
ESTUDIOS Y DISEÑOS DEFINITIVOS, FINANCIACIÓN, GESTIÓN AMBIENTAL, PREDIAL Y SOCIAL, CONSTRUCCIÓN, MEJORAMIENTO, REHABILITACIÓN, OPERACIÓN, MANTENIMIENTO Y REVERSIÓN DEL CORREDOR VIAL PAMPLONA-CÚCUTA

ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS

CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA



sacyr
INGENIERÍA E
INFRAESTRUCTURAS

**Unión Vial
Río Pamplonita**
Una Compañía de Sacyr Concesiones

ANi
Agencia Nacional de
Infraestructura

CORREDOR VIAL DOBLE CALZADA PAMPLONA – CÚCUTA

CORREDOR 4G PAMPLONA - CÚCUTA

ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA – LOS ACACIOS

CAPITULO 5.1.8 Caracterización del Área de Influencia - Hidrogeología.

TABLA DE CONTENIDO

| | | |
|-----------|--|----|
| 5. | CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA..... | 1 |
| 5.1 | MEDIO ABIÓTICO..... | 1 |
| 5.1.8 | Hidrogeología | 1 |
| 5.1.8.1 | Objetivo General..... | 1 |
| 5.1.8.2 | Objetivo Específicos | 1 |
| 5.1.8.3 | Alcance..... | 1 |
| 5.1.8.4 | Metodología para la vía a cielo abierto y túnel de Pamplonita | 2 |
| 5.1.8.4.1 | Área de influencia Hidrogeológica | 7 |
| 5.1.8.4.2 | Marco Teórico | 10 |
| 5.1.8.4.3 | Definiciones Hidrogeología..... | 10 |
| 5.1.8.4.4 | Clasificación de unidades hidrogeológicas | 12 |
| 5.1.8.4.5 | Pasos para la clasificación de puntos hidrogeológicos | 14 |
| 5.1.8.4.6 | Clasificación de los puntos hidrogeológicos | 14 |
| 5.1.8.5 | Geología de referencia | 20 |
| 5.1.8.6 | Inventario y clasificación de puntos hidrogeológicos..... | 20 |
| 5.1.8.6.1 | Resultados de campo..... | 21 |
| 5.1.8.6.2 | Análisis de los datos de interés hidrogeológico provenientes del inventario | 40 |
| 5.1.8.7 | Caracterización Hidrogeoquímica del agua muestreada..... | 58 |
| 5.1.8.7.1 | Criterios para la selección de los puntos de agua para muestreo y análisis de laboratorio..... | 59 |
| 5.1.8.7.2 | Puntos de agua seleccionados..... | 59 |
| 5.1.8.7.3 | Parámetros analizados..... | 59 |
| 5.1.8.7.4 | Clasificación Hidrogeoquímica | 64 |
| 5.1.8.8 | Modelo Hidrogeológico Conceptual UF3-4-5 (Túnel y Vía a Cielo Abierto) | 74 |

| | | |
|------------|---|-----|
| 5.1.8.8.1 | Principales unidades geológicas y su comportamiento hidrogeológico | 74 |
| 5.1.8.8.2 | Principales zonas de recarga y descarga | 78 |
| 5.1.8.8.3 | Dirección preferencial del flujo subsuperficial y subterráneo..... | 78 |
| 5.1.8.8.4 | Dinámica del flujo de agua subsuperficial y subterránea | 79 |
| 5.1.8.9 | Modelos conceptuales de puntos de agua más relevantes para el proyecto | 80 |
| 5.1.8.10 | Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los Acuíferos a la contaminación en las UF3-4-5..... | 132 |
| 5.1.8.10.1 | Metodología GOD..... | 133 |
| 5.1.8.10.1 | Grado Confinamiento Hidráulico (G)..... | 135 |
| 5.1.8.10.2 | Ocurrencia del Sustrato Suprayacente (O) | 136 |
| 5.1.8.10.3 | Distancia al Nivel de Agua Subterránea (D)..... | 140 |
| 5.1.8.10.4 | Clasificación de la Vulnerabilidad | 143 |
| 5.1.8.11 | Valoración del riesgo de contaminación del acuífero por el desarrollo de las actividades y obras planteadas en las UF3-4-5..... | 145 |
| 5.1.8.11.1 | Introducción..... | 145 |
| 5.1.8.11.2 | Metodología aplicada | 145 |
| 5.1.8.11.3 | Análisis de la vulnerabilidad | 146 |
| 5.1.8.11.4 | Factores de peligrosidad de las fuentes de amenaza | 147 |
| 5.1.8.11.5 | Evaluación del riesgo | 148 |
| 5.1.8.11.6 | Resultados | 149 |
| 5.1.8.12 | Valoración del potencial de afectación de los puntos de agua censado en la vía a cielo abierto y zodmes de las UF3-4-5. | 151 |
| 5.1.8.12.1 | Criterios utilizados | 151 |
| 5.1.8.12.2 | Resumen evaluación de impactos puntos vía a cielo abierto y zodmes sin incluir túnel..... | 162 |
| 5.1.8.12.3 | Medidas de manejo de impactos | 162 |
| 5.1.8.13 | Caracterización hidrogeológica particular para el Túnel de Pamplonita | 182 |
| 5.1.8.13.1 | Datos generales del túnel..... | 182 |
| 5.1.8.13.2 | Análisis hidrogeológico de los puntos de agua representativos en el área del túnel..... | 184 |
| 5.1.8.13.3 | Valoración de la recarga túnel de Pamplonita..... | 192 |
| 5.1.8.13.4 | Caracterización hidrodinámica de los terrenos y rocas interceptados | |

| | |
|--|-----|
| por la excavación del túnel de Pamplonita..... | 222 |
| 5.1.8.14 Probabilidad de afectación de los puntos de agua existentes en el área del túnel según método DHI..... | 242 |
| 5.1.8.14.1 Método del cálculo..... | 243 |
| 5.1.8.14.2 Descripción de las variables del sistema | 244 |
| 5.1.8.14.3 Resultados | 251 |
| 5.1.8.14.4 Medidas de prevención, mitigación y compensación específicas para el área del túnel. | 254 |
| 5.1.8.15 Modelo numérico del flujo subsuperficial y subterráneo Túnel de Pamplonita..... | 267 |
| 5.1.8.15.1 Introducción..... | 267 |
| 5.1.8.15.2 Principales elementos considerados en la simulación numérica... .. | 271 |
| 5.1.8.15.3 Método de modelación | 272 |
| 5.1.8.15.4 Parametrización, corrida y calibración del modelo | 276 |
| 5.1.8.15.5 Resultados del modelo numérico..... | 290 |
| 5.1.8.15.6 Caudal crítico | 300 |
| 5.1.8.15.7 Consideraciones finales..... | 301 |
| 5.1.8.16 Red de Monitoreo | 303 |
| 5.1.8.16.1 Criterios de Selección de Puntos para la Red de Monitoreo | 303 |
| 5.1.8.16.2 Puntos de agua seleccionados para integrar la red de monitoreo propuesta | 305 |
| 5.1.8.16.3 Frecuencia de las mediciones | 314 |
| 5.1.8.17 Conclusiones..... | 321 |
| 5.1.8.17.1 Resultado del inventario de puntos de agua UF3-4-5..... | 321 |
| 5.1.8.17.2 Resultado de los análisis hidrogeoquímicos | 322 |
| 5.1.8.17.3 Modelo hidrogeológico conceptual (Túnel y vía a cielo abierto).... | 322 |
| 5.1.8.17.4 Vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos presentes en la UF3-4-5 | 322 |
| 5.1.8.17.5 riesgo de contaminación del acuífero por el desarrollo de las actividades y obras planteadas..... | 323 |
| 5.1.8.17.6 Valoración del potencial de afectación de los puntos de agua relacionados con la vía a cielo abierto y zóndes. | 323 |
| 5.1.8.17.7 Valoración del potencial de afectación de los puntos de agua relacionados con el túnel de Pamplonita aplicando la metodología DHI. | 323 |
| 5.1.8.17.8 Medidas de mitigación y compensación. | 324 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| 5.1.8.17.9 | Cálculo del caudal esperado en el túnel de Pamplonita..... | 324 |
| 5.1.8.17.10 | Zonas potencialmente críticas hidrogeológicamente en el túnel de Pamplonita | 324 |
| 5.1.8.17.11 | Modelo numérico del flujo subterráneo presente en el túnel de Pamplonita | 325 |
| 5.1.8.17.12 | Red de monitoreo | 325 |
| 5.1.8.18 | Recomendaciones | 326 |
| 5.1.8.19 | Referencias bibliográficas..... | 326 |

CORREDOR 4G PAMPLONA - CÚCUTA

ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA – LOS ACACIOS

CAPITULO 5.1.8 Caracterización del Área de Influencia - Hidrogeología.

ÍNDICE DE TABLAS

| | Pág. |
|---|------|
| Tabla 5-2.1. Puntos de agua naturales censados en la UF3..... | 24 |
| Tabla 5-2.2. Puntos de agua naturales censados en la UF4..... | 29 |
| Tabla 5-2.3. Puntos de agua naturales censados en la UF5..... | 36 |
| Tabla 5-2.4. Puntos de agua antrópicos censados en las UF3-4-5..... | 37 |
| Tabla 5-2.5. Piezómetros existentes censados en las UF3-4-5..... | 38 |
| Tabla 5-2.6. Clasificación de puntos de agua de acuerdo con su caudal. | 40 |
| Tabla 5-2.7. Caudales característicos de los puntos de agua inventariados en las UF3-4-5. (Abril - Julio de 2018)..... | 40 |
| Tabla 5-2.8. Contraste de valores de caudales medidos en diferentes períodos estacionales en 65 puntos de agua de referencia..... | 47 |
| Tabla 5-2.9. Valores para la conductividad y los STD de todos los puntos censados en las UF3-4-5. | 50 |
| Tabla 5-2.10. Puntos de agua seleccionados para muestreo y análisis hidrogeoquímico en las UF3-4-5. | 60 |
| Tabla 5-2.11. Equivalencia de códigos de muestreo y códigos para puntos de agua..... | 61 |
| Tabla 5-2.12. Parámetros hidrogeoquímicos medidos en los puntos de agua seleccionados en el área de influencia de las UF3-4-5, de acuerdo con la resolución 751 de marzo del 2015 (1). | 62 |
| Tabla 5-2.13. Parámetros hidrogeoquímicos medidos en los puntos de agua seleccionados en el área de influencia de las UF3-4-5, de acuerdo con la resolución 751 de marzo del 2015 (2). | 63 |
| Tabla 5-2.14. Facies hidrogeoquímicas de los puntos de agua muestreados. | 69 |
| Tabla 5-2.15. Complejos hidrogeológicos de las UF3-4-5..... | 76 |
| Tabla 5-2.16 Definición práctica de clases de Vulnerabilidad a la Contaminación de Acuíferos | 133 |
| Tabla 5-2.17 Vulnerabilidad de unidades hidrogeológicas según grado de confinamiento. | 135 |
| Tabla 5-2.18 Vulnerabilidad de unidades hidrogeológicas según sustrato suprayacente para las UF3-4-5. | 138 |
| Tabla 5-2.19. Vulnerabilidad de unidades hidrogeológicas por distancia al nivel del agua subterránea. | 140 |
| Tabla 5-2.20. Clasificación adoptada por la evaluación del Factor de peligrosidad (Fp) | 147 |
| Tabla 5-2.21. Clasificación adoptada por la evaluación del Factor de contacto (Fc) | 148 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 5-2.22. Cálculo del riesgo (R) mínimo y máximos posibles y del riesgo normalizado (Rn), entre 0 y 1 | 149 |
| Tabla 5-2.23. Potencial de afectación de los puntos de agua encontrados en las UF3-4-5 | 154 |
| Tabla 5-2.24. Medidas de manejo discriminadas por punto para las UF3-4-5 | 173 |
| Tabla 5-2.25. Datos generales del Túnel de Pamplonita | 182 |
| Tabla 5-2.26. Datos de información de base relacionada con los puntos de agua representativos en el sector del túnel de Pamplonita. | 185 |
| Tabla 5-2.27 Clasificación de parámetros en función de la variación del Índice de Aridez | 196 |
| Tabla 5-2.28 Estaciones meteorológicas utilizadas | 199 |
| Tabla 5-2.29 Índice de Aridez de Marttne Ajustado para las áreas de estudio | 210 |
| Tabla 5-2.30 Clasificación de Permeabilidad en la Zona de Estudio de acuerdo con método Kennessy | 211 |
| Tabla 5-2.31 Clasificación cobertura vegetal y uso del suelo en las zonas de estudio ... | 214 |
| Tabla 5-2.32 Escorrentía Superficial – Régimen Anual | 216 |
| Tabla 5-2.33 Régimen de Infiltración Anual | 218 |
| Tabla 5-2.34. Descripción de la permeabilidad de acuerdo con la norma AFTES | 222 |
| Tabla 5-2.35. Datos de caracterización hidrogeológica de las unidades geológicas interceptadas por el túnel (información primaria). | 226 |
| Tabla 5-2.36 Campo de variación de la permeabilidad asociada a las clases de roca de acuerdo con el índice RMR | 227 |
| Tabla 5-2.37. – Campo de variación de la permeabilidad asociada al grado de fracturación del macizo rocoso. | 227 |
| Tabla 5-2.38. – Permeabilidad atribuida a los tramos de túnel para condiciones geológico-geomecánicas homogéneas. Grado de fracturación H=Alto; M=Medio y L=Bajo. | 228 |
| Tabla 5-2.39 – Valoración de la carga hidráulica en correspondencia con el eje del túnel de Pamplonita | 229 |
| Tabla 5-2.40. Datos piezométricos disponibles. Se muestran los valores de profundidad del nivel freático y de carga hidráulica sobre la clave del túnel (m) | 230 |
| Tabla 5-2.41. Cálculo analítico del caudal esperado en el túnel de Pamplonita a corto plazo. | 235 |
| Tabla 5-2.42 – Valores de caudales específicos a corto plazo a lo largo del túnel de Pamplonita (valores mínimos y máximos) | 236 |
| Tabla 5-2.43 – Valores de caudales estabilizados a largo plazo a lo largo del túnel de Pamplonita sin considerar limitación de la recarga (valores mínimos y máximos) | 238 |
| Tabla 5-2.44. Cálculo del caudal esperado en el túnel (valoración analítica) a largo plazo con aplicación de la valoración numérica | 240 |
| Tabla 5-2.45. Descripción de las ocho (8) variables del sistema acuífero-túnel y definición de los índices correspondientes para los puntos de agua | 249 |
| Tabla 5-2.46. Grado de probabilidad de afectación de los puntos de agua. | 251 |
| Tabla 5-2.47. Potencial de impacto sobre los puntos de agua representativos localizados en la zona de influencia del túnel de Pamplonita. | 251 |
| Tabla 5-2.48. Cálculo valor DHI para los puntos de agua representativos en el túnel de Pamplonita | 252 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 5-2.49. Puntos de agua representativos según probabilidad de impacto DHI localizados en la zona de influencia del túnel de Pamplonita. | 253 |
| Tabla 5-2.50. Tramos del túnel de Pamplonita donde de acuerdo con el perfil geológico y geotécnico se prevé encontrar zonas de fallas y/o zonas de mayor fracturación y/o zonas de mayor permeabilidad. | 259 |
| Tabla 5-2.51. Descripción del tipo de intervención en relación con la probabilidad de impacto atribuida a los puntos de agua analizados. | 262 |
| Tabla 5-2.52. Resultados de las calibraciones de los modelos considerando los valores de la cota piezométrica medida en el eje del túnel. | 276 |
| Tabla 5-2.53. Valores de Permeabilidad Hidráulica a lo largo de la sección S1. | 279 |
| Tabla 5-2.54. Valores de Permeabilidad Hidráulica a lo largo de la sección S2. | 281 |
| Tabla 5-2.55. Valores de Permeabilidad Hidráulica a lo largo de la sección S3. | 282 |
| Tabla 5-2.56. Curva de abatimiento del caudal esperado en el túnel en correspondencia con la sección S1. | 292 |
| Tabla 5-2.57. Curva de abatimiento del caudal esperado en el túnel en correspondencia con la sección S2. | 294 |
| Tabla 5-2.58. Curva de alimentación del punto de agua UF3-PA54 a lo largo de la sección S2. | 296 |
| Tabla 5-2.59. Curva de abatimiento del caudal esperado en el túnel en correspondencia con la sección S3. | 297 |
| Tabla 5-2.60. Curva de alimentación del punto de agua UF3-PA29 a lo largo de la sección S3. | 299 |
| Tabla 5-2.61. Caudal crítico establecido para el túnel de Pamplonita. | 301 |
| Tabla 5-2.62 Tipo de punto de control y mediciones relacionadas con el monitoreo tipo A de los puntos de agua seleccionados | 305 |
| Tabla 5-2.63 Puntos de agua subsuperficial y subterránea que integran la red de monitoreo. | 307 |
| Tabla 5-2.64 Piezómetros que integran la red de monitoreo del túnel de Pamplonita y correspondencia con puntos de sondeo. | 310 |
| Tabla 5-2.65 Puntos de agua representados por puntos sobre cursos de aguas superficiales que integran la red de monitoreo de las UF3-4-5. | 311 |
| Tabla 5-2.66 Parámetros del monitoreo tipo B según las especificaciones de la Tabla 5 de la Resolución N. 0751 del 2015. | 313 |
| Tabla 5-2.67 Frecuencia de medición red de monitoreo de las UF3-4-5. | 315 |
| Tabla 5-2.68. Zonas potencialmente críticas en el túnel de Pamplonita. | 325 |

CORREDOR 4G PAMPLONA - CÚCUTA

ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA – LOS ACACIOS

CAPITULO 5.1.8 Caracterización del Área de Influencia - Hidrogeología.

ÍNDICE DE FIGURAS

| | Pág. |
|--|------|
| Figura 5-2.1 Localización de las principales prospecciones realizadas en las UF3-4-5..... | 4 |
| Figura 5-2.2 Zona de influencia hidrogeológica de las UF3-4-5. | 9 |
| Figura 5-2.3. Esquema de un acuífero colgado (Fetter, 1980). | 11 |
| Figura 5-2.4. Acuífero libre, confinado o de nivel freático (Fetter, 1980)..... | 11 |
| Figura 5-2.5. Estratigrafía en un sistema acuífero (Fetter, 1980) | 12 |
| Figura 5-2.6. Esquema de colores para representación hidrogeológica – IAH (1995)..... | 13 |
| Figura 5-2.7. Ejemplo de implementación de colores para representación hidrogeológica – IAH (1995) | 13 |
| Figura 5-2.8. Ocurrencia de manantiales a causa de variables geológicas | 16 |
| Figura 5-2.9. Tipos de manantiales..... | 17 |
| Figura 5-2.10. Resurgencia..... | 17 |
| Figura 5-2.11. Interflujo (SEEP en la imagen) | 18 |
| Figura 5-2.12. Clasificación de puntos de agua | 19 |
| Figura 5-2.13. Localización puntos de agua censados en las UF3-4-5 | 23 |
| Figura 5-2.14. Valores de caudal de los puntos de agua encontrados durante el inventario en las UF3-4-5 (Abril - Julio de 2018) | 46 |
| Figura 5-2.15. Valores de caudal de los puntos de agua encontrados durante el inventario en las UF3-4-5 en 65 puntos de referencia (Nov – Dic 2017)..... | 49 |
| Figura 5-2.16. Valores de caudal de los puntos de agua encontrados durante el inventario en las UF3-4-5 en 65 puntos de referencia (Julio de 2018)..... | 50 |
| Figura 5-2.17. Distribución de la conductividad en todos los puntos censados en las UF3-4-5. | 56 |
| Figura 5-2.18. Distribución de los STD en todos los puntos censados en las UF3-4-5..... | 57 |
| Figura 5-2.19. Ubicación de los puntos con muestreo hidroquímico en la UF3 | 65 |
| Figura 5-2.20. Clasificación química de los tipos de agua en el diagrama de Piper. | 66 |
| Figura 5-2.21. Diagrama de Piper para las muestras de 21 puntos de agua analizados .. | 67 |
| Figura 5-2.22. Diagrama de Shoeller para las veintiún fuentes de agua analizadas | 68 |
| Figura 5-2.23. Gráficos de correlación entre los iones Na^+ y Cl^- expresados en mg/l..... | 69 |
| Figura 5-2.24. Correlación entre los iones $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}$ versus $\text{SO}_4^{2-}+\text{HCO}_3^-$ en meq/l..... | 70 |
| Figura 5-2.25. Diagramas de Stiff para las veintiún fuentes analizadas | 71 |
| Figura 5-2.26. Correlación de la elevación con la conductividad eléctrica y el potencial redox para los puntos de agua analizados..... | 72 |
| Figura 5-2.27. Temperatura de los puntos de agua analizados..... | 73 |
| Figura 5-2.28. Triangulo de Giggenbach para los puntos de agua analizados. | 74 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5-2.29. Ubicación de los puntos UF3-PA26 y UF3-PA33. | 81 |
| Figura 5-2.30. Escarpe de socavación zona distal del abanico aluvial con ubicación de los puntos UF3-PA26 y UF3-PA33. | 82 |
| Figura 5-2.31. Perfil geológico puntos UF3-PA26 y UF3-PA33. | 83 |
| Figura 5-2.32 Sondeos sobre abanico aluvial donde se encuentran los puntos UF3-PA26 y UF3-PA33. | 84 |
| Figura 5-2.33 Ubicación de los puntos UF3-PA39 y UF3-PA40. | 85 |
| Figura 5-2.34 Perfil geológico punto UF3-PA39. | 86 |
| Figura 5-2.35 Perfil geológico punto UF3-PA40. | 87 |
| Figura 5-2.36 Tubería enterrada para obtención de agua en los puntos antrópicos UF3-PA39 y UF3-PA40. | 88 |
| Figura 5-2.37 Ubicación del punto UF4-PA16. | 89 |
| Figura 5-2.38 Imagen 3D con ubicación del punto UF4-PA16. | 89 |
| Figura 5-2.39 Perfil geológico punto UF4-PA16. | 90 |
| Figura 5-2.40 Perfil geológico detallado del punto UF4-PA16. | 91 |
| Figura 5-2.41 Fotografía del punto de agua UF4-PA16 donde se puede observar el bajo caudal surgente. | 92 |
| Figura 5-2.42 Esquema de manejo de puntos de agua en áreas de zodmes. | 92 |
| Figura 5-2.43 Documento de entrega anticipada del Predio El Potrerito. | 93 |
| Figura 5-2.44 Ubicación de los puntos UF4-PA17 y UF4-PA18. | 94 |
| Figura 5-2.45 Imagen 3D con ubicación de los puntos UF4-PA17 y UF4-PA18. | 95 |
| Figura 5-2.46 Perfil geológico con ubicación de los puntos UF4-PA17 - UF4-PA18 y UF4-PA101. | 96 |
| Figura 5-2.47 Perfiles geológicos detallados de los puntos UF4-PA17 y UF4-PA18. | 97 |
| Figura 5-2.48 Perfiles geológicos detallados de los puntos UF4-PA17 y UF4-PA18. | 98 |
| Figura 5-2.49 Fotografía de los puntos UF4-PA17 - UF4-PA18. | 99 |
| Figura 5-2.50 Aspectos de trazado UF4-PA17 y UF4-PA18. | 101 |
| Figura 5-2.51 Aspectos de geotecnia UF4-PA17 y UF4-PA18. | 103 |
| Figura 5-2.52 Aspectos de áreas de exclusión UF4-PA17 y UF4-PA18. | 104 |
| Figura 5-2.53 Ubicación del punto UF4-PA21 con respecto al trazado del proyecto. | 105 |
| Figura 5-2.54 Situación del punto UF4-PA21 con respecto a otro manantial de la zona (indicador amarillo). | 106 |
| Figura 5-2.55 Perfil geológico punto UF4-PA21. | 107 |
| Figura 5-2.56 Aspectos de trazado UF4-PA21. | 108 |
| Figura 5-2.57 Aspectos de geotecnia UF4-PA21. | 110 |
| Figura 5-2.58 Aspectos de áreas de exclusión UF4-PA21. | 111 |
| Figura 5-2.59 Ubicación de los puntos UF4-PA26, UF4-PA27 y UF4-PA28. | 112 |
| Figura 5-2.60. perfil geológico de los puntos UF4-PA26, UF4-PA27 y UF4-PA28. | 113 |
| Figura 5-2.61 Medida de manejo mediante talud de recolección. | 114 |
| Figura 5-2.62 Planta con la ubicación de los puntos UF4-PA26, UF4-PA27 y UF4-PA28 y los taludes asociados con medida de manejo. | 116 |
| Figura 5-2.63 Modelo de estabilización de talud en condiciones estáticas ($FS > 1.50$). | 116 |
| Figura 5-2.64 Modelo de estabilización de talud en condiciones pseudo-estáticas ($FS > 1.05$). | 117 |
| Figura 5-2.65 Aspectos de trazado UF4-PA26, UF4-PA27 y UF4-PA28. | 118 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5-2.66 Aspectos de geotecnia UF4-PA26, UF4-PA27 y UF4-PA28..... | 120 |
| Figura 5-2.67 Aspectos de áreas de exclusión UF4-PA26, UF4-PA27 y UF4-PA28 | 121 |
| Figura 5-2.68 Limitantes al trazado por el costado oriental. Puntos UF4-PA89, UF4-PA 90 y UF4-PA 91. | 122 |
| Figura 5-2.69 Limitantes al trazado por el costado oriental. Puntos UF4-PA92, UF4-PA 93 y UF4-PA 94. | 123 |
| Figura 5-2.70 Rectificación ubicación punto UF4-PA29 | 124 |
| Figura 5-2.71 Perfil geologico de los puntos UF4-PA29 (Resurgencia) y UF4-PA49 (Manantial)..... | 125 |
| Figura 5-2.72 Perfil geologico punto UF4-PA51 | 127 |
| Figura 5-2.73 Localización del punto 86..... | 128 |
| Figura 5-2.74 Localización de punto de suministro alternativo propuesto..... | 129 |
| Figura 5-2.75 Mapa geologico con ubicación del punto UF4-PA86..... | 130 |
| Figura 5-2.76 Perfil geologico del punto UF4-PA86 | 131 |
| Figura 5-2.77. Esquema de análisis de la vulnerabilidad de acuíferos (método GOD)... .. | 134 |
| Figura 5-2.78. Distribución geográfica del parámetro G en las UF3-4-5..... | 137 |
| Figura 5-2.79. Distribución geográfica del parámetro O. | 139 |
| Figura 5-2.80. Valores de profundidad del nivel freático en la zona de estudio de las UF3-4-5. | 141 |
| Figura 5-2.81. Valores asignados al parámetro D en la zona de influencia de las UF3-4-5. | 142 |
| Figura 5-2.82. Distribución geográfica de la vulnerabilidad intrínseca en las UF3-4-5.... | 144 |
| Figura 5-2.83. Clasificación del riesgo para la zona de estudio..... | 149 |
| Figura 5-2.84. Clasificación del riesgo para la zona de estudio de las UF3-4-5 | 150 |
| Figura 5-2.85 Modificación de trazado en la unidad funcional 4 por presencia de fuentes termales..... | 163 |
| Figura 5-2.86 Modelo de cerramiento | 165 |
| Figura 5-2.87 Modelo de zanja perimetral..... | 165 |
| Figura 5-2.88 Vista esquemática de medidas básicas de protección. | 166 |
| Figura 5-2.89 Tanque para la protección de afloramientos de agua..... | 167 |
| Figura 5-2.90. Tanque de concreto en el cual se almacenará el agua del punto de agua. | 167 |
| Figura 5-2.91 Corte en un punto de agua asociado a flujo subsuperficial | 169 |
| Figura 5-2.92. Medida de manejo para punto de agua con cruce de vía en tubería. | 170 |
| Figura 5-2.93. Sección geométrica túnel de Pamplonita con contra bóveda | 182 |
| Figura 5-2.94. Localización túnel de Pamplonita..... | 183 |
| Figura 5-2.95. Depósitos de ladera observados en el apique UF3-AP01 | 184 |
| Figura 5-2.96. Distribución de los puntos de agua representativos en la zona de influencia del túnel de Pamplonita. | 187 |
| Figura 5-2.97 Relación entre los resultados de la tomografía eléctrica y el terreno relevado in situ | 188 |
| Figura 5-2.98. Sección de tomografía eléctrica AY-TE03 transversal al eje del túnel de Pamplonita..... | 189 |
| Figura 5-2.99. Sección de tomografía eléctrica (GD-TE01N) longitudinal sobre el eje del túnel de Pamplonita. | 190 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5-2.100. Perspectiva tridimensional tipo bloque diagrama del Túnel de Pamplonita. Entorno geológico e hidrogeológico..... | 191 |
| Figura 5-2.101. Esquema Metodológico..... | 192 |
| Figura 5-2.102 Área Hidrogeológica de Estudio..... | 198 |
| Figura 5-2.103 Comportamiento de la Precipitación de enero a junio | 201 |
| Figura 5-2.104 Comportamiento de la Precipitación de julio a diciembre | 202 |
| Figura 5-2.105 Correlación inversa media mensual multianual | 203 |
| Figura 5-2.106 Correlación inversa anual | 204 |
| Figura 5-2.107 Comportamiento de la Temperatura de enero a junio | 205 |
| Figura 5-2.108 Comportamiento de la Temperatura de julio a diciembre | 206 |
| Figura 5-2.109 Régimen Humedad Relativa | 207 |
| Figura 5-2.110 Régimen Evapotranspiración Potencial..... | 208 |
| Figura 5-2.111 Comportamiento Balance Hidroclimático | 209 |
| Figura 5-2.112 Clasificación de Pendientes (CA) – Pamplonita UF3..... | 212 |
| Figura 5-2.113 Clasificación de Permeabilidad (CP) – Pamplonita UF3..... | 213 |
| Figura 5-2.114 Clasificación de Cobertura Vegetal (CV) – Pamplonita UF3..... | 215 |
| Figura 5-2.115 Condición de Escorrentía Superficial (CK) – Pamplonita UF3..... | 217 |
| Figura 5-2.116 Régimen de Recarga Máxima – Túnel de Pamplonita UF3..... | 219 |
| Figura 5-2.117 Régimen de Recarga Media – Túnel de Pamplonita UF3..... | 220 |
| Figura 5-2.118 Régimen de Recarga Mínima – Túnel de Pamplonita UF3..... | 221 |
| Figura 5-2.119 Ubicación de los sondeos realizados sobre la traza del túnel de Pamplonita. | 223 |
| Figura 5-2.120. Sección longitudinal del túnel de Pamplonita con indicación de los sondeos realizados, la profundidad alcanzada, los valores de permeabilidad obtenidos en los tramos de prueba y los niveles piezométricos medidos | 225 |
| Figura 5-2.121. Análisis estadístico de los datos de permeabilidad disponibles, distinguiendo litotipo y profundidad..... | 225 |
| Figura 5-2.122. Esquema de la relación geométrica entre la posición del punto de agua considerado y el tramo de túnel de referencia..... | 244 |
| Figura 5-2.123. Ejemplo conceptual de la matriz del sistema Acuífero-túnel..... | 245 |
| Figura 5-2.124. Esquema de la influencia que la cobertura tiene sobre la amplitud de la zona plástica que se forma entorno de una excavación subterránea (A) y, a la escala del macizo, sobre la abertura media de las fracturas (B). | 246 |
| Figura 5-2.125. Relación entre el radio del túnel y el caudal drenado aplicando la ecuación de Goodman..... | 247 |
| Figura 5-2.126. Esquema conceptual del efecto topográfico (ET). En la tabla de la izquierda se muestran los valores que asume ET para puntos de agua..... | 248 |
| Figura 5-2.127. (a y b) Secuencia de excavación por etapas en terrenos de muy mala calidad geotécnica. NATM. | 255 |
| Figura 5-2.128. Túnel de Pamplonita, sección tipo SC-V, secuencia de excavación por etapas en terrenos de muy pobre calidad geotécnica. NATM. | 256 |
| Figura 5-2.129. Fracturamiento del macizo rocoso por la voladura. | 257 |
| Figura 5-2.130. Post-inyecciones de impermeabilización contingentes..... | 258 |
| Figura 5-2.131. Medidas de compensación especiales transitorias o permanentes – esquema..... | 264 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5-2.132. Medidas de compensación estándar transitorias o permanentes – localización (1)..... | 265 |
| Figura 5-2.133. Medidas de compensación estándar transitorias o permanentes – localización (2)..... | 266 |
| Figura 5-2.134 Trazado del eje de las secciones a través de las cuales se realizaron los modelos numéricos en sección vertical..... | 270 |
| Figura 5-2.135 Grilla utilizada para el modelo numérico a lo largo de la sección S1. | 273 |
| Figura 5-2.136 Grilla utilizada para el modelo numérico a lo largo de la sección S2. | 274 |
| Figura 5-2.137 Grilla utilizada para el modelo numérico a lo largo de la sección S3. | 275 |
| Figura 5-2.138. Diagramas de dispersión de las medidas piezométricas medidas a lo largo del eje del túnel en correspondencia con las secciones consideradas para simulaciones numéricas..... | 278 |
| Figura 5-2.139. Valores de permeabilidad hidráulica a lo largo de la sección S1. | 280 |
| Figura 5-2.140. Distribución de la permeabilidad hidráulica a lo largo de la sección S2. | 282 |
| Figura 5-2.141. Distribución de la permeabilidad hidráulica a lo largo de la sección S3. | 283 |
| Figura 5-2.142. Soportes de pruebas físicas realizadas - Informe..... | 284 |
| Figura 5-2.143. Soportes de Pruebas Físicas Realizadas – Datos Obtenidos en Pruebas de Bombeo (Lecturas Pozo Observación) | 284 |
| Figura 5-2.144. Soportes de Pruebas Físicas Realizadas – Datos Obtenidos en Pruebas de Recuperación (Lecturas Pozo Observación)..... | 285 |
| Figura 5-2.145. Soportes de Pruebas Físicas Realizadas – Datos Obtenidos en Pruebas de Bombeo (Lecturas Pozo Bombeo) | 285 |
| Figura 5-2.146. Gráfica de tiempos extendidos para la prueba de bombeo. | 287 |
| Figura 5-2.147. Simulación en estado estacionario a lo largo de la sección S1. | 288 |
| Figura 5-2.148. Simulación en estado estacionario a lo largo de la sección S2. | 289 |
| Figura 5-2.149. Simulación en estado estacionario a lo largo de la sección S3. | 290 |
| Figura 5-2.150. Variación del nivel piezométrico simulado en el piezómetro UF3-PZ05 | 293 |
| Figura 5-2.151. Simulación de los flujos en estado transitorio a lo largo de la sección S1 con presencia del túnel (10 años)..... | 294 |
| Figura 5-2.152. Variación del nivel piezométrico simulado en el piezómetro PZ06. | 295 |
| Figura 5-2.153. Simulación de los flujos en estado transitorio a lo largo de la sección S2 con presencia del túnel (10 años)..... | 297 |
| Figura 5-2.154. Simulación de los flujos en estado transitorio a lo largo de la sección S3 con presencia del túnel (10 años)..... | 299 |
| Figura 5-2.155. Variación del nivel piezométrico simulado en correspondencia con el eje del túnel (izquierda) y el punto de agua UF3-PA29 (derecha). | 300 |

CORREDOR 4G PAMPLONA - CÚCUTA

ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA – LOS ACACIOS

CAPITULO 5.1.8 Caracterización del Área de Influencia - Hidrogeología.

LISTADO DE ANEXOS

ANEXO 5.1.3.1_FUNIAS
ANEXO 5.1.3.2_MODELOS CONCEPTUALES PUNTOS DE AGUA
ANEXO 5.1.3.3_MAPA HIDROGEOLÓGICO
ANEXO 5.1.3.4_HIDROQUIMICA_LABORATORIO
ANEXO 5.1.3.5_TOMOGRFIA ELÉCTRICA
ANEXO 5.1.3.6_FICHAS DE SONDEOS
ANEXO 5.1.3.7_ENSAYOS Y PRUEBAS HIDRÁULICAS
ANEXO 5.1.3.8_PERFIL HIDROGEOLÓGICO

5. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA

5.1 MEDIO ABIÓTICO

5.1.8 Hidrogeología

El estudio hidrogeológico del corredor vial Cúcuta - Pamplona, se enmarca en los términos de referencia con códigos M-M-INA-02, emitidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible el 26 de marzo del 2015, la metodología general para la presentación de estudios ambientales (MAVDT 2010) en proyectos de construcción de carreteras, las especificaciones técnicas del proyecto vial Cúcuta – Pamplona. De forma adicional en el desarrollo del presente estudio se emplea literatura hidrogeológica especializada.

5.1.8.1 Objetivo General

Realizar la caracterización del componente hidrogeológico de las unidades funcionales 3,4 y 5 (UF3-4-5) de la vía Cúcuta-Pamplona.

5.1.8.2 Objetivo Específicos

- i. Recolectar información secundaria regional y local relacionada con el componente hidrogeológico (fuentes: SGC, IDEAM, IGAC, MINAMBIENTE, entre otros).
- ii. Analizar la información existente hidrogeológica, hidrológica, geofísica, geoquímica y de caracterización de las aguas subsuperficiales y subterráneas sobre el área de estudio.
- iii. Realizar inventario de puntos de agua consistente en pozos, aljibes, surgencias de flujos subsuperficiales (llamados también flujos hipodérmicos e interflujo), resurgencias (filtraciones difusas), afloramientos antrópicos y manantiales presentes en el área de estudio, determinando el nivel freático, unidad acuífera captada, caudales y tiempos de explotación, usos y números de usuarios.
- iv. Identificar regionalmente las unidades hidrogeológicas captadas a partir de las unidades geológicas presentes e identificar los tipos de acuíferos.
- v. Estimar el flujo de agua subterránea, agua subsuperficial y posibles conexiones hidráulicas entre acuíferos y cuerpos de agua superficiales.
- vi. Identificar las zonas de recarga y descarga naturales de los acuíferos.
- vii. Evaluar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación para proteger la calidad del mismo.
- viii. Evaluar el riesgo de contaminación del acuífero por el desarrollo de las actividades y obras planteadas

5.1.8.3 Alcance

El alcance del presente capítulo está enfocado en la identificación y caracterización de aguas subsuperficiales y subterráneas y de los acuíferos presentes en la zona de influencia

hidrogeológica de las unidades funcionales 3,4, y 5 (UF3-4-5), de manera que se pueda establecer una línea base que servirá de referencia para el posterior monitoreo de este recurso en términos de calidad y cantidad.

Como producto final de los diferentes análisis se entrega una valoración de los potenciales impactos que por la construcción de la vía a cielo abierto pudieran sufrir los puntos de agua identificados en el inventario. Esta valoración será hecha mediante un análisis de sensibilidad que toma en cuenta condiciones hidrogeológicas de los puntos de agua y los tipos de estructuras a construir.

De manera análoga, pero para el túnel de Pamplonita, se entrega un análisis en términos probabilísticos que valora el potencial impacto que la excavación del túnel pudiera tener sobre los puntos de agua identificados en su zona de influencia. Esto se hace aplicando el método DHI (Drawdown Hazard Index).

5.1.8.4 Metodología para la vía a cielo abierto y túnel de Pamplonita

En los siguientes numerales se menciona el procedimiento seguido para obtener el resultado final, sin entrar en el detalle de la metodología técnica, la cual se trata de forma detallada en cada capítulo específico.

- Recopilación y análisis de información secundaria

En la fase inicial se recopila y analiza la información técnica secundaria existente, relacionada con aspectos geológicos, geotécnicos estructurales, geomorfológicos, hidrogeológicos y en general, toda la información recopilada relacionada con estructuración y diseños de las obras de la UF3-4-5 incluyendo perforaciones, planos, entre otra información de importancia. Adicionalmente se obtiene información de fuentes oficiales como planchas geológicas y memorias explicativas del Servicio Geológico Colombiano (en adelante SGC) (Plancha 110_Pamplona y Plancha 98_Durania, escala 1:100.000); del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (en adelante IDEAM), con los datos de estaciones en el área de estudio, Estudio Nacional del Agua 2014; del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Metodologías, Resoluciones, etc.) entre otras entidades ambientales para el interés del presente estudio. También se utilizaron: Cobertura Vegetal Corine Land Cover (imagen rapideye año 2017), Modelo de Elevación Digital del Terreno (imagen Alos-palsar del 2011) y ortofotos del proyecto (año 2018).

- Marco conceptual

Corresponde al marco que rige en gran parte el presente estudio. Se toma en cuenta el estado del arte para cada temática desarrollada. En particular, para la clasificación de los puntos de agua se ha tomado como referencia el desarrollo conceptual entregado por la UVRP e Hidrogeocol.

- Recopilación y análisis de información primaria

Dentro de la información primaria recopilada durante las diferentes campañas de investigación realizadas por Sacyr construcción para el túnel y vía a cielo abierto se obtuvo y analizó la siguiente información de interés hidrogeológico:

Investigaciones UF3:

- 8 perforaciones mecánicas con recuperación de núcleos ejecutadas a lo largo de la traza del túnel de Pamplonita, con alcance hasta la cota del túnel.
- 8 piezómetros instalados en correspondencia con el eje del túnel de Pamplonita en las perforaciones antes indicadas.
- 4 líneas de prospección geoeléctrica con alcance hasta la cota del túnel de Pamplonita.
- 12 ensayos de permeabilidad tipo Lugeon y 3 tipo Lefranc ejecutados en las perforaciones mecánicas ejecutadas en correspondencia con el eje del túnel de Pamplonita,
- 1 pruebas de bombeo ejecutada en correspondencia con el túnel de Pamplonita,
- Datos geomecánicos obtenidos de los núcleos de las perforaciones (RQD, Co, modulo, entre otros).
- 55 perforaciones mecánicas con recuperación de núcleo ejecutadas a lo largo de la vía a cielo abierto,
- Muestreo y análisis hidroquímico con laboratorio certificado sobre 9 puntos de agua (ver capítulo de hidroquímica).

Investigaciones UF4:

- 59 perforaciones mecánicas con recuperación de núcleo ejecutadas a lo largo de la vía a cielo abierto.
- Muestreo y análisis hidroquímico con laboratorio certificado sobre 12 puntos de agua (ver capítulo de hidroquímica).

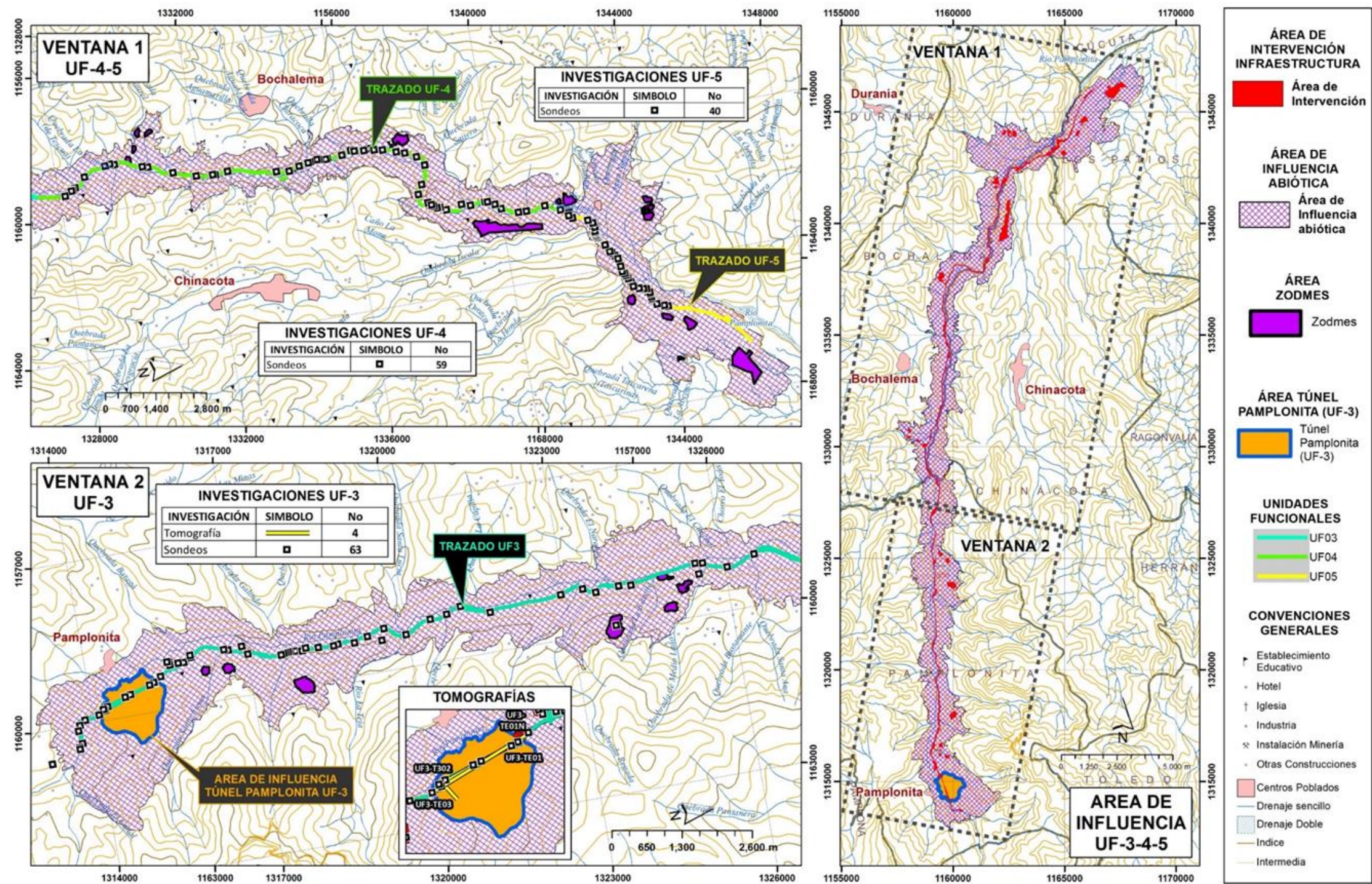
Investigaciones UF5:

- 40 perforaciones mecánicas con recuperación de núcleo ejecutadas a lo largo de la vía a cielo abierto.

Se realizó análisis hidroquímico de laboratorio para 21 puntos representativos. En la **Figura 5-2.1** se muestra la localización de las prospecciones más representativas llevadas a cabo en el área de estudio. Los resultados de estas investigaciones se incluyen en los anexos:

- Anexo 5.1.3.5_Tomografía eléctrica
- Anexo 5.1.3.6_ Fichas de los sondeos
- Anexo 5.1.3.7_Ensayos y pruebas hidráulicas

Figura 5-2.1 Localización de las principales prospecciones realizadas en las UF3-4-5



Fuente: Aecom – Concol, 2018.

- Toma de información de campo

Se realizaron varias campañas de reconocimiento de puntos de agua, la primera realizada el mes de noviembre y diciembre de 2017, la segunda el mes de abril de 2018 y la tercera en el mes de julio del 2018.

Esta fase del estudio se dividió en dos comisiones de campo integradas por profesionales y personal capacitado con el fin de recolectar información de carácter hidrogeológico representada especialmente en el inventario de puntos de agua que incluyó la medición del nivel del agua subterránea en los piezómetros.

La actividad de inventario de puntos de agua se realizó siguiendo el Formulario Único Nacional para Inventarios de Aguas Subterráneas (FUNIAS), elaborado por el IDEAM, SGC y MINAMBIENTE.

- Procesamiento de la información

En oficina, se procesó la información recolectada y levantada, con el fin de que cada dato pudiese ser usado en la elaboración del modelo hidrogeológico conceptual, análisis de la afectación potencial de las obras y la definición del área de influencia hidrogeológica.

- Análisis de la Hidrogeoquímica del Agua

Este análisis se basa en resultados de muestreo fisicoquímicos de puntos de agua y está encaminado a comprender los procesos de flujo del agua desde que se infiltra en el subsuelo hasta que se descarga nuevamente a superficie. Durante el tránsito del agua en las unidades hidrogeológicas sus características pueden cambiar por la disolución de iones, razón por la cual se analiza su concentración.

- Elaboración del Modelo Hidrogeológico Conceptual

El modelo conceptual busca abstraer de la realidad los aspectos más importantes y representativos desde el punto de vista hidrogeológico, para plasmarlos en una base más sencilla manejable tanto a nivel hidrogeológico cualitativo como a nivel numérico computacional, buscando siempre representar el medio hidrogeológico de la forma más cercana a la realidad.

Con base en la información de carácter primario y secundario disponible sobre el área de estudio, la recopilada durante las investigaciones hidrogeológicas de campo (inventario de puntos de agua) y aquella de tipo hidroquímica se elabora un Modelo Hidrogeológico Conceptual del área de estudio, identificando la relación existente entre las diferentes unidades hidrogeológicas identificadas, los tipos de drenaje dominantes, las principales zonas de carga y descarga, así como la dirección preferencial de flujo subterráneo.

- Elaboración del Modelo numérico del flujo subsuperficial y subterráneo

De manera similar a lo que sucede con el modelo hidrogeológico conceptual, el cual se toma como referencia; el modelo numérico debe entenderse como un acercamiento a la realidad que trata de simular de la mejor manera posible y con base en la información a disposición, el comportamiento de los flujos subsuperficiales y subterráneos teniendo en cuenta la construcción del túnel de Pamplonita.

Para el caso específico del túnel de Pamplonita las simulaciones numéricas realizadas se han ejecutado involucrando puntos de agua en superficie.

Para la elaboración del modelo numérico se utilizó el método de elementos finitos, código Feflow 7.0 (Wasy AG, Berlin) que aplica la ley de Darcy en todas sus partes. La cual es actualmente una de las herramientas de cálculo más utilizadas y reconocidas por la comunidad científica internacional en estudios hidrogeológicos realizados en contextos geológicos y estructurales complejos como aquel donde se construirá el túnel de Pamplonita.

No obstante, dada la complejidad geológica, estructural y por lo tanto de distribución de flujos en el contexto geológico presente en la zona de estudio, el modelo numérico realizado se cruza y complementa con otras metodologías en el tema específico de valoración de potenciales afectaciones a los puntos de agua por la presencia del túnel de Pamplonita, como por ejemplo el método DHI (Drawdown Hazard Index), de esta manera no se confía este importante resultado a una sola herramienta de cálculo.

- Definición del Área Influencia y Análisis de la Afectación Potencial y Medidas

Todas las actividades y análisis realizados mediante la anterior metodología están enfocados a definir un área de influencia hidrogeológica. De forma posterior a la definición de esta área, se realiza también un análisis con el objeto de identificar la potencial afectación del recurso hídrico subsuperficial y subterráneo (incluyendo puntos de agua) por las obras que integran el nuevo corredor vial.

Finalmente, de evidenciarse alguna afectación en cantidad o calidad del agua subsuperficial y subterránea, se plantean medidas de manejo sobre los cuerpos que tienen posibilidad de ser impactados.

- Análisis de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos

Para el análisis de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos se utilizó el método G.O.D. (Foster et al., 2002; Foster, 1987), muy eficaz en contextos análogos al objeto en estudio, que toma en cuenta tres datos fundamentales: a) el tipo de confinamiento del agua subsuperficial y subterránea o tipo de acuífero (G), b) características litológicas de la zona no saturada (O) y c) la profundidad del agua subsuperficial o subterránea (D). Se eligió este método frente a otros existentes, por ejemplo, DRASTIC, SINTACS, COP o EPIK,

especialmente por la confiabilidad de los datos a disposición tomando en cuenta la extensión del área de estudio.

- Valoración del riesgo de contaminación del acuífero por el desarrollo de las actividades y obras planteada

Este análisis específico toma en consideración las principales obras que conforman el proyecto y valora la posibilidad de que ocurra algún daño causado por la presencia de condiciones peligrosas en alguna parte de este. El riesgo representa la probabilidad e importancia de que un posible peligro se haga realidad en términos de contaminación.

El objetivo del proceso para identificar y evaluar riesgos es obtener un mayor conocimiento acerca de los tipos de sustancias y productos transportados, así como de las principales fuentes de potencial contaminación. El requisito principal de una identificación y evaluación de riesgos es adquirir un entendimiento del modelo físico del sitio, la vulnerabilidad de los acuíferos, la localización de las aguas subsuperficiales y subterráneas amenazadas para la contaminación y los tiempos de exposición a una contaminación. Estos factores son tenidos en cuenta en la valoración de riesgo realizada.

- Elaboración de la Red Monitoreo

En términos generales, son objetivos de una Red de Monitoreo para aguas subsuperficiales y subterráneas identificar las propiedades físicas, químicas y bacteriológicas del agua, su estado y variación estacional en cantidad y calidad, los efectos de los procesos naturales y los impactos antrópicos y la estimación de tendencias en cantidad y calidad.

Con base en lo anterior, para concluir y realizar seguimiento del análisis realizado, se elabora una red de monitoreo, especificando los puntos para el monitoreo, incluyendo periodicidad y parámetros a medir a lo largo de la construcción y operación del proyecto vial.

5.1.8.4.1 Área de influencia Hidrogeológica

Para la definición del área de influencia hidrogeológica se ha considerado específicamente el tipo de obra que se prevé implementar, en este caso una vía a cielo abierto con un túnel, y se ha valorado el potencial impacto que sobre el entorno hidrogeológico pudieran tener las estructuras que la conforman.

Las obras más importantes que conforman una carretera proyectada en zona de montaña, y que pueden incidir en mayor o menor grado en el abatimiento de los niveles freáticos en los acuíferos interceptados y/o redireccionamiento de los flujos que alimentan los diferentes puntos de agua en correspondencia y/o inmediaciones de las zonas de intervención, son:

- Puentes o viaductos de diferentes tipos y longitudes (impacto bajo a muy bajo). Por lo general su impacto se limita a un área relacionada con el tipo y tamaño de la

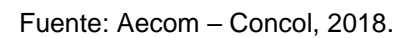
fundación. En el caso de las UF3-4-5 se construirán como mínimo 20 viaductos de diferente longitud, desde 16 m hasta 385 m.

- Terraplenes de diferentes alturas (impacto bajo a medio). Por lo general su impacto se traduce en la reducción de la permeabilidad en el terreno subyacente por el peso propio del terraplén. En el caso específico de las UF3-4-5 son varios los terraplenes que se construirán y todos de ellos altura baja a moderada.
- Vía a nivel o estructura de vía normal (impacto bajo). Por lo general su impacto se relaciona con la reducción local del área de infiltración y recarga potencial debido a la presencia de la carpeta asfáltica. Gran parte del proyecto de las UF3-4-5 se desarrollará en esta condición.
- Cortes y/o taludes de diferentes alturas y diseños (impacto medio a alto). Por lo general su impacto se considera el de mayor relevancia especialmente para los flujos subsuperficiales, dado que, dependiendo de su altura, tiene la capacidad de afectarlos o interceptarlos, con el potencial de afectar puntos de agua ubicados en cotas superiores o inferiores respecto al eje de la vía proyectada. La mayor parte de los cortes y taludes previstos en de las UF3-4-5 son menores a 30 m, con algunas excepciones que bordean los 55 m de altura.
- Zodmes (Impacto medio – alto). Por lo general su impacto se limita al área de intervención propiamente dicha y un perímetro aledaño. En de las UF3-4-5 se ha previsto el uso de 24 zodmes de diferentes tamaños.
- Túnel (impacto alto). Sin duda alguna es la obra que mayor capacidad tiene de impactar su entorno hidrogeológico debido a su efecto dren, el cual genera un cono de abatimiento alrededor del túnel. En la UF3 se tiene prevista la construcción del túnel de Pamplonita.

Tomando en cuenta lo antes expuesto y el hecho que la selección del área de estudio tiene como objetivo incluir todas las zonas donde potencialmente pudiesen ocurrir impactos a causa de la construcción y operación de la vía proyectada, el área de estudio se enmarca de la siguiente manera:

- Para la vía a cielo abierto se considera una distancia perpendicular a su trazado de 100 m para cotas superiores (buffer), mientras que para cotas inferiores se toma el área comprendida entre el eje del trazado vial y el cauce del Río Pamplonita, por ser este último el límite hidrogeológico más claro y evidente a lo largo de todas las UF3-4-5 para la vía a cielo abierto.
- Para el túnel se considera un área que se extiende para cotas superiores hasta aprox. 800 m desde la parte central del eje del túnel, mientras que para cotas inferiores esta área alcanza el cauce del Río Pamplonita.
- Para los zodmes se considera una zona equivalente al área de intervención más un polígono de 100 m a su alrededor.

En la **Figura 5-2.2** se muestra el área de influencia hidrogeológica, la cual se enmarca en el área de influencia abiótica del proyecto.



5.1.8.4.2 Marco Teórico

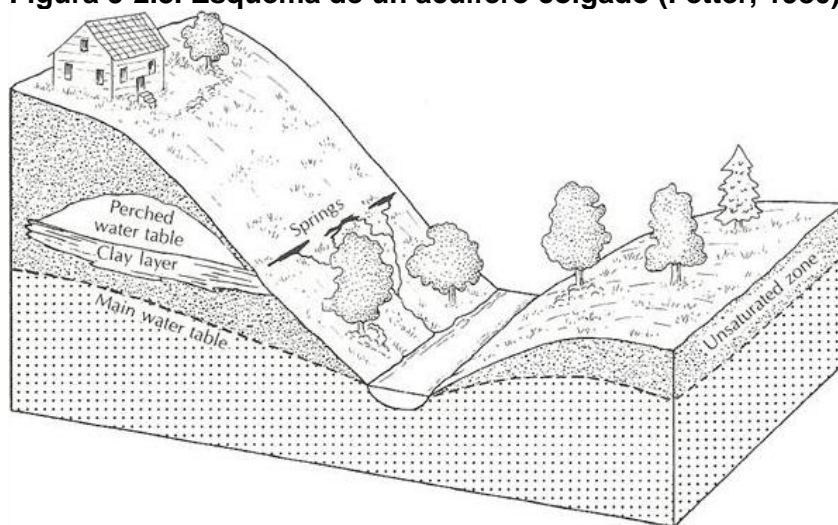
Como base para la caracterización hidrogeológica del área de estudio, es preciso realizar una síntesis teórica sobre los conceptos básicos utilizados en el desarrollo del documento, así como las definiciones y clasificaciones implementadas.

5.1.8.4.3 Definiciones Hidrogeología

- **Acuífero:** Es una formación, grupo de formaciones o parte de una formación que contiene suficiente material saturado permeable para proveer cantidades significativas de agua a pozos, aljibes y manantiales (Wilson & Moore, 1998).
- **Acuitardo:** Es una unidad geológica que no es capaz de transmitir cantidades significativas de agua, bajo gradientes hidráulicos ordinarios (Freeze & Cherry, 1979). En la actualidad el término acuitardo se reemplazó con el término capa confinante (Wilson & Moore, 1998). Sobre este tipo de unidades no es factible ubicar pozos y/o aljibes.
- **Acuífero Libre:** Acuífero en el cual el nivel piezométrico se encuentra a presión atmosférica, dentro de la zona saturada (Wilson & Moore, 1998). La recarga a estos acuíferos se da desde los procesos de infiltración descendente a través de la zona no saturada.
- **Descarga:** Se entiende como el volumen de agua que fluye en un tiempo unitario a través de una corriente o un acuífero.
- **Área de descarga:** Corresponde a un área en la cual el agua subsuperficial, incluyendo agua subterránea y agua de la zona vadosa se descarga a la superficie, a cuerpos de agua superficiales o a la atmosfera (Wilson & Moore, 1998).
- **Descarga específica:** Corresponde a una velocidad aparente calculada a partir de la ecuación de Darcy que corresponde al flujo de agua subsuperficial y subterránea por área unitaria de un acuífero.
- **Área de recarga:** Es un área bajo la cual el agua alcanza la zona saturada por medio de infiltración y percolación. Por debajo de esta zona existen componentes de gradiente hidráulico que hacen que el agua fluya a zonas más profundas del acuífero (Wilson & Moore, 1998).
- **Filtración Difusa (SEEP):** Corresponde a un área, generalmente pequeña donde el agua percola de la tierra a la superficie. Es usado para flujos muy pequeños para ser considerados manantiales (Wilson & Moore, 1998).
- **Flujo subsuperficial:** Sinónimo de filtración superficial, interflujo y flujo hipodérmico. Es una parte de la precipitación que no se ha filtrado hasta el nivel freático, pero que se descarga como flujo subsuperficial desde el terreno (Unesco, WMO, 2012).
- **Resurgencia:** Reparición por encima del suelo, al final de su recorrido subsuperficial o subterráneo, de una corriente de agua superficial que había desaparecido bajo tierra (Unesco, WMO, 2012).

Con el fin de detallar los últimos 3 conceptos descritos, en la **Figura 5-2.3** y la **Figura 5-2.4** se muestran esquemas de manantiales, tal y como son descritos por Fetter (1980).

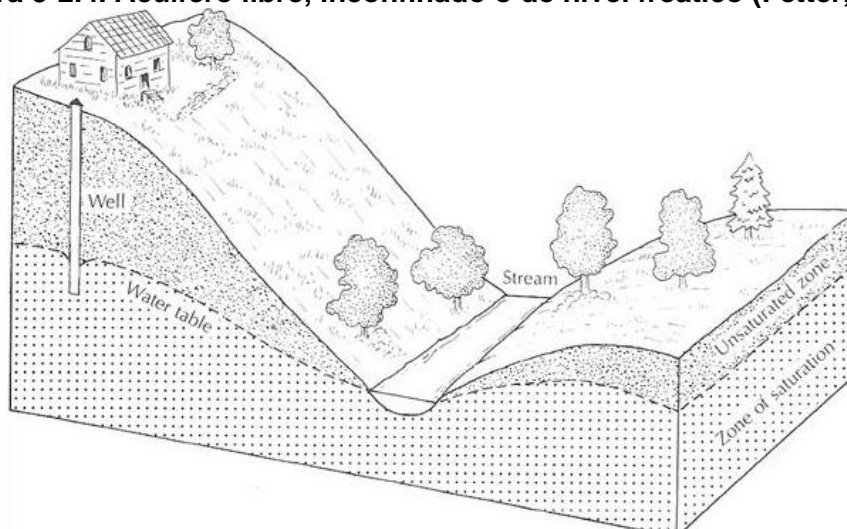
Figura 5-2.3. Esquema de un acuífero colgado (Fetter, 1980).



Fuente: Hidrogeocol, 2018

En la **Figura 5-2.3** se puede observar una zona que corresponde a manantiales (springs) ocasionados por niveles colgados (perched water table). Estos flujos de agua a la superficie corresponden a fenómenos locales no relacionados con la tabla de agua principal.

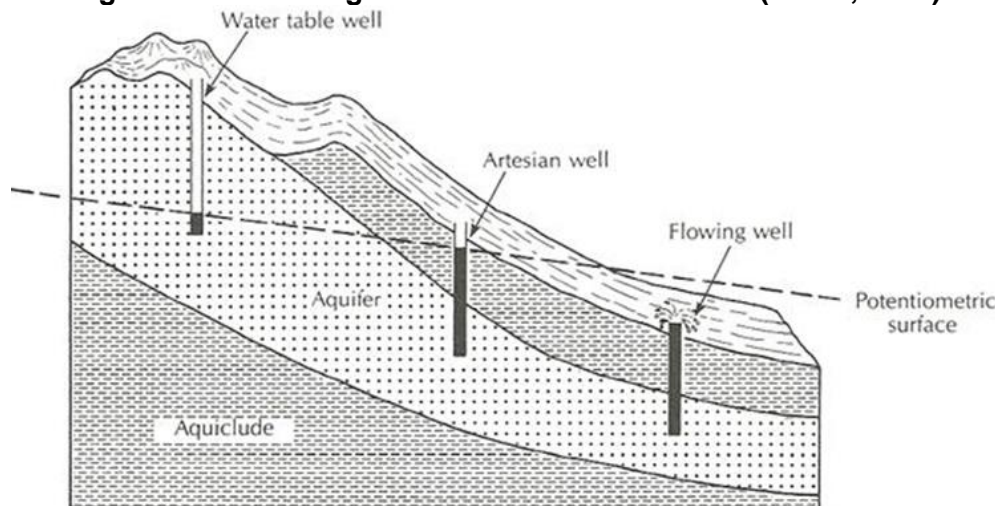
Figura 5-2.4. Acuífero libre, inconfinado o de nivel freático (Fetter, 1980)



Fuente: Hidrogeocol, 2018

En la **Figura 5-2.4** se observa el esquema de un acuífero libre de extensión regional, en el cual no hay niveles colgados, por lo cual no se observan afloramientos de agua en superficie a media ladera.

Figura 5-2.5. Estratigrafía en un sistema acuífero (Fetter, 1980)



Fuente: Hidrogeocol, 2018

En la **Figura 5-2.5** se muestra la estratigrafía de un sistema acuífero el cual se encuentra semiconfinado por capas de baja permeabilidad. La zona de recarga se muestra en la zona superior, en donde el acuífero tiene un comportamiento libre, agua abajo, el acuífero se hace confinado.

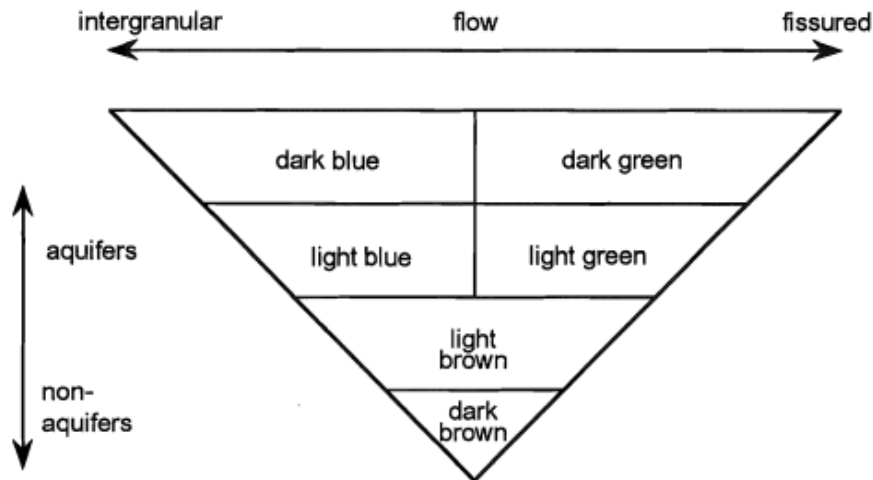
5.1.8.4.4 Clasificación de unidades hidrogeológicas

La clasificación de las unidades hidrogeológicas busca determinar de forma global los principales aspectos que controlan el flujo de agua subsuperficial y subterránea dentro del área de estudio. Los resultados de la clasificación de unidades serán implementados en el modelo conceptual de forma posterior.

Las unidades hidrogeológicas en el área de estudio se clasifican siguiendo los lineamientos planteados por la Asociación Internacional de Hidrogeología (1995) (en adelante IAH, por sus siglas en inglés). La clasificación de la IAH se basa en el tipo de porosidad dominante en los sedimentos y rocas (Primaria o intergranular y secundaria o por fracturas) y a su potencialidad acuífera, reflejada ésta última en el valor de la Capacidad Específica y la Conductividad Hidráulica de cada unidad, clasificándose las dichas unidades en acuífero, capa confinante y/o unidad sin potencial acuífero.

En la **Figura 5-2.6** se muestra el estándar de colores para la representación de unidades hidrogeológicas según la IAH (1995).

Figura 5-2.6. Esquema de colores para representación hidrogeológica – IAH (1995)



Fuente: Hidrogeocol, 2018

Figura 5-2.7. Ejemplo de implementación de colores para representación hidrogeológica – IAH (1995)

Groundwater and rocks

Aquifers in which flow is mainly intergranular



extensive and highly productive aquifers



local or discontinuous productive aquifers or extensive but only moderately productive aquifers

Fissured aquifers, including karst aquifers



extensive and highly productive aquifers



local or discontinuous productive aquifers, or extensive but only moderately productive aquifers

Strata (granular or fissured rocks) forming insignificant aquifers with local and limited groundwater resources or strata with essentially no groundwater resources



minor aquifers with local and limited groundwater resources



strata with essentially no groundwater resources

Fuente: Hidrogeocol, 2018

5.1.8.4.5 Pasos para la clasificación de puntos hidrogeológicos

A continuación, se enuncian los pasos básicos para la caracterización de los puntos hidrogeológicos:

1. Identificación de aspectos geológicos y geomorfológicos a nivel regional
2. Identificación de localización de surgencias de agua.
3. Realización de pruebas físicas de caracterización. (sondeos, slug, tomografías, SEVs, piezómetros, etc)
4. Filtro de caracterización de puntos de surgencia según ocurrencia geológica y distribución hidrogeológica.
5. Filtro de caracterización de puntos de surgencia según origen y sentido de los flujos.
6. Determinación de condiciones de cercanía y afectación a las obras viales para su clasificación en cuanto a criticidad y medidas requeridas.

Para la clasificación de los puntos hidrogeológicos se tienen en cuenta las definiciones contempladas al inicio del componente hidrogeológico:

MANANTIAL. De acuerdo a la definición, es el afloramiento de agua desde una roca o suelo en la superficie del terreno o en otros cuerpos de agua superficial. Se considera el hecho de que se origina a partir de flujo subterráneo saturado, no de flujo subsuperficial.

INTERFLUJO o Flujo Subsuperficial. Es la segunda clasificación, que corresponde a un flujo que se ha infiltrado pero que no llega hasta el nivel, sino que sigue trayectorias cortas y generalmente aflora en cursos de agua o en el suelo, formando cursos de agua superficial.

RESURGENCIA. Es la reaparición en el suelo de un agua o corriente que se ha infiltrado siguiendo trayectorias cortas, o sea se puede considerar también como flujo subsuperficial, y reaparece más aguas abajo del lugar de re-infiltración.

5.1.8.4.6 Clasificación de los puntos hidrogeológicos

Los puntos de agua subsuperficial y agua subterránea en una determinada zona pueden estar subdivididos en puntos de agua de origen natural (flujos desde el suelo hacia la superficie) y puntos de agua de origen antrópico, que son aquellos en los cuales existe un flujo de agua desde el suelo hacia la superficie ocasionado a partir de actividades humanas.

Para el presente estudio se generó una clasificación con el fin de cumplir con los objetivos planteados y siguiendo las directrices de los Términos de Referencia del ANLA. Esta clasificación corresponde a una recopilación de la literatura disponible sobre el tema, así como a la experiencia de la empresa Hidrogeocol S.A. en el desarrollo de estudios hidrogeológicos.

Para realizar la clasificación de los puntos de agua que existen en la zona se empleó bibliografía académica altamente empleada a nivel mundial. Las principales fuentes citadas se muestran en la siguiente lista. Cabe resaltar que los dos primeros documentos, datan de los años 70's y 90's, sin embargo, aún se siguen citando ampliamente en publicaciones indexadas contemporáneas.

- Custodio, E. & Llamas, M.R. (1976). Hidrología Subterránea. OMEGA ESPAÑA
- Wilson, W. & Moore, J. (1998). Glossary of Hydrology. American Geological Institute. Capital City Press.
- Kresic, N. & Stevanovic, Z. (2009). Groundwater Hydrology of Springs: Engineering, Theory, Management and Sustainability
- Fetter C.W. (2001). Applied Hydrogeology. Prentice Hall.
- Glosario Hidrológico Internacional, WMO UNESCO (2012)

Con base en la revisión de la literatura citada se realiza la definición del tipo de puntos de agua que se encuentran presentes en la zona de estudio.

- Puntos Antrópicos: Corresponden a todo elemento construido por el ser humano para la exploración y/o explotación de aguas subsuperficiales y subterráneas que no están disponibles de manera natural. Estos puntos se encuentran en un sistema hidrogeológico principalmente como:
 - A. Pozos de Agua: Corresponden a excavaciones artificiales, generalmente cilíndricas, realizadas en el suelo. Poseen una profundidad lo suficientemente alta para permitir la penetración en roca con condiciones acuíferas (Wilson & Moore, 1998).
 - B. Piezómetros: Corresponden a perforaciones utilizadas para la medición de carga hidráulica al interior de unidades acuíferas (Wilson & Moore, 1998).
 - C. Aljibes: Corresponden a pozos someros, generalmente de gran diámetro, contruidos mediante excavación manual o por medios diferentes a taladros de perforación profunda (Wilson & Moore, 1998).
 - D. Excavaciones y/o modificaciones del terreno: Corresponden a cortes de material en el terreno que modifican la topografía, cortan el nivel freático en un acuífero libre y generan exfiltraciones a partir del suelo.
- Puntos Naturales: Corresponden a todo afloramiento natural de agua desde la matriz de suelo hacia la superficie. Pueden estar asociados a flujos en zona no saturada, a la naturaleza de las rocas, a la posición de la tabla de agua y a la topografía de la zona (Wilson & Moore, 1998).
- A. Manantiales: Un manantial es un lugar en el cual el agua emerge de forma natural desde una roca o el suelo y fluye hacia la superficie o hacia una masa de agua

superficial (Unesco, WMO, 2012). El manantial es entonces el afloramiento de agua subterránea diferente de los flujos subsuperficiales llamados también interflujos o flujos hipodérmicos, los cuales que tienen generalmente trayectorias más cortas.

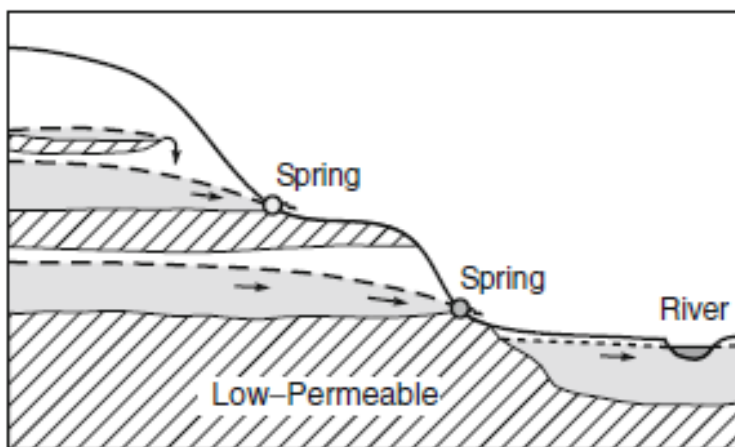
Los manantiales se clasifican de acuerdo con diferentes criterios, entre los cuales suelen ser los más usuales:

- Caudal y estacionalidad.
- Carácter de la carga hidráulica que crea la descarga.
- Unidad y estructura geológica y geomorfológica que controla el caudal (depresión, contacto, barrera, etc).
- Calidad y temperatura del agua

Se han establecido varios criterios para agrupar manantiales, algunos esquemas han sido propuestos por Fuller (1904), Keilhack (1912), Bryan (1919), Meinzer (1923), Clarke (1924), Stiny (1933), Wallace & Alfaro (2001), etc. De los anteriores esquemas, la clasificación de Meinzer, basada en 11 características de los manantiales (físicas y químicas) continúa siendo empleada, detallando únicamente los valores de caudal (1 variable de 11). La clasificación basada únicamente en la descarga promedio del manantial, sin especificar otros parámetros de descarga, no es muy útil y no permite realizar análisis cualitativos/cuantitativos válidos.

En las siguientes figuras se muestran algunos tipos de manantial, tal y como son definidos por Kresic (2010).

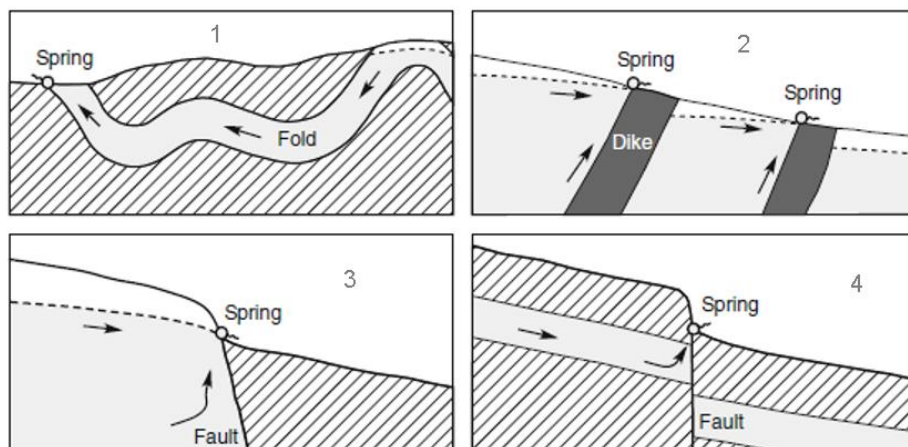
Figura 5-2.8. Ocurrencia de manantiales a causa de variables geológicas



Fuente: Hidrogeocol, 2018

En la **Figura 5-2.8** y **Figura 5-2.9** se muestra la ocurrencia de manantiales a causa de capas semiconfinantes en una unidad geológica.

Figura 5-2.9. Tipos de manantiales

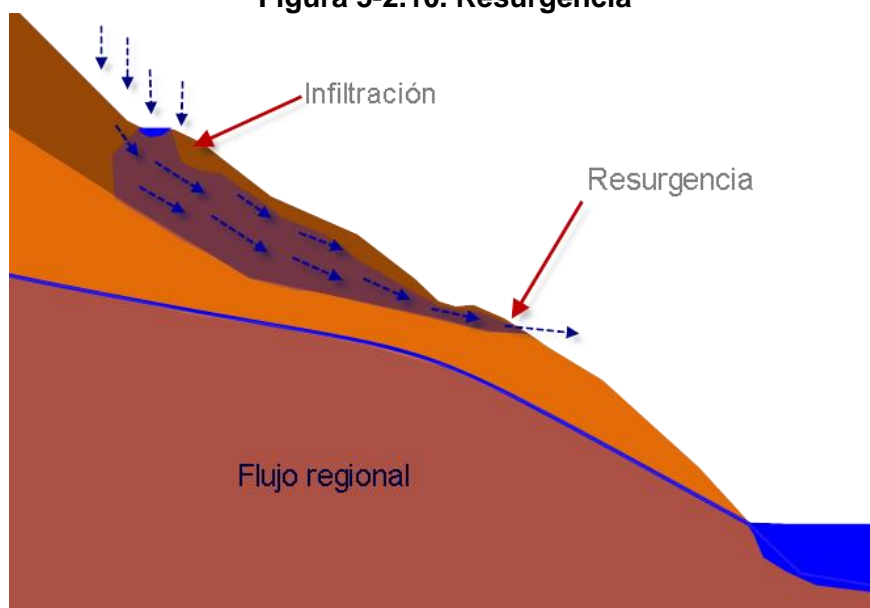


Fuente: Hidrogeocol, 2018 - Kresic (2010).

En la **Figura 5-2.9** se muestran varios tipos de manantiales. El primero corresponde a un manantial de plegamiento, el segundo a manantiales por barreras de baja permeabilidad, el tercero a manantiales por fallas que ponen en contacto dos formaciones y el cuarto a un manantial por fallas normales que separan dos tipos de formaciones.

- B. Resurgencia (Flujo Secundario): Se define como la reaparición por encima del suelo, al final de su recorrido subsuperficial o subterráneo, de una corriente de agua superficial que había desaparecido bajo tierra (Unesco, WMO, 2012).

