 100 años no sobrepasa la capacidad máxima de la estructura, la estructura funciona a flujo libre.

Figura 298 Hidrograma alcantarilla cajón 3.2m x 2.4m, ID: Nov08_1



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

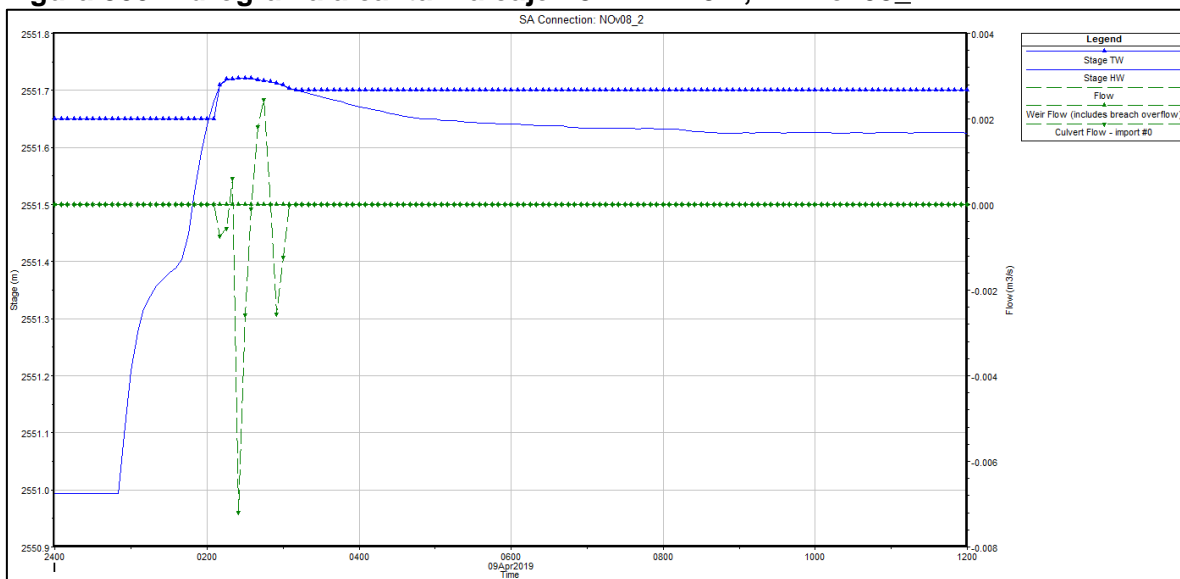
Figura 299 Sección transversal alcantarilla cajón 3.2m x 2.4m, ID: Nov08_1



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

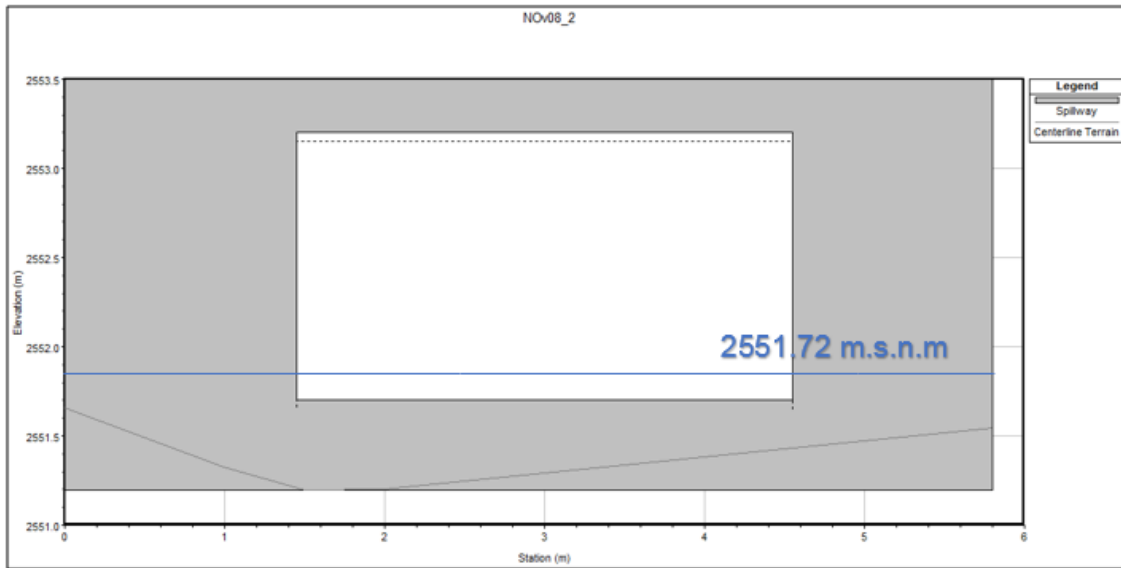
En la Figura 300 se presenta el hidrograma para la estructura identificada con el ID: Nov08_2, que corresponde a una alcantarilla de cajón de 3.1m de ancho por 1.5m de alto, la cota de rasante corresponde a 2553.5 msnm, en la Figura 301 se aprecia que la cota máxima para el periodo de retorno de 100 años no sobrepasa la capacidad máxima de la estructura, la estructura funciona a flujo libre.

Figura 300 Hidrograma alcantarilla cajón 3.1m x 1.5m, ID: Nov08_2



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

Figura 301 Sección transversal alcantarilla cajón 3.1m x 1.5m, ID: Nov08_2

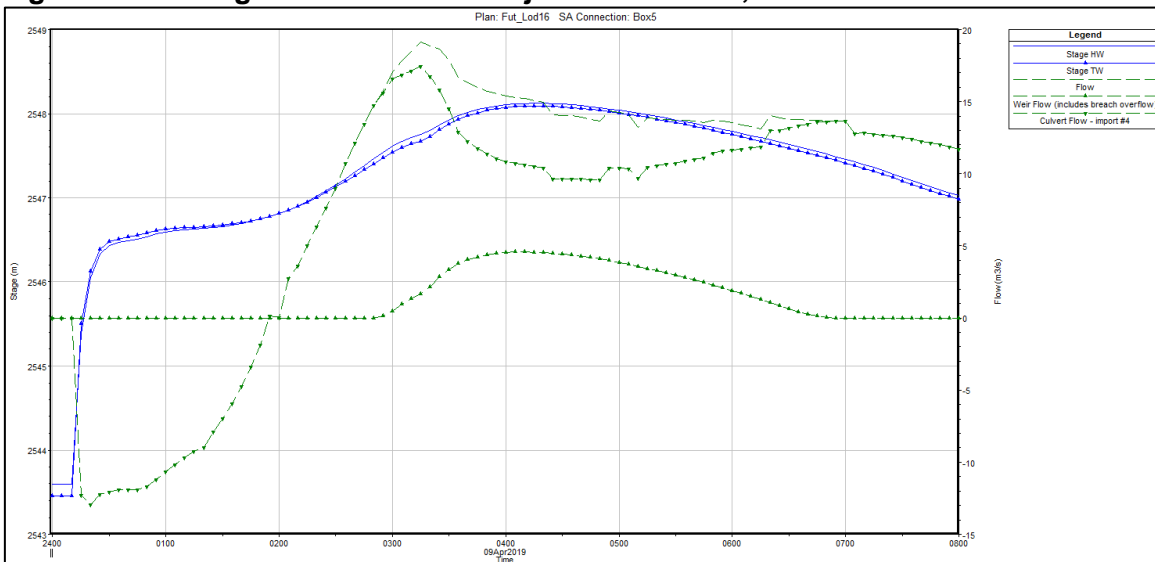


Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

6.3.15.1.2 Estructuras sobre Canal Guaymaral

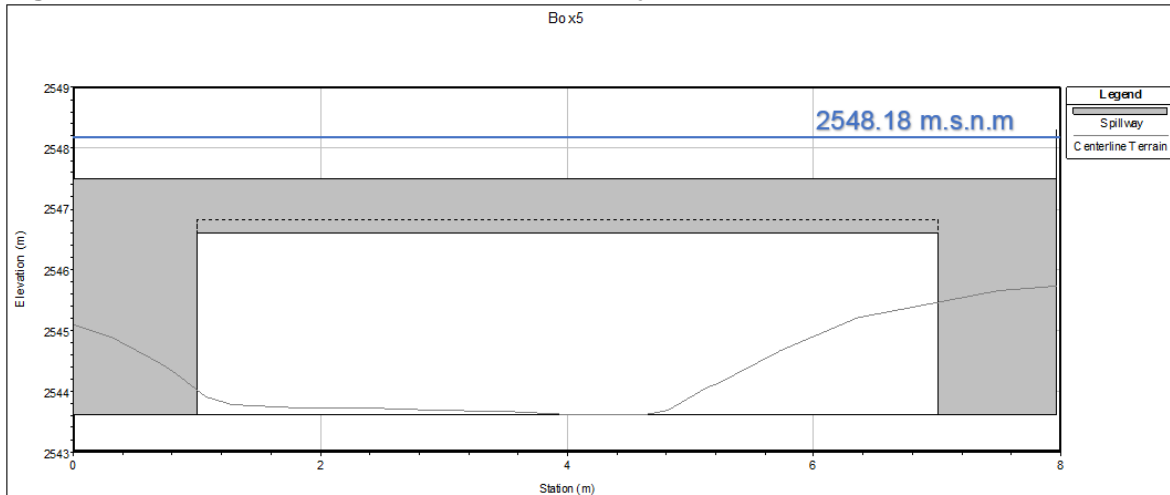
En la Figura 302 se presentan los hidrogramas y el nivel de agua que circula a lo largo de la estructura identificada con el ID: Box5, en la cual se aprecia un caudal pico cerca de la 3 hora de simulación. La cota de rasante de la vía es de 2547.50 m.s.n.m., en la Figura 303 se presenta la sección transversal y la cota máxima de agua para el periodo de retorno de 100 años, la capacidad máxima de la estructura es superada, se aprecia que la lámina supera la cota de rasante de la vía.

Figura 302 Hidrograma alcantarilla cajón 6.0m x 3.0m, ID: Box5



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

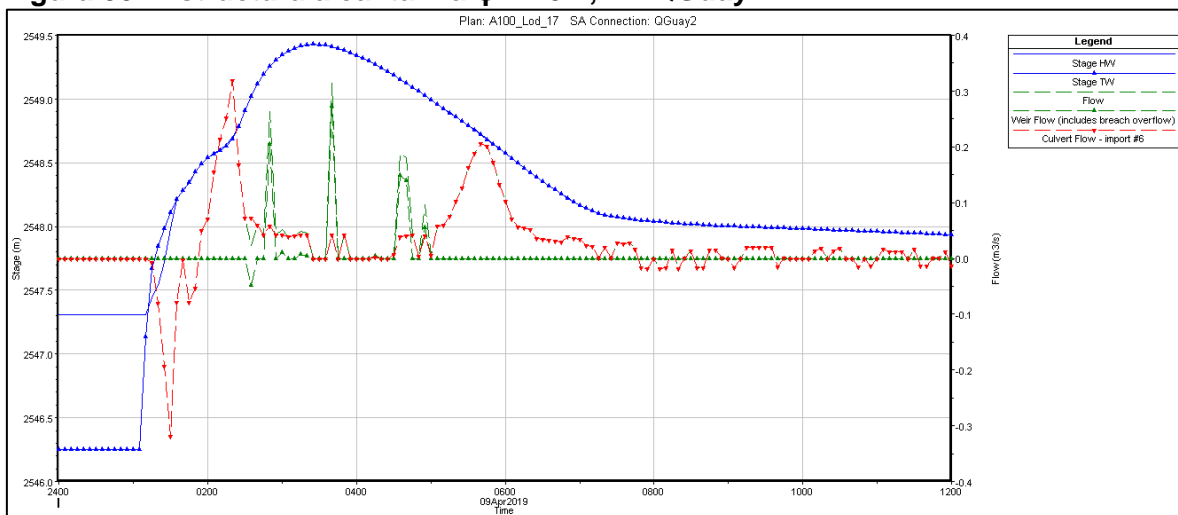
Figura 303 Sección transversal alcantarilla cajón 6.0m x 3.0m, ID: Box5



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

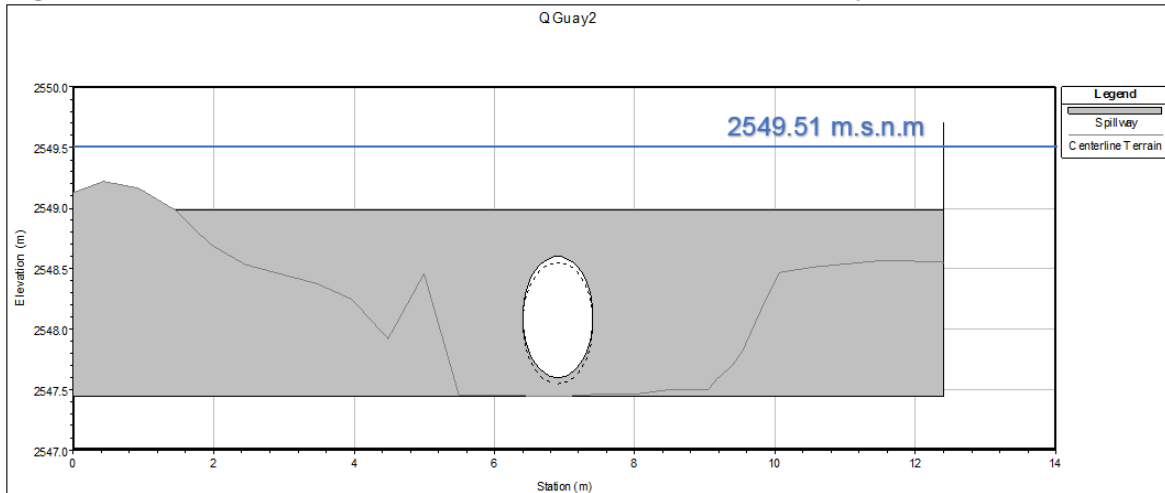
En la Figura 304 se presenta el comportamiento a lo largo del periodo de simulación de la estructura identificada con el ID: QGuay2, sobre el canal Guaymaral, la cota de rasante de la vía es de 2548.99 m.s.n.m., esta cota es alcanzada alrededor de las 2.3 horas de simulación. En la Figura 305 se presenta la sección transversal de la alcantarilla de 1.0 m de diámetro, en la cual se aprecia que la cota de rasante es superada por la cota máxima correspondiente al periodo el retorno de 100 años. En la Figura 306 se presenta la vista en planta de la estructura.

Figura 304 Estructura alcantarilla $\phi = 1.0\text{m}$, ID: QGuay2



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

Figura 305 Sección transversal alcantarilla $\phi=1.0\text{m}$, ID: QGuay2



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

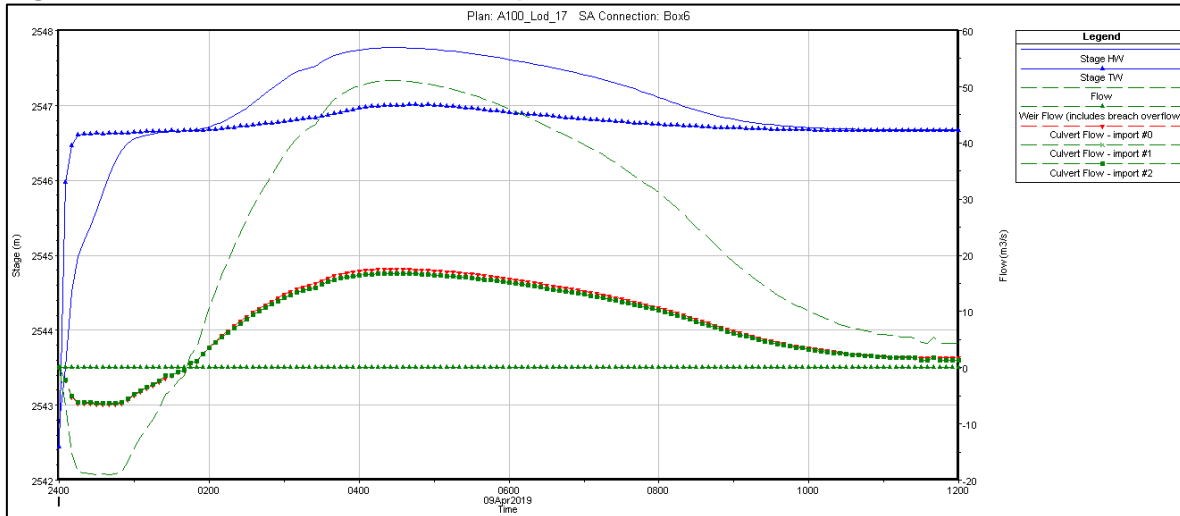
Figura 306 Vista en planta estructura ID: QGuay2



Fuente: WSP, 2019.

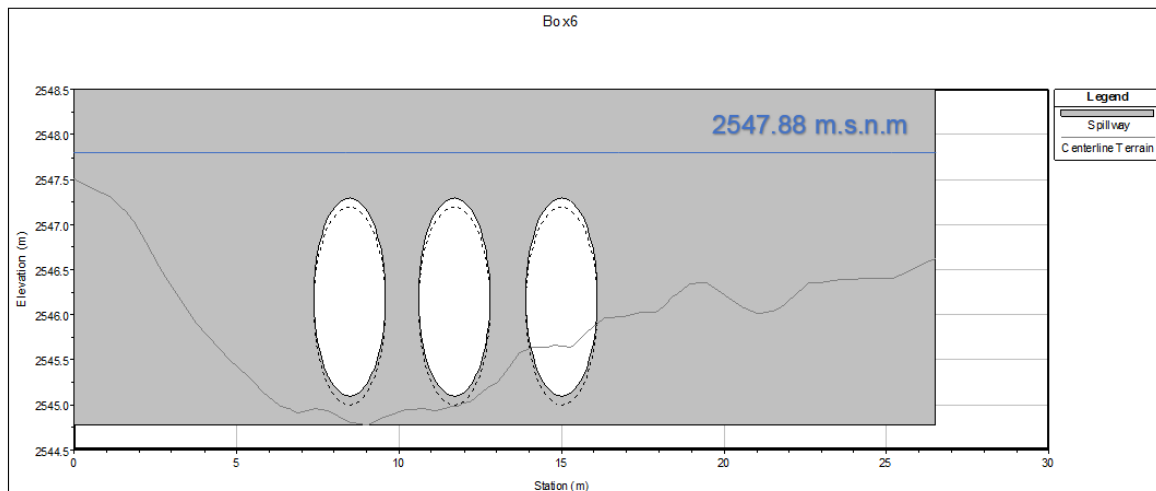
En la Figura 307 se presenta el comportamiento hidráulico de la estructura identificada con el ID: Box6, localizada sobre el canal Guaymaral, esta estructura está conformada por 3 alcantarillas paralelas de 2.2 de diámetro, la cota de rasante de la vía corresponde a 2548.58 m.s.n.m., se evidencia que esta cota no es sobrepasada por la lámina de agua durante todo el periodo de simulación. En la Figura 308 se presenta la sección transversal de la estructura, en la cual se aprecia que la cota clave de las alcantarillas es superada por la cota máxima generada por la simulación de los caudales periodo de retorno de 100 años.

Figura 307 Estructura 3 alcantarillas paralelas ϕ :2.2 m, ID: Box6



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

Figura 308 Sección transversal 3 alcantarillas paralelas ϕ =2.2m, ID: Box6



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

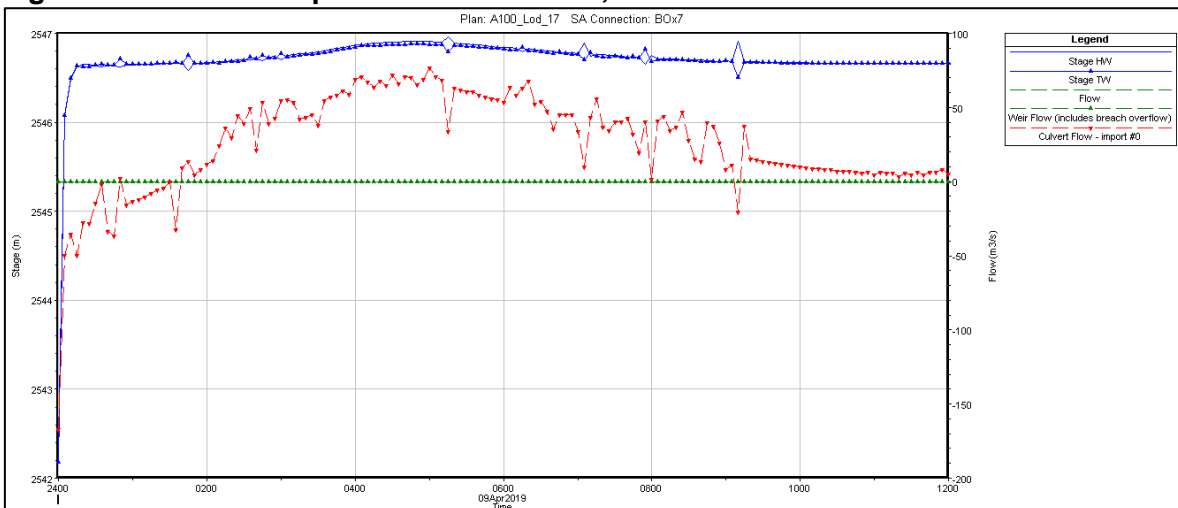
Figura 309 Vista en planta estructura ID: Box6



Fuente: WSP, 2019.

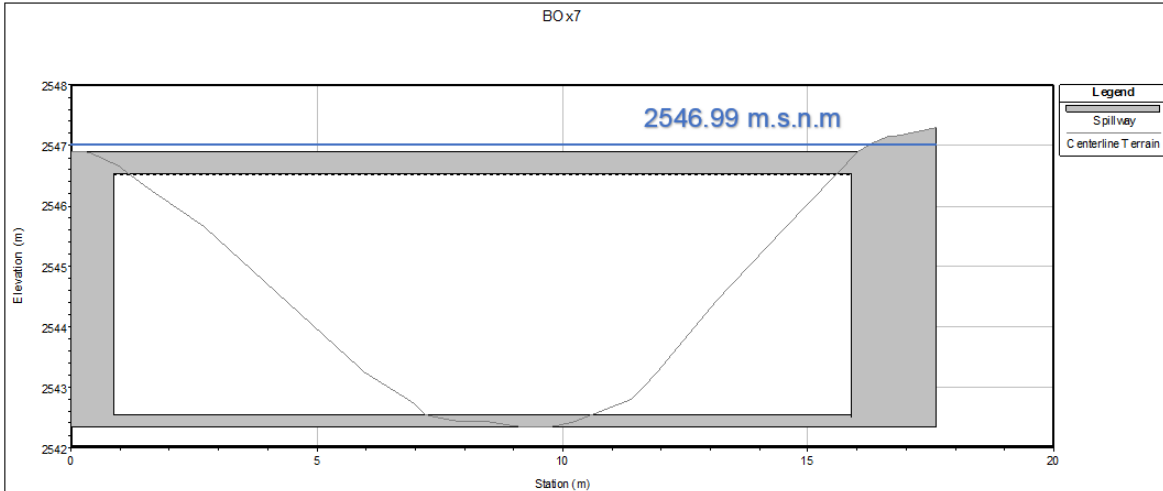
En la Figura 310 se presenta el comportamiento hidráulico de la estructura identificada con el ID Box7, que corresponde a un pontón de sección de 15.0 m de ancho y 430 m de alto, la cual se localiza sobre el Canal Guaymaral, la cota de rasante de la vía corresponde a 2546.91 m.s.n.m., en la Figura 311 se evidencia que la cota es superada por la cota máxima de inundación para el periodo de retorno de 100 años.

Figura 310 Estructura pontón 15.0m x 4.0m, ID: Box7



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

Figura 311 Sección transversal de 15.0m x 4.0m, ID: Box7



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

Figura 312 Vista en planta estructura ID: Box7



Fuente: WSP, 2019.

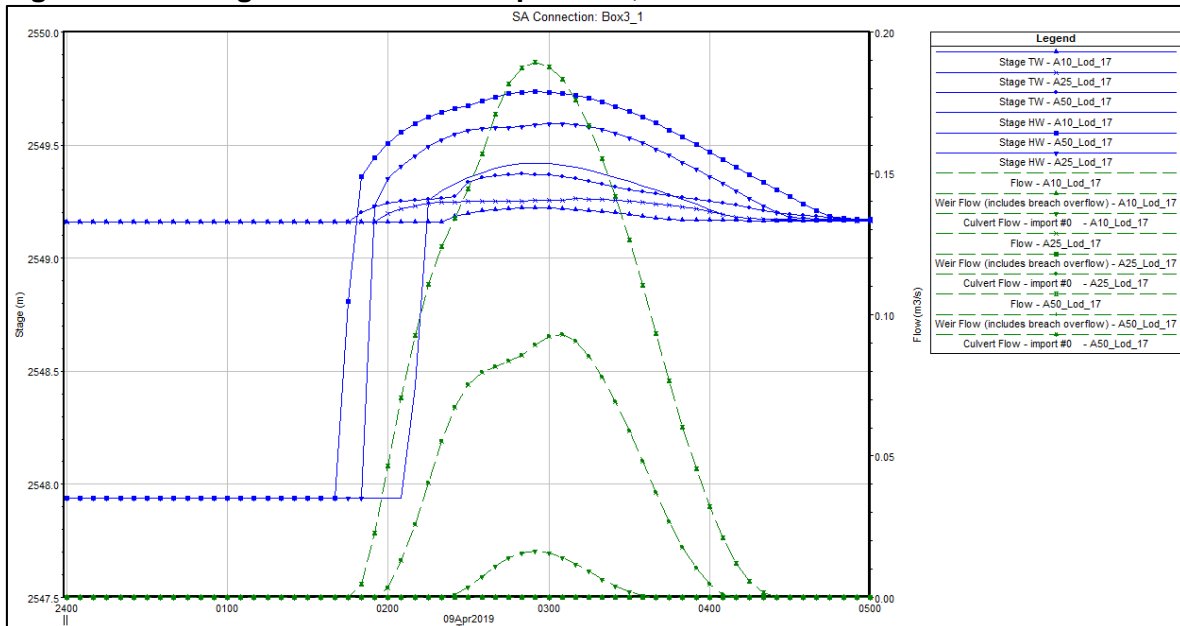
6.3.15.2 Análisis otros periodos de retorno

A continuación, se presenta el análisis comparativo del comportamiento hidráulico de las estructuras principales del sistema para escenarios de simulación para caudales de 10, 25 y 50 años de periodo de retorno.

6.3.15.2.1 Estructuras de cruce Autopista Norte

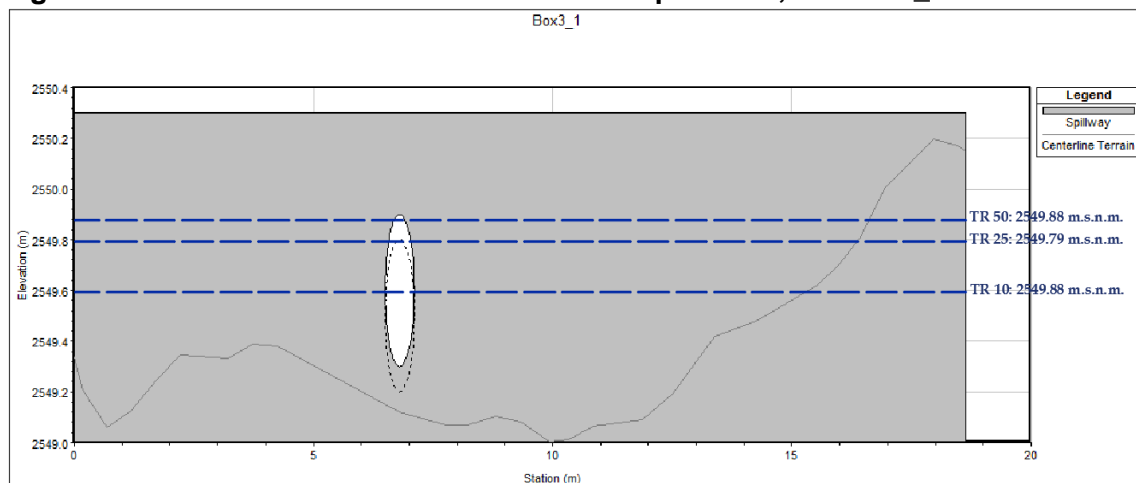
En la Figura 313 se presenta el comportamiento hidráulico de la estructura identificada con el ID Box3_1, la cual corresponde a una alcantarilla de 0.60 m de diámetro, la cota de rasante de la vía corresponde a 2550.3 m.s.n.m. De acuerdo con los resultados obtenidos de los modelos para los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años, en la Figura 314 se presentan las cotas máximas de inundación resultantes, en las que se evidencia un control hidráulico aguas abajo por los niveles de los cales centrales de la autopista, lo cual controla la descarga a través de esa estructura.

Figura 313 Hidrogramas alcantarilla $\phi=0.60\text{m}$, ID: Box3_1



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

Figura 314 Sección transversal alcantarilla de $\phi=0.60\text{ m}$, ID: Box3_1

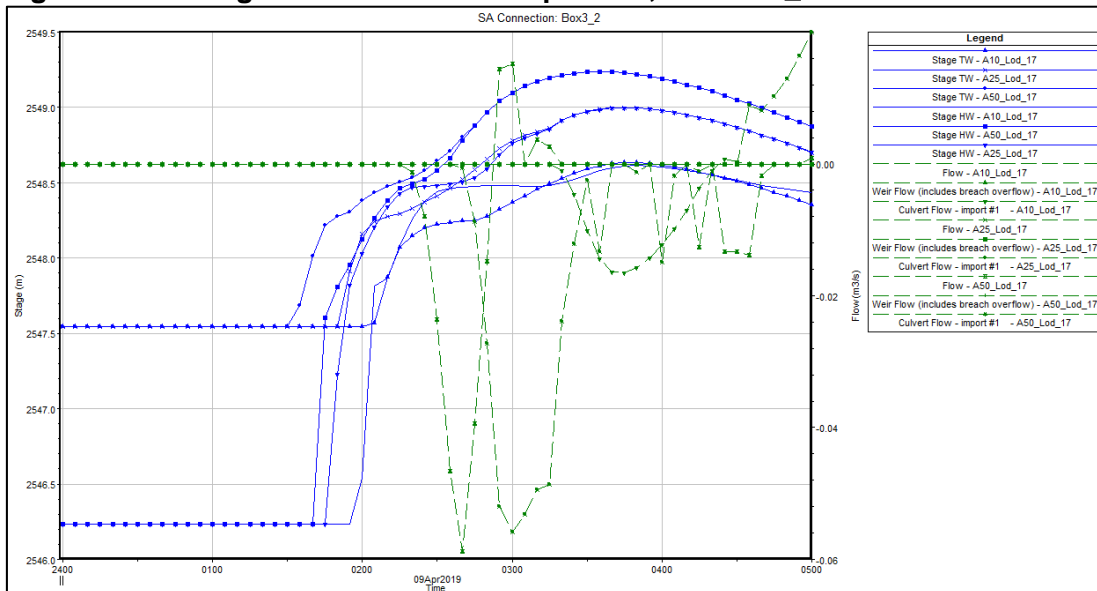


Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

Lo anterior indica que esta obra requiere reemplazarse y compaginar la adecuación de la futura Autopista Norte, aunque condicionado a los resultados que se definan en esta consultoría, y que se especificará en el Productos 5 y el Producto 7.

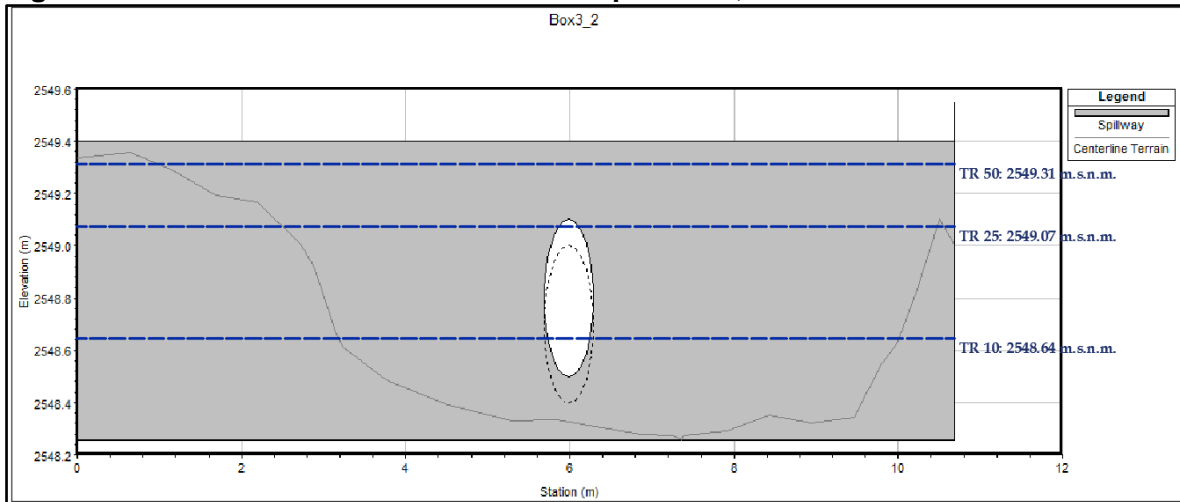
En la Figura 315 se presenta el comportamiento de la estructura identificada con el ID: Box3_2, la cual corresponde a una alcantarilla de 0.60 m de diámetro, la cota de rasante corresponde a 2549.4 msnm. En la Figura 316 se presentan las cotas máximas de inundación resultantes, en las que se evidencia un control hidráulico aguas abajo por los niveles del canal Guaymaral aguas abajo, lo cual controla la descarga a través de esa estructura.