Figura 5-2.10. Resurgencia

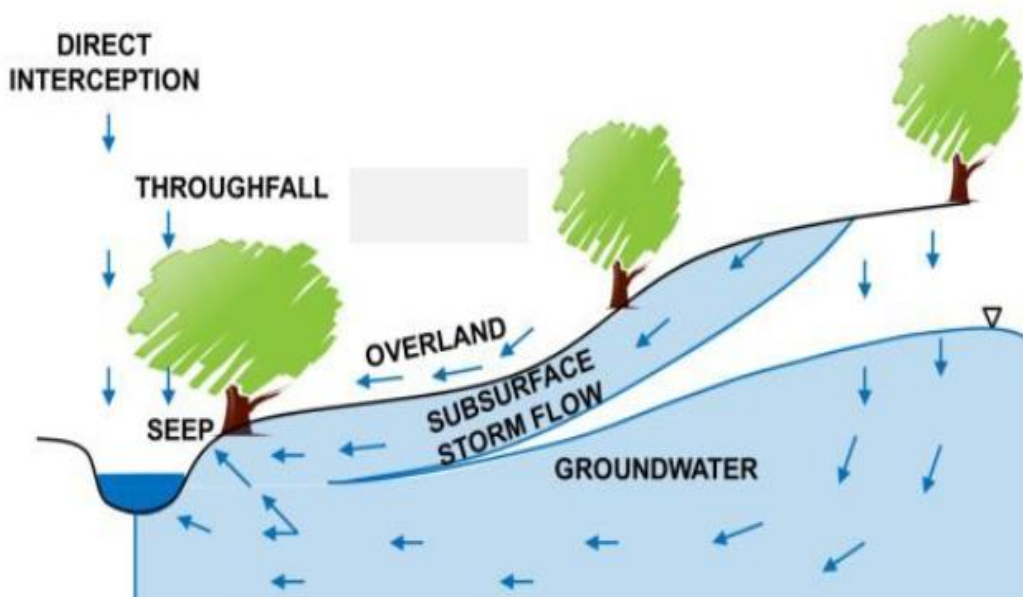


Fuente: Hidrogeocol, 2018

En la **Figura 5-2.10** se muestra de forma esquemática una resurgencia. Por definición las resurgencias no están asociadas al nivel de flujo regional de la zona, por lo que están asociadas a flujo subsuperficial.

- C. Interflujo: El interflujo es parte de la precipitación que no se ha filtrado hasta el nivel freático pero que se descarga como flujo subsuperficial en los cursos de agua. Figura 5-2.11 También se define como el flujo de agua desde zonas de saturación temporales que circula a través de los estratos superiores de una formación geológica a una velocidad muy superior a la de la escorrentía subterránea normal (Unesco, WMO, 2012). Por esta razón también el interflujo se puede considerar como flujo subsuperficial.

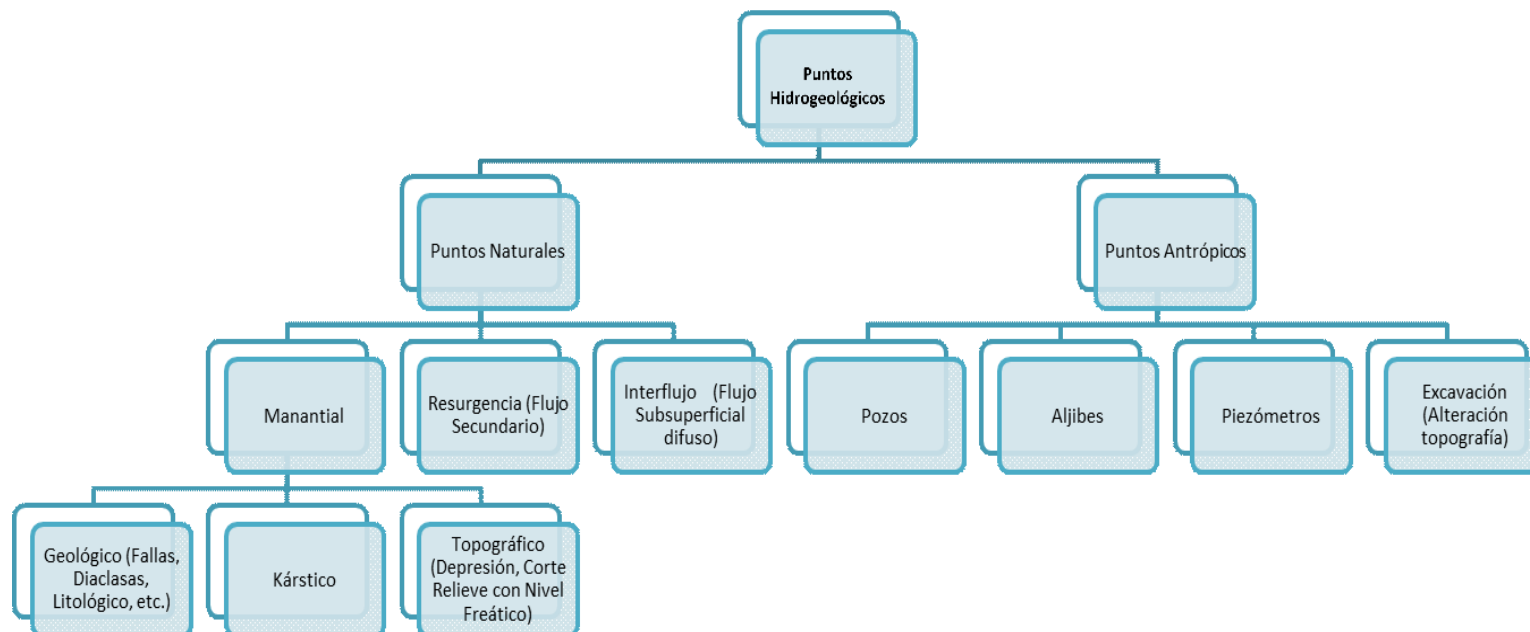
Figura 5-2.11. Interflujo (SEEP en la imagen)



Fuente: Hidrogeocol, 2018

En la **Figura 5-2.11** se pueden observar los flujos asociados a escorrentía (overland y subsurface storm flow) que finalmente terminan en un SEEP.

Figura 5-2.12. Clasificación de puntos de agua



Fuente: Hidrogeocol, 2018

5.1.8.5 Geología de referencia

En el numeral 5.1.1 se presenta la geología que ha sido conciliada entre las diferentes áreas del proyecto. Esta constituye el modelo geológico de referencia para el desarrollo del componente hidrogeológico. Las características de las unidades y los rasgos estructurales se presentan en el capítulo correspondiente.

5.1.8.6 Inventario y clasificación de puntos hidrogeológicos

El inventario se realiza con el objeto de recolectar, ordenar, almacenar y analizar la información básica de las captaciones de agua subterránea en el área de estudio. Permite, además, evaluar la disponibilidad del recurso hídrico, tener una visión global de las características y comportamiento de las unidades potencialmente acuíferas y conocer la dirección del flujo subterráneo.

El inventario se ejecuta consignando la información en el “Formulario Único Nacional Para el Inventario de Puntos de Agua Subterránea -FUNIAS-” (IDEAM), donde se describen las principales características físicas e hidrogeológicas de las captaciones referidas a manantiales o nacederos, pozos, piezómetros, aljibes, flujos subsuperficiales y otros puntos antrópicos. Posteriormente sobre cada punto se realiza una caracterización que permite clasificarlo.

Durante el desarrollo del inventario se ejecutaron las siguientes actividades:

- I. Identificación e inventario de puntos de agua subterránea, que a su vez constituyen la línea base hidrogeológica a lo largo del corredor vial. Cada punto de agua subterránea identificado fue descrito siguiendo el Formulario Único Nacional para Inventarios de Aguas Subterráneas (FUNIAS), diseñado por el IDEAM, SGC y MINAMBIENTE. Se obtuvo como resultado una ficha de información de cada uno de los puntos de agua, con registro fotográfico, cuyas captaciones fueron identificadas con un código y un número de identificación.
- II. Mediciones de parámetros in – situ de las aguas subsuperficiales y subterráneas (PH, conductividad eléctrica, Temperatura y Redox). Esta información fue diligenciada en el Formulario Único Nacional para Inventarios de Aguas Subterráneas (FUNIAS).
- III. Verificación de los puntos de monitoreo para análisis químico, corroborando que ellos cuenten con las condiciones idóneas de acceso y representatividad para la realización de la actividad, con el fin de ajustar o no las coordenadas de muestreo para posterior notificación al laboratorio contratado.
- IV. Reconocimiento de las fuentes de recarga y descarga de las aguas subsuperficiales y subterráneas y sus direcciones preferenciales de flujo.

Para el trabajo de campo se contó con las siguientes herramientas:

- I. Cartografía preliminar

- II. Formatos de campo (FUNIAS)
- III. Recipientes de volumen conocido para efectuar las correspondientes mediciones de caudales.
- IV. Sonda piezométrica.
- V. GPS (Garmin)
- VI. Equipos HANNA INSTRUMENTS, modelos HI98121, HI 98129, HI991300 y termómetro HI 98501 Termómetro digital Checktemp C -50 a 150°C, para medición de parámetros “in situ” de calidad de agua.
- VII. Otros como cámara digital, martillo geológico y brújula, cronómetro.

Se hicieron barridos completos de toda la zona de influencia del proyecto verificando sus condiciones geológicas e hidrogeológicas, identificando los puntos de aguas subsuperficiales y subterráneas e interactuando con la comunidad; ésta última considerada una fuente de información muy relevante para el inventario.

Para el reconocimiento de campo se contó con dos grupos de trabajo liderados por profesionales idóneos (geólogos), quienes estuvieron apoyados por cuatro baquianos, estos últimos habitantes de la zona de estudio. Los grupos de campo contaron con el apoyo y asesoría permanente de un grupo de especialistas en hidrogeología conformados por un geólogo senior y un especialista en hidrogeología ambiental e hidroquímica.

Desde el punto de vista hidrogeológico los datos y parámetros medidos “in situ” por cada punto de agua censado fueron:

- I. Caudal de los puntos de agua: El 100% de las mediciones de caudal se hicieron con método volumétrico.
- II. Conductividad eléctrica del agua ($\mu\text{S}/\text{cm}$), pH, Temperatura y Sólidos Totales Disueltos (SDT). Medidos con sonda multiparamétrica (HANNA INSTRUMENTS HI98121, HI 98129, HI991300 y HI 991300). Todas las medidas de pH y conductividad son automáticamente compensadas por temperatura. El instrumento cuenta con calibración de fábrica; en campo se estableció un control de la calibración con soluciones normalizadas provenientes del mismo fabricante del instrumento. La calibración del pH se realizó con frecuencia diaria.
- III. Potencial de Óxido Reducción “ORP” (mV), medido con una sonda de ORP HANNA INSTRUMENTS, modelo HI 98120. Su sensor de temperatura expuesto provee un rápido tiempo de respuesta y su cercanía garantiza la exacta compensación de temperatura en las lecturas. El instrumento viene calibrado de fábrica; sin embargo, se hicieron lecturas periódicas de control.

5.1.8.6.1 Resultados de campo

Para el caso de la vía a cielo abierto en las UF3-4-5, el inventario se realizó en zonas aledañas al trazado vial proyectado, cubriéndose el área de estudio con énfasis en el corredor vial definido contractualmente y con mayor detalle en una franja respecto al eje de la vía que alcanza aprox. 200 m hacia la parte alta de la ladera y hacia la parte baja llega

hasta el valle inferior del Río Pamplonita. Con lo cual se logra un reconocimiento en campo que cubre con suficiencia el área de influencia hidrogeológica de la vía a cielo abierto.

Para el caso del túnel de Pamplonita el inventario alcanzó en la parte central del túnel una extensión de hasta aprox. 800 m hacia cotas superiores; mientras que hacía cotas inferiores el mismo se llevó hasta los límites con el cauce del Río Pamplonita, con lo cual se logra un reconocimiento en campo que cubre con suficiencia el área de influencia hidrogeológica de esta obra subterránea.

Los principales objetivos de naturaleza hidrogeológica que se tuvieron en cuenta para la realización del inventario fueron:

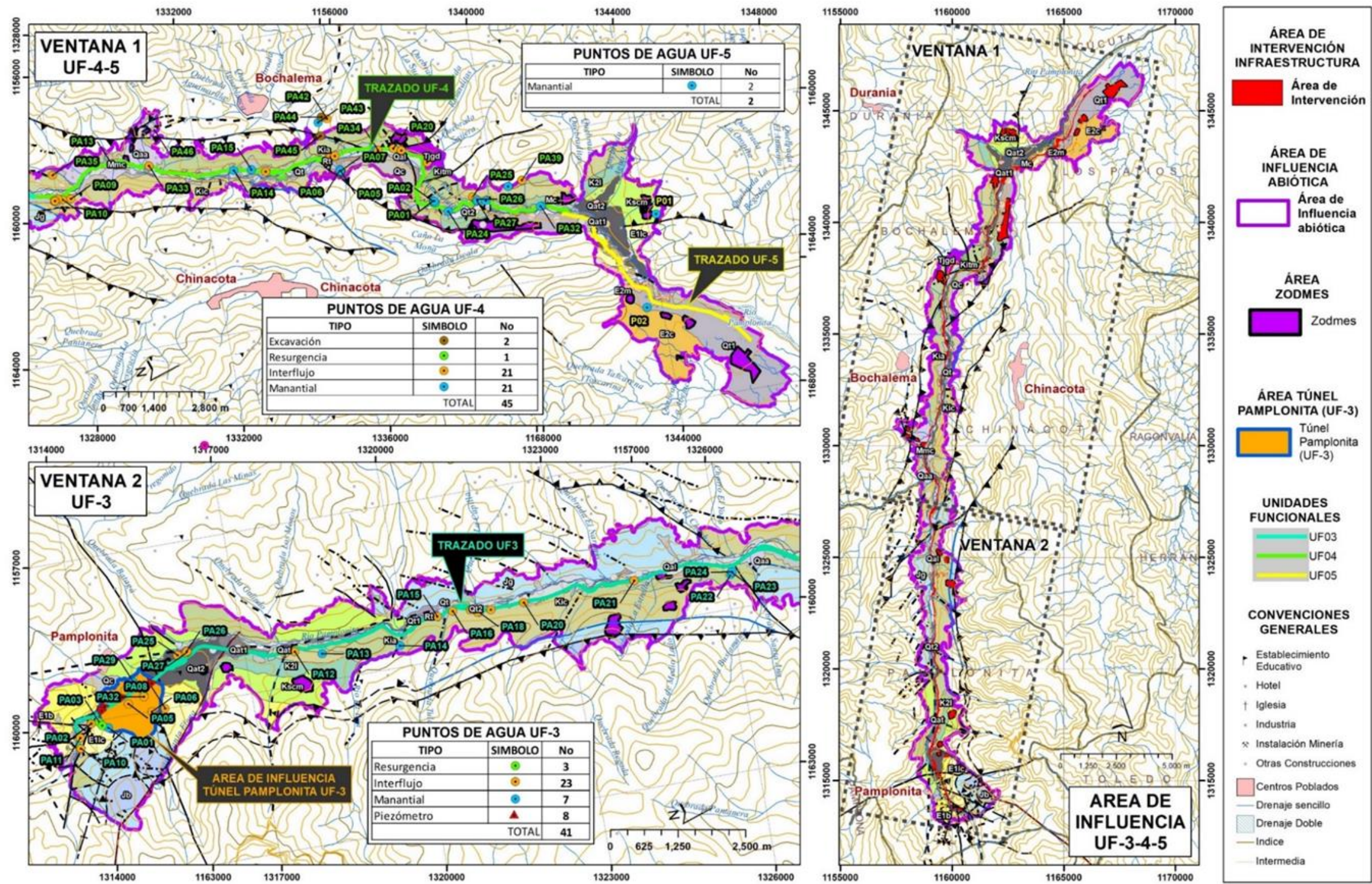
- I. Obtener un conocimiento lo más detallado posible del estado actual de los recursos hídricos subterráneos al interior del área de influencia de la vía a cielo abierto de las UF3-4-5.
- II. Identificar los puntos de agua localizados en correspondencia con los principales litotipos presentes en la zona. Específicamente se relacionan las siguientes unidades litológicas:

| | |
|---|--------------------------------------|
| ✓ Depósitos Aluviales (Qal) | ✓ Formación Colón – Mito Juan (Kscm) |
| ✓ Depósitos Coluviales (Qc) | ✓ Formación la Luna (K2l) |
| ✓ Depósitos abanicos aluviales (Qaa, Qat, Qat1, Qat2) | ✓ Formación Guineales (E3N1g) |
| ✓ Depósitos de terraza (Qt, Qt1, Qt2, Qt3) | ✓ Formación Capacho (Kic) |
| ✓ Formación León (E31) | ✓ Formación Aguardiente (Kia) |
| ✓ Formación Carbonera (E2c) | ✓ Formación Tibú - Mercedes (Kitm) |
| ✓ Formación Mirador (E2m) | ✓ Granito de Durania (Tjgd) |
| ✓ Formación los Cuervos (E1lc) | ✓ Formación Girón (Jg) |
| ✓ Formación Barco (Tpb) | ✓ Formación Bocas (Jb) |

Las campañas realizadas dieron lugar a un censo de 173 puntos siendo 153 puntos de agua naturales (40 manantiales, 48 interflujos y 65 resurgencias), 12 puntos de agua antrópicos y 8 piezómetros. La información acerca de los puntos inventariados fue recopilada en los respectivos formularios FUNIAS y se encuentran en el Anexo 5.1.3.1 del presente Estudio. Del mismo modo en dicho Anexo se presentan los certificados de calibración de los equipos utilizados y los resultados de las verificaciones hechas en campo con las respectivas soluciones buffer.

En el mapa hidrogeológico (Anexo 5.1.3.3), se presentan todos los puntos de agua recopilados durante el inventario para las UF3-4-5 (túnel + vía a cielo abierto). Estos mismos puntos de agua se muestran en la **Figura 5-2.13** y se resumen en la **Tabla 5-2.1**.


Figura 5-2.13. Localización puntos de agua censados en las UF3-4-5




Fuente: Aecom – Concol, 2018.

Tabla 5-2.1. Puntos de agua naturales censados en la UF3


| CÓDIGO | TIPO DE PUNTO | Ubicación | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Unidad Geológica | Fecha | Caudal (l/s) | MEDICIÓN PARÁMETROS FÍSICOS-Q | | | | | |
|----------|---------------|-----------|--|-----------|-------|---|--------|--------------|-------------------------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | | | E | N | ELEV | | | | PH | CE (µs/cm) | Temp. (°C) | SDT (mg/l) | Redox-Eh/ | T°C Redox |
| UF3-PA01 | Manantial | Túnel | 1,160,160 | 1,314,278 | 1,868 | Formación Los Cuervos | nov-17 | 0,079 | 6,66 | 250 | 18,1 | 120 | 255 | 18,4 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,0177 | 6,66 | 405 | 16,4 | 200 | 170 | 16,4 |
| UF3-PA02 | Resurgencia | Vía | 1,160,029 | 1,313,981 | 1,763 | Depósito coluvial sobre Formación los Cuervos | nov-17 | 0,007 | 4,46 | 170 | 18,2 | 80 | 289 | 18,4 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,0058 | 5,09 | 182 | 16,6 | 91 | 197 | 16,6 |
| UF3-PA03 | Resurgencia | Túnel | 1,160,027 | 1,314,126 | 1,777 | Formación Los Cuervos | nov-17 | 0,032 | 5,73 | 150 | 19,1 | 80 | 118 | 19,4 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,0577 | 6,14 | 171 | 19,6 | 85 | 128 | 19,6 |
| UF3-PA04 | Resurgencia | Túnel | 1,160,099 | 1,314,170 | 1,818 | Formación Los Cuervos | nov-17 | 0,249 | 5,7 | 150 | 18,4 | 70 | 237 | 18,7 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,0161 | 5,28 | 170 | 17,6 | 82 | 163 | 17,6 |
| UF3-PA06 | Manantial | Túnel | 1,160,002 | 1,315,124 | 1,906 | Formación Los Cuervos | nov-17 | 0,027 | 6,46 | 40 | 20,4 | 20 | 144 | 20,2 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,028 | 7,18 | 30 | 19,8 | 15 | 118 | 19,8 |
| UF3-PA07 | Resurgencia | Túnel | 1,160,103 | 1,315,191 | 1,910 | Formación Los Cuervos | nov-17 | 0,074 | 6,78 | 90 | 20,5 | 40 | 84 | 20,8 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,025 | 6,9 | 99 | 17,1 | 50 | 30 | 17,1 |
| UF3-PA08 | Manantial | Túnel | 1,159,991 | 1,315,376 | 1,863 | Formación Los Cuervos | nov-17 | 0,010 | 6,32 | 200 | 22,5 | 100 | 63 | 22,7 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,125 | 6,73 | 100 | 18,2 | 50 | 41 | 18,2 |
| UF3-PA10 | Interflujo | Vía | 1,160,450 | 1,313,709 | 1,737 | Terraza Aluvial sobre Formación Los Cuervos | nov-17 | 0,074 | 8,45 | 430 | 17,7 | 220 | 414 | 17,7 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,0229 | 8,97 | 464 | 17,4 | 231 | 171 | 17,4 |
| UF3-PA11 | Interflujo | Vía | 1,160,251 | 1,313,731 | 1,731 | Terraza Aluvial sobre Formación Los Cuervos | nov-17 | 0,078 | 7,78 | 330 | 19,3 | 170 | 320 | 19 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,00138 | 6,54 | 410 | 17,8 | 205 | 197 | 17,8 |
| UF3-PA12 | Manantial | Vía | 1,159,373 | 1,317,920 | 1,495 | Formación Capacho | nov-17 | 0,142 | 7,91 | 670 | 21,8 | 340 | 151 | 21,5 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,019 | 7,3 | 612 | 19,5 | 306 | 145 | 19,8 |

| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA |
| Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta | |


| CÓDIGO | TIPO DE PUNTO | Ubicación | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Unidad Geológica | Fecha | Caudal (l/s) | MEDICIÓN PARÁMETROS FÍSICOS-Q | | | | | |
|----------|---------------|-----------|--|-----------|-------|---|--------|--------------|-------------------------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | | | E | N | ELEV | | | | PH | CE (µs/cm) | Temp. (°C) | SDT (mg/l) | Redox-Eh/ | T°C Redox |
| UF3-PA13 | Manantial | Vía | 1,159,496 | 1,318,414 | 1,500 | Formación Capacho | nov-17 | 0,732 | 7,52 | 780 | 21,3 | 390 | 165 | 21,9 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,761 | 8,55 | 687 | 19,8 | 343 | - | - |
| UF3-PA14 | Resurgencia | Vía | 1,159,601 | 1,319,855 | 1,388 | Formación Aguardiente | nov-17 | 0,699 | 7,05 | 170 | 27,2 | 80 | 249 | 27,1 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,64 | 7,31 | 160 | 27 | 80 | - | - |
| UF3-PA15 | Interflujo | Vía | 1,159,200 | 1,320,633 | 1,327 | Deposito Coluvial | nov-17 | 0,086 | 7,52 | 420 | 21,8 | 210 | 324 | 23,2 |
| | | | | | | | abr-18 | 0,24 | 7,32 | 480 | 21 | 230 | 170 | 20,8 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,5 | 7,48 | 409 | 21,7 | 204 | - | - |
| UF3-PA16 | Interflujo | Vía | 1,159,140 | 1,320,926 | 1,313 | Formación Capacho | nov-17 | 0,922 | 7,78 | 210 | 23,7 | 110 | 306 | 23,7 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,1 | 8,18 | 225 | 20,3 | 113 | - | - |
| UF3-PA17 | Interflujo | Vía | 1,159,174 | 1,321,257 | 1,297 | Depósito Coluvial sobre Formación Capacho | nov-17 | 0,224 | 7,44 | 400 | 21,8 | 200 | 270 | 21,8 |
| | | | | | | | abr-18 | 0,219 | 7,71 | 400 | 21,3 | 200 | 178 | 21,1 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,05 | 7,63 | 347 | 20,8 | 173 | - | - |
| UF3-PA18 | Interflujo | Vía | 1,159,246 | 1,321,403 | 1,303 | Formación Capacho | nov-17 | 0,024 | 6,61 | 210 | 22,1 | 100 | 360 | 22 |
| | | | | | | | abr-18 | 0,017 | 6,76 | 230 | 21,6 | 120 | 191 | 21,4 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,23 | 7,22 | 215 | 21 | 108 | - | - |
| UF3-PA19 | Resurgencia | Vía | 1,159,234 | 1,321,629 | 1,299 | Formación Capacho | nov-17 | 0,006 | 7,34 | 170 | 20,6 | 90 | 292 | 20,7 |
| | | | | | | | abr-18 | 0,03 | 7,03 | 160 | 21,1 | 80 | 197 | 21,1 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,01 | 7,11 | 170 | 19,8 | 85 | - | - |

| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA |
| Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta | |

| CÓDIGO | TIPO DE PUNTO | Ubicación | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Unidad Geológica | Fecha | Caudal (l/s) | MEDICIÓN PARÁMETROS FÍSICOS-Q | | | | | |
|----------|---------------|-----------|--|-----------|-------|---|--------|--------------|-------------------------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | | | E | N | ELEV | | | | PH | CE (µs/cm) | Temp. (°C) | SDT (mg/l) | Redox-Eh/ | T°C Redox |
| UF3-PA20 | Resurgencia | Vía | 1,159,213 | 1,322,250 | 1,274 | Depósito Coluvial sobre Formación Capacho | nov-17 | 0,257 | 7,37 | 60 | 20,9 | 30 | 93 | 24,4 |
| | | | | | | | abr-18 | 0,309 | 7,1 | 30 | 22,9 | 20 | 143 | 22 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,01 | 6,82 | 24 | 18,7 | 12 | 74 | 19,8 |
| UF3-PA21 | Resurgencia | Vía | 1,159,156 | 1,324,321 | 1,194 | Depósitos Aluviales sobre Formación Capacho | nov-17 | 0,608 | 7,61 | 420 | 21,4 | 210 | 311 | 22 |
| | | | | | | | abr-18 | 0,626 | 7,32 | 410 | 22,4 | 200 | 31 | 21,9 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,45 | 7,62 | 350 | 21,5 | 181 | - | - |
| UF3-PA23 | Resurgencia | Vía | 1,159,329 | 1,326,132 | 1,187 | Formación Aguardiente | nov-17 | 1,718 | 7,13 | 418 | 22 | 240 | 134 | 21,8 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,35 | 7,32 | 460 | 21,8 | 239 | - | - |
| UF3-PA25 | Resurgencia | Vía | 1,159,059 | 1,315,768 | 1,574 | Abanico terraza 2, nivel 2 sobre Formación Colón- Mito Juan | nov-17 | 0,183 | 8,78 | 420 | 24 | 210 | 133 | 24,1 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,1 | 7,13 | 371 | 19,8 | 185 | 92 | 18,8 |
| UF3-PA26 | Resurgencia | Vía | 1,159,040 | 1,315,930 | 1,573 | Abanico terraza 2, nivel 2 sobre Formación Colón- Mito Juan | nov-17 | 0,023 | 7,56 | 350 | 16,8 | 170 | 82 | 19,3 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,01 | 8,02 | 332 | 18,9 | 166 | 54 | 18,9 |
| UF3-PA27 | Interflujo | Vía | 1,159,025 | 1,315,966 | 1,588 | Abanico terraza, nivel 2- - Formación Colón - Mito Juan | nov-17 | 0,066 | 6,38 | 290 | 21,2 | 140 | 163 | 21,2 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,01 | 6,9 | 344 | 21,2 | 172 | 76 | 21,2 |
| UF3-PA28 | Resurgencia | Túnel | 1,159,476 | 1,314,833 | 1,666 | Formación Barco | nov-17 | 0,109 | 6,76 | 100 | 18,5 | 50 | 166 | 18,5 |
| | | | | | | | jul-18 | - | 6,17 | 227 | 20,9 | 114 | - | - |
| UF3-PA29 | Manantial | Túnel | 1,159,407 | 1,314,880 | 1,635 | Formación Colón - Mito Juan | nov-17 | 0,13 | 6,74 | 270 | 20,2 | 130 | -13 | 20,2 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,2 | 6,59 | 250 | 19 | 125 | -11 | 19 |

| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>INGENIERÍA E INFRAESTRUCTURAS</small> <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA |
| Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta | |

| CÓDIGO | TIPO DE PUNTO | Ubicación | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Unidad Geológica | Fecha | Caudal (l/s) | MEDICIÓN PARÁMETROS FÍSICOS-Q | | | | | |
|----------|---------------|-----------|--|-----------|-------|---|--------|----------------------|-------------------------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | | | E | N | ELEV | | | | PH | CE (µs/cm) | Temp. (°C) | SDT (mg/l) | Redox-Eh/ | T°C Redox |
| UF3-PA30 | Interflujo | Túnel | 1,159,532 | 1,314,703 | 1,683 | Depósito Coluvial | nov-17 | 0,04 | 7,46 | 70 | 20,4 | 40 | 32 | 20,6 |
| | | | | | | | jul-18 | Humedad | - | - | - | - | - | - |
| UF3-PA31 | Interflujo | Vía | 1,159,241 | 1,321,375 | 1,310 | Depósito Coluvial | nov-17 | 0,145 | 7,89 | 330 | 20,8 | 160 | 120 | 20,7 |
| UF3-PA32 | Interflujo | Túnel | 1,159,708 | 1,315,024 | 1,836 | Formación Los Cuervos | jul-18 | No se puede encausar | 5,71 | 32 | 19,2 | 16 | 119 | 19,2 |
| UF3-PA33 | Resurgencia | Vía | 1,159,021 | 1,315,955 | 1,613 | Abanico terraza, nivel 2- - Formación Colón - | jul-18 | 0,145 | 6,49 | 277 | 21 | 138 | 84 | 21 |
| UF3-PA34 | Resurgencia | Vía | 1,159,403 | 1,326,093 | 1,203 | Fm Aguardiente | abr-18 | 1 | 7.02 | 350 | 20.2 | 220 | 121 | 20.8 |
| UF3-PA35 | Interflujo | Vía | 1,159,196 | 1,321,378 | 1,307 | Terraza Aluvial Nivel 2 | abr-18 | 0.32 | 7.61 | 330 | 22.3 | 160 | 118 | 20.5 |
| UF3-PA36 | Interflujo | Vía | 1,159,621 | 1,321,446 | 1,509 | Fm Capacho | abr-18 | 0.14 | 7.23 | 210 | 20.4 | 90 | 86 | 19.2 |
| UF3-PA37 | Interflujo | Vía | 1,159,571 | 1,321,659 | 1,517 | Fm Capacho | abr-18 | 0.02 | 7.01 | 120 | 20.1 | 70 | 152 | 20.1 |
| UF3-PA38 | Interflujo | Vía | 1,159,589 | 1,321,868 | 1,510 | Fm Capacho | abr-18 | 0.018 | 7.06 | 95 | 19.8 | 68 | 170 | 19.4 |
| UF3-PA43 | Interflujo | Vía | 1,159,122 | 1,320,879 | 1,318 | Terraza Aluvial Nivel 2 | abr-18 | 0.73 | 7.8 | 265 | 23.9 | 125 | 285 | 23.8 |
| UF3-PA44 | Interflujo | Vía | 1,159,044 | 1,319,620 | 1,389 | Fm Colon-Mito Juan | abr-18 | 0.12 | 7.23 | 198 | 26.2 | 100 | 222 | 25.7 |
| UF3-PA45 | Interflujo | Vía | 1,159,583 | 1,317,603 | 1,533 | Fm La Luna | abr-18 | 2.732 | 6.57 | 780 | 22.4 | 395 | 192 | 21.4 |
| UF3-PA46 | Interflujo | Vía | 1,159,719 | 1,317,580 | 1,554 | Fm La Luna | abr-18 | 2.1 | 6.86 | 521 | 21.3 | 300 | 192 | 21.4 |
| UF3-PA47 | Interflujo | Vía | 1,159,312 | 1,315,870 | 1,619 | Abanico Terraza Nivel 2 | abr-18 | 0.14 | 7.45 | 371 | 19.4 | 185 | 96 | 19.7 |
| UF3-PA48 | Interflujo | Vía | 1,159,342 | 1,315,873 | 1,623 | Abanico Terraza Nivel 2 | abr-18 | 0.17 | 7.57 | 300 | 19.2 | 180 | 100 | 19.5 |
| UF3-PA51 | Interflujo | Vía | 1,159,038 | 1,315,967 | 1,581 | Abanico Terraza Nivel 2 | abr-18 | 0.017 | 8.2 | 355 | 19.1 | 154 | 45 | 17.9 |
| UF3-PA52 | Resurgencia | Tunel | 1,159,949 | 1,315,109 | 1,910 | Fm Los Cuervos | abr-18 | 0.024 | 7.2 | 52 | 19.9 | 16 | 117 | 19.2 |


| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA |
| Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta | |

| CÓDIGO | TIPO DE PUNTO | Ubicación | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Unidad Geológica | Fecha | Caudal (l/s) | MEDICIÓN PARÁMETROS FÍSICOS-Q | | | | | |
|-----------|---------------|-----------|--|-----------|-------|-------------------------|--------|--------------|-------------------------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | | | E | N | ELEV | | | | PH | CE (µs/cm) | Temp. (°C) | SDT (mg/l) | Redox-Eh/ | T°C Redox |
| UF3-PA53 | Resurgencia | Tunel | 1,159,955 | 1,315,290 | 1,864 | Fm Los Cuervos | abr-18 | 0.08 | 6.83 | 117 | 19.1 | 66 | 56 | 18.9 |
| UF3-PA54 | Resurgencia | Tunel | 1,159,809 | 1,314,743 | 1,844 | Fm Los Cuervos | abr-18 | 0.025 | 7.23 | 51 | 19.7 | 25 | 32 | 20.4 |
| UF3-PA57 | Resurgencia | Vía | 1,159,132 | 1,315,246 | 1,584 | Abanico Terraza Nivel 2 | abr-18 | 0.14 | 7.29 | 258 | 20.1 | 1254 | 97 | 19.3 |
| UF3-PA58 | Manantial | Vía | 1,158,808 | 1,315,040 | 1,664 | Fm Colon-Mito Juan | abr-18 | 0.25 | 7.29 | 258 | 20.1 | 1254 | 97 | 19.3 |
| UF3-PA59 | Resurgencia | Vía | 1,160,687 | 1,314,021 | 1,850 | Fm Giron | abr-18 | 0.05 | 7.9 | 320 | 17.2 | 140 | 456 | 17.9 |
| UF3-PA60 | Manantial | Vía | 1,160,467 | 1,314,297 | 1,903 | Fm Giron | abr-18 | 0.074 | 7.4 | 300 | 17.1 | 154 | 187 | 17.1 |
| UF3-PA61 | Resurgencia | Tunel | 1,159,390 | 1,314,182 | 1,682 | Deposito Coluvial | abr-18 | 0.13 | 8.78 | 420 | 24 | 210 | 133 | 24.1 |
| UF3-PA62 | Resurgencia | Tunel | 1,159,364 | 1,314,218 | 1,677 | Deposito Coluvial | abr-18 | 0.14 | 7.45 | 415 | 20.5 | 254 | 68 | 19.4 |
| UF3-PA63 | Manantial | Tunel | 1,159,372 | 1,314,002 | 1,747 | Fm Barco | abr-18 | 0.98 | 7.14 | 358 | 21.3 | 298 | 95 | 20.6 |
| UF3-PA64 | Manantial | Tunel | 1,159,412 | 1,313,988 | 1,750 | Fm Barco | abr-18 | 0.91 | 7.08 | 366 | 20.9 | 312 | 74 | 20.4 |
| UF3-PA65 | Manantial | Tunel | 1,159,462 | 1,313,960 | 1,765 | Fm Barco | abr-18 | 1.02 | 7.1 | 254 | 19.5 | 222 | 70 | 19.7 |
| UF3-PA66 | Resurgencia | Tunel | 1,159,519 | 1,314,017 | 1,747 | Fm Barco | abr-18 | 0.99 | 7.23 | 278 | 19.3 | 300 | 95 | 20.2 |
| UF3-PA67 | Interflujo | Vía | 1,159,014 | 1,315,978 | 1,572 | Abanico Terraza Nivel 2 | abr-18 | 0.12 | 6.51 | 284 | 20.4 | 120 | 81 | 20.9 |
| UF3-PA68 | Interflujo | Vía | 1,159,005 | 1,315,977 | 1,568 | Abanico Terraza Nivel 2 | abr-18 | 0.04 | 6.44 | 290 | 21 | 155 | 100 | 20.6 |
| UF3-PA69 | Interflujo | Vía | 1,159,002 | 1,315,996 | 1,570 | Abanico Terraza Nivel 2 | abr-18 | 0.055 | 6.78 | 265 | 21.5 | 187 | 120 | 21.4 |
| UF3-PA101 | Interflujo | Vía | 1159120 | 1315913 | 1606 | Abanico Terraza Nivel 2 | abr-19 | 0.01 | 6.66 | 314 | 22 | 157 | - | - |


Fuente: Aecom – Concol, 2018.

Tabla 5-2.2. Puntos de agua naturales censados en la UF4


| CÓDIGO | TIPO DE PUNTO | Ubicación | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Unidad Geológica | Fecha | Caudal (l/s) | MEDICIÓN PARÁMETROS FÍSICOS-Q | | | | | |
|----------|---------------|-----------|--|-----------|-------|--|--------|--------------|-------------------------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | | | E | N | ELEV | | | | PH | CE (μs/cm) | Temp. (°C) | SDT (mg/l) | Redox-Eh/ | T°C Redox |
| UF4-PA01 | Manantial | Vía | 1,161,314 | 1,338,265 | 878 | Formación Aguardiente (fracturada) | nov-17 | 0,640 | 6,82 | 380 | 39,8 | 190 | 12 | 36,9 |
| | | | | | | | abr-18 | 0,636 | 7,36 | 370 | 36,1 | 190 | 137 | 36,9 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,59 | 7,11 | 388 | 40,7 | 202 | - | - |
| UF4-PA02 | Manantial | Vía | 1,161,348 | 1,338,268 | 862 | Formación Aguardiente (fracturada) | nov-17 | 1,015 | 7,33 | 860 | 39,1 | 380 | -299 | 44,5 |
| | | | | | | | abr-18 | 1,604 | 6,8 | 920 | 48,1 | 460 | -283 | 48,2 |
| | | | | | | | jul-18 | 1,55 | 7 | 782 | 52,3 | 407 | -135 | 52,3 |
| UF4-PA03 | Manantial | Vía | 1,161,368 | 1,338,283 | 842 | Formación Aguardiente suprayacida por Terraza aluvial, nivel 2 | nov-17 | 0,988 | 7,57 | 880 | 36 | 440 | -57 | 41,2 |
| | | | | | | | abr-18 | 0,916 | 7,13 | 910 | 39,8 | 460 | -122 | 39,7 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,07 | 6,97 | 905 | 51,2 | 475 | - | - |
| UF4-PA06 | Manantial | Vía | 1,160,022 | 1,335,864 | 964 | Formación Capacho suprayacida por Depósito Coluvial | nov-17 | 0,138 | 6,76 | 660 | 37,3 | 330 | -137 | 40 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,13 | 6,6 | 579 | 40,2 | 301 | - | - |
| UF4-PA08 | Resurgencia | Vía | 1,161,374 | 1,338,299 | 843 | Formación Aguardiente suprayacida por Terraza aluvial, nivel 2 | abr-18 | 0,374 | 7,67 | 380 | 33 | 190 | 50 | 32,9 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,38 | 7,83 | 271 | 30,5 | 141 | 19 | 30,5 |
| UF4-PA09 | Interflujo | Vía | 1,159,519 | 1,328,230 | 1,089 | Formación Capacho | nov-17 | 0,154 | 6,8 | 340 | 22,4 | 170 | 237 | 23,2 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,2 | 7,45 | 309 | 21,5 | 154 | - | - |
| UF4-PA10 | Interflujo | Vía | 1,159,496 | 1,328,131 | 1,114 | Depósito Coluvial sobre Formación Capacho | nov-17 | 0,102 | 6,41 | 260 | 22,6 | 130 | 365 | 22,6 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,0934 | 6,68 | 214 | 21,7 | 107 | - | - |
| UF4-PA11 | Interflujo | Vía | 1,159,459 | 1,328,012 | 1,094 | Depósito Coluvial sobre Formación Capacho | nov-17 | 0,102 | 7,28 | 110 | 22,4 | 60 | 233 | 23,1 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,16 | 7,56 | 117 | 21,4 | 59 | - | - |

| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA |
| Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta | |


| CÓDIGO | TIPO DE PUNTO | Ubicación | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Unidad Geológica | Fecha | Caudal (l/s) | MEDICIÓN PARÁMETROS FÍSICOS-Q | | | | | |
|----------|---------------|-----------|--|-----------|-------|--|--------|--------------|-------------------------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | | | E | N | ELEV | | | | PH | CE (µs/cm) | Temp. (°C) | SDT (mg/l) | Redox-Eh/ | T°C Redox |
| UF4-PA12 | Interflujo | Vía | 1,159,513 | 1,327,909 | 1,177 | Depósito Coluvial sobre Formación Capacho | nov-17 | 0,405 | 6,79 | 220 | 21,6 | 110 | 119 | 21,7 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,09 | 6,24 | 167 | 20,6 | 83 | - | - |
| UF4-PA13 | Resurgencia | Vía | 1,158,748 | 1,329,639 | 1,092 | Formación Aguardiente | nov-17 | 0,032 | 6,67 | 20 | 33 | 10 | 463 | 32,2 |
| | | | | | | | abr-18 | Sin flujo | 6,53 | 20 | 24,3 | 10 | 121 | 24 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,0022 | 5,86 | 13 | 22,1 | 6 | - | - |
| UF4-PA14 | Resurgencia | Vía | 1,159,531 | 1,332,952 | 969 | Depósitos Aluviales sobre Formación Aguardiente | dic-17 | 0,174 | 6,78 | 210 | 26,1 | 110 | -59 | 25,8 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,26 | 7,05 | 168 | 22,2 | 84 | -194 | 22,5 |
| UF4-PA15 | Interflujo | Vía | 1,159,592 | 1,333,433 | 1,012 | Depósito Coluvial sobre Formación Aguardiente | dic-17 | 0,057 | 7 | 840 | 23 | 420 | -74 | 22,6 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,01 | 7,05 | 711 | 21,5 | 355 | -235 | 21,8 |
| UF4-PA16 | Resurgencia | Vía | 1,159,712 | 1,333,818 | 952 | Terraza aluvial, nivel 1 sobre Formación Aguardiente | dic-17 | 0,021 | 6,91 | 360 | 25,9 | 180 | 153 | 25,7 |
| | | | | | | | abr-18 | 0,068 | 6,44 | 220 | 23,5 | 110 | 111 | 23,3 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,001 | 6,9 | 213 | 22 | 106 | 29 | 22 |
| UF4-PA17 | Resurgencia | Vía | 1,159,599 | 1,335,645 | 920 | Terraza aluvial, nivel 1 sobre Formación Aguardiente | dic-17 | 0,232 | 6,87 | 80 | 24,2 | 40 | 443 | 24,2 |
| | | | | | | | abr-18 | 0,112 | 7,34 | 80 | 24,8 | 40 | 164 | 24,7 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,25 | 6,39 | 73 | 23,1 | 38 | 28 | 23,1 |
| UF4-PA18 | Resurgencia | Vía | 1,159,611 | 1,335,667 | 916 | Terraza aluvial, nivel 1 sobre Formación Aguardiente | dic-17 | 0,076 | 7,33 | 70 | 25,2 | 40 | 371 | 25,1 |
| | | | | | | | abr-18 | 0,044 | 6,97 | 90 | 23,7 | 50 | 28 | 23,5 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,07 | 7,35 | 65 | 23,3 | 32 | 65 | 23,3 |
| UF4-PA19 | Resurgencia | Vía | 1,159,617 | 1,335,784 | 910 | Depósitos Aluviales sobre Formación Aguardiente | dic-17 | 0,042 | 7,58 | 170 | 24,1 | 80 | 339 | 29,2 |
| | | | | | | | abr-18 | SECO | - | - | - | - | - | - |
| | | | | | | | jul-18 | 0,02 | 6,61 | 174 | 24,5 | 89 | 66 | 24,5 |

| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA |
| Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta | |


| CÓDIGO | TIPO DE PUNTO | Ubicación | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Unidad Geológica | Fecha | Caudal (l/s) | MEDICIÓN PARÁMETROS FÍSICOS-Q | | | | | |
|----------|---------------|-----------|--|-----------|------|---|--------|-------------------|-------------------------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | | | E | N | ELEV | | | | PH | CE (µs/cm) | Temp. (°C) | SDT (mg/l) | Redox-Eh/ | T°C Redox |
| UF4-PA20 | Resurgencia | Vía | 1,159,701 | 1,337,421 | 898 | Depósito Coluvial sobre Formación Aguardiente | dic-17 | 0,194 | 5,98 | 90 | 24,6 | 40 | 154 | 24,6 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,04 | 5,59 | 70 | 22,9 | 36 | 80 | 22,9 |
| UF4-PA21 | Resurgencia | Vía | 1,159,789 | 1,337,629 | 894 | Depósito Coluvial sobre Formación Aguardiente | dic-17 | 0,920 | 5,58 | 70 | 24,6 | 40 | 187 | 24,5 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,14 | 6,25 | 51 | 23,3 | 27 | 53 | 23,3 |
| UF4-PA22 | Resurgencia | Vía | 1,159,665 | 1,336,910 | 890 | Depósitos Aluviales sobre Formación Aguardiente | dic-17 | >10 | 6,23 | 40 | 25,3 | 20 | 427 | 25,4 |
| | | | | | | | jul-18 | Estimado en 2 a 4 | 5,71 | 39 | 24,5 | 20 | 65 | 24,5 |
| UF4-PA23 | Resurgencia | Vía | 1,160,238 | 1,338,278 | 906 | Granito de Durania | dic-17 | 0,003 | 6,87 | 100 | 22,8 | 50 | 302 | 22,8 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,0006 | 6,8 | 76 | 21,7 | 40 | 90 | 21,7 |
| UF4-PA24 | Interflujo | Vía | 1,161,679 | 1,338,620 | 826 | Terraza aluvial, nivel 1, sobre Formación Capacho | dic-17 | 0,094 | 7,28 | 1020 | 25,1 | 510 | 122 | 25,4 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,05 | 8,92 | 893 | 24,9 | 463 | 104 | 24,9 |
| UF4-PA25 | Resurgencia | Vía | 1,161,398 | 1,339,352 | 880 | Formación Capacho | dic-17 | 0,287 | 4,1 | 70 | 24,2 | 30 | 203 | 24,6 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,06 | 3,87 | 62 | 23,6 | 32 | 108 | 23,6 |
| UF4-PA26 | Resurgencia | Vía | 1,161,472 | 1,339,425 | 861 | Formación Capacho suprayacida por Depósito Coluvial | dic-17 | 0,696 | 4,34 | 60 | 23,9 | 30 | 277 | 24,2 |
| | | | | | | | jul-18 | 1,17 | 4,4 | 52 | 23,5 | 27 | 89 | 23,5 |
| UF4-PA27 | Resurgencia | Vía | 1,161,521 | 1,339,444 | 833 | Formación Capacho suprayacida por Depósito Coluvial | dic-17 | 0,165 | 5,53 | 70 | 23,6 | 40 | 291 | 23,9 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,08 | 5,79 | 67 | 23,6 | 35 | 55 | 23,6 |
| UF4-PA28 | Resurgencia | Vía | 1,161,519 | 1,339,462 | 823 | Formación Capacho suprayacida por Depósito Coluvial | dic-17 | 1,161 | 6,68 | 130 | 23,8 | 70 | 290 | 23,9 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,19 | 5,94 | 128 | 23,4 | 68 | - | - |
| UF4-PA29 | Resurgencia | Vía | 1,161,547 | 1,339,714 | 835 | Formación Capacho | dic-17 | 0,226 | 7,3 | 660 | 22,8 | 330 | 301 | 23,1 |

| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA |
| Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta | |


| CÓDIGO | TIPO DE PUNTO | Ubicación | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Unidad Geológica | Fecha | Caudal (l/s) | MEDICIÓN PARÁMETROS FÍSICOS-Q | | | | | |
|----------|---------------|-----------|--|-----------|-------|--|--------|-------------------|-------------------------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | | | E | N | ELEV | | | | PH | CE (µs/cm) | Temp. (°C) | SDT (mg/l) | Redox-Eh/ | T°C Redox |
| | | | | | | | jul-18 | 0,06 | 7,61 | 637 | 21,9 | 332 | 37 | 21,9 |
| UF4-PA30 | Manantial | Vía | 1,161,325 | 1,338,283 | 862 | Formación Aguardiente | dic-17 | 0,077 | 6,37 | 180 | 32,6 | 90 | 144 | 32,6 |
| | | | | | | | abr-18 | 0,028 | 7,5 | 200 | 28,4 | 100 | -32 | 28,5 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,09 | 8,1 | 159 | 26,7 | 83 | 5 | 26,7 |
| UF4-PA31 | Resurgencia | Vía | 1,161,978 | 1,341,194 | 751 | Formación La Luna suprayacida por Depósito Aluvial | nov-17 | 4,993 | 6,77 | 1010 | 23,9 | 500 | -202 | 23,7 |
| | | | | | | | jul-18 | Estimado en 2 a 5 | 7,12 | 889 | 24 | 462 | -226 | 24 |
| UF4-PA32 | Resurgencia | Vía | 1,161,979 | 1,341,162 | 748 | Depósito Coluvial sobre Formación La Luna | nov-17 | 0,043 | 7,47 | 1030 | 23,7 | 510 | 22 | 23,6 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,04 | 7,02 | 934 | 23,9 | 486 | - | - |
| UF4-PA33 | Resurgencia | Vía | 1,158,991 | 1,330,654 | 1,016 | Depositos aluviales, abanico aluvial sobre Formación Aguardiente | nov-17 | 0,059 | 8,07 | 600 | 23,2 | 300 | 97 | 24,4 |
| | | | | | | | abr-18 | 0,052 | 7,55 | 580 | 23,1 | 290 | 61 | 23 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,33 | 8,23 | 510 | 21,8 | 255 | 31 | 22 |
| UF4-PA34 | Interflujo | Vía | 1,159,671 | 1,336,990 | 887 | Depósitos Aluviales sobre Formación Aguardiente | dic-17 | 0,643 | 5,77 | 50 | 24,8 | 20 | 331 | 24,8 |
| | | | | | | | jul-18 | 0,54 | 5,69 | 48 | 24 | 25 | 78 | 24 |
| UF4-PA35 | Interflujo | Vía | 1,158,786 | 1,327,979 | 1,092 | Formación Capacho | jul-18 | Estimado < 0,005 | 6,66 | 260 | 20,6 | 138 | - | - |
| UF4-PA39 | Manantial | Vía | 1,161,178 | 1,340,776 | 1,029 | Formación Aguardiente | jul-18 | 0,1 | 7,14 | 216 | 22,4 | 112 | 31 | 22,4 |
| UF4-PA40 | Manantial | Vía | 1,161,287 | 1,340,374 | 995 | Formación Aguardiente | jul-18 | 0,04 | 7,35 | 559 | 21,1 | 291 | 8 | 21,1 |
| UF4-PA41 | Manantial | Vía | 1,160,053 | 1,335,851 | 954 | Formación Capacho | jul-18 | 0,02 | 6,68 | 552 | 35,7 | 288 | 41 | 35,7 |
| UF4-PA42 | Interflujo | Vía | 1,158,562 | 1,335,743 | 1023 | Formación Aguardiente | jul-18 | 0,017 | 4,9 | 21 | 21,8 | 11 | 52 | 21,8 |

| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA |
| Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta | |


| CÓDIGO | TIPO DE PUNTO | Ubicación | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Unidad Geológica | Fecha | Caudal (l/s) | MEDICIÓN PARÁMETROS FÍSICOS-Q | | | | | |
|----------|---------------|------------------|--|-----------|-------|-------------------------|--------|--------------|-------------------------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | | | E | N | ELEV | | | | PH | CE (µs/cm) | Temp. (°C) | SDT (mg/l) | Redox-Eh/ | T°C Redox |
| UF4-PA43 | Interflujo | Zodme 495 | 1,158,619 | 1,335,512 | 1,153 | Formación Aguardiente | jul-18 | 0,011 | 7,9 | 364 | 23 | 190 | -30 | 23 |
| UF4-PA44 | Interflujo | Vía | 1,158,485 | 1,335,607 | 1,017 | Formación Aguardiente | abr-18 | 0.014 | 7.8 | 378 | 22.5 | 200 | -29 | 22.8 |
| UF4-PA45 | Interflujo | Vía | 1,159,006 | 1,335,491 | 1,034 | Formación Aguardiente | abr-18 | 0.009 | 7.3 | 312 | 21.7 | 150 | -20 | 22.1 |
| UF4-PA46 | Resurgencia | Zodme 495 | 1,158,009 | 1,330,964 | 1,158 | Formación Aguardiente | abr-18 | 0.013 | 7.2 | 274 | 20.9 | 120 | -25 | 22.4 |
| UF4-PA47 | Resurgencia | Vía | 1,160,004 | 1,337,949 | 874 | Depositos Aluviales | abr-18 | 0.6 | 5.53 | 45 | 24.1 | 20 | 89 | 23.5 |
| UF4-PA49 | Manantial | Vía | 1,161,469 | 1,339,736 | 872 | Fm Capacho | abr-18 | 0.17 | 7.1 | 650 | 21.8 | 280 | 300 | 23.4 |
| UF4-PA50 | Interflujo | Vía | 1,162,045 | 1,341,261 | 745 | Depositos Aluviales | abr-18 | 0.12 | 6.68 | 852 | 24.4 | 620 | 23 | 22.1 |
| UF4-PA51 | Manantial | Vía | 1,161,978 | 1,341,184 | 772 | Terraza aluvial nivel 1 | abr-18 | 4 | 6.95 | 980 | 23.5 | 440 | -180 | 22.8 |
| UF4-PA52 | Manantial | Vía | 1,161,781 | 1,338,477 | 866 | Fm La Luna | abr-18 | 0.11 | 6.82 | 990 | 25 | 470 | 110 | 24 |
| UF4-PA53 | Resurgencia | Acceso Zodme 402 | 1,161,948 | 1,338,819 | 867 | Fm La Luna | abr-18 | 0.095 | 6.77 | 1010 | 24.5 | 442 | 100 | 23.5 |
| UF4-PA54 | Resurgencia | Acceso Zodme 402 | 1,161,967 | 1,338,970 | 882 | Fm La Luna | abr-18 | 0.07 | 7.12 | 890 | 23.9 | 652 | 150 | 24.1 |
| UF4-PA55 | Interflujo | Vía | 1,161,916 | 1,338,538 | 895 | Fm La Luna | abr-18 | 0.085 | 6.9 | 1020 | 23.9 | 510 | 90 | 23.6 |
| UF4-PA56 | Resurgencia | Vía | 1,161,967 | 1,338,491 | 922 | Fm La Luna | abr-18 | 0.078 | 6.9 | 1020 | 23.9 | 510 | 90 | 23.6 |
| UF4-PA57 | Resurgencia | Vía | 1,161,299 | 1,338,259 | 887 | Fm Aguardiente | abr-18 | 0.61 | 7.23 | 452 | 27.1 | 200 | 123 | 26.8 |
| UF4-PA58 | Manantial | Vía | 1,161,385 | 1,338,285 | 854 | Terraza aluvial nivel 2 | abr-18 | 0.78 | 7.5 | 330 | 36 | 190 | 128 | 36.7 |
| UF4-PA59 | Interflujo | Vía | 1,161,477 | 1,337,992 | 871 | Fm Aguardiente | abr-18 | 0.08 | 6.78 | 850 | 24.1 | 338 | 95 | 23.1 |
| UF4-PA60 | Resurgencia | Vía | 1,161,494 | 1,338,031 | 872 | Terraza aluvial nivel 2 | abr-18 | 0.09 | 6.81 | 780 | 24 | 350 | 84 | 23.7 |
| UF4-PA61 | Resurgencia | Vía | 1,160,539 | 1,338,185 | 896 | Deposito Coluvial | abr-18 | 0.002 | 6.98 | 90 | 22.4 | 70 | 300 | 22.1 |

| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA |
| Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta | |

| CÓDIGO | TIPO DE PUNTO | Ubicación | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Unidad Geológica | Fecha | Caudal (l/s) | MEDICIÓN PARÁMETROS FÍSICOS-Q | | | | | |
|----------|---------------|-----------|--|-----------|-------|-------------------------------------|--------|--------------|-------------------------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | | | E | N | ELEV | | | | PH | CE (µs/cm) | Temp. (°C) | SDT (mg/l) | Redox-Eh/ | T°C Redox |
| UF4-PA62 | Interflujo | Vía | 1,160,079 | 1,338,114 | 883 | Deposito Coluvial | abr-18 | 0.3 | 5.9 | 56 | 23.8 | 20 | 90 | 23.6 |
| UF4-PA63 | Interflujo | Vía | 1,159,878 | 1,337,913 | 900 | Granito de Durania | abr-18 | 0.4 | 6 | 85 | 23.1 | 50 | 110 | 23.2 |
| UF4-PA64 | Resurgencia | Zodme 426 | 1,159,657 | 1,337,810 | 941 | Fm Aguardiente | abr-18 | 0.46 | 6.57 | 50 | 23.2 | 55 | 140 | 22.9 |
| UF4-PA65 | Interflujo | Vía | 1,159,711 | 1,337,171 | 891 | Depositos Aluviales | abr-18 | 0.71 | 5.66 | 67 | 24.8 | 30 | 80 | 24.3 |
| UF4-PA66 | Resurgencia | Vía | 1,159,907 | 1,337,132 | 895 | Deposito Coluvial | abr-18 | 0.21 | 6.67 | 54 | 23.8 | 41 | 172 | 23.5 |
| UF4-PA67 | Manantial | Vía | 1,160,122 | 1,337,418 | 901 | Deposito Coluvial | abr-18 | 0.25 | 6.7 | 76 | 24 | 50 | 113 | 23.6 |
| UF4-PA69 | Resurgencia | Vía | 1,159,237 | 1,335,829 | 1,036 | Fm Aguardiente | abr-18 | 0.7 | 7.45 | 298 | 22.4 | 77 | -25 | 23 |
| UF4-PA70 | Resurgencia | Vía | 1,158,553 | 1,335,200 | 958 | Depositos Aluviales Abanico Aluvial | abr-18 | 0.6 | 5.5 | 35 | 22.7 | 40 | 52 | 22.7 |
| UF4-PA71 | Manantial | Vía | 1,159,993 | 1,335,845 | 949 | Deposito Coluvial sobre Fm Capacho | abr-18 | 0.26 | 6.68 | 630 | 37.8 | 350 | -132 | 39 |
| UF4-PA72 | Manantial | Vía | 1,160,090 | 1,335,870 | 976 | Fm Capacho | abr-18 | 0.45 | 6.4 | 520 | 38.1 | 410 | -138 | 40 |
| UF4-PA73 | Manantial | Vía | 1,159,954 | 1,336,087 | 956 | Deposito Coluvial sobre Fm Capacho | abr-18 | 1.1 | 7.25 | 210 | 24.8 | 332 | 29 | 25 |
| UF4-PA74 | Manantial | Vía | 1,160,001 | 1,335,905 | 953 | Deposito Coluvial sobre Fm Capacho | abr-18 | 0.71 | 6.35 | 557 | 37.8 | 390 | -121 | 39 |
| UF4-PA75 | Resurgencia | Vía | 1,159,812 | 1,334,234 | 945 | Teraza Aluvial Nivel 1 | abr-18 | 0.095 | 6.3 | 140 | 22.8 | 95 | 120 | 22.5 |
| UF4-PA76 | Resurgencia | Vía | 1,158,745 | 1,330,896 | 1,047 | Depositos Aluviales Abanico Aluvial | abr-18 | 0.04 | 7.15 | 442 | 22.4 | 180 | 65 | 23 |

| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA |
| Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta | |

| CÓDIGO | TIPO DE PUNTO | Ubicación | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Unidad Geológica | Fecha | Caudal (l/s) | MEDICIÓN PARÁMETROS FÍSICOS-Q | | | | | |
|----------|---------------|------------------|--|-----------|-------|-------------------------------------|--------|--------------|-------------------------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | | | E | N | ELEV | | | | PH | CE (µs/cm) | Temp. (°C) | SDT (mg/l) | Redox-Eh/ | T°C Redox |
| UF4-PA77 | Resurgencia | Vía | 1,158,712 | 1,330,874 | 1,046 | Depositos Aluviales Abanico Aluvial | abr-18 | 0.05 | 7.2 | 385 | 22 | 200 | 50 | 22 |
| UF4-PA78 | Resurgencia | Acceso Zodme 497 | 1,158,742 | 1,330,458 | 1,033 | Depositos Aluviales Abanico Aluvial | abr-18 | 0,052 | 7.35 | 570 | 23.5 | 295 | 77 | 22.6 |
| UF4-PA79 | Manantial | Zodme 495 | 1,157,913 | 1,331,186 | 1,229 | Depositos Aluviales Abanico Aluvial | abr-18 | 0.019 | 7.02 | 300 | 20.5 | 100 | -25 | 20.6 |
| UF4-PA80 | Interflujo | Vía | 1,158,896 | 1,330,254 | 1,024 | Depositos Aluviales Abanico Aluvial | abr-18 | 0.009 | 6.71 | 60 | 24.1 | 15 | 110 | 24 |
| UF4-PA81 | Interflujo | Vía | 1,158,948 | 1,330,277 | 1,022 | Depositos Aluviales Abanico Aluvial | abr-18 | 0.01 | 6.8 | 55 | 24 | 20 | 120 | 24.2 |
| UF4-PA82 | Resurgencia | Zodme 495 | 1,157,952 | 1,331,043 | 1,180 | Fm La Luna | abr-18 | 0.019 | 7.02 | 300 | 20.5 | 100 | -25 | 20.6 |
| UF4-PA83 | Resurgencia | Vía | 1,159,587 | 1,328,414 | 1,124 | Fm Capacho | abr-18 | 0.16 | 6.84 | 310 | 21.9 | 150 | 250 | 22.1 |
| UF4-PA84 | Resurgencia | Vía | 1,159,681 | 1,328,774 | 1,112 | Fm Capacho | abr-18 | 0.75 | 6.2 | 251 | 23.6 | 412 | 200 | 23.7 |
| UF4-PA85 | Resurgencia | Vía | 1,159,417 | 1,328,346 | 1,073 | Terraza Aluvial Nivel 1 | abr-18 | 0.15 | 6.79 | 260 | 22.7 | 125 | 300 | 22.9 |
| UF4-PA87 | Resurgencia | Vía | 1,161,548 | 1,339,464 | 827 | Formación La Luna | jul-19 | 0.265 | 6.85 | 178 | 25.3 | 88 | 75 | 25.3 |
| UF4-PA88 | Resurgencia | Vía | 1,161,569 | 1,339,461 | 817 | Deposito coluvial | jul-19 | 0.539 | 6.7 | 231 | 24.1 | 116 | 48 | 24.1 |
| UF4-PA89 | Manantial | Vía | 1,162,051 | 1,340,190 | 779 | Terraza aluvial, nivel 1 | jul-19 | 0.008 | 6.44 | 278 | 23.3 | 132 | 135 | 23.3 |
| UF4-PA90 | Manantial | Vía | 1,162,044 | 1,339,766 | 904 | Terraza aluvial, nivel 1 | jul-19 | 0.167 | 7.38 | 375 | 21.9 | 187 | 142 | 21.9 |
| UF4-PA91 | Manantial | Vía | 1,161,911 | 1,339,760 | 821 | Terraza aluvial, nivel 1 | jul-19 | 0.049 | 7.2 | 695 | 27 | 345 | 185 | 27 |
| UF4-PA92 | Manantial | Vía | 1,162,262 | 1,340,881 | 793 | Terraza aluvial, nivel 1 | jul-19 | 0.313 | 5.43 | 805 | 25.3 | 402 | 130 | 25.3 |


| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA |
| Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta | |

| CÓDIGO | TIPO DE PUNTO | Ubicación | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Unidad Geológica | Fecha | Caudal (l/s) | MEDICIÓN PARÁMETROS FÍSICOS-Q | | | | | |
|-----------|---------------|-----------|--|-----------|------|--------------------------|--------|--------------|-------------------------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | | | E | N | ELEV | | | | PH | CE (µs/cm) | Temp. (°C) | SDT (mg/l) | Redox-Eh/ | T°C Redox |
| UF4-PA93 | Manantial | Vía | 1,162,259 | 1,340,935 | 771 | Terraza aluvial, nivel 2 | jul-19 | 0.457 | 5.41 | 998 | 24.1 | 499 | 183 | 24.1 |
| UF4-PA94 | Manantial | Vía | 1,162,125 | 1,340,523 | 769 | Rio | jul-19 | 0.055 | 5.27 | 782 | 25.5 | 384 | 267 | 25.5 |
| UF4-PA95 | Manantial | Vía | 1,160,117 | 1,337,400 | 905 | Deposito coluvial | jul-19 | 0.571 | 5.54 | 82 | 24.5 | 41 | 16 | 24.5 |
| UF4-PA96 | Manantial | Vía | 1,159,813 | 1,335,679 | 920 | Deposito coluvial | jul-19 | 0.095 | 5.15 | 1330 | 32.1 | 665 | 493 | 32.1 |
| UF4-PA97 | Manantial | Vía | 1,159,886 | 1,335,446 | 946 | Deposito coluvial | jul-19 | 0.435 | 5.48 | 937 | 29.8 | 540 | 278 | 29.8 |
| UF4-PA98 | Manantial | Vía | 1,159,823 | 1,335,305 | 934 | Deposito coluvial | jul-19 | 0.683 | 5.39 | 1078 | 31.4 | 617 | 781 | 31.4 |
| UF4-PA101 | Manantial | Vía | 1,159,414 | 1,335,662 | 1063 | Fm Aguardiente | abr-19 | 0.18 | 6.91 | 84 | 22,6 | 55 | 29 | 23,2 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

Tabla 5-2.3. Puntos de agua naturales censados en la UF5

| CÓDIGO | TIPO DE PUNTO | Ubicación | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Unidad Geológica | Fecha | Caudal (l/s) | MEDICIÓN PARÁMETROS FÍSICOS | | | | | |
|----------|---------------|---------------------|--|-----------|------|--|--------|--------------|-----------------------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | | | E | N | ELEV | | | | PH | CE (µs/cm) | Temp. (°C) | SDT (mg/l) | Redox-Eh/ | T°C Redox |
| UF5-PA01 | Resurgencia | Zodme VER-533 | 1,162,753 | 1,344,287 | 924 | Formación Colón - Mito Juan | jul-18 | 0,1 | 8.95 | 1716 | 26 | 895 | - | - |
| UF5-PA02 | Interflujo | Acceso Zodme 724 | 1165266 | 1343588 | 846 | Terraza aluvial, nivel 1 sobre Formación Carbonera | jul-18 | 0,01 | 6.61 | 1144 | 22,6 | 595 | -10 | 22,6 |
| UF5-PA04 | Interflujo | Vía a cielo abierto | 1163187 | 1341521 | 784 | Abanico terraza nivel 2 | abr-18 | 0.15 | 6.5 | 1010 | 23.8 | 780 | 125 | 24 |


| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA |
| Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta | |

| CÓDIGO | TIPO DE PUNTO | Ubicación | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Unidad Geológica | Fecha | Caudal (l/s) | MEDICIÓN PARÁMETROS FÍSICOS | | | | | |
|----------|---------------|---------------------|--|---------|------|-------------------------|--------|--------------|-----------------------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | | | E | N | ELEV | | | | PH | CE (µs/cm) | Temp. (°C) | SDT (mg/l) | Redox-Eh/ | T°C Redox |
| UF5-PA05 | Resurgencia | Vía a cielo abierto | 1164383 | 1343389 | 687 | Terraza aluvial nivel 2 | abr-18 | 0.2 | 6.35 | 1215 | 23.5 | 740 | -15 | 24 |
| UF5-PA06 | Interflujo | Vía a cielo abierto | 1163548 | 1343003 | 708 | Fm Los Cuervos | abr-18 | 0.18 | 6.7 | 1020 | 23.4 | 555 | -10 | 24.3 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

Tabla 5-2.4. Puntos de agua antrópicos censados en las UF3-4-5

| CÓDIGO | TIPO DE PUNTO | Ubicación | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Unidad Geologica | Prof. Perf. (m) | Fecha | N.P (m) | MEDICIÓN PARÁMETROS FÍSICOS | | | | | |
|----------|-----------------|---------------------|--|---------|------|-------------------------|-----------------|----------|---------|-----------------------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | | | E | N | ELEV | | | | | PH | CE (µs/cm) | Temp. (°C) | SDT (mg/l) | Redox-Eh/ | T°C Redox |
| UF3-PA39 | Dren Horizontal | Vía a cielo abierto | 1159183 | 1320459 | 1351 | Deposito Coluvial | N.A. | Nov_2017 | N.A. | 6,76 | 200 | 23,1 | 100 | 136 | 23 |
| | | | | | | | | jul-18 | | 6,52 | 234 | 24 | 121 | - | - |
| UF3-PA40 | Excavación | Vía a cielo abierto | 1159185 | 1320519 | 1346 | Deposito Coluvial | N.A. | Dic_2017 | N.A. | 6,03 | 130 | 26,4 | 70 | 343 | 26,5 |
| | | | | | | | | jul-18 | | 6,41 | 41 | 21,9 | 21 | 66 | 21,9 |
| UF3-PA41 | Dren Horizontal | Vía a cielo abierto | 1159188 | 1320592 | 1341 | Terraza Aluvial Nivel 1 | N.A. | abr-18 | N.A. | 6.86 | 660 | 35.8 | 334 | -128 | 39 |
| UF3-PA42 | Deslizamiento | Vía a cielo abierto | 1159184 | 1320676 | 1334 | Deposito Coluvial | N.A. | abr-18 | N.A. | 7.4 | 410 | 22.5 | 221 | 180 | 20.4 |
| UF3-PA49 | Explanación | Vía a cielo abierto | 1159502 | 1316381 | 1643 | Fm Colon-Mito Juan | N.A. | abr-18 | N.A. | 6.82 | 190 | 21.4 | 90 | 61 | 21.5 |
| UF3-PA50 | Corte minero | Vía a cielo abierto | 1160011 | 1316048 | 1712 | Fm Barco | N.A. | abr-18 | N.A. | 6.9 | 182 | 20.7 | 82 | 66 | 21 |
| UF3-PA55 | Dren Horizontal | Tunel | 1159310 | 1315096 | 1628 | Abanico Terraza Nivel 2 | N.A. | abr-18 | N.A. | 5.2 | 32 | 19,2 | 16 | 119 | 19,2 |
| UF3-PA56 | Excavación | Vía a cielo abierto | 1159185 | 1315284 | 1602 | Abanico Terraza Nivel 2 | N.A. | abr-18 | N.A. | 5.6 | 55 | 22.7 | 21 | 165 | 23.1 |


| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA |
| Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta | |

| CÓDIGO | TIPO DE PUNTO | Ubicación | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Unidad Geologica | Prof. Perf. (m) | Fecha | N.P (m) | MEDICIÓN PARÁMETROS FÍSICOS | | | | | |
|----------|---------------|---------------------|--|---------|------|--|-----------------|--------|---------|-----------------------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | | | E | N | ELEV | | | | | PH | CE (µs/cm) | Temp. (°C) | SDT (mg/l) | Redox-Eh/ | T°C Redox |
| UF4-PA48 | Excavación | Vía a cielo abierto | 1159570 | 1336521 | 1624 | Deposito Coluvial | N.A. | abr-18 | N.A. | 6,61 | 174 | 24,5 | 89 | 66 | 24,5 |
| UF4-PA68 | Deslizamiento | Vía a cielo abierto | 1159575 | 1335397 | 1569 | Terraza Aluvial | N.A. | abr-18 | N.A. | 6.6 | 219 | 24.2 | 122 | 29 | 23 |
| UF4-PA86 | Aljibe | Vía a cielo abierto | 1159195 | 1328552 | 1056 | Depositos aluviales Abanico aluvial | N.A. | abr-18 | N.A. | 6.63 | 724 | 23.1 | 290 | 301 | 21 |
| UF5-PA03 | Excavación | Vía a cielo abierto | 1162836 | 1343300 | 782 | Abanico Terraza Nivel 2 | N.A. | abr-18 | N.A. | 8,95 | 1716 | 26 | 895 | - | - |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

Tabla 5-2.5. Piezómetros existentes censados en las UF3-4-5

| CÓDIGO | TIPO DE PUNTO | Ubicación | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Unidad Geologica | Prof. Perf. (m) | Fecha | N.P (m) | MEDICIÓN PARÁMETROS FÍSICOS | | | | | |
|----------|---------------|-----------|--|-----------|-------|---|-----------------|--------|---------|-----------------------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | | | E | N | ELEV | | | | | PH | CE (µs/cm) | Temp. (°C) | SDT (mg/l) | Redox-Eh/ | T°C Redox |
| UF3-PZ01 | Piezómetro | Túnel | 1,159,465 | 1,315,212 | 1,663 | Coluviones - Formación Barco | 60 | may-18 | 38,7 | 6,99 | 280 | 20,3 | 140 | 216 | 20,6 |
| | | | | | | | | jul-18 | 41,76 | 6,85 | 225 | 19,7 | 112 | -75 | 19,9 |
| UF3-PZ02 | Piezómetro | Túnel | 1,159,484 | 1,315,229 | 1,662 | Abanico Terraza, nivle 2, Formación Barco | 35 | may-18 | 17,39 | 6,29 | 140 | 20,7 | 70 | 183 | 20,6 |
| | | | | | | | | jul-18 | 19,6 | 7,63 | 169 | 21,1 | 85 | 153 | 20,8 |
| UF3-PZ03 | Piezómetro | Túnel | 1,159,491 | 1,315,139 | 1,709 | Depósitos Coluviales, Formación Barco | 25 | may-18 | 17,52 | 5,69 | 170 | 21 | 90 | 192 | 20,3 |
| | | | | | | | | jul-18 | 18,77 | 6,25 | 144 | 20,5 | 72 | -84 | 20,7 |
| UF3-PZ04 | Piezómetro | Túnel | 1,159,820 | 1,314,233 | 1,720 | Formación Barco | 45,3 | may-18 | 37,35 | 7,14 | 490 | 20,1 | 240 | 172 | 19,7 |
| | | | | | | | | jul-18 | 39,92 | 7,23 | 605 | 20,1 | 304 | -87 | 20,4 |
| UF3-PZ05 | Piezómetro | Túnel | 1,159,758 | 1,314,295 | 1,726 | Depósitos Coluviales - Formación Barco | 40 | may-18 | 30,99 | 7,69 | 290 | 21,7 | 140 | 140 | 20,4 |
| | | | | | | | | jul-18 | 36,23 | 7,05 | 907 | 19,6 | 403 | -179 | 19,8 |

| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA |
| Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta | |

| CÓDIGO | TIPO DE PUNTO | Ubicación | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Unidad Geologica | Prof. Perf. (m) | Fecha | N.P (m) | MEDICIÓN PARÁMETROS FÍSICOS | | | | | |
|----------|---------------|-----------|--|-----------|-------|--|-----------------|--------|---------|-----------------------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | | | E | N | ELEV | | | | | PH | CE (µs/cm) | Temp. (°C) | SDT (mg/l) | Redox-Eh/ | T°C Redox |
| UF3-PZ06 | Piezómetro | Túnel | 1,159,799 | 1,314,209 | 1,697 | Depósitos Coluviales - Formación Barco | 45 | may-18 | 38,55 | 6,64 | 770 | 20,5 | 390 | 137 | 20,1 |
| | | | | | | | | jul-18 | 40,06 | 7,53 | 610 | 19,8 | 305 | -206 | 20 |
| UF3-PZ07 | Piezómetro | Túnel | 1,159,647 | 1,314,651 | 1,700 | Depósitos Coluviales - Formación Barco | 95 | may-18 | 60,34 | 7,16 | 330 | 20 | 160 | -24 | 19,7 |
| | | | | | | | | jul-18 | 62,8 | 7,63 | 292 | 20,2 | 146 | -310 | 20,1 |
| UF3-PZ08 | Piezómetro | Túnel | 1,159,827 | 1,314,233 | 1,717 | Formación Barco | 60 | may-18 | 27,25 | 7,67 | 80 | 20,3 | 90 | 129 | 19,9 |
| | | | | | | | | jul-18 | 39,5 | 7,17 | 521 | 20,1 | 260 | -60 | 20,3 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

5.1.8.6.2 Análisis de los datos de interés hidrogeológico provenientes del inventario

- Caudales característicos de los puntos de agua

Se analizaron los datos de caudales característicos ($Q=l/s$) mediante la metodología propuesta por Meinzer (1923). Se seleccionó esta metodología porque su división en ocho (8) grupos diferentes, contiene los intervalos suficientes para discriminar correctamente los bajos caudales obtenidos en los diferentes puntos de agua censados. Donde el primer grupo generalmente corresponde a afloramientos de agua más grandes, con una capacidad de producción más alta, y el octavo grupo a afloramientos de agua muy pequeños, con una capacidad de producción muy modesta.

Tabla 5-2.6. Clasificación de puntos de agua de acuerdo con su caudal.

| GRUPO | Q (L/s) |
|---------|-----------------------------------|
| Primero | $Q \geq 2800$ l/s |
| Segundo | 280 l/s $\leq Q < 2800$ l/s |
| Tercero | 28 l/s $\leq Q < 280$ l/s |
| Cuarto | $6,7$ l/s $\leq Q < 28$ l/s |
| Quinto | $0,67$ l/s $\leq Q < 6,7$ l/s |
| Sexto | $0,067$ l/s $< Q < 0,67$ l/s |
| Séptimo | $0,0083$ l/s $\leq Q < 0,067$ l/s |
| Octavo | $Q < 0,0083$ l/s |

Fuente: Meinzer, 1923

La clasificación propuesta por Meinzer inicialmente para manantiales es extensible a otros puntos de agua que no se clasifican como manantiales.

En la **Tabla 5-2.7** y **Figura 5-2.14**, se reportan los valores de caudales medios medidos “in situ” durante el inventario realizado.