Figura 315 Hidrograma alcantarilla de $\phi=0.6$ m, ID: Box3_2



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

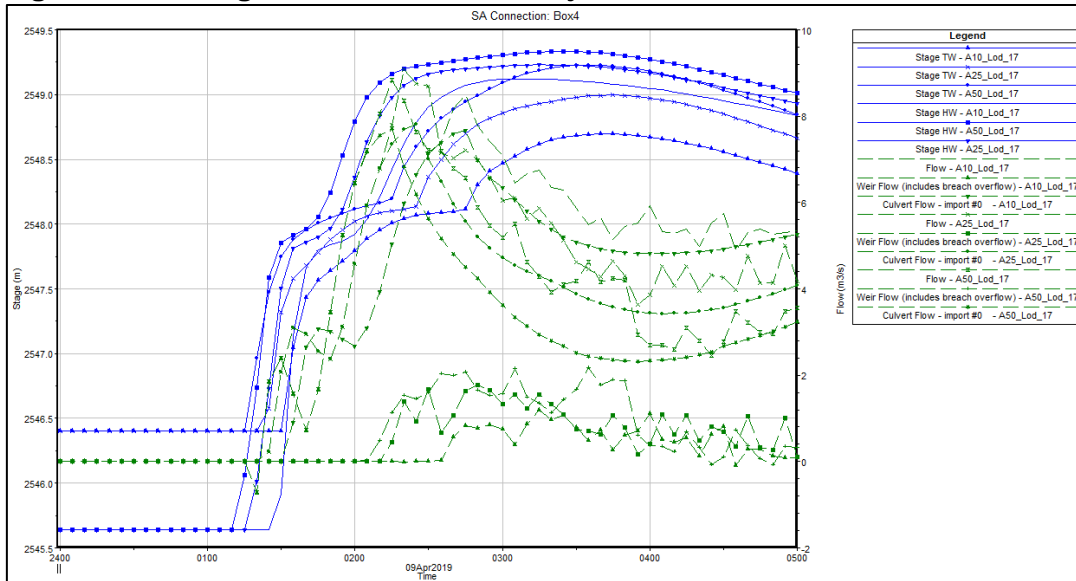
Figura 316 Sección transversal alcantarilla $\phi=0.60$ m, ID: Box3_2



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

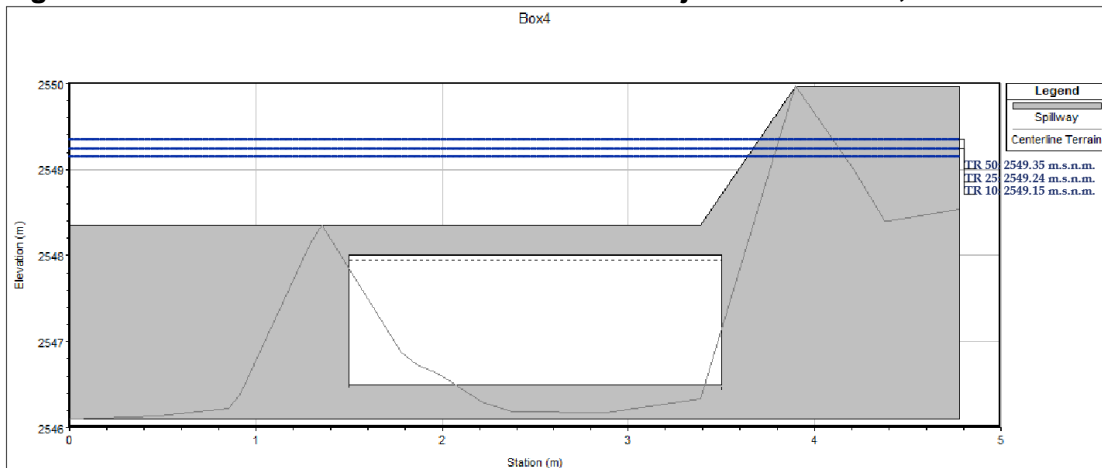
En la Figura 317 se presenta el comportamiento de la estructura identificada con el ID: Box4, corresponde a una alcantarilla de cajón de 2.0m x 1.5m, la cota de rasante corresponde a 2548.36 m.s.n.m., la estructura para todos los periodos de retorno analizados (10, 25 y 50 años), supera su capacidad máxima cerca de la segunda hora de inicio de la simulación.

Figura 317 Hidrograma alcantarilla de cajón de 2.0m x 1.5m, ID: Box4



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

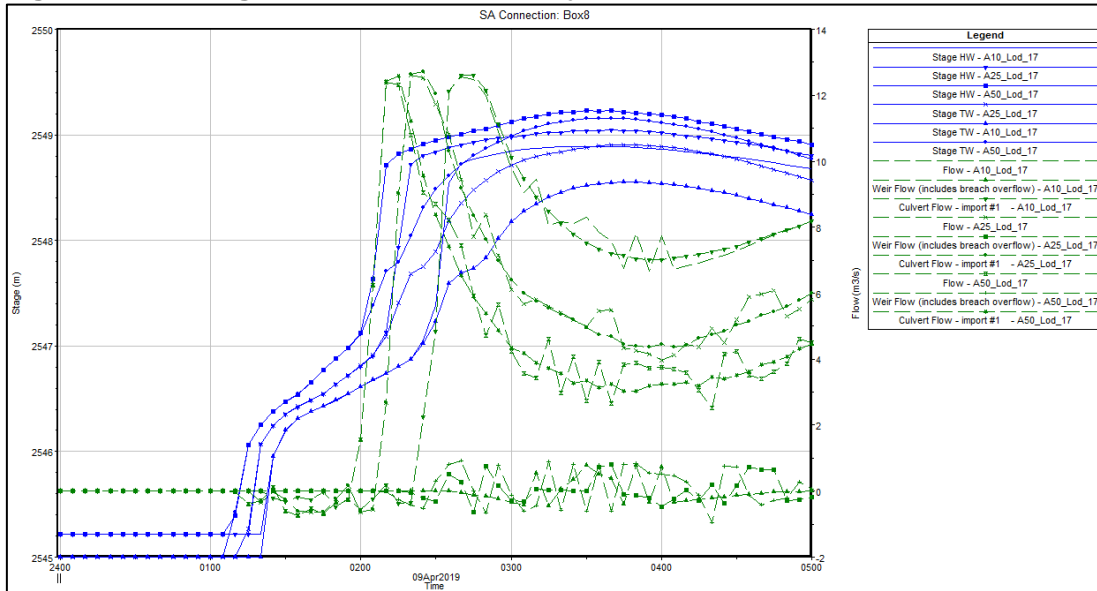
Figura 318 Sección transversal alcantarilla de cajón 2.0m x 1.5m, ID: Box4



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

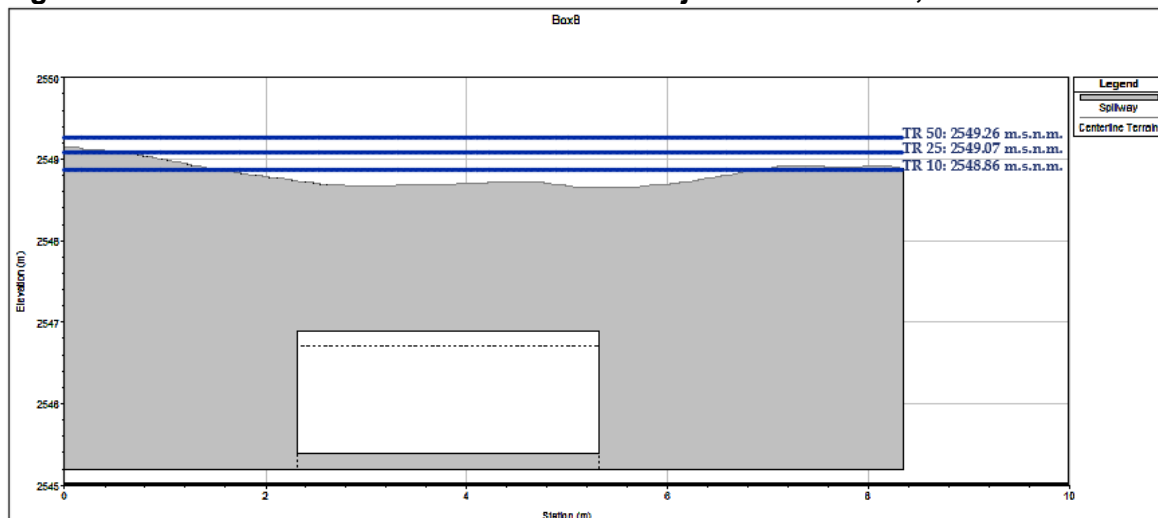
En la Figura 319 se presenta el comportamiento de la estructura denominada Box8, que corresponde a una alcantarilla de cajón de 3.0m x 1.5m, la cota de rasante de la vía corresponde a 2548.69 m.s.n.m., de acuerdo con los resultados de la modelación para los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años, la capacidad máxima de la estructura es superada, alrededor de la segunda hora de simulación, tal como se presenta en la Figura 320.

Figura 319 Hidrograma alcantarilla de cajón de 3.0m x 1.5m, ID: Box8



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

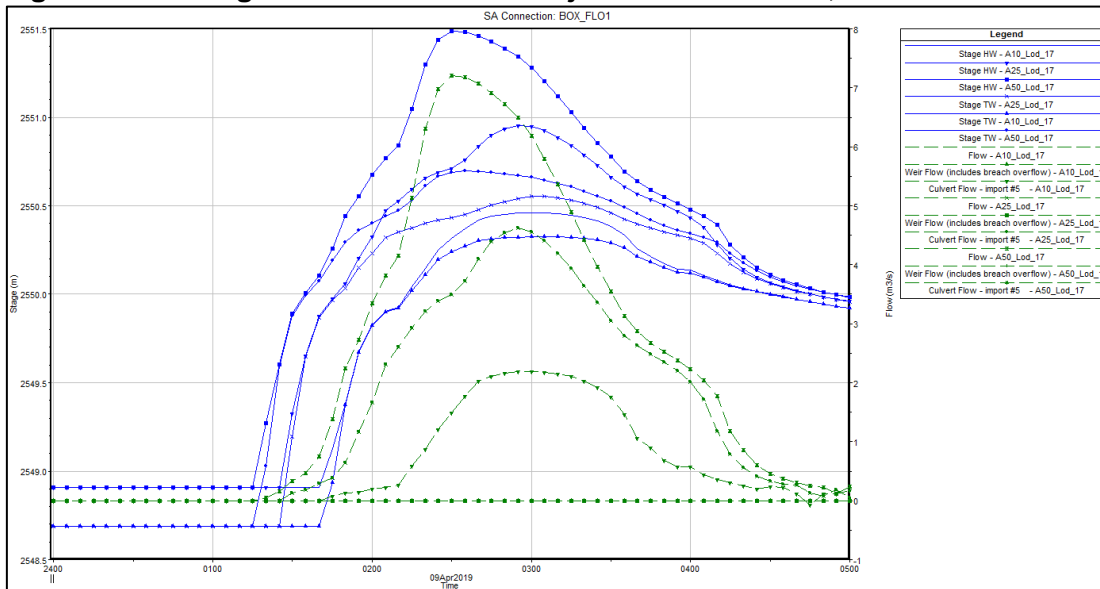
Figura 320 Sección transversal alcantarilla de cajón 3.0m x 1.50m, ID: Box8



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

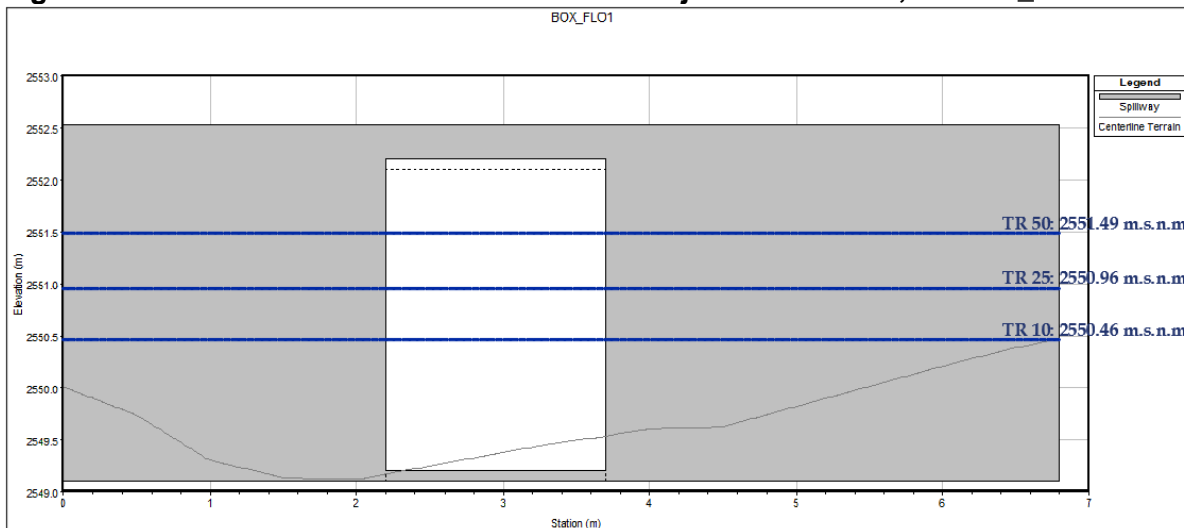
En la Figura 321 se presenta el comportamiento de la estructura identificada con el ID: Box_FLO1, corresponde a una alcantarilla de cajón de 1.5m x 3.0m, la cota de rasante de la vía corresponde a 2552.53 m.s.n.m., la estructura para los periodos de retorno analizados (10, 25 y 50 años) funciona por debajo de su capacidad máxima.

Figura 321 Hidrograma alcantarilla de cajón de 1.5m x 3.0m, ID: Box_FLO1



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

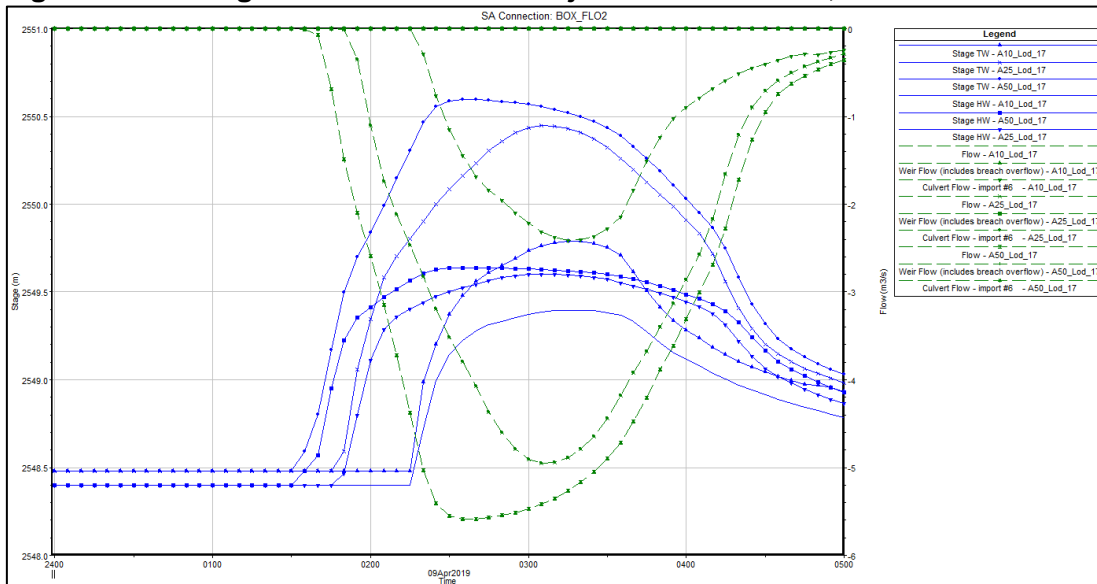
Figura 322 Sección transversal alcantarilla de cajón 1.5m x 3.0m, ID: Box_Flo1



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

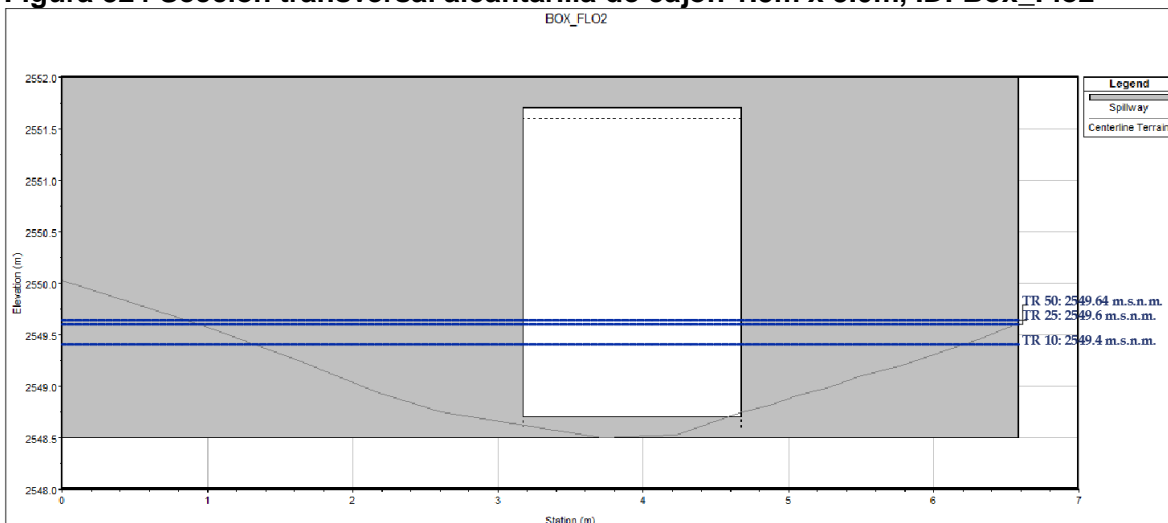
En la Figura 323 se presenta el comportamiento de la estructura identificada con el ID: Box_FLO2, la cota de rasante corresponde a 2552.0 m.s.n.m., corresponde a una alcantarilla de cajón de 1.5m x 3.0m. Periodos de retorno analizados (10, 25 y 50 años), la estructura funciona por debajo de su capacidad máxima.

Figura 323 Hidrograma alcantarilla de cajón de 1.5m x 3.0m, ID: Box_FLO2



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

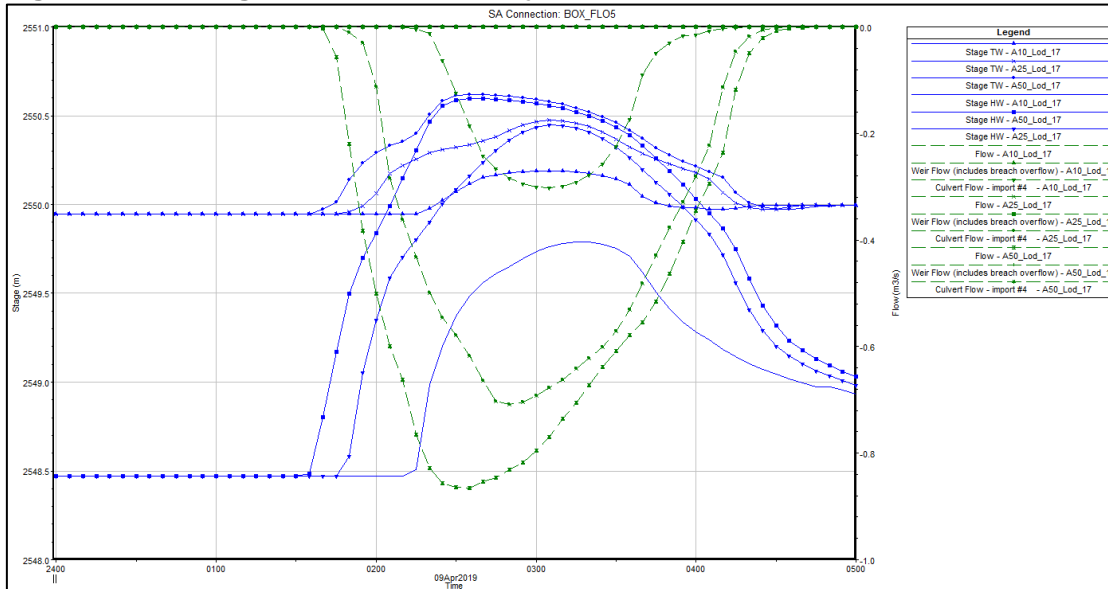
Figura 324 Sección transversal alcantarilla de cajón 1.5m x 3.0m, ID: Box_Flo2



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

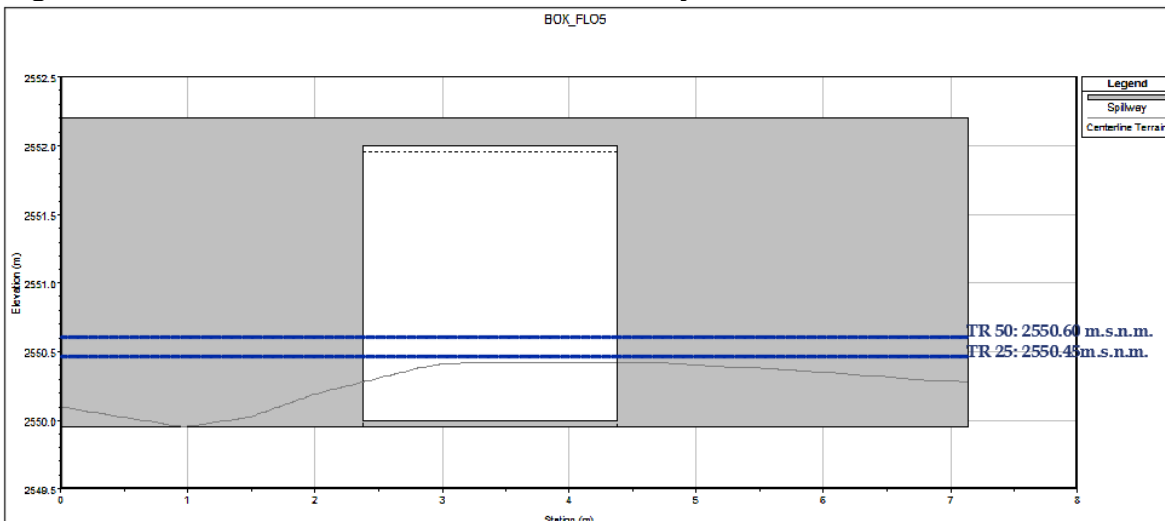
En la Figura 325 se presenta el comportamiento de la estructura identificada con el ID: Box_FLO5, corresponde a una alcantarilla de cajón de 2.0m x 2.0 m, la cota de rasante es de 2552.20 m.s.n.m., para los periodos de retorno analizados (10, 25 y 50 años), la estructura funciona por debajo de su capacidad máxima.

Figura 325 Hidrograma alcantarilla cajón de 2.0m x 2.0 m, Box_FLO5



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

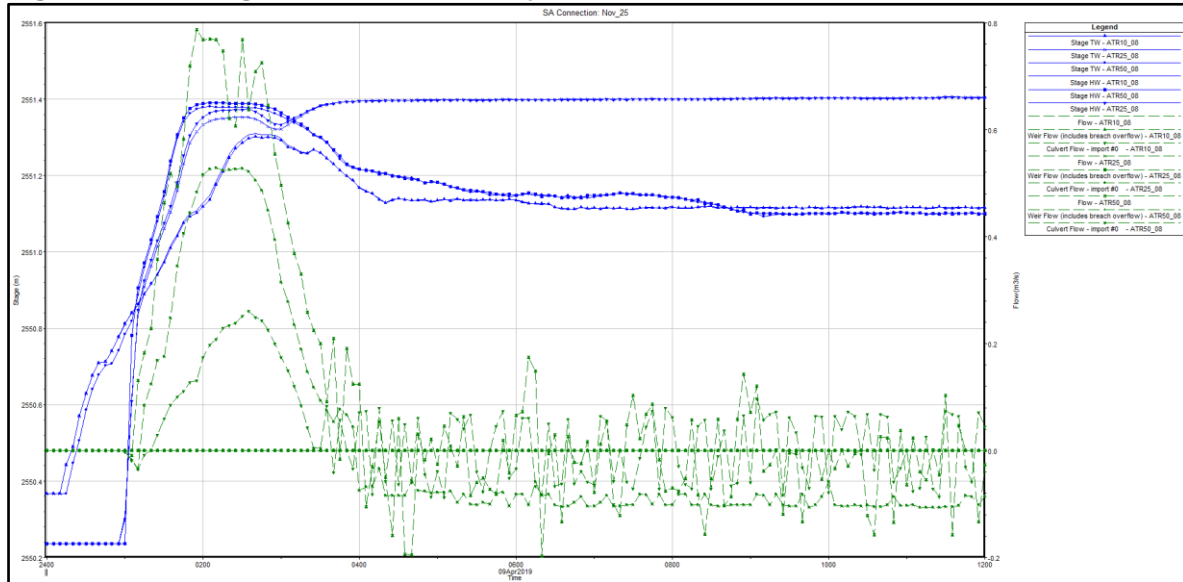
Figura 326 Sección transversal alcantarilla de cajón 2.0m x 2.0 m, ID: Box_Flo5



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

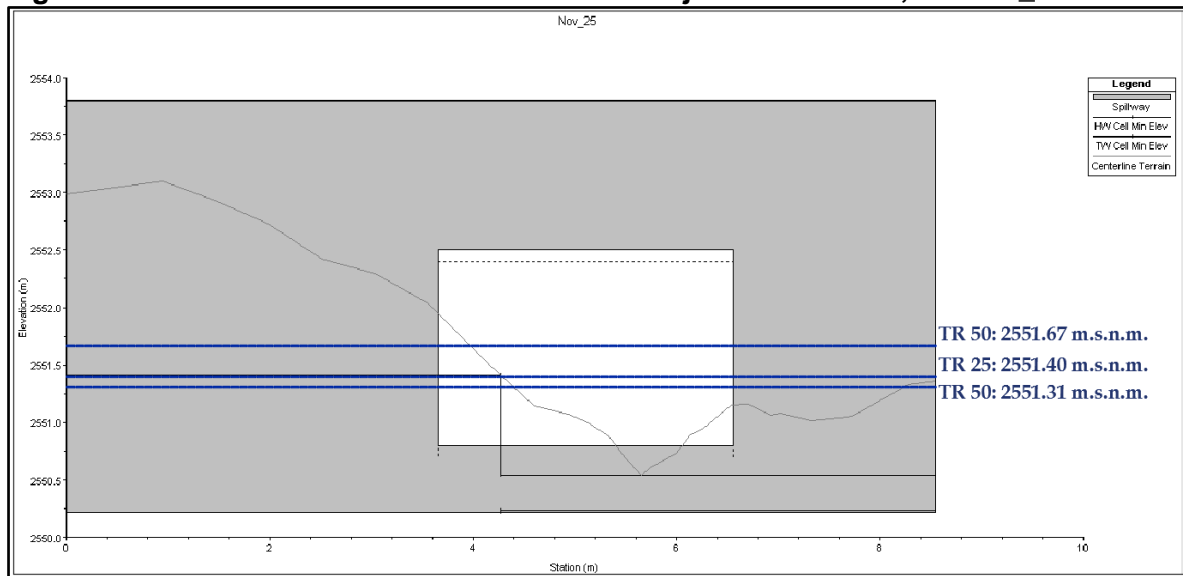
En la Figura 327 se presentan los hidrogramas para los periodos de retorno analizados de 10, 25 y 50 años, en la estructura identificada con el ID: Nov25, que corresponde a una alcantarilla de cajón de 1.7m x 2.9m, la cota de rasante de 2553.8 m.s.n.m., Tal como se aprecia en la Figura 328, se parecía que de acuerdo con los resultados de la simulación la estructura para los tres periodos de retorno funciona muy por debajo de su capacidad máxima.

Figura 327 Hidrograma alcantarilla cajón 1.7m x 2.9m Nov_25



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

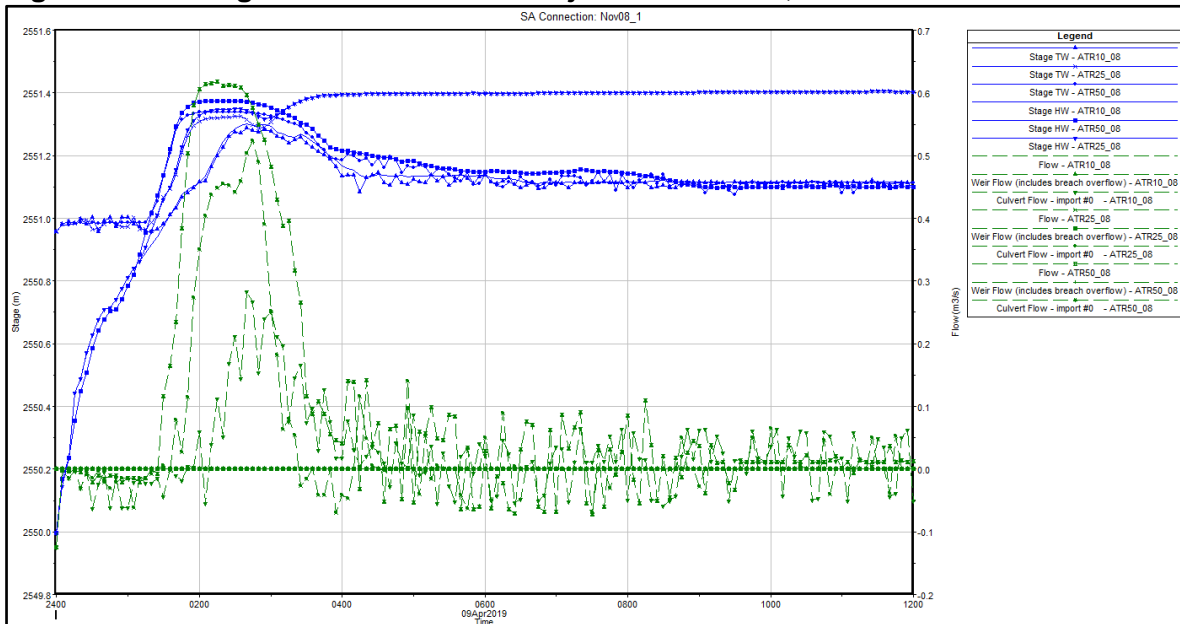
Figura 328 Sección transversal alcantarilla de cajón 1.7m x 2.9m, ID: Nov_25



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

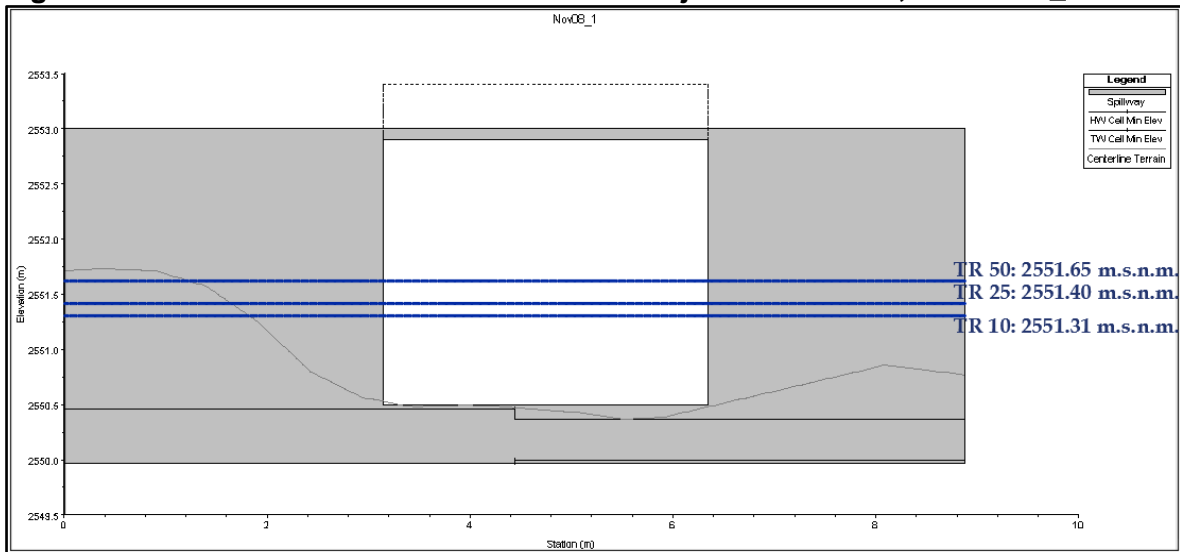
En la Figura 329 se presentan los hidrogramas correspondientes a la estructura identificada con el ID: Nov08_1, para los escenarios de modelación de 10, 25 y 50 años de periodo de retorno. La estructura presenta una sección transversal rectangular 3.2m x 2.4m, la cota de rasante es 2553.0 m.s.n.m. Tal como se aprecia en la Figura 330, se parecía que de acuerdo con los resultados de la simulación la estructura para los tres periodos de retorno funciona por debajo de su capacidad máxima.