Tabla 5-2.7. Caudales característicos de los puntos de agua inventariados en las UF3-4-5. (Abril - Julio de 2018)

| ID Punto | Tipo Punto | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Caudal (l/s) |
|----------|-------------|--|-----------|------|---------------------|
| | | E | N | ELEV | Abril/Julio_2018/19 |
| UF3-PA01 | Manantial | 1,160,160 | 1,314,278 | 1868 | 0,018 |
| UF3-PA02 | Resurgencia | 1,160,029 | 1,313,981 | 1763 | 0,006 |
| UF3-PA03 | Resurgencia | 1,160,027 | 1,314,126 | 1777 | 0,058 |
| UF3-PA04 | Resurgencia | 1,160,099 | 1,314,170 | 1818 | 0,016 |
| UF3-PA06 | Manantial | 1,160,002 | 1,315,124 | 1906 | 0,028 |
| UF3-PA07 | Resurgencia | 1,160,103 | 1,315,191 | 1910 | 0,025 |

| ID Punto | Tipo Punto | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Caudal (l/s) |
|----------|-------------|--|-----------|------|---------------------|
| | | E | N | ELEV | Abril/Julio_2018/19 |
| UF3-PA08 | Manantial | 1,159,991 | 1,315,376 | 1863 | 0,125 |
| UF3-PA10 | Interflujo | 1,160,450 | 1,313,709 | 1737 | 0,023 |
| UF3-PA11 | Interflujo | 1,160,251 | 1,313,731 | 1731 | 0,001 |
| UF3-PA12 | Manantial | 1,159,373 | 1,317,920 | 1495 | 0,019 |
| UF3-PA13 | Manantial | 1,159,496 | 1,318,414 | 1500 | 0,761 |
| UF3-PA14 | Resurgencia | 1,159,601 | 1,319,855 | 1388 | 0,640 |
| UF3-PA15 | Interflujo | 1,159,200 | 1,320,633 | 1327 | 0,500 |
| UF3-PA16 | Interflujo | 1,159,140 | 1,320,926 | 1313 | 0,100 |
| UF3-PA17 | Interflujo | 1,159,174 | 1,321,257 | 1297 | 0,050 |
| UF3-PA18 | Interflujo | 1,159,246 | 1,321,403 | 1303 | 0,230 |
| UF3-PA19 | Resurgencia | 1,159,234 | 1,321,629 | 1299 | 0,010 |
| UF3-PA20 | Resurgencia | 1,159,213 | 1,322,250 | 1274 | 0,010 |
| UF3-PA21 | Resurgencia | 1,159,156 | 1,324,321 | 1194 | 0,450 |
| UF3-PA23 | Resurgencia | 1,159,329 | 1,326,132 | 1187 | 0,350 |
| UF3-PA25 | Resurgencia | 1,159,059 | 1,315,768 | 1574 | 0,100 |
| UF3-PA26 | Resurgencia | 1,159,040 | 1,315,930 | 1573 | 0,010 |
| UF3-PA27 | Interflujo | 1,159,025 | 1,315,966 | 1588 | 0,010 |
| UF3-PA28 | Resurgencia | 1,159,476 | 1,314,833 | 1666 | 0,010 |
| UF3-PA29 | Manantial | 1,159,407 | 1,314,880 | 1635 | 0,200 |
| UF3-PA30 | Interflujo | 1,159,532 | 1,314,703 | 1683 | 0,000 |
| UF3-PA31 | Interflujo | 1,159,241 | 1,321,375 | 1310 | 0,000 |
| UF3-PA32 | Interflujo | 1,159,708 | 1,315,024 | 1836 | 0,010 |
| UF3-PA33 | Resurgencia | 1,159,021 | 1,315,955 | 1613 | 0,145 |
| UF3-PA34 | Resurgencia | 1,159,403 | 1,326,093 | 1202 | 1 |
| UF3-PA35 | Interflujo | 1,159,196 | 1,321,378 | 1306 | 0.32 |
| UF3-PA36 | Interflujo | 1,159,621 | 1,321,446 | 1509 | 0.14 |
| UF3-PA37 | Interflujo | 1,159,571 | 1,321,659 | 1516 | 0.02 |
| UF3-PA38 | Interflujo | 1,159,589 | 1,321,868 | 1510 | 0.018 |
| UF3-PA39 | Antropico | 1,159,183 | 1,320,459 | 1337 | 0.6 |
| UF3-PA40 | Antropico | 1,159,185 | 1,320,519 | 1334 | 0.74 |
| UF3-PA41 | Antropico | 1,159,188 | 1,320,592 | 1331 | 0.66 |
| UF3-PA42 | Antropico | 1,159,184 | 1,320,676 | 1327 | 0.55 |
| UF3-PA43 | Interflujo | 1,159,122 | 1,320,879 | 1318 | 0.73 |
| UF3-PA44 | Interflujo | 1,159,044 | 1,319,620 | 1389 | 0.12 |

| ID Punto | Tipo Punto | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Caudal (l/s) |
|-----------|-------------|--|-----------|------|---------------------|
| | | E | N | ELEV | Abril/Julio_2018/19 |
| UF3-PA45 | Interflujo | 1,159,583 | 1,317,603 | 1534 | 2.732 |
| UF3-PA46 | Interflujo | 1,159,719 | 1,317,580 | 1554 | 2.1 |
| UF3-PA47 | Interflujo | 1,159,312 | 1,315,870 | 1618 | 0.14 |
| UF3-PA48 | Interflujo | 1,159,342 | 1,315,873 | 1623 | 0.17 |
| UF3-PA49 | Antropico | 1,159,502 | 1,316,381 | 1621 | 0.58 |
| UF3-PA50 | Antropico | 1,160,011 | 1,316,048 | 1697 | 0.7 |
| UF3-PA51 | Interflujo | 1,159,038 | 1,315,967 | 1580 | 0.017 |
| UF3-PA52 | Resurgencia | 1,159,949 | 1,315,109 | 1911 | 0.024 |
| UF3-PA53 | Resurgencia | 1,159,955 | 1,315,290 | 1863 | 0.08 |
| UF3-PA54 | Resurgencia | 1,159,809 | 1,314,743 | 1845 | 0.025 |
| UF3-PA55 | Antropico | 1,159,310 | 1,315,096 | 1618 | 0.4 |
| UF3-PA56 | Antropico | 1,159,185 | 1,315,284 | 1593 | 0.8 |
| UF3-PA57 | Resurgencia | 1,159,132 | 1,315,246 | 1584 | 0.14 |
| UF3-PA58 | Manantial | 1,158,808 | 1,315,040 | 1663 | 0.25 |
| UF3-PA59 | Resurgencia | 1,160,687 | 1,314,021 | 1850 | 0.05 |
| UF3-PA60 | Manantial | 1,160,467 | 1,314,297 | 1902 | 0.074 |
| UF3-PA61 | Resurgencia | 1,159,390 | 1,314,182 | 1681 | 0.13 |
| UF3-PA62 | Resurgencia | 1,159,364 | 1,314,218 | 1677 | 0.14 |
| UF3-PA63 | Manantial | 1,159,372 | 1,314,002 | 1747 | 0.98 |
| UF3-PA64 | Manantial | 1,159,412 | 1,313,988 | 1751 | 0.91 |
| UF3-PA65 | Manantial | 1,159,462 | 1,313,960 | 1766 | 1.02 |
| UF3-PA66 | Resurgencia | 1,159,519 | 1,314,017 | 1748 | 0.99 |
| UF3-PA67 | Interflujo | 1,159,014 | 1,315,978 | 1572 | 0.12 |
| UF3-PA68 | Interflujo | 1,159,005 | 1,315,977 | 1569 | 0.04 |
| UF3-PA69 | Interflujo | 1,159,002 | 1,315,996 | 1570 | 0.055 |
| UF3-PA101 | Interflujo | 1,159,120 | 1,315,913 | 1606 | 0,012 |
| UF4-PA01 | Manantial | 1.161.314 | 1.338.265 | 878 | 0,590 |
| UF4-PA02 | Manantial | 1.161.348 | 1.338.268 | 862 | 1.550 |
| UF4-PA03 | Manantial | 1.161.368 | 1.338.283 | 842 | 0,070 |
| UF4-PA06 | Manantial | 1.160.022 | 1.335.864 | 964 | 0,130 |
| UF4-PA08 | Manantial | 1.161.374 | 1.338.299 | 843 | 0,380 |
| UF4-PA09 | Interflujo | 1.159.519 | 1.328.230 | 1089 | 0,200 |
| UF4-PA10 | Interflujo | 1.159.496 | 1.328.131 | 1114 | 0,093 |
| UF4-PA11 | Interflujo | 1.159.459 | 1.328.012 | 1094 | 0,160 |

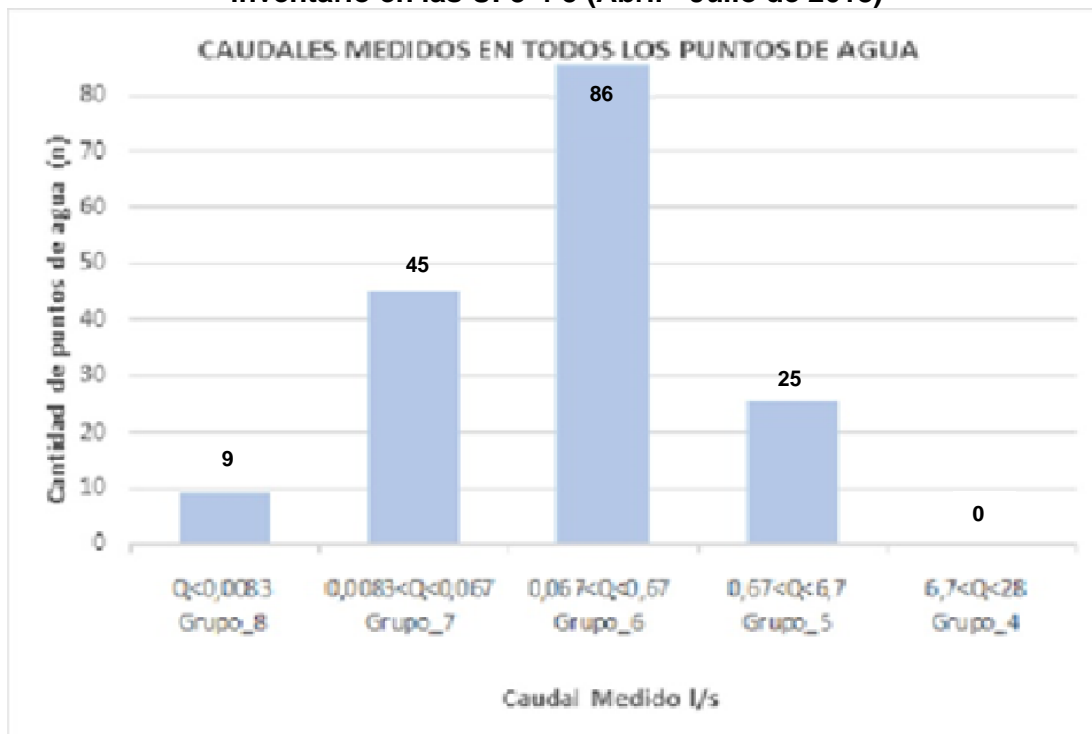
| ID Punto | Tipo Punto | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Caudal (l/s) |
|----------|-------------|--|-----------|------|---------------------|
| | | E | N | ELEV | Abril/Julio_2018/19 |
| UF4-PA12 | Interflujo | 1.159.513 | 1.327.909 | 1177 | 0,090 |
| UF4-PA13 | Interflujo | 1.158.748 | 1.329.639 | 1092 | 0,002 |
| UF4-PA14 | Manantial | 1.159.531 | 1.332.952 | 969 | 0,260 |
| UF4-PA15 | Manantial | 1.159.592 | 1.333.433 | 1012 | 0,010 |
| UF4-PA16 | Interflujo | 1.159.712 | 1.333.818 | 952 | 0,001 |
| UF4-PA17 | Resurgencia | 1.159.599 | 1.335.645 | 920 | 0,250 |
| UF4-PA18 | Resurgencia | 1.159.611 | 1.335.667 | 916 | 0,070 |
| UF4-PA19 | Interflujo | 1.159.617 | 1.335.784 | 910 | 0,020 |
| UF4-PA20 | Interflujo | 1.159.701 | 1.337.421 | 898 | 0,040 |
| UF4-PA21 | Resurgencia | 1.159.789 | 1.337.629 | 894 | 0,140 |
| UF4-PA22 | Manantial | 1.159.665 | 1.336.910 | 890 | 4.000 |
| UF4-PA23 | Interflujo | 1.160.238 | 1.338.278 | 906 | 0,001 |
| UF4-PA24 | Manantial | 1.161.679 | 1.338.620 | 826 | 0,050 |
| UF4-PA25 | Interflujo | 1.161.398 | 1.339.352 | 880 | 0,060 |
| UF4-PA26 | Resurgencia | 1.161.472 | 1.339.425 | 861 | 1.170 |
| UF4-PA27 | Resurgencia | 1.161.521 | 1.339.444 | 833 | 0,080 |
| UF4-PA28 | Resurgencia | 1.161.519 | 1.339.462 | 823 | 0,190 |
| UF4-PA29 | Resurgencia | 1.161.547 | 1.339.714 | 835 | 0,060 |
| UF4-PA30 | Manantial | 1.161.325 | 1.338.283 | 862 | 0,090 |
| UF4-PA31 | Manantial | 1.161.978 | 1.341.194 | 751 | 4.000 |
| UF4-PA32 | Manantial | 1.161.979 | 1.341.162 | 748 | 0,040 |
| UF4-PA33 | Interflujo | 1.158.991 | 1.330.654 | 1016 | 0,330 |
| UF4-PA34 | Interflujo | 1.159.671 | 1.336.990 | 887 | 0,540 |
| UF4-PA35 | Interflujo | 1.158.786 | 1.327.979 | 1092 | 0,005 |
| UF4-PA39 | Interflujo | 1.161.178 | 1.340.776 | 1029 | 0,100 |
| UF4-PA40 | Manantial | 1.161.287 | 1.340.374 | 995 | 0,040 |
| UF4-PA41 | Manantial | 1.160.053 | 1.335.851 | 954 | 0,020 |
| UF4-PA42 | Interflujo | 1.158.562 | 1.335.743 | 1023 | 0,017 |
| UF4-PA43 | Manantial | 1.158.619 | 1.335.512 | 1153 | 0,011 |
| UF4-PA44 | Interflujo | 1.158.485 | 1.335.607 | 1018 | 0,014 |
| UF4-PA45 | Interflujo | 1.159.006 | 1.335.491 | 1036 | 0,009 |
| UF4-PA46 | Resurgencia | 1.158.009 | 1.330.964 | 1158 | 0,013 |
| UF4-PA47 | Resurgencia | 1.160.004 | 1.337.949 | 876 | 0,6 |
| UF4-PA48 | Antropico | 1.159.570 | 1.336.521 | 910 | 0,09 |

| ID Punto | Tipo Punto | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Caudal (l/s) |
|----------|-------------|--|-----------|------|---------------------|
| | | E | N | ELEV | Abril/Julio_2018/19 |
| UF4-PA49 | Manantial | 1.161.469 | 1.339.736 | 872 | 0,17 |
| UF4-PA50 | Interflujo | 1.162.045 | 1.341.261 | 744 | 0,12 |
| UF4-PA51 | Manantial | 1.161.978 | 1.341.184 | 773 | 4 |
| UF4-PA52 | Manantial | 1.161.781 | 1.338.477 | 865 | 0,11 |
| UF4-PA53 | Resurgencia | 1.161.948 | 1.338.819 | 866 | 0,095 |
| UF4-PA54 | Resurgencia | 1.161.967 | 1.338.970 | 883 | 0,07 |
| UF4-PA55 | Interflujo | 1.161.916 | 1.338.538 | 895 | 0,085 |
| UF4-PA56 | Resurgencia | 1.161.967 | 1.338.491 | 922 | 0,078 |
| UF4-PA57 | Resurgencia | 1.161.299 | 1.338.259 | 886 | 0,61 |
| UF4-PA58 | Manantial | 1.161.385 | 1.338.285 | 854 | 0,78 |
| UF4-PA59 | Interflujo | 1.161.477 | 1.337.992 | 871 | 0,08 |
| UF4-PA60 | Resurgencia | 1.161.494 | 1.338.031 | 873 | 0,09 |
| UF4-PA61 | Resurgencia | 1.160.539 | 1.338.185 | 896 | 0,002 |
| UF4-PA62 | Interflujo | 1.160.079 | 1.338.114 | 883 | 0,3 |
| UF4-PA63 | Interflujo | 1.159.878 | 1.337.913 | 900 | 0,4 |
| UF4-PA64 | Resurgencia | 1.159.657 | 1.337.810 | 941 | 0,46 |
| UF4-PA65 | Interflujo | 1.159.711 | 1.337.171 | 891 | 0,71 |
| UF4-PA66 | Resurgencia | 1.159.907 | 1.337.132 | 895 | 0,21 |
| UF4-PA67 | Manantial | 1.160.122 | 1.337.418 | 901 | 0,25 |
| UF4-PA68 | Antropico | 1.159.575 | 1.335.397 | 1569 | 0,12 |
| UF4-PA69 | Resurgencia | 1.159.237 | 1.335.829 | 1036 | 0,7 |
| UF4-PA70 | Resurgencia | 1.158.553 | 1.335.200 | 958 | 0,6 |
| UF4-PA71 | Manantial | 1.159.993 | 1.335.845 | 949 | 0,26 |
| UF4-PA72 | Manantial | 1.160.090 | 1.335.870 | 976 | 0,45 |
| UF4-PA73 | Manantial | 1.159.954 | 1.336.087 | 956 | 1,1 |
| UF4-PA74 | Manantial | 1.160.001 | 1.335.905 | 953 | 0,71 |
| UF4-PA75 | Resurgencia | 1.159.812 | 1.334.234 | 945 | 0,095 |
| UF4-PA76 | Resurgencia | 1.158.745 | 1.330.896 | 1047 | 0,04 |
| UF4-PA77 | Resurgencia | 1.158.712 | 1.330.874 | 1046 | 0,05 |
| UF4-PA78 | Resurgencia | 1.158.742 | 1.330.458 | 1033 | 0,052 |
| UF4-PA79 | Manantial | 1.157.913 | 1.331.186 | 1229 | 0,019 |
| UF4-PA80 | Interflujo | 1.158.896 | 1.330.254 | 1024 | 0,009 |
| UF4-PA81 | Interflujo | 1.158.948 | 1.330.277 | 1022 | 0,01 |
| UF4-PA82 | Resurgencia | 1.157.952 | 1.331.043 | 1180 | 0,019 |

| ID Punto | Tipo Punto | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Caudal (l/s) |
|-----------|-------------|--|-----------|------|---------------------|
| | | E | N | ELEV | Abril/Julio_2018/19 |
| UF4-PA83 | Resurgencia | 1.159.587 | 1.328.414 | 1124 | 0,16 |
| UF4-PA84 | Resurgencia | 1.159.681 | 1.328.774 | 1112 | 0,75 |
| UF4-PA85 | Resurgencia | 1.159.417 | 1.328.346 | 1073 | 0,15 |
| UF4-PA86 | Aljibe | 1.159.195 | 1.328.552 | 1056 | 2,5 |
| UF4-PA87 | Resurgencia | 1161548 | 1339464 | 827 | 0,265 |
| UF4-PA88 | Resurgencia | 1161569 | 1339461 | 817 | 0,539 |
| UF4-PA89 | Manantial | 1162051 | 1340190 | 779 | 0,008 |
| UF4-PA90 | Manantial | 1162044 | 1339766 | 904 | 0,167 |
| UF4-PA91 | Manantial | 1161911 | 1339760 | 821 | 0,049 |
| UF4-PA92 | Manantial | 1162262 | 1340881 | 793 | 0,313 |
| UF4-PA93 | Manantial | 1162259 | 1340935 | 771 | 0,457 |
| UF4-PA94 | Manantial | 1162125 | 1340523 | 769 | 0,055 |
| UF4-PA95 | Manantial | 1160117 | 1337400 | 905 | 0,571 |
| UF4-PA96 | Manantial | 1159813 | 1335679 | 920 | 0,095 |
| UF4-PA97 | Manantial | 1159886 | 1335446 | 946 | 0,435 |
| UF4-PA98 | Manantial | 1159823 | 1335305 | 934 | 0,683 |
| UF4-PA101 | Manantial | 1.159.414 | 1.335.662 | 1063 | 0.18 |
| UF5-PA01 | Resurgencia | 1.162.753 | 1.344.287 | 924 | 0,100 |
| UF5-PA02 | Interflujo | 1.165.266 | 1.343.588 | 846 | 0,010 |
| UF5-PA03 | Antropico | 1.162.836 | 1.343.300 | 780 | 0,55 |
| UF5-PA04 | Interflujo | 1.163.187 | 1.341.521 | 785 | 0,15 |
| UF5-PA05 | Resurgencia | 1.164.383 | 1.343.389 | 688 | 0,2 |
| UF5-PA06 | Interflujo | 1.163.548 | 1.343.003 | 708 | 0,18 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

Figura 5-2.14. Valores de caudal de los puntos de agua encontrados durante el inventario en las UF3-4-5 (Abril - Julio de 2018)



Fuente: Aecom – Concol, 2018

Del análisis de los datos reportados en la **Figura 5-2.14**, se destaca lo siguiente:

- 131 de los 165 puntos de agua aforados (se excluyen los piezómetros) se ubican en los grupos 6 y 7. Lo que equivale a decir que el 79,4% de los puntos inventariados presentan caudales bajos a muy bajos, inferiores todos ellos a 0,67 l/s (21129 m3/año por punto).
- 25 de los 165 puntos de agua aforados se ubican en el grupo 5. Lo que equivale a decir que el 15,15% de los puntos inventariados presentan caudales moderados a bajos, inferiores todos ellos a 2,15 l/s (78840 m3/año por punto).
- 9 de los 165 puntos de agua aforados se ubican en el grupo 8. Lo que equivale a decir que el 5,45% de los puntos inventariados presentan caudales despreciables a insignificantes, inferiores a 0,0083 l/s (262 m3/año por punto).

Respecto a la cantidad de agua presente en los puntos de agua aforados se tiene que en la totalidad de puntos medidos durante el inventario se registraron los caudales medios indicados en la **Tabla 5-2.7**.

Los bajos caudales son indicativos de una circulación poco profunda generalmente asociada a zonas de recarga y almacenamientos de poca extensión, o a interflujos y

resurgencias, presentes en los depósitos cuaternarios y en las zonas alteradas y fracturadas del basamento rocoso o rocas permeables. Esto conlleva además a prever una alta posibilidad de afectación de la cantidad de agua medida en los puntos de agua censados ante periodos prolongados de sequía.

Para tener una valoración de la variación del caudal medio de los puntos censados, se tomó una muestra de 65 puntos de agua a los cuales se les aforó su caudal en dos periodos climáticos (noviembre_diciembre del 2017 y julio del 2018). En la **Tabla 5-2.8** se muestran estos puntos y los caudales medidos.

Los datos mostrados en la **Tabla 5-2.8** y **Figura 5-2.15** se evidencia una disminución de la oferta hídrica de aproximadamente un 39% en el mes de julio del 2018 (mes de menores precipitaciones) respecto al mes de nov_dic del 2017 (periodo húmedo). La mayor disminución del recurso hídrico se registra en aquellos puntos de agua que presentaron caudales más altos en época húmeda.

Tabla 5-2.8. Contraste de valores de caudales medidos en diferentes períodos estacionales en 65 puntos de agua de referencia.

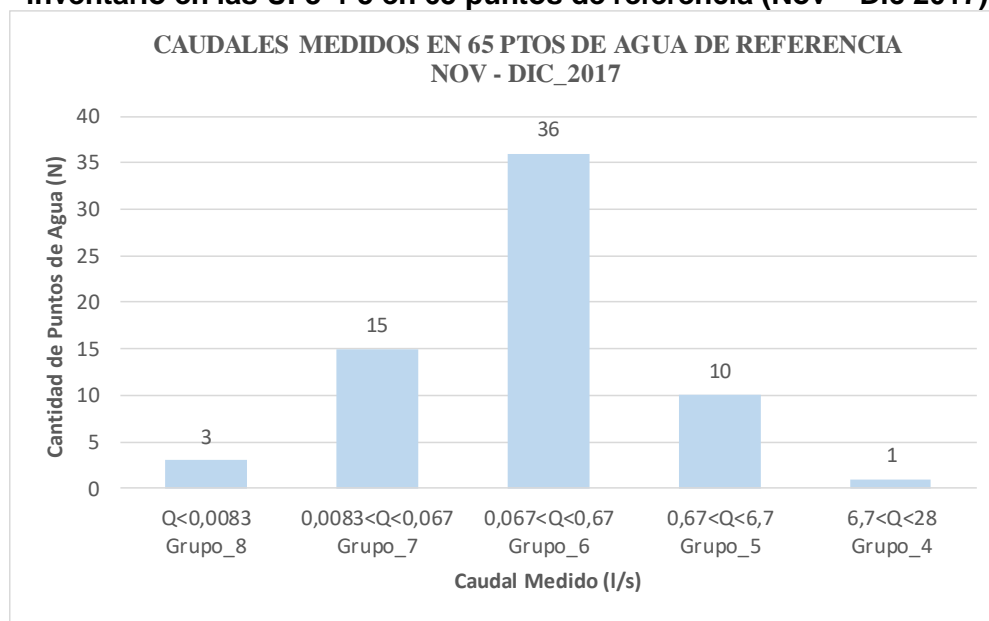
| ID Punto | Tipo Punto | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Caudal (l/s) | |
|----------|-------------|--|-----------|-------|--------------|--------|
| | | E | N | ELEV | nov-17 | jul-18 |
| UF3-PA01 | Manantial | 1.160.160 | 1.314.278 | 1.868 | 0.079 | 0.018 |
| UF3-PA02 | Resurgencia | 1.160.029 | 1.313.981 | 1.763 | 0.007 | 0.006 |
| UF3-PA03 | Resurgencia | 1.160.027 | 1.314.126 | 1.777 | 0.032 | 0.058 |
| UF3-PA04 | Resurgencia | 1.160.099 | 1.314.170 | 1.818 | 0.249 | 0.016 |
| UF3-PA06 | Manantial | 1.160.002 | 1.315.124 | 1.906 | 0.027 | 0.028 |
| UF3-PA07 | Resurgencia | 1.160.103 | 1.315.191 | 1.910 | 0.074 | 0.025 |
| UF3-PA08 | Manantial | 1.159.991 | 1.315.376 | 1.863 | 0.010 | 0.125 |
| UF3-PA10 | Interflujo | 1.160.450 | 1.313.709 | 1.737 | 0.021 | 0.015 |
| UF3-PA11 | Interflujo | 1.160.251 | 1.313.731 | 1.731 | 0.074 | 0.023 |
| UF3-PA12 | Manantial | 1.159.373 | 1.317.920 | 1.495 | 0.078 | 0.001 |
| UF3-PA13 | Manantial | 1.159.496 | 1.318.414 | 1.500 | 0.732 | 0.761 |
| UF3-PA14 | Resurgencia | 1.159.601 | 1.319.855 | 1.388 | 0.699 | 0.640 |
| UF3-PA15 | Interflujo | 1.159.200 | 1.320.633 | 1.327 | 0.086 | 0.500 |
| UF3-PA16 | Interflujo | 1.159.140 | 1.320.926 | 1.313 | 0.922 | 0.100 |
| UF3-PA17 | Manantial | 1.159.174 | 1.321.257 | 1.297 | 0.224 | 0.050 |
| UF3-PA18 | Manantial | 1.159.246 | 1.321.403 | 1.303 | 0.024 | 0.230 |
| UF3-PA19 | Resurgencia | 1.159.234 | 1.321.629 | 1.299 | 0.006 | 0.010 |
| UF3-PA20 | Resurgencia | 1.159.213 | 1.322.250 | 1.274 | 0.257 | 0.010 |
| UF3-PA21 | Resurgencia | 1.159.156 | 1.324.321 | 1.194 | 0.608 | 0.450 |
| UF3-PA23 | Resurgencia | 1.159.329 | 1.326.132 | 1.187 | 1.718 | 0.350 |

| ID Punto | Tipo Punto | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Caudal (l/s) | |
|----------|-------------|--|-----------|-------|--------------|--------|
| | | E | N | ELEV | nov-17 | jul-18 |
| UF3-PA25 | Resurgencia | 1.159.059 | 1.315.768 | 1.574 | 0.183 | 0.100 |
| UF3-PA26 | Resurgencia | 1.159.040 | 1.315.930 | 1.573 | 0.023 | 0.010 |
| UF3-PA27 | Interflujo | 1.159.025 | 1.315.966 | 1.588 | 0.066 | 0.010 |
| UF3-PA28 | Resurgencia | 1.159.476 | 1.314.833 | 1.666 | 0.109 | 0.010 |
| UF3-PA29 | Manantial | 1.159.407 | 1.314.880 | 1.635 | 0.130 | 0.200 |
| UF3-PA30 | Interflujo | 1.159.532 | 1.314.703 | 1.683 | 0.040 | 0.000 |
| UF3-PA31 | Interflujo | 1.159.241 | 1.321.375 | 1.310 | 0.145 | 0.000 |
| UF4-PA01 | Manantial | 1.161.314 | 1.338.265 | 878 | 0.640 | 0.590 |
| UF4-PA02 | Manantial | 1.161.348 | 1.338.268 | 862 | 1.015 | 1.550 |
| UF4-PA03 | Manantial | 1.161.368 | 1.338.283 | 842 | 0.988 | 0.070 |
| UF4-PA06 | Manantial | 1.160.022 | 1.335.864 | 964 | 0.289 | 0.270 |
| UF4-PA08 | Resurgencia | 1.161.374 | 1.338.299 | 843 | 0.374 | 0.380 |
| UF4-PA09 | Interflujo | 1.159.519 | 1.328.230 | 1.089 | 0.154 | 0.200 |
| UF4-PA10 | Interflujo | 1.159.496 | 1.328.131 | 1.114 | 0.102 | 0.093 |
| UF4-PA11 | Interflujo | 1.159.459 | 1.328.012 | 1.094 | 0.102 | 0.160 |
| UF4-PA12 | Interflujo | 1.159.513 | 1.327.909 | 1.177 | 0.405 | 0.090 |
| UF4-PA13 | Resurgencia | 1.158.748 | 1.329.639 | 1.092 | 0.032 | 0.002 |
| UF4-PA14 | Resurgencia | 1.159.531 | 1.332.952 | 969 | 0.174 | 0.260 |
| UF4-PA15 | Interflujo | 1.159.592 | 1.333.433 | 1.012 | 0.057 | 0.010 |
| UF4-PA16 | Resurgencia | 1.159.712 | 1.333.818 | 952 | 0.021 | 0.001 |
| UF4-PA17 | Resurgencia | 1.159.599 | 1.335.645 | 920 | 0.232 | 0.250 |
| UF4-PA18 | Resurgencia | 1.159.611 | 1.335.667 | 916 | 0.076 | 0.070 |
| UF4-PA19 | Resurgencia | 1.159.617 | 1.335.784 | 910 | 0.042 | 0.020 |
| UF4-PA20 | Resurgencia | 1.159.701 | 1.337.421 | 898 | 0.194 | 0.040 |
| UF4-PA21 | Resurgencia | 1.159.789 | 1.337.629 | 894 | 0.920 | 0.140 |
| UF4-PA22 | Resurgencia | 1.159.665 | 1.336.910 | 890 | 10.000 | 4.000 |
| UF4-PA23 | Resurgencia | 1.160.238 | 1.338.278 | 906 | 0.003 | 0.001 |
| UF4-PA24 | Interflujo | 1.161.679 | 1.338.620 | 826 | 0.094 | 0.050 |

| ID Punto | Tipo Punto | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Caudal (l/s) | |
|----------|-------------|--|-----------|-------|--------------|-----------|
| | | E | N | ELEV | nov-17 | jul-18 |
| UF4-PA25 | Resurgencia | 1.161.398 | 1.339.352 | 880 | 0.287 | 0.060 |
| UF4-PA26 | Resurgencia | 1.161.472 | 1.339.425 | 861 | 0.696 | 1.170 |
| UF4-PA27 | Resurgencia | 1.161.521 | 1.339.444 | 833 | 0.165 | 0.080 |
| UF4-PA28 | Resurgencia | 1.161.519 | 1.339.462 | 823 | 1.161 | 0.190 |
| UF4-PA29 | Resurgencia | 1.161.547 | 1.339.714 | 835 | 0.226 | 0.060 |
| UF4-PA30 | Manantial | 1.161.325 | 1.338.283 | 862 | 0.077 | 0.090 |
| UF4-PA31 | Resurgencia | 1.161.978 | 1.341.194 | 751 | 5.000 | 4.000 |
| UF4-PA32 | Resurgencia | 1.161.979 | 1.341.162 | 748 | 0.043 | 0.040 |
| UF4-PA33 | Resurgencia | 1.158.991 | 1.330.654 | 1.016 | 0.059 | 0.330 |
| UF4-PA34 | Interflujo | 1.159.671 | 1.336.990 | 887 | 0.643 | 0.540 |
| | | | | | 31 | 19 |

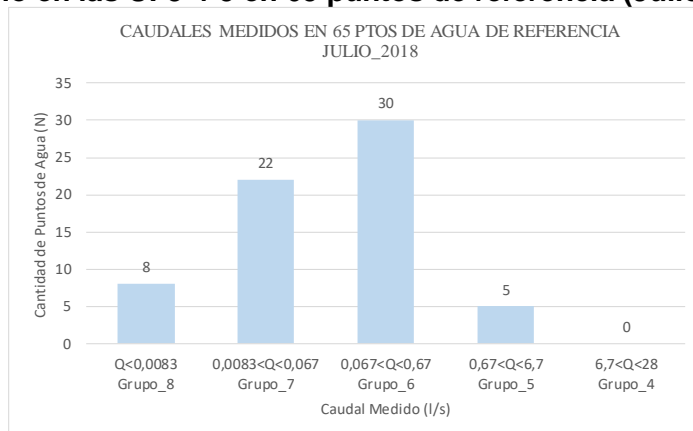
Fuente: Aecom – Concol, 2018

Figura 5-2.15. Valores de caudal de los puntos de agua encontrados durante el inventario en las UF3-4-5 en 65 puntos de referencia (Nov – Dic 2017)



Fuente: Aecom – Concol, 2018

Figura 5-2.16. Valores de caudal de los puntos de agua encontrados durante el inventario en las UF3-4-5 en 65 puntos de referencia (Julio de 2018)



Fuente: Aecom – Concol, 2018

- Conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos en puntos de agua naturales

La conductividad eléctrica del agua subterránea (aquí expresada en $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C) depende de una serie de factores ligados esencialmente a la naturaleza litológica del acuífero. Además de esto, también la temperatura del agua, su profundidad y el tiempo de residencia en el acuífero afectan los valores de conductividad eléctrica. Éste último factor depende a su vez de la longitud del recorrido y de la velocidad de flujo.

La conductividad eléctrica provee información sobre la cantidad total de sales disueltas (mg/L), dado que su valor es directamente proporcional a la concentración total. Los dos factores son correlacionables con la siguiente relación linealⁱ.

$$\text{SDT} = \alpha \cdot \text{COND} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde α , que corresponde al coeficiente angular de la recta, puede variar dependiendo de las especies disueltas en el agua.

En la **Tabla 5-2.9**, **Figura 5-2.17** y **Figura 5-2.18** se reportan la distribución de la conductividad y STD en cada uno de los puntos de agua muestreados durante el inventario.

Tabla 5-2.9. Valores para la conductividad y los STD de todos los puntos censados en las UF3-4-5.

| ID Punto | Tipo Punto | CE | SDT | T | CE | SDT | T |
|----------|-------------|-----------------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------------|--------------------------|----------------------|
| | | ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | (mg/l) | ($^\circ\text{C}$) | ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | (mg/l) | ($^\circ\text{C}$) |
| | | abr-18 | abr-18 | abr-18 | jul-18/jul-19 | jul-18/jul-19 | jul-18/jul-19 |
| UF3-PA01 | Manantial | NA | NA | NA | 405 | 200 | 16,4 |
| UF3-PA02 | Resurgencia | NA | NA | NA | 182 | 91 | 16,6 |

| ID Punto | Tipo Punto | CE | SDT | T | CE | SDT | T |
|----------|-------------|---------|--------|--------|---------------|---------------|---------------|
| | | (µS/cm) | (mg/l) | °C | (µS/cm) | (mg/l) | °C |
| | | abr-18 | abr-18 | abr-18 | jul-18/jul-19 | jul-18/jul-19 | jul-18/jul-19 |
| UF3-PA03 | Resurgencia | NA | NA | NA | 171 | 85 | 19,6 |
| UF3-PA04 | Resurgencia | NA | NA | NA | 170 | 82 | 17,6 |
| UF3-PA06 | Manantial | NA | NA | NA | 30 | 15 | 19,8 |
| UF3-PA07 | Resurgencia | NA | NA | NA | 99 | 50 | 17,1 |
| UF3-PA08 | Manantial | NA | NA | NA | 100 | 50 | 18,2 |
| UF3-PA10 | Interflujo | NA | NA | NA | 464 | 231 | 17,4 |
| UF3-PA11 | Interflujo | NA | NA | NA | 410 | 205 | 17,8 |
| UF3-PA12 | Manantial | NA | NA | NA | 612 | 306 | 19,5 |
| UF3-PA13 | Manantial | NA | NA | NA | 687 | 343 | 19,8 |
| UF3-PA14 | Resurgencia | NA | NA | NA | 160 | 80 | 27 |
| UF3-PA15 | Interflujo | NA | NA | NA | 409 | 204 | 21,7 |
| UF3-PA16 | Interflujo | NA | NA | NA | 225 | 113 | 20,3 |
| UF3-PA17 | Interflujo | NA | NA | NA | 347 | 173 | 20,8 |
| UF3-PA18 | Interflujo | NA | NA | NA | 215 | 108 | 21 |
| UF3-PA19 | Resurgencia | NA | NA | NA | 170 | 85 | 19,8 |
| UF3-PA20 | Resurgencia | NA | NA | NA | 24 | 12 | 18,7 |
| UF3-PA21 | Resurgencia | NA | NA | NA | 350 | 181 | 21,5 |
| UF3-PA23 | Resurgencia | NA | NA | NA | 460 | 239 | 21,8 |
| UF3-PA25 | Resurgencia | NA | NA | NA | 371 | 185 | 19,8 |
| UF3-PA26 | Resurgencia | NA | NA | NA | 332 | 166 | 18,9 |
| UF3-PA27 | Interflujo | NA | NA | NA | 344 | 172 | 21,2 |
| UF3-PA28 | Resurgencia | NA | NA | NA | 227 | 114 | 20,9 |
| UF3-PA29 | Manantial | NA | NA | NA | 250 | 125 | 19 |
| UF3-PA30 | Interflujo | NA | NA | NA | 70 | 40 | 20,4 |
| UF3-PA31 | Interflujo | NA | NA | NA | 330 | 160 | 20,8 |
| UF3-PA32 | Interflujo | NA | NA | NA | 32 | 16 | 19,2 |
| UF3-PA33 | Resurgencia | NA | NA | NA | 277 | 138 | 21 |
| UF3-PA34 | Resurgencia | 350 | 220 | 20.2 | NA | NA | NA |
| UF3-PA35 | Interflujo | 330 | 160 | 22.3 | NA | NA | NA |
| UF3-PA36 | Interflujo | 210 | 90 | 20.4 | NA | NA | NA |
| UF3-PA37 | Interflujo | 120 | 70 | 20.1 | NA | NA | NA |
| UF3-PA38 | Interflujo | 95 | 68 | 19.8 | NA | NA | NA |
| UF3-PA39 | Antropico | NA | NA | NA | 234 | 121 | 24 |
| UF3-PA40 | Antropico | NA | NA | NA | 41 | 21 | 21.9 |
| UF3-PA41 | Antropico | 660 | 339 | 35.8 | NA | NA | NA |
| UF3-PA42 | Antropico | 410 | 221 | 22.5 | NA | NA | NA |
| UF3-PA43 | Interflujo | 265 | 125 | 23.9 | NA | NA | NA |

| ID Punto | Tipo Punto | CE | SDT | T | CE | SDT | T |
|-----------|-------------|---------|--------|--------|---------------|---------------|---------------|
| | | (µS/cm) | (mg/l) | °C | (µS/cm) | (mg/l) | °C |
| | | abr-18 | abr-18 | abr-18 | jul-18/jul-19 | jul-18/jul-19 | jul-18/jul-19 |
| UF3-PA44 | Interflujo | 198 | 100 | 26.2 | NA | NA | NA |
| UF3-PA45 | Interflujo | 780 | 395 | 22.4 | NA | NA | NA |
| UF3-PA46 | Interflujo | 521 | 300 | 21.3 | NA | NA | NA |
| UF3-PA47 | Interflujo | 371 | 185 | 19.4 | NA | NA | NA |
| UF3-PA48 | Interflujo | 300 | 180 | 19.2 | NA | NA | NA |
| UF3-PA49 | Antropico | 190 | 90 | 21.4 | NA | NA | NA |
| UF3-PA50 | Antropico | 182 | 82 | 20.7 | NA | NA | NA |
| UF3-PA51 | Interflujo | 355 | 154 | 19.1 | NA | NA | NA |
| UF3-PA52 | Resurgencia | 52 | 16 | 19.9 | NA | NA | NA |
| UF3-PA53 | Resurgencia | 117 | 66 | 19.1 | NA | NA | NA |
| UF3-PA54 | Resurgencia | 51 | 25 | 19.7 | NA | NA | NA |
| UF3-PA55 | Antropico | 32 | 16 | 19.2 | NA | NA | NA |
| UF3-PA56 | Antropico | 55 | 21 | 22.7 | NA | NA | NA |
| UF3-PA57 | Resurgencia | 258 | 1254 | 20.1 | NA | NA | NA |
| UF3-PA58 | Manantial | 258 | 1254 | 20.1 | NA | NA | NA |
| UF3-PA59 | Resurgencia | 320 | 140 | 17.2 | NA | NA | NA |
| UF3-PA60 | Manantial | 300 | 154 | 17.1 | NA | NA | NA |
| UF3-PA61 | Resurgencia | 420 | 210 | 24 | NA | NA | NA |
| UF3-PA62 | Resurgencia | 415 | 254 | 20.5 | NA | NA | NA |
| UF3-PA63 | Manantial | 358 | 298 | 21.3 | NA | NA | NA |
| UF3-PA64 | Manantial | 366 | 312 | 20.9 | NA | NA | NA |
| UF3-PA65 | Manantial | 254 | 222 | 19.5 | NA | NA | NA |
| UF3-PA66 | Resurgencia | 278 | 300 | 19.3 | NA | NA | NA |
| UF3-PA67 | Interflujo | 284 | 120 | 20.4 | NA | NA | NA |
| UF3-PA68 | Interflujo | 290 | 155 | 21 | NA | NA | NA |
| UF3-PA69 | Interflujo | 265 | 187 | 21.5 | NA | NA | NA |
| UF3-PA101 | Interflujo | 314 | 157 | 22 | NA | NA | NA |
| UF4-PA01 | Manantial | NA | NA | NA | 388 | 202 | 40,7 |
| UF4-PA02 | Manantial | NA | NA | NA | 782 | 407 | 52,3 |
| UF4-PA03 | Manantial | NA | NA | NA | 905 | 475 | 51,2 |
| UF4-PA06 | Manantial | NA | NA | NA | 579 | 301 | 40,2 |
| UF4-PA08 | Resurgencia | NA | NA | NA | 271 | 141 | 30,5 |
| UF4-PA09 | Interflujo | NA | NA | NA | 309 | 154 | 21,5 |
| UF4-PA10 | Interflujo | NA | NA | NA | 214 | 107 | 21,7 |
| UF4-PA11 | Interflujo | NA | NA | NA | 117 | 59 | 21,4 |
| UF4-PA12 | Interflujo | NA | NA | NA | 167 | 83 | 20,6 |
| UF4-PA13 | Resurgencia | NA | NA | NA | 13 | 6 | 22,1 |

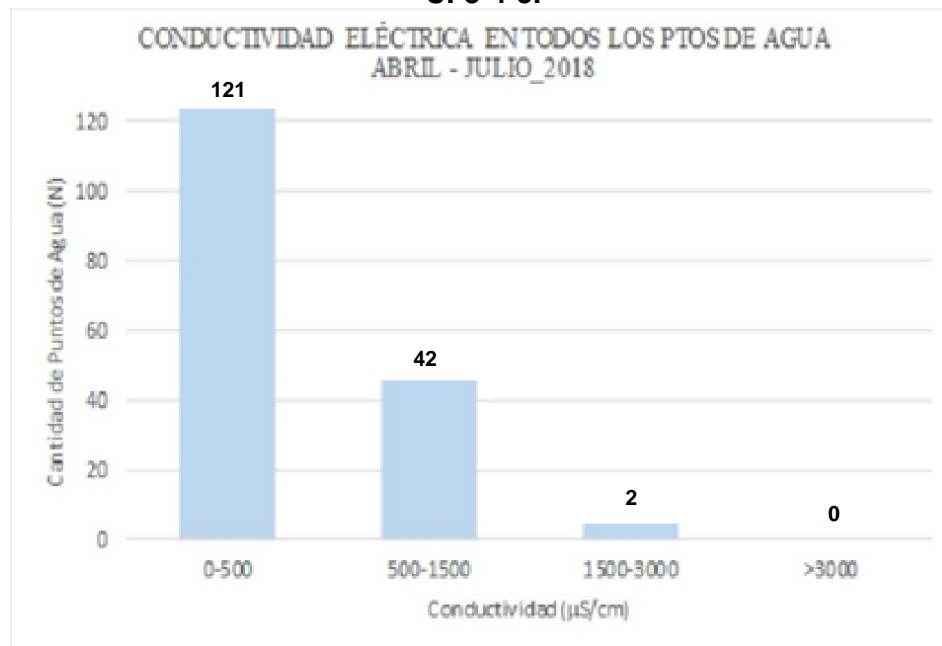
| ID Punto | Tipo Punto | CE | SDT | T | CE | SDT | T |
|----------|-------------|---------|--------|--------|---------------|---------------|---------------|
| | | (µS/cm) | (mg/l) | °C | (µS/cm) | (mg/l) | °C |
| | | abr-18 | abr-18 | abr-18 | jul-18/jul-19 | jul-18/jul-19 | jul-18/jul-19 |
| UF4-PA14 | Resurgencia | NA | NA | NA | 168 | 84 | 22,2 |
| UF4-PA15 | Interflujo | NA | NA | NA | 711 | 355 | 21,5 |
| UF4-PA16 | Resurgencia | NA | NA | NA | 213 | 106 | 22 |
| UF4-PA17 | Resurgencia | NA | NA | NA | 73 | 38 | 23,1 |
| UF4-PA18 | Resurgencia | NA | NA | NA | 65 | 32 | 23,3 |
| UF4-PA19 | Resurgencia | NA | NA | NA | 174 | 89 | 24,5 |
| UF4-PA20 | Resurgencia | NA | NA | NA | 70 | 36 | 22,9 |
| UF4-PA21 | Resurgencia | NA | NA | NA | 51 | 27 | 23,3 |
| UF4-PA22 | Resurgencia | NA | NA | NA | 39 | 20 | 24,5 |
| UF4-PA23 | Resurgencia | NA | NA | NA | 76 | 40 | 21,7 |
| UF4-PA24 | Interflujo | NA | NA | NA | 893 | 463 | 24,9 |
| UF4-PA25 | Resurgencia | NA | NA | NA | 62 | 32 | 23,6 |
| UF4-PA26 | Resurgencia | NA | NA | NA | 52 | 27 | 23,5 |
| UF4-PA27 | Resurgencia | NA | NA | NA | 67 | 35 | 23,6 |
| UF4-PA28 | Resurgencia | NA | NA | NA | 128 | 68 | 23,4 |
| UF4-PA29 | Resurgencia | NA | NA | NA | 637 | 332 | 21,9 |
| UF4-PA30 | Manantial | NA | NA | NA | 159 | 83 | 26,7 |
| UF4-PA31 | Resurgencia | NA | NA | NA | 889 | 462 | 24 |
| UF4-PA32 | Resurgencia | NA | NA | NA | 934 | 486 | 23,9 |
| UF4-PA33 | Resurgencia | NA | NA | NA | 510 | 255 | 21,8 |
| UF4-PA34 | Interflujo | NA | NA | NA | 48 | 25 | 24 |
| UF4-PA35 | Interflujo | NA | NA | NA | 260 | 138 | 20,6 |
| UF4-PA39 | Manantial | NA | NA | NA | 216 | 112 | 22,4 |
| UF4-PA40 | Manantial | NA | NA | NA | 559 | 291 | 21,1 |
| UF4-PA41 | Manantial | NA | NA | NA | 552 | 288 | 35,7 |
| UF4-PA42 | Interflujo | NA | NA | NA | 21 | 11 | 21,8 |
| UF4-PA43 | Interflujo | NA | NA | NA | 364 | 190 | 23 |
| UF4-PA44 | Interflujo | NA | NA | NA | 234 | 121 | 24 |
| UF4-PA45 | Interflujo | NA | NA | NA | 41 | 21 | 21,9 |
| UF4-PA46 | Resurgencia | 274 | 120 | 20.9 | NA | NA | NA |
| UF4-PA47 | Resurgencia | 45 | 20 | 24.1 | NA | NA | NA |
| UF4-PA48 | Antropico | 174 | 89 | 24.5 | NA | NA | NA |
| UF4-PA49 | Manantial | 650 | 280 | 21.8 | NA | NA | NA |
| UF4-PA50 | Interflujo | 852 | 620 | 24.4 | NA | NA | NA |
| UF4-PA51 | Manantial | 980 | 440 | 23.5 | NA | NA | NA |
| UF4-PA52 | Manantial | 990 | 470 | 25 | NA | NA | NA |
| UF4-PA53 | Resurgencia | 1010 | 442 | 24.5 | NA | NA | NA |

| ID Punto | Tipo Punto | CE | SDT | T | CE | SDT | T |
|----------|-------------|---------|--------|--------|---------------|---------------|---------------|
| | | (μS/cm) | (mg/l) | °C | (μS/cm) | (mg/l) | °C |
| | | abr-18 | abr-18 | abr-18 | jul-18/jul-19 | jul-18/jul-19 | jul-18/jul-19 |
| UF4-PA54 | Resurgencia | 890 | 652 | 23.9 | NA | NA | NA |
| UF4-PA55 | Interflujo | 1020 | 510 | 23.9 | NA | NA | NA |
| UF4-PA56 | Resurgencia | 1020 | 510 | 23.9 | NA | NA | NA |
| UF4-PA57 | Resurgencia | 452 | 200 | 27.1 | NA | NA | NA |
| UF4-PA58 | Manantial | 330 | 190 | 36 | NA | NA | NA |
| UF4-PA59 | Interflujo | 850 | 338 | 24.1 | NA | NA | NA |
| UF4-PA60 | Resurgencia | 780 | 350 | 24 | NA | NA | NA |
| UF4-PA61 | Resurgencia | 90 | 70 | 22.4 | NA | NA | NA |
| UF4-PA62 | Interflujo | 56 | 20 | 23.8 | NA | NA | NA |
| UF4-PA63 | Interflujo | 85 | 50 | 23.1 | NA | NA | NA |
| UF4-PA64 | Resurgencia | 50 | 55 | 23.2 | NA | NA | NA |
| UF4-PA65 | Interflujo | 67 | 30 | 24.8 | NA | NA | NA |
| UF4-PA66 | Resurgencia | 54 | 41 | 23.8 | NA | NA | NA |
| UF4-PA67 | Manantial | 76 | 50 | 24 | NA | NA | NA |
| UF4-PA68 | Antropico | 219 | 122 | 24.2 | NA | NA | NA |
| UF4-PA69 | Resurgencia | 298 | 77 | 22.4 | NA | NA | NA |
| UF4-PA70 | Resurgencia | 35 | 40 | 22.7 | NA | NA | NA |
| UF4-PA71 | Manantial | 630 | 350 | 37.8 | NA | NA | NA |
| UF4-PA72 | Manantial | 520 | 410 | 38.1 | NA | NA | NA |
| UF4-PA73 | Manantial | 210 | 332 | 24.8 | NA | NA | NA |
| UF4-PA74 | Manantial | 557 | 390 | 37.8 | NA | NA | NA |
| UF4-PA75 | Resurgencia | 140 | 95 | 22.8 | NA | NA | NA |
| UF4-PA76 | Resurgencia | 442 | 180 | 22.4 | NA | NA | NA |
| UF4-PA77 | Resurgencia | 385 | 200 | 22 | NA | NA | NA |
| UF4-PA78 | Resurgencia | 570 | 295 | 23.5 | NA | NA | NA |
| UF4-PA79 | Manantial | 300 | 100 | 20.5 | NA | NA | NA |
| UF4-PA80 | Interflujo | 60 | 15 | 24.1 | NA | NA | NA |
| UF4-PA81 | Interflujo | 55 | 20 | 24 | NA | NA | NA |
| UF4-PA82 | Resurgencia | 300 | 100 | 20.5 | NA | NA | NA |
| UF4-PA83 | Resurgencia | 310 | 150 | 21.9 | NA | NA | NA |
| UF4-PA84 | Resurgencia | 251 | 412 | 23.6 | NA | NA | NA |
| UF4-PA85 | Resurgencia | 260 | 125 | 22.7 | NA | NA | NA |
| UF4-PA86 | Aljibe | 724 | 290 | 23.1 | NA | NA | NA |
| UF4-PA87 | Resurgencia | NA | NA | NA | 178 | 88 | 25,3 |
| UF4-PA88 | Resurgencia | NA | NA | NA | 231 | 116 | 24,1 |
| UF4-PA89 | Manantial | NA | NA | NA | 278 | 132 | 23,3 |
| UF4-PA90 | Manantial | NA | NA | NA | 375 | 187 | 21,9 |

| ID Punto | Tipo Punto | CE | SDT | T | CE | SDT | T |
|-----------|-------------|---------|--------|--------|---------------|---------------|---------------|
| | | (µS/cm) | (mg/l) | °C | (µS/cm) | (mg/l) | °C |
| | | abr-18 | abr-18 | abr-18 | jul-18/jul-19 | jul-18/jul-19 | jul-18/jul-19 |
| UF4-PA91 | Manantial | NA | NA | NA | 695 | 345 | 27 |
| UF4-PA92 | Manantial | NA | NA | NA | 805 | 402 | 25,3 |
| UF4-PA93 | Manantial | NA | NA | NA | 998 | 499 | 24,1 |
| UF4-PA94 | Manantial | NA | NA | NA | 782 | 384 | 25,5 |
| UF4-PA95 | Manantial | NA | NA | NA | 82 | 41 | 24,5 |
| UF4-PA96 | Manantial | NA | NA | NA | 1330 | 665 | 32,1 |
| UF4-PA97 | Manantial | NA | NA | NA | 937 | 540 | 29,8 |
| UF4-PA98 | Manantial | NA | NA | NA | 1078 | 617 | 31,4 |
| UF4-PA101 | Manantial | 84 | 55 | 22.6 | NA | NA | NA |
| UF5-PA01 | Resurgencia | NA | NA | NA | 1716 | 895 | 26 |
| UF5-PA02 | Interflujo | NA | NA | NA | 1144 | 595 | 22,6 |
| UF5-PA03 | Antropico | 1716 | 895 | 26 | NA | NA | NA |
| UF5-PA04 | Interflujo | 1010 | 780 | 23.8 | NA | NA | NA |
| UF5-PA05 | Resurgencia | 1215 | 740 | 23.5 | NA | NA | NA |
| UF5-PA06 | Interflujo | 1020 | 555 | 23.4 | NA | NA | NA |

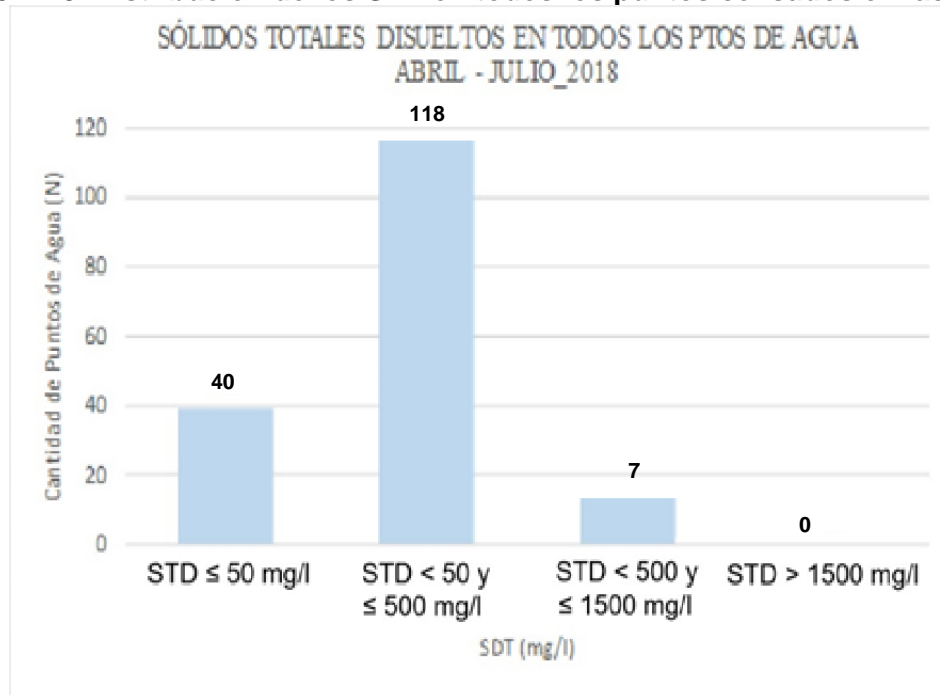
Fuente: Aecom – Concol, 2018

Figura 5-2.17. Distribución de la conductividad en todos los puntos censados en las UF3-4-5.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

Figura 5-2.18. Distribución de los STD en todos los puntos censados en las UF3-4-5.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

De todos los 165 puntos de agua reportados en la **Figura 5-2.17** y **Figura 5-2.18** se destaca lo siguiente:

- 121 puntos de agua que representan el 73.33% del total de puntos muestreados, presentan valores de conductividad comprendidos entre 0 y 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que corresponde a una mineralización total inferior a 250 mg/L.
- 42 puntos de agua que representan el 25.45% del total de puntos muestreados, presentan valores de conductividad comprendidos entre 500 y 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que corresponden a una mineralización total comprendida entre 250 mg/L y 595 mg/L.
- 2 puntos de agua restantes que representan el 1.21% del total de puntos muestreados, presentan un valor de conductividad superior a 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que corresponden a una mineralización alrededor de 895 mg/L.

Existen diferentes clasificaciones del agua en función de su mineralización total. Una de estas, aplicada al agua potable y mineral en Europa, identifica cuatro categorías:

- | | |
|---------------------------|--------------------------------|
| • STD ≤ 50 mg/l | Agua poco mineralizada |
| • STD < 50 y ≤ 500 mg/l | Ligeramente mineralizada |
| • STD < 500 y ≤ 1500 mg/l | Agua medianamente mineralizada |
| • STD > 1500 mg/l | Agua rica en sales minerales |

Bajo esta clasificación, el agua muestreada en los 165 puntos de agua naturales censados se ubica en los siguientes rangos (ver **Figura 5-2.18**):

- 40 puntos de agua que representan el 24.24% del total de puntos muestreados, presentan valores de STD comprendidos entre 0 y 50 mg/l.
- 118 puntos de agua que representan el 71.52% del total de puntos muestreados, presentan valores de STD comprendidos entre 50 y 500 mg/l
- Los 7 puntos de agua restantes que representan el 4.24% del total de puntos muestreados, presentan valores de STD comprendidos entre 500 mg/l y 895 mg/l.

Lo anterior indica que el 97.4% del agua muestreada durante el inventario corresponde a agua poco a ligeramente mineralizada, mientras que el 2.6% restante corresponde a agua medianamente mineralizada. Esta baja conductividad y mineralización en la gran mayoría de puntos inventariados es un indicativo adicional de la estrecha correlación entre los puntos de agua con la recarga directa del agua de lluvia, evidenciando flujos en su mayoría subsuperficiales de trayectorias cortas.

Existen 20 puntos de agua (UF3-PA12, UF3-PA13, UF4-PA02, UF4-PA03, UF4-PA04, UF4-PA72, UF4-PA06, UF4-PA07, UF4-PA15, UF4-PA24, UF4-PA29, UF4-PA31, UF4-PA32, UF4-PA33, UF4-PA38, UF4-PA40, UF4-PA41, UF4-PA96, UF4-PA97, UF4-PA98) cuyos valores de conductividad se ubican por encima de 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual puede indicar mayor tiempo de circulación, probablemente influenciados localmente por circuitos un poco más profundos o que son alimentados por sectores más amplios que permiten una mayor circulación en los depósitos cuaternarios, generando un enriquecimiento de aniones/cationes a través de rocas más solubles como p.e. calizas meteorizadas, sin descartar la contribución de insumos utilizados en la agroindustria frecuente en la región. En este caso en particular se puede estar ante la presencia de flujos mixtos donde la mayor parte de alimentación del punto se atribuye a flujos subsuperficiales.

5.1.8.7 Caracterización Hidrogeoquímica del agua muestreada

La red de muestreo hidrogeoquímico, de carácter esencialmente hidrogeológico, tiene como objeto caracterizar químicamente el agua presente en los puntos de agua censados en la zona de influencia de las UF3-4-5, de acuerdo con los parámetros relacionados en la Tabla 5 de la resolución 751 de marzo del 2015. Esta actividad representa un dato útil para la definición del modelo hidrogeológico conceptual.

De los puntos de agua naturales censados durante el inventario entre los meses de noviembre_diciembre del 2017, fueron seleccionados 21 puntos (**Figura 5-2.19**), que desde la perspectiva hidrogeológica satisfacen los requerimientos hechos de acuerdo con los criterios enumerados en el subcapítulo siguiente.

El protocolo de muestreo y análisis satisface lo establecido por el IDEAM para este tipo de agua, como explícitamente ha sido requerido en los Términos de Referencia. Los análisis fueron llevados a cabo por el laboratorio CIMA (Corporación Integral del Medio Ambiente).

5.1.8.7.1 Criterios para la selección de los puntos de agua para muestreo y análisis de laboratorio.

Entre los puntos de agua identificados durante el inventario fueron muestreados veintiún puntos (21), que se consideran representativos para la definición de una red de muestreo y monitoreo hidroquímico de particular interés hidrogeológico para las UF3-4-5.

Los criterios utilizados para la selección de los puntos antes citados son de naturaleza hidrogeológica y se relacionan a continuación:

- Puntos de agua localizados en correspondencia con los litotipos más representativos de la zona. Los cuales han sido relacionados en el numeral 5.1.8.6.1 del presente informe.
- Puntos de agua más mineralizados y/o caracterizados por caudales mayores.
- Puntos de agua distribuidos especialmente a lo largo del trazado vial proyectado.
- Puntos de agua mayormente utilizados por la comunidad.

5.1.8.7.2 Puntos de agua seleccionados

Aplicando los criterios antes indicados fueron seleccionados 21 puntos de agua, los cuales se resumen en la **Tabla 5-2.10** y **Figura 5-2.19**.

5.1.8.7.3 Parámetros analizados

En atención a la resolución 751 de marzo de 2015 y con especial énfasis en aquellos datos de interés hidrogeológico se relacionan a continuación los parámetros que fueron muestreados en cada uno de los 21 puntos seleccionados (**Tabla 5-2.12**).


| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA |
| Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta | |

Tabla 5-2.10. Puntos de agua seleccionados para muestreo y análisis hidrogeoquímico en las UF3-4-5.

| CÓDIGO | TIPO DE PUNTO | Fecha | Ubicación | Geología | Caudal (l/s) | PH | CE (µs/cm) | Temp. (°C) | SDT (mg/l) | Redox-Eh/ | T°C Redox |
|----------|---------------|----------|-----------|--|--------------|------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| UF3-PA02 | Resurgencia | Nov_2017 | Vía | Depósito coluvial sobre Formación los Cuervos | 0,007 | 4,46 | 170 | 18,2 | 80 | 289 | 18,4 |
| UF3-PA03 | Resurgencia | Nov_2017 | Túnel | Formación Los Cuervos | 0,249 | 5,7 | 150 | 18,4 | 70 | 237 | 18,7 |
| UF3-PA06 | Manantial | Nov_2017 | Túnel | Formación Los Cuervos | 0,027 | 6,46 | 40 | 20,4 | 20 | 144 | 20,2 |
| UF3-PA12 | Manantial | Nov_2017 | Vía | Formación Capacho | 0,078 | 7,78 | 330 | 19,3 | 170 | 320 | 19 |
| UF3-PA13 | Manantial | Nov_2017 | Vía | Formación Capacho | 0,732 | 7,52 | 780 | 21,3 | 390 | 165 | 21,9 |
| UF3-PA15 | Interflujo | Nov_2017 | Vía | Deposito Coluvial | 0,086 | 7,52 | 420 | 21,8 | 210 | 324 | 23,2 |
| UF3-PA18 | Interflujo | Nov_2017 | Vía | Formación Capacho | 0,024 | 6,61 | 210 | 22,1 | 100 | 360 | 22 |
| UF3-PA23 | Resurgencia | Nov_2017 | Vía | Formación Aguardiente | 1,718 | 7,13 | 418 | 22 | 240 | 134 | 21,8 |
| UF3-PA54 | Resurgencia | Nov_2017 | Túnel | Formación Los Cuervos | 0,177 | 6,73 | 150 | 18 | 70 | 91 | 18,3 |
| UF4-PA01 | Manantial | Nov_2017 | Vía | Formación Aguardiente (fracturada) | 0,640 | 6,82 | 380 | 39,8 | 190 | 12 | 36,9 |
| UF4-PA02 | Manantial | Nov_2017 | Vía | Formación Aguardiente (fracturada) | 1,015 | 7,33 | 860 | 39,1 | 380 | -299 | 44,5 |
| UF4-PA06 | Manantial | Nov_2017 | Vía | Formación Capacho suprayacida por Depósito Coluvial | 0,138 | 6,76 | 660 | 37,3 | 330 | -137 | 40 |
| UF4-PA12 | Interflujo | Nov_2017 | Vía | Depósito Coluvial sobre Formación Capacho | 0,405 | 6,79 | 220 | 21,6 | 110 | 119 | 21,7 |
| UF4-PA14 | Resurgencia | Dic_2017 | Vía | Depósitos Aluviales sobre Formación Aguardiente | 0,174 | 6,78 | 210 | 26,1 | 110 | -59 | 25,8 |
| UF4-PA17 | Resurgencia | Dic_2017 | Vía | Terraza aluvial, nivel 1 sobre Formación Aguardiente | 0,232 | 6,87 | 80 | 24,2 | 40 | 443 | 24,2 |
| UF4-PA21 | Resurgencia | Dic_2017 | Vía | Depósito Coluvial sobre Formación Aguardiente | 0,920 | 5,58 | 70 | 24,6 | 40 | 187 | 24,5 |
| UF4-PA23 | Resurgencia | Dic_2017 | Vía | Granito de Durania | 0,003 | 6,87 | 100 | 22,8 | 50 | 302 | 22,8 |
| UF4-PA24 | Interflujo | Dic_2017 | Vía | Terraza aluvial, nivel 1, sobre Formación Capacho | 0,094 | 7,28 | 1020 | 25,1 | 510 | 122 | 25,4 |
| UF4-PA28 | Resurgencia | Dic_2017 | Vía | Formación Capacho suprayacida por Depósito Coluvial | 1,161 | 6,68 | 130 | 23,8 | 70 | 290 | 23,9 |
| UF4-PA30 | Manantial | Dic_2017 | Vía | Formación Aguardiente | 0,077 | 6,37 | 180 | 32,6 | 90 | 144 | 32,6 |
| UF4-PA72 | Manantial | Nov_2017 | Vía | Formación Capacho | 0,289 | 6,78 | 660 | 35,3 | 330 | 10 | 41,7 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

Con el objetivo de guardar coherencia en la identificación del punto de muestreo se incluye la siguiente lista de equivalencias entre el código de laboratorio y los distintos nombres genéricos dados a los puntos de agua muestreados:

Tabla 5-2.11. Equivalencia de códigos de muestreo y códigos para puntos de agua.

| Código Laboratorio | ID Punto Hidrogeológico | Tipo de Punto | Código Muestra |
|--------------------|-------------------------|---------------|----------------|
| 28476 | UF3-PA02 | Resurgencia | UF3- MA02 |
| 28477 | UF3-PA03 | Resurgencia | UF3- MA04 |
| 28916 | UF3-PA06 | Manantial | UF3 -MA06 |
| 28698 | UF3-PA12 | Manantial | UF3-MA11 |
| 28700 | UF3-PA13 | Manantial | UF3-MA13 |
| 28682 | UF3-PA15 | Interflujo | UF3-MA15 |
| 28475 | UF3-PA18 | Interflujo | UF3- MA18 |
| 28683 | UF3-PA23 | Resurgencia | UF3-MA23 |
| 28699 | UF3-PA54 | Resurgencia | UF3- MA05 |
| 29133 | UF4-PA01 | Manantial | UF4- MA01 |
| 29206 | UF4-PA02 | Manantial | UF4 - MA02 |
| 29209 | UF4-PA06 | Manantial | UF4- MA06 |
| 28474 | UF4-PA12 | Interflujo | UF4-MA12 |
| 28943 | UF4-PA14 | Resurgencia | UF4- MA14 |
| 28972 | UF4-PA17 | Resurgencia | UF4-MA17 |
| 28973 | UF4-PA21 | Resurgencia | UF4-MA21 |
| 29134 | UF4-PA23 | Resurgencia | UF4- MA23 |
| 29132 | UF4-PA24 | Interflujo | UF 4-MA 24 |
| 29135 | UF4-PA28 | Resurgencia | UF4- MA28 |
| 29207 | UF4-PA30 | Manantial | UF4-MA30 |
| 29208 | UF4-PA72 | Manantial | UF4 - MA05 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

Tabla 5-2.12. Parámetros hidrogeoquímicos medidos en los puntos de agua seleccionados en el área de influencia de las UF3-4-5, de acuerdo con la resolución 751 de marzo del 2015 (1).

| Parámetro | Método | Límite cuantificación | Unidades | UF3-PA06 | UF3-PA54 | UF3-PA13 | UF3-PA12 | UF3-PA15 | UF3-PA23 | UF3-PA02 | UF3-PA03 | UF3-PA18 | UF4-PA12 | UF4-PA72 |
|------------------------------------|---|--------------------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | | | 28916 | 28699 | 28700 | 28698 | 28682 | 28683 | 28476 | 28477 | 28475 | 28474 | 29208 |
| Fecha | NA | NA | NA | 14/01/2018 | 13/01/2018 | 13/01/2018 | 12/01/2018 | 11/01/2018 | 11/01/2018 | 10/01/2018 | 10/01/2018 | 09/01/2018 | 09/01/2018 | 19/01/2018 |
| Hora | NA | NA | NA | 15:36 | 13:23 | 15:55 | 15:50 | 13:40 | 16:23 | 12:18 | 14:00 | 15:32 | 12:27 | 15:26 |
| T° Ambiente | In Situ | Por defecto | ° C | 16,5 | 21,9 | 21 | 21,8 | 23,8 | 21 | 25,9 | 24,4 | 22,5 | 21,2 | 22,3 |
| T° Muestra | In Situ | Por defecto | ° C | 16,27 | 17,21 | 19,56 | 20,76 | 21,06 | 20,26 | 18,09 | 18,84 | 20,83 | 20,52 | 31,73 |
| pH | In Situ | Por defecto | Unidades | 6,89 | 7,04 | 7,41 | 6,91 | 6,49 | 7,94 | 5,44 | 5,23 | 6,57 | 6,63 | 6,47 |
| Conductividad | In Situ | Por defecto | µs/cm | 65 | 84 | 526 | 619 | 369 | 324 | 291 | 147 | 200 | 157 | 791 |
| Sólidos disueltos totales | In Situ | Por defecto | mg/L | 33 | 42 | 263 | 310 | 184 | 162 | 145 | 74 | 100 | 79 | 395 |
| Sólidos sedimentables | In Situ | Por defecto | mL/L | 0,5 | <0.1 | 1,1 | 0,2 | 0,1 | <0.1 | 5,5 | 0,5 | <0.1 | <0.1 | <0.1 |
| Oxígeno disuelto | In Situ | Por defecto | mg/L | 5,89 | 6,03 | 2,03 | 5,14 | 4,69 | 6,31 | 1,14 | 1,24 | 6,79 | 6,32 | 1,94 |
| Acidez | SM 2310 B | 5 | mg CaCO3/L | <5 | 12 | 28 | 39 | 33 | 24 | 25 | 15 | 16 | 7 | 45 |
| Alcalinidad Total | SM 2320 B | 4 | mg/L CaCO3 | 111 | 25 | 27 | 113 | 69 | 65 | 8 | <4 | 32 | 23 | 275 |
| Aluminio Total | SM 3030 E 3111 D | 0,3 | mg Al/L | 0,6 | 0,4 | 0,8 | <0,3 | <0,3 | <0,3 | 0,3 | <0,3 | <0,3 | 0,3 | <0,3 |
| Arsénico Total | SM 3030 K - EPA 200-9 - ICP/MS | 0,0045 | mg Metal/L | <0,0045 | <0,0045 | <0,0045 | <0,0045 | <0,0045 | <0,0045 | <0,0045 | <0,0045 | <0,0045 | <0,0045 | <0,0045 |
| Bario Total | SM 3030 E 3111 D | 0,1 | mg Ba/L | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 |
| Bicarbonatos | SM 2320 B | 10 | mg CaCO3/L | 111 | 25 | 27 | 113 | 69 | 65 | <10 | <10 | 32 | 23 | 261 |
| Cadmio Total | SM 3030 E, 3111 B | 0,005 | mg Cd/L | <0,005 | <0,005 | 0,006 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Calcio Total | SM 3030 E, 3111 B | 0,1 | mg Ca/L | 26,3 | 20,1 | 87,0 | 111,3 | 61,6 | 48,2 | 10,7 | 1,2 | 34,4 | 26,7 | 87,8 |
| Cloruros | SM 4500 - CL C | 5 | mg Cl-/L | <5 | <5 | 38 | <5 | 5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | 22 |
| Cobre total | SM 3030 E, 3111 B | 0,015 | mg Cu/L | <0,015 | <0,015 | <0,015 | 0,015 | <0,015 | <0,015 | <0,015 | <0,015 | <0,015 | <0,015 | <0,015 |
| Coliformes fecales termotolerantes | SM 9223 B Modificado | <1 | NMP/100mL | 236 | 126 | 480 | 19 | 260 | 328 | 37 | 3 | 144 | 178 | 1986 |
| Coliformes totales | SM 9223 B | <1 | NMP/100mL | 29870 | 12997 | 120330 | 141360 | 19863 | 17329 | 24196 | 332 | 14136 | 14136 | 5172 |
| Color Verdadero | SM 2120 C | 4,97 | UPC | 11.17 | 22.2 | 6.58 | <4,970 | <4,970 | <4,970 | 36.18 | <4,970 | <4,970 | <4,970 | <4,970 |
| Cromo total | SM 3030 E, 3111 B | 0,05 | mg Cr/L | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| DBO5 | SM 5210 B. ASTM D-888-12 Método C | 10 | mgO2/L | <10 | <10 | <10 | <10 | <10 | <10 | <10 | <10 | <10 | <10 | <10 |
| DQO | SM 5220 C | 10 | mgO2/L | 26 | 67 | 46 | 70 | 65 | 49 | 85 | 59 | 50 | 46 | 11 |
| Dureza Calcica | SM 3500-Ca B | 5 | mg CaCO3/L | 87 | 67 | 277 | 296 | 169 | 14 | 64 | 27 | 55 | 44 | 233 |
| Dureza Total | SM 2340 C | 5 | mg CaCO3/L | 152 | 68 | 1028 | 1180 | 651 | 56 | 309 | 60 | 85 | 72 | 501 |
| Fenoles Totales | S.M. 5530 B-S.M. 5530 D | 0,002 | mg/L | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 |
| Fluoruros | EPA 300.0 | 0,05 | mg F/L | 0,06 | <0,05 | 0,15 | 0,11 | 0,07 | <0,05 | 0,16 | 0,08 | <0,05 | <0,05 | 0,50 |
| Fósforo Total | S.M 4500- P B,E | 0,02 | mg P/L | 0,04 | 0,06 | 0,11 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,06 | 0,06 | 0,16 |
| Grasas y aceites | NTC 3362: 2011-12-09, Numeral 4, Método C | 0,5 | mg/L | <0,5 | <0,5 | <0,5 | 2,6 | <0,5 | 1,9 | 0,62 | 0,7 | 1,6 | 1,2 | 2,2 |
| Hierro Total | SM 3030 E, 3111 B | 0,05 | mg Fe/L | 1,59 | 0,94 | 1,51 | 0,18 | 0,30 | 0,19 | 9,08 | 3,77 | 0,17 | 0,65 | 0,24 |
| Magnesio Total | SM 3030 E, 3111 B | 0,3 | mg Mg/L | 10,7 | 5,3 | 4,2 | 4,6 | 5,2 | 4,5 | 9,8 | 6,6 | 2,7 | 3,9 | 15,1 |
| Manganeso Total | SM 3030 E, 3111 B | 0,03 | mg Mn/L | 0,24 | 0,14 | 0,11 | <0,03 | <0,03 | <0,03 | 0,47 | 0,36 | <0,03 | 0,05 | 0,12 |
| Mercurio Total | SM 3030 K - EPA 200.8 - ICP/MS | 0,0006 | mg Metal/L | <0,0006 | <0,0006 | <0,0006 | <0,0006 | <0,0006 | <0,0006 | <0,0006 | 0,0007 | 0,0008 | <0,0006 | <0,0006 |
| Molibdeno Total | SM 3030 E 3111 D | 0,2 | mg Mo/L | <0,2 | <0,2 | <0,2 | <0,2 | <0,2 | <0,2 | <0,2 | <0,2 | <0,2 | <0,2 | <0,2 |
| Nitratos | J. Rodier, 9 na Edición, 2011 | 0,3 | mg NO2^- -N/L | <0,3 | <0,3 | <0,3 | <0,3 | <0,3 | <0,3 | <0,3 | 14,6 | 0,7 | <0,3 | <0,3 |
| Nitritos | SM 4500 NO2- B | 0,003 | mg NO3^- -N/L | <0,003 | <0,003 | <0,003 | <0,003 | <0,003 | 0,004 | 0,007 | <0,003 | <0,003 | <0,003 | <0,003 |
| Nitrógeno total Kjeldhal | SM 4500-Norg C-4500NH3 B,C | 2 | mg N/L | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 | 3 | <2 | <2 | <2 | <2 |
| Níquel Total | SM 3030 E, 3111 B | 0,05 | mg Ni/L | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| Ortofosfatos | SM 4500-P E | 0,06 | mg/L | <0,05 | <0,05 | 0,09 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| Plata Total | SM 3030 E, 3111 B | 0,05 | mg Ag/L | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| Plomo Total | SM 3030 E. 3111 B | 0,05 | mg Pb/L | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| Potasio Total | SM 3030 E 3500 K B | 0,1 | mg K/L | 1,3 | 1,3 | 0,9 | 0,8 | 1,4 | 0,9 | 1,1 | 1,6 | 2,4 | 0,5 | 9,9 |
| Selenio Total | SM 3030 K - EPA 200.8 - ICP/MS | 0,0055 | mg Metal/L | <0,0055 | <0,0055 | <0,0055 | <0,0055 | <0,0055 | <0,0055 | <0,0055 | <0,0055 | <0,0055 | <0,0055 | <0,0055 |
| Silicio Total | SM 4500-SIO2 D AZUL DE HEROPOLI | 0,175 | mg/L | 4,83 | 4,62 | 5,24 | 7,34 | 6,17 | 5,01 | 5,61 | 4,82 | 4,39 | 4,42 | 5,77 |
| Sodio Total | SM 3030 E, 3500-Na B | 0,2 | mg Na/L | 6,5 | 5,5 | 7,6 | 7,8 | 7,2 | 4,4 | 4,6 | 3,6 | 4,4 | 1,8 | 53,8 |
| Sulfatos | SM 4500 SO4 - E | 2 | mg SO4^2-/L | 75 | 22 | 36 | 54 | 19 | 21 | 105 | 23 | 22 | 22 | 120 |
| Sólidos Suspendidos Totales | SM 2540 D | 5 | mg/L | 29 | 29 | 20 | 9 | 10 | 69 | 47 | 5 | 11 | 17 | <5 |
| Turbiedad | SM 2130 B | 0,3 | NTU | 31,2 | 25,4 | 11,3 | 1,9 | 6,6 | 5,9 | 113,0 | 25,1 | 5,0 | 15,1 | 2,1 |
| Zinc Total | SM 3030 E, 3111 B | 0,01 | mg Zn/L | <0,01 | <0,01 | 0,06 | <0,01 | 0,02 | <0,01 | 0,14 | 0,26 | <0,01 | <0,01 | <0,02 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

Tabla 5-2.13. Parámetros hidrogeoquímicos medidos en los puntos de agua seleccionados en el área de influencia de las UF3-4-5, de acuerdo con la resolución 751 de marzo del 2015 (2).

| Parámetro | Método | Límite cuantificación | Unidades | UF4-PA06 | UF4-PA02 | UF4-PA30 | UF4-PA23 | UF4-PA28 | UF4-PA24 | UF4-PA01 | UF4-PA17 | UF4-PA21 | UF4-PA14 |
|------------------------------------|---|--------------------------|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | | | | 29209 | 29206 | 29207 | 29134 | 29135 | 29132 | 29133 | 28972 | 28973 | 28943 |
| Fecha | NA | NA | NA | 19/01/2018 | 20/01/2018 | 20/01/2018 | 17/01/2018 | 17/01/2018 | 18/01/2018 | 18/01/2018 | 16/01/2018 | 16/01/2018 | 15/01/2018 |
| Hora | NA | NA | NA | 17:05 | 14:34 | 17:08 | 13:53 | 16:19 | 13:19 | 15:26 | 13:08 | 15:37 | 15:16 |
| T° Ambiente | In Situ | Por defecto | ° C | 23,4 | 25,5 | 25,3 | 22,4 | 23,5 | 24,5 | 22,9 | 26,4 | 25,9 | 23,6 |
| T° Muestra | In Situ | Por defecto | ° C | 71,81 | 55 | 32,92 | 21,02 | 23,17 | 25,12 | 44,5 | 22,88 | 21,99 | 22,51 |
| pH | In Situ | Por defecto | Unidades | 7,27 | 6,68 | 4,94 | 6,67 | 5,63 | 6,66 | 6,82 | 5,28 | 5,01 | 6,75 |
| Conductividad | In Situ | Por defecto | µs/cm | 650 | 807 | 151 | 72 | 104 | 900 | 346 | 71 | 13 | 284 |
| Sólidos disueltos totales | In Situ | Por defecto | mg/L | 325 | 404 | 70 | 36 | 52 | 450 | 173 | 36 | 7 | 142 |
| Sólidos sedimentables | In Situ | Por defecto | mL/L | <0.1 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,4 | 0,2 | 0,1 | <0.1 | 0,6 | 0,3 |
| Oxígeno disuelto | In Situ | Por defecto | mg/L | 3,4 | 0,00 | 0,17 | 1,06 | 4,46 | 1,16 | 1,6 | 3,56 | 4,77 | 1,41 |
| Acidez | SM 2310 B | 5 | mg CaCO3/L | 30 | 25 | 6 | 6 | 5 | 68 | 20 | 10 | 14 | 38 |
| Alcalinidad Total | SM 2320 B | 4 | mg/L CaCO3 | 265 | 129 | 32 | 46 | 12 | 383 | 119 | 22 | 8 | 90 |
| Aluminio Total | SM 3030 E, 3111 D | 0,3 | mg Al/L | <0,3 | <0,3 | <0,3 | <0,3 | <0,3 | <0,3 | <0,3 | <0,3 | <0,3 | <0,3 |
| Arsénico Total | SM 3030 K - EPA 200-9 - ICP/MS | 0,0045 | mg Metal/L | <0,0045 | <0,0045 | <0,0045 | <0,0045 | <0,0045 | <0,0045 | <0,0045 | <0,0045 | <0,0045 | <0,0045 |
| Bario Total | SM 3030 E, 3111 D | 0,1 | mg Ba/L | <0,1 | 0,2 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 |
| Bicarbonatos | SM 2320 B | 10 | mg CaCO3/L | 247 | 113 | 32 | 46 | 12 | 383 | 119 | 22 | <10 | 90 |
| Cadmio Total | SM 3030 E, 3111 B | 0,005 | mg Cd/L | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 | <0,005 |
| Calcio Total | SM 3030 E, 3111 B | 0,1 | mg Ca/L | 52,5 | 29,3 | 8,2 | 15,9 | 6,5 | 121,1 | 16,9 | 7,2 | 1,5 | 27,9 |
| Cloruros | SM 4500 - CL C | 5 | mg Cl-/L | 31 | 21 | 9 | <5 | <5 | 55 | 26 | <5 | <5 | 8 |
| Cobre total | SM 3030 E, 3111 B | 0,015 | mg Cu/L | <0,015 | <0,015 | <0,015 | <0,015 | <0,015 | <0,015 | <0,015 | <0,015 | <0,015 | <0,015 |
| Coliformes fecales termotolerantes | SM 9223 B Modificado | <1 | NMP/100mL | 1553 | 381 | 34 | 1 | 517 | 649 | 3 | 31 | 17 | 7270 |
| Coliformes totales | SM 9223 B | <1 | NMP/100mL | 10462 | 5475 | 19180 | 450 | 2755 | 19863 | 12 | 970 | 19863 | 20980 |
| Color Verdadero | SM 2120 C | 4,97 | UPC | <4,970 | 5,91 | <4,970 | 6,01 | <4,970 | <4,970 | <4,970 | <4,970 | 41.45 | 8.21 |
| Cromo total | SM 3030 E, 3111 B | 0,05 | mg Cr/L | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| DBO5 | SM 5210 B. ASTM D-888-12 Método C | 10 | mgO2/L | <10 | <10 | <10 | <10 | <10 | <10 | <10 | <10 | <10 | 12 |
| DQO | SM 5220 C | 10 | mgO2/L | 10 | <10 | <10 | <10 | <10 | <10 | <10 | <10 | 27 | 13 |
| Dureza Calcica | SM 3500-Ca B | 5 | mg CaCO3/L | 149 | 53 | 17 | 22 | 14 | 266 | 67 | <5 | <5 | 73 |
| Dureza Total | SM 2340 C | 5 | mg CaCO3/L | 245 | 56 | 18 | 26 | 16 | 267 | 85 | <5 | <5 | 75 |
| Fenoles Totales | S.M. 5530 B-S.M. 5530 D | 0,002 | mg/L | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 |
| Fluoruros | EPA 300.0 | 0,05 | mg F/L | 0,66 | 0,23 | 0,07 | <0,05 | 0,05 | 0,39 | 0,22 | <0,05 | <0,05 | 0,06 |
| Fósforo Total | S.M 4500- P B,E | 0,02 | mg P/L | 0,24 | 0,17 | 0,17 | 0,14 | 0,09 | 0,17 | 0,04 | 0,10 | 0,14 | 0,40 |
| Grasas y aceites | NTC 3362: 2011-12-09, Numeral 4, Método C | 0,5 | mg/L | 2,3 | 2,4 | 2,0 | 4,9 | 3,0 | 2,1 | 2,4 | 59,6 | 38,6 | <0,5 |
| Hierro Total | SM 3030 E, 3111 B | 0,05 | mg Fe/L | <0,05 | 0,60 | 0,10 | 0,08 | 0,44 | 0,10 | 0,09 | 0,10 | 0,82 | 1,13 |
| Magnesio Total | SM 3030 E, 3111 B | 0,3 | mg Mg/L | 7,9 | 8,1 | 4,3 | 1,5 | 3,6 | 7,6 | 7,4 | 2,5 | 0,5 | 2,8 |
| Manganeso Total | SM 3030 E, 3111 B | 0,03 | mg Mn/L | 0,07 | 0,42 | 0,04 | <0,03 | 0,04 | 0,11 | 0,21 | <0,03 | 0,04 | 0,25 |
| Mercurio Total | SM 3030 K - EPA 200.8 - ICP/MS | 0,0006 | mg Metal/L | <0,0006 | <0,0006 | <0,0006 | <0,0006 | <0,0006 | <0,0006 | <0,0006 | <0,0006 | <0,0006 | <0,0006 |
| Molibdeno Total | SM 3030 E 3111 D | 0,2 | mg Mo/L | <0,2 | <0,2 | <0,2 | <0,2 | <0,2 | <0,2 | <0,2 | <0,2 | <0,2 | <0,2 |
| Nitratos | J. Rodier, 9 na Edición, 2011 | 0,3 | mg NO2^- -N/L | <0,3 | <0,3 | <0,3 | <0,3 | <0,3 | <0,3 | <0,3 | <0,3 | 0,8 | 2,2 |
| Nitritos | SM 4500 NO2- B | 0,003 | mg NO3^- -N/L | <0,003 | <0,003 | <0,003 | <0,003 | <0,003 | <0,003 | <0,003 | <0,003 | <0,003 | 0,463 |
| Nitrógeno total Kjeldhal | SM 4500-Norg C-4500NH3 B,C | 2 | mg N/L | <2 | <2 | <2 | 2 | <2 | <2 | <2 | <2 | <2 | 2 |
| Níquel Total | SM 3030 E, 3111 B | 0,05 | mg Ni/L | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| Ortofosfatos | SM 4500-P E | 0,06 | mg/L | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | 0,052 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| Plata Total | SM 3030 E, 3111 B | 0,05 | mg Ag/L | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| Plomo Total | SM 3030 E. 3111 B | 0,05 | mg Pb/L | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 | <0,05 |
| Potasio Total | SM 3030 E 3500 K B | 0,1 | mg K/L | 13,0 | 8,8 | 2,1 | 0,5 | 0,3 | 1,8 | 2,6 | 0,6 | 0,2 | 2,9 |
| Selenio Total | SM 3030 K - EPA 200.8 - ICP/MS | 0,0055 | mg Metal/L | <0,0055 | <0,0055 | <0,0055 | <0,0055 | <0,0055 | <0,0055 | <0,0055 | <0,0055 | <0,0055 | <0,0055 |
| Silicio Total | SM 4500-SIO2 D AZUL DE HEROPOLI | 0,175 | mg/L | 7,24 | 4,89 | 3,43 | 3,41 | 5,15 | 9,33 | 12,7 | 5,07 | 3,42 | 5,34 |
| Sodio Total | SM 3030 E, 3500-Na B | 0,2 | mg Na/L | 72,8 | 113,5 | 11,0 | 1,0 | 0,9 | 76,7 | 40,6 | 1,2 | 2,4 | 7,4 |
| Sulfatos | SM 4500 SO4 - E | 2 | mg SO4^2-/L | 41 | 7 | 23 | 9 | 25 | 27 | 21 | 11 | <2 | 9 |
| Sólidos Suspendidos Totales | SM 2540 D | 5 | mg/L | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | <5 | 18 |
| Turbiedad | SM 2130 B | 0,3 | NTU | 0,8 | 0,6 | 1,1 | 0,3 | 1,9 | 0,5 | 0,5 | 1,9 | 6,6 | 7,2 |
| Zinc Total | SM 3030 E, 3111 B | 0,01 | mg Zn/L | <0,02 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | 0,16 | <0,02 | <0,02 | <0,02 | 0,02 | <0,01 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

5.1.8.7.4 Clasificación Hidrogeoquímica

En el presente capítulo se describen las características hidrogeoquímicas de 21 puntos de agua seleccionados en el área de influencia de las UF3-4-5. En la **Tabla 5-2.10** y **Tabla 5-2.12** se presentan sus principales características físicoquímicas y en la **Figura 5-2.19** se observa su distribución espacial en la zona de estudio.