Figura 329 Hidrograma alcantarilla de cajón 3.2m x 2.4m, ID: Nov08_1



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

Figura 330 Sección transversal alcantarilla de cajón 3.2m x 2.4m, ID: Nov08_1

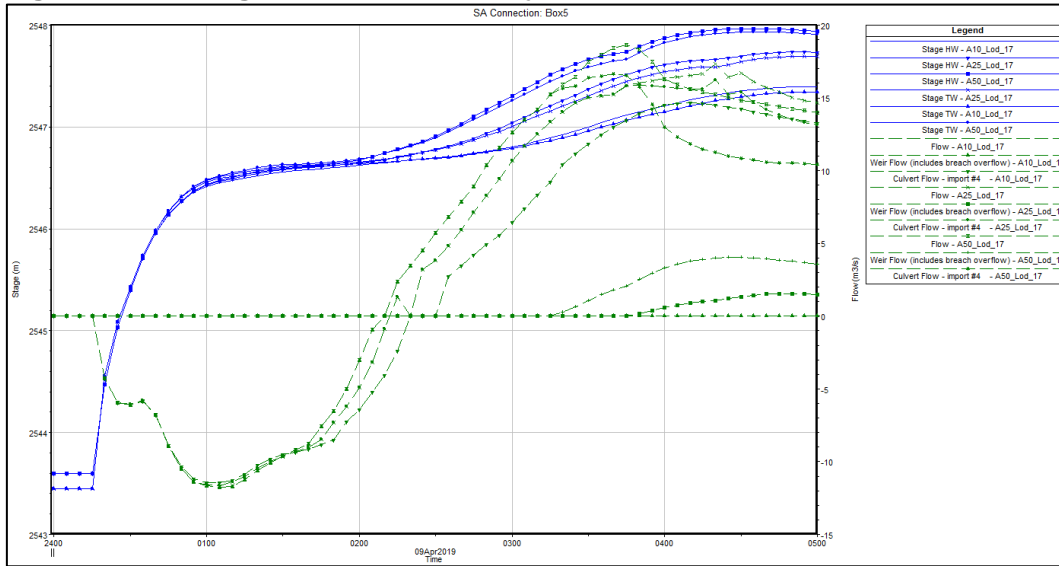


Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

6.3.15.2 Estructuras sobre Canal Guaymaral

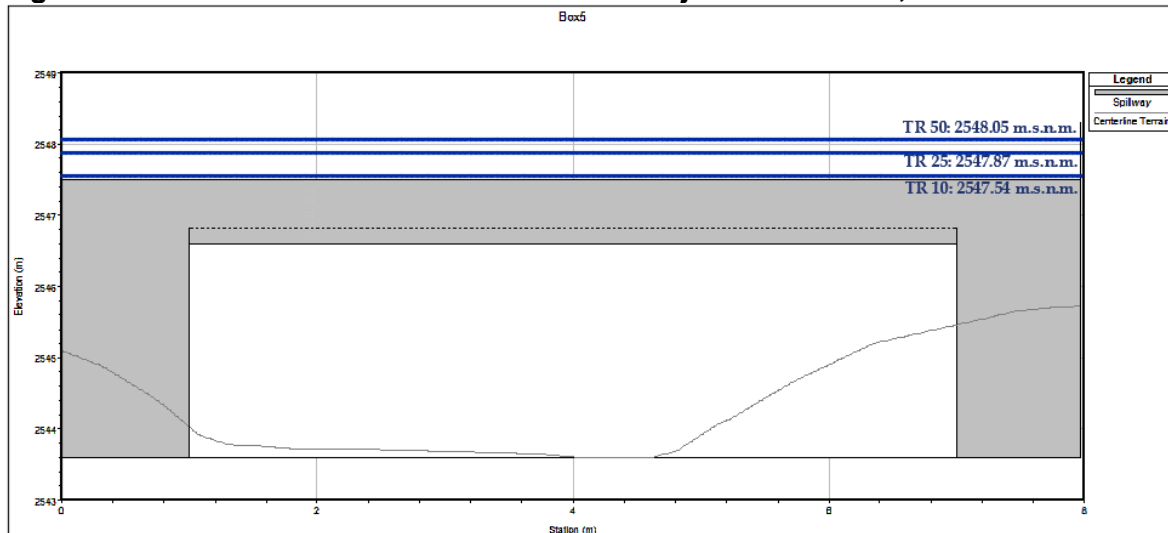
En la Figura 331 se presenta el comportamiento de la estructura identificada con el ID Box5, la cota de rasante de la vía es de 2547.50 m.s.n.m., la sección transversal de la estructura presenta una forma rectangular de 6.0m de ancho por 3.0 m de alto. De acuerdo con los resultados de las simulaciones, la estructura supera su capacidad máxima para los tres periodos de retorno analizados (10, 25 y 50 años), tal como se aprecia en la Figura 332.

Figura 331 Hidrograma alcantarilla cajón de 6.0m x 3.0 m, ID: Box5



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

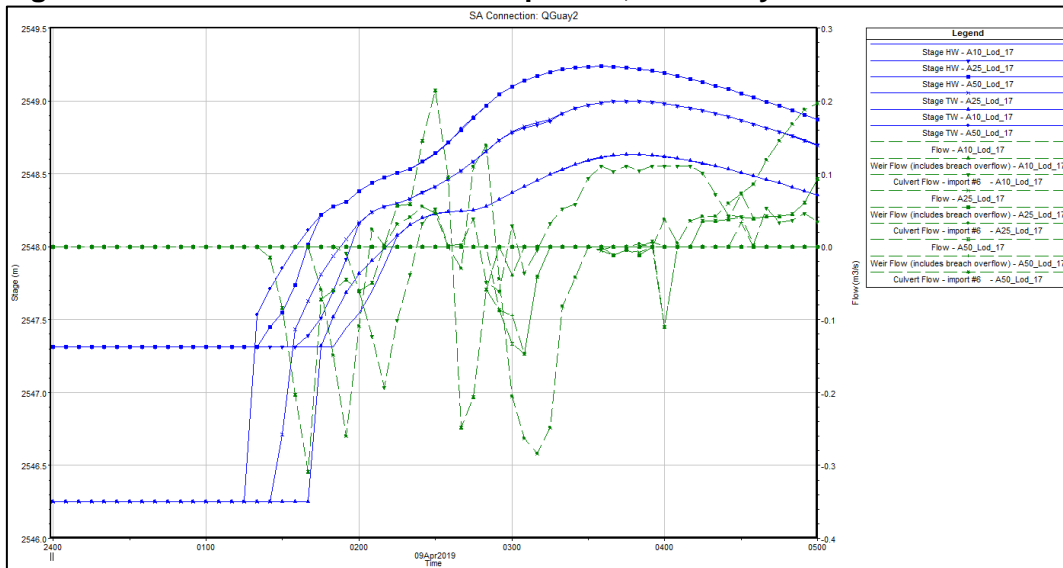
Figura 332 Sección transversal alcantarilla de cajón 6.0m x 3.0m, ID: Box5



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

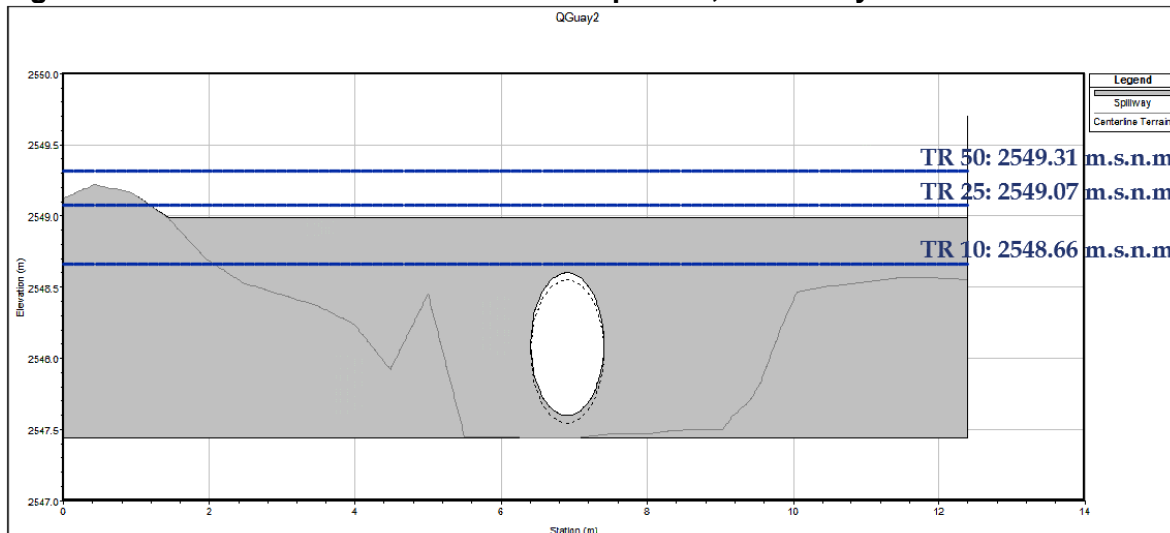
En la Figura 333 se presenta el comportamiento de la estructura identificada con el ID Qguay2, la cual corresponde a una alcantarilla de 1.0m de diámetro, la cota de rasante de la vía es de 2548.99 m.s.n.m., la estructura para los periodos de retorno llega a su máxima capacidad alrededor de la segunda hora de simulación. De acuerdo con los resultados de las simulaciones, la estructura supera su capacidad máxima para los tres periodos de retorno analizados (10, 25 y 50 años), tal como se aprecia en la Figura 334.

Figura 333 Estructura alcantarilla de $\phi=1.0\text{m}$, ID:QGuay2



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

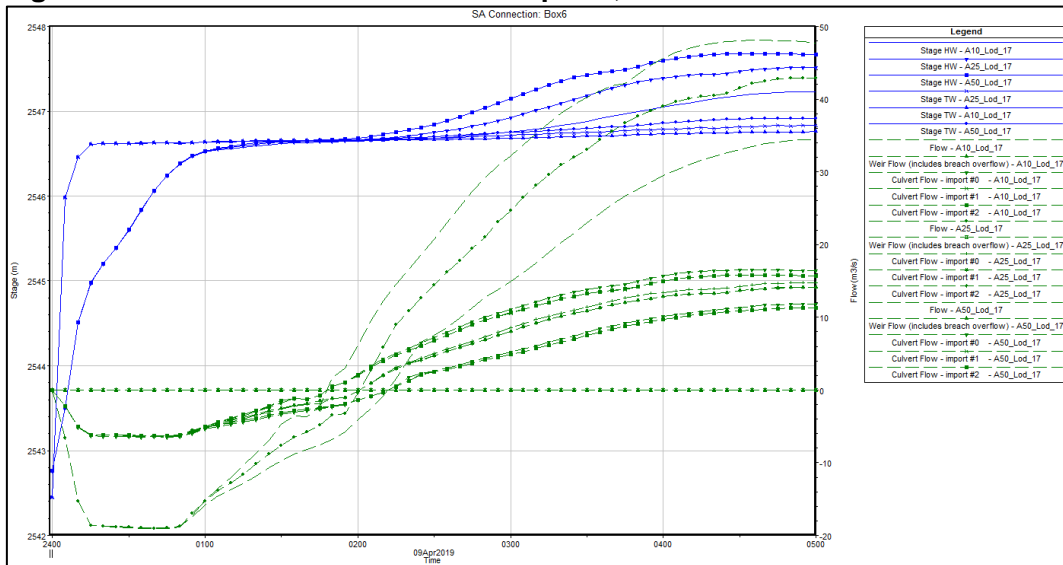
Figura 334 Sección transversal alcantarilla $\phi=1.0\text{m}$, ID: QGuay2



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

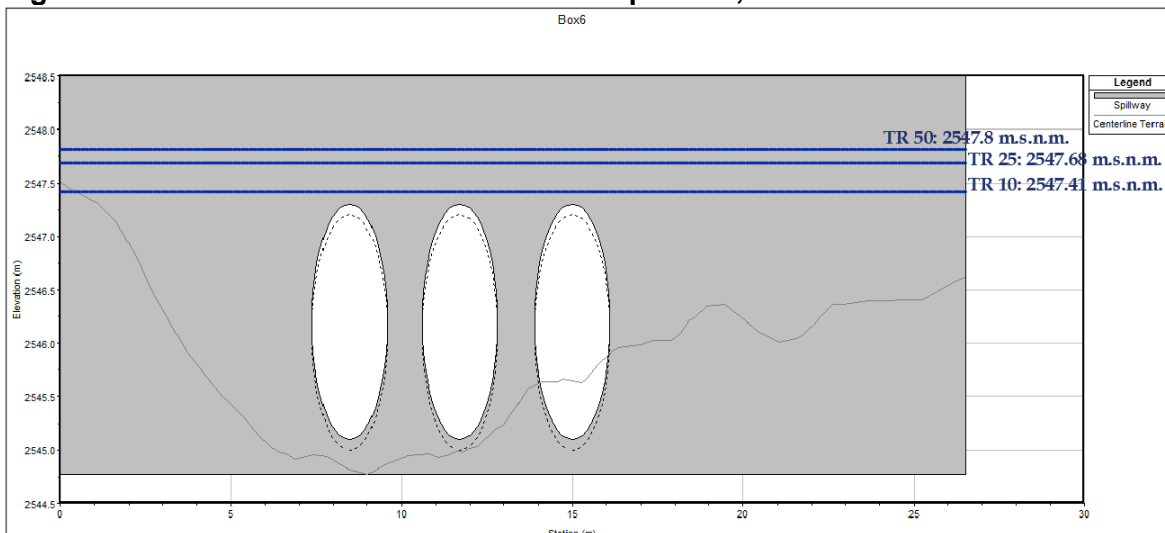
En la Figura 335 se presenta el comportamiento de la estructura identificada con el ID Box6, esta estructura está compuesta por tres alcantarillas paralelas de 2.2m de diámetro, la cota de rasante corresponde a 2548.58 m.s.n.m., en la Figura 336 se presenta la cota máxima resultante de la simulación para los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años, las cuales no superan la cota de rasante pero si superan la cota clave de las estructuras, la cual corresponde a 2547.3 m.s.n.m.

Figura 335 Estructura alcantarillas de $\phi=2.2$, ID: Box6



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

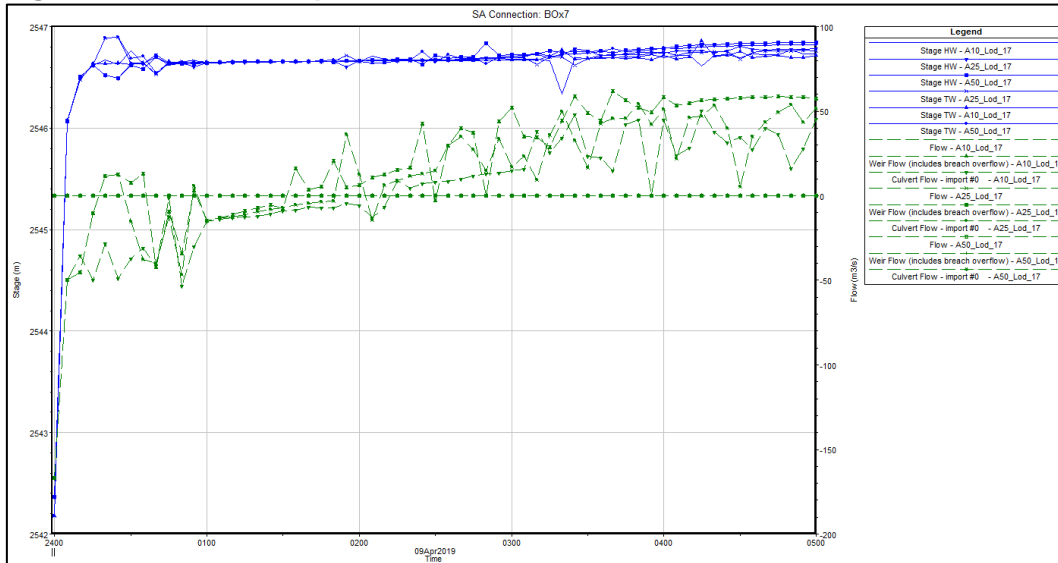
Figura 336 Sección transversal alcantarillas $\phi=2.2$ m, ID: Box6



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

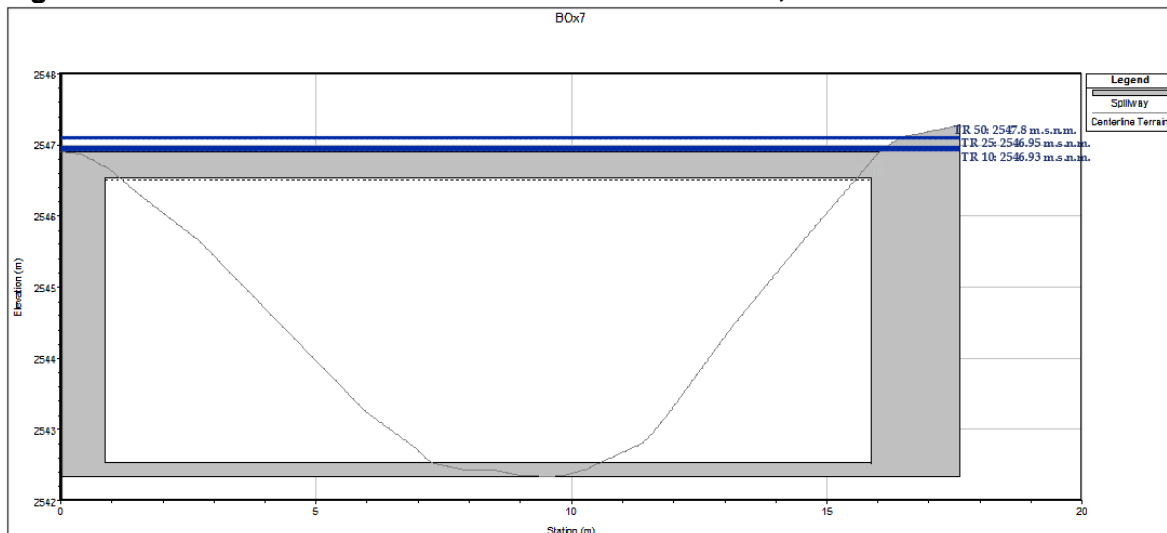
En la Figura 337 se presenta el comportamiento a lo largo del periodo de simulación de la estructura identificada con el ID Box7, sobre el canal Guaymaral, que corresponde a un pontón de sección de 15m de ancho por 4.0m de alto, la cota de rasante de esta estructura es de 2546.91 m.s.n.m., en la Figura 338 se aprecia que, de acuerdo con los resultados de las simulaciones, para los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años, se supera la capacidad máxima de la estructura.

Figura 337 Estructura pontón de 15.0m x 4.0 m, ID: Box7



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

Figura 338 Sección transversal Pontón de 15.0m x 4.0m, ID: Box7



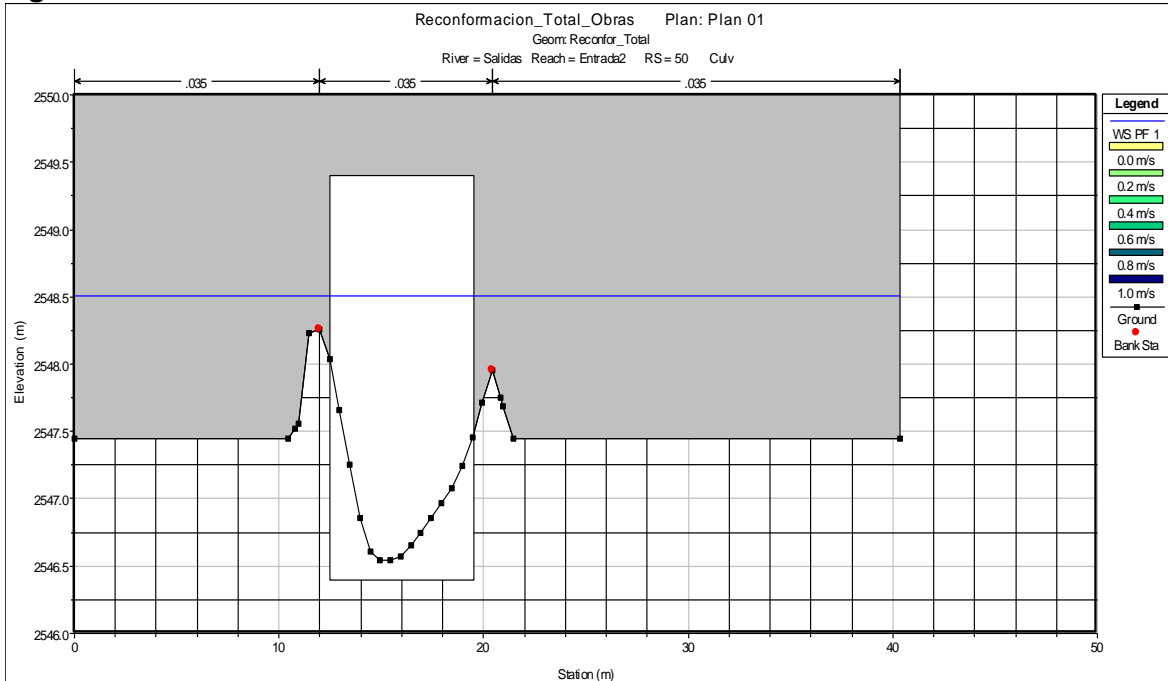
Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

6.3.15.3 Propuestas de conexión hidráulica del humedal

En lo que respecta a las obras de cruce bajo la Autopista Norte y dadas las condicionantes establecidas por la Red Matriz Tibitoc-Casablanca localizada bajo el separador de esta vía, se hace necesario que las nuevas obras mantengan el mismo trazado y elevación vertical de las obras actuales, reemplazo que también está limitado por el ancho disponible para su implementación, el cual de igual manera está definido por la desviación vertical previsto por la Red Matriz para los cruces actuales.

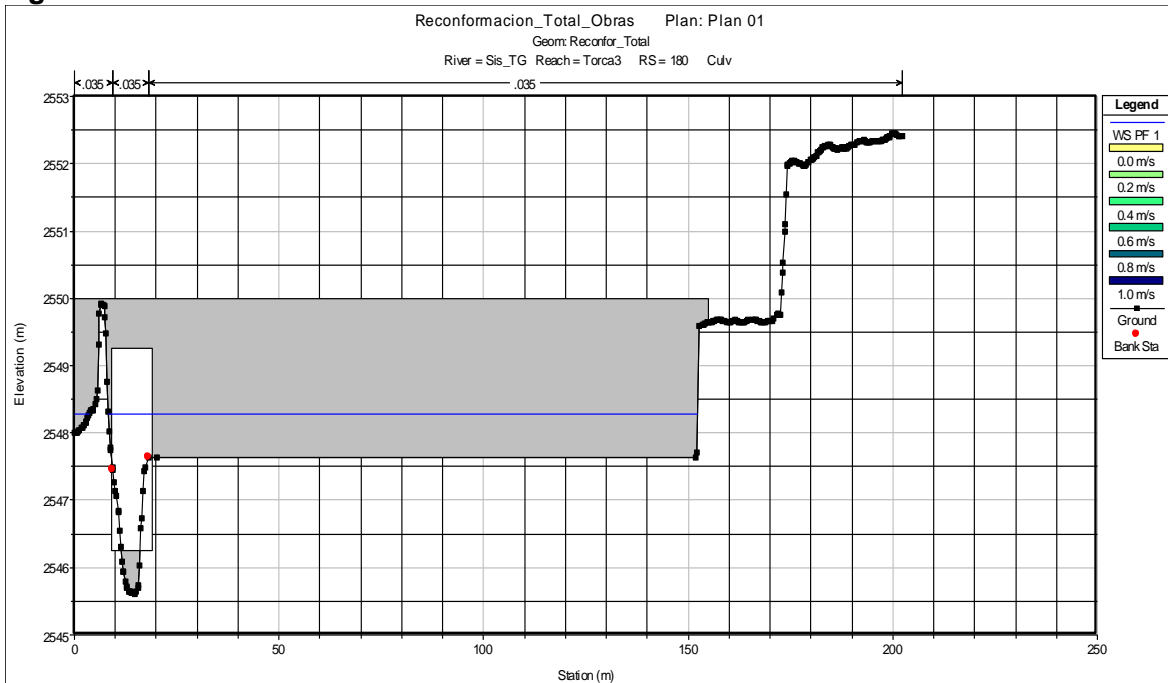
Bajo las anteriores limitaciones la sección de las obras que se prevé serán de una sección de 7.0x3.00 m, en los tres sitios de cruce, como se ilustra en la Figura 339, la Figura 340 y la Figura 341.

Figura 339 Sección transversal Cruce No. 1



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

Figura 340 Sección transversal Cruce No. 2



Fuente: WSP a partir de software HEC-RAS 5.05, 2019.

7 MODELAMIENTO DE CALIDAD DE AGUA

7.1 INTRODUCCION

El proceso metodológico mediante el cual se llevó a cabo la modelación hidrodinámica de las quebradas: Tibabita, Aguas Calientes, La Floresta, Patiño, San Juan, Torca y Novita, recoge las ideas presentadas por Fischer et al (1979), Thomann (1987) y Chapra (1997), así como las presentadas en el protocolo de Camacho & Díaz-Granados (2003), el cual es uno de los más utilizados a nivel nacional para la estimación de la calidad del agua, aplicado a conocer el comportamiento de la calidad de agua y capacidad de asimilación de las quebradas, pertenecientes al sistema Torca - Guaymaral.

Para el caso del presente estudio fue empleado el modelo QUAL2Kw, fundamentado en el modelo QUAL2E, en vista de que el modelo considera flujo tipo pistón el cual corresponde a los cuerpos de agua en estudio. Igualmente, la información existente se ajusta a la solicitada por el modelo, por lo cual se considera suficiente para garantizar que los resultados del modelo son correctos. Igualmente, el modelo ha sido desarrollado por la EPA (Environmental Protection Agency, US), que lo actualiza periódicamente y permite al usuario acceder a las actualizaciones en forma fácil a través de la red (Internet).

7.2 METODOLOGIA

Los pasos generales dentro del protocolo de la presente modelación hidrodinámica desarrollados por esta consultoría y su aplicación en las quebradas afluentes al Humedal Torca-Guaymaral, se describen brevemente a continuación:

- Inspección de campo: importante para determinar la información que será objeto de análisis en las fases siguientes, así como para el levantamiento de información primaria para tener en cuenta en las consideraciones de los modelos a desarrollar. Para este ejercicio de modelación se tendrán en cuenta las cuatro (4) campañas de monitoreo contempladas.
- Definición del objetivo del estudio: de acuerdo con lo mencionado en el inicio del presente numeral.
- Descripción de los cuerpos de agua a modelar: permite conocer las características de los mismos y seleccionar el modelo más adecuado.
- Caracterización hidrológica: la cual consta de la adquisición de información de datos hidroclimatológicos, que deben ser analizados para determinar la calidad de información que será utilizada en la modelación hidrológica.
- Caracterización hidráulica: realizada a partir de información topobatimétrica y la proveniente del estudio con trazadores para el modelo de simulación hidráulica de cada quebrada de interés.
- Formulación del modelo conceptual: producto de las fases anteriores se tiene la información suficiente para poder explicar cuáles deben ser los procesos objeto de

análisis, de acuerdo con el cuerpo natural. Como se había mencionado con anterioridad, para los modelos del presente EMCA se consideran únicamente determinantes convencionales, por lo cual los procesos objeto de modelación se reducen a los asociados con estos determinantes.

- Selección del modelo: basado en el modelo conceptual del numeral anterior, se establece cuál debe ser el programa computacional a utilizar.
- Campaña de monitoreo: teniendo en consideración las variables de entrada del software escogido, así como los tiempos de viaje obtenidos bien sea del estudio con trazadores o con el modelo hidráulico respectivo a cada quebrada, se llevan a cabo muestreos para caracterizar el cuerpo de agua mediante parámetros fisicoquímicos, procurando siempre hacer seguimiento a la masa de agua.
- Modelación de calidad de agua: con los resultados de las modelaciones hidrológicas e hidráulicas, junto con los resultados del laboratorio correspondientes a las campañas de monitoreo realizadas, se desarrolla la configuración tanto de la física como de las variables de ingreso de calidad de agua.

7.3 PÁRAMETROS

7.3.1 Análisis de calidad de agua

Estos modelos tienen como finalidad evaluar la condición actual de seis (6) quebradas pertenecientes al sistema del humedal Torca - Guaymaral, para poder establecer el comportamiento fisicoquímico de determinantes convencionales para cada una, y así poder eventualmente evaluar la afectación de estos cuerpos de agua superficial, verificando el cumplimiento de la normativa ambiental vigente.

Se llevaron a cabo campañas de monitoreo en las quebradas:

- Campaña 1: entre el 25 de Abril al 10 de mayo
- Campaña II: entre el 31 de mayo al 10 de junio;
- Campaña III: entre el 11 y 18 de julio
- Campaña IV: entre el 21 y 26 de agosto de 2019

7.3.2 Parámetros hidrológicos

7.3.2.1 Caudales medios y mínimos

La estimación de los caudales medios y mínimas se llevó a cabo mediante un modelamiento hidrológico que parte de la información de precipitación diaria de las estaciones de precipitación de la EAAB y el análisis de coberturas desarrollado en este producto. El método de cálculo implementado corresponde a Déficit y Pérdida Constante, que utiliza una capa de suelo para calcular los cambios continuos en la humedad de suelo, que debe ser usada en combinación de un método de interceptación de la precipitación (Canopy), que extraiga el agua del suelo en respuesta a la evapotranspiración potencial ingresada como serie de tiempo en el modelo meteorológico.

El método de Canopy se usa para representar la presencia de plantas en la superficie de la cuenca, las plantas interceptan la precipitación, reduciendo la cantidad de precipitación que llega de la superficie al suelo. El agua interceptada se evapora entre tormentas, las plantas también extraen agua del suelo en un proceso llamado transpiración, este método es requerido para aplicaciones de simulación continua como es el caso.

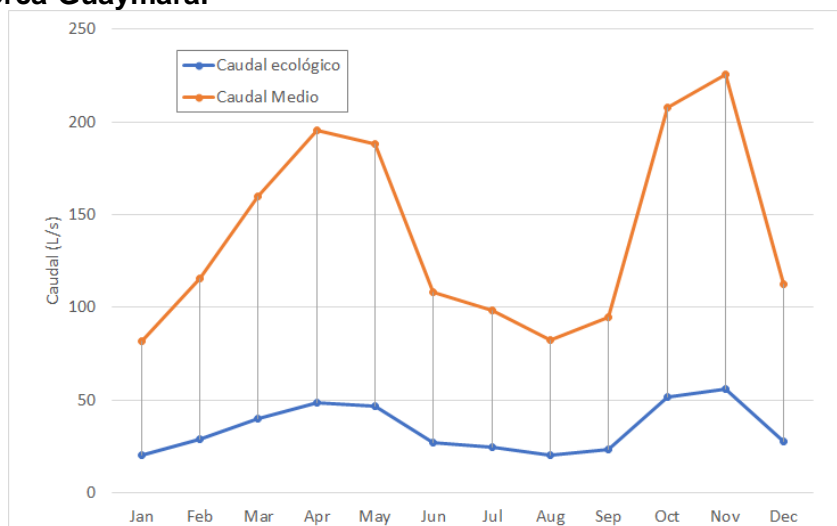
Para el método de transformación, se seleccionó el hidrograma unitario del SCS, el cual requiere la asignación del tiempo de retardo en minutos para cada una de las cuencas, el cual es calculado en función del tiempo de concentración estimado. La infiltración es calculada a partir del método de pérdidas seleccionado, y se considera como una entrada del reservorio lineal. Los parámetros requeridos para cada uno de los modelos seleccionados fueron calibrados manualmente para cada una de las cuencas con base en el conocimiento de la zona de estudio y de los aforos realizados en las quebradas.

7.3.2.2 Caudal ecológico

El Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2010), establece lo siguiente: “...El caudal ecológico y ambiental se define como aquel que mantiene el funcionamiento, composición y estructura del ecosistema fluvial que el cauce contiene en condiciones naturales, preservando los valores ecológicos, el hábitat natural y funciones ambientales como: purificación de aguas, amortiguación de extremos hidrológicos, recreación y pesca, entre otros...”.

Teniendo en cuenta lo anterior y dado el tipo de información disponible para las cuencas en estudio, el cálculo del caudal ambiental sigue la metodología establecida en la Resolución 0865 de 2004, según el cual este valor corresponde al 25% del caudal mensual medio más bajo, a partir de un registro sintético de caudales medios diarios, que para este caso empleó el procedimiento ofrecido por el software Hec-HMS, con los resultados que se muestran en la Figura 342.

Figura 342. Variación de caudales medios y ecológicos afluentes esperados en el humedal Torca-Guaymaral



Fuente: WSP, 2019.

7.3.3 Parámetros hidráulicos

El cálculo de los coeficientes hidráulicos se desarrolló con base en los datos obtenidos del trabajo en campo donde se levantaron las secciones batimétricas para cada una de las corrientes y donde se estimaron los caudales medios y mínimos, a lo largo de cada una de las quebradas.

Por otra parte, para el cálculo de los coeficientes se utilizó la metodología de Molddok y Leopold, en la cual se relaciona la velocidad (V), el ancho (B) y la profundidad (H) en función del caudal de la corriente de cada tramo y linealizando los datos con escala Log – Log para obtener una regresión potencial, cuyos coeficientes ingresan el modelo de simulación de calidad de agua.

En el Anexo C Informe de Calidad de Agua, se describen las actividades, procedimientos y consideraciones tenidas en cuenta por la Consultoría, para la selección de los puntos de monitoreo, toma de muestras de calidad de agua y ensayos de trazadores, modelamiento hidrológico de caudales medios y mínimos a través de Hec-HMS, modelamiento hidráulico mediante Hec-RAS y los resultados del modelamiento de calidad de agua a través del software QUAL2Kw.

7.4 CONCLUSIONES

7.4.1 Calidad de agua

A partir de las mediciones in situ, se evidencia que los cuerpos de agua monitoreados presentan un pH con un comportamiento que oscila entre neutro y ligeramente alcalino; la Conductividad es baja en general, la Oxigenación es poca para el desarrollo de la mayoría de las especies de peces y otros organismos acuáticos en la mayoría de los puntos de monitoreo, así como la Temperatura está acorde a las condiciones climáticas de la zona de estudio.

En cuanto a los Coliformes Fecales y Totales, los análisis reportaron que no se cumple con los criterios para consumo humano y doméstico y uso agrícola, para lo cual es un indicador indirecto del riesgo potencial de contaminación con bacterias o virus de carácter patógeno ya que las coliformes fecales están presentes en las heces humanas y de los animales.

De acuerdo a lo establecido en el decreto 1076 de 2015, en el artículo 2.2.3.3.9.10 las condiciones de oxígeno no son del todo óptimas para el desarrollo de la vida acuática dado que en cada uno de los sistemas monitoreados las concentraciones de oxígeno son bajas.

De acuerdo con los resultados de laboratorio se evidencia que el agua superficial mantiene un comportamiento natural en relación con los elementos metálicos, no obstante, las concentraciones de Aluminio fueron superiores al límite de detección de la técnica analítica empleada por el laboratorio en los puntos, sin que esto genere alteración en las condiciones del agua natural; a su vez, no se identifica afectación por parte de nutrientes de Fósforo y Nitrógeno, materia orgánica, partículas sólidas e iones.