Las formaciones donde surgen los 21 puntos de agua estudiados están caracterizadas por litologías que van desde areniscas de grano fino, lutitas, rocas calizas y conglomerados, dentro de los cuales es posible encontrar números minerales (feldespatos, carbonatos, silicatos entre otros) de fácil disolución por el flujo de las aguas que circulan en el subsuelo. Entre los elementos más importantes para la clasificación de las aguas que se pueden encontrar en estas litologías están: el Ca, Na, Mg, Al, K, Fe, Cl, SO₄ y HCO₃. Para mayor información sobre las características litológicas de cada una de las unidades aflorantes se remite al capítulo de geología (numeral 5.1.1).

En los análisis presentados en este capítulo se propone una clasificación mediante diferentes diagramas (Piper, Schoeller e Stiff), que permiten definir una caracterización hidrogeoquímica inicial de la zona de estudio para el periodo noviembre/diciembre 2017. La interacción agua-roca determina la disolución de minerales y la carga iónica del agua, que puede ser estudiada y clasificada con base en sus fases químicas, utilizando los mencionados diagramas geoquímicos de Piper, Shoeller y Stiff.

El diagrama de Piper está conformado por un rombo en cuyos extremos inferiores se localizan dos triángulos equiláteros, uno para los cationes y uno para los aniones. La concentración se expresa en meq/l. En los dos triángulos, la posición del punto se localiza teniendo en cuenta que cada lado se subdivide en 100 partes. En el esquema (rombo), el punto representativo de todo el análisis se sitúa en la intersección de la recta paralela al lado Mg²⁺ (pasando por el punto representativo de los cationes), con aquella paralela al lado SO₄²⁻ (pasando por el punto representativo de los aniones). Como se muestra en la **Figura 5-2.19**, se representan las características hidrogeoquímicas de los puntos de agua según su posición espacial dentro del rombo superior.

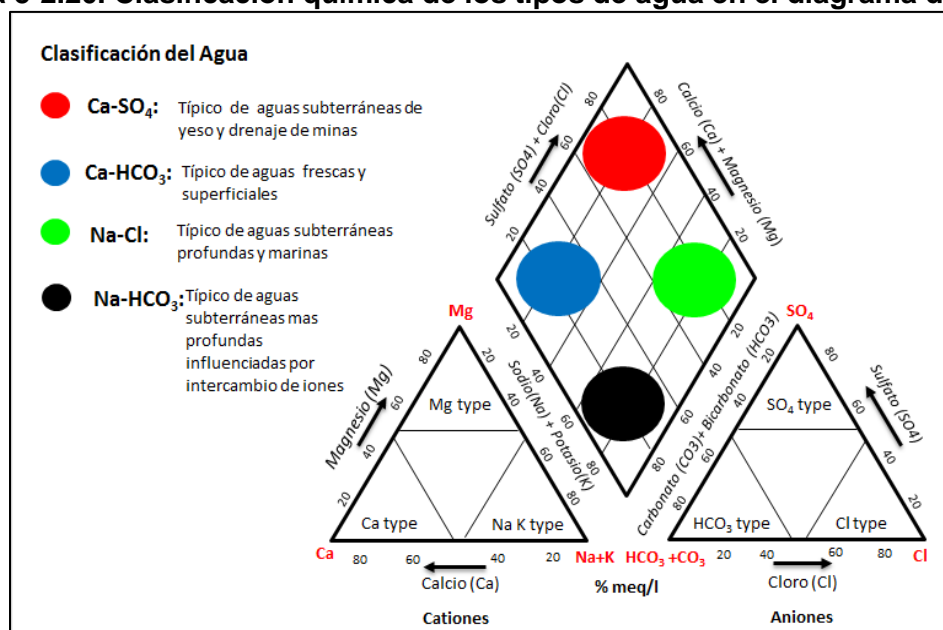
El diagrama de Shoeller se compone de 7 escalas verticales logarítmicas, equidistantes entre sí, que representan la concentración de los aniones principales (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺++K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻), más uno extra, en este caso relacionado con los STD (sólidos totales disueltos) expresados en meq/l. La ventaja de este gráfico es que, a diferencia del diagrama de Piper, se conservan los valores absolutos de la concentración de los iones individuales. Esto permite distinguir el agua de baja mineralización de aquella más mineralizada. La pendiente de cada segmento que une los puntos representativos de dos iones diferentes representa la relación característica entre los iones mismos; por lo tanto, relaciones iguales implican la existencia de segmentos paralelos o sub paralelos, mientras que segmentos con pendientes diferentes o invertidas indican que el agua tiene características hidrogeoquímicas diferentes.

El diagrama de Stiff está constituido por el diseño en meq/L, de tres o más aniones y cationes, los cuales pueden ser trazados para evaluar los cambios de la calidad del agua, en un lugar durante el tiempo: También pueden ser útiles para evaluar el cambio de la calidad del agua que fluye a través de una unidad geológica diferente, o para evaluar diferentes condiciones geoquímicas del subsuelo.

Estos tres tipos de representación de las ocho fuentes estudiadas son útiles para clasificar el agua con base en sus componentes principales.

En la **Figura 5-2.20** se describen los tipos de aguas que se pueden discriminar según el diagrama de Piper.

Figura 5-2.20. Clasificación química de los tipos de agua en el diagrama de Piper.

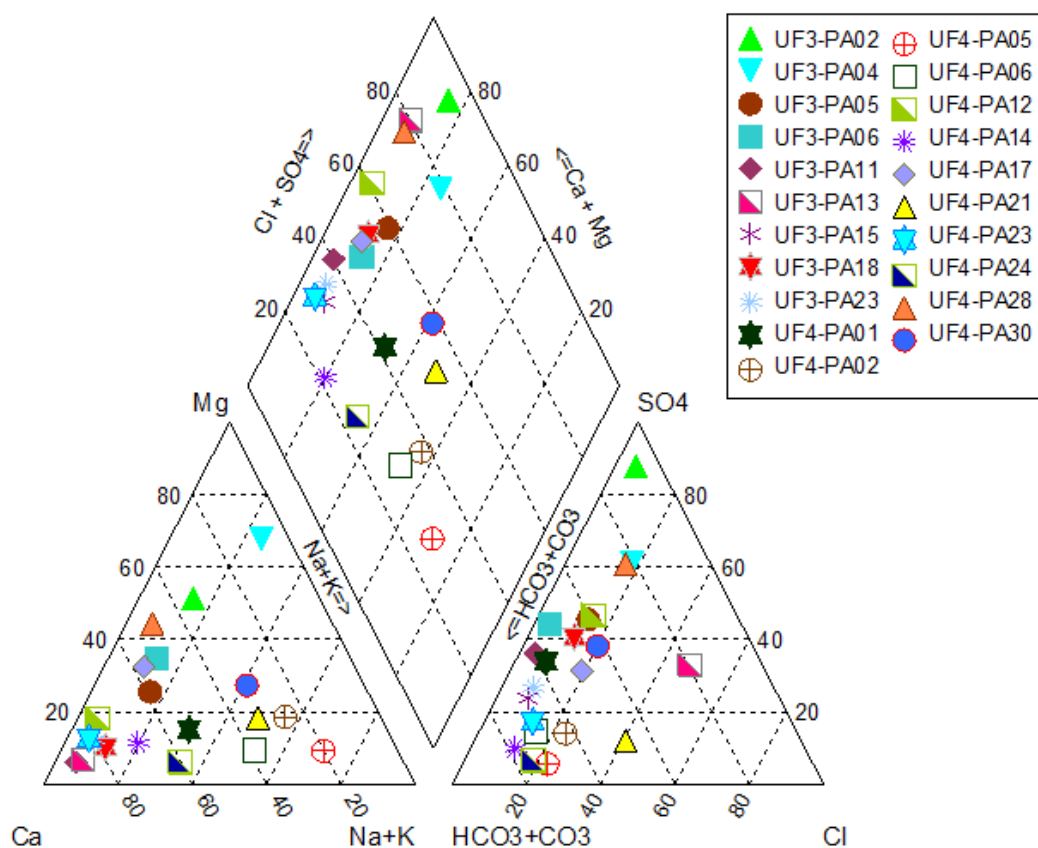


Fuente: Aecom – Concol, 2018

La **Figura 5-2.21** muestra los resultados de los análisis de las veintiún fuentes disponibles e indica que la mayoría de los puntos de agua pertenecen a facies hidrogeoquímicas de tipo cálcico sulfatito y cálcico-bicarbonático, con algunos pocos puntos con tendencias hacia aguas sodio-bicarbonáticas (UF4-PA06 y UF4-PA02). El catión dominante es el Ca en el triángulo de los cationes, mientras que en el triángulo de los aniones se evidencia una tendencia hacia los HCO₃+CO₃.

Estas características en términos generales indicarían aguas que provienen en su mayoría de recargas subsuperficiales, que podrían estar influenciada por la degradación del yeso. Más específicamente los puntos de agua que pertenecen a las calcio-bicarbonáticas (parte izquierda rombo) se trata de aguas que han tenido una circulación corta y poco profunda en el subsuelo.

Figura 5-2.21. Diagrama de Piper para las muestras de 21 puntos de agua analizados

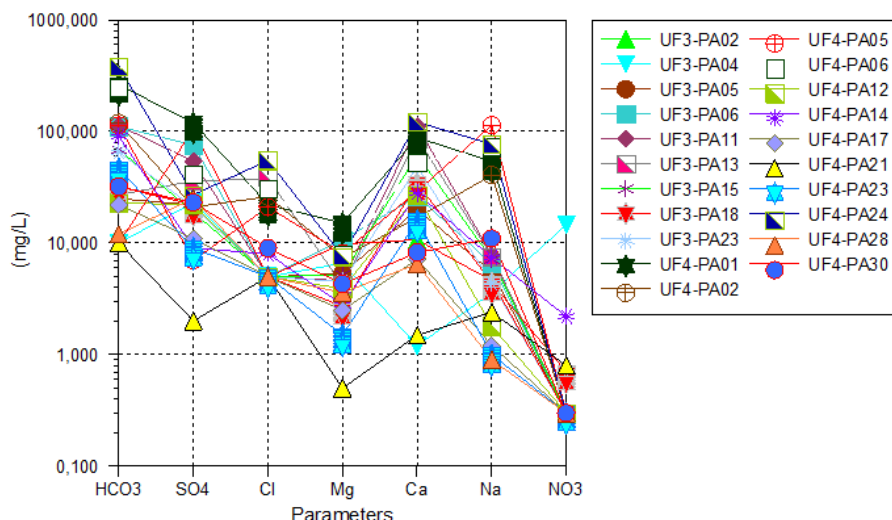


Fuente: Aecom – Concol, 2018

En la **Figura 5-2.22** se muestra el diagrama de Shoeller para las 21 fuentes de agua analizadas. Se puede observar como la mayor parte de las muestras presentan una gran variabilidad de concentraciones de Ca. Por el contrario, la mayoría de estos puntos de agua presentan poca variabilidad en las concentraciones de cloruros, de solo un orden de magnitud; esta poca variación valida la corta circulación anteriormente descrita con el diagrama de piper, pues el Cl se utiliza como trazador natural y las bajas concentraciones indican poca circulación dentro del acuífero.

La concentración del NO_3 expuesta en la **Figura 5-2.22**, indica que solamente uno de los puntos de agua presenta una concentración mayor a 10mg/L, la cual respeta los valores límites de 50 mg/L para las aguas de consumo humano (*COUNCIL DIRECTIVE 98/83/EC - 3 November 1999*). Del mismo modo las concentraciones de SO_4 , menores a 250 mg/L, indicarían que el origen de estas bajas concentraciones puede estar relacionado a una circulación subsuperficial dentro de los acuíferos montañosos o en las zonas de fracturas poco profundas.

Figura 5-2.22. Diagrama de Shoeller para las veintiún fuentes de agua analizadas



Fuente: Aecom – Concol, 2018

Los elementos que presentan la mayor variabilidad de concentraciones son el Ca y los HCO₃, que validan las facies dominantes en todos los puntos de agua analizados. Debido especialmente a la disolución de compuestos ricos en Ca y HCO₃, relacionados muy probablemente con las formaciones ricas en calizas (Fm. Luna, Fm. Capacho, Fm. Colon Mito Juan y Fm. Tibú Mercedes).

En la **Tabla 5-2.10** se exponen los valores de STD (Sólidos Totales Disueltos) calculados para los puntos de agua analizados, la mayoría de las muestras demuestran concentraciones menores a 500 mg/l. Según los límites propuestos por la comunidad europea (Directiva 2000/60/EU), los valores de STD inferiores a 50 mg/l corresponde a aguas poco mineralizadas, mientras que valores de STD comprendido entre 50 y 500 mg/l corresponden a aguas ligeramente mineralizadas. Adoptando esta clasificación resulta que cuatro de las veintiún muestras son aguas minerales y los 18 restantes corresponderían con agua poco mineralizadas. Las aguas con mayor concentración de iones podrían estar representando circuitos o recorridos más largos dentro del acuífero.

- Facies hidrogeoquímicas

Una vez analizadas las facies hidrogeoquímicas de los puntos de agua utilizando el software especializado “AquaChem”, los tipos de aguas muestreadas se pueden dividir en tres grupos principales Ca-HCO₃; Ca-Mg-Cl-HCO₃ con variaciones a Ca-Mg-SO₄-HCO₃ y Na-Ca-HCO₃ con variaciones a Na-Ca-HCO₃-Cl (Ver **Tabla 5-2.14**). En este estudio se evidencia únicamente una caracterización puntual relacionada específicamente con las condiciones del acuífero durante el periodo de muestreo realizado durante los meses de noviembre a diciembre de 2017.

Tabla 5-2.14. Facies hidrogeoquímicas de los puntos de agua muestreados.

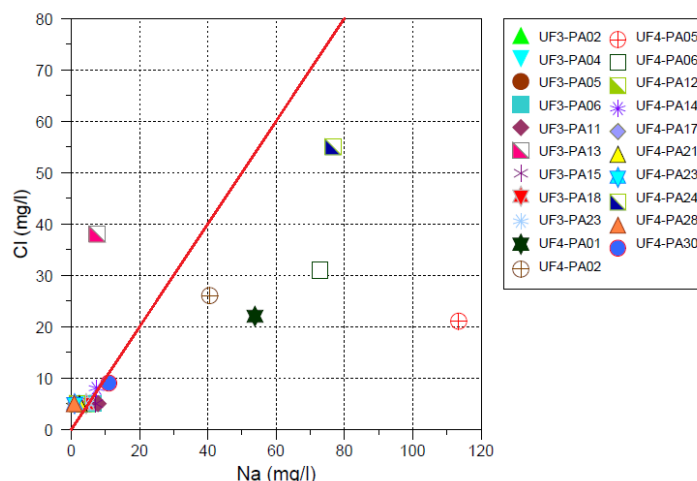
| Puntos de Agua | Facies hidrogeoquímica | Puntos de Agua | Facies hidrogeoquímica |
|----------------|---|----------------|--|
| UF3-PA13 | Ca-Cl-SO ₄ | UF4-PA24 | Ca-Na-HCO ₃ |
| UF3-PA15 | Ca-HCO ₃ | UF4-PA01 | Na-Ca-HCO ₃ -SO ₄ |
| UF3-PA23 | Ca-HCO ₃ | UF3-PA02 | Mg-Ca-SO ₄ |
| UF4-PA23 | Ca-HCO ₃ | UF3-PA03 | Mg-SO ₄ -NO ₃ |
| UF3-PA18 | Ca-HCO ₃ -SO ₄ | UF4-PA72 | Ca-Na-HCO ₃ |
| UF3-PA12 | Ca-HCO ₃ -SO ₄ | UF4-PA06 | Na-Ca-HCO ₃ |
| UF3-PA06 | Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄ | UF4-PA02 | Na-Ca-HCO ₃ -Cl |
| UF4-PA17 | Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄ | UF4-PA21 | Na-Ca-HCO ₃ -Cl |
| UF4-PA12 | Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃ | UF4-PA30 | Na-Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄ |
| UF3-PA54 | Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃ | UF4-PA14 | NO ₂ -HCO ₃ |
| UF4-PA28 | Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃ | | |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

Algunas correlaciones estequiometrias entre los iones de los Cl con el Na, pueden ser útiles para definir si existe o no una correlación estequiometria. Si la correlación Na/Cl es mayor que 1, el origen del Na se debe a la degradación de los silicatos (Meybeck, 1987), si en cambio la relación Na/Cl está por debajo de la línea de correlación, entonces el Cl puede tener origen diferente a la degradación de los silicatos, probablemente de elementos con Cl, por ejemplo, del yeso presente en venas dentro de los niveles arenosos/arcillosos existentes en la mayoría de las formaciones geológicas presentes en la zona de estudio. En la **Figura 5-2.23** la mayoría de los puntos de agua presentan una correlación estequiométrica casi lineal (línea roja).

El enriquecimiento de sodio respecto al cloruro indica la existencia de una disolución de minerales ricos en sodio, como la plagioclasa (albita) y anfíbol (hornblenda), que pueden estar presentes en las areniscas y en los limos (UF4-PA02; UF4-PA06, UF4-PA72 Y UF4-PA01).

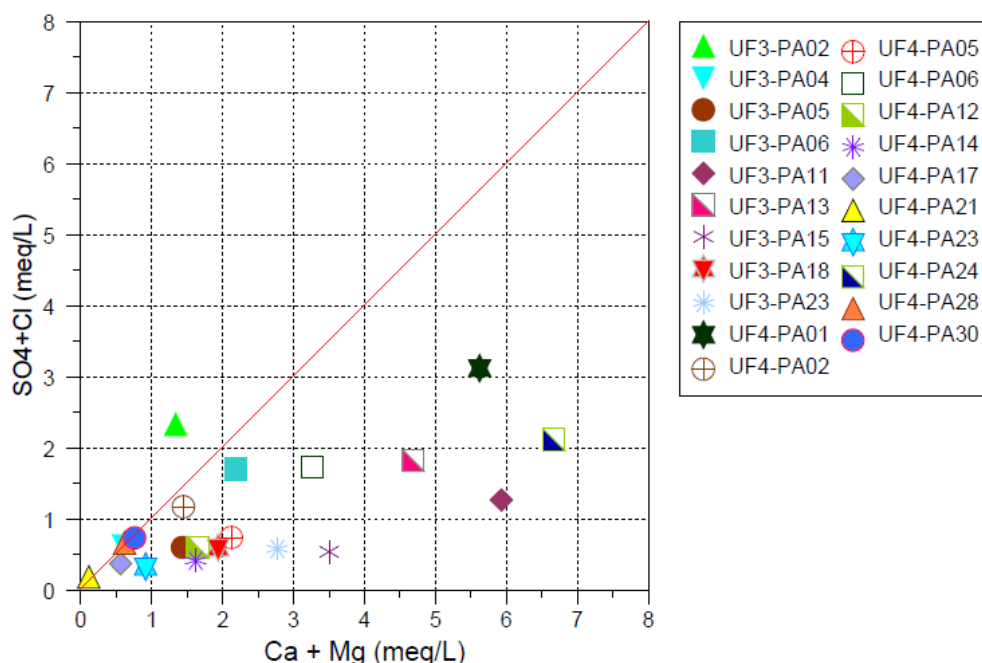
Figura 5-2.23. Gráficos de correlación entre los iones Na⁺ y Cl⁻ expresados en mg/l.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

En la **Figura 5-2.24**, se representa la relación entre la suma de los cationes del Ca + Mg, versus la suma de los aniones del CL+SO₄ en términos de meq/l, la cual permite validar los procesos de degradación que están actuando en los puntos de agua al momento del muestreo. Es posible evidenciar que solo un punto de agua, el UF3-PA02 cae sobre la línea de correlación (línea roja), todos los demás puntos caen por debajo de esta línea indicando que el fenómeno dominante es la degradación de los carbonatos. Este desbalance hacia el Ca+Mg podría deberse a iones de la disolución del yeso (CaSO₄), o también a la disolución de las plagioclasas y de los anfíboles, minerales representativos de las formaciones presentes.

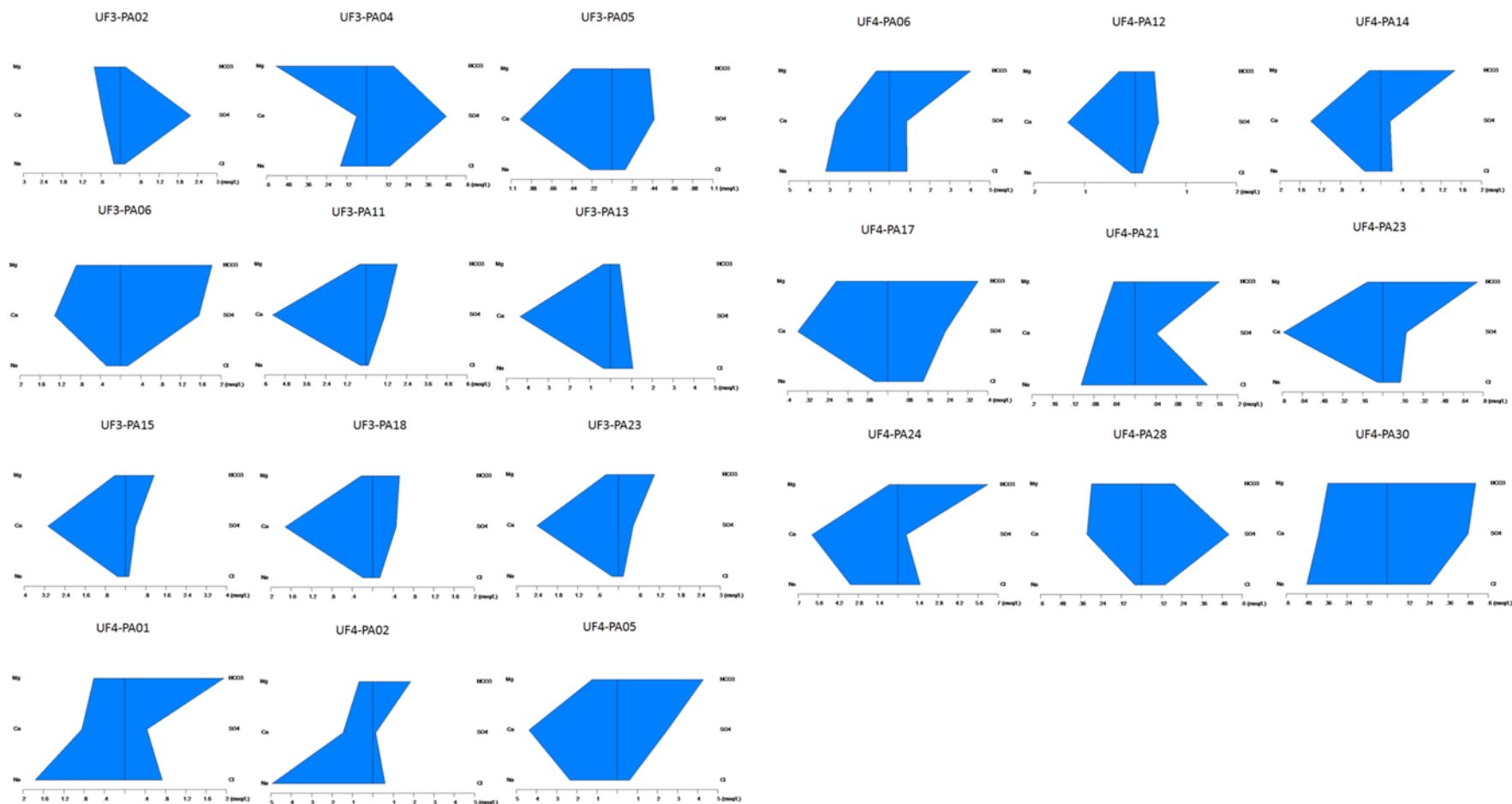
Figura 5-2.24. Correlación entre los iones Ca²⁺+Mg versus SO₄²⁻+HCO₃ en meq/l.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

Por último, en la **Figura 5-2.25**, se muestran los gráficos representativos para cada una de las 21 fuentes analizadas según el método de Stiff. Este método permite establecer fácilmente correlaciones gráficas, y de este modo crear grupos Hidrogeoquímicos. Utilizando el método grafico para agrupar los puntos de agua se puede evidenciar que existen geometrías con forma de flecha a la izquierda con mayores concentraciones de Ca y bajas concentraciones de Cl y concentraciones variables de los aniones HCO₃ (UF3-PA54, UF3-PA06, UF3-PA12, UF3-PA13, UF3-PA15, UF3-PA16, UF3-PA23, UF4-PA12, UF4-PA14, UF4-PA17, UF4-PA23 y UF4-PA24). El punto de agua UF4-PA30 se diferencia geométricamente de todos las demás, pues probablemente está recorriendo una zona con mayor enriquecimiento por parte de los bicarbonatos y los sulfatos.

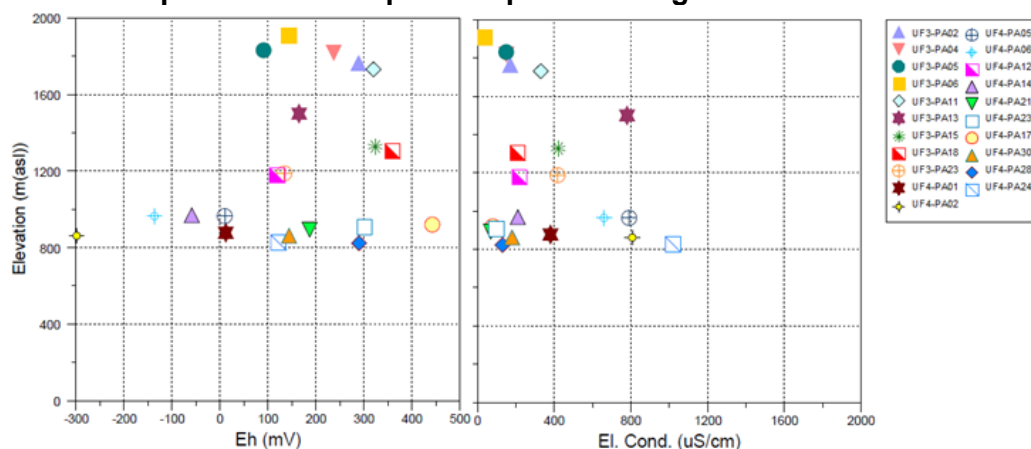
Figura 5-2.25. Diagramas de Stiff para las veintiún fuentes analizadas



Fuente: Aecom – Concol, 2018

Los valores de EC (Conductividad eléctrica, $\mu\text{S}/\text{cm}$) medidos durante la campaña de muestreo, contienen valores máximos de 1020 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y mínimos de 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (media de 345 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Cinco de los puntos de agua presentan valores de EC mayores a 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual puede indicar mayor tiempo de recorrido dentro del acuífero (UF3-PA13, UF4-PA02, UF4-PA72, UF4-PA06 y UF4-PA24) (Figura 5-2.26)

Figura 5-2.26. Correlación de la elevación con la conductividad eléctrica y el potencial redox para los puntos de agua analizados.



Fuente: Aecom – Concol, Datos de Nov_Dic_2017

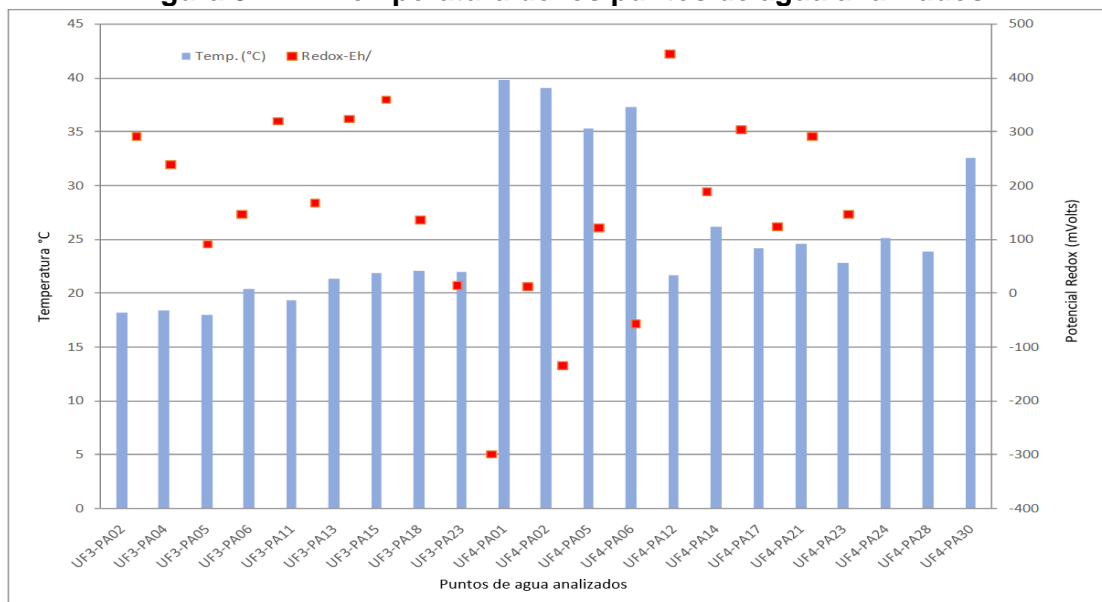
Los valores del potencial Redox-Eh/°C medidos en el momento del análisis (en nov-dic_2017) muestran valores entre -299mVolts y 443mVolts, estos valores demuestran condiciones hidrogeoquímicas caracterizadas por ambientes principalmente oxidantes, y reductivos (para las muestras UF4-PA02, UF4-PA14 y UF4-PA06). Las primeras fluyen probablemente en acuíferos poco profundos, probablemente no confinados y colgados, mientras que los puntos de agua con potencial redox negativo pueden asociarse a acuíferos profundos o con circuitos de circulación más prolongada, de hecho, la conductividad eléctrica en dos de estos tres puntos de agua están entre las más altas medidas en la campaña de muestreo (860 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 660 $\mu\text{S}/\text{cm}$) respectivamente para UF4-PA02 y UF4-PA06, indicando una posible influencia de aguas termales profundas (ver Figura 5-2.26).

Es posible que todos los puntos de agua con temperaturas mayores a 30°C estén influenciados por circuitos termales profundos (Ver Figura 5-2.27), no sólo porque afloran con las temperaturas más elevadas de la zona de estudio, sino además por las condiciones estructurales de la región que podrían permitir un contacto con una zona termal profunda de mayor temperatura.

Los puntos de agua UF4-PA02 y UF4-PA06 son probablemente dentro del conjunto de los puntos de agua analizados, los que presentan los circuitos de flujo subterráneos más largos. Esta afirmación se puede validar a causa de su elevada conductividad eléctrica (mayor de 600 uS), así como la temperatura medida (39 °C y 37°C respectivamente) y los valores negativos de Eh (-299mV y -137mV), que indican condiciones reductivas, las cuales son las

dominantes en las aguas termales. No se pueden definir los tiempos de circulación debido a falta de datos isotópicos, pero el Cl, como trazador natural puede ser útil para determinar interacciones con la roca madre, de hecho, las concentraciones mayores de Cl se midieron en estos dos puntos de agua (21mg/L y 31 mg/L respectivamente), indicando el mayor tiempo de flujo subterráneo.

Figura 5-2.27. Temperatura de los puntos de agua analizados.

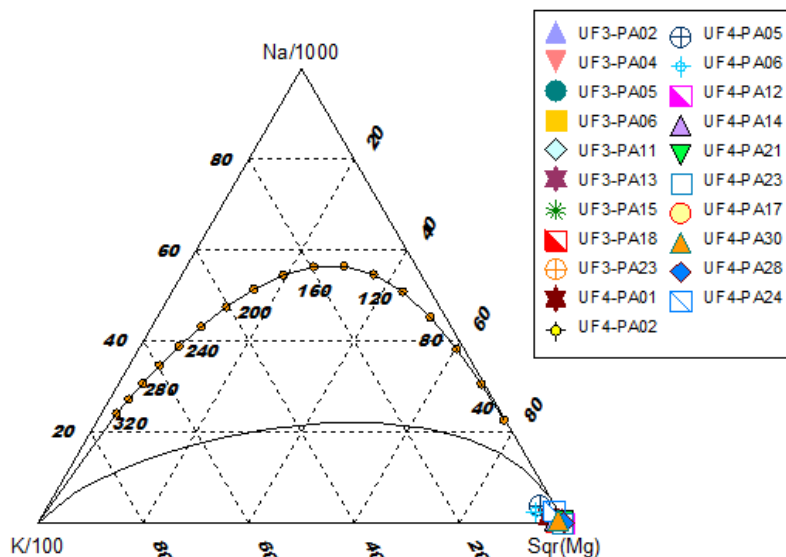


Fuente: Aecom – Concol, Datos de Nov_Dic_2017.

Considerando que entre los puntos de agua muestreados hay algunos con temperaturas que pueden estar asociadas a circuitos termales, se ha utilizado el triángulo de gigenbach (**Figura 5-2.28**), el cual permite establecer si el equilibrio de las muestras de agua ha alcanzado el equilibrio con la roca madre. Este método se puede proponer pues las temperaturas de muestreo no denotan solo manantiales hipotermiales (entre 20°C y 30°C), sino también termales (entre 30°C y 40°C) de acuerdo con Marotta e Sica (1933). La relación que se observa en general es que los manantiales con temperaturas de afloramiento mayores son aquellas que presentan valores de potencial redox menor, es decir de ambiente reductor, indicando un flujo subterráneo más profundo (UF4-PA01, UF4PA02, UF4-PA72 y UF4-PA06).

La posición que demuestran todos los puntos de agua muestreados de acuerdo con la **Figura 5-2.28** indican que son inmaduros desde el punto de vista de los geotermómetros, de igual forma este resultado a pesar de las temperaturas medidas en campo, puede indicar que en su recorrido hacia la superficie, estas aguas se mezclan con aguas superficiales. Esta condición es plausible considerando la gran cantidad de estructuras y fallas que afectan estructuralmente el valle del Río Pamplonita donde se emplazan los puntos de agua muestreados.

Figura 5-2.28. Triangulo de Giggenbach para los puntos de agua analizados.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

Finalmente, además de hacer un análisis netamente hidrogeoquímico se podrían considerar otros elementos químicos como el hierro y el arsénico, para definir las características geogénicas de los puntos de agua analizados. Estos dos elementos no superan concentraciones mayores de 3.77mg/l y 4.5 ug/l, indicando características que no afectan la calidad del agua para consumo humano, validando además el hecho de la poca interacción entre la madre roca y el flujo subterráneo.

5.1.8.8 Modelo Hidrogeológico Conceptual UF3-4-5 (Túnel y Vía a Cielo Abierto)

5.1.8.8.1 Principales unidades geológicas y su comportamiento hidrogeológico

La mayoría de las formaciones geológicas presentes a lo largo del corredor vial en términos generales se pueden agrupar de la siguiente manera.

Sedimentos y rocas con porosidad primaria de limitado interés hidrogeológico:

- Corresponde a depósitos recientes no consolidados constituidos especialmente por coluviones dispersos en las laderas (Qc), abanicos aluviales (Qaa, Qat, Qat1, Qat2), depósitos de terrazas (Qt1, Qt2, Qt3), algunos depósitos aluviales circunscritos especialmente a las zonas aledañas al cauce actual del río Pamplonita (Qal) y en menor proporción a depósitos de origen antrópico (Qrt). La composición dominante de los depósitos cuaternarios más representativos en la zona de estudio (Qc/Qaa y Qt), es variable, generalmente constituida por granulometrías gruesas, alguna de ellas embebidas en matriz compuesta por gran cantidad de arenas y gravas, arenas arcillosas y mezcla de finos. Su comportamiento hidrogeológico más probable

corresponde a acuíferos libres, discontinuos y heterogéneos de limitada extensión, poco productivos, de porosidad primaria y permeabilidad de media a alta. Entre estos se destacan los depósitos de terrazas (Qt) que logran alcanzar grandes extensiones.

- b) Formaciones geológicas consolidadas compuestas por secuencias de areniscas con intercalaciones menores de lutitas y limolitas (E2m, Tpb, Kia, Jg y Jb), con porosidad primaria y secundaria por fracturación, por lo que en términos generales la permeabilidad es baja a intermedia. Su comportamiento hidrogeológico más probable se relaciona con acuíferos semiconfinados de extensión regional y limitado interés hidrogeológico.

Rocas con porosidad secundaria de limitado interés hidrogeológico:

- a) Formaciones geológicas consolidadas con presencia importante de niveles de calizas e intercalaciones menores de lutitas y areniscas (K2l y Kitm), con porosidad secundaria dada por fracturas y/o disolución (pseudokarts), por lo que la permeabilidad dominante es, en términos generales, intermedia, siendo su comportamiento hidrogeológico más probable el de acuíferos confinados a semiconfinados de poca extensión y productividad baja a moderada.

Rocas con porosidad secundaria y primaria sin interés hidrogeológico:

- a) Formaciones geológicas consolidadas compuestas por rocas cristalinas (Tjgd) y rocas sedimentarias dominadas, estas últimas, por secuencias de lutitas con intercalaciones menores de calizas, limolitas y areniscas de grano fino (E31, E2c, E11c, Ksm y Kic), por lo que la permeabilidad dominante es, en términos generales, baja a muy baja y principalmente de tipo secundario, siendo su comportamiento hidrogeológico más probable el de acuitados y/o acuícludos, con presencia eventual de flujos locales asociados a fracturas, disolución de las calizas y niveles menores de areniscas de grano fino.

En la mayor parte de la zona de influencia de la vía a cielo abierto existe lo que podría llamarse un “acuifero superficial”, fracturado, discontinuo y heterogéneo de limitado interés hidrogeológico; el cual contiene una napa libre, constituido por depósitos cuaternarios y de alteración del macizo rocoso.

En el Anexo 5.1.3.3, se presenta el mapa hidrogeológico del sector en el que se ilustra la distribución de las unidades geológicas, que para fines del presente trabajo han sido consideradas como complejos hidrogeológicos, se indican las direcciones preferenciales del flujo subterráneo, así como las principales zonas de recarga y descarga identificadas en la zona de influencia del proyecto. La nomenclatura utilizada en el mapa hidrogeológico sigue las recomendaciones de la International “International Association of Hydrogeologists_ (IAH)”.

En la **Tabla 5-2.15**, se indican los principales complejos hidrogeológicos presentes en la zona de estudio.

Tabla 5-2.15. Complejos hidrogeológicos de las UF3-4-5.

| DESCRIPCION DE LOS COMPLEJOS HIDROGEOLÓGICOS | | | | |
|--|--|--|--|------------|
| SIMBOLO | Unidad Geológica | DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA | DESCRIPCIÓN HIDROGEOLÓGICA | "IAH" Mapa |
| Qrt | Depósitos antrópicos | Se trata de depósitos mayoritariamente arcillo-limosos con algunas gravas y bloques de roca de composición variable (procedentes de la construcción de la vía) sobre suelos residuales que se sitúan a ambos lados de la vía existente. Sus espesores máximos reconocidos son del orden de 5 - 10 m. | Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero libre. Porosidad dominante: primaria, la cual puede variar de acuerdo con la composición granulométrica de la matriz y verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Conformado por depósitos cuaternarios no consolidados con el potencial de formar acuíferos de extensión local de baja productividad. capacidad específica entre 0.05 y 1.0 l/s/m; B= 463 a 1132 m; K= 2 a 13 m/d; T= 25 a 350 m2/d; S= 5.0 x 10-4 a 1.8 x 10-3 | Qrt |
| Qal | Depósitos aluviales | Se observan a todo lo largo del área de influencia del proyecto, como depósitos recientes, angostos asociados al río Pamplonita y algunos de sus afluentes. En general, están conformados por un predominio de gravas y cantos rodados sueltos, móviles, y en menor proporción arenas sueltas. | Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero libre. Porosidad dominante: primaria, la cual puede variar de acuerdo con la composición granulométrica de la matriz y verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Conformado por depósitos cuaternarios no consolidados con el potencial de formar acuíferos de extensión local de baja productividad. capacidad específica entre 0.05 y 1.0 l/s/m. B= 463 a 1132 m; K= 2 a 13 m/d; T= 25 a 350 m2/d; S= 5.0 x 10-4 a 1.8 x 10-3 | Qal |
| Qc | Depósitos coluviales | Estos depósitos se identifican a lo largo de toda el área de influencia del proyecto, asociados a las laderas del relieve de montañas que caracteriza el área de estudio. Corresponden principalmente a depósitos de corta distancia, asociados a deslizamientos y en menor proporción flujos de escombros. | Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero libre. Porosidad dominante: primaria, la cual puede variar de acuerdo con la composición granulométrica de la matriz y verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Conformado por depósitos cuaternarios no consolidados con el potencial de formar acuíferos de extensión local de baja productividad. capacidad específica entre 0.05 y 1.0 l/s/m; B= 463 a 1132 m; K= 2 a 13 m/d; T= 25 a 350 m2/d; S= 5.0 x 10-4 a 1.8 x 10-3 | Qc |
| Qaa | Depósitos abanicos aluviales (Qat, Qat1, Qat2) | Estos depósitos cuaternarios son comunes a lo largo del área de influencia del proyecto. Se presentan de dimensiones variadas, y algunos de ellos evidencian varios eventos, los cuales pudieron ser cartografiados como Qat1 y Qat2. En sondeo realizado en esta unidad de depósitos cuaternarios se identifica una textura areno limosa a limo arenosa, con clastos de areniscas y algo de limolitas, consistencia media, color café oscuro | Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero libre. Porosidad dominante: primaria, la cual puede variar de acuerdo con la composición granulométrica de la matriz y verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Conformado por depósitos cuaternarios no consolidados con el potencial de formar acuíferos de extensión local de baja productividad. capacidad específica entre 0.05 y 1.0 l/s/m. B= 463 a 1132 m; K= 2 a 13 m/d; T= 25 a 350 m2/d; S= 5.0 x 10-4 a 1.8 x 10-3 | Qal |
| Qt | Depósitos de terraza (Qt1, Qt2, Qt3) | Son depósitos de gran magnitud y desarrollo de escarpes de terraza de altura hasta 150m, asociados a una depositación aluvial con alta carga de sedimentos, principalmente tamaño grava; estas gravas cubrieron toda la superficie a niveles distintos a medida que los ríos comenzaron a incisarse. También se presentan terrazas con presencia de clastos subangulares a subredondeados de areniscas, matriz arena gruesa con intercalaciones de materiales más finos. | Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero libre. Porosidad dominante: primaria, la cual puede variar de acuerdo con la composición granulométrica de la matriz y verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Conformado por depósitos cuaternarios no consolidados con el potencial de formar acuíferos de extensión local a regional de productividad baja a media. capacidad específica entre 0.05 y 1.0 l/s/m; B= 463 a 1132 m; K= 2 a 13 m/d; T= 25 a 350 m2/d; S= 5.0 x 10-4 a 1.8 x 10-3 | Qt |
| E31 | Formación León | Lodolitas grises y gris verdosas, con escasas intercalaciones de areniscas cuarzosas grises de grano fino a medio en capas medias. | Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuícludo a Acuitardo. Porosidad dominante: secundaria, la cual puede verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Son complejo de rocas sedimentarias que tienen el potencial de almacenar agua por fracturación, de productividad muy baja. Eventual presencia de flujos locales asociados a los niveles de areniscas. Capacidad específica promedio menor de 0.05 l/s/m. | E31 |
| E2c | Formación Carbonera | Lodolitas grises a gris verdosas, cafés, micáceas, con nódulos ferruginosos, en capas gruesas, intercaladas con areniscas cuarzosas de grano fino, color blanco, shales carbonosos y grandes mantos de carbón. | Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuícludo a Acuitardo. Porosidad dominante: secundaria, la cual puede verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Son complejo de rocas sedimentarias que tienen el potencial de almacenar agua por fracturación, de productividad muy baja. Eventual presencia de flujos locales asociados a los niveles de areniscas. Capacidad específica promedio menor de 0.05 l/s/m. | E2c |
| E2m | Formación Mirador | Capas gruesas de areniscas cuarzosas de grano fino a medio, gris claro, intercaladas con lodolitas grises, carbonosas; hacia la parte alta se presentan areniscas amarillentas. | Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero semiconfinado de baja productividad. Porosidad dominante: primaria, la cual puede verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Con posibilidad de flujos locales asociados a niveles de arenisca. capacidad específica promedio menor de 0.05 l/s/m. | E2m |
| E1lc | Formación Los Cuervos | Lodolitas grises oscuras, micáceas, con intercalaciones delgadas de areniscas de grano fino, grises a amarillentas y shales carbonosos. Se presentan mantos de carbón en las partes inferior y media. | Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuícludo a Acuitardo. Porosidad dominante: secundaria, la cual puede verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Son complejo de rocas sedimentarias que tienen el potencial de almacenar agua por fracturación, de productividad muy baja. Eventual presencia de flujos locales asociados a los niveles de areniscas. Capacidad específica promedio menor de 0.05 l/s/m. | E1lc |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

Tabla 5-2.15. Complejos hidrogeológicos de las UF3-4-5 (continuación).

| DESCRIPCION DE LOS COMPLEJOS HIDROGEOLOGICOS | | | | |
|--|---------------------------|---|--|------------|
| SIMBOLO | Unidad Geológica | DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA | DESCRIPCIÓN HIDROGEOLOGICA | "IAH" Mapa |
| Tpb | Formación Barco | Areniscas cuarzosas de color blanco, bien seleccionadas micáceas, grises, amarillentas a blancas de grano fino a media en capas tubulares, con estratificación cruzada intercalada con capas delgadas de lodolitas grises claras a oscuras. | Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero semiconfinado de baja productividad. Porosidad dominante: primaria, la cual puede verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Con posibilidad de flujos locales asociados a niveles de arenisca. capacidad específica promedio menor de 0.05 l/s/m. | Tpb |
| Kscm | Formación Colon-Mito Juan | Capas medias y gruesas de lodolitas grises oscuras a negras, en algunos niveles calcáreos, micáceos, fosilíferos, laminación plano paralela; nódulos ferruginosos paralelos a la estratificación. En la parte superior, capas de lodolitas grises intercaladas con areniscas de grano fino. | Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuícludo a Acuitardo. Porosidad dominante: secundaria, la cual puede verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Son complejo de rocas sedimentarias que tienen el potencial de almacenar agua por fracturación, de productividad muy baja. Capacidad específica promedio menor de 0.05 l/s/m. | Kscm |
| Ksl | Formación la Luna | Calizas grises en capas delgadas fosilíferas, lodolitas calcáreas color gris, con grandes concreciones elipsoidales y discoidales, capas plano paralelas de chert, lodolitas silíceas y capas fosfáticas. | Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero confinado a semiconfinado. Porosidad dominante: secundaria por fracturación/disolución (pseudokarts). Esta porosidad puede verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Sistemas acuíferos discontinuos de extensión local, conformados por rocas sedimentarias carbonatadas cretácicas, consolidadas de ambiente marino, de productividad moderada. capacidad específica promedio mayor de 5,0 l/s/m | Ksl |
| Kic | Formación Capacho | Lutitas grises oscuras a negras, con calizas grises, masivas y fosilíferas en las partes inferior y superior | Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuitardo. Porosidad dominante: secundaria, la cual puede verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Son complejo de rocas sedimentarias que tienen el potencial de almacenar agua por fracturación y/o disolución (pseudokarts) , de muy baja productividad. Eventual presencia de flujos locales asociados a fracturas y disolución de las calizas. capacidad específica promedio menor de 0.05 l/s/m. | Kic |
| Kia | Formación Aguardiente | Areniscas claras, duras, de grano fino a grueso, con algunas capas de limolitas y lutitas carbonáceas. | Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero semiconfinado. Porosidad dominante: primaria y secundaria por fracturación. Esta doble porosidad puede verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Son sistemas acuíferos discontinuos de extensión regional, de baja productividad, conformados por rocas sedimentarias clásticas de edades cretácicas depositadas en ambientes marinos. capacidad específica promedio entre 0.05 y 1 l/s/m. | Kia |
| Kitm | Formación Tibu-Mercedes | Areniscas cuarzosas de color gris claro, grano medio a grueso en capas gruesas, lodolitas negras en capas delgadas, calizas (packstone y wackstone) y areniscas calcáreas de grano fino. | Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero semiconfinado. Porosidad dominante: secundaria por fracturación/disolución (pseudokarts), la cual puede verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Son sistemas acuíferos discontinuos de extensión regional, de baja productividad, conformados por rocas sedimentarias carbonatadas-clásticas de edades cretácicas depositadas en ambientes marinos. Capacidad específica promedio mayor de 5,0 l/s/m | Kitm |
| Tjgd | Granito de Durania | Granito variedad alaskita, compuesto por cuarzo, feldespato y moscovita. | Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuícludo. Porosidad dominante: secundaria por fracturación, la cual puede verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Corresponde a rocas graníticas que tienen el potencial de almacenar agua por fracturación, de muy baja productividad. Capacidad específica promedio menor de 0.05 l/s/m. | Tjgd |
| Jg | Formación Girón | Areniscas conglomeráticas y conglomerados, gris amarillento a pardo rojizo; masivos y lenticulares. Limolitas pardo-rojizas. | Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero semiconfinado. Porosidad dominante: primaria, la cual puede verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Sistema de acuíferos discontinuos de extensión regional de baja productividad, conformados por rocas sedimentarias clásticas. capacidad específica entre 0,05 y 1 l/s/m | Jg |
| Jb | Formación Bocas | Areniscas rojizas y grises verdosas, ligeramente calcáreas, limolitas rojizas y verdosas, areniscas conglomeráticas y shales negros y carbonáceos. | Comportamiento hidrogeológico más probable: Acuífero semiconfinado. Porosidad dominante: primaria, la cual puede verse incrementada en presencia de meteorización y/o discontinuidades importantes. Sistema de acuíferos discontinuos de muy baja productividad, capacidad específica de 0,05 l/s/m | Jb |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

5.1.8.8.2 Principales zonas de recarga y descarga

Las principales áreas de recarga se identifican con zonas donde afloran las unidades con mayor potencial de infiltración, incluidos depósitos cuaternarios de cualquier tipo, zonas de mayor influencia tectónica caracterizadas por discontinuidades persistentes como el sistema de fallas Pamplona - Chitagá que discurre en dirección dominante paralela al trazado vial, zonas con pendientes moderadas y continuas, zonas con vegetación arbustiva, así como zonas donde la precipitación es mayor. Todos estos elementos fueron considerados en los análisis dando como resultado la distribución geográfica de la recarga indicada en el mapa hidrogeológico (Anexo 5.1.3.3).

De esta manera se tiene que la zona interceptada por el trazado vial se caracteriza a nivel regional por presentar, en términos generales, zonas con mayor capacidad de recarga ubicadas hacia la parte alta de la zona de influencia abiótica, con mayor incidencia en las unidades funcionales 4 y 5. Por otra parte las zonas con mayor capacidad de descarga se ubican en la partes bajas de las cuencas, en particular hacia el valle inferior del río Pamplonita (ver mapa hidrogeológico en el Anexo 5.1.3.3).

En términos generales, las zonas donde se da el proceso de recarga, en mayor o menor grado, de acuerdo con su espesor y permeabilidad retienen el agua de lluvia permitiendo su infiltración en profundidad, para posteriormente drenarla de forma natural en el área de descarga representada especialmente por las laderas bajas del río pamplonita. Otras áreas de descarga natural menos significativas la constituyen los pequeños valles Intermontanos de las quebradas presentes en la zona, todas ellas tributarias del río Pamplonita, siendo las más representativas la Qda Santa Helena, Qda la Cucalina, Qda la Teja, Qda Tulantá, Qda de Jimenez, Qda la Regada, Qda la Estrella, Qda de Medio Lado, Qda Santa Ana, Qda la Colonia, Qda el Laurel, Qda Chiracoca, Qda Llano Bonito, Qda Suarez, Qda Iscalá y Qda Honda. Otro medio de descarga natural lo constituyen los distintos puntos de agua presentes en la región e identificados durante el inventario (ver mapa hidrogeológico).

5.1.8.8.3 Dirección preferencial del flujo subsuperficial y subterráneo

De acuerdo con el análisis de los datos provenientes del inventario presentados en este informe, es de esperar en la zona de influencia del corredor vial una circulación poco profunda y rápida tanto del agua subsuperficial como del agua subterránea, con pocas excepciones asociadas básicamente a los manantiales termales que podrían estar representando circuitos hídricos más largos y profundos.

En consecuencia, se espera que en las zonas donde predominan las unidades geológicas dominadas por rocas cristalinas (Tjgd), lutitas con intercalaciones de calizas, limolitas y areniscas de grano fino (E31, E2c, E11c, Ksm y Kic), caracterizadas por presentar permeabilidades bajas a muy bajas; la dirección dominante del flujo subterráneo siga el contacto entre los depósitos cuaternarios y el basamento rocoso menos alterado, influenciado por las pendientes moderadas de las laderas del terreno que drenan hacia los valles de los principales cursos de agua superficiales antes mencionados. Mientras que en

los sectores donde predominan las unidades geológicas más permeables y fracturadas (E2m, Tpb, Kia, Jg, Jb K2l y Kitm); es de esperar que gran parte del flujo subterráneo penetre al interior de las capas de areniscas, conglomerados, calizas y siga las direcciones del buzamiento de las principales discontinuidades presentes en las mismas (ver mapa hidrogeológico en el Anexo 5.1.3.3).

En relación con la circulación intermedia o mixta relacionada probablemente con algunos puntos de agua que presentan mayores conductividades, incluidos los manantiales termales y considerando el marco geológico y estructural reportado en el informe geológico dominado por el sistema de fallas Pamplona - Chitagá, es de esperar que en las zonas de mayor fracturación, representadas por fallas y diaclasas maestras, presentes potencialmente en el macizo rocoso subyacente (muchas de ellas cubiertas por depósitos recientes), tengan lugar infiltraciones localizadas que seguirán en profundidad la posición dominante de estas discontinuidades geológicas, en dirección preferencial hacia los principales cursos de agua superficiales y cuencas superficiales vecinas que se encuentren conectadas a través de fallas, como las indicadas en el mapa geológico del sector, las cuales para efectos del presente estudio han sido consideradas como potenciales conexiones hidráulicas entre los acuíferos superficiales y aquellos más profundos. Finalmente, una vez ocurrida la saturación de la cobertura cuaternaria de los macizos rocosos, es de esperar que el flujo comience un proceso de escorrentía superficial, siguiendo la topografía dominante hasta integrarse con el sistema de drenaje.

A lo largo de todo el corredor vial de las UF3-4-5 se destaca la presencia de fallas inversas de cabalgamiento y fallas de rumbo asociadas al sistema Pamplona - Chitagá que discurren en dirección preferencia N-S a NNE-SSW. Estas fallas regionales tienen el potencial de condicionar las direcciones de flujo subterráneo a lo largo de su traza facilitando la interconexión entre diferentes cuencas a lo largo del trazado vial.

Los análisis de los datos obtenidos durante el inventario en la mayoría de los puntos censados permiten prever una circulación dominante de carácter subsuperficial y rápida en la zona de influencia de las UF3-4-5. Con algunas excepciones asociadas a flujos mixtos o intermedios y flujos más profundos, estos últimos relacionados con manantiales termales.

5.1.8.8.4 Dinámica del flujo de agua subsuperficial y subterránea

Se describe cada punto de agua censado en la zona de influencia hidrogeológica de las UF3-4-5, tanto para el túnel como para la vía a cielo abierto. Esta descripción constituye un modelo hidrogeológico local o de detalle por cada punto censado, en el que se tienen en cuenta aspectos geológicos, geomorfológicos, estructurales, fisicoquímicos, investigaciones (tomografías eléctricas, sondeos mecánicos, piezómetros) y de cobertura vegetal para definir el punto de surgencia. La mayoría de estos aspectos se consignan en los respectivos formatos FUNIAS y se analizan y describen en el Anexo 5.1.3.1, al cual se remite. En capítulos sucesivos se complementa la descripción de modelo hidrogeológico conceptual para el túnel Pamplonita.

5.1.8.9 Modelos conceptuales de puntos de agua más relevantes para el proyecto

Como parte de los análisis del estudio se describen los puntos de agua que se consideran relevantes para la comunidad, y se presentan los modelos hidrogeológicos conceptuales y análisis de los resultados de la isotopía para los 13 puntos de agua que fueron visitados por la ANLA en el marco de la evaluación del Estudio de Impacto Ambiental dentro del trámite de solicitud de licencia ambiental para el proyecto; y que corresponden a UF3-PA12, UF3-PA26, UF3-PA33 de la Unidad Funciones 3, y UF4-PA17, UF4-PA18, UF4-PA21, UF4-PA26, UF4-PA27, UF4-PA28 UF4-PA-49, UF4-PA51, UF4-PA58, UF4-PA-94 de la Unidad Funcional 4. A todos estos puntos se les elaboró perfil geológico y se les incluyó medidas de manejo orientadas a proteger y garantizar la permanencia del recurso hídrico.

En respuesta a los Requerimientos No.9 y 10 del Acta de No. 85 del 2019 (Acta de Reunion de Información Adicional Exp. Lav.0037-002019) de La Autoridad de Nacional de Licencias Ambientales - ANLA, en el Anexo 5. CARACTERIZACION\5.1 MEDIO ABIOTICO\5.1.3 Hidrogeologia\ANEXO 5.1.3.8_MODELOS HIDROGEOLOGÍCOS Y ISOTOPIA 13 PUNTOS DE AGUA se presentan los modelos hidrogeológicos conceptuales y los análisis de isotopía para los 13 puntos visitados por la ANLA.

Según el análisis de los resultados de Isotopia sólo **cinco (5) de los 13 puntos visitados se clasifican como manantiales: UF3-PA12, UF4-PA49, UF4-PA51, UF4-PA58 y UF4-PA94**, y en consecuencia con el fin de subsanar la restricción de intervención que impone la ronda de protección de 100 mts establecida por Artículo 2.2.1.1.18.2 de la SECCIÓN 18 del Decreto 1076 de 2015, se solicita ocupaciones de cauce para estos cinco (5) puntos de agua clasificados como manantiales (capítulo 7) y en el Capítulo 11.1.1. Plan de Manejo se definen medidas de manejo específicas para los manantiales.

A continuación, se presenta la descripción de los modelos conceptuales para cada uno de los puntos relevantes que incluyen los 13 puntos de agua visitados por ANLA.

- Punto UF3-PA12

La descripción de este punto, junto con el modelo hidrogeológico conceptual y los resultados de Isotopia se presenta en el Anexo 5. CARACTERIZACION\5.1 MEDIO ABIOTICO\5.1.3 Hidrogeologia\ANEXO 5.1.3.8_MODELOS HIDROGEOLOGÍCOS Y ISOTOPIA 13 PUNTOS DE AGUA

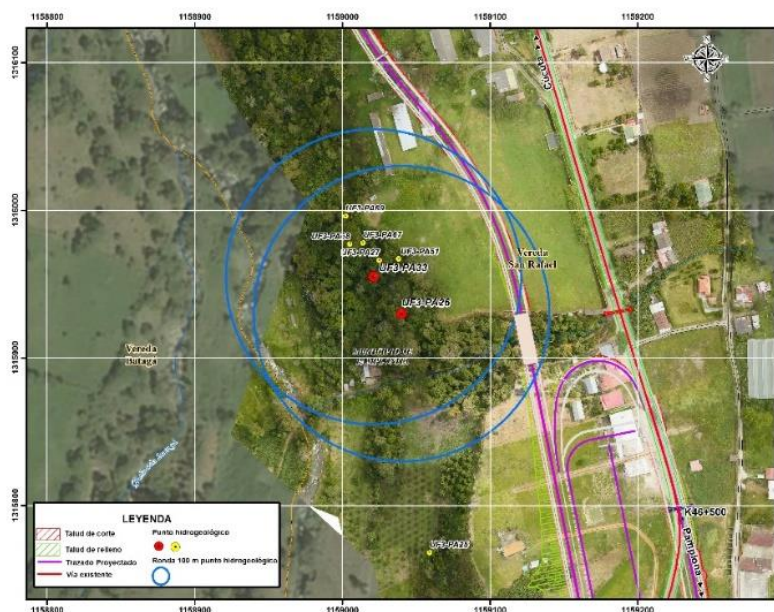
- Punto UF3-PA26 y UF3-PA33

Estos puntos se encuentran ubicados en la vereda San Rafael del municipio de Pamplonita sector El Salvador a la altura del PR 46+300; las coordenadas son: E 1159040 N 1315930 H 1573 para el punto UF3-PA26 y E 1159021 N 1315955 H 1613 para el punto UF3-PA33. Los puntos se encuentran a una distancia de 78 y 90 metros del eje de la vía proyectada respectivamente y en cota inferior a la cota rasante del proyecto (**Figura 5-2.29**); debido a su caudal, uso, número de usuarios y distancia a obra mas cercana, el potencial de

afectación de estos puntos es de nivel 1 (**Tabla 5-2.23**), es decir, corresponden a puntos de agua en los cuales no se prevé afectación o su potencial es muy bajo a imperceptible. Los puntos se clasifican como manantiales a pesar de tener una condición geológica que no necesariamente implica esa caracterización. Sin embargo, por su incidencia en términos de ser fuente alterna de recurso hídrico para algunos pobladores y la conveniencia de enfatizar en su protección, se clasifican como tal.

Los modelos hidrogeológicos conceptuales y los resultados de Isotopia para estos puntos se presenta en el Anexo 5. CARACTERIZACION\5.1 MEDIO ABIOTICO\5.1.3 Hidrogeologia\ANEXO 5.1.3.8_MODELOS HIDROGEOLOGÍCOS Y ISOTOPIA 13 PUNTOS DE AGUA

Figura 5-2.29. Ubicación de los puntos UF3-PA26 y UF3-PA33.



Fuente: UVRP, 2019

Geologicamente los puntos UF3-PA26 y UF3-PA33 se encuentran ubicados en la parte distal de un abanico aluvial formado por la quebrada Santa Helena y otros drenajes menores como la quebrada NN116; esta zona distal del abanico esta disectada por el rio Pamplonita produciendo un escarpe o frente de socavación por donde se da la surgencia (**Figura 5-2.30**). El abanico aluvial es matriz-soportado con matriz areno-limosa y clastos subredondeados a subangulosos (origen torrencial) predominantemente de areniscas provenientes de la Fm Barco, mientras que el porcentaje de finos en la matriz lo aportan las unidades con niveles arcillosos que están hacia el ápice del abanico (Fm Colon-Mito Juan, Fm Los Cuervos).

No ocurrirá ninguna afectación directa sobre el flujo subsuperficial que alimenta las

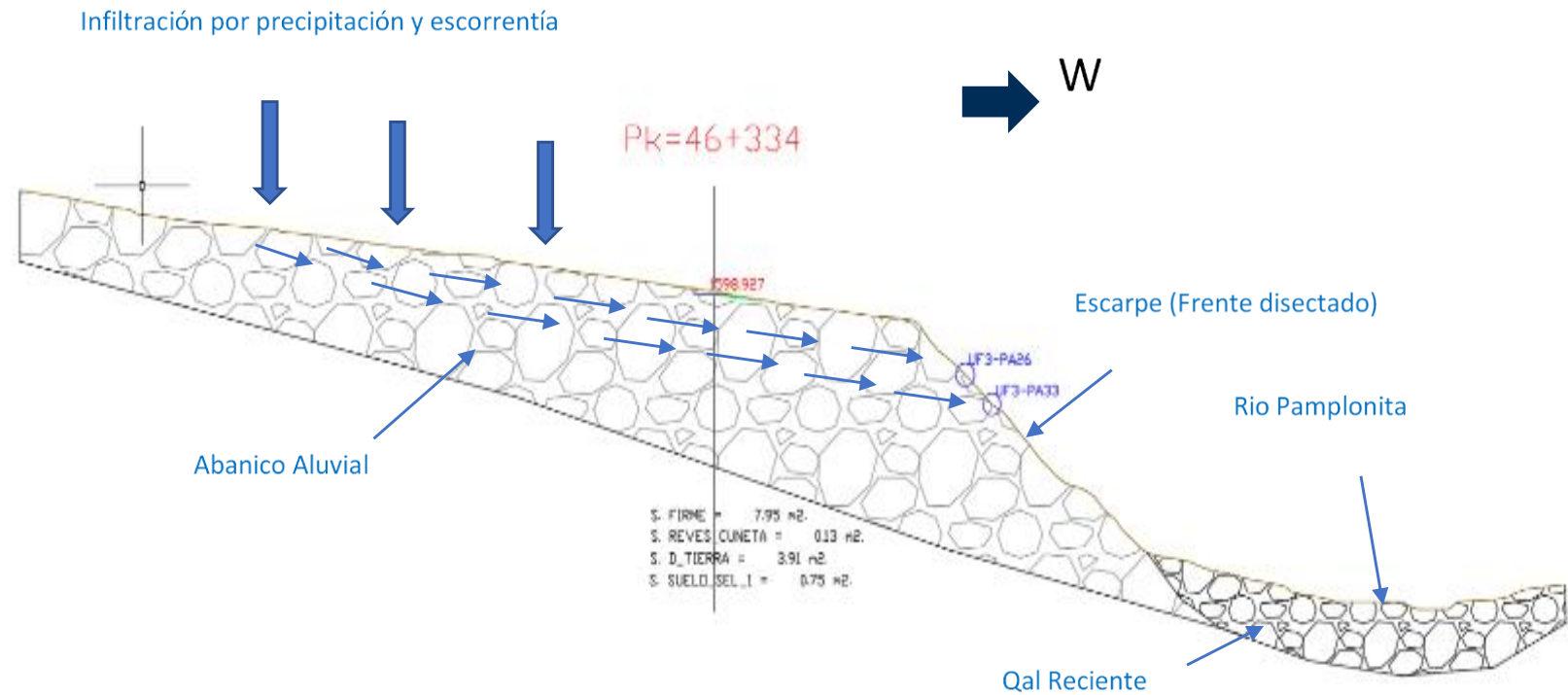
surgencias, pero en el caso de necesitarse una medida extendida en el tiempo, la **Tabla 5-2.24** contempla incluir las medidas de demarcación de aislamiento y tanque de protección (**Figura 5-2.89 y Figura 5-2.86**) que se describen en el numeral 5.1.8.12.3 de este documento.

Figura 5-2.30. Escarpe de socavación zona distal del abanico aluvial con ubicación de los puntos UF3-PA26 y UF3-PA33



Fuente: UVRP, 2019

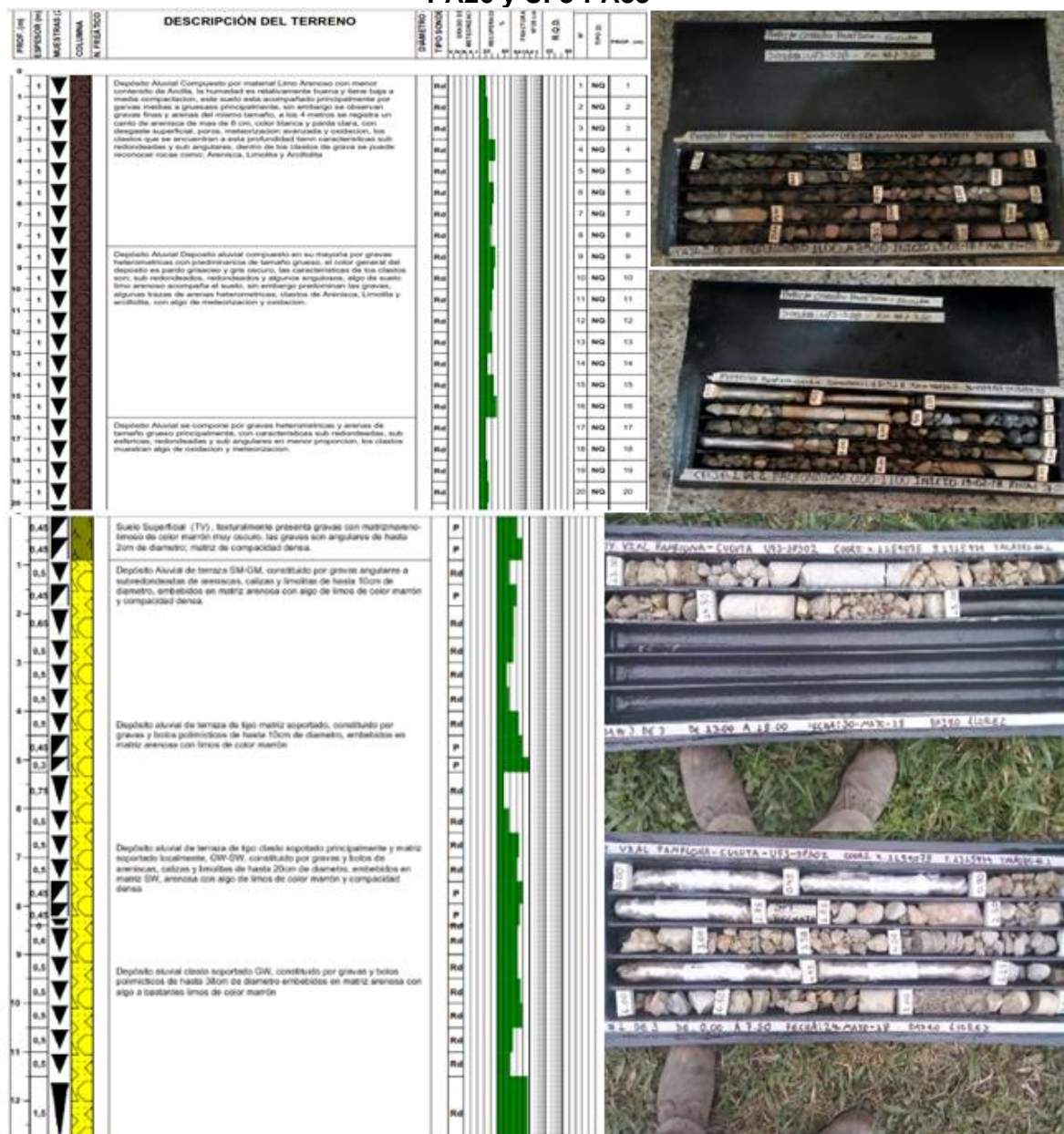
Figura 5-2.31. Perfil geológico puntos UF3-PA26 y UF3-PA33



Fuente: UVRP, 2019

La **Figura 5-2.31** muestra el perfil geológico de los puntos en cuestión y en ella se puede observar que la surgencia de agua es generada por infiltración de aguas meteóricas en la terraza del abanico aluvial las cuales no alcanzan el nivel freático y reaparecen en el escarpe disectado por el río Pamplonita, prueba de ello son Los bajos caudales, la intermitencia en las surgencias y los parámetros fisicoquímicos tomados in situ.

Figura 5-2.32 Sondeos sobre abanico aluvial donde se encuentran los puntos UF3-PA26 y UF3-PA33



Fuente: UVRP, 2019

- Puntos UF3-PA39 y UF3-PA40

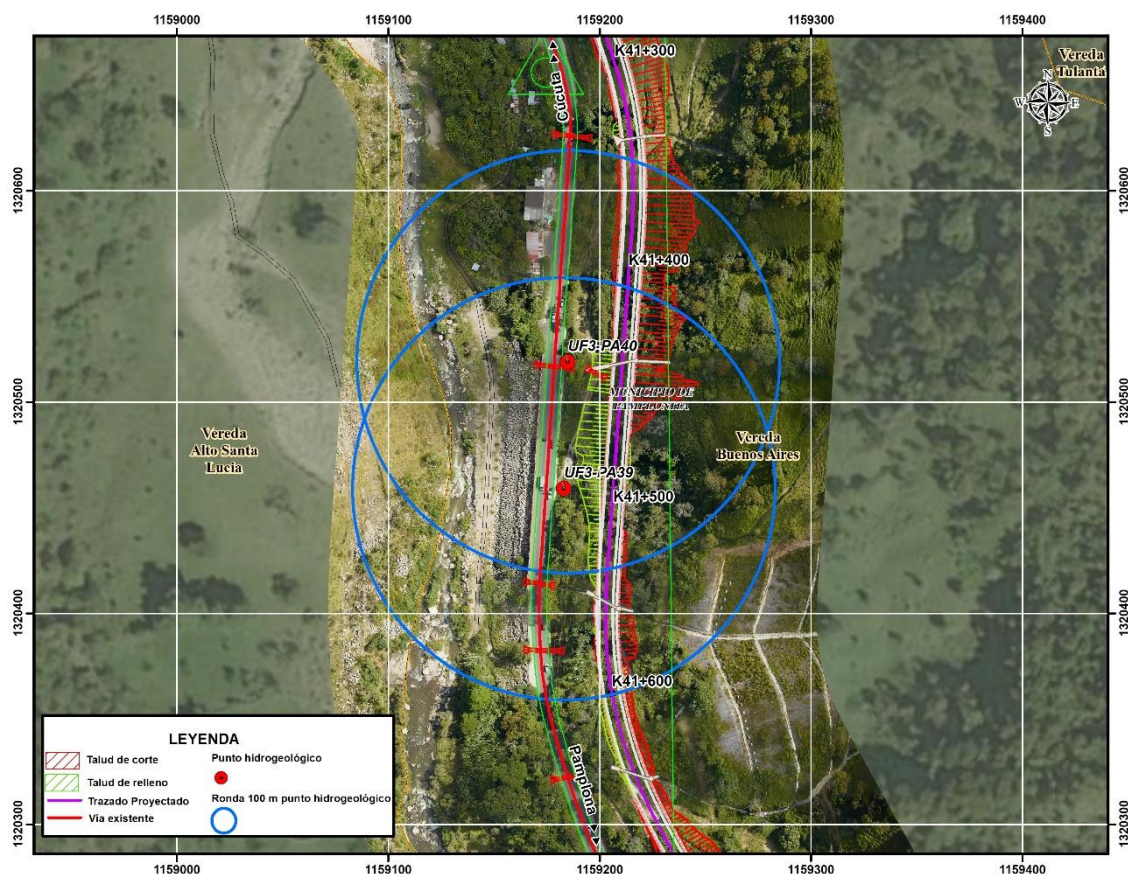
Estos puntos se encuentran ubicados en la vereda Buenos Aires del municipio de Pamplonita entre los PK 41+400 y 41+500 al borde de la vía actual (trazado verde **Figura 5-2.33**), las coordenadas para estos puntos son:

UF3-PA39: 1159183 E 1320459 N

UF3-PA40: 1159185 E 1320519 N

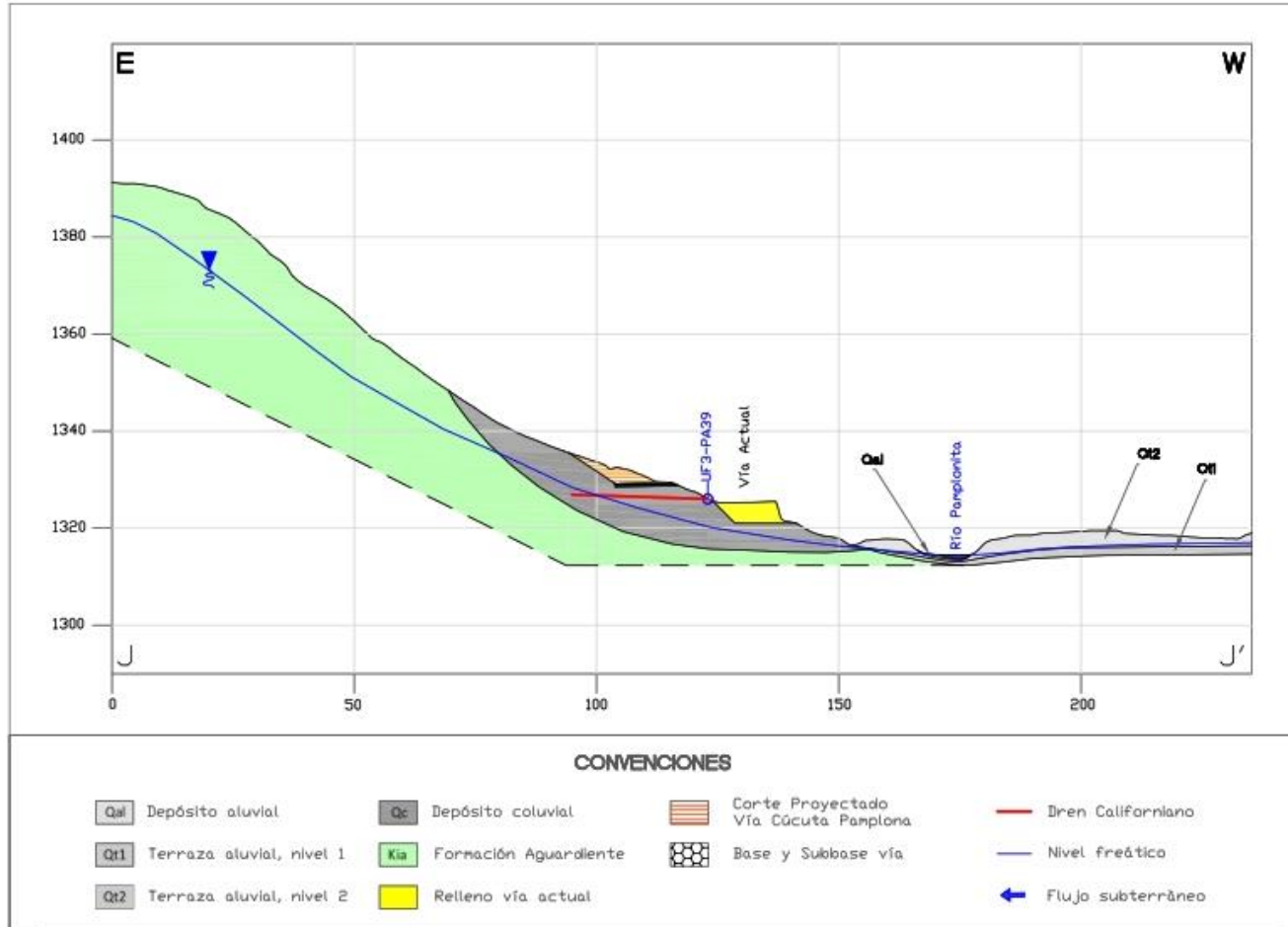
Y se encuentran en cota inferior a la de la rasante del proyecto.

Figura 5-2.33 Ubicación de los puntos UF3-PA39 y UF3-PA40



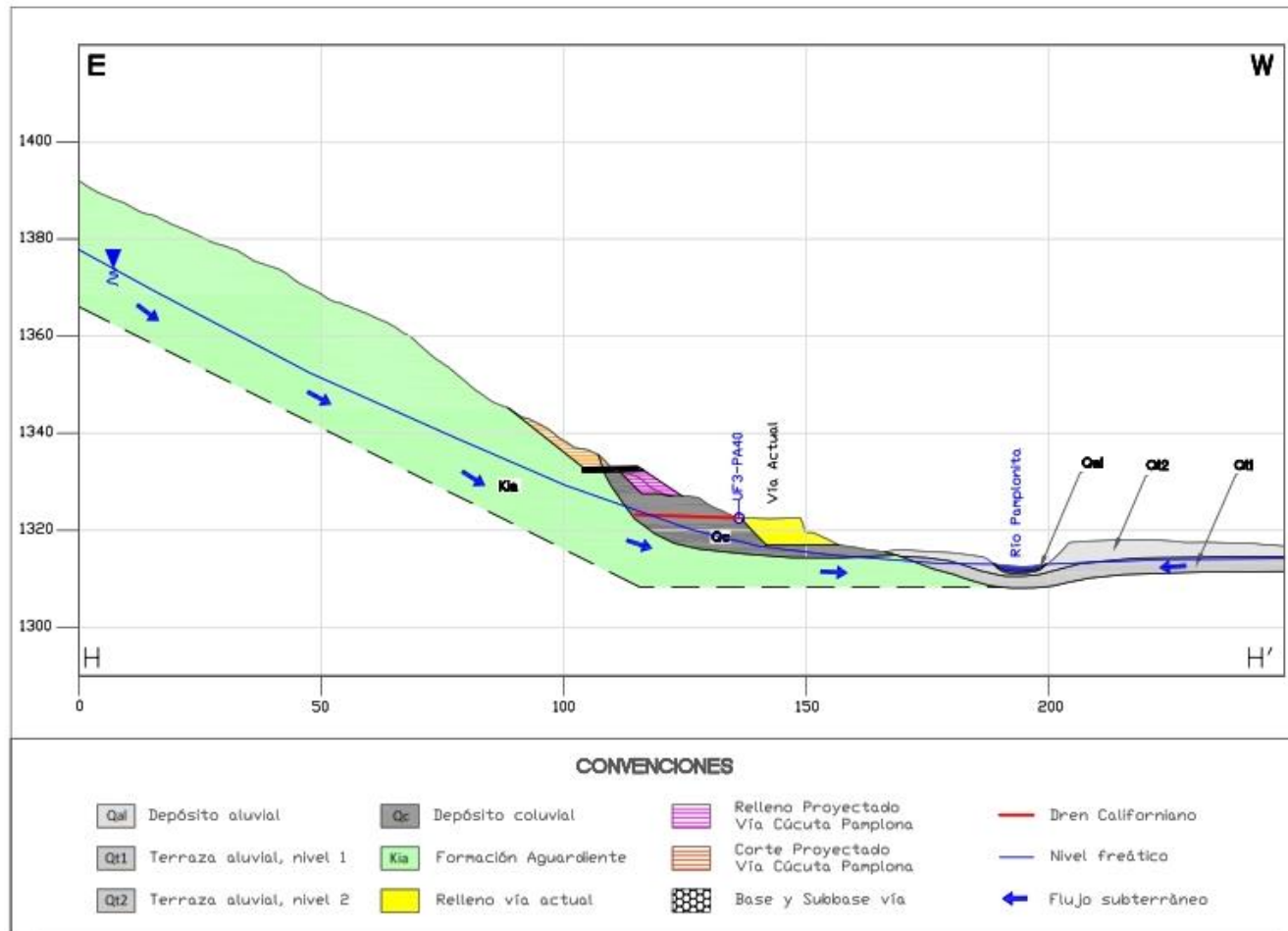
Fuente: UVRP, 2019

Figura 5-2.34 Perfil geológico punto UF3-PA39



Fuente: UVRP, 2019

Figura 5-2.35 Perfil geológico punto UF3-PA40



Fuente: UVRP, 2019

Los puntos están ubicados sobre un coluvión de bajo espesor matriz-soportado de características litológicas areno-arcillosas en la matriz y clastos predominantes de areniscas provenientes de la Fm Aguardiente. Con ensayos de campo se logro caracterizar la matriz con plasticidad media a baja y permeabilidad media a alta (**Figura 5-2.34** y **Figura 5-2.35**).

Las surgencias de agua se generaron cuando el terreno fue cortado para construir los taludes de la via actual y de otro acceso veredal paralelo. Este corte antrópico interceptó el nivel freático de un acuífero colgado que fluye a través de la matriz areno arcillosa del coluvión. Este flujo generado por el corte antrópico es aprovechado por los vecinos del sector, los cuales realizaron apiques e insertaron tubería de 3 pulgadas a manera de dren californiano para aumentar el caudal obtenido con el corte de la vía (**Figura 5-2.36**).

En caso de generarse afectación directa sobre el nivel freatico, la Tabla 5-2.24 contempla incluir las medida de manejo de talud de recoleccion (**Figura 5-2.92**) que se describe en el numeral 5.1.8.12.3 de este documento.

Figura 5-2.36 Tuberia enterrada para obtención de agua en los puntos antrópicos UF3-PA39 y UF3-PA40



Fuente: UVRP, 2019

- Punto UF4-PA16

Este punto esta ubicado en la vereda Zarcuta, PR 27+350 (coordenadas 1159712 E 1333818 N 952 H) en inmediaciones de la quebrada “los toches”, el cual es un drenaje de muy bajo caudal y estacionario. El punto se encuentra en el eje del trazado de la nueva calzada Pamplona-Cúcuta (**Figura 5-2.37**), en un tramo donde se tiene proyectado realizar un terraplen para la nueva via (**Figura 5-2.40**). Este flujo infiltrado no alcanza los niveles piezométricos del acuífero propiamente dicho y resurge aprovechando las características de permeabilidad del coluvión (**Figura 5-2.39**)

Figura 5-2.37 Ubicación del punto UF4-PA16



Fuente: UVRP, 2019

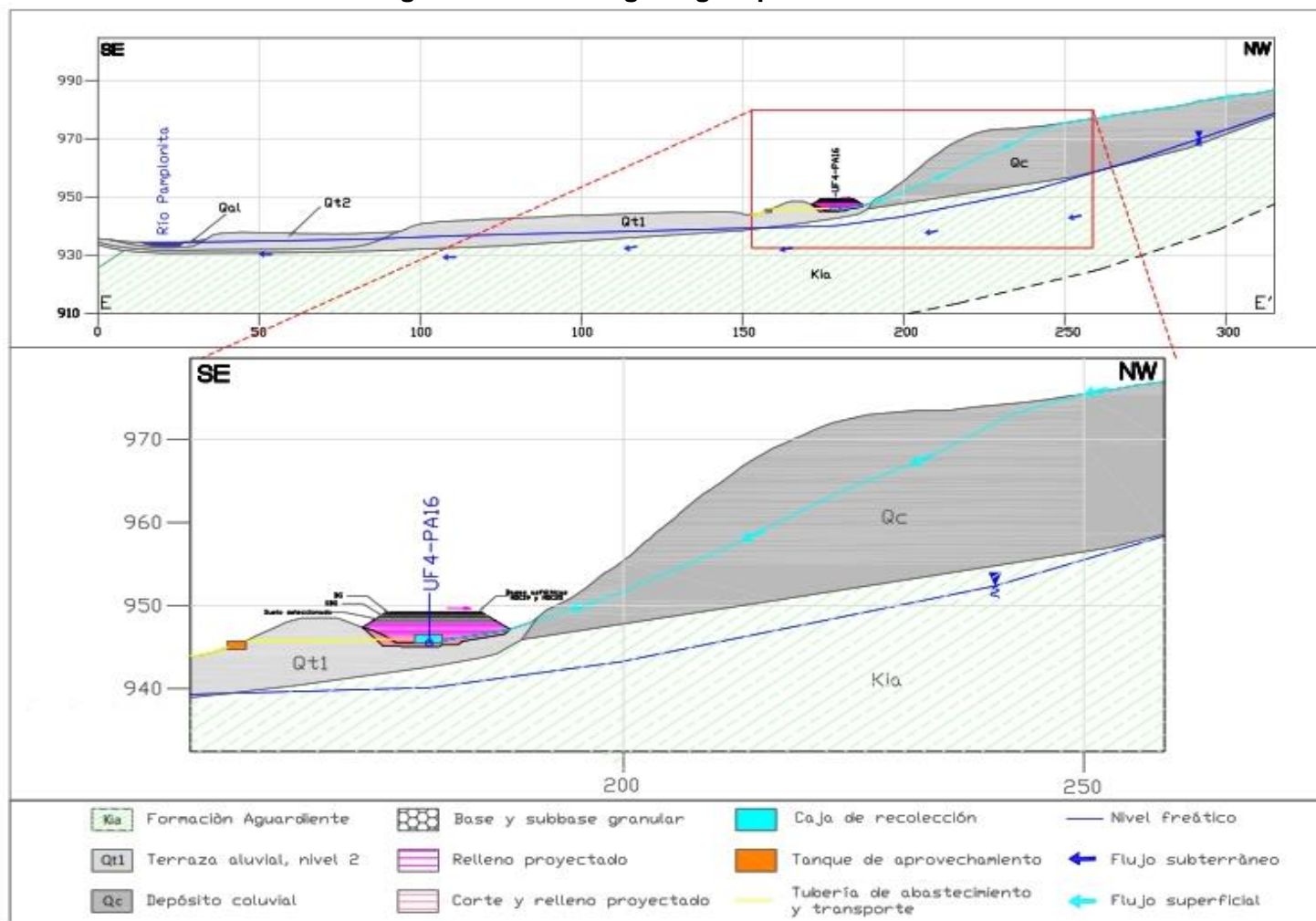
Figura 5-2.38 Imagen 3D con ubicación del punto UF4-PA16



Fuente: UVRP, 2019

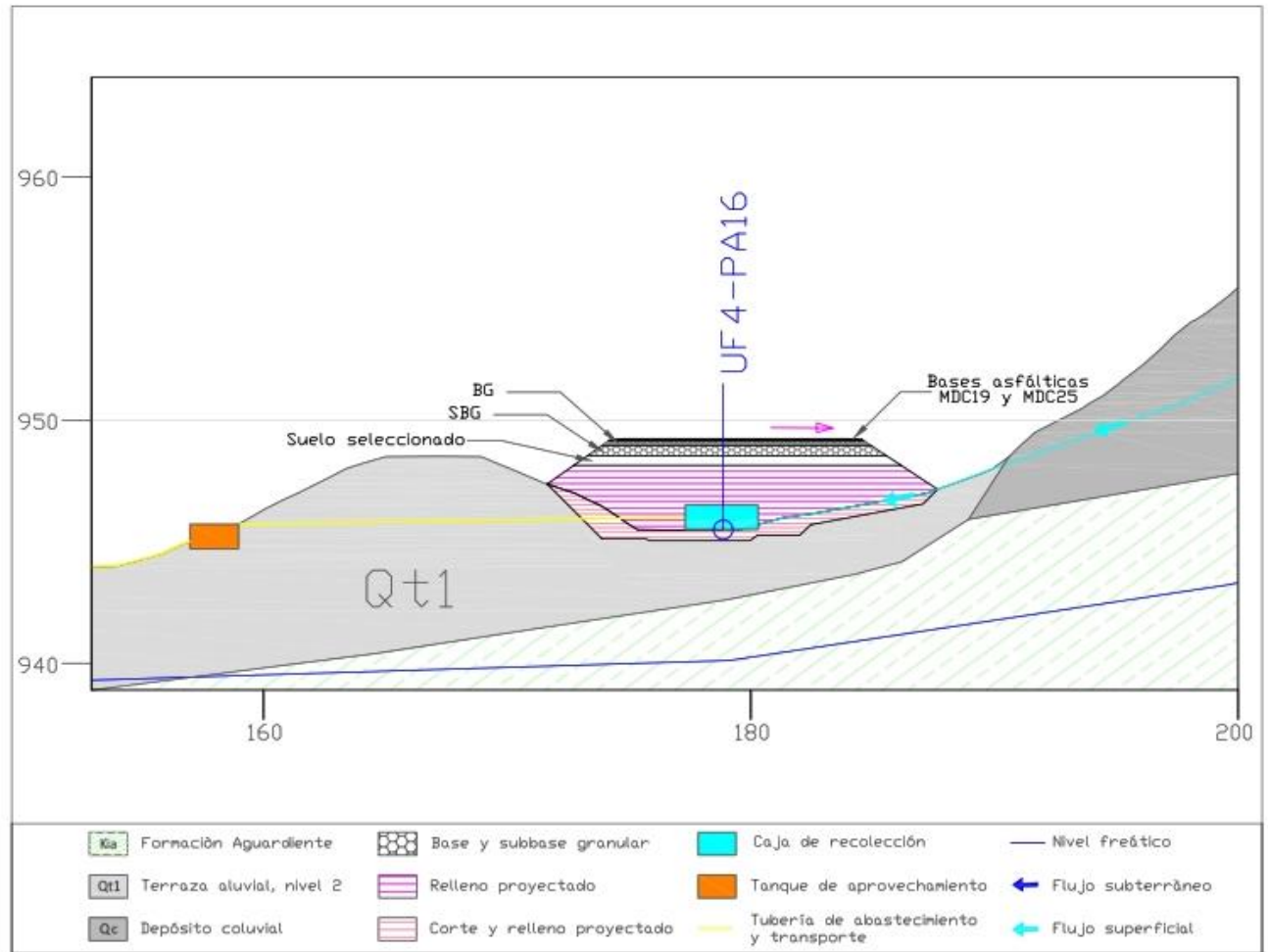
El punto UF4-PA16 se puede describir como una pequeña surgencia de muy bajo caudal (0.021 l/s) que geológicamente se encuentra cerca al contacto entre un depósito coluvial matriz-soportado y terrazas aluviales del río Pamplonita (Figura 5-2.39); en el punto, la litología predominante es un depósito matriz-soportado de cantos y guijos de areniscas embebidos en una matriz limo-arenosa de alta permeabilidad y baja plasticidad, por lo cual favorece el flujo subsuperficial.

Figura 5-2.39 Perfil geológico punto UF4-PA16



Fuente: UVRP, 2019

Figura 5-2.40 Perfil geológico detallado del punto UF4-PA16



Fuente: UVRP, 2019

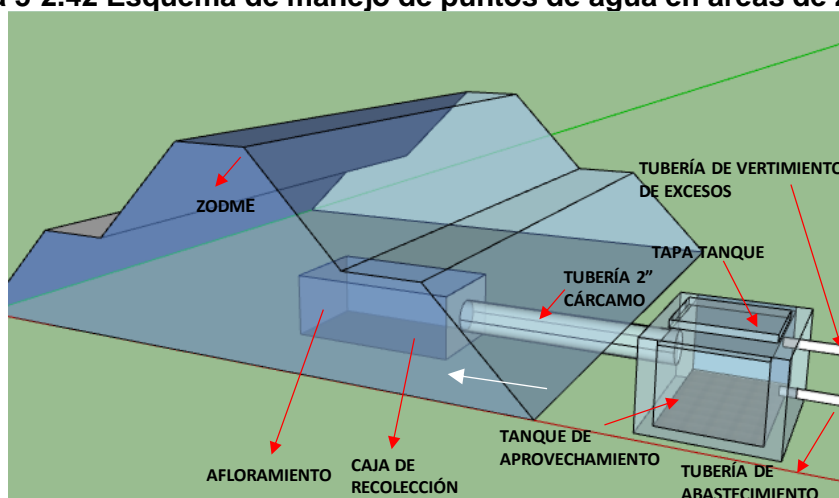
Debido a su escaso caudal, a su situación geológica y a la ausencia de usuarios, el punto se puede clasificar como resurgencia, por lo cual no presenta ninguna implicación ambiental ni de diseño (Figura 5-2.41Figura 5-2.41); sin embargo, es necesario garantizar la continuidad del flujo estacionario, para ello se utilizara la medida de manejo que se implementara para el traslado de puntos de agua en ZODMES. La Figura 5-2.42 presenta un esquema conceptual de la implementación de la estructura de recuperación y traslado de un punto de agua.

Figura 5-2.41 Fotografía del punto de agua UF4-PA16 donde se puede observar el bajo caudal surgente



Fuente: UVRP, 2019

Figura 5-2.42 Esquema de manejo de puntos de agua en áreas de zodmes



Fuente: Geodata, 2018


- Puntos UF4-PA17, UF4-PA18 Y UF4-PA101

Los puntos UF4-PA17 y UF4-PA18 se encuentran ubicados en la vereda Calaluna sector “La Tomatera” del municipio de Bochalema, dentro del predio “El Potrerito”. Dicho predio contó con usuarios de estos dos puntos de agua hasta el mes de marzo de 2019, cuando fue entregado a la ANI mediante la figura de “entrega anticipada” como parte de la adquisición de predios para el Proyecto objeto de este Estudio. En la actualidad ya no se tienen usuarios para estos puntos de agua. Las coordenadas de UF4-PA17 y UF4-PA18 respectivamente son: (1159599 E 1335645 N y 1159611 E 1335667 N).

Los modelos hidrogeológicos conceptuales y los resultados de Isotopia para estos puntos se presenta en el Anexo 5. CARACTERIZACION\5.1 MEDIO ABIOTICO\5.1.3 Hidrogeologia\ANEXO 5.1.3.8_MODELOS HIDROGEOLOGÍCOS Y ISOTOPIA 13 PUNTOS DE AGUA.

Como respaldo de esto, se cuenta a la fecha de preparación de este documento con el soporte de la entrega a la ANI, del predio donde se encuentran los usuarios de estos puntos, la cual se efectúa mediante una figura de “Entrega Anticipada” de la cual se presenta un aparte donde explícitamente se cita el procedimiento, el cual se muestra en la **Figura 5-2.40**.

Figura 5-2.43 Documento de entrega anticipada del Predio El Potrerito del señor Gilberto Gómez con ficha predial PC-04-0046 (Fragmento)

| | | |
|---|-------------------------------------|-------------------|
|  | CONCESIÓN UNIÓN VIAL RÍO PAMPLONITA | Versión: 1 |
| | PERMISO DE INTERVENCIÓN VOLUNTARIO | Fecha: 25-05-2018 |
| | GESTIÓN PREDIAL | |

c) Que en consecuencia el **CONCESIONARIO** se encuentra debidamente facultado por la ANI - para adelantar toda la gestión predial en cumplimiento de las disposiciones contenidas en el Artículo 58 de la Constitución Política de Colombia y el Capítulo VII de la Ley 388 de 1997 y el Título IV, Capítulo I de la ley 1682 de 2013, modificada por la Ley 1742 de 2014 y 1882 de 2018.

En virtud de lo anterior,

ACUERDAN

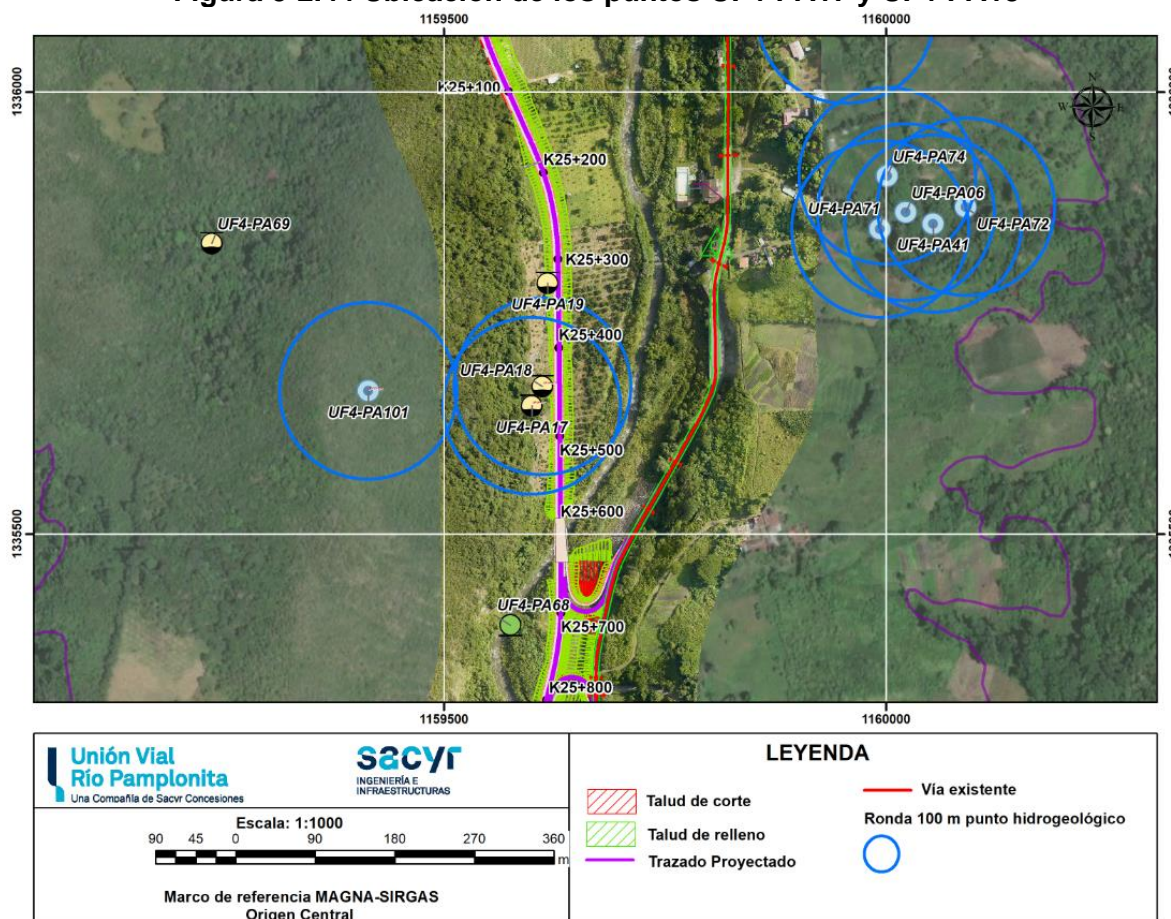
PRIMERO: De conformidad con lo dispuesto en el artículo 27 de la Ley 1682 de 2013, modificado por el artículo 11 de la Ley 1882 de 2018, de manera libre, espontánea y con el ánimo de colaborar con la ejecución del **PROYECTO**, **EL TITULAR** otorga a **LA ENTIDAD** un Permiso de Intervención Voluntario sobre **EL PREDIO**, de carácter irrevocable, de tal forma que ésta, a través del Concesionario, pueda iniciar en él las actividades del **PROYECTO**, constituyéndose en entrega anticipada que se hace efectiva con la firma del presente Acuerdo y la entrega material perfeccionada mediante el presente documento. Lo anterior, sin perjuicio de los eventuales derechos que puedan tener terceros sobre el inmueble, los cuales no surtirán afectación o detrimento alguno con el permiso aquí otorgado.

Nota: Ver explicación de la figura legal de entrega anticipada al final de la Tabla 5-2.24

Fuente. Unión Vial Río Pamplonita 2019

La Figura 5-2.44 presenta la ubicación de los puntos y su situación respecto al trazado de la vía proyectada. Respecto al punto UF4-PA101, se trata de un manantial ladera arriba de los dos puntos de agua referidos.

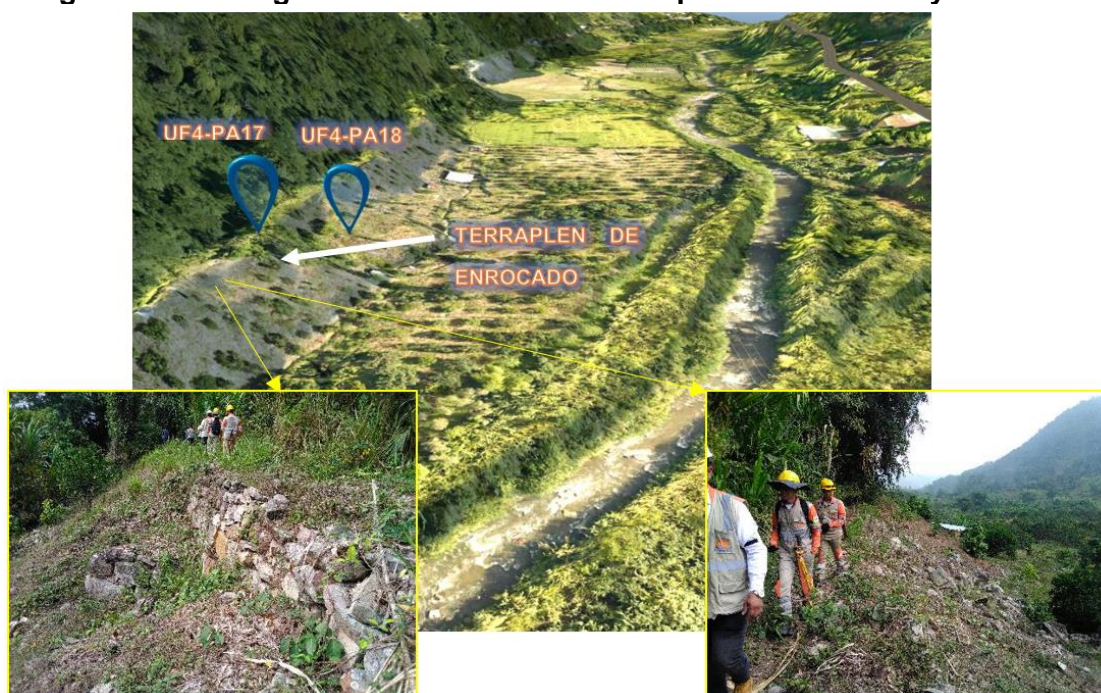
Figura 5-2.44 Ubicación de los puntos UF4-PA17 y UF4-PA18



Fuente: UVRP, 2019

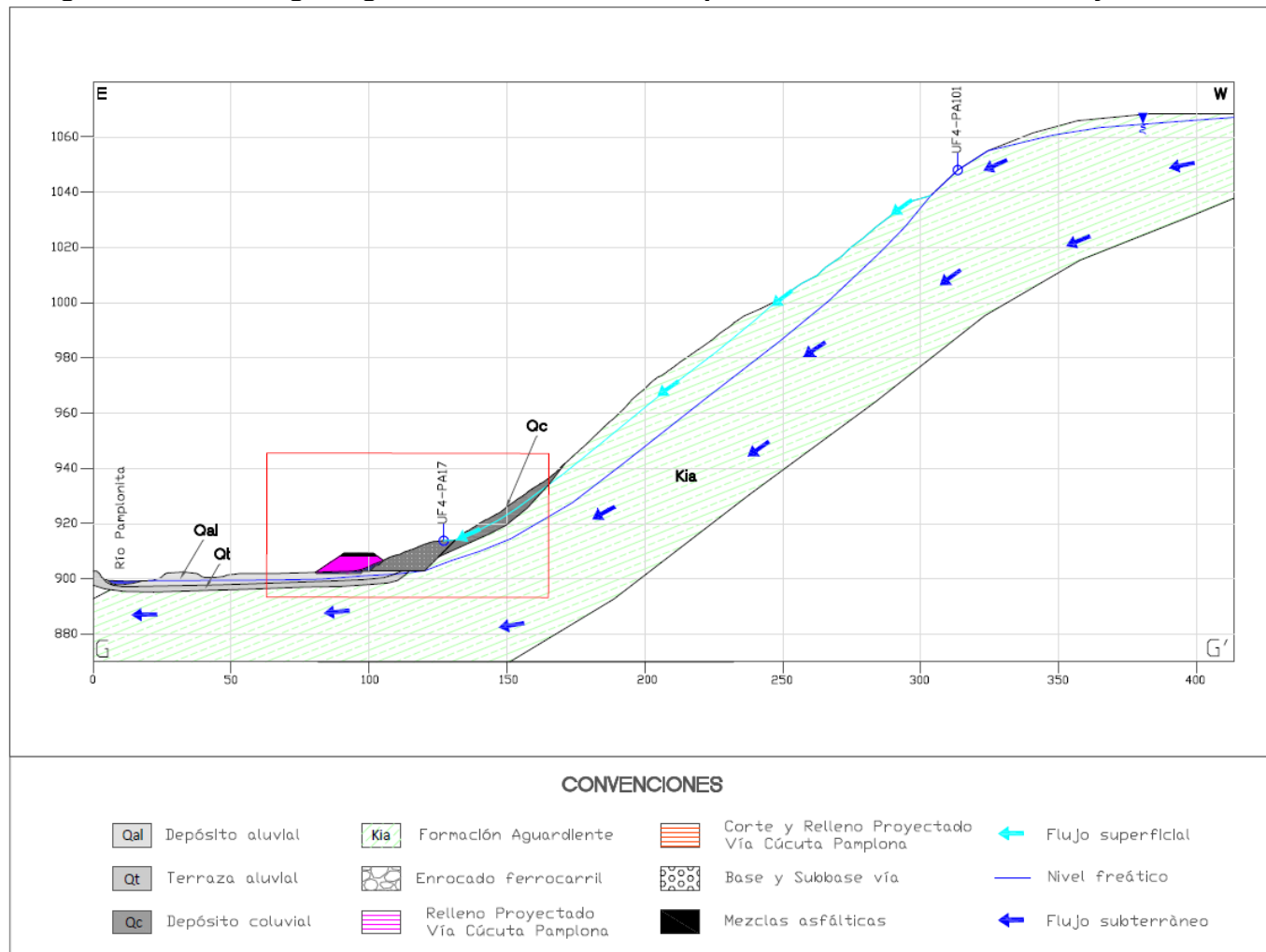
Hidrogeológicamente, los puntos UF4-PA17 y UF4-PA18 corresponden a dos surgencias naturales que se presentan dentro de un terraplen de enrocado construido para la antigua vía del tren. La Figura 5-2.45 muestra una imagen 3D de la zona donde se puede diferenciar el terraplen. El agua de estas surgencias proviene de un drenaje natural de escaso caudal asociado al manantial UF4-PA101 (Figura 5-2.46), el cual aflora sobre rocas de la Fm Aguardiente y sigue su cauce superficial hasta el contacto con el deposito antropico de enrocado, donde, por la alta permeabilidad y porosidad del enrocado, el drenaje superficial se profundiza llenando los espacios vacios de la estructura antrópica, para luego resurgir en los puntos UF4-PA17 y UF4-PA18 (Figura 5-2.47). Debido a que el agua de estos puntos está asociada a los flujos hipodérmicos en la cara del terraplén que dan hacia la ladera, estos pueden ser clasificados como manantial.

Figura 5-2.45 Imagen 3D con ubicación de los puntos UF4-PA17 y UF4-PA18



Fuente: UVRP, 2019

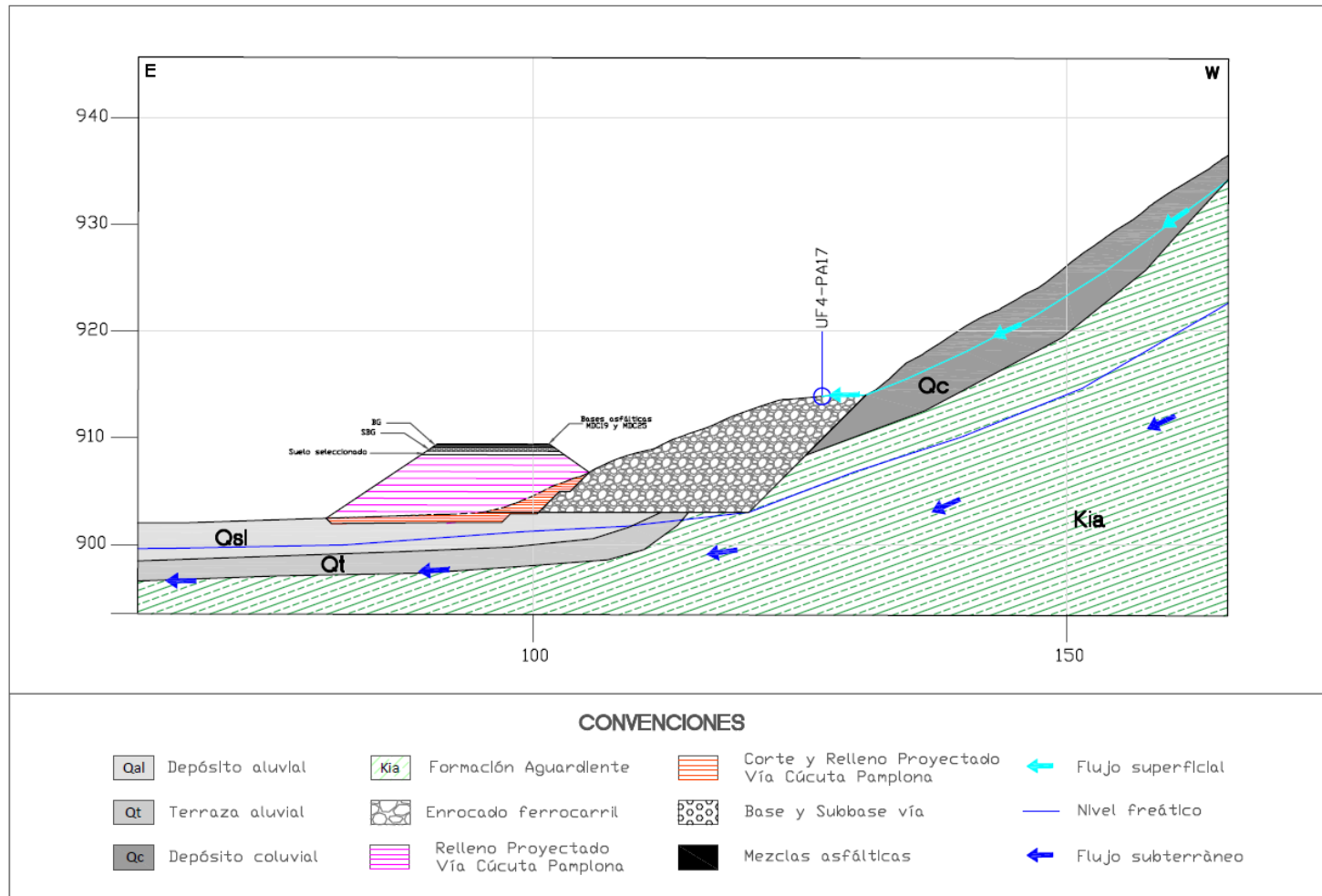
Figura 5-2.46 Perfil geológico con ubicación de los puntos UF4-PA17 - UF4-PA18 y UF4-PA101



Fuente: UVRP, 2019

Figura 5-2.47 Perfiles geológicos detallados de los puntos UF4-PA17 y UF4-PA18

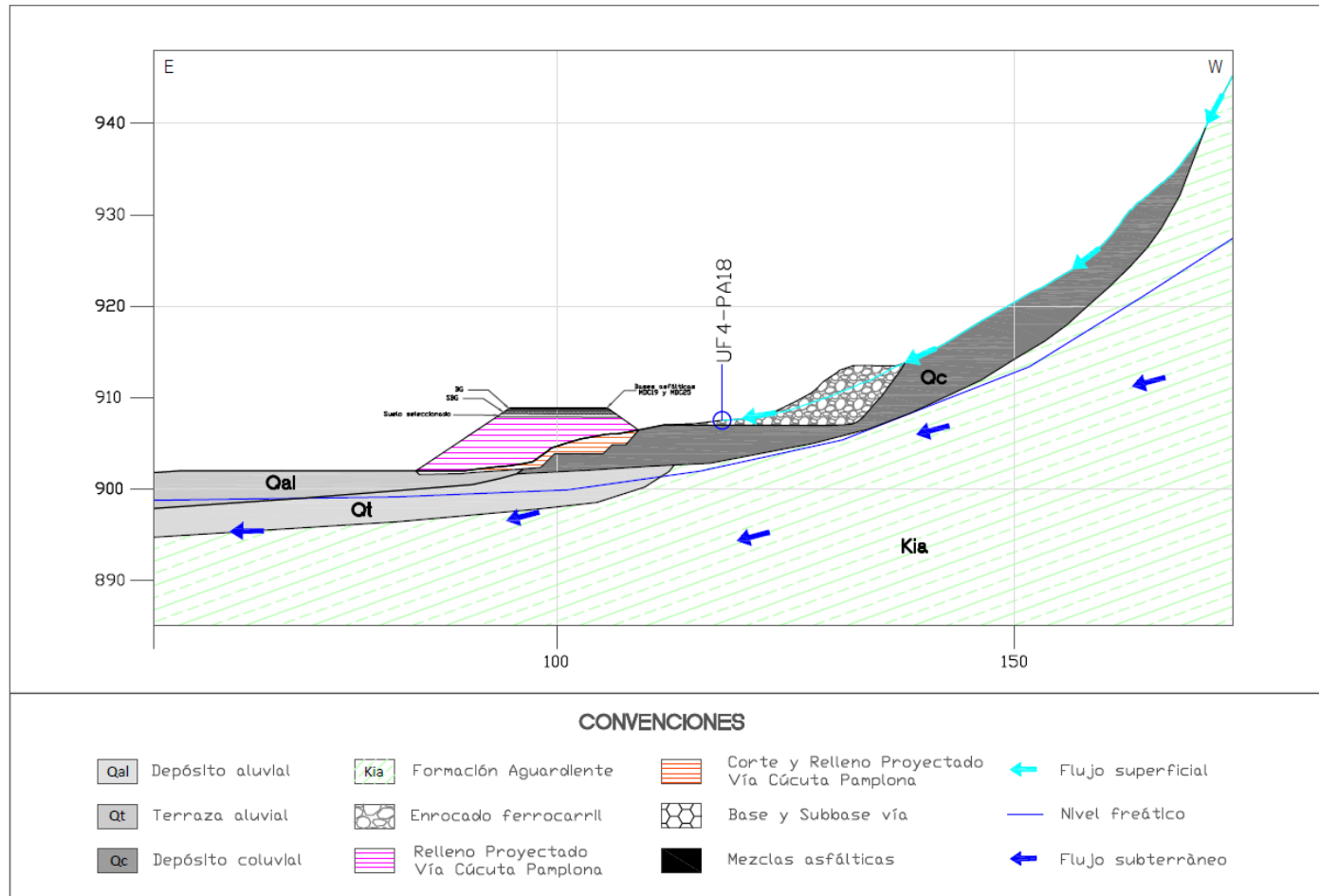
a) UF4-PA17



Fuente: UVRP, 2019

Figura 5-2.48 Perfiles geológicos detallados de los puntos UF4-PA17 y UF4-PA18

b) UF4-PA18



Fuente: UVRP, 2019

Es importante resaltar que el usuario realizó pequeñas excavaciones a manera de aljibe en cada uno de los puntos (**Figura 5-2.49**), debido a que, según lo menciona el mismo propietario, la surgencia no es perenne y en gran parte del año se profundiza; lo anterior permite inferir que el agua surgente en los puntos en cuestión, tiene un alto porcentaje de aporte de aguas lluvias.

Entre las medidas de manejo convencionales previstas para la posible afectación directa sobre estos puntos, se contempla incluir la demarcación de aislamiento y construcción de tanque de protección (**Figura 5-2.89 y Figura 5-2.86**) las cuales se describen en el numeral 5.1.8.12.3 de este documento.

Figura 5-2.49 Fotografía de los puntos UF4-PA17 - UF4-PA18



Fuente: UVRP, 2019

Inconveniencia de cambiar alineamiento en puntos UF4-PA17 y UF4-PA18 por aspectos de trazado

A pesar de que los modelos hidrogeológicos conceptuales y resultados de isotopía permiten concluir que estos puntos no son manantiales y que en consecuencia no aplica la restricción de zona de exclusión de 100 mt., a continuación, se presentan los argumentos sobre la inconveniencia de cambiar el alineamiento del eje vial en el sector de localización de los puntos UF4 PA-17 y UF4 PA-18.

Aspectos generales

El diseño geométrico de la unidad funcional 4 ha sido definido de acuerdo con los requerimientos contractuales recogidos en el Apéndice Técnico 1 y a las normas y criterios establecidos en el Manual de Diseño Geométrico INVIAS 2008.

Con el propósito de garantizar condiciones de estabilidad, el trazado está integrado e interactúa con los estudios geológicos, geotécnicos del corredor, de esta manera ha sido necesario efectuar modificaciones al trazado de manera iterativa hasta conseguir que cumpla con todas las condiciones.

Teniendo en cuenta que la vía es de categoría primaria de una calzada (pues las calzadas proyectadas se tratan de forma independiente) en terreno montañoso y escarpado, la tabla 2.1 del el Manual de Diseño Geométrico INVIAS 2008 establece su velocidad de diseño VTR en un valor no menor a 60 km/h. Dicho valor ha sido adoptado como velocidad de diseño de todas las calzadas proyectadas.

Para las vías proyectadas, se ha realizado el estudio de velocidades específicas, en base al trazado, para asegurar el cumplimiento de la obligación recogida en el MDG-2008 de que la velocidad específica no supere la VTR en más de 20 Km/h.

En general, para este diseño, se han utilizado curvas espirales, las cuales proporcionan una trayectoria natural y fácil de seguir por los conductores, de tal manera que la fuerza centrífuga crece o decrece en la medida que el vehículo entra o sale de una curva horizontal. Adicionalmente mediante la aplicación de espirales se suprimen las discontinuidades notorias al comienzo y al final de la curva circular.

Teniendo en cuenta los parámetros citados, el diseño propuesto para la UF4 cumple con lo establecido en el MDG-2008 y a su vez aprovechando la vía del ferrocarril existente para un mejor manejo de rellenos y excavaciones, y en lo posible afectando lo menos posible los taludes de la ladera existente (contiguos a la Vía férrea).

El eje de la Unidad Funcional 4 (Calzada nueva), fue implantado sobre el terraplén existente de la antigua vía férrea, con el fin de mitigar los impactos ambientales, sociales y potenciales problemas prediales. Adicionalmente, en el aspecto técnico se garantiza un mejor desarrollo de las obras dado que se mitigan las intervenciones sobre laderas y

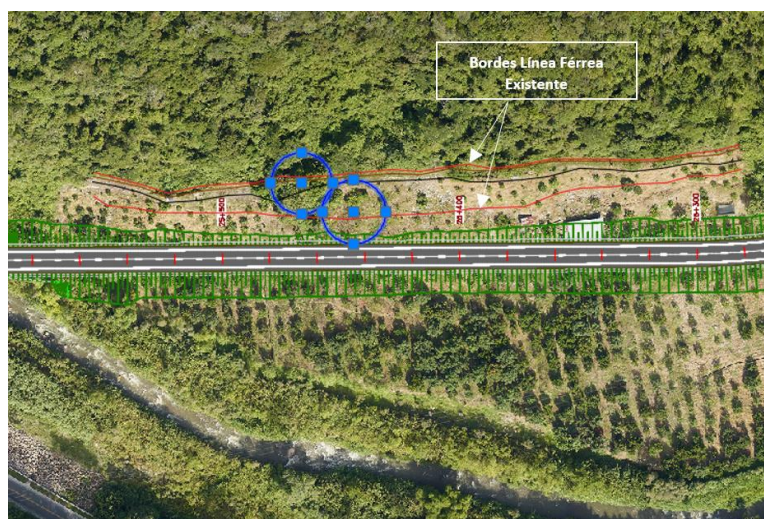
bosques, asegurando simultáneamente un adecuado comportamiento funcional y estructural de los elementos a construir. Por otra parte, para cumplimiento de las especificaciones técnicas del contrato, en algunos sectores fue necesario desplazar el eje respecto al terraplén existente de la antigua vía férrea. Sin embargo, para estos casos particulares y con el fin de mitigar los impactos, se dejó como límite el borde externo de dicho terraplén.

Aspectos específicos

- La alternativa sin cambio de trazado está diseñada para poder empalmar los retornos en ambos sentidos, en la propuesta con cambio de trazado no hay el espacio suficiente para empalmar el retorno que se dirige a Cúcuta.
- Para la alternativa con cambio de trazado es necesaria la construcción de un puente de 240 metros por el tipo de topografía, y para poder cumplir con los criterios del diseño vertical del Manual de diseño geométrico.
- La construcción de este puente conllevaría a una mayor afectación forestal y ronda de río ya que para la construcción de la infraestructura del puente se necesita accesos para la maquinaria.
- Adicionalmente, el impacto a la movilidad de las comunidades vecinas al proyecto se logra mitigar completamente, garantizando los accesos hacia la nueva calzada y la calzada existente.

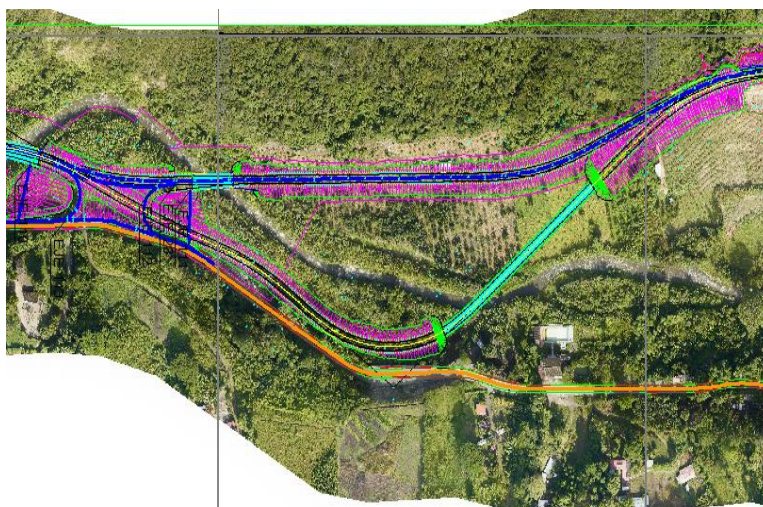
Figura 5-2.50 Aspectos de trazado UF4-PA17 y UF4-PA18

a)



Fuente: Unión Vial Río Pamplonita 2019

b)



Fuente: Unión Vial Río Pamplonita 2019

Inconveniencia de cambiar alineamiento en puntos UF4-PA17 y UF4-PA18 por aspectos de geología y geotecnia

Los puntos mencionados, se localizan en la margen izquierda del río pamplonita, aproximadamente a 10 m y 25 m del trazado de proyecto.

El trazado actual de proyecto corre adyacente a un antiguo relleno estructural (Rt) de naturaleza antrópica, clasto soportado de compacidad densa, según la campaña de exploración geotécnica ejecutada, lo cual permite concluir que es un material apto para construir sobre este los terraplenes que se tienen proyectados para la vía nueva.

La alternativa de trazado modificado trasladando el eje con el fin de eludir las potenciales áreas de exclusión de algunos puntos de agua, discurrirá sobre un depósito aluvial (Qal) joven, con posible presencia de retrabajos por encontrarse muy cercano al cauce del río, lo que no le permite presentar una madurez textural adecuada, esto a su vez repercute en la calidad geotécnica de los materiales que lo conforman, los cuales pueden presentar una compacidad floja, tendencia a asentarse notablemente ante la presencia de cargas externas, esto debido a la redistribución de sus componentes por la falta de madurez textural antes mencionada.

La alternativa de trazado requiere la construcción de un puente. Este puente requiere de al menos 7 pilas de al menos 10 m de altura y dos estribos, el cual deberá ser construido en su totalidad sobre el depósito aluvial (Qal), mencionado en anteriores ocasiones, requiriendo para ello la excavación de al menos 18 caisson de 2 m de diámetro y 15 m de profundidad con sus consecuentes repercusiones sobre la dinámica fluvial y con la necesaria construcción de estructuras de protección para evitar la socavación de las pilas, toda esta obra civil se ejecutara en un material de pobres calidades geotécnicas como se

ha venido describiendo. Por lo cual no se considera adecuado el trazado opcional en relación con el trazado original, el cual ha mostrado sus bondades geotécnicas y geológicas durante la etapa de estudios realizada.

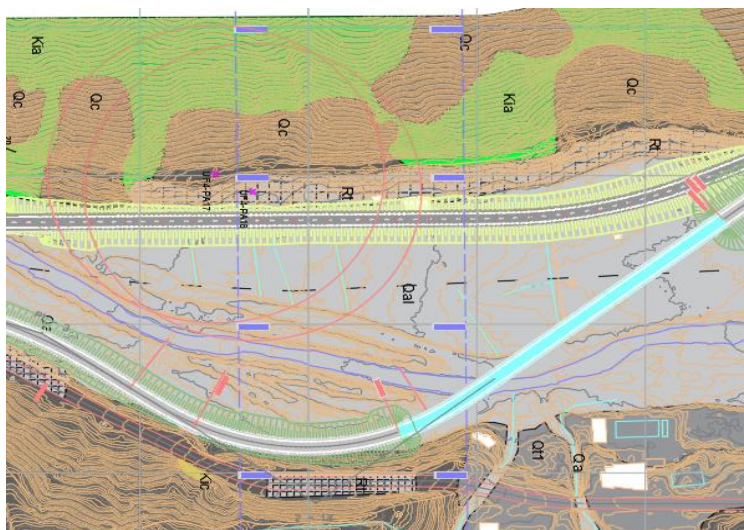
Figura 5-2.51 Aspectos de geotecnia UF4-PA17 y UF4-PA18

a)



Fuente: Unión Vial Río Pamplonita 2019

b)

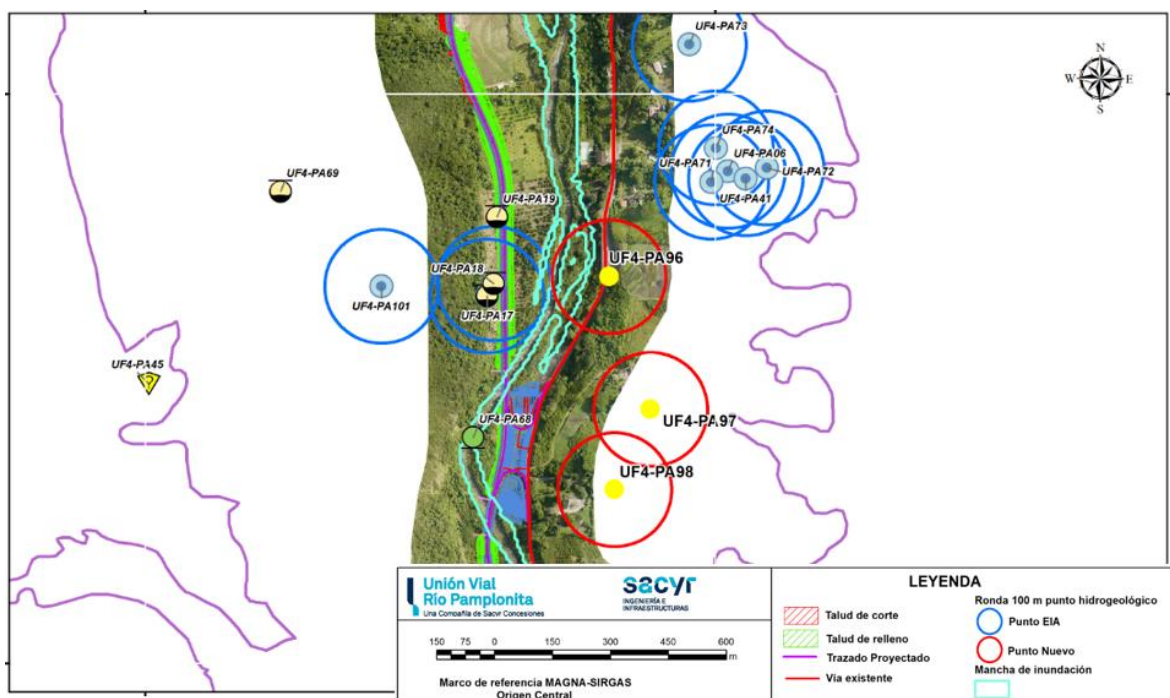


Fuente: Unión Vial Río Pamplonita 2019

Áreas de exclusión con otros puntos y rondas hídricas que imposibilitan la modificación de trazado UF4-PA17 y UF4-PA18

Como se observa en la figura, la existencia de potenciales zonas de exclusión generadas por los manantiales UF4-PA96, UF4-PA97 y UF4-PA98, imposibilita el cambio de trazado para desviar los puntos UF4-PA17 y UF4-PA18, sin crear una afectación muchísimo mayor que la ya generada y controlada mediante las medidas de manejo definidas.

Figura 5-2.52 Aspectos de áreas de exclusión UF4-PA17 y UF4-PA18



Fuente: Unión Vial Río Pamplonita 2019

- Punto UF4-PA21

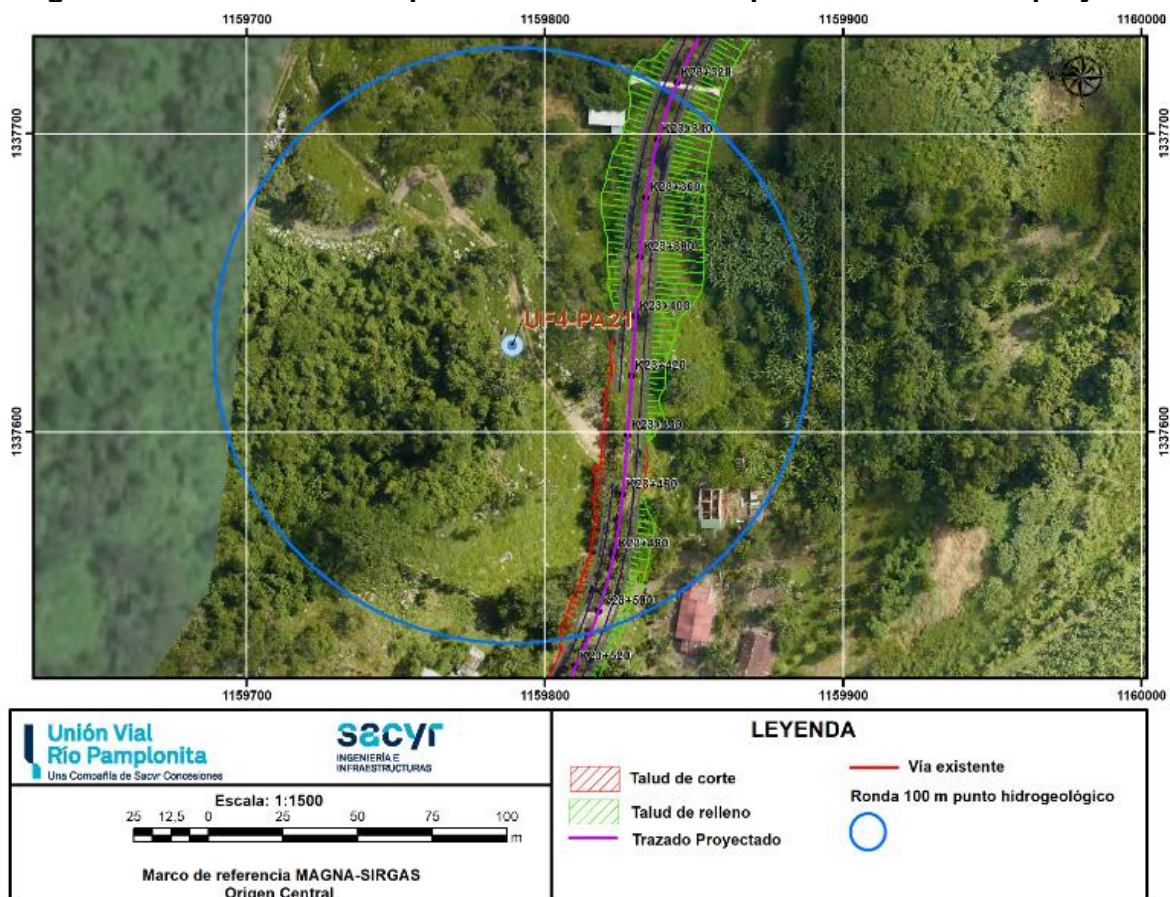
Este punto está localizado en la vereda Calaluna al costado izquierdo de la vía férrea (1159789 E 1337629 N), por lo cual, entre el punto y el trazado del proyecto, ya existe una intervención antrópica anterior que es la construcción de la vía férrea (**Figura 5-2.53**). Por lo anterior, cabe resaltar que el punto no será intervenido, además de que actualmente se localiza sobre la vía de acceso de un predio privado.

El punto UF4-PA21 presenta un caudal constante de 0.92 l/s; sin embargo, el punto no se encuentra en uso y no se verá afectado por la construcción porque además de estar en una cota superior a la cota del proyecto, gran parte del caudal que aflora en este punto proviene

de otro manantial que esta hacia la parte alta de la misma ladera (Figura 5-2.54).

A pesar de que el punto cabe dentro de la categoría de interflujo, se considerará como manantial debido a que la surgencia se presenta a través de un depósito coluvial que filtra agua desde un nivel freático somero proveniente de la subyacente formación aguardiente y es susceptible de aprovechamiento.

Figura 5-2.53 Ubicación del punto UF4-PA21 con respecto al trazado del proyecto



Fuente: UVRP, 2019

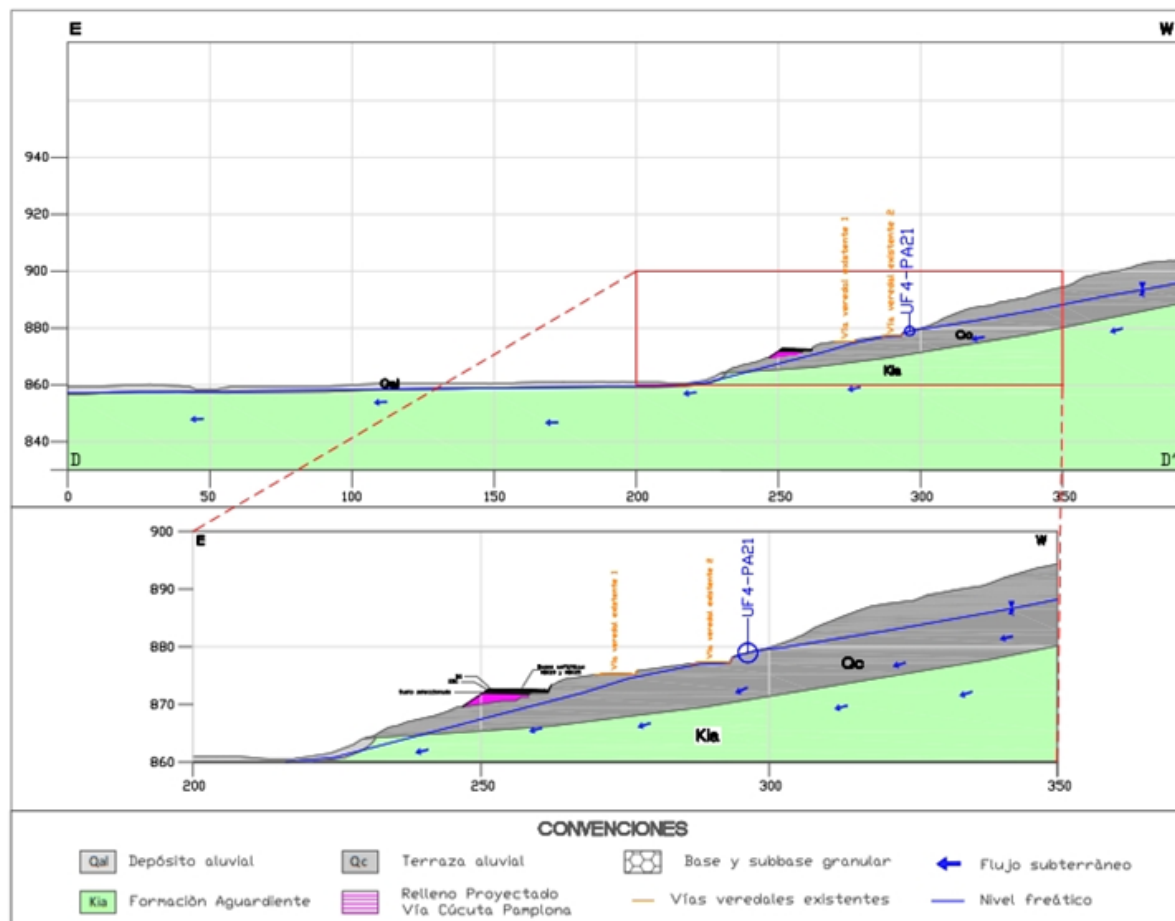
Figura 5-2.54 Situación del punto UF4-PA21 con respecto a otro manantial de la zona (indicador amarillo)



Fuente: UVRP, 2019

Geologicamente, el punto UF4-PA21 se ubica sobre depósitos coluviales heterométricos, con clastos provenientes principalmente de la Fm Aguardiente, compuestos por bloques de areniscas, embebidos en una matriz limo-arenosa que soporta todo el deposito. La Figura 5-2.55 presenta el perfil geológico de este punto, resaltando su situación respecto al trazado, donde también se incluye fotografía de detalle del deposito coluvial que conforma el terreno donde se produce la surgencia.

Figura 5-2.55 Perfil geológico punto UF4-PA21



Fuente: UVRP, 2019

Inconveniencia de cambiar alineamiento en punto UF4-PA21 por aspectos de trazado

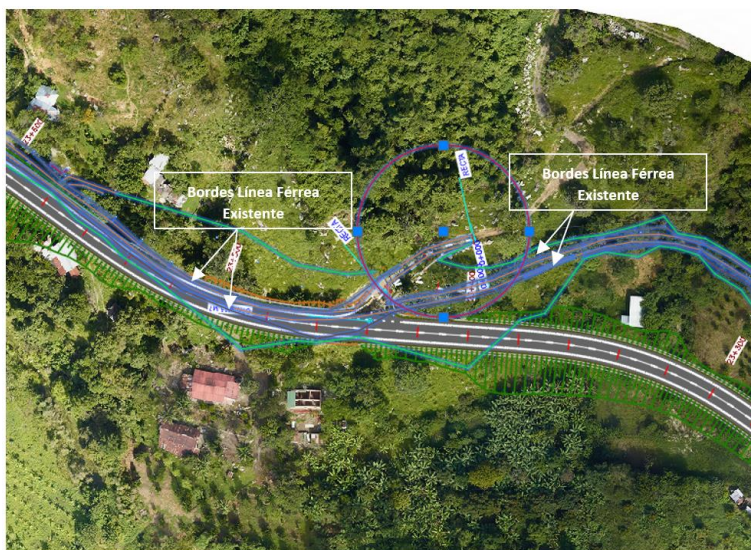
Este punto al igual que en los casos de UF4-PA 17 y UF4-PA 18 tanto el modelo hidrogeológico conceptual y los resultados de isotopía permitieron concluir que el punto UF4-PA 21 corresponde a un afloramiento subsuperficial y en consecuencia no aplica la restricción de zona de exclusión de 100 mt. No obstante, se presentan los argumentos respecto a la inconveniencia de cambiar el alineamiento de la vía por la presencia del punto UF4-PA 21. A continuación se exponen aspectos específicos para el punto de interés.

Aspectos específicos

- Para el trazado desviado alternativo del tramo donde se encuentra este punto, es necesario generar dos curvas seguidas en el mismo sentido, lo que reduce las especificaciones de la vía.
- En la versión sin modificación de trazado es menor la afectación predial y forestal y es muy poco el corte que se genera, ya que en su mayoría de trazado va en terraplén.
- Adicionalmente, el impacto a la movilidad de las comunidades vecinas al proyecto se logra mitigar completamente, garantizando los accesos hacia la nueva calzada y la calzada existente.

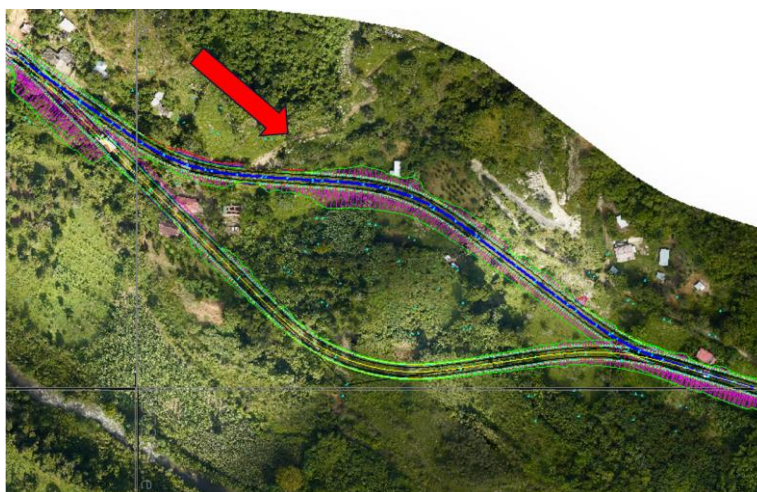
Figura 5-2.56 Aspectos de trazado UF4-PA21

a)



Fuente: Unión Vial Río Pamplonita 2019

b)



Fuente: Unión Vial Río Pamplonita 2019

Inconveniencia de cambiar alineamiento en puntos UF4-PA21 por aspectos de geología y geotecnia

El punto en mención, se localiza contiguo a una vía veredal que recorre la vereda Zarcuta y a 40 m aproximadamente del borde de la vía proyectada.

El trazado proyectado transcurre sobre un depósito cuaternario tipo coluvial (Qc), granular considerablemente competente, de compacidad densa debido a su matriz arenosa y a ser predominantemente grano soportado, brinda unas características óptimas para apoyar sobre estos depositos la nueva calzada.

Por otro lado, el trazado opcional atravesará un depósito aluvial (Qal) reciente de características similares al mencionado anteriormente, es decir, baja capacidad portante, compacidad floja, que puede presentar asentamientos considerables durante la construcción y posterior operación de la vía, sin apenas información geotécnica sobre su comportamiento, mucho más cercano del cauce del río que el trazado de proyecto, lo cual habla de la juventud de su génesis.

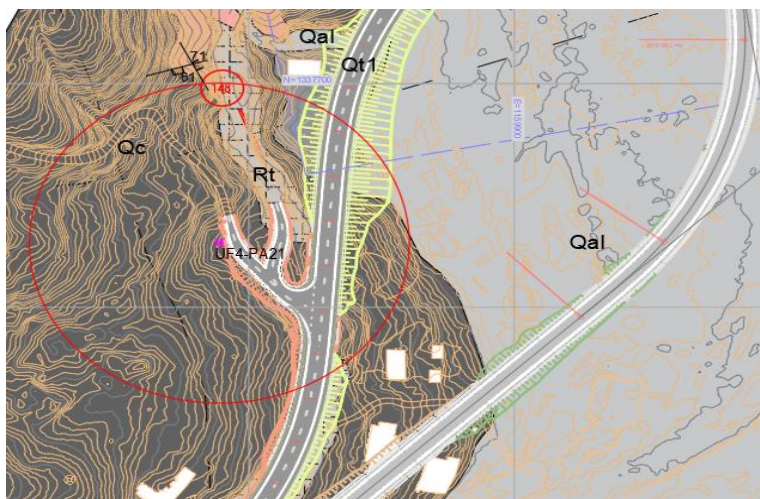
Figura 5-2.57 Aspectos de geotecnia UF4-PA21

a)



Fuente: Unión Vial Río Pamplonita 2019

b)



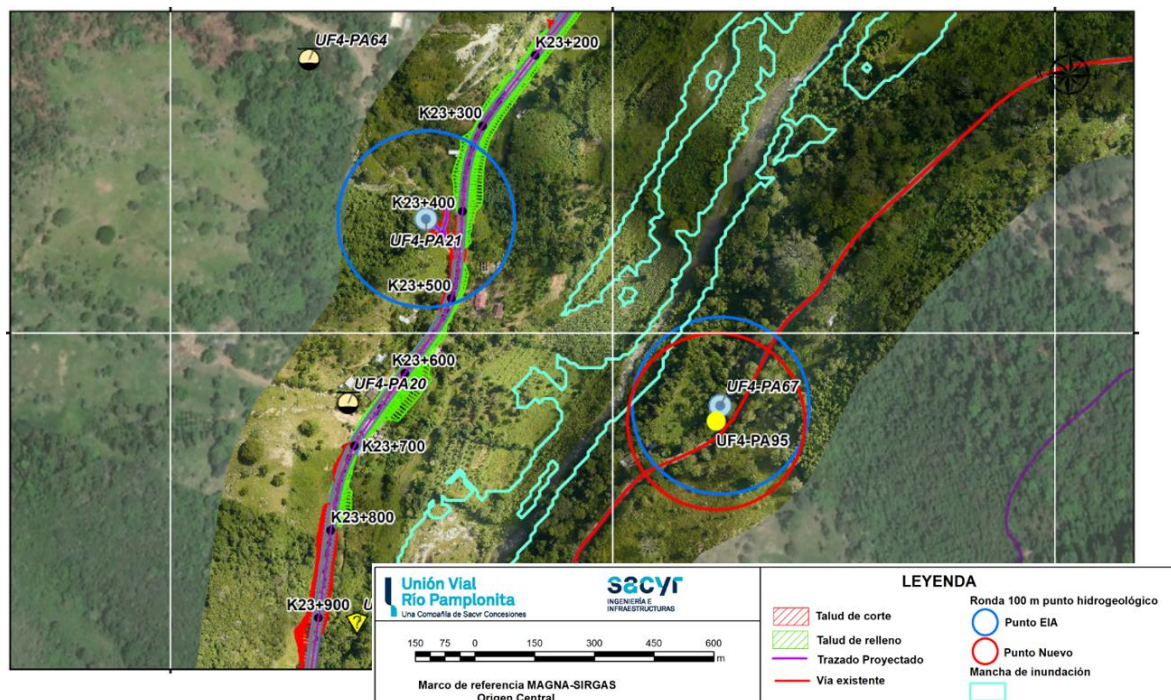
Fuente: Unión Vial Río Pamplonita 2019

Por lo anterior se considera que el trazado propuesto para el proyecto es el más adecuado geológica y geotécnicamente.