7.4.2 Modelamiento de calidad de agua

En lo que respecta a la comprobación de los valores de los parámetros medidos, no fue factible establecer dicha correlación, debido a las condiciones variables del flujo de caudal en las quebradas, a tal punto que durante algunas campañas no se encontró agua al momento de realizar el monitoreo.

A pesar de lo anterior, los modelos de simulación permiten determinar que las corrientes de agua, en su condición actual, tienen escasa capacidad de asimilación y de reaireación, como de igual manera se demostró con los análisis de trazadores llevados a cabo en esta consultoría, según los cuales:

- La escasa capacidad de transporte que se refleja por el bajo caudal observado, limita de entrada la asimilación del cauce como cuerpo receptor de ciertos valores mayores de flujo de vertimiento. La baja velocidad observada favorece procesos de deposición y retención de sedimentos.
- La Longitud de mezcla, sin ser muy extendida (gracias a la poca anchura de los cauces) se asocia a valores bajos del Coeficiente Longitudinal de dispersión y del Coeficiente transversal de difusión, lo que permite prever un efecto de dilución limitado y un potencial de mezcla débil.
- En su conjunto los cursos de agua estudiados, son sistemas acuáticos frágiles, tanto por su pequeño tamaño como por las características especiales consistentes en un cambio brusco de pendiente y la presencia de formaciones lenticas.
- Las Longitudes de mezcla son afortunadamente cortas en virtud de sus exiguos anchos, permitiendo que un eventual vertimiento en el primer sub-tramo logre cubrir homogéneamente la sección transversal del flujo antes de llegar al cuerpo lenticico.
- Los valores de los coeficientes de transporte son pequeños (Longitudinal y transversal) haciendo que el proceso de dilución sea relativamente débil, lo mismo que el proceso de mezcla.

7.5 RECOMENDACIONES

- Los resultados de los modelos hidrodinámicos para las quebradas pertenecientes al sistema Torca – Guaymaral y teniendo en cuenta las actividades de reconfiguración y restauración, será posible mejorar y recuperar la capacidad ecológica a través de la recuperación de la condición hídrica de la corriente.
- Las validaciones realizadas sobre los datos tomados en cada Campaña de monitoreo, así como las modelaciones y su concordancia con las expresiones analíticas usuales, ofrecen un muy buen nivel de garantía de que los tiempos de viaje corresponden a la realidad del flujo en el momento de la experimentación. Estos valores así obtenidos y validados pueden entonces usarse en el futuro con confianza tanto para la calibración puntual de los modelos, como para la planeación de programas de monitoreo en la misma estación (condiciones iguales de flujo), cuando los cauces de las quebradas

hayan sido objeto de restauración geomorfológica y de recuperación del caudal de flujo.

- En lo que respecta a los aportes de sedimentos hacia los cuerpos de agua (humedal y quebradas), el control se debe establecer inicialmente haciendo una diferenciación entre el flujo torrencial de las cuencas altas, aguas arriba de la Carrera Séptima, que son sinónimo de flujo supercrítico o rápido, bien diferente al comportamiento de los flujos lentos, subcríticos o fluviales, de las zonas llanas. En el primer caso, el transporte de sedimentos tiene características inherentes al fenómeno aluvional, con la ocurrencia de caudales sólidos y la presencia de crecidas súbitas y violentas. Normalmente la corrección de estos procesos debe incluir acciones tanto en los cauces, con obras de ingeniería hidráulica, como en la cuenca de aporte, con acciones mecánicas y biológicas, dentro de lo posible.
- En la zona baja de las cuencas, las obras de control de la erosión superficial tienen carácter típicamente extensivo e incluyen aquellas intervenciones de ingeniería hidráulica y/o naturalista orientadas a la consolidación de las laderas. Las obras de control están destinadas al control de la red hidrográfica a través de la modificación de la capacidad de transporte sólido de los cursos de agua, la estabilización de la morfología física (pendiente de equilibrio) limitando las divagaciones y los cambios de la cota de fondo. Para estas zonas se recomienda la implementación de sistemas de barreras transversales al cauce y localizadas a lo largo del cauce, las cuales de igual manera contribuyen a garantizar el equilibrio geomorfológico de los cauces.
- A nivel de los desarrollos urbanísticos, se propone evaluar la implementación de elementos de retención de sedimentos a través de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, SUDS, mediante los cuales se haga la retención primaria de los sólidos finos que puedan arrastrarse a través de los sistemas de drenaje pluvial, previo a la descarga a los sistemas hídricos naturales.

8 CONCLUSIONES

En comparación con el análisis espacial realizado a los patrones anuales definidos en el desarrollo del presente informe, se obtiene una profundidad media de precipitación para el área de drenaje del sistema Torca – Guaymaral de 82.65 mm, a partir del patrón desplazado 1, que corresponde a una profundidad mayor con respecto a los encontrados con el desplazamiento del patrón elíptico (56,5 mm Ingetec, 2015), por tal razón, se selecciona aquel patrón para la determinación de la tormenta de diseño (Sección 5.6 Selección del Patrón de Precipitación).

El análisis de los eventos recientes de anomalía climática (año 2010-2011), para las estaciones de la zona de estudio, mostró que hubo un aumento de los volúmenes de precipitación para este período, es decir, este periodo de Fenómeno Niña evidentemente tuvo gran influencia sobre el área de estudio en cuanto a volúmenes de precipitación acumulados mensuales, más no en cuanto a precipitaciones máximas en 24 horas o tormentas únicas de gran magnitud. Los registros de los eventos de precipitación ocurridos en la cuenca Torca muestra que fueron elevados, ya que los datos indican que efectivamente, si hubo un incremento reportado en todas las estaciones analizadas, con respecto al promedio anual histórico (Usaquén Santa Ana 1609 mm, Cerros de Suba 1476 mm, Serrezuela 1555 mm, La Conejera 1251 mm y La Caro 1422 mm). (Sección 5.6.2 Análisis evento Niña 2010-2011).

Con referencia a los eventos máximos generados en el río Bogotá y registrados en la estación La Balsa, localizada aguas abajo del sitio de la desembocadura del canal Guaymaral, muestra que durante los años 2010 y 2011 se presentaron altos niveles en el río, así como elevados caudales a través de este, lo cual no es consecuente con los registros de precipitación reportados en las estaciones de la zona de la cuenca del sistema Torca – Guaymaral. Lo anterior da a entender que los eventos ocurridos en las dos cuencas, la cuenca alta del río Bogotá y la cuenca Torca, no fueron sincrónicos y que los niveles altos del canal Guaymaral, en la zona de la desembocadura, corresponderían a los controles ejercidos por el nivel del río Bogotá (Sección 6.3.7.1 Niveles en río Bogotá).

Como una descripción general, las cuencas urbanas y rurales drenan su caudal a los cuerpos de agua que vienen desde los Cerros Orientales, cruzan la Carrera Séptima, y confluyen hacia el Humedal Torca, algunas prosiguen a través de la Autopista Norte y continúan por el canal y humedal Guaymaral, hasta la desembocadura en el Río Bogotá. El modelo de simulación hidráulico indica que las estructuras de cruce existentes sobre la Carrera 7ª, la Vía Férrea y la misma Autopista Norte, se convierten en controles hidráulicos que promueven la retención del flujo o el *overtopping* de la vía.

En la Autopista Norte, esto se evidencia en las cotas alcanzadas por la lámina de agua para los escenarios modelados a la altura de la estructura de la zona media del humedal torca, identificada con el ID Box 4, que alcanzan 2549.47 m.s.n.m. para periodo de retorno de 100 años, 2549.35 m.s.n.m. para periodo de retorno de 50 años, 2549.24 m.s.n.m., para periodo de retorno de 25 años, mientras que la cota de la rasante de la vía en este punto corresponde a 2548.36 (sección 6.3.15.1.1 Estructuras de cruce Autopista Norte).

En cuanto a las estructuras hidráulicas para cruce de vías, se evidencia que la mayoría de estas presentan deficiencia en la capacidad hidráulica para el evento máximo de análisis (Tr100 años), lo que implicará que las obras de adecuación del canal Guaymaral, especialmente, se acompañe del reemplazo de estas obras por estructuras con suficiente capacidad y elevación de rasante, para garantizar el paso adecuado de una creciente de esa magnitud, sin generar remansos o controles hidráulicos hacia aguas arriba. Esta situación ocurre para la obra de control existente (3Φ2.20 m) a la altura de la Calle 242 en el acceso a los predios de Mazuera, la Calle 235 o vía a Guaymaral (Box culvert 6.0x3.0 m) y la Calle 222 (1Φ1.0 m). La evaluación llevada a cabo en el presente estudio sólo se remitió al componente hidráulico y no contempló el establecimiento de sus condiciones estructurales y/o geotécnicas (Sección 6.3.15.1.2 Estructuras sobre Canal Guaymaral).

Todo el sistema hídrico que compone la red de drenaje de la zona norte de la ciudad (quebradas y humedales) ha sufrido a través del tiempo afectaciones producto de la presión urbana, la agroindustria y las actividades pecuarias, las cuales han ocasionado alteraciones a las condiciones del drenaje natural, en cuanto al trazado natural, como a los procesos de sedimentación. En este caso los niveles de sedimentación evidenciados en los vasos del humedal en cada sector (Torca y Guaymaral), indicaron valores que van entre los 30 cm a casi 1 metro y dada la importancia ecosistémica que tiene el cuerpo de agua en torno a las condiciones biofísicas de estos lugares, que merecen ser objeto de programas y acciones inmediatas para su restauración y protección, tanto en las áreas forestales protectoras o ZMPA, zonas transicionales entre tierra seca y el espejo de agua, donde se encuentra parte importante de la biodiversidad del Humedal. Si a esto se suma la reiteración en el sentido de viabilizar las acciones tendientes a mejorar la calidad de las aguas y al control del crecimiento de las plantas invasoras o acumulación excesiva de sedimentos, se puede lograr el buen funcionamiento de estos sistemas, como reguladores del régimen hídrico y conectores ecológicos entre el río Bogotá y los Cerros Orientales (Sección 6.3.12.3 Comportamiento de los humedales y Sección 6.3.12.4 Amortiguamiento de los humedales).

Las láminas de inundación de las quebradas evidenciadas, muestran que los cauces no tienen capacidad para albergar la creciente máxima de Tr100 años, lo cual evidencia que para la consecución de los objetivos propuestos en el Decreto 088 de 2017, será necesario llevar a cabo de manera urgente la restauración hidrogeomorfológica y ecosistémica de estas corrientes, para que de esta manera se pueda llegar a conseguir el corredor ecológico Río Bogotá – Cerros Orientales, eje fundamental del desarrollo de la zona norte de la ciudad. Situación especial cobra el cauce bajo de la quebrada Aguas Calientes y las obras de cruce en ese sector, así como también el cauce inexistente en la zona media y baja de la quebrada Patiño (Sección 6.3.12.5.2 Propuesta preliminar de adecuación de quebradas (Alinderamiento)).

Especial relevancia dentro del comportamiento hidrológico, tiene la vía férrea (Futura Avenida Laureano Gómez), que en todos los cruces de quebradas no tiene la obra más adecuada que permita el paso de la creciente, o en la situación más crítica como es el caso de la quebrada Patiño, que no existe la obra que permita la continuidad de flujo, dando como resultado procesos de trasvase de cuencas o extensión de las áreas inundables a lo largo de este corredor vial (Sección 6.3.12.5.2 Propuesta preliminar de adecuación de quebradas (Alinderamiento)).

Según el perfil de flujo para todos los escenarios modelados, inclusive aquel en el que se supuso la rotura del Jarillón izquierdo del Río Bogotá y que tiene como condición de control el nivel de los jarillones proyectados para la adecuación del Río, no muestran una gran influencia de los niveles del río en el comportamiento hidráulico de la zona en estudio. En este escenario, la sobrelevación ocurre solamente en la zona baja del sistema, entre el Río Bogotá y la estructura de ingreso al Club Guaymaral, con un aumento de solo 7 cm. Desde este sitio hacia aguas arriba prácticamente las láminas de agua actual y del evento contingente, se confunden en un solo nivel (Sección 6.3.14 Análisis de amenaza por rotura del Jarillón del Río Bogotá). De todas maneras, es importante que la entidad encargada del manejo de la cuenca, realice monitoreos y visitas de inspección a esta zona del jarillón, con el objeto de evidenciar afectaciones o deformaciones en el cuerpo de esta estructura y acometer las acciones en procura de su estabilidad.

Para el escenario en el que se supone un confinamiento del canal Guaymaral, sobre margen izquierda, desde el origen en el sector del cementerio Jardines del Recuerdo, hasta la desembocadura en el río Bogotá, se evidencian sobreelevaciones a lo largo del perfil en tres sectores bien definidos, descritos desde aguas abajo hacia aguas arriba así: El primero entre el río Bogotá y la vía que cruza la calle 242. En este sector la sobreelevación alcanza los 30 cm. Entre este sitio y la salida del humedal Guaymaral, el nivel es de 25 cm superior al nivel de la condición actual, mientras que en el tramo entre el inicio del humedal Guaymaral hasta el inicio del canal, la sobreelevación alcanza los 30 cm. De lo anterior se colige que, dentro de las alternativas de restauración y/o conformación del sistema hídrico, el canal Guaymaral debe incorporarse dentro esas acciones (Sección 6.3.12.6 Escenario de confinamiento de la margen izquierda del canal Guaymaral).

Los resultados del análisis presentado corresponden a eventos de precipitación máxima de Tr100 años que generan un evento con esa probabilidad de ocurrencia, que evalúa las condiciones de capacidad del sistema hídrico, para el caso de las quebradas orientales, a partir de la carrera Séptima. Los eventos que involucran transporte de sedimentos o torrencialidad, no ha sido tenido en cuenta en este estudio, escenario aquel que podría modificar la delimitación de las áreas de amenaza definidas en este.

A pesar de que los análisis llevados a cabo en este estudio no se tuvieron en cuenta los efectos de reducción de los caudales picos generados por los sistemas SUDS que deben desarrollarse al interior de los Planes Parciales, estos deben implementarse como lo expone el Decreto 088 de 2017. De esta manera se podrá otorgar al sistema general de drenaje una condición de seguridad en el caso de la ocurrencia de eventos hidrológicos con mayor criticidad al aquí evaluado.

Los resultados presentados en el informe de calibración y validación del modelo hidrológico e hidráulico, muestran que la calibración del modelo no fue exitosa, especialmente debido a la escasa cantidad de los datos recopilados. La información de precipitación utilizada en el proceso de calibración fue obtenida de cinco estaciones pluviométricas propiedad de la EAAB, en este aspecto la norma NS-163 de la EAAB establece criterios para la construcción y calibración de modelos hidráulicos de sistemas de alcantarillado, indica que para la medición de lluvia se deberá contar con por lo menos tres aparatos del tipo pluviógrafos digitales hasta un área de 800 hectáreas y uno



adicional por cada 400 ha adicionales, localizados dentro de la cuenca razón por la cual se deberá analizar la propuesta de la instalación de estaciones de registro hidroclimatólogo al interior de la cuenca Torca-Guaymaral. Los datos relacionados a las campañas de medición de caudal se realizaron en tiempo seco o con eventos de lluvia de baja magnitud, lo que generó que no se tuvieran suficientes datos para generar curvas de caudal y nivel, por lo que fue necesario optar por curvas de calibración teóricas que permiten tener datos confiables para la calibración.

9 RECOMENDACIONES

Los resultados de los análisis de precipitación para la zona de estudio indicaron que la distribución de la precipitación de la zona nororiental de la ciudad es distinta al de toda la Sabana, razón por la cual Ingetec en el estudio del año 2013 no considera adecuado el empleo de un patrón elíptico para llevar a cabo análisis de este tipo, y que por el contrario deberán llevarse a cabo estudios específicos, como es el caso de la presente consultoría, se sugiere que la duración del evento de máximo volumen siga siendo el de 3 horas, con una distribución temporal según lo aquí planteado. De todas maneras, debe evaluarse su aplicación de manera específica al diseño de redes de alcantarillado o estimación de caudales hidrológicos de cuencas en la zona, según lo establece la Norma NS-085 de la EAAB.

Para mejorar la condición de drenaje del sistema, se propone la adecuación de los humedales obteniendo un área mayor de almacenamiento, realizando una adecuación geomorfológica que amplíe su extensión en procura de promover zonas de desbordamiento controlado y/o retozo de los picos de crecientes que desborden el canal principal. Esta adecuación, dado que para fines de amortiguación no sería suficiente en períodos extendidos de precipitación, conviene por tanto aumentar las áreas de las que actualmente dispone, esto con el objeto de permitir mayores zonas inundables o de amortiguación. Se debe tener en cuenta que, por tratarse de una zona muy llana, implicaría destinar grandes áreas para lograr una efectiva atenuación de los eventos.