Áreas de exclusión con otros puntos y rondas hídricas que imposibilitan la modificación de trazado frente a los puntos UF4-PA21

Como se observa en la figura, la existencia de potenciales zonas de exclusión generadas por los manantiales UF4-PA67 y UF4-PA95, imposibilita el cambio de trazado para desviar el punto UF4-PA21, sin crear una afectación muchísimo mayor que la ya generada y controlada mediante las medidas de manejo definidas.

Figura 5-2.58 Aspectos de áreas de exclusión UF4-PA21



Fuente: Unión Vial Río Pamplonita 2019

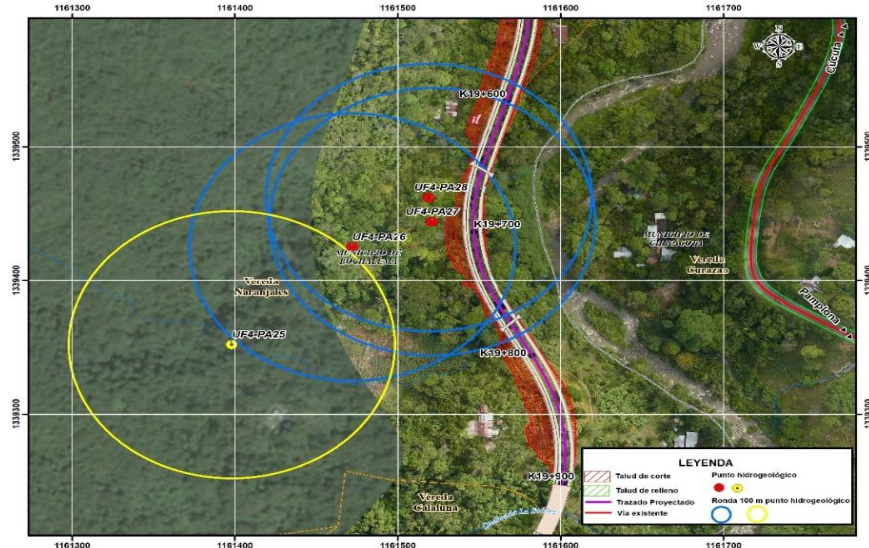
El modelo hidrogeológico conceptual y los resultados de Isotopia para este punto se presenta en el Anexo 5. CARACTERIZACION\5.1 MEDIO ABIOTICO\5.1.3 Hidrogeologia\ANEXO 5.1.3.8_MODELOS HIDROGEOLOGICOS Y ISOTOPIA 13 PUNTOS DE AGUA.

- Puntos UF4-PA26, UF4-PA27 y UF4-PA28

Estos puntos se localizan en los limites de las veredas el Naranjal y Calaluna del municipio de Bochalema, en cotas superiores a la cota de la rasante del proyecto (Figura 5-2.59). Las coordenadas para estos puntos son:

UF4-PA26: 1161472, E 1339425 N, 861 msnm
UF4-PA27: 1161521, E 1339444 N, 833 msnm
UF4-PA28: 1161519, E 1339462 N, 823 msnm

Figura 5-2.59 Ubicación de los puntos UF4-PA26, UF4-PA27 y UF4-PA28

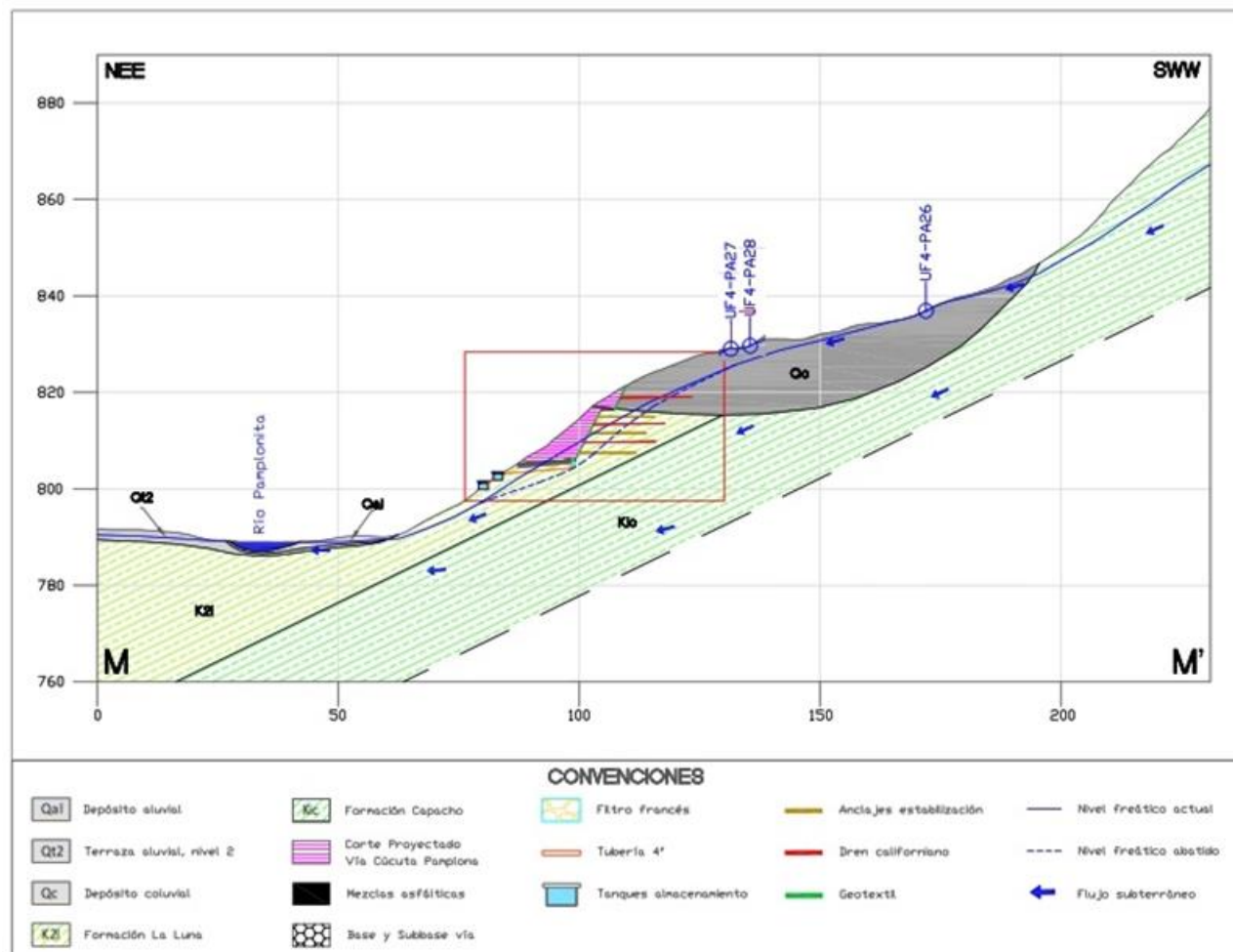


Fuente: UVRP, 2019

La Figura 5-2.59 permite ver una zona húmeda sobre el coluvión donde se encuentran los puntos, lo cual corresponde a una red de cauces de aguas intermitentes que tienen su verdadero nacimiento en la parte alta de la montaña (Punto UF4-PA25).

Como se menciona en el párrafo anterior, los tres puntos se encuentran ubicados sobre depósitos coluviales espesos compuestos por clastos heterométricos provenientes de la Fm Capacho y matriz limo-arenosa de plasticidad media a baja y permeabilidad alta que suprayacen dicha formación, (**Figura 5-2.60**). Al igual que los puntos 26 y 33, los puntos 27 y 28 también se clasifican como manantiales a pesar de tener una condición geológica que no necesariamente implica esa caracterización; sin embargo; por su incidencia en términos de ser fuente alterna de recurso hídrico para algunos pobladores y la conveniencia de enfatizar en su protección, se clasifican como tal sin que esto genere implicaciones en modificación de trazado.

Figura 5-2.60. perfil geologico de los puntos UF4-PA26, UF4-PA27 y UF4-PA28



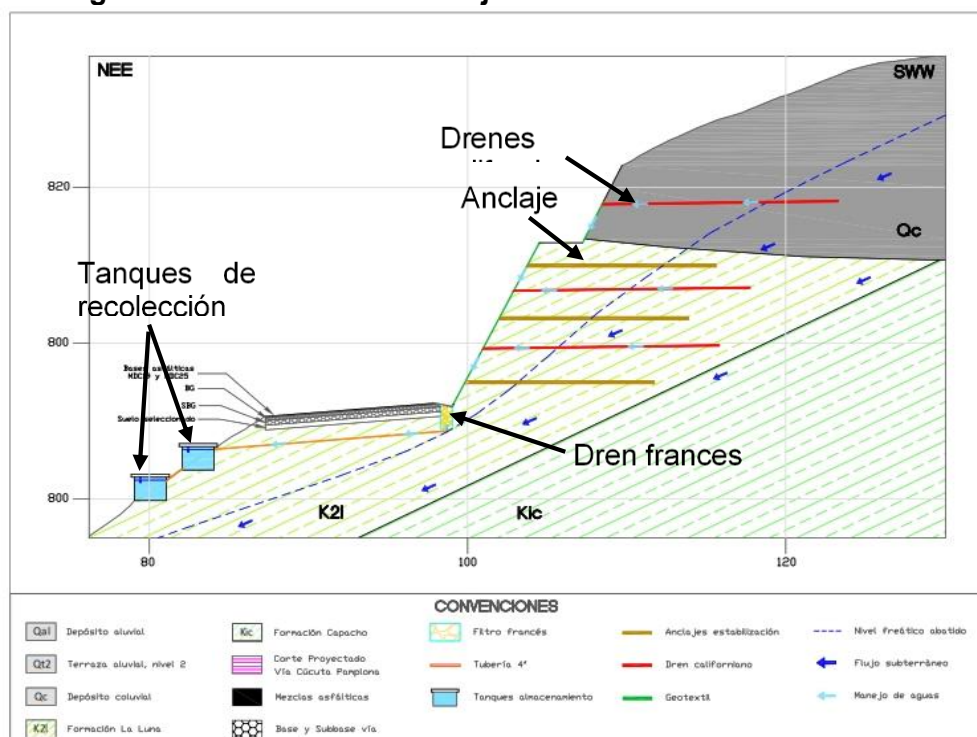
Fuente: UVRP, 2019

Los modelos hidrogeológicos conceptuales y los resultados de Isotopia para estos puntos se presentan en el Anexo 5. CARACTERIZACIÓN\5.1 MEDIO ABIOTICO\5.1.3 Hidrogeología\ANEXO 5.1.3.8_MODELOS HIDROGEOLÓGICOS Y ISOTOPIA 13 PUNTOS DE AGUA.

Medidas de Manejo

Para estos tres puntos se presentan dos medidas de manejo, la primera se trata de una captación de agua en talud con el objetivo de lograr la reubicación de los puntos de agua. Se busca conformar un talud de recolección, el agua producto del drenaje subsuperficial se direcciona a un dren francés desde el cual se proyecta una conducción hacia el sector de la vía aguas abajo; el cruce de la vía se realizará a través de una tubería dentro de las alcantarillas de la vía o a través de una tubería bajo la estructura de pavimento, para finalmente disponer del agua en tanques de recolección para aprovechamiento de los usuarios (Figura 5-2.61).

Figura 5-2.61 Medida de manejo mediante talud de recolección



Fuente: UVRP, 2019

La otra medida de manejo se basa en realizar verticalizaciones en los taludes de la margen derecha en el tramo K19+650-K19+740, que es la zona mas cercana a los puntos (Figura 5-2.62), para de esta manera alejar también los puntos del área de intervención actual. Para la verticalización de los taludes se realizaron dos cálculos de estabilidad, uno en

condiciones estáticas ($FS > 1.50$) y otro en pseudo-estáticas (sismo, $FS > 1.05$), considerando un talud al 1H/3V en su totalidad y asumiendo niveles freáticos en condición crítica (suelo completamente saturado) para que el análisis sea lo mas conservador posible (**Figura 5-2.62, Figura 5-2.63 y Figura 5-2.64**).

Figura 5-2.62 Planta con la ubicación de los puntos UF4-PA26, UF4-PA27 y UF4-PA28 y los taludes asociados con medida de manejo

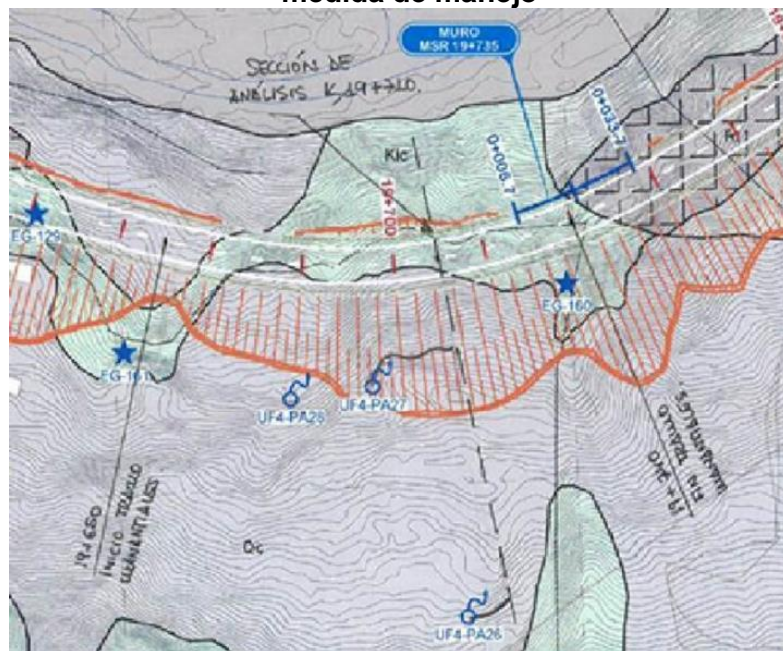
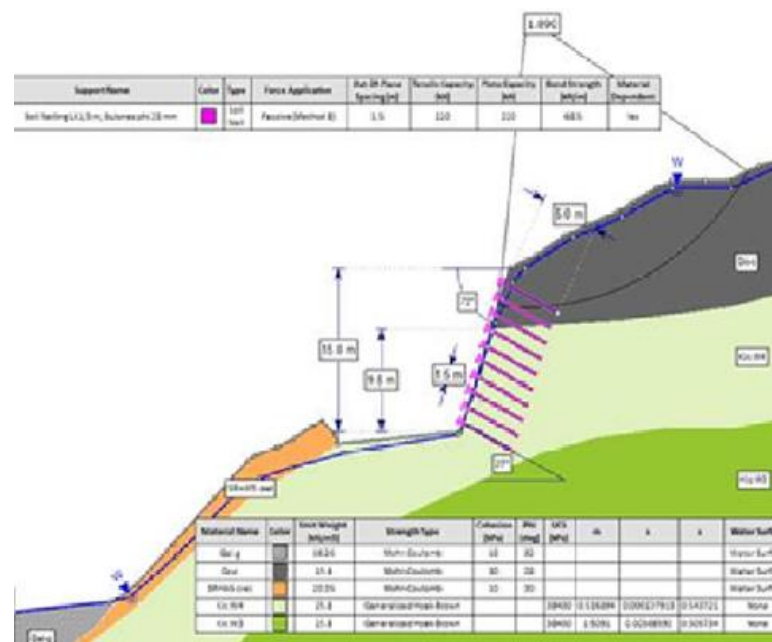
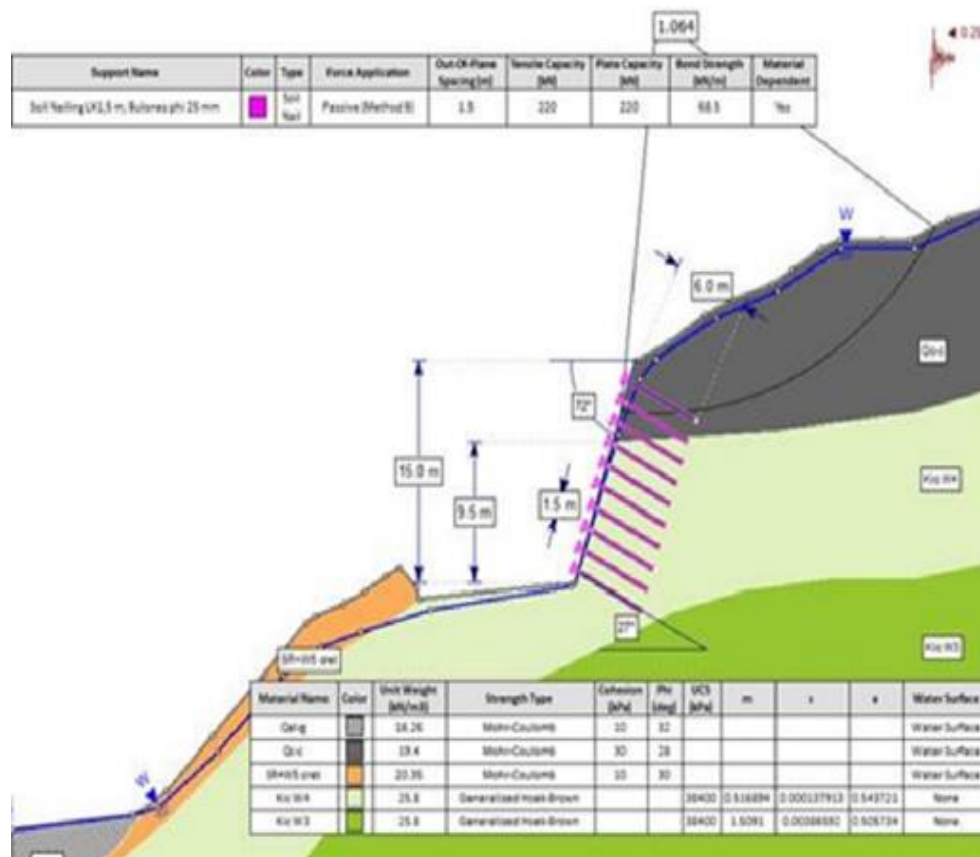


Figura 5-2.63 Modelo de estabilización de talud en condiciones estáticas (FS>1.50)



Fuente: UVRP, 2019

Figura 5-2.64 Modelo de estabilización de talud en condiciones pseudo-estaticas (FS>1.05)



Fuente: UVRP, 2019

La aplicación de la medida queda sujeta a su aprobación como resultado de la evaluación de este estudio. De ser esta positiva, se realizarán posteriormente los diseños detallados y la consecuente implantación de la obra dentro de los diseños.

Inconveniencia de cambiar alineamiento en puntos UF4-PA26, UF4-PA27 y UF4-PA28 por aspectos de trazado

Para estos puntos al igual que en los casos de UF4-PA 17, UF4-PA 18 y UF4-PA 21 tanto el modelo hidrogeológico conceptual y los resultados de isotopía permitieron concluir que los mismos corresponden a afloramiento subsuperficial y en consecuencia no aplica la restricción de zona de exclusión de 100 metros. Sin embargo, se presentan los argumentos respecto a la inconveniencia de cambiar el alineamiento de la vía por la presencia de estos puntos de agua. Al respecto, se exponen los aspectos específicos que explican la inconveniencia de cambiar el eje vial por la presencia de estos puntos.

Aspectos específicos

- En esta zona el trazado propuesto se encuentra a un costado del río evitando invadir en lo posible la ronda del río y teniendo una menor afectación predial a diferencia de la alternativa de trazado modificado.
- Para el trazado original se genera un desmonte apropiado para la estabilidad de los taludes siendo esta una solución más económica ya que en el trazado modificado alternativo es necesaria la construcción de un puente de 364 metros por condiciones de topografía, así como para poder cumplir con los criterios del diseño vertical del Manual de diseño geométrico.
- La construcción de este puente conllevaría a una mayor afectación forestal y ronda de río ya que para la construcción de la infraestructura del puente se necesitan accesos para la maquinaria y la construcción de múltiples apoyos intermedios (pilas) por su longitud, sumado a los aproches del puente.
- Para el caso particular de este segmento, la nueva calzada se encuentra proyectada sobre la antigua vía férrea. Sin embargo, para el cumplimiento técnico a las especificaciones del contrato, se requieren ajustes en el ancho de la banca y cota de la rasante.

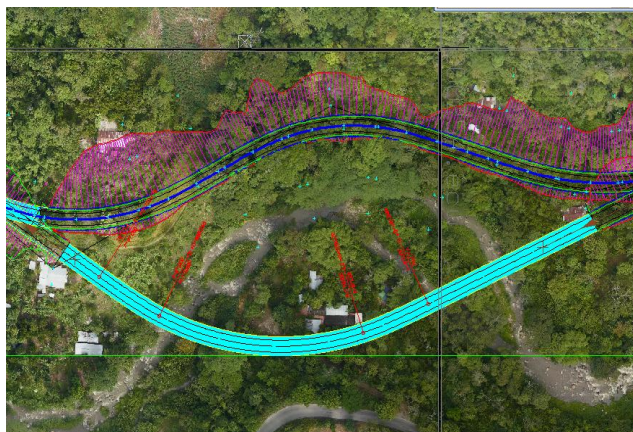
Figura 5-2.65 Aspectos de trazado UF4-PA26, UF4-PA27 y UF4-PA28

a)



Fuente: Unión Vial Río Pamplonita 2019

b)



Fuente: Unión Vial Río Pamplonita 2019

Inconveniencia de cambiar alineamiento en puntos UF4-PA26, UF4-PA27 y UF4-PA28 por aspectos de geología y geotecnia

Los puntos objeto de análisis se encuentran localizados sobre la margen izquierda del río aproximadamente entre 30 m y 70 m de distancia del borde de la vía proyectada.

A favor del trazado actual de proyecto se tiene que los materiales, sobre los cuales discurre el trazado, han sido investigados a través de una extensa campaña de exploración geotécnica que comprendió perforaciones, apiques, sísmica, DPSH, SPT y ensayos de laboratorio, tanto de clasificación como de evaluación de parámetros geotécnicos, esto ha permitido obtener con considerable certeza las características geotécnicas de los materiales que serán excavados, lo cual permite concluir que los diseños de las excavaciones cercanas a los puntos de agua relacionados al inicio, son óptimos y ofrecerán condiciones de estabilidad geotécnica y geológica, conforme a los requerimientos técnicos del contrato de concesión suscrito con la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI).

Para lo anterior, se aprovechó el trazado existente de la antigua vía férrea, la cual, ha demostrado ser estable geotécnicamente con el pasar de los años.

Por otro lado, sobre el margen derecho se presenta el trazado alternativo que tendría que desarrollarse para poder dar cumplimiento a la solicitud del ANLA, el mismo está conformado por un viaducto de aproximadamente 360 m de longitud, con 9 pilas que alcanzan hasta los 25 m de altura y dos estribos.

Esta estructura de las dimensiones antes mencionadas sería apoyada sobre un depósito aluvial reciente como se muestra en la segunda imagen. Este depósito aluvial (Qal), se caracteriza por su baja capacidad portante debido al poco lapso que tiene desde su depositación y por el constante retrabajo de sus materiales por estar en su gran mayoría dentro del cauce natural del río.

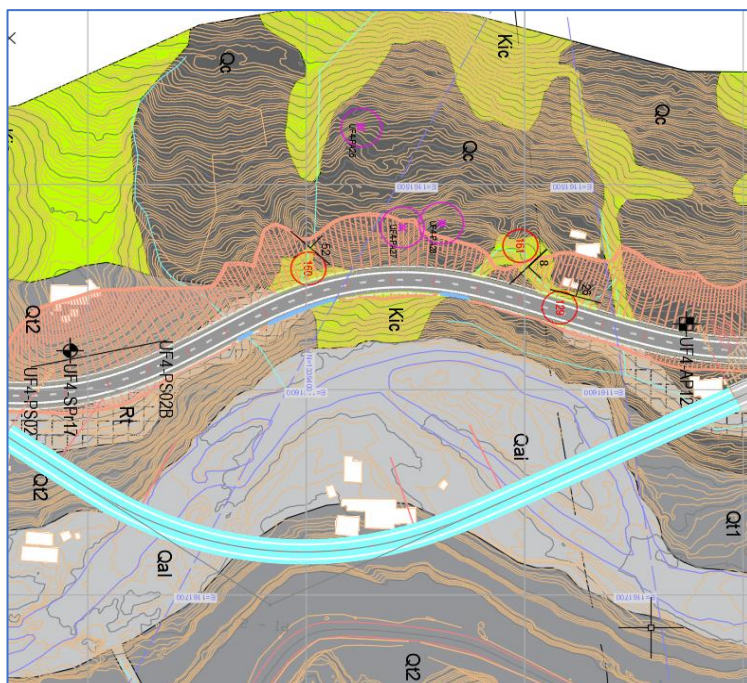
Figura 5-2.66 Aspectos de geotecnia UF4-PA26, UF4-PA27 y UF4-PA28

a)



Fuente: Unión Vial Río Pamplonita 2019

b)



Fuente: Unión Vial Río Pamplonita 2019

Con base en las consideraciones anteriores es de esperar que éste depósito presente un

120

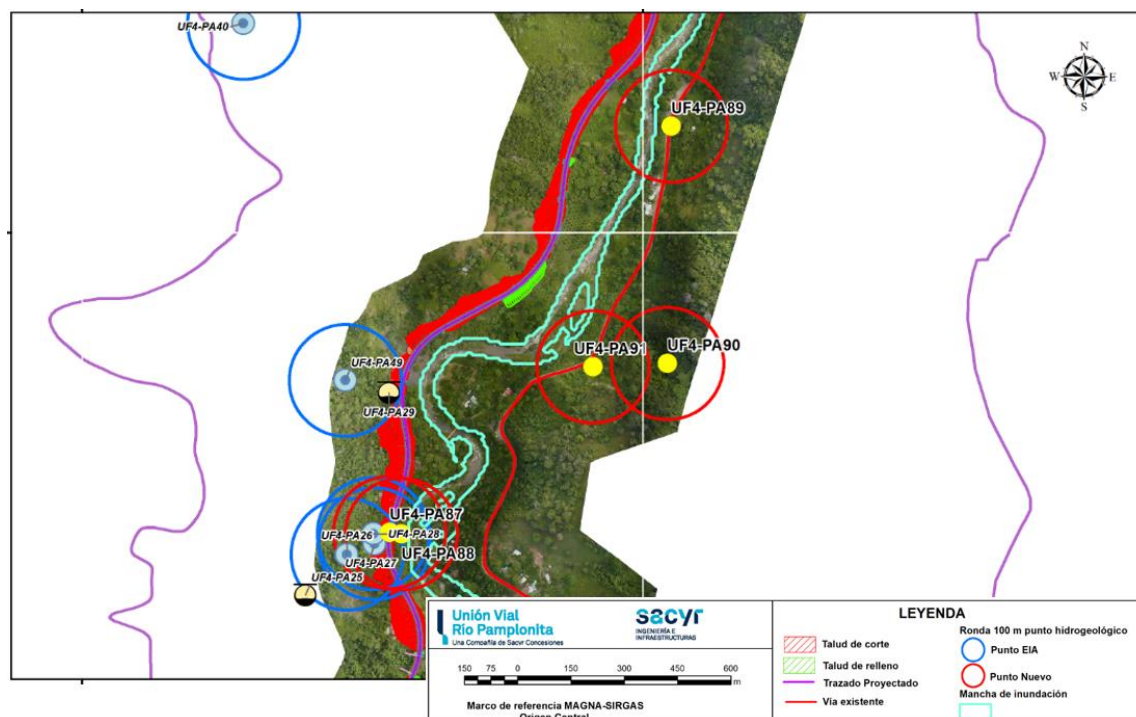
material granular de compacidad floja propenso a sufrir asentamientos considerables por carga y que debido a ello requiera mejoramientos (saneos), por otro lado, se requerirían excavaciones de dimensiones considerables (aproximadamente 2 caisson de 2 m de diámetro y 15 m de longitud), en total un aproximado de 22 excavaciones dentro y adyacentes al río, para poder apoyar adecuadamente el viaducto en el depósito aluvial ello hará además que se requieran obras de contención adecuadas para evitar el socavamiento de los apoyos mencionados, al final esta obra civil terminará afectando de manera notable la dinámica del río, la cual con el trazado original no sufre ningún tipo de perturbación.

Por lo anterior tanto geológica, geotécnica e hidráulicamente se considera que la opción del trazado actual, paralela al terraplén de la antigua vía férrea, es la más adecuada para el proyecto.

Áreas de exclusión con otros puntos y rondas hídricas que imposibilitan la modificación de trazado frente a los puntos UF4-PA26, UF4-PA27 y UF4-PA28

Como se observa en la figura, la existencia de potenciales zonas de exclusión generadas por los manantiales UF4-PA90 y UF4-PA91, imposibilita el cambio de trazado para desviar los puntos UF4-PA26, UF4-PA27 y UF4-PA28, sin crear una afectación muchísimo mayor que la ya generada y controlada mediante las medidas de manejo definidas.

Figura 5-2.67 Aspectos de áreas de exclusión UF4-PA26, UF4-PA27 y UF4-PA28



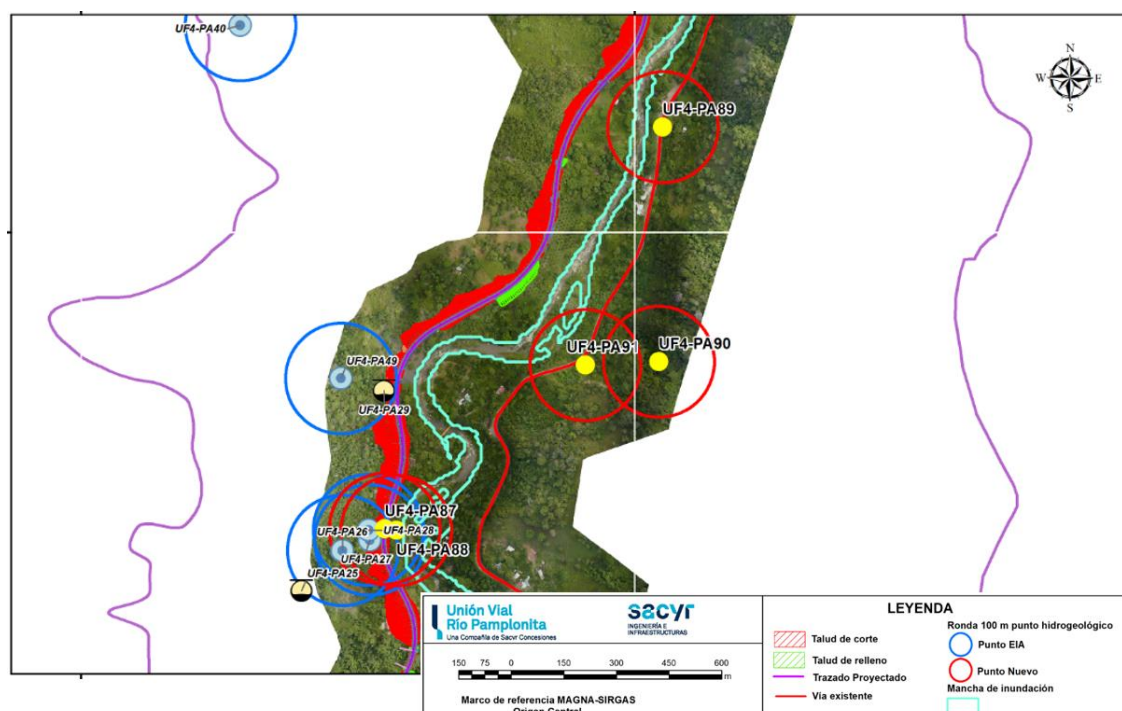
Fuente: Unión Vial Río Pamplonita 2019

Limitaciones a un trazado alternativo sobre la margen oriental del Río Pamplonita al norte de la UF4.

En complemento a las justificaciones dadas para los tres grupos de puntos anteriores, se considera importante mencionar la existencia de otros puntos de agua que imposibilitan el desarrollo de un trazado por la margen oriental del Río Pamplonita. Específicamente se trata de los puntos UF4-PA89, UF4-PA 90, UF4-PA 91, UF4-PA92, UF4-PA 93 y UF4-PA 94.

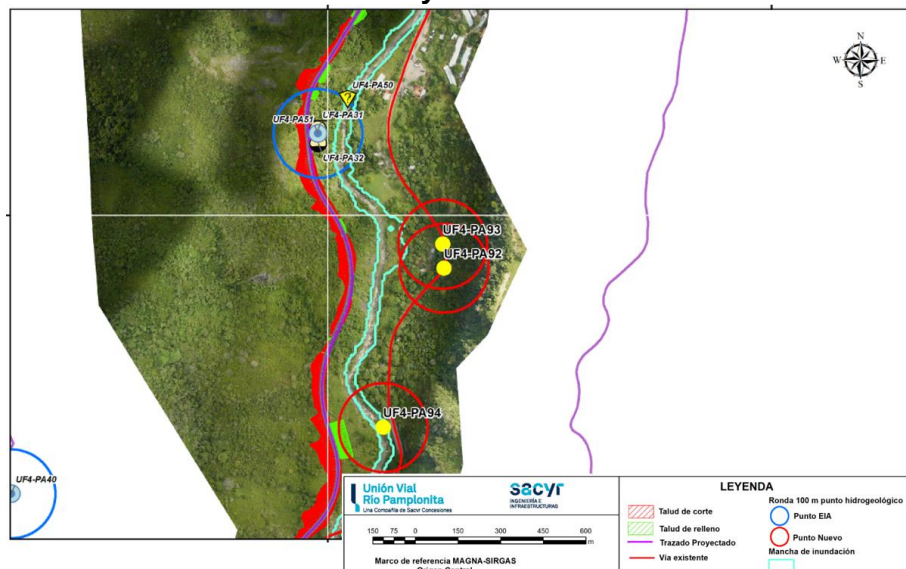
En caso de que se pretendiera desarrollar el trazado por la margen oriental, se encontrarían áreas de exclusión que dificultarían en gran medida el cumplimiento de las especificaciones de diseño, las cuales en definitiva y tal como se ha mencionado con argumentos basados en consideraciones sobre el trazado, la geología, la geotecnia y la hidráulica, son mas viables por la margen occidental. Con esto, el impacto sería muchísimo mayor que simplemente conservando el trazado por la margen occidental procurando seguir el corredor sobre el terraplen de la antigua vía férrea tal como se presenta en este Estudio y aplicando las medidas de manejo locales que corresponan a cada punto de agua en particular.

Figura 5-2.68 Limitantes al trazado por el costado oriental. Puntos UF4-PA89, UF4-PA 90 y UF4-PA 91.



Fuente: Unión Vial Río Pamplonita 2019

Figura 5-2.69 Limitantes al trazado por el costado oriental. Puntos UF4-PA92, UF4-PA 93 y UF4-PA 94.



Fuente: Unión Vial Río Pamplonita 2019

- Punto UF4-PA29 y UF4-PA49

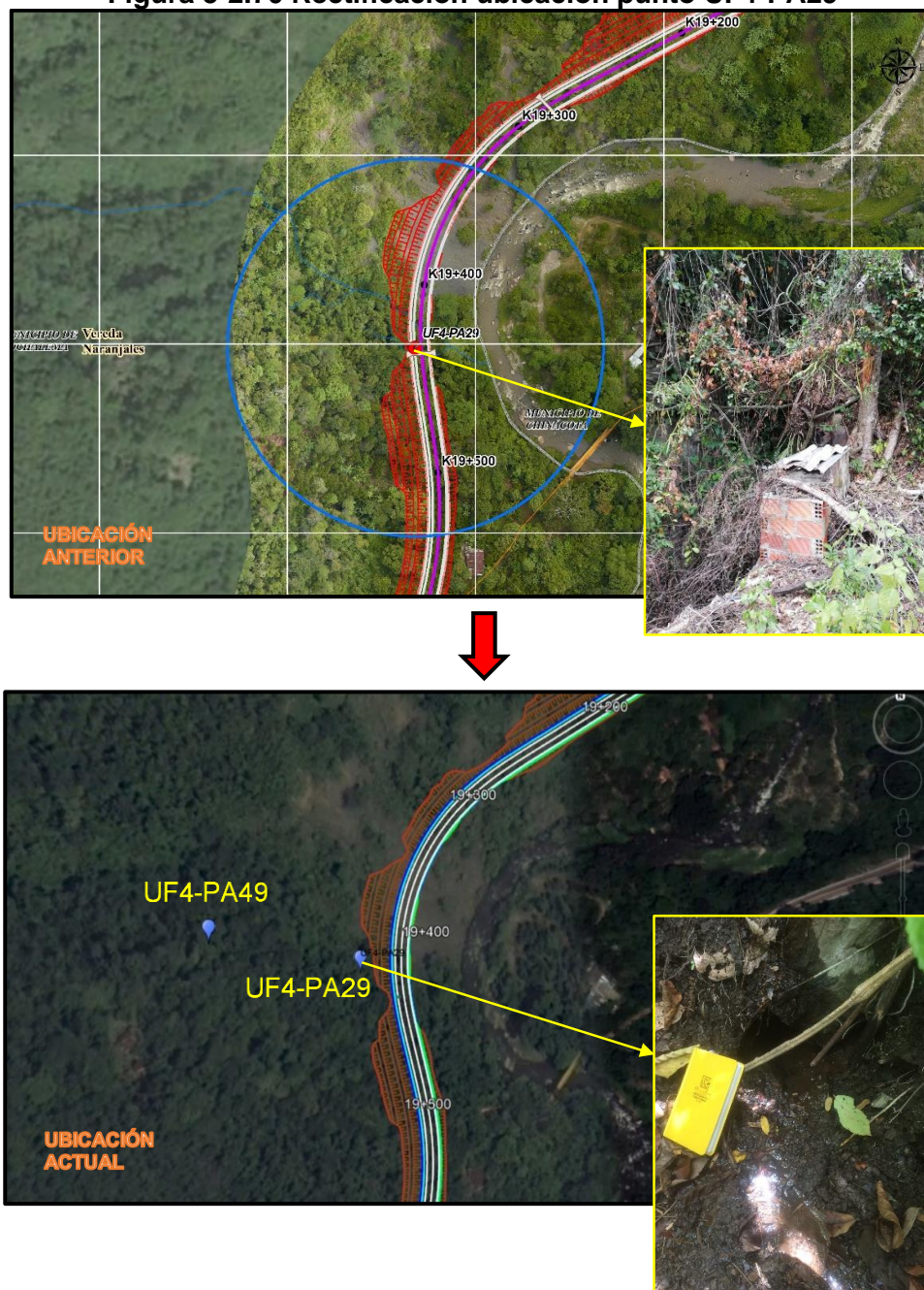
Este punto anteriormente fue localizado sobre el trazado de la vía férrea, justo sobre un drenaje al cual, por diseño, se le solicitó ocupación de cauce. Por las dificultades de acceso, la ubicación exacta del punto se hizo con ayuda de dron y topografía de detalle, lo cual permitió llegar al lugar exacto donde se produce la surgencia. Las coordenadas del punto son 1161547 E 1339714 N 835 msnm.

La **Figura 5-2.70** presenta el antiguo y actual punto de ubicación del afloramiento de agua, se puede observar que el punto fue reubicado debido a que inicialmente se tomó el tanque de captación de estas aguas como nacimiento, pero la verdadera surgencia se encuentra ladera arriba a una distancia de 22 metros de punto anterior. Gracias a la reubicación el punto de agua UF4-PA29 queda fuera de la zona de intervención y se le aplica la misma medida de manejo de los puntos UF4-PA26, UF4-PA27 y UF4-PA28 (ver apartado anterior).

Desde un enfoque hidrogeológico, este punto se mantiene bajo la clasificación de resurgencia debido a que es alimentado por aguas del manantial UF4-PA49, el cual se profundiza y resurge en las coordenadas relacionadas anteriormente aprovechando el diaclasamiento y algo grado de tectonismo observado en la unidad geológica involucrada (Fm Capachos) (Figura 5-2.71)

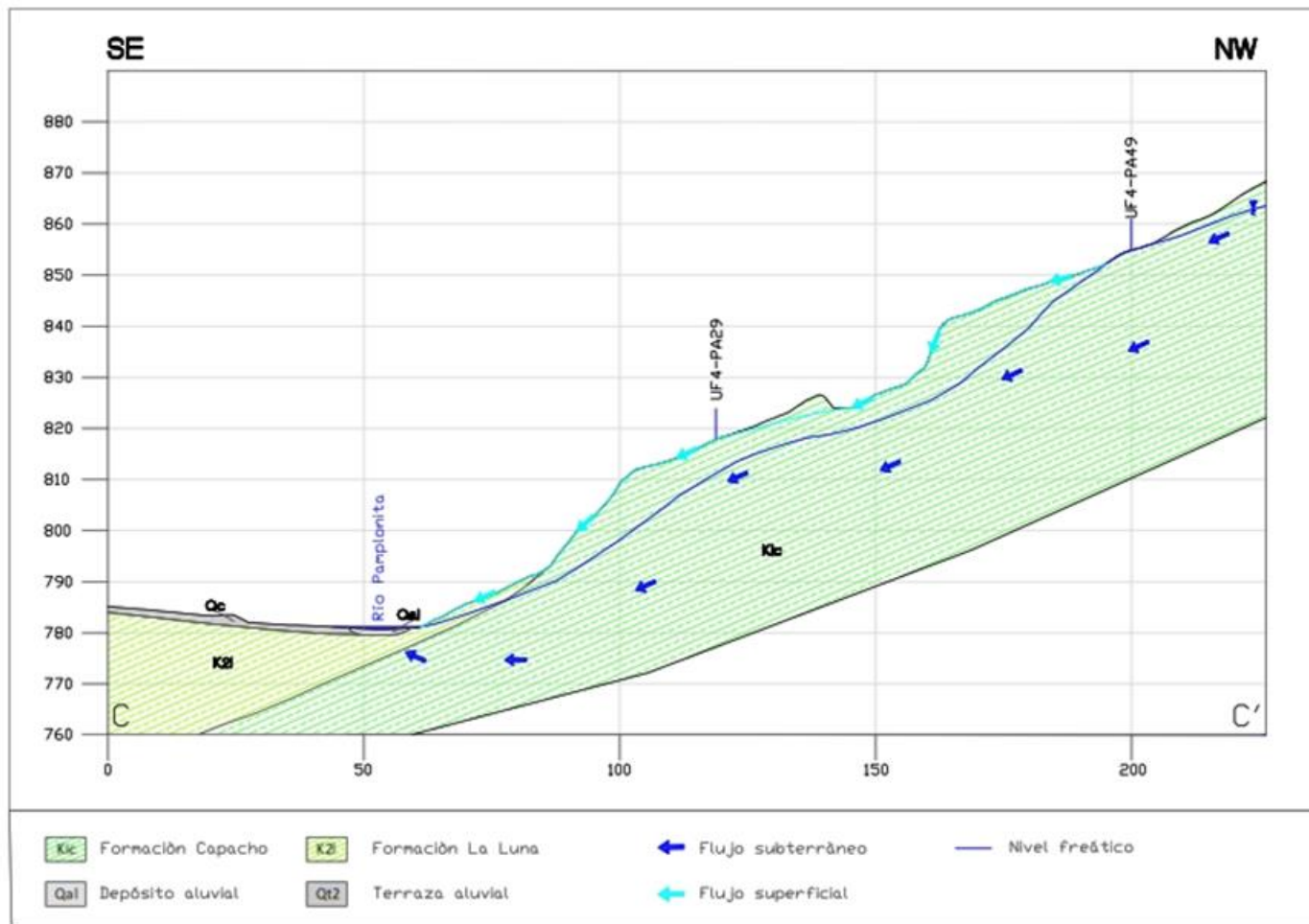
Los modelos hidrogeológicos conceptuales y los resultados de Isotopia de estos puntos se presenta en el Anexo 5. CARACTERIZACION\5.1 MEDIO ABIOTICO\5.1.3 Hidrogeologia\ANEXO 5.1.3.8_MODELOS HIDROGEOLOGICOS Y ISOTOPIA 13 PUNTOS DE AGUA.

Figura 5-2.70 Rectificación ubicación punto UF4-PA29



Fuente: UVRP, 2019

Figura 5-2.71 Perfil geológico de los puntos UF4-PA29 (Resurgencia) y UF4-PA49 (Manantial)



Fuente: UVRP, 2019

Geologicamente, tanto el punto UF4-PA29 como el UF4-PA49 se ubican sobre rocas estratificadas de la Fm Capacho, que en la zona tiene predominancia litológica de areniscas con algunos niveles arcillosos de bajo espesor, y presenta gran densidad de diaclasas y desprendimiento de bloques y cuñas (**Figura 5-2.71**). El cauce surgente en UF4-PA49 se hace algo difuso por el diaclasamiento de la roca, pero conserva su orientación hasta que resurge mas cerca al trazo de la vía proyectada; allí se requiere una obra hidráulica tal como fue solicitada en el presente estudio.

- Punto UF4-PA51

Este punto se encuentra ubicado en el contacto entre rocas de la Fm La Luna y la terraza aluvial del rio Pamplonita (**Figura 5-2.72**), en una cota mas baja que la cota del proyecto, la surgencia es favorecida por una familia de diaclasas maestras (168/88) que son normales a la cara libre de ladera. Debido a la presencia de un coluvión colgado ladera arriba de esta surgencia, el cual se observa completamente seco, y a una anterior intervención (via férrea) a la altura de la rasante del proyecto, se puede inferir que el nivel freatico en la zona de intervención es profundo y no se afectara la surgencia de agua en este punto, de la misma manera como no se afecto con la intervención realizada para lo construcción de la antigua via del tren.

Ladera arriba del manantial en cuestion, la antigua via del tren se encuentra cubierta por un deslizamiento, pero se alcanza a evidenciar que esta via ferrea se encontraba casi a la misma cota de la via proyectada (**Figura 5-2.72**). Debido a que su construcción no afectó la permanencia del manantial, es evidente que la nueva obra no presentara problemas al respecto; por lo tanto, no se hace necesario modificar el trazado como medida de protección al recurso.

La descripción de este punto, conjuntamente con el modelo hidrogeológico conceptual y los resultados de Isotopia se presenta en el Anexo 5. CARACTERIZACION\5.1 MEDIO ABIOTICO\5.1.3 Hidrogeologia\ANEXO 5.1.3.8_MODELOS HIDROGEOLOGICOS Y ISOTOPIA 13 PUNTOS DE AGUA.

Medida de Manejo

Como se menciona en parrafos anteriores, hasta el momento las investigaciones no han permitido evidenciar un nivel freatico cercano a la superficie del terreno ni cercano a las cotas que plantea el diseño de la via, pero en el caso de necesitarse una medida extendida en el tiempo, la **Tabla 5-2.24** contempla incluir las medidas de manejo de talud y tanque de recolección (**Figura 5-2.89 y Figura 5-2.92**) que se describen en las paginas 150 y 152 de este documento.

En la **Tabla 5-2.24** se relacionan las medidas de manejo para este punto, aclarando que el talud de recolección solo es necesario en caso de que se verifique presencia de nivel freático en los cortes.

Figura 5-2.72 Perfil geológico punto UF4-PA51



Fuente: UVRP, 2019

- Punto UF4-PA58

La descripción de este punto, conjuntamente con el modelo hidrogeológico conceptual y los resultados de Isotopia se presenta en el Anexo 5. CARACTERIZACION\5.1 MEDIO ABIOTICO\5.1.3 Hidrogeologia\ANEXO 5.1.3.8_MODELOS HIDROGEOLOGICOS Y ISOTOPIA 13 PUNTOS DE AGUA.

- Punto UF4-PA86

Debido a que el punto 86 se encuentra dentro del área de compra (línea amarilla) y del área de intervención (línea morada) según se observa en la **(Figura 5-2.73)**, se ha solicitado considerar la posibilidad de prever un suministro alternativo en caso de que el respectivo aljibe se vea afectado por las obras.

Figura 5-2.73 Localización del UF4-PA86



Fuente: UVRP, 2019

Al efectuar el análisis de las obras a realizar, se encuentra que dentro de la franja de compra y en los 20 metros alrededor del aljibe, se realizarán únicamente actividades de demolición. La adecuación de los accesos a la nueva estructura de la vía no tocara el punto y el área de intervención está definida únicamente en términos de circulación del personal de la obra para el afirmado de las rampas de acceso.

Dado lo anterior, se prevé realizar la demolición del predio donde se encuentra el aljibe, únicamente hasta donde no genere una afectación, de manera que el mismo encerramiento que actualmente posee se mantenga y sólo sea necesario implementar el conjunto de medidas de protección que se ha definido para todo tipo de puntos de agua.

De forma complementaria y en atención a la solicitud de implementar un punto de agua “alternativo”, se propone la localización indicada en la (**Figura 5-2.74**), la cual únicamente será necesaria en caso de que por la construcción de las obras se pueda ver disminuido el caudal disponible en el punto UF4-PA86 existente. El aljibe que eventualmente allí se construya, estará al frente de la actual batería de mangueras que actualmente se alimenta desde el UF4-PA86 y será complementario a la conducción entre el aljibe y la batería de mangueras, sin generar alguna modificación en éstas.

Figura 5-2.74 Localización de punto de suministro alternativo propuesto



Fuente: UVRP, 2019

Figura 5-2.75 Mapa geológico con ubicación del punto UF4-PA86

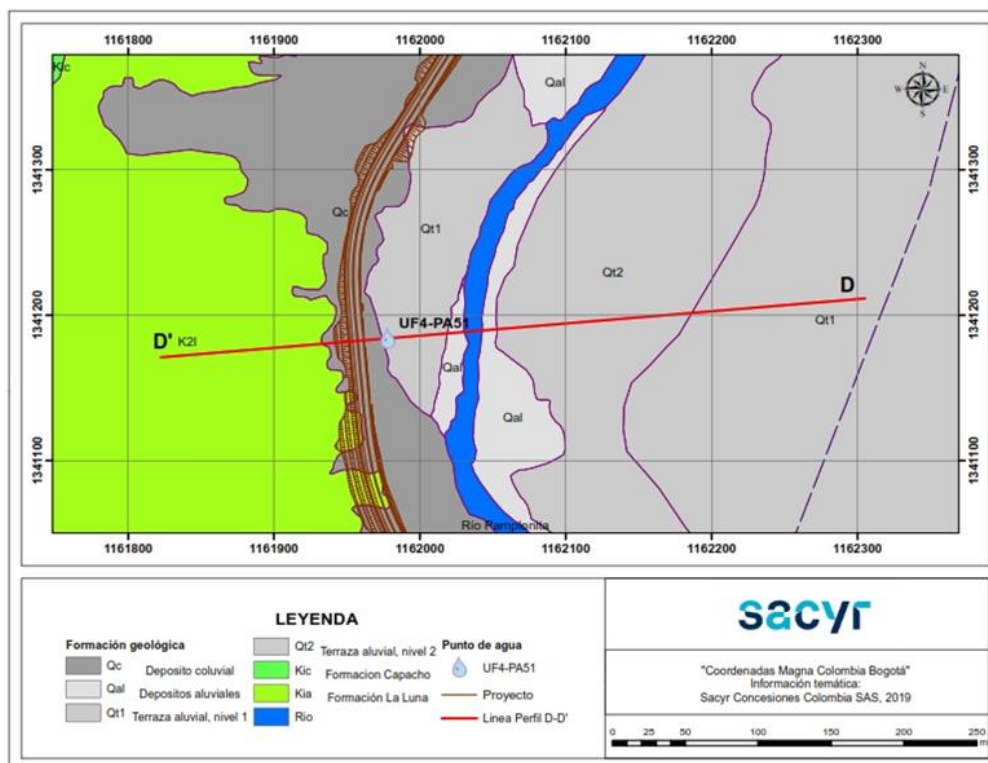
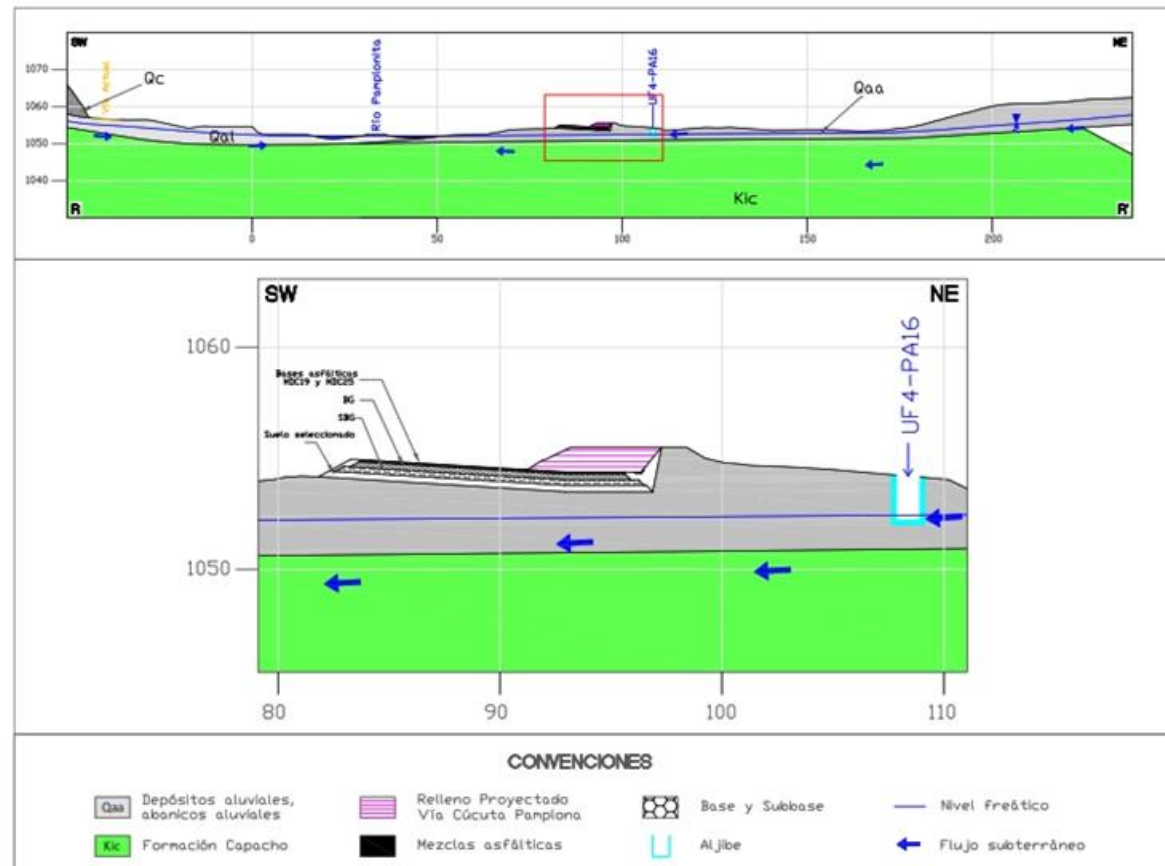


Figura 5-2.76 Perfil geológico del punto UF4-PA86



Fuente: UVRP, 2019

- UF4-PA-94

La descripción de este punto, conjuntamente con el modelo hidrogeológico conceptual y los resultados de Isotopia se presenta en el Anexo 5. CARACTERIZACION\5.1 MEDIO ABIOTICO\5.1.3 Hidrogeologia\ANEXO 5.1.3.8_MODELOS HIDROGEOLOGICOS Y ISOTOPIA 13 PUNTOS DE AGUA.

Ocupaciones de cauce para manantiales

Para los cinco (5) manantiales UF3-PA12, UF4-PA49, UF4-PA51. UF4-PA58 y UF4-PA94 que se encuentran en la franja de 100 metros respecto al trazado de la obra, se presentan en el capítulo 7 Demanada de Recursos Naturales las correspondientes solicitudes de ocupación de cauce, en cumplimiento Artículo 2.2.1.1.18.2 de la SECCIÓN 18 del Decreto 1076 de 2015.

5.1.8.10 Evaluación de la Vulnerabilidad Intrínseca de los Acuíferos a la contaminación en las UF3-4-5.

Para el objeto del presente proyecto, es preciso realizar un análisis de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de las unidades acuíferas identificadas y descritas. La evaluación de la vulnerabilidad de estas unidades permite establecer el grado de defensa natural del acuífero ante la potencial alteración de la calidad del agua subterránea, basándose en la determinación de las propiedades físicas del medio no saturado, por lo cual se constituye en una herramienta de protección del recurso.

Con la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación antrópica, se establece la facilidad con la cual ingresan las sustancias que puedan degradar la calidad del agua subterránea, mediante infiltración a través del suelo y de la zona no saturada. Foster (1987) sugiere que la definición más confiable de la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos es “la medida del grado de inaccesibilidad de los contaminantes a través de la zona no saturada de un acuífero y el grado de atenuación a la contaminación que posean las capas de esta zona, como resultado de retención y/o reacción físico – química”.

La utilidad del mapa de vulnerabilidad a la contaminación, lo determina la escala de trabajo y la cantidad y calidad de la información. Existen varias metodologías para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación y su aplicación depende principalmente de la escala de presentación y de la información existente. Para el presente proyecto, se tuvo en cuenta la propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial del 2010, en la cual se presentan las descripciones de las principales metodologías, su utilidad y limitaciones. Las metodologías en general califican la vulnerabilidad a la contaminación mediante una escala cualitativa que generalmente va

desde una vulnerabilidad muy baja o despreciable, hasta vulnerabilidad extrema. En la **Tabla 5-2.16**, se pueden observar las definiciones prácticas de las categorías de vulnerabilidad según el documento del Banco Mundial, 2007.

Para la presente investigación se desarrolla el método GOD, un método de puntuación en los que cada parámetro está dividido en clases a las cuales se atribuye un valor específico. A continuación, se explica en detalle la metodología GOD.

Tabla 5-2.16 Definición práctica de clases de Vulnerabilidad a la Contaminación de Acuíferos

| CLASE DE VULNERABILIDAD | DESCRIPCIÓN |
|-------------------------|--|
| EXTREMA | Vulnerable a la mayoría de los contaminantes con impacto rápido en muchos escenarios de contaminación |
| ALTA | Vulnerable a muchos contaminantes (excepto a los que son fuertemente absorbidos o fácilmente transformados en muchos escenarios de contaminación). |
| MODERADA | Vulnerable a algunos contaminantes sólo cuando son continuamente descargados o lixiviados. |
| BAJA | Sólo vulnerable a contaminantes conservativos cuando son descargados o lixiviados en forma amplia y continua durante largos periodos de tiempo |
| DESPRECIABLE | Presencia de capas confinantes en las que el flujo vertical (percolación) es insignificante. |

Fuente: Banco Mundial, 2007. Protección de la Calidad del Agua Subterránea guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales Guía Técnica parte B.

5.1.8.10.1 Metodología GOD

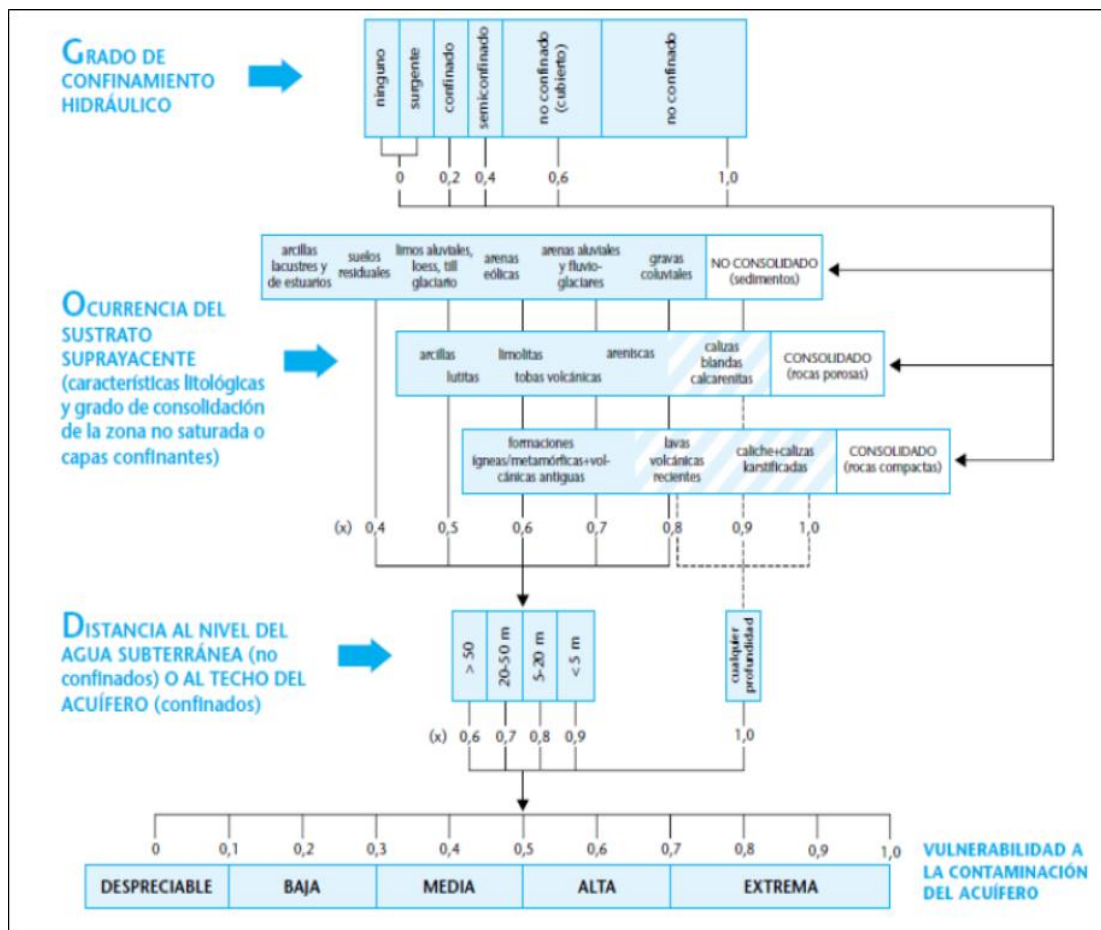
En Colombia según el nivel de información hidrogeológica se ha empleado el método GOD (Foster, 1987), recomendado para áreas con escasa información, con irregular distribución de datos o con incertidumbre de estos. Este método considera tres parámetros de evaluación: “G” para la ocurrencia del agua subterránea, “O” para la condición del sustrato litológico (zona no saturada) y “D” para la profundidad del agua subterránea.

La metodología GOD da un puntaje a cada variable de acuerdo con la capacidad de atenuación del suelo. Una vez valorado cada parámetro se calcula el índice de vulnerabilidad total multiplicando los valores asignados a cada parámetro, obteniéndose valores de 0 a 1, donde un índice cero “0” indica una vulnerabilidad despreciable y el índice “1” revela vulnerabilidad extrema a la contaminación (Ver **Tabla 5-2.16**).

Los suelos tienen un papel muy importante en la valoración de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, ya que dependiendo de sus características texturales (arcillas no expansivas o expansivas, franco, franco arcilloso a franco arenoso, arenas o gravas) y

su contenido de materia orgánica, son susceptibles a la lixiviación o transporte de contaminantes. El grado de susceptibilidad de los suelos a la lixiviación de contaminantes aumenta de suelos conformados por arcillas no expansivas (menor susceptibilidad) a los suelos constituidos por gravas (mayor susceptibilidad).

Figura 5-2.77. Esquema de análisis de la vulnerabilidad de acuíferos (método GOD).



Fuente: Foster et al., 2002; Foster, 1987, modificada Min. Ambiente 2010.

La vulnerabilidad intrínseca se representa mediante un mapa temático que muestra cualitativa o cuantitativamente ciertas características de un ambiente subsuperficial, que hace susceptible de contaminación al agua subterránea.

Los mapas de vulnerabilidad son útiles como herramienta de planificación, de ordenamiento territorial, de gestión del presupuesto y de educación a la comunidad. Además, permiten identificar áreas susceptibles de transporte de contaminantes, definir zonas de protección, diseñar redes de monitoreo y definir acciones en caso de emergencia hídrica.

A continuación, se muestra la Metodología GOD desarrollada por Foster (1987) para evaluar el Índice de Vulnerabilidad de Contaminación de los acuíferos.

5.1.8.10.1 Grado Confinamiento Hidráulico (G)

Se refiere a la condición de confinamiento del acuífero y establece las siguientes categorías: no confinado, no confinado-cubierto, semiconfinado, confinado y sin presencia de acuífero. La condición de confinamiento de los acuíferos es una función que interviene directamente en la vulnerabilidad natural del agua subterránea ante una contaminación potencial, ya que en general en acuíferos confinados o cautivos con un espesor considerable de capa confinante, el acceso de contaminantes es más restringido.

La valoración de este parámetro tiene como soporte principal el mapa hidrogeológico del área de estudio y la información litológica disponible para algunos pozos y piezómetros del área, como también información de sondeos eléctricos verticales y estudios de suelos. En particular la información aportada por 162 perforaciones realizadas tanto para la vía a cielo abierto como para el túnel (ver Anexo 5.1.3.6).

Teniendo en cuenta las condiciones litológicas más someras, dominantes en el área de influencia de las UF3-4-5, puestas en evidencia por las perforaciones mecánicas realizadas, se dan valores a las unidades hidrogeológicas de la siguiente manera (Ver **Tabla 5-2.17**).

Tabla 5-2.17 Vulnerabilidad de unidades hidrogeológicas según grado de confinamiento.

| Nombre Unidad Hidrogeológica | Nomenclatura | Valor asignado |
|------------------------------|--------------|----------------|
| Acuífero Cuaternario | Qrt | 0,8 |
| Acuífero Cuaternario | Qal | 0,8 |
| Acuífero Cuaternario | Qaa | 0,8 |
| Acuífero Cuaternario | Qc | 0,8 |
| Acuífero Cuaternario | Qt | 0,8 |
| Acuitardo León | E31 | 0,2 |
| Acuitardo Carbonera | E2c | 0,2 |
| Acuífero mirador | E2m | 0,4 |
| Acuitardo Mirador | E1lc | 0,2 |
| Acuífero Barco | Tpb | 0,4 |
| Acuicludo Colón - Mito Juan | Kscm | 0,2 |
| Acuífero La Luna | Ksl | 0,4 |
| Acuitardo Capacho | Kic | 0,2 |
| Acuífero Aguardiente | Kia | 0,4 |
| Acuífero Tibu-Mercedes | Kitm | 0,4 |
| Acuicludo de Durania | Tjgd | 0,2 |
| Acuífero Girón | Jg | 0,4 |
| Acuífero Bocas | Jg | 0,4 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

Es clara la presencia dominante de un acuífero no confinado consistente en lentes discontinuos que por su limitada capacidad de almacenamiento debida a aspectos geomorfológicos se convierte mayoritariamente en zonas de flujos subsuperficiales, localizados en correspondencia con los depósitos cuaternarios que sirven de cobertura al basamento rocoso conformado por las principales unidades geológicas presentes en la zona de estudio.

La distribución geográfica del parámetro “G” se muestra en la Figura 5-2.78.

5.1.8.10.2 Ocurrencia del Sustrato Suprayacente (O)

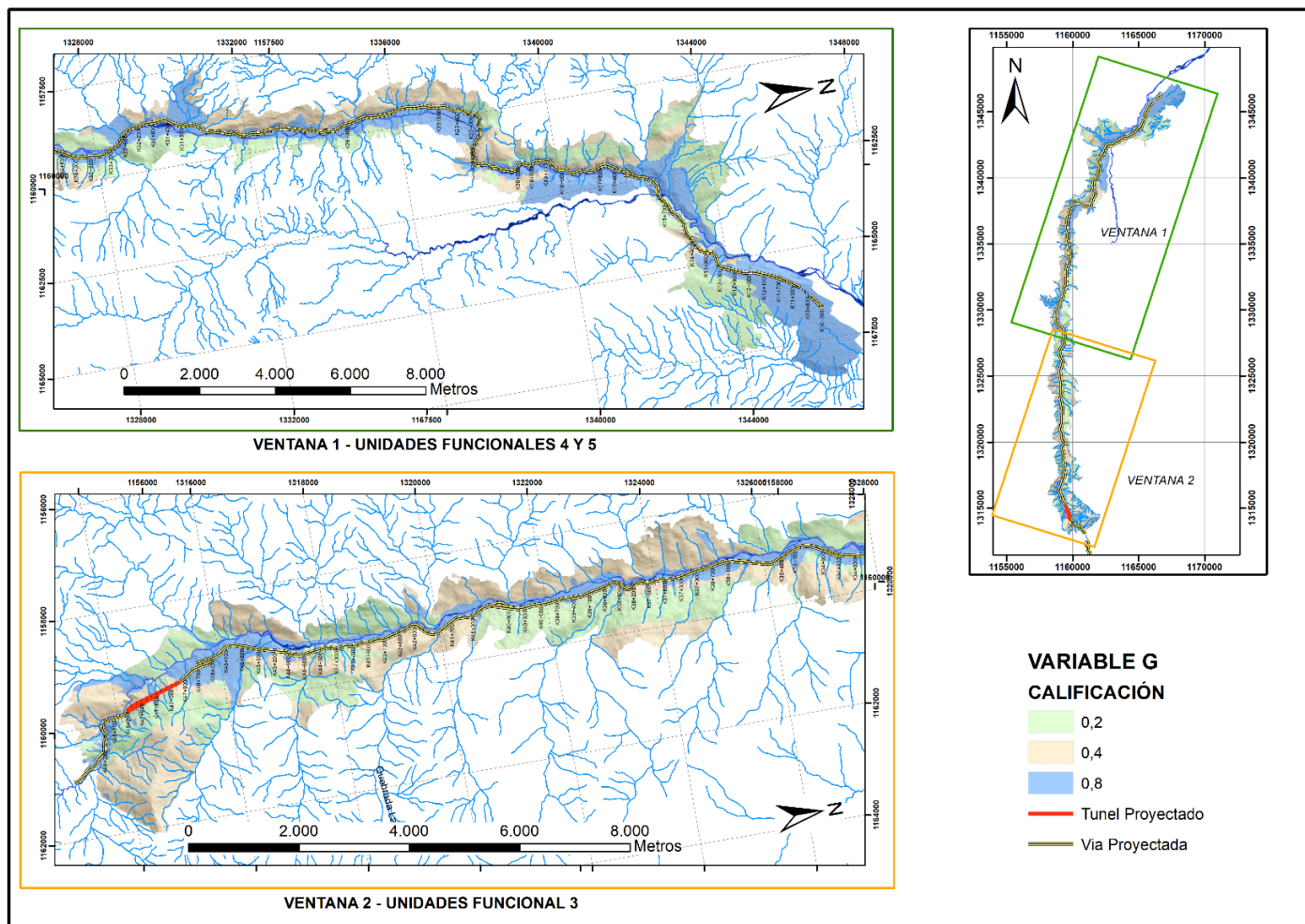
Este parámetro incluye una caracterización global de la zona que suprayace al acuífero, en cuanto a la naturaleza litológica y al grado de consolidación y fracturamiento de la roca. La importancia de la zona no saturada en la evaluación de la vulnerabilidad radica en su potencial para la interceptación, sorción y eliminación de bacterias y virus patógenos; para la atenuación de minerales pesados y químicos orgánicos a través de precipitación (como carbonatos, sulfatos e hidróxidos); para la sorción e intercambio catiónico y para la sorción y biodegradación de algunos compuestos orgánicos de origen natural o sintético. Sin embargo, la zona no saturada puede en ocasiones actuar sólo como un retardante del efecto contaminante, cuando se enfrenta a contaminantes móviles y persistentes.

Las características litológicas de la zona no saturada en la evaluación de la vulnerabilidad de acuíferos pueden dar indicios de la condición de confinamiento de los acuíferos.

Según las características litológicas evidenciadas en las perforaciones existentes se asignaron a este parámetro los valores indicados en la **Tabla 5-2.21**.

La distribución geográfica del parámetro “O” se muestra en la **Figura 5-2.79**.

Figura 5-2.78. Distribución geográfica del parámetro G en las UF3-4-5.



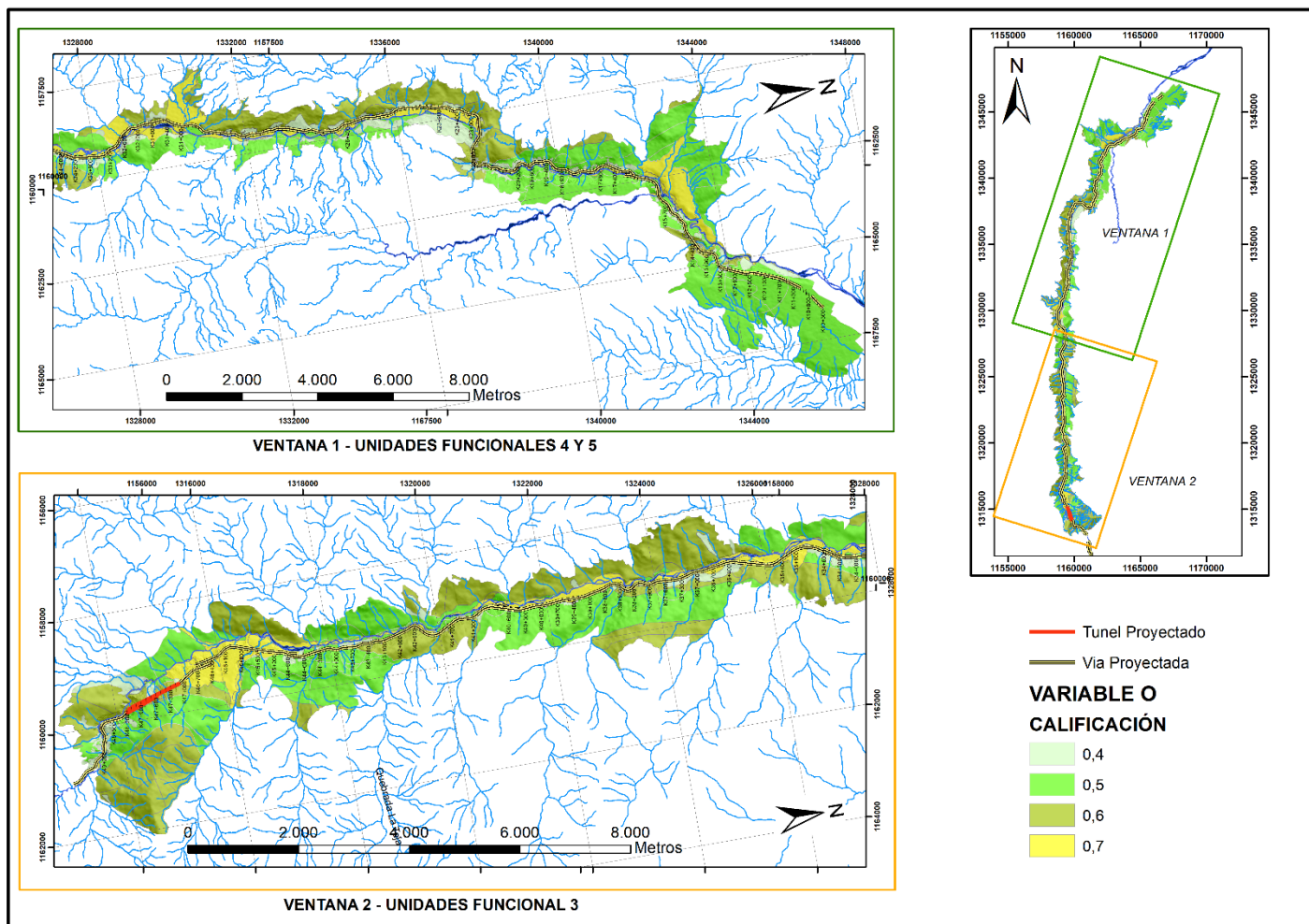
Fuente: Aecom – Concol, 2018

Tabla 5-2.18 Vulnerabilidad de unidades hidrogeológicas según sustrato suprayacente para las UF3-4-5.

| Unidad Hidrogeológica | Código | Calificación Parámetro "O" |
|--------------------------------------|--------|----------------------------|
| Abanico terraza | Qat | 0,6 |
| Abanico terraza, nivel 1 | Qat1 | 0,7 |
| Abanico terraza, nivel 2 | Qat2 | 0,7 |
| Deposito coluvial | Qc | 0,4 |
| Depósitos aluviales | Qal | 0,7 |
| Depósitos aluviales, abanico aluvial | Qaa | 0,7 |
| Formación La Luna | Ksl | 0,5 |
| Formación Tibú y Mercedes | Kitm | 0,6 |
| Formación Aguardiente | Kia | 0,6 |
| Formación Barco | Tpb | 0,6 |
| Formación Bocas | Jb | 0,6 |
| Formación Capacho | Kic | 0,5 |
| Formación Carbonera | E2c | 0,5 |
| Formación Colon-Mito Juan | Kscm | 0,5 |
| Formación Girón | Jg | 0,6 |
| Formación La Luna | Ksl | 0,5 |
| Formación Los Cuervos | E1lc | 0,5 |
| Formación Mirador | E2m | 0,6 |
| Granito de Durania | Tjgd | 0,6 |
| Relleno antrópico | Qrt | 0,6 |
| Relleno antrópico | Qrt | 0,6 |
| Terraza aluvial | Qt | 0,5 |
| Terraza aluvial, nivel 1 | Qt1 | 0,5 |
| Terraza aluvial, nivel 2 | Qt2 | 0,5 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

Figura 5-2.79. Distribución geográfica del parámetro O.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

5.1.8.10.3 Distancia al Nivel de Agua Subterránea (D)

Corresponde a la profundidad del nivel freático en acuíferos libres o profundidad del estrato litológico confinante en acuíferos confinados. La profundidad del agua subterránea es el parámetro más difícil de valorar. Esta profundidad puede estar sujeta a variaciones estacionales para el caso de acuíferos libres, cuya recarga depende en gran medida de la precipitación y las inundaciones que varían de acuerdo con las condiciones climáticas.

Según la profundidad del nivel freático y de acuerdo con la **Figura 5-2.80** se asignaron a este parámetro los siguientes valores:

Tabla 5-2.19. Vulnerabilidad de unidades hidrogeológicas por distancia al nivel del agua subterránea.

| Profundidad del nivel freático | Valor asignado |
|--------------------------------|----------------|
| >50 | 0,6 |
| 20 - 50 m | 0,7 |
| 5 - 20 m | 0,8 |
| <5m | 0,9 |

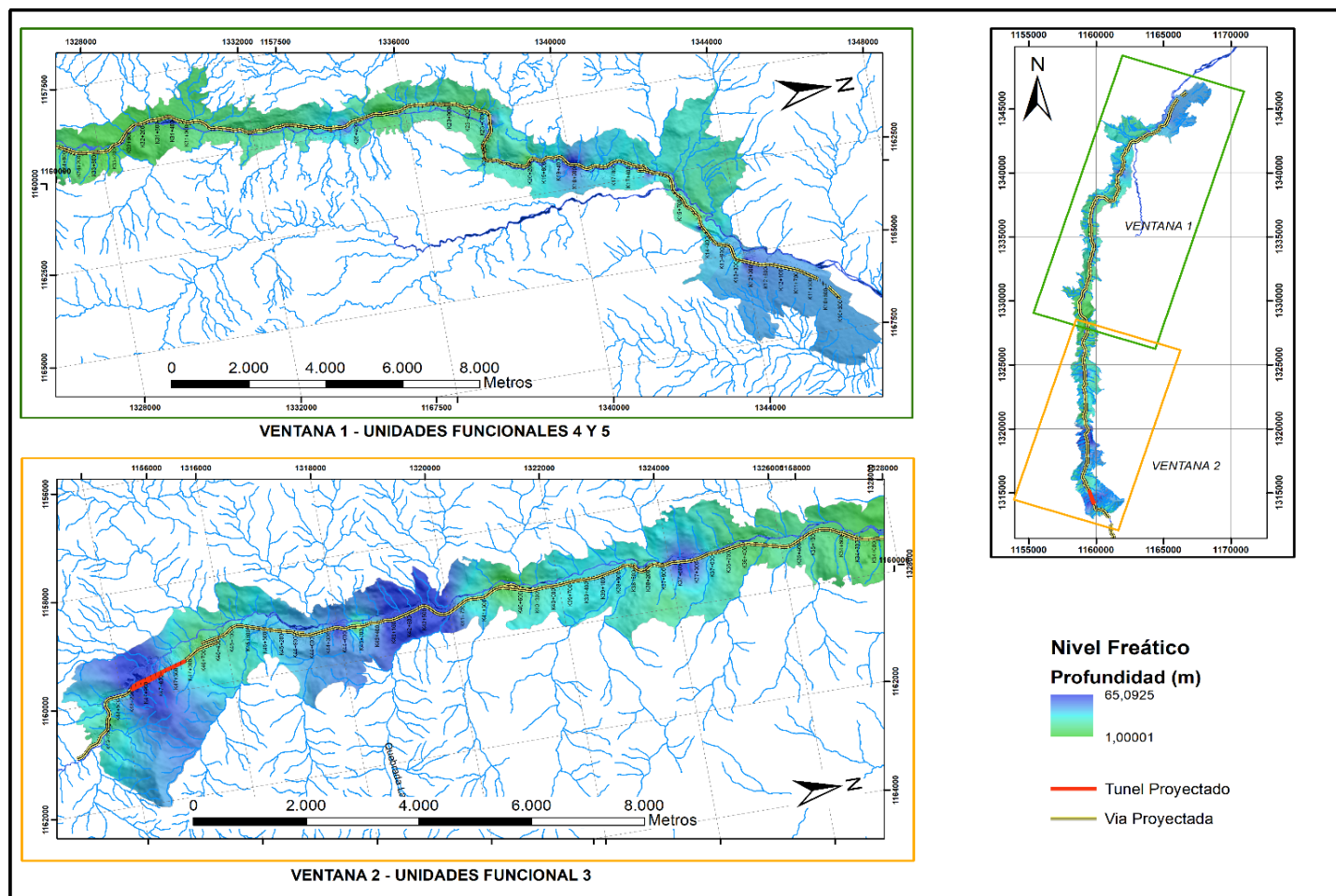
Fuente: Foster et al., 2002

En el presente estudio los valores de la profundidad del agua subterránea (D) han sido obtenidos a partir de la información suministrada por las perforaciones mecánicas realizadas a lo largo del trazado de las UF3-4-5 (Anexo 5.1.3.6) y modelo de elevación del terreno (MDT).

El nivel del agua subterránea se ha obtenido interpolando los valores de las isopiezas del nivel del agua subterránea, elaborado como “shapefile” en ambiente GIS a partir de los datos extraídos de las perforaciones y red hidrográfica de la zona de estudio, en donde su principal elemento lo constituye el río Pamplonita, así como varios cursos de aguas superficiales de menor orden. El proceso de interpolación ha permitido obtener un “raster” con resolución de 1m x 1m, en el que a cada celda le corresponde un valor de la profundidad relativa del nivel del agua en el subsuelo. Estos datos además permitieron que, en zonas con poca información, los datos fueran interpolados para mejorar la fiabilidad del modelo.

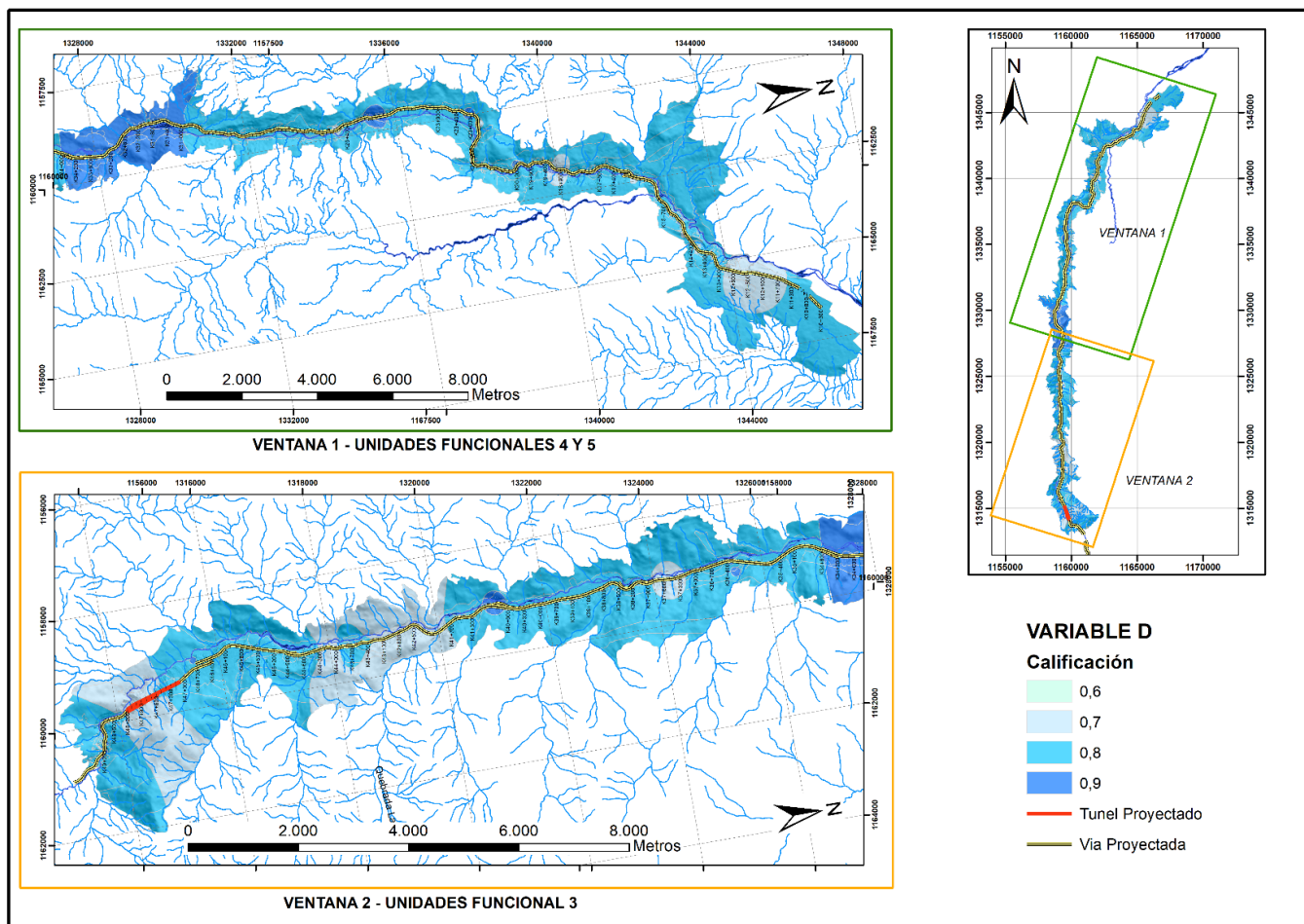
En la **Figura 5-2.80** y **Figura 5-2.81** se aprecia el análisis y resultado de la variable D en el área de influencia de las UF3-4-5. A partir de estos valores, se clasificaron los rangos de acuerdo con la **Tabla 5-2.19**, en función de la profundidad del nivel freático. El resultado se presenta en la **Figura 5-2.81**.

Figura 5-2.80. Valores de profundidad del nivel freático en la zona de estudio de las UF3-4-5.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

Figura 5-2.81. Valores asignados al parámetro D en la zona de influencia de las UF3-4-5.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

El cálculo de la vulnerabilidad en correspondencia con el túnel sólo es aplicable en aquellos casos en los que el nivel freático se ubique por debajo de la rasante de esta obra subterránea, lo cual para el túnel pamplonita sólo sucede en la zona de los portales. Para la mayor parte del túnel donde el nivel piezométrico se ubica por encima de su rasante no se aplica el concepto de vulnerabilidad descrito en el presente capítulo. Esto es tratado con mayor detalle en el último párrafo del capítulo sucesivo relacionado con el análisis de riesgo a la contaminación del acuífero.

5.1.8.10.4 Clasificación de la Vulnerabilidad

El índice de vulnerabilidad se calculó mediante la multiplicación de las variables de los tres componentes citados anteriormente (G.O.D), de acuerdo con la metodología descrita en la **Figura 5-2.77** con lo cual se llega a la siguiente expresión: $I = G \times O \times D$. (Ver Ecuación 4), en donde:

(G) Tipo de confinamiento del agua subterránea (tipo de acuífero). Se utilizó la información litológica y aquella relacionada con la capa freática.

(O) Características litológicas de la zona no saturada del acuífero. Se utilizó la información litológica que incluye la zona no saturada.

(D) Profundidad del agua subterránea o profundidad del nivel freático. Se utilizó la información del nivel freático.

De este modo, con el método aplicado se obtuvo un resultado que permitió discriminar los sectores vulnerables de aquellos de menor criticidad presentes a lo largo de la zona de estudio. El valor del índice (I) varía también entre 0 (vulnerabilidad muy baja) y 1 (vulnerabilidad elevada). El método prevé 5 (cinco) rangos de vulnerabilidad.

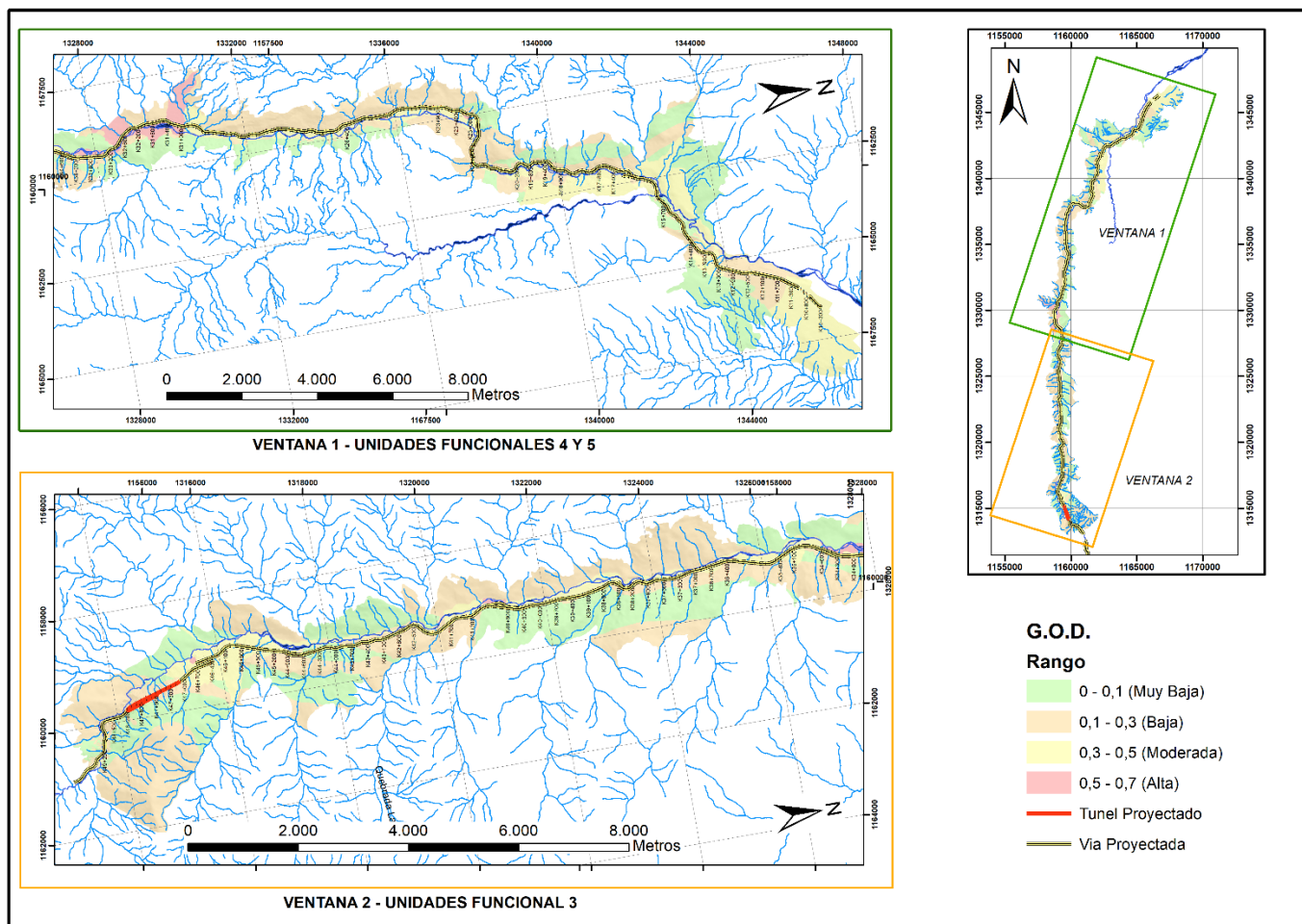
- Muy Baja o despreciable: Rango de valor entre 0.0 a 0.1;
- Baja: Rango de valor entre 0.1 y 0.3;
- Moderada: Rango de valor entre 0.3 y 0.5;
- Alta: Rango de valor entre 0.5 y 0.7;
- Elevada o Extrema: Rango de valor entre 0.7 y 1.0;

Con esto elementos conceptuales, se procedió a trabajar en el entorno SIG (Sistemas de Información Geográfica ArcGIS). El proceso de interpolación ha permitido obtener en términos generales un “raster” con resolución de 1m x 1m, con lo cual se aseguró el cubrimiento adecuado de toda el área de trabajo.

El valor asignado a cada una de las variables se basó en la información tomada de las perforaciones realizadas, observaciones de campo y análisis hidrogeológico. Siendo las perforaciones insumo importante para la asignación de la información litológica y sobre la profundidad del nivel freático.

Los resultados del procedimiento aplicado para calcular la vulnerabilidad del acuífero se muestran en la **Figura 5-2.82**.

Figura 5-2.82. Distribución geográfica de la vulnerabilidad intrínseca en las UF3-4-5.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

5.1.8.11 Valoración del riesgo de contaminación del acuífero por el desarrollo de las actividades y obras planteadas en las UF3-4-5.

5.1.8.11.1 Introducción

La evaluación de Riesgos es un instrumento para estimar la probabilidad de que ocurra algún daño causado por la presencia de condiciones peligrosas en alguna parte del proyecto. El riesgo representa la probabilidad e importancia de que un posible peligro se haga realidad.

El objetivo del proceso para identificar y evaluar riesgos es obtener un mayor conocimiento acerca de los tipos de sustancias y productos transportados, así como de las principales fuentes de potencial contaminación. El requisito principal de una identificación y evaluación de riesgos es adquirir un entendimiento del modelo conceptual del sitio, la vulnerabilidad de los acuíferos, la localización de las aguas subterráneas amenazadas por la contaminación y los tiempos de exposición a una contaminación.

Para las UF3-4-5 se ha analizado la siguiente información:

- ✓ Mapa de obras en fase de construcción (túneles, carretera nueva, carretera existente, vías de acceso, zódmes).
- ✓ Mapa de puntos o áreas de peligro de contaminación del acuífero por el desarrollo de las actividades y obras.
- ✓ Mapa de vulnerabilidad de los acuíferos (GOD).
- ✓ Matriz de cálculo de riesgo de contaminación del acuífero.
- ✓ Mapa de riesgo de contaminación del acuífero.

5.1.8.11.2 Metodología aplicada

Este documento ha sido realizado a partir de un análisis crítico de los procedimientos y ecuaciones propuestas por las principales líneas de normas y directrices nacionales e internacionales sobre la aplicación del análisis de riesgos para este tipo de obras. En particular, se han considerado como referencia los documentos emitidos por la ASTM, EPA, UNICHIM, CONCAWE. Estos documentos son el punto de referencia para el estudio del riesgo, ya que proporcionan la información necesaria para la elección de los parámetros, las ecuaciones para la descripción del transporte de contaminantes y para el cálculo de los límites de riesgo. Por lo general son el resultado del trabajo realizado por las agencias gubernamentales (por ejemplo, la EPA "*Environmental Protection Agency*" Estados Unidos.) o grupos de investigación que combinan diferentes competencias (por ejemplo, UNICHIM "*Associazione per l'Unificazione nel Settore dell'Industria Chimica*", asociación italiana federada al UNI) con el objetivo de crear una guía de referencia técnica para la aplicación del análisis de los criterios de riesgo.

El "Análisis de riesgos para el transporte terrestre de mercancías peligrosas en la ciudad de Barranquilla" (Gloria Estebana Bastidas Rodriguez y Fabio Andres Monsalvo Carrillo,

2011), propuesta para la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Atlántico en el marco del Programa de Ingeniería Industrial Barranquilla, es otro ejemplo de aplicación metodológica que ha proporcionado una indicación útil para los análisis del presente estudio.

La reconstrucción del medio real (tanto natural como antropogénico), de sus elementos y de las interacciones entre ellos, por medio de herramientas cualitativas o matemáticas lleva el nombre de "Modelo". Esta abstracción permite, a partir de una geometría real y por lo tanto compleja, dar vida a un esquema físico teórico simplificado. Como parte del análisis de riesgo relacionado con la contaminación de un acuífero, es necesario identificar el Modelo Conceptual del Sitio. Este proceso es el resultado de las investigaciones y análisis del sitio y su definición comprende esencialmente la reconstrucción de los tres componentes principales de los caracteres que constituyen el modelo:

Fuente \Rightarrow Transporte \Rightarrow Objetivo

para lo cual se definen:

- las fuentes de peligro de contaminación, o fuentes de amenaza
- La vulnerabilidad del acuífero desde la superficie
- La localización de los acuíferos

El riesgo (R), como definición originalmente derivada de los procedimientos de seguridad industrial, es la combinación de la probabilidad de ocurrencia de un evento dañoso, o vulnerabilidad (V) con la entidad de los daños causados por el mismo evento (D). Donde,

$$R = V \times D \quad (\text{Ecuación 2})$$

El daño resultante de un evento incidental (D), a su vez, puede ser dado por el producto de un factor de peligrosidad (Fp), dependiente de la entidad del daño teóricamente posible, y un factor de contacto (Fc), dependiente de la duración de la exposición. Resultando que,

$$D = Fp \times Fc \quad (\text{Ecuación 3})$$

Los numerales del 5.1.8.10.3 al 5.1.8.10.4 integran y complementan la metodología utilizada en la evaluación del riesgo del presente estudio.

5.1.8.11.3 Análisis de la vulnerabilidad

En el presente estudio hidrogeológico se ha realizado un análisis de vulnerabilidad de los acuíferos, mediante el método GOD (Foster et al., 2002; Foster, 1987). Esta información representa el primer dato necesario para investigar las características propias de un acuífero expuesto a una amenaza.

El método GOD se basa en tres variables que permiten el cálculo de la vulnerabilidad del acuífero:

- el confinamiento del agua subterránea (G),
- las diferentes capas geológicas pertenecientes al acuífero y su respectivo grado de consolidación (O) y
- la profundidad del nivel freático (D).

En el proyecto de las UF3-4-5, se obtuvo el índice de vulnerabilidad según la siguiente operación:

$$I = G \times O \times D \quad (\text{Ecuación 4})$$

El valor del índice (I) varía entre 0 (vulnerabilidad baja) y 1 (vulnerabilidad elevada). El método prevé 5 (cinco) clases de vulnerabilidad, a las cuales se ha aplicado un puntaje de 1 a 5, necesario para calcular el riesgo de contaminación de los acuíferos.

El análisis realizado, así como los resultados obtenidos mediante la aplicación del método GOD en las UF3-4-5, se pueden ver con detalle en el numeral 5.1.8.9 del presente informe.

5.1.8.11.4 Factores de peligrosidad de las fuentes de amenaza

Como se describió anteriormente, el daño resultante de un hipotético evento incidental es el producto de un factor de peligrosidad (Fp), dependiente de la entidad del daño teóricamente posible, y un factor de contacto (Fc), dependiente de la duración de la exposición.

- Factor de peligrosidad (Fp)

Para la identificación, descripción y análisis de amenazas se debe identificar y ordenar el tipo de fuente de amenaza de infiltración de sustancias peligrosas que podrían contaminar los acuíferos y el medio ambiente, esto con el propósito de facilitar una priorización de riesgos, el cual puede consistir en una simple categorización. Para este fin se utilizó la **Tabla 5-2.20**. En la primera columna se describen las posibles fuentes de amenaza identificadas. En las columnas siguientes se describen las características que contribuyen a definir la peligrosidad y se coloca el puntaje, de 1 a 3, y la calificación que corresponda. Como se ve, el puntaje de Fp varía de 1 a 9 y sugiere prioridades donde 1 representa el de menor importancia y 9 el de mayor riesgo de contaminación.

Tabla 5-2.20. Clasificación adoptada por la evaluación del Factor de peligrosidad (Fp)

| Fuente de amenaza | Geometría | | | Fenómeno | | | Puntaje Fp | Peligrosidad |
|-------------------------------|-----------|--------|-------|-------------------|------------------|----------------------------|------------|--------------|
| | Puntual | Lineal | Areal | Material orgánico | Aceites y grasas | Metales pesados , pH ácido | | |
| Nueva carretera cielo abierto | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 | 0 | 4 | MEDIA |

| Fuente de amenaza | Geometría | | | Fenómeno | | | Puntaje Fp | Peligrosidad |
|-----------------------------------|-----------|--------|-------|-------------------|------------------|----------------------------|------------|--------------|
| | Puntual | Lineal | Areal | Material orgánico | Aceites y grasas | Metales pesados , pH ácido | | |
| Carretera existente cielo abierto | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 | 0 | 4 | MEDIA |
| Botadero (zodmes) | 0 | 0 | 3 | 0 | 2 | 3 | 8 | ALTA |
| Accesos Viales | 0 | 2 | 0 | 0 | 2 | 0 | 4 | MEDIA |

Fuente: Aecom – Concol, 2018.

- **Factor de contacto (Fc)**

El factor de contacto (Fc), o duración de la exposición, se calcula asignando los puntajes de 0, 1 o 2 a los tiempos de duración de la fuente de contaminación, dependiendo si la fuente es temporal (puntaje 1) o permanente (puntaje 2). En la **Tabla 5-2.21** se describen las clasificaciones adoptadas.

Tabla 5-2.21. Clasificación adoptada por la evaluación del Factor de contacto (Fc)

| Fuente de amenaza | Duración | | Puntaje Fc | Peligrosidad |
|-----------------------------------|----------|------------|------------|--------------|
| | Temporal | Permanente | | |
| Nueva carretera cielo abierto | 0 | 2 | 2 | ALTA |
| Carretera existente cielo abierto | 0 | 2 | 2 | ALTA |
| Botadero (zodmes) | 0 | 2 | 2 | ALTA |
| Accesos Viales | 0 | 2 | 2 | ALTA |

Fuente: Aecom – Concol, 2018.

El factor Fc varia de 1 a 2 y sugiere prioridades donde 1 representa el riesgo de menor importancia y 2 el de mayor riesgo de contaminación. La peligrosidad en este caso puede variar de baja (puntaje 1) a alta (puntaje 2).

5.1.8.11.5 Evaluación del riesgo

Esta etapa cumple para la evaluación y valoración del riesgo basada en la mencionada metodología de calificación. El fundamento básico de la metodología es asignar puntajes a la vulnerabilidad de los acuíferos y a los factores de amenaza y de exposición, con ello valorar el riesgo. Esta metodología permite desarrollar de forma general y cualitativa el análisis de amenaza y vulnerabilidad con el fin de determinar el nivel de riesgo a través de la combinación de diversas variables. Asimismo, aporta elementos de prevención y mitigación de los riesgos, los cuales constituirán la base para formular los planes de acción.

Una vez identificadas, descritas y analizadas las amenazas y desarrollado el análisis de vulnerabilidad, se procede a determinar el nivel de riesgo combinando la calificación de la amenaza y la vulnerabilidad.

Tabla 5-2.22. Cálculo del riesgo (R) mínimo y máximos posibles y del riesgo normalizado (Rn), entre 0 y 1

| Vulnerabilidad (V) | Factor de peligrosidad (Fp) | Factor de contacto (Fc) | Riesgo (R) | Riesgo Normalizado (R) |
|--------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------|------------------------|
| 1 | 1 | 1 | 1 (mínimo) | 0,00 |
| 5 | 9 | 2 | 90 (máximo) | 1,00 |
| 1 | 1 | 2 | 2 | 0,01 |
| 3 | 1 | 1 | 3 | 0,02 |
| 2 | 1 | 2 | 4 | 0,03 |
| 4 | 2 | 1 | 8 | 0,08 |
| 2 | 4 | 2 | 16 | 0,17 |
| 3 | 4 | 2 | 24 | 0,26 |
| 4 | 4 | 2 | 32 | 0,35 |
| 3 | 8 | 2 | 48 | 0,53 |
| 4 | 4 | 2 | 64 | 0,71 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018.

5.1.8.11.6 Resultados

El resultado de los pasos anteriores se usa para priorizar los riesgos. La clasificación total de los riesgos para cada tramo, las diferentes amenazas estudiadas, sus respectivas calificaciones y descripciones se encuentran detalladas a continuación:

Lo primero que se debe tener en cuenta es que la clasificación se dividió en 5 clases:

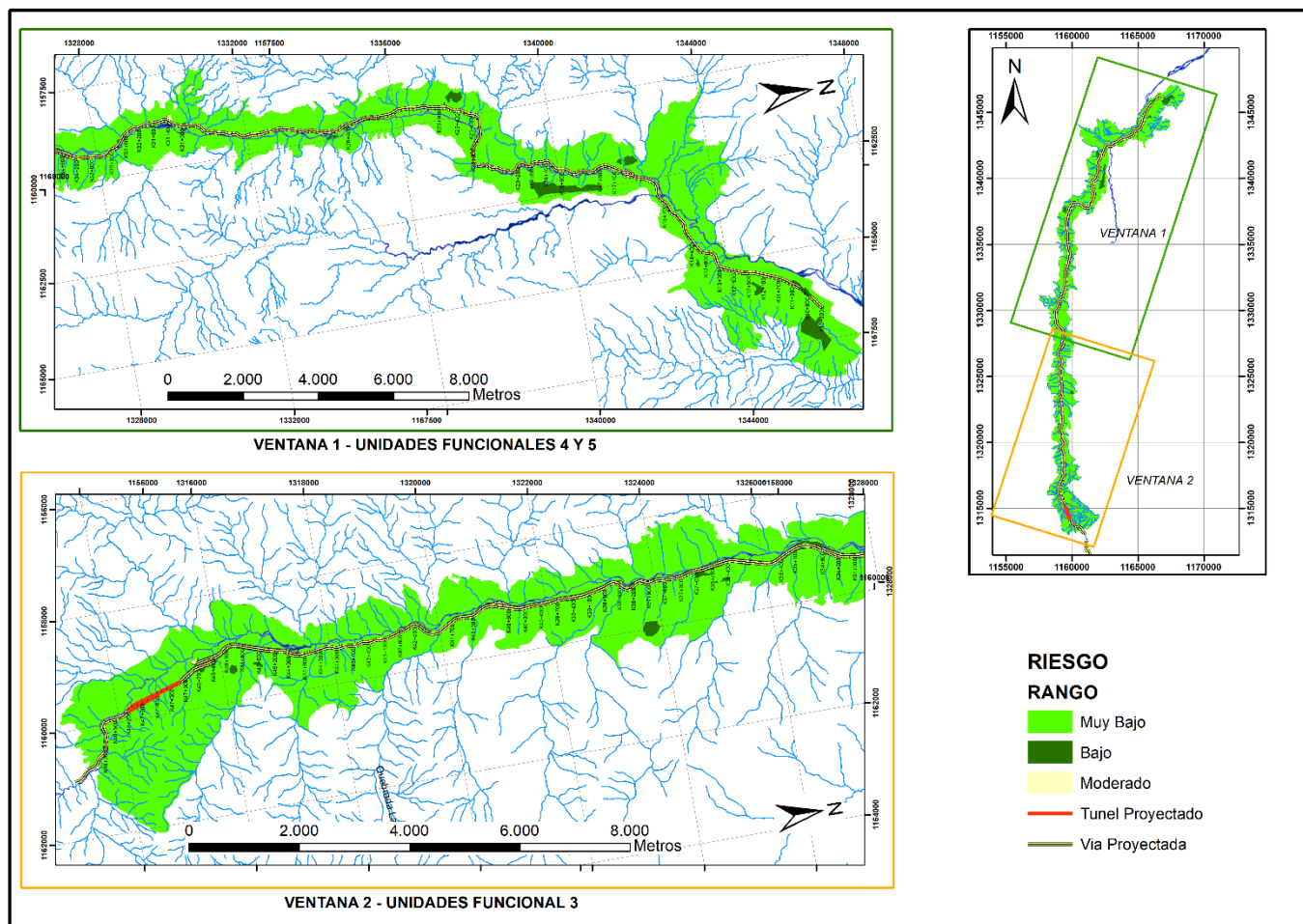
Figura 5-2.83. Clasificación del riesgo para la zona de estudio



Fuente: Aecom – Concol, 2018

Cada clase fue ponderada acorde al peso de la vulnerabilidad y al factor de peligrosidad y de contacto, luego de lo cual se normalizaron los resultados y se agruparon para su posterior análisis.

Figura 5-2.84. Clasificación del riesgo para la zona de estudio de las UF3-4-5



Fuente: Aecom – Concol, 2018

Una vez analizado el riesgo se encontró que concordantemente con el análisis de vulnerabilidad, la mayor cantidad de la zona presenta una vulnerabilidad muy baja (96.70%), baja (5.33%) y moderada (0.14%) esto se debe a la presencia de pendientes moderadas y fuertes en la zona, así como a la ausencia de grandes obras o intervenciones, salvo la vía misma y el túnel. Este último amerita un análisis diferente ya que su cota de excavación se encuentra a una profundidad razonable, generalmente bajo nivel freático. Bajo estas condiciones de saturación y considerando la presencia de las obras de drenaje e impermeabilización previstas en el túnel Pamplonita, no es posible que se introduzcan contaminantes al acuífero. Aquí el riesgo a la contaminación se da especialmente por vertimiento del caudal drenado en el túnel, lo cual está sujeto a otro tipo de análisis tratado en un capítulo aparte.

5.1.8.12 Valoración del potencial de afectación de los puntos de agua censado en la vía a cielo abierto y zódmes de las UF3-4-5.

5.1.8.12.1 Criterios utilizados

Los puntos de agua identificados durante el inventario y localizados en la zona de influencia de las UF3-4-5 han sido sometidos a un análisis de sensibilidad con el objeto de identificar su potencial afectación por las obras que integran el nuevo corredor vial. Los criterios de mayor relevancia utilizados para la valoración hecha toman en cuenta la distancia y posición del punto de agua respecto al trazado de la nueva vía y al tipo de obra civil que la integra (puentes/viaductos, terraplenes, vía normal, cortes/taludes, entre otros). Así como su posición en el área general del proyecto definida por las obras conexas al mismo.

De lo indicado en el párrafo anterior y para la definición de los puntos a ser impactados se distinguen dos áreas con respecto al trazado de la vía. La primera corresponde a aquellas áreas sobre las cuales van a existir obras, es decir las zonas en las cuales la vía tendrá cortes, rellenos y por supuesto la zona de construcción de la estructura lineal de pavimento, bermas y obras de arte conexas (polígono de intervención de la obra). La segunda área corresponde a aquella de diseño definida por el constructor que contiene las obras anexas al proyecto vial (ZODMES, campamentos, senderos, plantas industriales, etc).

En relación con la valoración de la posición del punto respecto al trazado de la vía proyectada, se tiene en cuenta si este se ubica altimétricamente arriba o abajo del nivel de la rasante, tomando en consideración la dirección preferencial del flujo subterráneo o subsuperficial.

En relación con las estructuras u obras que integran el corredor vial se ha dado un mayor peso de afectación a aquellos puntos de agua localizados en una cota cercana respecto a cortes y taludes, así como en cotas inferiores respecto a rellenos aledaños al trazado donde puede verse afectada el área de captura o recarga del punto. Así como un peso menor a aquellos puntos ubicados frente a la estructura de vía a nivel.

En el caso de los taludes y cortes, aparte de la excavación que se realiza en el terreno, se

suma el hecho que generalmente se deben realizar perforaciones para instalación de drenajes que de acuerdo con su cantidad y dimensiones tienen el potencial de abatir el nivel freático hasta varios metros atrás de la cabeza del talud, convirtiéndose de este modo en la obra que en mayor grado puede llegar a afectar los puntos de agua ubicados en cotas superiores y/o inferiores respecto al trazado.

En relación con la distancia respecto al eje de la nueva vía, los puntos de agua identificados durante el inventario se han dividido en dos grandes grupos; aquellos localizados a distancias mayores o iguales a 100 m y aquellos ubicados a distancias menores o iguales a este valor. Estos últimos a su vez se han dividido en tres subgrupos; aquellos puntos de agua localizados a distancias mayores a 60 m, aquellos localizados a distancias entre 60 y 30 m, y finalmente aquellos ubicados en distancias menores a 30 m respecto al eje de la vía o al interior del polígono de intervención o en sus inmediaciones.

Para todos los puntos de agua en general se ha estimado un potencial de afectación dividido en tres (3) niveles (desde 1 hasta 3). La división en tres niveles se ha considerado adecuada porque permite de manera clara y eficaz obtener una valoración concreta del riesgo al que está sometido el punto de agua por la presencia de la vía, de manera coherente con la información base necesaria para su determinación. Siendo el nivel 1 el de menor potencial de afectación y el nivel 3 el de mayor potencial de afectación esperada. En el presente trabajo se incluye la valoración de afectación de los puntos de agua por la presencia de zódmes. La valoración y criterios específicos aplicables al presente caso de estudio son los descritos a continuación:

- Nivel 1: Corresponde a puntos de agua en los cuales no se prevé afectación o su potencial es muy bajo a imperceptible.

Se le asigna este valor a todos los puntos que cumplen con los siguientes criterios:

- Puntos de agua localizados a distancias mayores a 100 m a cada lado del trazado vial, independientemente de su posición respecto al eje de la vía, estructura u obra.
- Puntos de agua localizados a una distancia mayor a 60 m del eje del trazado vial; ubicados en cotas superiores o inferiores respecto a cortes/taludes, puentes, terraplenes, rellenos laterales o vía a nivel.
- Puntos de agua localizados a una distancia menor a 60 m del eje del trazado vial, ubicados en cotas superiores o inferiores respecto a puentes, taludes menores a 10 m de altura (sin drenes), terraplenes de baja altura, y vía a nivel (sin rellenos laterales); con excepción de los puntos de agua descritos en los niveles 2 y 3.
- Puntos de agua localizados a distancias mayores a 100 m alrededor del polígono que delimita el área del zódme, independientemente de su posición altimétrica.
- Puntos de agua localizados en cotas superiores dentro de un buffer de 100 m

alrededor del polígono que delimita el área del zodme, con excepción de los puntos de agua planteados en los niveles 2 y 3.

- Nivel 2: Corresponde a puntos de agua con potencial de afectación bajo a medio.

Se le asigno este valor a todos los puntos que cumplen con los siguientes criterios:

- Puntos de agua localizados a una distancia comprendida entre 60 y 30 m del eje del trazado vial, ubicados en cotas superiores respecto a cortes y taludes en los que se construyen zanjas de recolección (por lo general taludes mayores a 10 m de altura) y/o en cotas inferiores respecto a rellenos laterales aledaños a la vía. Con excepción de los puntos de agua ubicados al interior del polígono de intervención de la obra o en sus inmediaciones.
- Puntos de agua localizados a una distancia menor o igual a 30 m del eje del trazado vial; ubicados en cotas inferiores respecto a puentes o viaductos, terraplenes de baja altura y vía a nivel (sin rellenos laterales). Con excepción de los puntos de agua ubicados al interior del polígono de intervención de la obra o en sus inmediaciones.
- Puntos de agua localizados en cotas inferiores dentro de un buffer de 100 m alrededor del polígono que delimita el área del zodme.

- Nivel 3: Corresponde a puntos de agua con potencial de afectación de alto a muy alto.

Se le asigno este valor a todos los puntos que cumplen con los siguientes criterios:

- Puntos de agua localizados en el interior o en las inmediaciones del polígono de intervención de la obra, es decir, en correspondencia con la(s) calzada(s) de la vía, incluidas sus obras de arte, chaflanes de los cortes o taludes y cotas de rellenos; independientemente de su posición respecto al eje de la vía, estructura u obra.
- Puntos de agua localizados al interior o en las inmediaciones del polígono que delimita el área del zodme.

En la **Tabla 5-2.23** se muestra el resultado del potencial de afectación definido para los puntos de agua censados para la vía a cielo abierto y zodmes de las UF3-4-5, a los que se les han aplicados los criterios antes mencionados. Los puntos de agua censados en la zona de influencia del túnel de Pamplonita fueron analizados con otra metodología y son presentados en parágrafos sucesivos.

Tabla 5-2.23. Potencial de afectación de los puntos de agua encontrados en las UF3-4-5

| Pto de Agua (ID PA) | Tipo de Punto ID | Coordenadas Magna Sirgas (origen Bogotá) | | | Abscisa Perímetro (Refe- rencia) | Obra más cercana al PA | | | Posición altimétrica | | Potencial de afectación | | |
|------------------------|---------------------|---|-----------|-------|---|--------------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------|------------------|-------------------------|---------|---------|
| | | E | N | ELEV | | Tipo Obra más cercana | Distancia H al perímetro PI | Distancia H al Eje Trazado | Cota superior | Cota inferior | Nivel 1 | Nivel 2 | Nivel 3 |
| UF3-P01 | Manantial | 1,160,160 | 1,314,278 | 1,868 | K48+150 | Tunel | 291 | 323 | SI | | 1 | | |
| UF3-P02 | Resurgencia | 1,160,029 | 1,313,981 | 1,763 | K48+470 | Vía | 90 | 115 | SI | | 1 | | |
| UF3-P03 | Resurgencia | 1,160,027 | 1,314,126 | 1,777 | K48+320 | Tunel | 114 | 137 | SI | | 1 | | |
| UF3-P04 | Resurgencia | 1,160,099 | 1,314,170 | 1,818 | K48+300 | Tunel | 197 | 219 | SI | | 1 | | |
| UF3-P06 | Manantial | 1,160,002 | 1,315,124 | 1,906 | K47+360 | Tunel | 471 | 484 | SI | | 1 | | |
| UF3-P07 | Resurgencia | 1,160,103 | 1,315,191 | 1,910 | K47+340 | Tunel | 587 | 601 | SI | | 1 | | |
| UF3-P08 | Manantial | 1,159,991 | 1,315,376 | 1,863 | K47+150 | Tunel | 494 | 547 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA10 | Interflujo | 1,160,450 | 1,313,709 | 1,737 | K49+000 | Vía | 20 | 48 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA11 | Interflujo | 1,160,251 | 1,313,731 | 1,731 | K49+028 | Vía | 0 | 15 | SI | | | | 3 |
| UF3-PA12 | Manantial | 1,159,373 | 1,317,920 | 1,495 | K44+235 | Vía | 9 | 54 | SI | | | 2 | |
| UF3-PA13 | Manantial | 1,159,496 | 1,318,414 | 1,500 | K43+690 | Vía | 76 | 129 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA14 | Resurgencia | 1,159,601 | 1,319,855 | 1,388 | K42+128 | Vía | 114 | 155 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA15 | Interflujo | 1,159,200 | 1,320,633 | 1,327 | K41+326 | Vía | 2 | 13 | | SI | | 2 | |
| UF3-PA16 | Interflujo | 1,159,140 | 1,320,926 | 1,313 | K41+010 | Vía | 35 | 50 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA17 | Interflujo | 1,159,174 | 1,321,257 | 1,297 | K40+661 | Vía | 0 | 11 | SI | | | | 3 |
| UF3-PA18 | Interflujo | 1,159,246 | 1,321,403 | 1,303 | K40+501 | Vía | 25 | 37 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA19 | Resurgencia | 1,159,234 | 1,321,629 | 1,299 | K40+284 | Vía | 0 | 8 | SI | | | | 3 |
| UF3-PA20 | Resurgencia | 1,159,213 | 1,322,250 | 1,274 | K39+663 | Vía | 8 | 18 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA21 | Resurgencia | 1,159,156 | 1,324,321 | 1,194 | K37+466 | Vía | 11 | 20 | | SI | | 2 | |
| UF3-PA23 | Resurgencia | 1,159,329 | 1,326,132 | 1,187 | K35+635 | Vía | 103 | 116 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA25 | Resurgencia | 1,159,059 | 1,315,768 | 1,574 | K46+500 | Vía | 64 | 92 | | SI | 1 | | |

| Pto de Agua | Tipo de Punto | Coordenadas Magna Sirgas (origen Bogotá) | | | Abscisa Perímetro | Obra más cercana al PA | | | Posición altimétrica | | Potencial de afectación | | |
|-------------|---------------|--|-----------|-------|-------------------|------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------|---------------|-------------------------|---------|---------|
| (ID PA) | ID | E | N | ELEV | (Referencia) | Tipo Obra más cercana | Distancia H al perímetro PI | Distancia H al Eje Trazado | Cota superior | Cota inferior | Nivel 1 | Nivel 2 | Nivel 3 |
| UF3-PA26 | Manantial | 1,159,040 | 1,315,930 | 1,573 | K46+335 | Vía | 8 | 78 | | SI | 1 | | |
| UF3-PA27 | Interflujo | 1,159,025 | 1,315,966 | 1,588 | K46+278 | Vía | 34 | 81 | | SI | 1 | | |
| UF3-PA28 | Resurgencia | 1,159,476 | 1,314,833 | 1,666 | K47+480 | Tunel | 92 | 104 | | SI | 1 | | |
| UF3-PA29 | Manantial | 1,159,407 | 1,314,880 | 1,635 | K47+400 | Tunel | 146 | 156 | | SI | 1 | | |
| UF3-PA30 | Interflujo | 1,159,532 | 1,314,703 | 1,683 | K47+620 | Tunel | 76 | 87 | | SI | 1 | | |
| UF3-PA31 | Interflujo | 1,159,241 | 1,321,375 | 1,310 | K40+530 | Vía | 26 | 41 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA32 | Interflujo | 1,159,708 | 1,315,024 | 1,836 | K47+380 | Tunel | 161 | 173 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA33 | Manantial | 1,159,021 | 1,315,955 | 1,613 | K46+290 | Vía | 22 | 90 | | SI | 1 | | |
| UF3-PA34 | Resurgencia | 1,159,403 | 1,326,093 | 1,203 | K35+650 | Vía | 177 | 192 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA35 | Interflujo | 1,159,196 | 1,321,378 | 1,307 | K40+530 | Vía | 0 | 3 | | | | | 3 |
| UF3-PA36 | Interflujo | 1,159,621 | 1,321,446 | 1,509 | K40+400 | Vía | 378 | 395 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA37 | Interflujo | 1,159,571 | 1,321,659 | 1,517 | K40+270 | Vía | 321 | 347 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA38 | Interflujo | 1,159,589 | 1,321,868 | 1,510 | K40+050 | Vía | 359 | 370 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA39 | Antropico | 1,159,183 | 1,320,459 | 1,351 | K41+500 | Vía | 0 | 23 | | SI | | | 3 |
| UF3-PA40 | Antropico | 1,159,185 | 1,320,519 | 1,346 | K41+450 | Vía | 6 | 26 | | SI | | 2 | |
| UF3-PA41 | Antropico | 1,159,188 | 1,320,592 | 1,341 | K41+370 | Vía | 15 | 27 | | SI | | 2 | |
| UF3-PA42 | Antropico | 1,159,184 | 1,320,676 | 1,334 | K41+270 | Vía | 5 | 16 | | SI | | 2 | |
| UF3-PA43 | Interflujo | 1,159,122 | 1,320,879 | 1,318 | K41+060 | Vía | 7 | 23 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA44 | Interflujo | 1,159,044 | 1,319,620 | 1,389 | K42+490 | Vía | 140 | 152 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA45 | Interflujo | 1,159,583 | 1,317,603 | 1,533 | K44+530 | Acceso Zodme 360 | 0 | 222 | SI | | | | 3 |
| UF3-PA46 | Interflujo | 1,159,719 | 1,317,580 | 1,554 | K44+560 | Acceso Zodme 360 | 1 | 353 | SI | | | | 3 |
| UF3-PA47 | Interflujo | 1,159,312 | 1,315,870 | 1,619 | K46+450 | Vía | 89 | 100 | SI | | 1 | | |

| Pto de Agua | Tipo de Punto | Coordenadas Magna Sirgas (origen Bogotá) | | | Abscisa Perímetro | Obra más cercana al PA | | | Posición altimétrica | | Potencial de afectación | | |
|-------------|---------------|--|-----------|-------|-------------------|------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------|---------------|-------------------------|---------|---------|
| (ID PA) | ID | E | N | ELEV | (Referencia) | Tipo Obra más cercana | Distancia H al perímetro PI | Distancia H al Eje Trazado | Cota superior | Cota inferior | Nivel 1 | Nivel 2 | Nivel 3 |
| UF3-PA48 | Interflujo | 1,159,342 | 1,315,873 | 1,623 | K46+450 | Vía | 119 | 130 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA49 | Antropico | 1,159,502 | 1,316,381 | 1,643 | K45+700 | Acceso Zodme 362 | 4 | 463 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA50 | Antropico | 1,160,011 | 1,316,048 | 1,712 | K46+300 | Polvorin 1 | 162 | 823 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA51 | Interflujo | 1,159,038 | 1,315,967 | 1,581 | K46+290 | Vía | 39 | 70 | | SI | 1 | | |
| UF3-PA52 | Resurgencia | 1,159,949 | 1,315,109 | 1,910 | K47+360 | Tunel | 417 | 429 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA53 | Resurgencia | 1,159,955 | 1,315,290 | 1,864 | K47+150 | Tunel | 446 | 487 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA54 | Resurgencia | 1,159,809 | 1,314,743 | 1,844 | K47+690 | Tunel | 147 | 189 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA55 | Antropico | 1,159,310 | 1,315,096 | 1,628 | K47+190 | Tunel | 43 | 187 | | SI | 1 | | |
| UF3-PA56 | Antropico | 1,159,185 | 1,315,284 | 1,602 | K46+920 | Vía | 98 | 203 | | SI | 1 | | |
| UF3-PA57 | Resurgencia | 1,159,132 | 1,315,246 | 1,584 | K46+930 | Vía | 154 | 266 | | SI | 1 | | |
| UF3-PA58 | Manantial | 1,158,808 | 1,315,040 | 1,664 | K46+950 | Vía | 501 | 651 | | SI | 1 | | |
| UF3-PA59 | Resurgencia | 1,160,687 | 1,314,021 | 1,850 | K49+250 | Vía | 405 | 429 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA60 | Manantial | 1,160,467 | 1,314,297 | 1,903 | K49+050 | Vía | 586 | 609 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA61 | Resurgencia | 1,159,390 | 1,314,182 | 1,682 | K48+100 | Tunel | 366 | 377 | | SI | 1 | | |
| UF3-PA62 | Resurgencia | 1,159,364 | 1,314,218 | 1,677 | K48+070 | Tunel | 376 | 387 | | SI | 1 | | |
| UF3-PA63 | Manantial | 1,159,372 | 1,314,002 | 1,747 | K48+200 | Tunel | 450 | 470 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA64 | Manantial | 1,159,412 | 1,313,988 | 1,750 | K48+200 | Tunel | 419 | 444 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA65 | Manantial | 1,159,462 | 1,313,960 | 1,765 | K48+200 | Tunel | 398 | 418 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA66 | Resurgencia | 1,159,519 | 1,314,017 | 1,747 | K48+200 | Tunel | 317 | 340 | SI | | 1 | | |
| UF3-PA67 | Interflujo | 1,159,014 | 1,315,978 | 1,572 | K46+250 | Vía | 42 | 86 | | SI | 1 | | |
| UF3-PA68 | Interflujo | 1,159,005 | 1,315,977 | 1,568 | K46+250 | Vía | 41 | 94 | | SI | 1 | | |
| UF3-PA69 | Interflujo | 1,159,002 | 1,315,996 | 1,570 | K46+240 | Vía | 61 | 86 | | SI | 1 | | |

| Pto de Agua | Tipo de Punto | Coordenadas Magna Sirgas (origen Bogotá) | | | Abscisa Perímetro | Obra más cercana al PA | | | Posición altimétrica | | Potencial de afectación | | |
|-------------|---------------|--|-----------|-------|-------------------|------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------|---------------|-------------------------|---------|---------|
| (ID PA) | ID | E | N | ELEV | (Referencia) | Tipo Obra más cercana | Distancia H al perímetro PI | Distancia H al Eje Trazado | Cota superior | Cota inferior | Nivel 1 | Nivel 2 | Nivel 3 |
| UF3-PA101 | Interflujo | 1,159,120 | 1,315,913 | 1606 | K46+370 | Vía | 0 | 5 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA01 | Manantial | 1,161,314 | 1,338,265 | 878 | K21+138 | Vía | 95 | 130 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA02 | Manantial | 1,161,348 | 1,338,268 | 862 | K21+126 | Vía | 74 | 109 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA03 | Manantial | 1,161,368 | 1,338,283 | 842 | K21+105 | Vía | 72 | 106 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA06 | Manantial | 1,160,022 | 1,335,864 | 964 | K25+277 | Vía | 376 | 397 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA08 | Resurgencia | 1,161,374 | 1,338,299 | 843 | K21+090 | Vía | 80 | 116 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA09 | Interflujo | 1,159,519 | 1,328,230 | 1,089 | K33+393 | Vía | 113 | 134 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA10 | Interflujo | 1,159,496 | 1,328,131 | 1,114 | K33+523 | Vía | 85 | 105 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA11 | Interflujo | 1,159,459 | 1,328,012 | 1,094 | K33+644 | Vía | 68 | 83 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA12 | Interflujo | 1,159,513 | 1,327,909 | 1,177 | K33+738 | Vía | 127 | 147 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA13 | Resurgencia | 1,158,748 | 1,329,639 | 1,092 | K31+803 | Vía | 0 | 8 | SI | | | | 3 |
| UF4-PA14 | Resurgencia | 1,159,531 | 1,332,952 | 969 | K28+244 | Vía | 23 | 33 | | SI | 1 | | |
| UF4-PA15 | Interflujo | 1,159,592 | 1,333,433 | 1,012 | K27+750 | Vía | 1 | 42 | SI | | | | 3 |
| UF4-PA16 | Resurgencia | 1,159,712 | 1,333,818 | 952 | K27+345 | Vía | 0 | 0 | SI | | | | 3 |
| UF4-PA17 | Resurgencia | 1,159,599 | 1,335,645 | 920 | K25+466 | Vía | 16 | 31 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA18 | Resurgencia | 1,159,611 | 1,335,667 | 916 | K25+445 | Vía | 5 | 19 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA19 | Resurgencia | 1,159,617 | 1,335,784 | 910 | K25+327 | Vía | 0 | 11 | SI | | | | 3 |
| UF4-PA20 | Resurgencia | 1,159,701 | 1,337,421 | 898 | K23+664 | Vía | 0 | 32 | SI | | | | 3 |
| UF4-PA21 | Resurgencia | 1,159,789 | 1,337,629 | 894 | K23+420 | Vía | 0 | 40 | SI | | | | 3 |
| UF4-PA22 | Resurgencia | 1,159,665 | 1,336,910 | 890 | K24+161 | Vía | 23 | 39 | | SI | | 2 | |
| UF4-PA23 | Resurgencia | 1,160,238 | 1,338,278 | 906 | K22+750 | Vía | 107 | 141 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA24 | Interflujo | 1,161,679 | 1,338,620 | 826 | K20+613 | Vía | 36 | 50 | | SI | 1 | | |

| Pto de Agua | Tipo de Punto | Coordenadas Magna Sirgas (origen Bogotá) | | | Abscisa Perímetro | Obra más cercana al PA | | | Posición altimétrica | | Potencial de afectación | | |
|-------------|---------------|--|-----------|-------|-------------------|------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------|---------------|-------------------------|---------|---------|
| (ID PA) | ID | E | N | ELEV | (Referencia) | Tipo Obra más cercana | Distancia H al perímetro PI | Distancia H al Eje Trazado | Cota superior | Cota inferior | Nivel 1 | Nivel 2 | Nivel 3 |
| UF4-PA25 | Resurgencia | 1,161,398 | 1,339,352 | 880 | K19+735 | Vía | 119 | 162 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA26 | Resurgencia | 1,161,472 | 1,339,425 | 861 | K19+706 | Vía | 37 | 74 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA27 | Resurgencia | 1,161,521 | 1,339,444 | 833 | K19+693 | Vía | 0 | 25 | SI | | | | 3 |
| UF4-PA28 | Resurgencia | 1,161,519 | 1,339,462 | 823 | K19+677 | Vía | 1 | 27 | SI | | | | 3 |
| UF4-PA29 | Resurgencia | 1,161,547 | 1,339,714 | 835 | K19+435 | Vía | 0 | 40 | SI | | | 2 | |
| UF4-PA30 | Manantial | 1,161,325 | 1,338,283 | 862 | K21+125 | Vía | 100 | 135 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA31 | Resurgencia | 1,161,978 | 1,341,194 | 751 | K17+725 | Vía | 12 | 21 | | SI | 1 | | |
| UF4-PA32 | Resurgencia | 1,161,979 | 1,341,162 | 748 | K17+758 | Vía | 9 | 19 | | SI | 1 | | |
| UF4-PA33 | Resurgencia | 1,158,991 | 1,330,654 | 1,016 | K30+717 | Vía | 0 | 2 | SI | | | | 3 |
| UF4-PA34 | Interflujo | 1,159,671 | 1,336,990 | 887 | K24+085 | Vía | 20 | 31 | | SI | 1 | | |
| UF4-PA35 | Interflujo | 1,158,786 | 1,327,979 | 1,092 | K33+750 | Vía | 560 | 582 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA39 | Manantial | 1,161,178 | 1,340,776 | 1,029 | K18+301 | Vía | 792 | 823 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA40 | Manantial | 1,161,287 | 1,340,374 | 995 | K18+835 | Vía | 601 | 624 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA41 | Manantial | 1,160,053 | 1,335,851 | 954 | K25+280 | Vía | 404 | 427 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA42 | Interflujo | 1,158,562 | 1,335,743 | 1,023 | K25+615 | Vía | 1046 | 1067 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA43 | Interflujo | 1,158,619 | 1,335,512 | 1,153 | Perímetro | Vía | 952 | 1014 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA44 | Interflujo | 1,158,485 | 1,335,607 | 869 | K23+039 | Vía | 1121 | 1138 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA45 | Interflujo | 1,159,006 | 1,335,491 | 915 | K24+843 | Vía | 564 | 623 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA46 | Resurgencia | 1,158,009 | 1,330,964 | 1,158 | K30+670 | Zodme 495 | 105 | 1032 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA47 | Resurgencia | 1,160,004 | 1,337,949 | 874 | K23+030 | Vía | 0 | 15 | | SI | | | 3 |
| UF4-PA48 | Antropico | 1,159,570 | 1,336,521 | 1,624 | K24+560 | Vía | 0 | 0 | | | | | 3 |
| UF4-PA49 | Manantial | 1,161,469 | 1,339,736 | 872 | K19+390 | Vía | 74 | 102 | SI | | 1 | | |

| Pto de Agua | Tipo de Punto | Coordenadas Magna Sirgas (origen Bogotá) | | | Abscisa Perímetro | Obra más cercana al PA | | | Posición altimétrica | | Potencial de afectación | | |
|-------------|---------------|--|-----------|-------|-------------------|------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------|---------------|-------------------------|---------|---------|
| (ID PA) | ID | E | N | ELEV | (Referencia) | Tipo Obra más cercana | Distancia H al perímetro PI | Distancia H al Eje Trazado | Cota superior | Cota inferior | Nivel 1 | Nivel 2 | Nivel 3 |
| UF4-PA50 | Interflujo | 1,162,045 | 1,341,261 | 745 | K17+630 | Vía | 62 | 82 | | SI | 1 | | |
| UF4-PA51 | Manantial | 1,161,978 | 1,341,184 | 772 | K17+720 | Vía | 11 | 20 | | SI | 1 | | |
| UF4-PA52 | Manantial | 1,161,781 | 1,338,477 | 866 | K20+710 | Vía | 170 | 193 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA53 | Resurgencia | 1,161,948 | 1,338,819 | 867 | K20+400 | Acceso Zodme 402 | 53 | 265 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA54 | Resurgencia | 1,161,967 | 1,338,970 | 882 | K20+380 | Acceso Zodme 402 | 0 | 315 | SI | | | | 3 |
| UF4-PA55 | Interflujo | 1,161,916 | 1,338,538 | 895 | K20+660 | Vía | 285 | 301 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA56 | Resurgencia | 1,161,967 | 1,338,491 | 922 | K20+700 | Vía | 343 | 364 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA57 | Resurgencia | 1,161,299 | 1,338,259 | 887 | K21+140 | Vía | 102 | 138 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA58 | Manantial | 1,161,385 | 1,338,285 | 854 | K21+050 | Vía | 61 | 98 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA59 | Interflujo | 1,161,477 | 1,337,992 | 871 | K21+300 | Vía | 76 | 103 | Igual Cota | | 1 | | |
| UF4-PA60 | Resurgencia | 1,161,494 | 1,338,031 | 872 | K21+260 | Vía | 80 | 120 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA61 | Resurgencia | 1,160,539 | 1,338,185 | 896 | K22+360 | Vía | 54 | 67 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA62 | Interflujo | 1,160,079 | 1,338,114 | 883 | K22+840 | Vía | 0 | 8 | | SI | | | 3 |
| UF4-PA63 | Interflujo | 1,159,878 | 1,337,913 | 900 | K23+120 | Vía | 69 | 86 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA64 | Resurgencia | 1,159,657 | 1,337,810 | 941 | K23+300 | Zodme 426 | 95 | 207 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA65 | Interflujo | 1,159,711 | 1,337,171 | 891 | K23+900 | Vía | 30 | 44 | | SI | 1 | | |
| UF4-PA66 | Resurgencia | 1,159,907 | 1,337,132 | 895 | K23+910 | Vía | 234 | 244 | | SI | 1 | | |
| UF4-PA67 | Manantial | 1,160,122 | 1,337,418 | 901 | K23+550 | Vía | 316 | 329 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA68 | Antropico | 1,159,575 | 1,335,397 | 1,569 | K25+710 | Vía | 0 | 55 | SI | | | | 3 |
| UF4-PA69 | Resurgencia | 1,159,237 | 1,335,829 | 1,036 | K25+170 | Vía | 369 | 390 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA70 | Resurgencia | 1,158,553 | 1,335,200 | 958 | K25+900 | Vía | 1005 | 1040 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA71 | Manantial | 1,159,993 | 1,335,845 | 949 | K25+290 | Vía | 345 | 365 | SI | | 1 | | |

| Pto de Agua | Tipo de Punto | Coordenadas Magna Sirgas (origen Bogotá) | | | Abscisa Perímetro | Obra más cercana al PA | | | Posición altimétrica | | Potencial de afectación | | |
|-------------|---------------|--|-----------|-------|-------------------|------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------|---------------|-------------------------|---------|---------|
| (ID PA) | ID | E | N | ELEV | (Referencia) | Tipo Obra más cercana | Distancia H al perímetro PI | Distancia H al Eje Trazado | Cota superior | Cota inferior | Nivel 1 | Nivel 2 | Nivel 3 |
| UF4-PA72 | Manantial | 1,160,090 | 1,335,870 | 976 | K25+280 | Vía | 444 | 464 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA73 | Manantial | 1,159,954 | 1,336,087 | 956 | K25+050 | Vía | 354 | 380 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA74 | Manantial | 1,160,001 | 1,335,905 | 953 | K25+230 | Vía | 359 | 379 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA75 | Resurgencia | 1,159,812 | 1,334,234 | 945 | K26+910 | Vía | 0 | 17 | | SI | | | 3 |
| UF4-PA76 | Resurgencia | 1,158,745 | 1,330,896 | 1,047 | K30+590 | Vía | 292 | 318 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA77 | Resurgencia | 1,158,712 | 1,330,874 | 1,046 | K30+610 | Vía | 318 | 343 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA78 | Resurgencia | 1,158,742 | 1,330,458 | 1,033 | K30+900 | Acceso Zodme 497 | 50 | 244 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA79 | Manantial | 1,157,913 | 1,331,186 | 1,229 | K30+800 | Zodme 495 | 349 | 1200 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA80 | Interflujo | 1,158,896 | 1,330,254 | 1,024 | K31+110 | Vía | 8 | 23 | Igual Cota | | | 2 | |
| UF4-PA81 | Interflujo | 1,158,948 | 1,330,277 | 1,022 | K31+090 | Vía | 0 | 14 | | SI | | | 3 |
| UF4-PA82 | Resurgencia | 1,157,952 | 1,331,043 | 1,180 | K30+800 | Zodme 495 | 200 | 1111 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA83 | Resurgencia | 1,159,587 | 1,328,414 | 1,124 | K33+370 | Vía | 160 | 270 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA84 | Resurgencia | 1,159,681 | 1,328,774 | 1,112 | K33+090 | Vía | 344 | 505 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA85 | Resurgencia | 1,159,417 | 1,328,346 | 1,073 | K33+360 | Vía | 0 | 92 | SI | | | | 3 |
| UF4-PA86 | Aljibe | 1,159,195 | 1,328,552 | 1,056 | K33+050 | Vía | 0 | 28 | | | | | 3 |
| UF4-PA87 | Resurgencia | 1161548 | 1339464 | 827 | K19+675 | Vía | 24 | 12 | | SI | | 1 | |
| UF4-PA88 | Resurgencia | 1161569 | 1339461 | 817 | K19+680 | Vía | 36 | 22 | | SI | | 1 | |
| UF4-PA89 | Manantial | 1162051 | 1340190 | 779 | K18+760 | Vía | 97 | 129 | | SI | 1 | | |
| UF4-PA90 | Manantial | 1162044 | 1339766 | 904 | K19+100 | Vía | 252 | 277 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA91 | Manantial | 1161911 | 1339760 | 821 | K19+200 | Vía | 169 | 192 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA92 | Manantial | 1162262 | 1340881 | 793 | K18+060 | Vía | 122 | 144 | | SI | 1 | | |
| UF4-PA93 | Manantial | 1162259 | 1340935 | 771 | K18+020 | Vía | 164 | 177 | | SI | 1 | | |

| Pto de Agua | Tipo de Punto | Coordenadas Magna Sirgas (origen Bogotá) | | | Abscisa Perímetro | Obra más cercana al PA | | | Posición altimétrica | | Potencial de afectación | | |
|-------------|---------------|--|-----------|-------|-------------------|------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------|---------------|-------------------------|---------|---------|
| (ID PA) | ID | E | N | ELEV | (Referencia) | Tipo Obra más cercana | Distancia H al perímetro PI | Distancia H al Eje Trazado | Cota superior | Cota inferior | Nivel 1 | Nivel 2 | Nivel 3 |
| UF4-PA94 | Manantial | 1162125 | 1340523 | 769 | K18+440 | Vía | 89 | 103 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA95 | Manantial | 1160117 | 1337400 | 905 | K23+540 | Vía | 281 | 309 | | SI | 1 | | |
| UF4-PA96 | Manantial | 1159813 | 1335679 | 920 | K25+440 | Vía | 176 | 208 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA97 | Manantial | 1159886 | 1335446 | 946 | K25+660 | Vía | 301 | 326 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA98 | Manantial | 1159823 | 1335305 | 934 | K25+800 | Vía | 269 | 292 | SI | | 1 | | |
| UF4-PA101 | Manantial | 1,159,414 | 1,335,662 | 1,063 | K25+480 | Vía | 90 | 100 | SI | | 1 | | |
| UF5-PA01 | Resurgencia | 1,162,753 | 1,344,287 | 924 | K15+600 | Zodme 533 | 147 | 1633 | SI | | 1 | | |
| UF5-PA02 | Interflujo | 1,165,266 | 1,343,588 | 846 | K13+319 | Acceso Zodme 724 | 50 | 229 | SI | | 1 | | |
| UF5-PA03 | Antropico | 1,162,836 | 1,343,300 | 782 | K15+600 | Vía | 690 | 745 | SI | | 1 | | |
| UF5-PA04 | Interflujo | 1,163,187 | 1,341,521 | 784 | K15+650 | Zodme 402 | 765 | 909 | SI | | 1 | | |
| UF5-PA05 | Resurgencia | 1,164,383 | 1,343,389 | 687 | K14+260 | Vía | 72 | 168 | | SI | 1 | | |
| UF5-PA06 | Interflujo | 1,163,548 | 1,343,003 | 708 | K15+180 | Vía | 102 | 120 | | SI | 1 | | |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

5.1.8.12.2 Resumen evaluación de impactos puntos vía a cielo abierto y zodmes sin incluir túnel

Los impactos sobre los 145 puntos de agua inventariados en la zona de influencia hidrogeológica de la vía a cielo abierto son asignados de acuerdo con la clasificación de tres niveles definida anteriormente. Los impactos probables se describen en los siguientes numerales. Tener en cuenta que los 20 puntos restantes corresponden a la zona del túnel y se evalúan mediante el método DHI.

- Puntos Nivel 1

Por las razones expuestas en el numeral anterior no se prevén cambios en el caudal de afloramiento o en la calidad del agua de estos puntos por la construcción de las obras que integran el corredor vial, especialmente por su distancia respecto a las mismas y el carácter local de los flujos que los alimentan. Los puntos en esta categoría corresponden a 109 puntos de agua de los 145 y se muestran en la **Tabla 5-2.23**.

- Puntos Nivel 2

Los puntos nivel 2 podrían ser afectados en su caudal, dado que el área de captura o flujo subsuperficial es susceptible de afectarse por el proyecto (cortes, rellenos y zodmes). De forma adicional, para los puntos ubicados en cotas inferiores al trazado vial o área de zodmes, la calidad del agua puede afectarse a causa de la escorrentía superficial que arrastra materiales de obra y desechos en la carretera o zodme hasta el afloramiento. Los puntos con esta categoría son 10 de 145 y se muestran en la **Tabla 5-2.23**.

- Puntos Nivel 3

El punto se verá completamente impactado por la obra, desapareciendo de su ubicación inicial. Los puntos con esta categoría son 26 de 145 y se muestran en la **Tabla 5-2.23**.

5.1.8.12.3 Medidas de manejo de impactos

A partir del análisis de sensibilidad del punto de agua por cercanía, cota y tipo de obra del proyecto, se han definido medidas para diferentes escenarios o niveles de afectación identificados (niveles 1, 2 y 3). Se realizó un análisis para cada punto obteniendo de forma general las medidas mostradas en los siguientes ítems.

Según se desprende del Estudio de Impacto Ambiental, la clasificación corresponde a:

- Nivel 1: Puntos de agua en los cuales no se prevé afectación o su potencial es muy bajo a imperceptible.
- Nivel 2: Puntos de agua con potencial de afectación bajo a medio.
- Nivel 3: Puntos de agua con potencial de afectación de alto a muy alto.

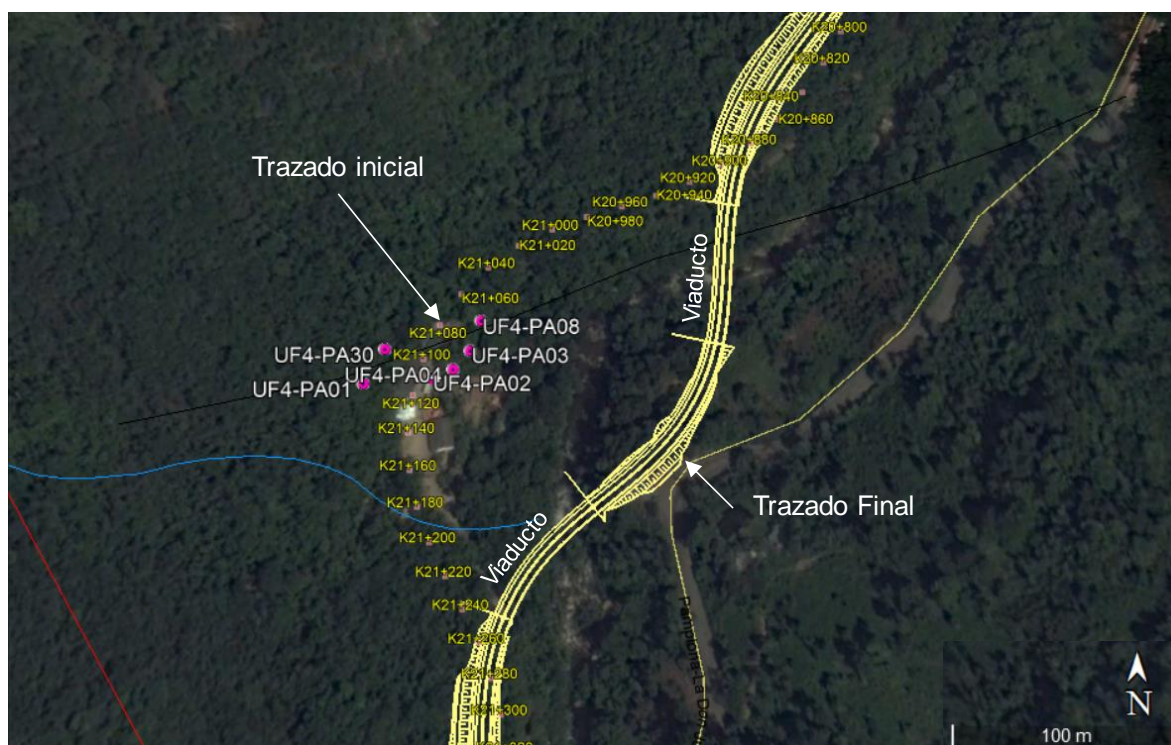
En la **Tabla 5-2.23**, presentada más atrás, se indica la clasificación de puntos de agua según el nivel de afectación definido en el Estudio de Impacto Ambiental. De igual manera, en la **Tabla 5-2.24** se especifica la medida o grupo de medidas aplicables a cada punto de agua.

Para el caso de los probables efectos en puntos de agua debidos a la construcción del túnel, se presenta aparte un análisis y ficha de manejo exclusiva.

- **Medidas de prevención**

La principal medida de prevención se aplica en las primeras etapas de diseño, específicamente en el diseño geométrico de la vía. En el caso específico de la vía UF4 se decidió desplazar hacia el SE el trazado original con el propósito de retirarlo del sector conocido como El Raizón donde afloran varias fuentes termales. Se modificó el diseño geométrico alejándolo más de 100 del mencionado sector y sustituyendo la vía normal por viaducto.

Figura 5-2.85 Modificación de trazado en la unidad funcional 4 por presencia de fuentes termales.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

Adicionalmente como una medida de seguimiento y control de los puntos de agua censados se realizará un atento monitoreo del caudal del agua que aflora en los puntos identificados. En este sentido se incluirán en la red de monitoreo todos los puntos de agua identificados en el inventario y ubicados a menos de 100 del área de diseño independientemente de su nivel de afectación. Para el desarrollo de esta actividad se remite al lector las **fichas de seguimiento y monitoreo** establecidas específicamente para este fin.

- **Medidas de protección**

Las medidas de protección se basan en los principios de protección, algunos de los cuales se mencionan a continuación (tomados de una publicación de Oxfam_2006).

- ✓ Se debe proteger de personas y animales el área sobre los puntos de agua para prevenir contaminación. Usar cercados preferiblemente.
- ✓ Construir un dren de corte sobre los puntos de agua previene la mezcla de agua contaminada de escorrentía.
- ✓ No se deben construir letrinas a menos de 30 metros agua arriba de los puntos de agua.
- ✓ Después de limpiar el área donde se encuentra el punto de agua, esta se debe proteger con rajón y/o bolos de río y grava. El tanque del punto de agua puede tener tubería para abastecer fácilmente de agua a los usuarios o facilitar la conexión al mismo mediante mangueras.
- ✓ Los caudales de rebose deben ser redirigidos a cuerpos superficiales y/o abrevaderos.
- ✓ Los tanques para los puntos de agua deben ser limpiados de forma periódica y deben tener condiciones de protección del agua a su interior, así como facilidad de acceso.

Las medidas de protección para la mayoría de los puntos incluidos en el análisis incluyen cerramiento y zanja perimetral, con base en las condiciones particulares de cada sitio. En algunos casos se proponen tanques o albercas para la protección de los afloramientos y sus captaciones. Para la identificación de las medidas de protección para los puntos de agua censados se remite a la **Tabla 5-2.24**.

A continuación, se describen las medidas de protección propuestas.

- Cerramiento del punto

Esta medida apunta a la protección de punto evitando el acceso de animales y personas que pudiesen alterar el estado del afloramiento, así como la calidad y/o cantidad del agua que aflora y las captaciones existentes. Esta medida también mejora las condiciones actuales del afloramiento, generando protección incluso ante factores diferentes a los generados por la construcción y operación de la vía. En la **Figura 5-2.86** se muestra la forma del cerramiento propuesto.

Figura 5-2.86 Modelo de cerramiento



Fuente: Segmento de imagen en (canacopegdl.com).

– Zanja Perimetral

Por la cara interior del cerramiento y de acuerdo con las condiciones fisiográficas del sitio, se realizará la construcción de una zanja perimetral, la cual corresponde a una excavación continua en el terreno del orden de 40 - 50 cm de profundidad y 40 a 50 cm de ancho, rellena con rajón o bolos de río de gran diámetro para que estos brinden soporte a la zanja y eviten su derrumbe. Ésta se excavará en forma de “U” con descarga hacia las cotas inferiores con respecto al sitio de afloramiento del punto de agua. Con la zanja se evita que lleguen flujos superficiales directamente sobre el afloramiento a partir de la escorrentía superficial, contaminando o dañando el sitio de afloramiento o punto de agua, así como las obras de captación que puedan existir. En la **Figura 5-2.87** se muestra un modelo para la excavación de las zanjas.

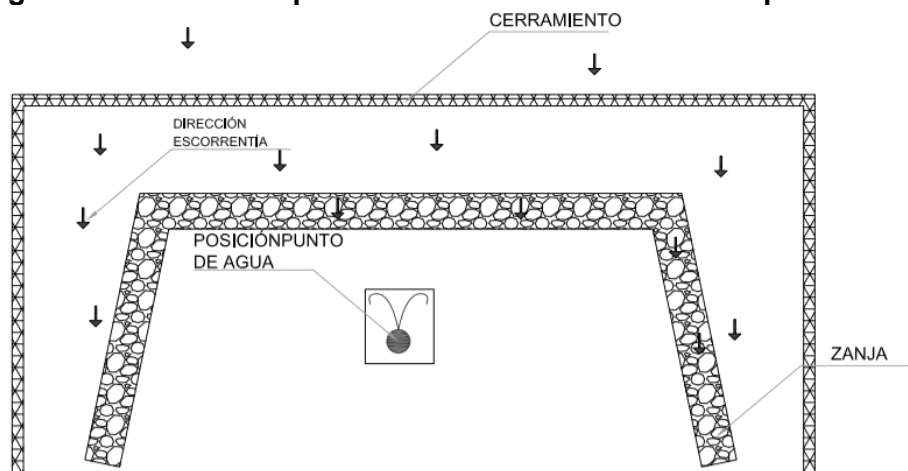
Figura 5-2.87 Modelo de zanja perimetral.



Fuente: (<http://maddyyoung.com/50054>)

A continuación, en la **Figura 5-2.88** se muestra el esquema de acople para la aplicación conjunta de las dos medidas de manejo presentadas anteriormente, correspondientes a cerramiento y zanja perimetral).

Figura 5-2.88 Vista esquemática de medidas básicas de protección.



Fuente: Hidrogeocol, 2018

Con base en lo mencionado anteriormente, para los puntos en los cuales se pudiese presentar afectación o en aquellos cuya ubicación sea menor a 100 metros respecto al área de diseño, se implementarán tanques de protección, con el objetivo de prevenir impactos en la calidad de los puntos y mantener la calidad del agua durante la etapa constructiva.

- Tanque de protección de puntos de agua

De forma posterior al cerramiento, sobre el punto de agua se recomienda construir (o rehabilitar) un tanque para protección, recolección y almacenamiento, cuyo esquema se muestra en la **Figura 5-2.89**. En la **Figura 5-2.90** se muestra la localización de ese tanque a escala regional. Esta estructura permite almacenar temporalmente el agua del punto, optimizando el área de contacto del sustrato filtrante (suelo suelto, grava, gravilla, o combinación de estos), disminuyendo la evaporación del líquido y brindando protección por contaminación superficial, así como facilitando su captación para los usuarios ya existentes del recurso.

Teniendo en cuenta que los caudales de los afloramientos de puntos de agua son relativamente bajos (menores a 0.67 l/s en la mayoría de los puntos) y dado que la mayoría de los flujos de agua en la zona son someros o subsuperficiales, se plantea mejorar los puntos que se encuentren fuera del polígono de intervención de la obra y sus inmediaciones mediante la construcción o mejora de la estructura de protección del punto de agua, para incluso llegar a aumentar su caudal al mejorar las condiciones de permeabilidad del sustrato en el afloramiento.