En la Tabla 49 se presenta un resumen de las condiciones de drenaje encontradas en los principales drenajes de la zona de estudio, en donde se incluye además las acciones para la adecuación del sistema hídrico:

Tabla 49. Resumen condiciones de drenaje en la zona de estudio

| SITIO | DESCRIPCIÓN | RECOMENDACIÓN PRELIMINAR |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Quebrada Tibabita | Se observa que la parte alta de la cuenca de la quebrada Tibabita presenta una alteración de su red de drenaje, que tampoco sigue la delimitación de corredor hídrico definido por la SDA. Sobre el cruce de la Vía Férrea, se evidencia falta de obras de cruce apropiadas y aguas abajo de esta, falta de capacidad hidráulica. En la llegada al canal Torca la estructura de entrega no tiene suficiente capacidad lo que genera un represamiento en la margen derecha de este canal. | Reconformación del canal actual en el Tramo comprendido entre la Vía férrea y el canal Torca. Entre la Carrera Séptima y la Vía Férrea se debe verificar la posibilidad de realinderamiento. |
| Quebrada Aguas Calientes | Entre la Carrera 7a y la Vía Férrea se observa que a pesar de que la lámina de inundación sigue los trazados de la red de drenaje, los canales actuales no tienen la capacidad suficiente evidenciado por los desbordamientos de las márgenes. El costado suroriental indica la necesidad de implementar un eje de drenaje que permita el desagüe de la zona que está siendo inundada actualmente, lo que incluso, representa un riesgo para la subestación eléctrica. Aguas abajo de la vía férrea se hace evidente la falta de capacidad en la sección hidráulica actual, a pesar de que esta zona conserva un buen estado de mantenimiento del cauce actual. En la entrega del humedal, igualmente se evidencia la falta de capacidad de la sección transversal y de sus obras de cruce. | Requiere la adecuación de las obras de cruce y conformación de sección para evitar desbordamientos. |
| Quebrada | Aguas arriba de la vía férrea, se aprecia la obstrucción de los | Reconformación del canal |

| SITIO | DESCRIPCIÓN | RECOMENDACIÓN PRELIMINAR |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Patiño | <p>cauces naturales de la cuenca de la quebrada Patiño, debido a rellenos antrópicos y falta de obras de cruce, tal como se observa en la imagen, lo que genera la falta de continuidad del drenaje y que el flujo de agua se comporte de manera caótica.</p> <p>Aguas abajo de la vía férrea el agua fluye siguiendo la morfología del terreno, que demarca el trazado original del cauce de la quebrada, permitiendo inferir que el cauce delimitado por la SDA, se convierte en un alivio de los desbordes del cauce original, mas no constituiría el cauce principal.</p> <p>Los caudales aportados de la quebrada El Perro, son originados probablemente por el trasvase de la quebrada Patiño.</p> | <p>actual en el Tramo comprendido entre la Vpia Férrea y el canal Torca. Entre la Carrera Séptima y la Vía Férrea se debe verificar la posibilidad de realinderamiento. Se requiere la implementación de obras de cruce bajo la vía férrea, para evitar el trasvase de la cuenca.</p> |
| Quebrada San Juan | <p>Se aprecia la capacidad insuficiente de las obras de cruce de la vía férrea, generando represamientos importantes y trasvases aguas arriba.</p> <p>Las zonas inundables siguen los trazados definidos por la SDA.</p> | <p>Reconformación del canal actual en el brazo izquierdo aguas debajo de la vía férrea. Entre la Carrera Séptima y la vía férrea se requiere de obras de confinamiento de la zona inundable.</p> |
| Quebrada Las Pilas | <p>La zona inundable se presenta por la falta de obras y canalización al interior de los predios que permitan el adecuado drenaje del área.</p> <p>Aguas arriba de la vía férrea, la quebrada Pilas se ve contralada por el pondaje construido en la hacienda La Gloria, lo que impide el drenaje natural aguas abajo de la vía férrea.</p> | <p>Se requiere la implementación de obras de cruce bajo la vía férrea, para dar continuidad al drenaje de la cuenca alta. Se requiere de la configuración de un nuevo canal.</p> <p>En el tramo final de la quebrada entre la Autopista Norte y el humedal Guaymaral se evidencia la necesidad de obras hidráulicas que permitan la continuidad del flujo.</p> |
| Quebrada La Floresta | <p>Se aprecia la necesidad de obras de cruce en la vía férrea.</p> <p>Aguas abajo de la vía férrea se presenta un déficit de la red de drenaje que permita el adecuado alivio de las crecientes.</p> <p>Aguas debajo de la Autopista Norte el canal es insuficiente, así como la obra de entrega al canal Guaymaral.</p> | <p>La totalidad del cauce principal de la quebrada requiere de la conformación de un canal que contenga la creciente máxima. De igual manera se requieren obra de cruce adecuadas sobre la Vía férrea, así como la adecuación de las obras existentes para el cruce de la Autopista Norte.</p> |
| Quebrada Novita | <p>El drenaje principal definido por la SDA corresponde a un desvío del cauce mas no al cauce original demarcado por la geomorfología del terreno.</p> <p>No se aprecia un cauce definido entre la vía férrea y la autopista Norte, a pesar de que hay obras que permiten la continuidad del drenaje entre la Autopista Norte y la</p> | <p>Requiere de la definición del canal de flujo principal, dado que en la actualidad, este no sigue el eje establecido por el alinderamiento de la SDA.</p> |

| SITIO | DESCRIPCIÓN | RECOMENDACIÓN PRELIMINAR |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | desembocadura en el canal Guaymaral. | Se requiere de adecuación de las obras de captación y entrega en la Autopista Norte, así como canal entre esta vía y la desembocadura en el canal Guaymaral. |
| Quebrada Torca | No se presenta un cauce definido aguas arriba de la vía férrea y al norte de la calle 245. La construcción de esta vía interrumpe el drenaje natural aguas abajo que originalmente la morfología muestra que su trazado fue en sentido nororiente - suroccidente, conformándose, en el pasado, como un afluente a la quebrada Novita. Aguas debajo de la Autopista Norte no se aprecia un cauce conformado, debido a que fue totalmente intervenido con una canalización cerrada. | Requiere de adecuaciones de las obras de cruce bajo la vía férrea y la Autopista Norte. Requiere restitución del canal entre la Autopista Norte y la desembocadura en el canal Guaymaral. |
| Canal Torca – aguas arriba humedal Torca | La capacidad hidráulica del canal Torca se encuentra en los límites de la capacidad de esta estructura hidráulica, tanto para la condición actual como la futura. | Se requiere evaluar la posibilidad de llevar a cabo un realce de las márgenes del canal, revestimiento de la zona alta del canal en tierra o el control de los flujos de aporte de caudal en este tramo del canal. |
| Canal Guaymaral – parte alta | El canal Guaymaral en el tramo comprendido entre la avenida Arrayanes hasta el sitio de confluencia con el canal Torca presenta una escasa capacidad hidráulica y un trazado con alta tortuosidad que generan amplias zonas inundables hacia la parte derecha del canal hasta la autopista Norte. La falta de confinamiento por el costado derecho implica desbordamiento hacia esta margen. | Requiere de la adecuación urgente del canal en el tramo comprendido entre el sector del cementerio Jardines del Recuerdo (Calle 209) y la Calle 224, donde inicia el Humedal. |
| Zona baja humedal Torca | La lamina de inundación en algunos sectores de la zona baja del humedal Torca supera la delimitación de la ZMPA del humedal, lo requerirá confinamiento futuro o la ampliación de la capacidad del humedal. | Existen áreas dentro de la ZMPA que pueden aprovecharse como zonas de inundación controlada. Verificar la posibilidad de incrementar la capacidad del vaso actual mediante obras de rehabilitación, conjuntamente al retiro de cobertura vegetal invasora y/o foránea. |
| Canal Guaymaral – desde la confluencia con el canal Torca hacia el humedal Guaymaral | Rellenos antrópicos han ocasionado que la inundación ocurra hacia la margen occidental del Canal. Estas áreas ocupadas, inhabilitan zonas dentro de la ZMPA del humedal que pueden llegar a ser restituidas para garantizar confinamiento de la inundación. | Restitución del cuerpo del Humedal Guaymaral y por lo tanto de su capacidad de amortiguación de crecientes en esta zona. Verificar la posibilidad de incrementar la capacidad del vaso actual mediante obras de rehabilitación, conjuntamente al retiro de cobertura vegetal |

| SITIO | DESCRIPCIÓN | RECOMENDACIÓN PRELIMINAR |
|--------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | invasora y/o foránea. |
| Canal Guaymaral - Bima | Rellenos antrópicos fuerzan la lámina de inundación hacia el occidente, inhabilitando áreas dentro de la ZMPA del humedal que pueden llegar a ser restituidas para garantizar confinamiento de la inundación. | Restitución del cuerpo del Humedal Guaymaral y por lo tanto de su capacidad de amortiguación de crecientes en esta zona. Verificar la posibilidad de incrementar la capacidad del vaso actual mediante obras de rehabilitación, conjuntamente al retiro de cobertura vegetal invasora y/o foránea. |
| Canal Guaymaral - Sector San Simón | Se observa confinamiento adecuado del canal Guaymaral, aunque algunos sectores como San Simón, se identifican desbordamientos hacia la margen izquierda, unos debidos a la irregularidad de la cota máxima en el Jarillón de confinamiento y otros por descargas pluviales por debajo del nivel máximo de inundación. | Asegurar el confinamiento de la creciente en el Canal Guaymaral, mediante la adecuación del canal principal y/o la reconfiguración del jarillón existente que ha sido afectado por la falta de mantenimiento de este. |
| Canal Guaymaral - Desembocadura río Bogotá | El tramo del canal Guaymaral comprendido entre la entrada club Guaymaral hasta la desembocadura en el río Bogotá, presenta control hidráulico definido por la cota máxima de inundación del río Bogotá y los desbordamientos del canal están relacionados con este efecto. | Se requiere de la adecuación el canal y sus jarillones marginales, para lograr un confinamiento de los efectos de remanso del río Bogotá, durante los eventos de creciente de este último. |

Fuente: WSP, 2019.

Un análisis particular requiere las obras necesarias para el cruce de la Autopista Norte, debido a que en la actualidad, ocasionan control del flujo hacia la zona del sistema Guaymaral (Canal y Humedal). La propuesta de adecuación de estas obras de cruce deberá evaluarse de manera conjunta con el manejo que el futuro concesionario de la Autopista Norte (Agencia Nacional de Infraestructura y Distrito Capital) plantee para el drenaje de esta infraestructura. Esta solución debe incorporar el manejo de conectividad ecosistémica requerida, con miras a la restauración del sistema hídrico y su función conectora de la Reserva Van der Hammen y los Cerros Orientales de la Sabana. Un determinante general para este proyecto de infraestructura serán los niveles máximos del humedal en el sector de Torca y que para las condiciones actuales tiene un valor que varía entre 2549.96 mnsnm en la desembocadura del canal Torca (Jardines de Paz), y 2549.49 msnm al final del humedal (Acceso al Club Deportivo Los Millonarios).

Dentro de los análisis de geomorfología y dinámica de la zona, así como desde el punto de vista de coberturas y las visitas de inspección realizadas, se identificaron algunas áreas aptas para la adecuación, reconfiguración o rehabilitación del cuerpo del humedal y que en la actualidad han sufrido alteraciones a su morfología, a las cuales se propone su reconfiguración, con el fin de restituirle la capacidad de amortiguación al sistema.

Dado que en el presente estudio se utilizó la información de precipitación de eventos extremos registrados en estaciones operadas por la EAAB, se recomienda, por lo tanto, llevar a cabo nuevos modelamientos a partir de la información que está siendo reportada por estaciones limnimétricas recientemente instaladas por esta Consultoría, para lo cual también se sugiere continuar el monitoreo con las estaciones de registro de niveles, además de procurar la implementación de por lo menos una estación meteorológica al interior de la cuenca Torca-Guaymaral.

De acuerdo con los resultados presentados, la condición futura generará un incremento de caudales en el sistema y en la entrega al río Bogotá, por lo que en los análisis de reconformación que se propone para el humedal y las quebradas, se deben evaluar los efectos de amortiguamiento para verificar el caudal y el volumen de agua esperados, con el fin de argumentar los resultados a las autoridades ambientales y garantizar la viabilidad del proyecto.

En lo que respecta a los aportes de sedimentos hacia los cuerpos de agua (humedal y quebradas) y analizados desde el punto de vista hidráulico, el control se debe establecer inicialmente haciendo una diferenciación entre el flujo torrencial de las cuencas altas, aguas arriba de la Carrera Séptima, que son sinónimo de flujo supercrítico o rápido, bien diferente al comportamiento de los flujos lentos, subcríticos o fluviales, de las zonas llanas. En el primer caso, el transporte de sedimentos tiene características inherentes al fenómeno aluvional, con la ocurrencia de caudales sólidos y la presencia de crecidas súbitas y violentas. Normalmente la corrección de estos procesos debe incluir acciones tanto en los cauces, con obras de ingeniería hidráulica, como en la cuenca de aporte, con acciones mecánicas y biológicas, dentro de lo posible.

En la zona baja de las cuencas, las obras de control de la erosión superficial tienen carácter típicamente extensivo e incluyen aquellas intervenciones de ingeniería hidráulica y/o naturalista orientadas a la consolidación de las laderas. Las obras de control están destinadas al control de la red hidrográfica a través de la modificación de la capacidad de transporte sólido de los cursos de agua, la estabilización de la morfología física (pendiente de equilibrio) limitando las divagaciones y los cambios de la cota de fondo.

A nivel de los desarrollos urbanísticos, se propone evaluar la implementación de elementos de retención de sedimentos a través de los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible, SUDS, mediante los cuales se haga la retención primaria de los sólidos finos que puedan arrastrarse a través de los sistemas de drenaje pluvial, previo a la descarga a los sistemas hídricos naturales.

10 BIBLIOGRAFÍA

1. ALCALDIA MAYOR DE BOGOTÁ, Decreto 088 de 3 de marzo de 2017.
2. APARICIO M., F. J. (1987), Fundamentos de hidrología de superficie, Editorial Limusa, México.
3. BUREAU OF RECLAMATION SERVICE, U.S. Diseño de Presas Pequeñas.
4. CHOW, V.T., Hidrología aplicada, primera edición en español, Traducido de la 1ª Edición en inglés, Applied Hydrology, Mc. Graw Hill, Bogotá, 1993.
5. CHOW, V.T., Hidráulica de Canales Abiertos. Edición en español, Mc. Graw Hill, Bogotá, 1994.
6. EMPRESA DE ACUEDUCTO DE BOGOTÁ, Norma NS-085 - Criterios para Diseño de Redes de Alcantarillado.
7. EMPRESA DE ACUEDUCTO DE BOGOTÁ, NE-001 Hidrología. medición de caudales por el método de área – velocidad.
8. EMPRESA DE ACUEDUCTO DE BOGOTÁ, NS-003 Hidrología. operación y mantenimiento de estaciones hidrológicas y meteorológicas.
9. EMPRESA DE ACUEDUCTO DE BOGOTÁ, NS-004 Hidrología. selección de sitios para efectuar mediciones de caudal.
10. EMPRESA DE ACUEDUCTO DE BOGOTÁ, NS-085 Criterios de diseño de sistemas de alcantarillado.
11. EMPRESA DE ACUEDUCTO DE BOGOTÁ, NS-163 Requisitos para el desarrollo y calibración de modelos hidráulicos de los sistemas de alcantarillado.
12. EMPRESA DE ACUEDUCTO DE BOGOTÁ FACTIBILIDAD TÉCNICA, AMBIENTAL, ECONÓMICA Y FINANCIERA PARA EL DESARROLLO DE LA INFRAESTRUCTURA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO SANITARIO Y SISTEMA DE DRENAJE PLUVIAL DEL BORDE NORTE DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ, Año 2011.
13. IDIGER. Subdirección de Análisis de Riesgos y Efectos del Cambio Climático. Grupo de trabajo temático inundaciones. Proyecto Actualización Componente de Gestión del Riesgo para la Revisión Ordinaria y Actualización del Plan de Ordenamiento Territorial. Documento Técnico de Soporte. “Amenaza por Inundación en Perspectiva de Cambio Climático” Volumen 2. Bogotá, junio 25 de 2018.

14. LINSLEY, KOHLER Y PAULUS, Hidrology for Engineers. Segunda edición. McGraw Hill, New York, 1966.
15. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, MADS Resolución 0330 de 2017 Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento básico
16. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, MADS. Guía técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia. Bogotá, 2018.
17. MONSALVE, G. Hidrología en la Ingeniería. Santafé de Bogotá. 1995.



**ESTUDIOS DE HIDROLOGÍA (INFORME PRINCIPAL)
Anexo 1 Análisis Precipitación (Medio magnético)**



**ESTUDIOS DE HIDROLOGÍA (INFORME PRINCIPAL)
Anexo 2 Análisis Caudales (medio magnético)**



**ESTUDIOS DE HIDROLOGÍA (INFORME PRINCIPAL)
Anexo 3 Cartográfico (Físico y magnético)**



**ESTUDIOS DE HIDROLOGÍA (INFORME PRINCIPAL)
Anexo 4 Modelo Hidráulico (Medio magnético)**

**ESTUDIOS DE HIDROLOGÍA (INFORME PRINCIPAL)
Anexo 5 Información Topográfica (Medio magnético)**



**ESTUDIOS DE HIDROLOGÍA (INFORME PRINCIPAL)
Anexo 6 Calidad del Agua (Medio magnético)**



**ESTUDIOS DE HIDROLOGÍA (INFORME PRINCIPAL)
Anexo 7 Calibración Modelo Hidrológico (Medio magnético)**