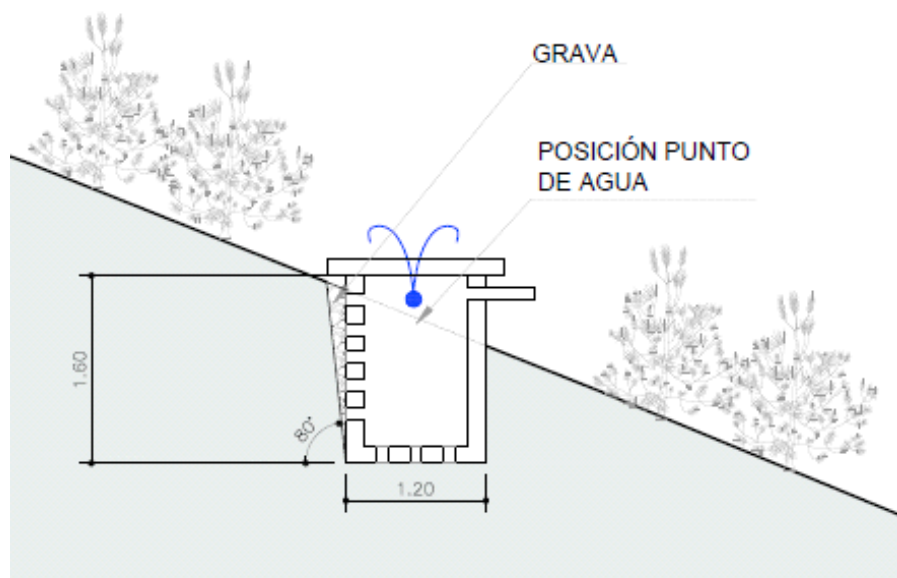
La estructura de protección consiste en un tanque en ladrillo, bloque o concreto en el cual se almacenará el agua proveniente del punto de agua, tal como se muestra en la **Figura 5-2.90**. El diseño conceptual del tanque de protección se realizó con base en múltiples diseños encontrados en la literatura (Universidad de Pensilvania, 2007) entre otros, y experiencias maduradas en la implementación de sistemas de protección a afloramientos de puntos de agua en el mundo.

Figura 5-2.89 Tanque para la protección de afloramientos de agua



Fuente: Adaptado de (<http://www.downtoearth.org.in/coverage/spring-in-a-box-49240>)

Figura 5-2.90. Tanque de concreto en el cual se almacenará el agua del punto de agua.



Fuente: Hidrogeocol, 2018

- **Medidas de mitigación de impactos**

Para los puntos en los cuales se prevén impactos en el caudal, se hace necesario implementar medidas de mitigación del impacto. Conforme se realiza en la prevención, la principal medida de mitigación corresponde a mantener en la mejor condición posible el punto de agua, en términos de disminuir al máximo los cambios en caudal y calidad.

- Repoblamiento vegetal

La medida corresponde a la repoblación vegetal alrededor del punto de agua, mediante la siembra o plantación de plantas nativas de la zona. En esta actividad se realizará un repoblamiento con especies nativas que mejoren la regulación hídrica superficial en las cercanías del punto de agua, dentro del área del cerramiento.

Las plantas incorporadas en esta zona permitirán una mayor protección del punto ante fenómenos de aumento de picos de la escorrentía superficial, compactación del sustrato, erosión del suelo y de forma adicional brindarán una segunda defensa ante la entrada de especies animales que puedan contaminar el punto.

Conforme se emplea repoblamiento vegetal en la mayoría de los puntos, se puede considerar esta medida como medida de protección en algunos casos, especialmente cuando se aplica en puntos nivel 1, sobre los cuales no se esperan impactos a causa de las obras a realizar. Se prevé su aplicación en puntos nivel 1, 2 y/o 3.

Se recomienda utilizar para la siembra especies nativas, entre otras, sauce, aliso, romero, helecho, cordoncillo y las especies conocidas localmente como “cola de caballo” y “rascadera”.

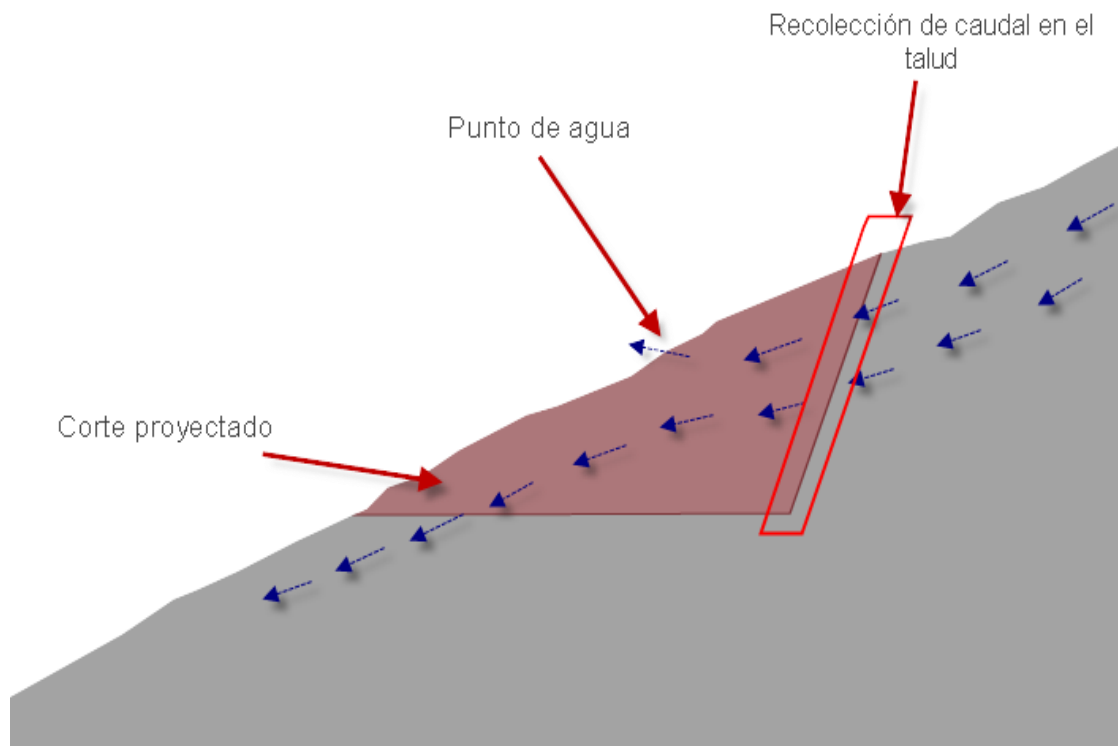
- Construcción de talud de recolección y cruce de vía

Esta medida corresponde a la construcción de una estructura de recolección de afloramientos de agua por goteo difuso. Mediante unas estructuras y unas conducciones el caudal que fluye en un punto de agua es transportado a una nueva ubicación, manteniendo su caudal disponible a los usuarios registrados en los formatos FUNIAS en estos puntos.

Se prevé su aplicación para puntos nivel 3, es decir, aquellos ubicados en el polígono de intervención de la obra.

En la **Figura 5-2.91** se muestran de forma esquemática los flujos en el suelo (antrópico, manantial, interflujo o resurgencia). Al realizar el corte de terreno, el agua que fluía en el medio aflorará en el talud, este flujo será transportado a un tanque en el pie del talud, para posteriormente ser dirigido a un tanque cruzando la vía, en donde se pondrá el recurso hídrico a disposición de los usuarios.

Figura 5-2.91 Corte en un punto de agua asociado a flujo subsuperficial



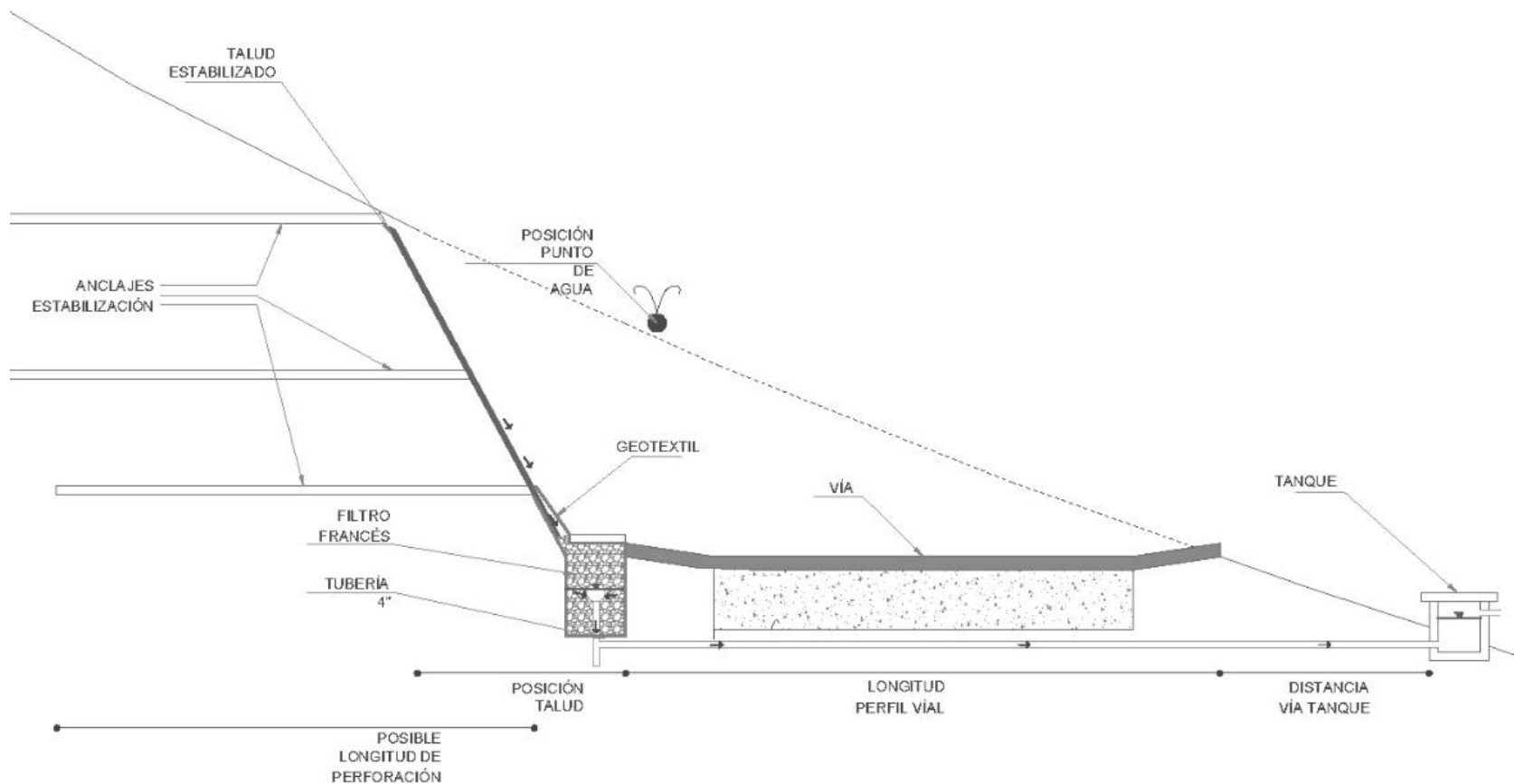
Fuente: Hidrogeocol, 2018

Siguiendo la estrategia de reubicación del punto de agua, se muestra un perfil en la **Figura 5-2.92** con un esquema típico de la medida de captación de agua en talud, para lograr la reubicación de punto de agua. Se busca que, en contacto con el concreto lanzado contra el talud para estabilización geotécnica, el agua producto del drenaje subsuperficial caiga a un dren francés, desde el cual se proyecta una conducción hacia el sector de la vía aguas abajo; el cruce de la vía se realizará a través de una tubería dentro de las alcantarillas de la vía o a través de una tubería bajo la estructura de pavimento. En la figura se hace referencia al dren como un tanque colector, teniendo en cuenta que su función no es drenar agua sino almacenarla.

A partir del filtro francés el agua será conducida mediante tubería a una "T", en este accesorio el agua tendrá una conexión con el tanque de aguas abajo y de forma adicional con una tubería de descole que tendrá válvula de desagüe en caso de requerirse. A través de la tubería de descole se realizará la limpieza de los sólidos sedimentables que pudieran pasar el filtro francés y colmatar la tubería.

De forma esquemática, en la **Figura 5-2.92** se muestra el sistema de captación en el talud y paso al otro lado de la vía.

Figura 5-2.92. Medida de manejo para punto de agua con cruce de vía en tubería.



Fuente: Hidrogeocol, 2018

• Medidas de Compensación

En caso de que las medidas de protección y mitigación propuestas no sean suficientes a pesar de las acciones realizadas para proteger las fuentes aprovechables, se puede requerir implementar medidas de compensación que corresponden fundamentalmente a dos tipos de intervenciones. Las medidas únicamente se viabilizarán durante la construcción de las obras y según se negocie y se determine un acuerdo con la comunidad. Con las medidas de protección y mitigación propuestas no se espera requerir medidas de compensación. Sin embargo, éstas se dejan propuestas en términos de contingencias durante el proceso constructivo de la vía, o por eventuales cambios en las condiciones de Línea Base evaluadas durante el Estudio.

Conexión a acueductos veredales

Implementar o mejorar la conexión al acueducto veredal o distrito de riego más cercano. Esto implica verificar con el proveedor las condiciones y nivel de servicio disponibles. El costo será el equivalente a una conexión domiciliaria que actualmente está alrededor de \$300.000 por punto de consumo. Para la conexión se tendrá en cuenta el levantamiento de redes existentes realizado como parte de este EIA.

Conexión a otras fuentes puntuales

Corresponde a implementar o mejorar la conexión a otra fuente de suministro de agua aledaña. Esto implica trasladar la conexión afectada hacia otro punto de agua disponible, lo cual se realizaría hacia puntos de agua cercanos ya identificados o incluso más aguas arriba de los límites del área de influencia. El costo de la intervención se determina en \$410.000 por conexión, suponiendo que se realice una adecuación en la obra de captación y una larga extensión en manguera.

Otras medidas de compensación

Según sea necesario implementar medidas de compensación y de acuerdo con las condiciones de negociación con la comunidad, se propone considerar otras posibles medidas que pueden aplicarse en caso de no ser viables las dos medidas indicadas anteriormente.

- ✓ Sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias.
- ✓ Traslado de bocatomas (proveedores locales).
- ✓ Mejora en sistemas de suministro y almacenamiento (tubos, mangueras, tanques).
- ✓ Control de pérdidas en redes de distribución existentes.

Las medidas citadas requerirán para su implementación viabilidad técnica y económica avalada por parte del Concesionario.

Medidas asignadas a cada punto

Con base en las características de cada punto, se asignaron las medidas correspondientes, como se muestra en la **Tabla 5-2.24**. En general no a todos los puntos se les coloca medida de compensación, teniendo en cuenta que como se mencionó anteriormente, se espera que estas no sean requeridas en condiciones normales, si un punto no tiene usuarios, no se propone medida de compensación.

Tener en cuenta que se incluyen medidas de manejo para los puntos UF3-PA39, UF3-PA40, UF4-PA75 y UF4-PA54 en la ficha de seguimiento SMF-07, así como para el punto UF4-PA86.

Tabla 5-2.24. Medidas de manejo discriminadas por punto para las UF3-4-5

| Punto de Agua | Tipo de Punto | Obra más Próxima al Punto de Agua | Distancia H a obra más próxima | Nivel de Afectación | Usuarios (---) | Uso predominante | Usuarios verificados (*) | Control Monitoreo | Protección | | | Mitigación | | Compensación |
|---------------|---------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------|----------------|------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| (ID PA) | ID | | | | | | | | Demarcación Aislamiento | Zanja Perimetral | Tanque de protección | Repoblamiento Vegetal | Talud de recolección | como contingencia |
| UF3-PA01 | Manantial | Tunel | 291 | 1 | SI | Doméstico | 1 | SI | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA02 | Resurgencia | Vía | 90 | 1 | SI | Doméstico | 4 | NO | SI | NO | NO | SI | NO | NO |
| UF3-PA03 | Resurgencia | Vía | 114 | 1 | SI | Comunitario | 20 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA04 | Resurgencia | Vía | 197 | 1 | SI | Comunitario | 20 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA06 | Manantial | Tunel | 471 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA07 | Resurgencia | Tunel | 587 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA08 | Manantial | Tunel | 494 | 1 | SI | Doméstico | 4 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA10 | Interflujo | Vía | 20 | 1 | NO | Ninguno | 0 | SI | SI | NO | SI | SI | NO | SI |
| UF3-PA11 | Interflujo | Vía | 0 | 3 | NO | Ninguno | 0 | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| UF3-PA12 | Manantial | Vía | 9 | 2 | SI | Agropecuario | 0 | SI | SI | NO | NO | SI | NO | SI |
| UF3-PA13 | Manantial | Vía | 76 | 1 | SI | Comunitario | 40 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA14 | Resurgencia | Vía | 114 | 1 | SI | Comunitario | 50 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA15 | Interflujo | Vía | 2 | 2 | SI | Comunitario | 10 | SI | SI | SI | SI | SI | NO | SI |
| UF3-PA16 | Interflujo | Vía | 35 | 1 | NO | Ninguno | 0 | SI | SI | NO | SI | SI | NO | SI |
| UF3-PA17 | Interflujo | Vía | 0 | 3 | SI | Comunitario | 10 | SI | SI | SI | SI | SI | NO | SI |
| UF3-PA18 | Interflujo | Vía | 25 | 1 | SI | Doméstico | 4 | SI | SI | NO | SI | SI | NO | SI |
| UF3-PA19 | Resurgencia | Vía | 0 | 3 | NO | Ninguno | 0 | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| UF3-PA20 | Resurgencia | Vía | 8 | 1 | SI | Doméstico | 4 | SI | SI | NO | SI | SI | NO | SI |
| UF3-PA21 | Resurgencia | Vía | 11 | 2 | SI | Agropecuario | 0 | SI | SI | SI | SI | SI | NO | SI |
| UF3-PA23 | Resurgencia | Vía | 103 | 1 | SI | Doméstico | 25 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA25 | Resurgencia | Vía | 64 | 1 | NO | Ninguno | 0 | SI | SI | NO | SI | SI | NO | SI |

| Punto de Agua | Tipo de Punto | Obra más Próxima al Punto de Agua | Distancia H a obra más próxima | Nivel de Afectación | Usuarios (---) | Uso predominante | Usuarios verificados (*) | Control Monitoreo | Protección | | | Mitigación | | Compensación como contingencia |
|---------------|---------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------|----------------|------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------------|
| (ID PA) | ID | | | | | | | | Demarcación Aislamiento | Zanja Perimetral | Tanque de protección | Repoblamiento Vegetal | Talud de recolección | |
| UF3-PA26 | Manantial | Vía | 8 | 1 | NO | Ninguno | 0 | SI | SI | NO | SI | SI | NO | SI |
| UF3-PA27 | Interflujo | Vía | 34 | 1 | SI | Doméstico | 7 | SI | SI | NO | SI | SI | NO | SI |
| UF3-PA28 | Resurgencia | Tunel | 92 | 1 | NO | Ninguno | 0 | SI | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA29 | Manantial | Tunel | 146 | 1 | NO | Ninguno | 0 | SI | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA30 | Interflujo | Tunel | 76 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA31 | Interflujo | Vía | 26 | 1 | NO | Ninguno | 0 | SI | SI | SI | SI | SI | NO | SI |
| UF3-PA32 | Interflujo | Tunel | 161 | 1 | NO | Ninguno | 0 | SI | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA33 | Manantial | Vía | 22 | 1 | NO | Ninguno | 0 | SI | SI | NO | SI | SI | NO | SI |
| UF3-PA34 | Resurgencia | Vía | 177 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA35 | Interflujo | Vía | 0 | 3 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA36 | Interflujo | Vía | 378 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA37 | Interflujo | Vía | 321 | 1 | SI | Doméstico | 1 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA38 | Interflujo | Vía | 359 | 1 | SI | Doméstico | 1 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA39 | Antropico | Vía | 0 | 3 | SI | Doméstico | 1 | SI | NO | NO | NO | NO | SI | SI |
| UF3-PA40 | Antropico | Vía | 6 | 2 | NO | Ninguno | 0 | SI | NO | NO | NO | NO | SI | SI |
| UF3-PA41 | Antropico | Vía | 15 | 2 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA42 | Antropico | Vía | 5 | 2 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA43 | Interflujo | Vía | 7 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA44 | Interflujo | Vía | 140 | 1 | SI | Doméstico | 1 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA45 | Interflujo | Acceso Zodme 360 | 0 | 3 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA46 | Interflujo | Acceso Zodme 360 | 1 | 3 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA47 | Interflujo | Vía | 89 | 1 | SI | Agropecuario | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA48 | Interflujo | Vía | 119 | 1 | SI | Agropecuario | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |

| Punto de Agua | Tipo de Punto | Obra más Próxima al Punto de Agua | Distancia H a obra más próxima | Nivel de Afectación | Usuarios (---) | Uso predominante | Usuarios verificados (*) | Control Monitoreo | Protección | | | Mitigación | | Compensación |
|---------------|---------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------|----------------|------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| (ID PA) | ID | | | | | | | | Demarcación Aislamiento | Zanja Perimetral | Tanque de protección | Repoblamiento Vegetal | Talud de recolección | como contingencia |
| UF3-PA49 | Antropico | Acceso Zodme 362 | 4 | 1 | SI | Agropecuario | 0 | NO | SI | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA50 | Antropico | Polvorin 1 | 162 | 1 | SI | Agropecuario | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA51 | Interflujo | Vía | 39 | 1 | SI | Agropecuario | 0 | NO | SI | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA52 | Resurgencia | Tunel | 417 | 1 | SI | Agropecuario | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA53 | Resurgencia | Tunel | 446 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA54 | Resurgencia | Tunel | 147 | 1 | NO | Ninguno | 0 | SI | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA55 | Antropico | Tunel | 43 | 1 | SI | Doméstico | 1 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA56 | Antropico | Vía | 98 | 1 | SI | Doméstico | 1 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA57 | Resurgencia | Vía | 154 | 1 | SI | Doméstico | 1 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA58 | Manantial | Vía | 501 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA59 | Resurgencia | Vía | 405 | 1 | SI | Agropecuario | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA60 | Manantial | Vía | 586 | 1 | SI | Agropecuario | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA61 | Resurgencia | Tunel | 366 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA62 | Resurgencia | Tunel | 376 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA63 | Manantial | Tunel | 450 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA64 | Manantial | Tunel | 419 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA65 | Manantial | Tunel | 398 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA66 | Resurgencia | Tunel | 317 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA67 | Interflujo | Vía | 42 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA68 | Interflujo | Vía | 41 | 1 | SI | Doméstico | 1 | NO | SI | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA69 | Interflujo | Vía | 61 | 1 | SI | Doméstico | 1 | NO | SI | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF3-PA101 | Interflujo | Vía | 0 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | SI | SI | SI | NO | NO | NO |

| Punto de Agua | Tipo de Punto | Obra más Próxima al Punto de Agua | Distancia H a obra más próxima | Nivel de Afectación | Usuarios (---) | Uso predominante | Usuarios verificados (*) | Control Monitoreo | Protección | | | Mitigación | | Compensación como contingencia |
|---------------|---------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------|----------------|------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|--------------------------------|
| (ID PA) | ID | | | | | | | | Demarcación Aislamiento | Zanja Perimetral | Tanque de protección | Repoblamiento Vegetal | Talud de recolección | |
| UF4-PA01 | Manantial | Vía | 95 | 1 | SI | Comunitario | 10 | NO | NO | NO | NO | SI | NO | SI |
| UF4-PA02 | Manantial | Vía | 74 | 1 | SI | Comunitario | 10 | NO | NO | NO | NO | SI | NO | SI |
| UF4-PA03 | Manantial | Vía | 72 | 1 | SI | Comunitario | 10 | NO | NO | NO | NO | SI | NO | SI |
| UF4-PA06 | Manantial | Vía | 376 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | SI |
| UF4-PA08 | Resurgencia | Vía | 80 | 1 | SI | Comunitario | 10 | NO | NO | NO | NO | SI | NO | SI |
| UF4-PA09 | Interflujo | Vía | 113 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA10 | Interflujo | Vía | 85 | 1 | SI | Doméstico | 4 | NO | NO | NO | NO | SI | NO | SI |
| UF4-PA11 | Interflujo | Vía | 68 | 1 | SI | Doméstico | 6 | SI | SI | NO | SI | SI | NO | SI |
| UF4-PA12 | Interflujo | Vía | 127 | 1 | SI | Doméstico | 8 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA13 | Resurgencia | Vía | 0 | 3 | NO | Ninguno | 0 | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| UF4-PA14 | Resurgencia | Vía | 23 | 1 | NO | Ninguno | 0 | SI | SI | SI | SI | SI | NO | SI |
| UF4-PA15 | Interflujo | Vía | 1 | 3 | NO | Ninguno | 0 | SI | SI | NO | SI | SI | NO | SI |
| UF4-PA16 | Resurgencia | Vía | 0 | 3 | SI | Agropecuario | 0 | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| UF4-PA17 | Resurgencia | Vía | 16 | 1 | SI (*) | Doméstico | 4 | SI | SI | NO | SI | SI | NO | SI |
| UF4-PA18 | Resurgencia | Vía | 5 | 1 | SI (*) | Doméstico | 4 | SI | SI | NO | SI | SI | NO | SI |
| UF4-PA19 | Resurgencia | Vía | 0 | 3 | SI | Agropecuario | 0 | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| UF4-PA20 | Resurgencia | Vía | 0 | 3 | NO | Ninguno | 0 | SI | SI | NO | SI | SI | NO | SI |
| UF4-PA21 | Resurgencia | Vía | 0 | 3 | NO | Ninguno | 0 | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| UF4-PA22 | Resurgencia | Vía | 23 | 2 | SI | Doméstico | 4 | SI | SI | SI | SI | SI | NO | SI |
| UF4-PA23 | Resurgencia | Vía | 107 | 1 | SI | Doméstico | 2 | NO | NO | NO | NO | SI | NO | NO |
| UF4-PA24 | Interflujo | Vía | 36 | 1 | NO | Ninguno | 0 | SI | SI | SI | SI | SI | NO | SI |
| UF4-PA25 | Resurgencia | Vía | 119 | 1 | SI | Agropecuario | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA26 | Resurgencia | Vía | 37 | 1 | SI | Doméstico | 7 | SI | SI | NO | SI | SI | NO | SI |

| Punto de Agua | Tipo de Punto | Obra más Próxima al Punto de Agua | Distancia H a obra más próxima | Nivel de Afectación | Usuarios (---) | Uso predominante | Usuarios verificados (*) | Control Monitoreo | Protección | | | Mitigación | | Compensación |
|---------------|---------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------|----------------|------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| (ID PA) | ID | | | | | | | | Demarcación Aislamiento | Zanja Perimetral | Tanque de protección | Repoblamiento Vegetal | Talud de recolección | como contingencia |
| UF4-PA27 | Resurgencia | Vía | 0 | 3 | SI | Doméstico | 6 | SI | SI | NO | SI | SI | NO | SI |
| UF4-PA28 | Resurgencia | Vía | 1 | 3 | SI | Doméstico | 17 | SI | SI | NO | SI | SI | NO | SI |
| UF4-PA29 | Resurgencia | Vía | 10 | 2 | SI | Doméstico | 7 | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| UF4-PA30 | Manantial | Vía | 100 | 1 | SI | Comunitario | 10 | NO | NO | NO | NO | SI | NO | NO |
| UF4-PA31 | Resurgencia | Vía | 12 | 1 | SI | Comunitario | 10 | SI | SI | SI | SI | SI | NO | SI |
| UF4-PA32 | Resurgencia | Vía | 9 | 1 | NO | Ninguno | 0 | SI | SI | SI | SI | SI | NO | SI |
| UF4-PA33 | Resurgencia | Vía | 0 | 3 | NO | Ninguno | 0 | SI | SI | SI | SI | SI | SI | SI |
| UF4-PA34 | Interflujo | Vía | 20 | 1 | NO | Ninguno | 0 | SI | SI | SI | SI | SI | NO | SI |
| UF4-PA35 | Interflujo | Vía | 560 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA39 | Manantial | Vía | 792 | 1 | SI | Doméstico | 1 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA40 | Manantial | Vía | 601 | 1 | SI | Doméstico | 1 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA41 | Manantial | Vía | 404 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA42 | Interflujo | Vía | 1046 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA43 | Interflujo | Vía | 952 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | SI | NO | NO |
| UF4-PA44 | Interflujo | Vía | 1121 | 1 | NO | Ninguno | 0 | SI | SI | SI | SI | SI | NO | SI |
| UF4-PA45 | Interflujo | Vía | 564 | 1 | SI | Agropecuario | 0 | SI | SI | SI | SI | SI | NO | SI |
| UF4-PA46 | Resurgencia | Zodme 495 | 105 | 1 | SI | Agropecuario | 1 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA47 | Resurgencia | Vía | 0 | 3 | NO | Ninguno | 0 | NO | SI | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA48 | Antropico | Vía | 0 | 3 | NO | Ninguno | 0 | NO | SI | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA49 | Manantial | Vía | 74 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | SI | SI | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA50 | Interflujo | Vía | 62 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA51 | Manantial | Vía | 11 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | SI | NO | SI | NO | SI | NO |
| UF4-PA52 | Manantial | Vía | 170 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |

| Punto de Agua | Tipo de Punto | Obra más Próxima al Punto de Agua | Distancia H a obra más próxima | Nivel de Afectación | Usuarios | Uso predominante | Usuarios verificados (*) | Control | Protección | | | Mitigación | | Compensación |
|---------------|---------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------|----------|------------------|--------------------------|-----------|-------------------------|------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| (ID PA) | ID | | | | (---) | | | Monitoreo | Demarcación Aislamiento | Zanja Perimetral | Tanque de protección | Repoblamiento Vegetal | Talud de recolección | como contingencia |
| UF4-PA53 | Resurgencia | Acceso Zodme 402 | 53 | 1 | SI | Doméstico | 1 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA54 | Resurgencia | Acceso Zodme 402 | 0 | 3 | SI | Doméstico | 1 | NO | SI | NO | NO | NO | SI | SI |
| UF4-PA55 | Interflujo | Vía | 285 | 1 | SI | Doméstico | 1 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA56 | Resurgencia | Vía | 343 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA57 | Resurgencia | Vía | 102 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA58 | Manantial | Vía | 61 | 1 | NO | Ninguno | 0 | SI | SI | SI | SI | NO | NO | SI |
| UF4-PA59 | Interflujo | Vía | 76 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA60 | Resurgencia | Vía | 80 | 1 | SI | Agropecuario | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA61 | Resurgencia | Vía | 54 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA62 | Interflujo | Vía | 0 | 3 | NO | Ninguno | 0 | NO | SI | NO | SI | NO | NO | SI |
| UF4-PA63 | Interflujo | Vía | 69 | 1 | SI | Doméstico | 1 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA64 | Resurgencia | Zodme 426 | 95 | 1 | SI | Doméstico | 1 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA65 | Interflujo | Vía | 30 | 1 | SI | Doméstico | 1 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA66 | Resurgencia | Vía | 234 | 1 | SI | Doméstico | 1 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA67 | Manantial | Vía | 316 | 1 | SI | Doméstico | 1 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA68 | Antropico | Vía | 0 | 3 | SI | Doméstico | 1 | NO | SI | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA69 | Resurgencia | Vía | 369 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA70 | Resurgencia | Vía | 1005 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA71 | Manantial | Vía | 345 | 1 | SI | Agropecuario | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA72 | Manantial | Vía | 444 | 1 | SI | Agropecuario | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA73 | Manantial | Vía | 354 | 1 | SI | Agropecuario | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA74 | Manantial | Vía | 359 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA75 | Resurgencia | Vía | 0 | 3 | SI | Agropecuario | 0 | SI | SI | NO | NO | NO | SI | NO |

| Punto de Agua | Tipo de Punto | Obra más Próxima al Punto de Agua | Distancia H a obra más próxima | Nivel de Afectación | Usuarios | Uso predominante | Usuarios verificados (*) | Control | Protección | | | Mitigación | | Compensación |
|---------------|---------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------|----------|------------------|--------------------------|-----------|-------------------------|------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| (ID PA) | ID | | | | (---) | | | Monitoreo | Demarcación Aislamiento | Zanja Perimetral | Tanque de protección | Repoblamiento Vegetal | Talud de recolección | como contingencia |
| UF4-PA76 | Resurgencia | Vía | 292 | 1 | SI | Agropecuario | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA77 | Resurgencia | Vía | 318 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA78 | Resurgencia | Acceso Zodme 497 | 50 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA79 | Manantial | Zodme 495 | 349 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA80 | Interflujo | Vía | 8 | 2 | NO | Ninguno | 0 | NO | SI | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA81 | Interflujo | Vía | 0 | 3 | NO | Ninguno | 0 | NO | SI | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA82 | Resurgencia | Zodme 495 | 200 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA83 | Resurgencia | Vía | 160 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA84 | Resurgencia | Vía | 344 | 1 | SI | Doméstico | 1 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA85 | Resurgencia | Vía | 0 | 3 | SI | Doméstico | 1 | NO | SI | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA86 | Aljibe | Vía | 0 | 3 | SI | Doméstico | 1 | SI | SI | NO | SI | NO | NO | SI |
| UF4-PA87 | Resurgencia | Vía | 24 | 2 | SI | Agropecuario | 0 | NO | SI | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA88 | Resurgencia | Vía | 36 | 2 | SI | Agropecuario | 5 | NO | SI | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA89 | Manantial | Vía | 97 | 1 | SI | Agropecuario | 10 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA90 | Manantial | Vía | 252 | 1 | SI | Agropecuario | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA91 | Manantial | Vía | 169 | 1 | SI | Agropecuario | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA92 | Manantial | Vía | 122 | 1 | SI | Agropecuario | 1 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA93 | Manantial | Vía | 164 | 1 | SI | Agropecuario | 5 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA94 | Manantial | Vía | 89 | 1 | SI | Agropecuario | 4 | NO | SI | SI | NO | NO | NO | SI |
| UF4-PA95 | Manantial | Vía | 281 | 1 | SI | Agropecuario | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA96 | Manantial | Vía | 176 | 1 | SI | Agropecuario | 3 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA97 | Manantial | Vía | 301 | 1 | SI | Agropecuario | 5 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF4-PA98 | Manantial | Vía | 269 | 1 | SI | Agropecuario | 5 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |

| Punto de Agua | Tipo de Punto | Obra más Próxima al Punto de Agua | Distancia H a obra más próxima | Nivel de Afectación | Usuarios (---) | Uso predominante | Usuarios verificados (*) | Control Monitoreo | Protección | | | Mitigación | | Compensación |
|---------------|---------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------|----------------|------------------|--------------------------|-------------------|-------------------------|------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| (ID PA) | ID | | | | | | | | Demarcación Aislamiento | Zanja Perimetral | Tanque de protección | Repoblamiento Vegetal | Talud de recolección | como contingencia |
| UF4-PA101 | Manantial | Vía | 90 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF5-PA01 | Resurgencia | Zodme 533 | 147 | 1 | SI | Agropecuario | 0 | NO | NO | NO | NO | SI | NO | NO |
| UF5-PA02 | Interflujo | Acceso Zodme 724 | 50 | 1 | SI | Agropecuario | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF5-PA03 | Antropico | Vía | 690 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF5-PA04 | Interflujo | Zodme 402 | 765 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF5-PA05 | Resurgencia | Vía | 72 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |
| UF5-PA06 | Interflujo | Vía | 102 | 1 | NO | Ninguno | 0 | NO | NO | NO | NO | NO | NO | NO |

(*) Para el caso particular de los puntos UF4-PA17 y UF4-PA18, tener en cuenta la explicación en cuanto al permiso de intervención voluntario que se da en el texto a continuación.
Fuente: Aecom – Concol, 2018

Alcance legal del Permiso de intervención voluntario.

Es de conocimiento que para los proyectos de infraestructura de transporte la Ley creó la figura del permiso de intervención voluntario, el cual se introduce y se describe en el artículo 27 de la Ley 1682 de 2016, modificado por el artículo 11 de la Ley 1882 de 2018 de la siguiente manera:

“ARTÍCULO 11. Modifícase el artículo 27 de la Ley 1682, el cual quedará así:

Artículo 27. Permiso de intervención voluntario. Mediante documento escrito suscrito por la entidad y el titular inscrito en el folio de matrícula el poseedor regular o los herederos determinados del bien, podrá pactarse un permiso de intervención voluntario del inmueble objeto de adquisición o expropiación. El permiso será irrevocable una vez se pacte.

Con base en el acuerdo de intervención suscrito, la entidad deberá iniciar el proyecto de infraestructura de transporte.

Lo anterior, sin perjuicio de los derechos de terceros sobre el inmueble los cuales no surtirán afectación o detrimento alguno con el permiso de intervención voluntaria, así como el deber del responsable del proyecto de infraestructura de transporte de continuar con el proceso de enajenación voluntaria, expropiación administrativa o judicial, según corresponda”. (Subrayado fuera de texto)

Así las cosas, el permiso de intervención es un documento por medio del cual el o los titulares de derechos reales, poseedores o herederos determinados de manera voluntaria dan autorización con el “*objetivo que la entidad administrativa responsable pueda iniciar o adelantar las obras de infraestructura en materia de transporte sobre un bien inmueble*” (Sentencia de la Corte Constitucional C-669 del 2015). Es importante resaltar, que el mismo no constituye título traslativo de dominio, toda vez, que como lo señala la citada norma se deberá continuar con el proceso de enajenación voluntaria y/o expropiación según corresponda.

Adicionalmente, el permiso de intervención tiene el carácter de irrevocable, es decir que se entiende que una vez otorgado dicho permiso la entidad cuenta con total disponibilidad del inmueble para iniciar con las actividades de construcción, sin que esto constituya una afectación y/o detrimento de los derechos de terceros.

5.1.8.13 Caracterización hidrogeológica particular para el Túnel de Pamplonita

5.1.8.13.1 Datos generales del túnel

Se trata de un túnel bidireccional de dos carriles con galería de emergencia, que se desarrolla entre las progresivas PK47+140 a PK48+200, en una longitud total de 1060 m, con una pendiente constante del 4,0%. La velocidad de diseño del túnel Pamplonita es de 60 km/h, con dos carriles de 3,65 m c/u, dos sobreanchos de vía de 0.5 m y bermas externas de 1.0 m. Se ubica al NE de la población homónima, al final del trazado de la unidad funcional 3 (**Figura 5-2.94**). En la **Tabla 5-2.25** se reportan los datos generales del túnel de Pamplonita.

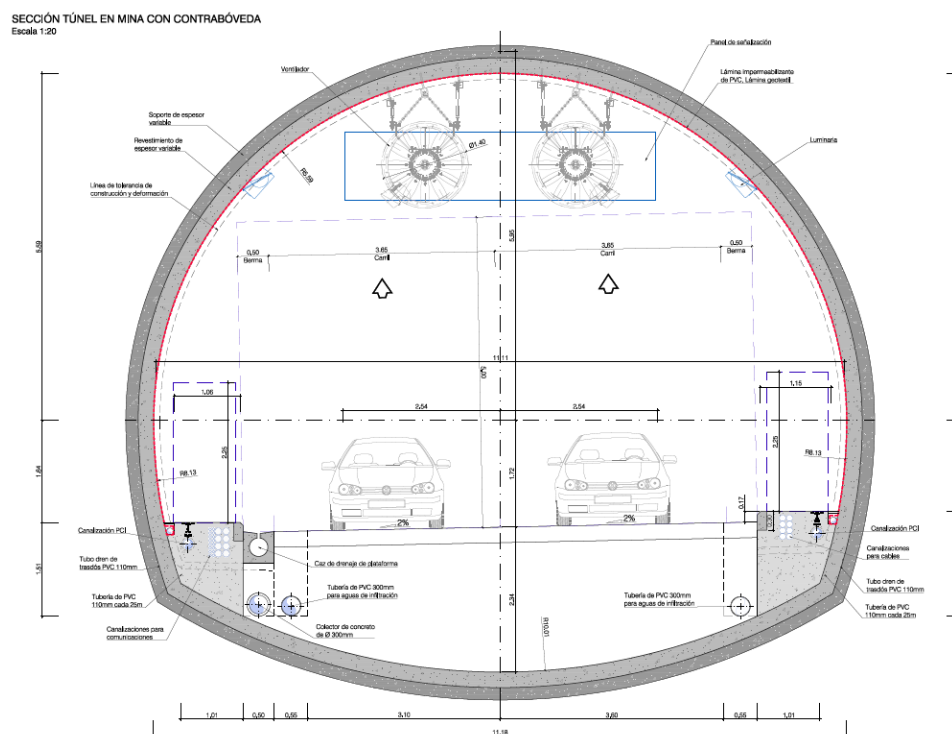
Tabla 5-2.25. Datos generales del Túnel de Pamplonita

| Túnel | Abscisa (m) | | Longitud (m) |
|------------|-------------|----------|--------------|
| | Inicio | Fin | |
| Pamplonita | PK47+140 | PK48+200 | 1060 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

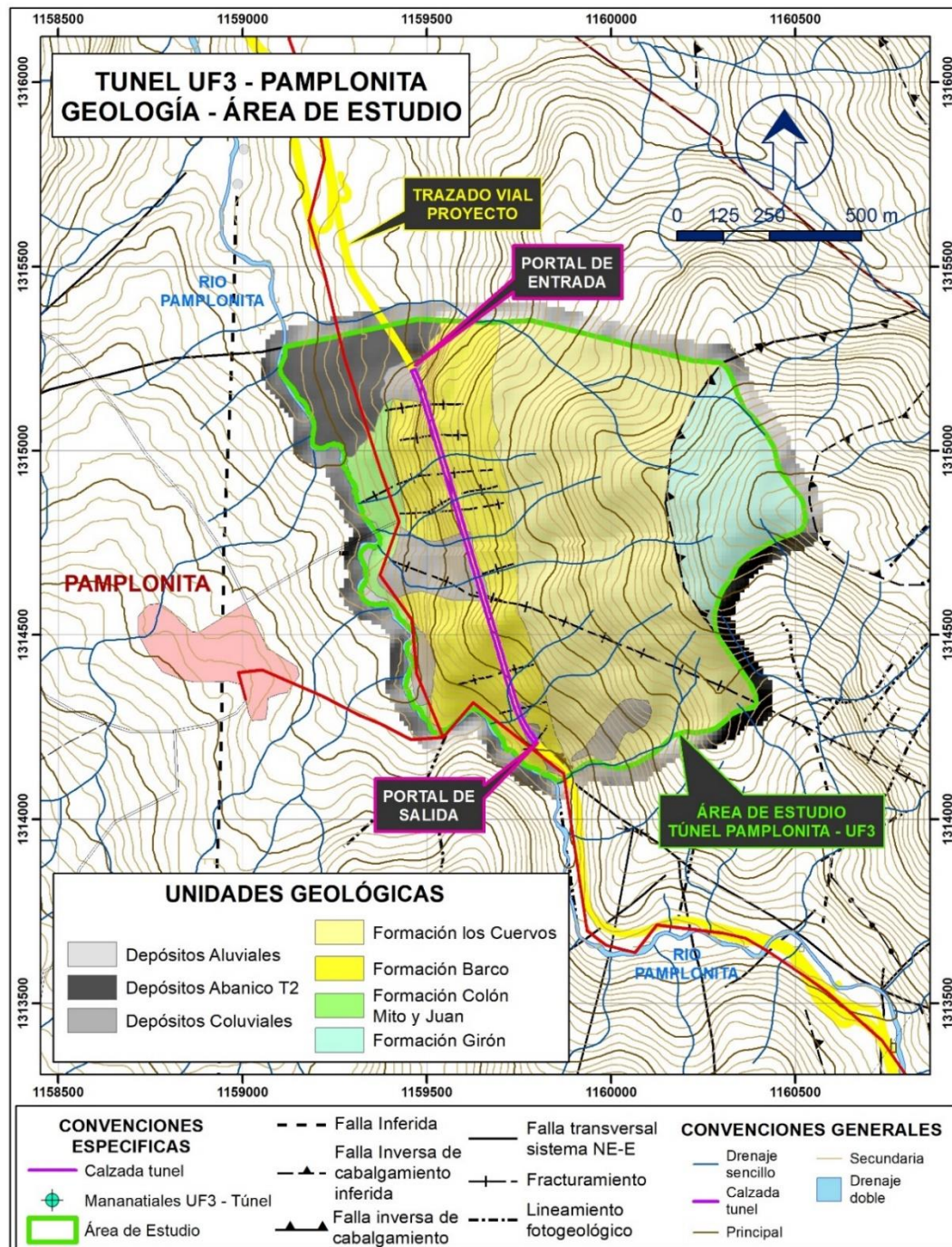
En la **Figura 5-2.93** se indica la sección geométrica del túnel de Pamplonita con contra bóveda e impermeabilización del revestimiento definitivo.

Figura 5-2.93. Sección geométrica túnel de Pamplonita con contra bóveda



Fuente: Sacyr construcción, 2018

Figura 5-2.94. Localización túnel de Pamplonita



Fuente: Aecom – Concol, 2018

5.1.8.13.2 Análisis hidrogeológico de los puntos de agua representativos en el área del túnel.

Durante el desarrollo de los estudios de la UF3-4-5 se han inventariado y monitoreado los puntos de agua presentes al interior de las cuencas interceptadas por el túnel de Pamplonita. Han sido inventariados 18 puntos en el área del túnel entre los que se tienen 12 puntos de agua representativos que se distribuyen a lo largo de la ladera derecha del Río Pamplonita en una faja altimétrica comprendida entre 1600 a 1900 msnm. Este sector se caracteriza por presentar una cobertura cuaternaria de espesor variable conformada por depósitos de origen mixto, especialmente depósitos coluviales (Qc), abanicos de terrazas (Qt2) y depósitos aluviales (Qal). Compuestos por guijarros y bloques con matriz limo-arcillosa y limo-arenosa observados en los diferentes apiques construidos a lo largo del trazado (ver **Figura 5-2.95**).

Figura 5-2.95. Depósitos de ladera observados en el apique UF3-AP01



Fuente: Sacyr construcción, 2018

Se trata de puntos de agua con caudales relativamente bajos comprendidos entre 0,002 y 0,25 l/s. Los datos de los parámetros físicoquímicos relevados en el terreno, indican valores de conductividad eléctrica (CE) relativamente bajos y comprendidos en su gran mayoría entre 40 y 405 microS/cm, evidenciando circuitos cortos con poca interacción con la matriz sólida del acuífero.

La correlación entre CE y mineralización del agua en términos de STD (Total Dissolved Solids) indican que el agua muestreada se clasifica como agua poco mineralizada ($TDS \leq 50$ mg/l) y mineral ($50 < TDS \leq 500$ mg/l). El máximo valor es de 200 mg/l. La medida de actividad redox indican un ambiente prevalentemente oxidante. Tampoco los datos de temperatura no indican anomalías térmica particulares (**Tabla 5-2.26**).

La red hidrográfica de menor orden se encuentra poco desarrollada y se activa especialmente durante los eventos de mayores precipitaciones. Mientras que los puntos de agua, de acuerdo con la información suministrada por los habitantes del sector, se caracterizan por ser en su mayoría perennes, aunque el caudal sea generalmente bajo ($Q < 1$ l/s) y variable. (**Tabla 5-2.26**).

Tabla 5-2.26. Datos de información de base relacionada con los puntos de agua representativos en el sector del túnel de Pamplonita.

| CÓDIGO FINAL | TIPO DE PUNTO | Fecha | Caudal (l/s) | MEDICIÓN PARÁMETROS FÍSICOS | | | | | |
|--------------|---------------|--------|----------------------|-----------------------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | | | | PH | CE (μs/cm) | Temp. (°C) | SDT (mg/l) | Redox-Eh/ | T°C Redox |
| UF3-PA01 | Manantial | nov-17 | 0,079 | 6,66 | 250 | 18,1 | 120 | 255 | 18,4 |
| | | jul-18 | 0,0177 | 6,66 | 405 | 16,4 | 200 | 170 | 16,4 |
| UF3-PA06 | Manantial | nov-17 | 0,027 | 6,46 | 40 | 20,4 | 20 | 144 | 20,2 |
| | | jul-18 | 0,028 | 7,18 | 30 | 19,8 | 15 | 118 | 19,8 |
| UF3-PA07 | Resurgencia | nov-17 | 0,074 | 6,78 | 90 | 20,5 | 40 | 84 | 20,8 |
| | | jul-18 | 0,025 | 6,9 | 99 | 17,1 | 50 | 30 | 17,1 |
| UF3-PA08 | Manantial | nov-17 | 0,010 | 6,32 | 200 | 22,5 | 100 | 63 | 22,7 |
| | | jul-18 | 0,125 | 6,73 | 100 | 18,2 | 50 | 41 | 18,2 |
| UF3-PA28 | Resurgencia | nov-17 | 0,109 | 6,76 | 100 | 18,5 | 50 | 166 | 18,5 |
| | | jul-18 | - | 6,17 | 227 | 20,9 | 114 | - | - |
| UF3-PA29 | Manantial | nov-17 | 0,13 | 6,74 | 270 | 20,2 | 130 | -13 | 20,2 |
| | | jul-18 | 0,2 | 6,59 | 250 | 19 | 125 | -11 | 19 |
| UF3-PA30 | Interflujo | nov-17 | 0,04 | 7,46 | 70 | 20,4 | 40 | 32 | 20,6 |
| | | jul-18 | Humedad | - | - | - | - | - | - |
| UF3-PA32 | Interflujo | jul-18 | No se puede encausar | 5,71 | 32 | 19,2 | 16 | 119 | 19,2 |
| UF3-PA52 | Resurgencia | abr-18 | 0.024 | 7.2 | 52 | 19.9 | 16 | 117 | 19.2 |
| UF3-PA53 | Resurgencia | abr-18 | 0.08 | 6.83 | 117 | 19.1 | 66 | 56 | 18.9 |
| UF3-PA54 | Resurgencia | abr-18 | 0.025 | 7.23 | 51 | 19.7 | 25 | 32 | 20.4 |
| UF3-PA55 | Antropico | abr-18 | 0,021 | 5.2 | 32 | 19.2 | 16 | 119 | 19.2 |
| UF3-PA61 | Resurgencia | abr-18 | 0.13 | 8,78 | 420 | 24 | 210 | 133 | 24,1 |
| UF3-PA62 | Resurgencia | abr-18 | 0.14 | 7.45 | 415 | 20.5 | 254 | 68 | 19.4 |
| UF3-PA63 | Manantial | abr-18 | 0.98 | 7.14 | 358 | 21.3 | 298 | 95 | 20.6 |
| UF3-PA64 | Manantial | abr-18 | 0.91 | 7.08 | 366 | 20.9 | 312 | 74 | 20.4 |
| UF3-PA65 | Manantial | abr-18 | 1.02 | 7.1 | 254 | 19.5 | 222 | 70 | 19.7 |

| CÓDIGO FINAL | TIPO DE PUNTO | Fecha | Caudal (l/s) | MEDICIÓN PARÁMETROS FÍSICOS | | | | | |
|--------------|---------------|--------|--------------|-----------------------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | | | | PH | CE (µs/cm) | Temp. (°C) | SDT (mg/l) | Redox-Eh/ | T°C Redox |
| UF3-PA66 | Resurgencia | abr-18 | 0.99 | 7.23 | 278 | 19.3 | 300 | 95 | 20.2 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

En la **Figura 5-2.96** se muestra la distribución de los puntos de agua representativos en la zona de influencia del túnel de Pamplonita. Si bien los datos a disposición indican que la alimentación de la mayoría de estos puntos de agua está relacionada con circuitos locales y subsuperficiales, es necesario subrayar que, de acuerdo con la información suministrada por la comunidad los mismos son prevalentemente de tipo perenne y, por lo tanto, representan descargas naturales continuas capaces de regular las contribuciones de precipitaciones meteorológicas que tienen un carácter estacional.

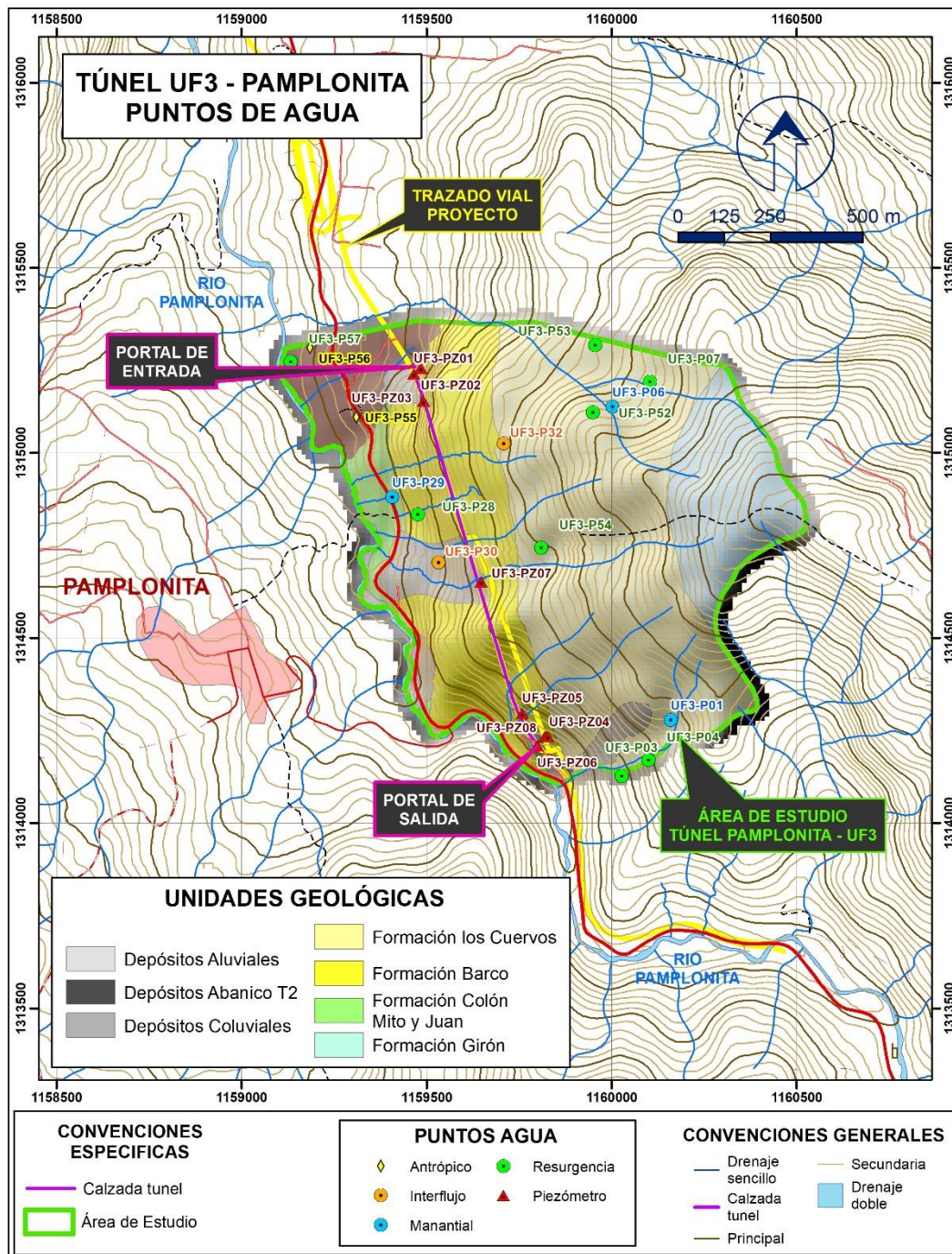
Los puntos de agua UF3-PA04, UF3-PA54 y UF3-PA06, que cubren gran parte de la zona de influencia del túnel, han sido objeto de análisis hidroquímico cuyos resultados se describen en el capítulo 5.1.8.7.4 al cual se remite. Básicamente se evidencia que las facies hidroquímicas dominantes de tipo de tipo calcio magnésico a magnésico sulfático, las cuales son características de aguas subsuperficiales.

Por lo que se concluye que la alimentación de los circuitos hídricos conexos con los principales puntos de agua inventariados deriva de la precipitación y se excluyen una alimentación derivada de circuitos profundos. Estos últimos, de acuerdo con los datos obtenidos de los piezómetros, se ubica a una cota distante de la superficie y muy cerca al eje del túnel en profundidad. Estos circuitos profundos pudieran estar alimentando algunos acuíferos ubicados en la parte más baja del valle constituyendo al Río Pamplonita en un río efluente o río ganador.

Aparte del inventario y muestreo hidroquímico antes mencionado, también se llevaron a cabo varias investigaciones geofísicas entre las que se destacan campañas de prospección eléctrica (tomografías) y sísmica (refracción). En particular se llevaron a cabo dos campañas de investigaciones geoelectricas y una campaña de sísmica en el sector del túnel de Pamplonita.

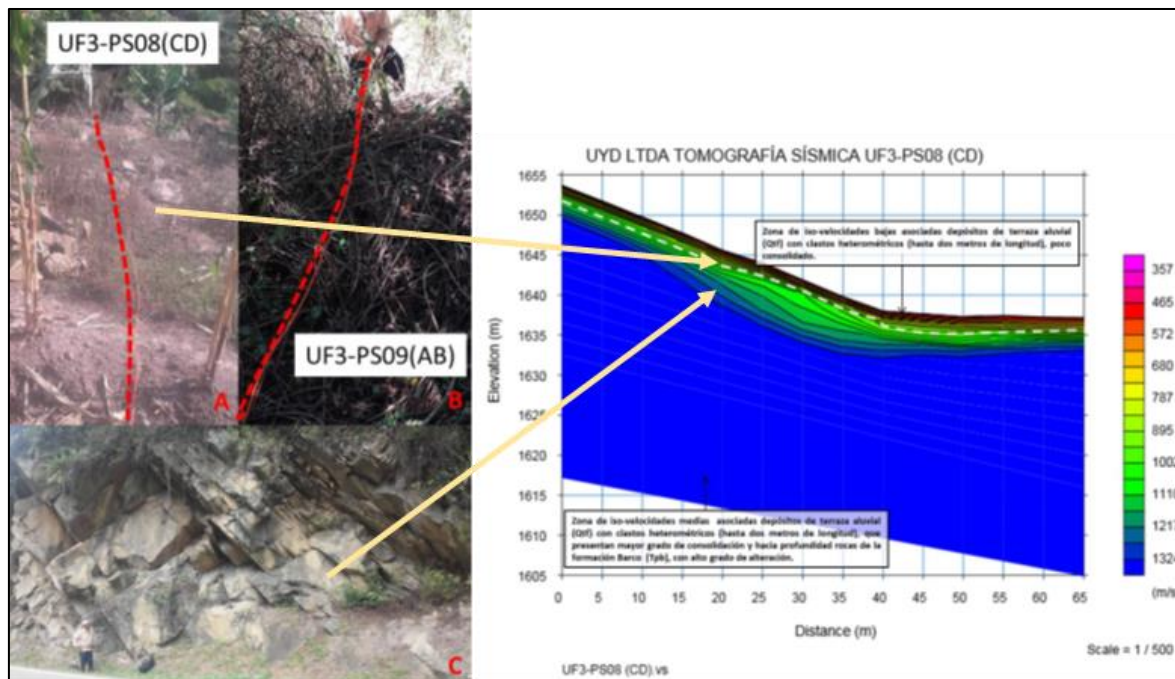
La prospección sísmica (tomografía sísmica de refracción), si bien no aportan indicaciones acerca del grado de saturación del terreno y que la profundidad de investigación es muy reducida (<50m), permiten identificar una sutil costra superficial caracterizada por velocidades de compresión relativamente bajas, comprendidas entre 400 y 1000 m/s que representan potencialmente el acuífero somero al interior del cual es posible que se desarrollen circuitos subsuperficiales que alimentan la mayor parte de los puntos de agua inventariados en este sector. De los resultados de la tomografía sísmica realizada es posible que deducir un espesor reducido del orden de 10 – 20 m que reposa directamente sobre un sustrato poco a nada alterado/fracturado y que representa potencialmente la base del acuífero superficial.

Figura 5-2.96. Distribución de los puntos de agua representativos en la zona de influencia del túnel de Pamplonita.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

Figura 5-2.97 Relación entre los resultados de la tomografía eléctrica y el terreno relevado in situ



Fuente: Sacyr construcción, 2018

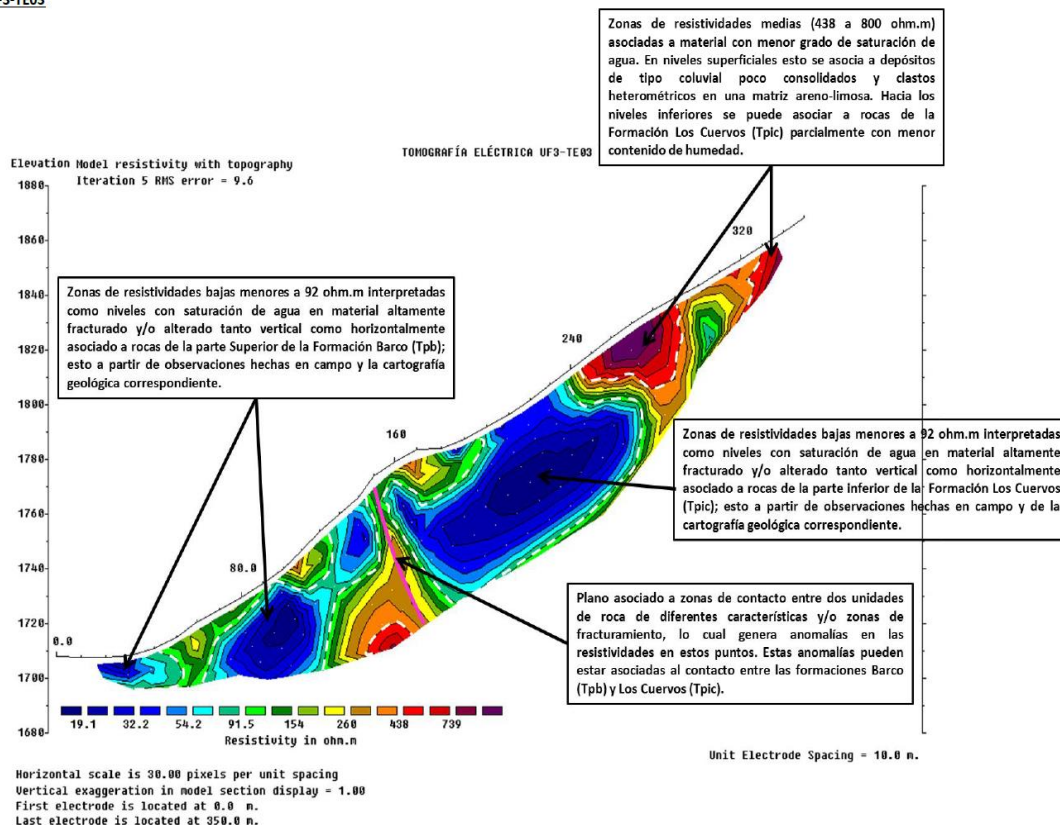
Fuente: Sacyr construcción, 2018. En la foto, en alto se representan los terrenos superficiales caracterizados por $V_p < 500 \text{ m/s}$; en la parte inferior se muestra sustrato rocoso caracterizado por una V_p entre aprox. 1000 – 1200 m/s.

Las investigaciones geoelectricas permiten obtener más información respecto al grado de saturación del subsuelo y, además, alcanzar mayores profundidades de investigación. Las secciones tomográficas fueron realizadas en sentido longitudinal (TE01-TE02 y TE01N) y transversal al eje del túnel de Pamplonita (TE03).

Los resultados obtenidos en las diferentes campañas resultan ser bastante coherentes entre sí. De hecho, aunque se pueden observar diferencias locales, el modelo geológico-hidrogeológico deducido prevé la presencia de sectores superficiales de baja resistividad, con espesores limitados, la mayoría de ellos saturados y constituidos por material poco o nada consolidados. Esto es evidente especialmente en la sección transversal al eje del túnel identificada como AY-TE03, la cual muestra zonas superficiales potencialmente acuíferas con espesores entre 20-40 m en conexión directa con la superficie topográfica; estas zonas, en coherencia con lo evidenciado por la prospección sísmica, pueden ser potencialmente interpretadas como parte del acuífero superficial que se desarrolla en los depósitos de ladera y en el horizonte de mayor alteración /fracturación del macizo rocoso.

Figura 5-2.98. Sección de tomografía eléctrica AY-TE03 transversal al eje del túnel de Pamplonita.

Tomografía UF3-TE03



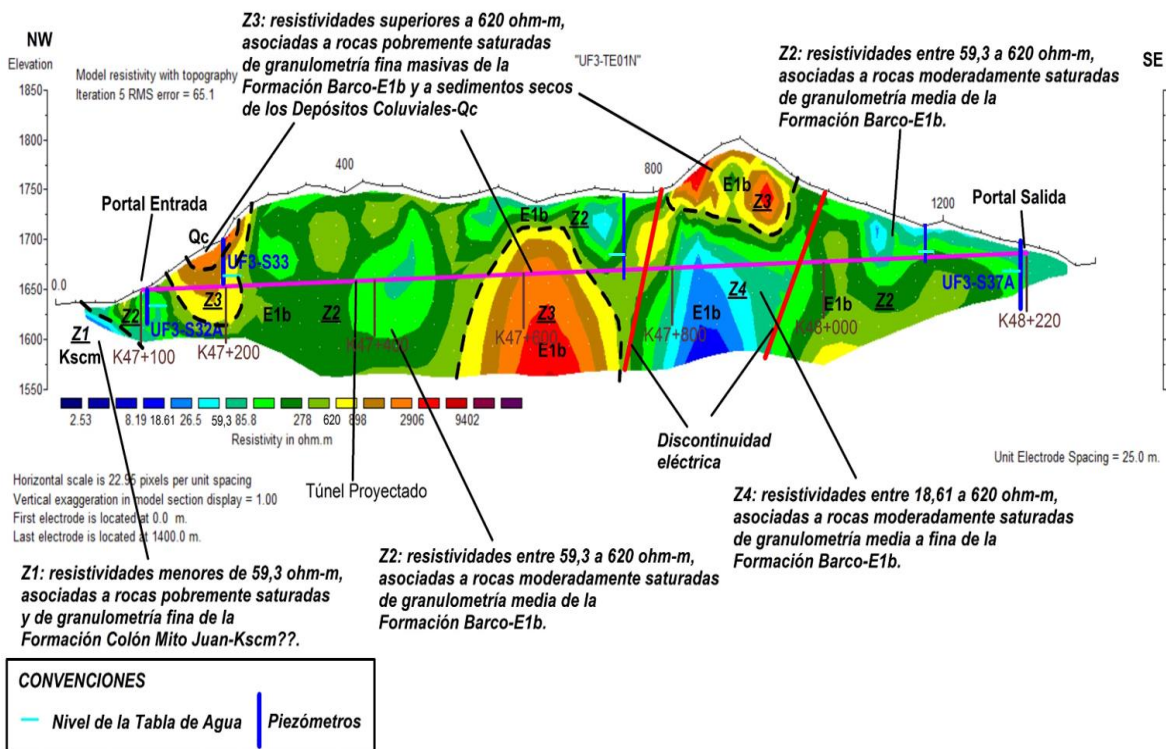
Fuente: Sacyr construcción, 2018

La sección longitudinal al trazado, que alcanza la cota del túnel, indica la presencia de zonas potencialmente saturadas especialmente en profundidad, confirmando los datos piezométricos que identifican una zona saturada en proximidad con la cota del túnel, aparentemente no conexas con los circuitos superficiales que alimentan los puntos de agua inventariados.

Las dos campañas resultan coherentes también en la identificación de las zonas de mayor fracturación (fallas geológicas) que representan potenciales conexiones hidráulicas entre los acuíferos superficiales y aquellos más profundos. Se asume, por lo tanto, que a lo largo de estas estructuras ocurren flujos descendentes que alimentan los acuíferos en roca.

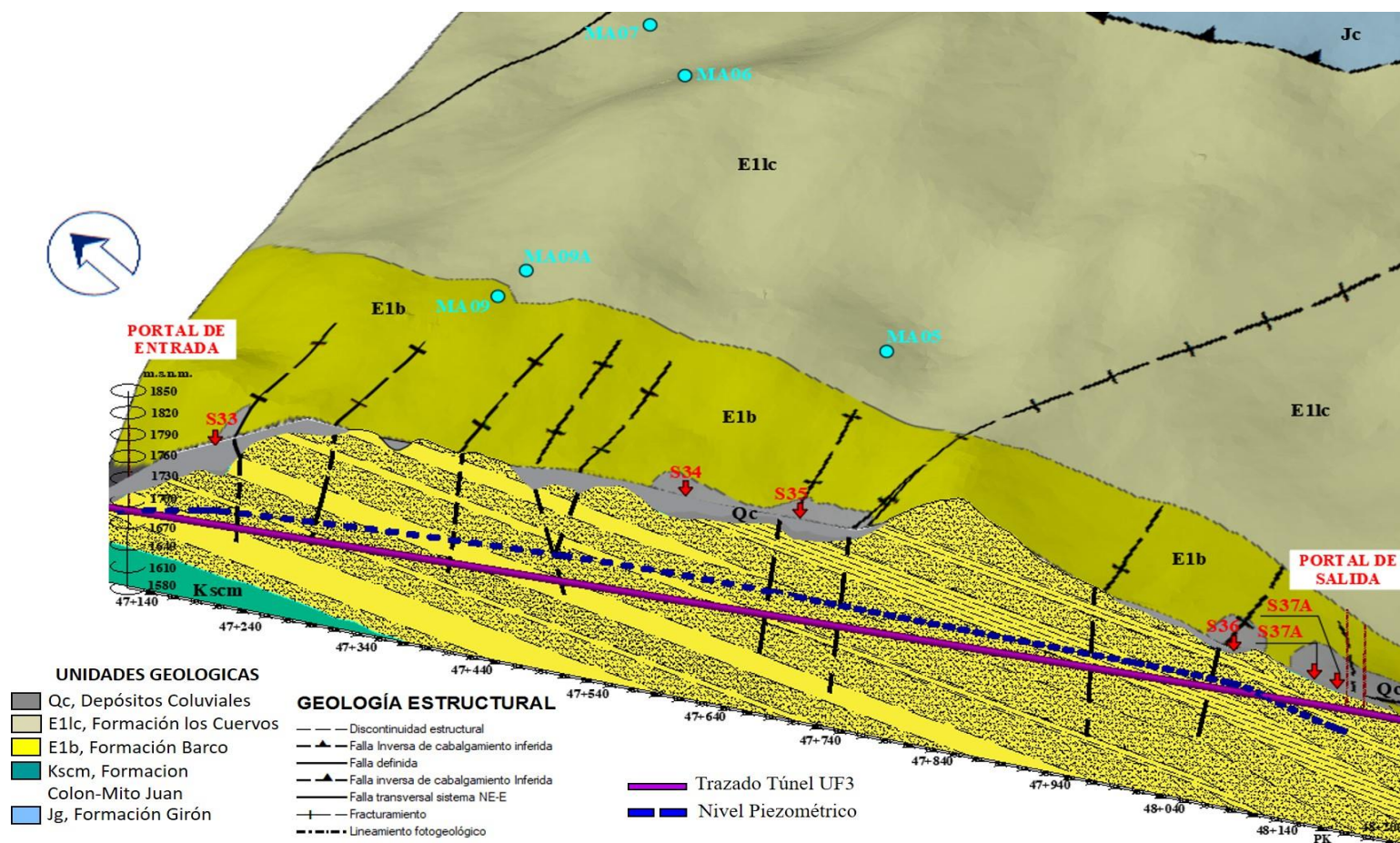
Para mayores detalles acerca de la descripción de cada punto de agua en particular se pide que el lector remita al Anexo 5.1.3.2, relacionado con los modelos hidrogeológicos locales.

Figura 5-2.99. Sección de tomografía eléctrica (GD-TE01N) longitudinal sobre el eje del túnel de Pamplonita.



Fuente: Sacyr construcción, 2018

Figura 5-2.100. Perspectiva tridimensional tipo bloque diagrama del Túnel de Pamplonita. Entorno geológico e hidrogeológico.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

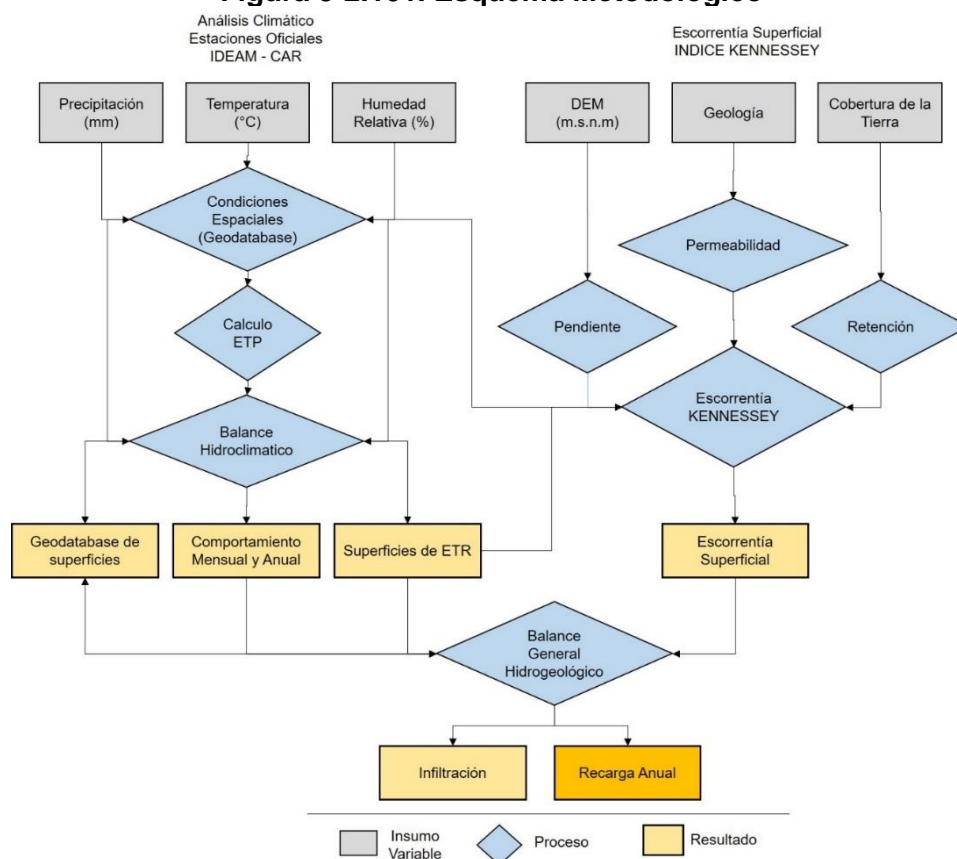
5.1.8.13.3 Valoración de la recarga túnel de Pamplonita

En este capítulo se desarrolla la metodología para el cálculo de la recarga esperada sobre el área de estudio que envuelve el trazado del Túnel de Pamplonita (UF 3). Incorporando el análisis climático medio anual a partir de estaciones climáticas oficiales y su comportamiento espacial y Multitemporal. Las condiciones de escorrentía superficial son abordadas a partir de la metodología Kennessey, caracterizando la Permeabilidad, la cobertura vegetal y la pendiente.

- **Metodología Empleada**

Se describe a continuación la metodología implementada para el análisis de recarga, incluyendo los análisis climáticos necesarios sobre las áreas de estudio (**Figura 5-2.101**). Siguiendo un procedimiento de análisis espacial, fundamentado en superficies continuas de las variables utilizadas. Las variables espaciales contempladas se han administrado a partir de Geodatabase organizadas y procesadas bajo un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Figura 5-2.101. Esquema Metodológico



Fuente: Aecom – Concol, 2018

La metodología se desarrolla en dos partes: primero, las principales condiciones climáticas del área de estudio y segundo, el cálculo de escorrentía, basado en el balance hidrogeológico del área de interés. A continuación, se describen los componentes metodológicos.

Análisis Climático:

Se evaluaron las condiciones atmosféricas principales, medidas a partir de estaciones oficiales del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

- *Precipitación (mm)*: La precipitación media mensual multianual y anual relacionan la cantidad de agua natural atmosférica de entrada al sistema natural evaluado.
- *Temperatura (°C)*: La sensación de temperatura media mensual multianual y anual, establecen las condiciones de cambio de estado y catalizador en los sistemas de energía sobre la superficie y los balances evaluados.

Las condiciones de temperatura mínima, media y máxima se espacializaron a partir de su correlación inversa de altura sobre las estaciones seleccionadas.

- *Humedad Relativa (%)*: Las proporciones de agua en diferentes condiciones atmosféricas permiten evaluar las posibilidades de cambio real y potencial, relacionando de manera sinérgica los elementos de precipitación y temperatura sobre los balances utilizados.
- *Evapotranspiración Potencial (ETP)*: Relaciona las condiciones de precipitación, temperatura y humedad relativa sobre las cuales el agua es transformada en vapor.

Evalutando de manera simultánea la posibilidad biológica de transpirar y las condiciones naturales en que el agua se evapora. Se plantea el uso de la ecuación de ETP mensual propuesta por García y López (1970), ya que se encuentra ajustada para condiciones tropicales (Valencia 2010). Los valores anuales de evapotranspiración son determinados a partir de la formulación de Turc (1954).

$$ETP = 1.21 * 10^{Ft} (1 - 0.01 * HR_D) + 0.21 * t - 2.3 \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$Ft = \frac{7.45t}{234.7+t} \quad (\text{Ecuación 6})$$

$HR_D = \text{Humedad media del mes}$

$t = \text{Temperatura media del mes}$

Condiciones Espaciales Geodatabase:

Las variables climáticas utilizadas al igual que los demás elementos expuestos en este documento se han construido a partir de superficies continuas, almacenadas en Geodatabases que permiten su manipulación espacial.

Balance Hidroclimático:

Se ha desarrollado el balance Hidroclimático medio mensual multianual a partir de las superficies de variables climáticas (Olaya, 2004), (Singh, 2012), (Rocha, 2010), obteniendo el comportamiento distribuido del balance a través del área de estudio, con ello se relaciona una mejor precisión en el comportamiento y los cambios que se producen en un medio continuo. Se obtuvieron los siguientes derivados al realizar el balance hidroclimático:

- *Almacenamiento*: Cantidad de agua media mensual que puede ser almacenada por las condiciones de suelo.
- *Déficit*: Cantidad de agua faltante en el sistema por un incremento en la evapotranspiración y la precipitación de entrada.
- *Evapotranspiración Real (ETR)*: Con el balance se obtiene el producto principal de este mecanismo de relaciones donde se calcula este fenómeno con base en el potencial real de entrada y salida para cada mes, llevando a un ajuste adecuado las condiciones de ETP iniciales.
- *Exceso*: Cantidad de agua de salida del sistema por saturación.

Escurrimiento Superficial

La escurrimiento superficial se determina a partir de la formulación establecida por KENNESSEY (1930) destacando la capacidad de incluir variables medibles y determinantes sobre el área de estudio. Se presentan ajustes adecuados para condiciones de relieve colinado y superiores, ya que este método fue ajustado bajo elementos similares (Tardi & Vittorini, 1977, Barazzuoli et al., 1987, Colombetti & Mattioli, 1991, Bauducco et al., 1992). También se relaciona en un buen ajuste para las condiciones de recarga en diferentes periodos de tiempo y evaluaciones de cambio tendencial del clima (Spadoni, Brilli, Giustini, & Petitta, 2010).

La versatilidad del método se basa en la cuantificación de condiciones que ejercen un peso uniforme en el fenómeno de escurrimiento:

- Pendiente del terreno: Derivada de un modelo digital de terreno, con resolución espacial de 12.5m del sensor activo ALOS para el año 2011. Con lo cual se obtiene una escala de mejor detalle a 1:25000.
- Permeabilidad: Se ha determinado por el estudio Geológico de detalle que fue entregado para el estudio.
- Cobertura vegetal y uso del suelo: Esta superficie fue actualizada a una escala 1:10000 a partir del mosaico que cubre las áreas de estudio, basados en el sensor óptico RapidEye.

El coeficiente de escorrentía (CK), se determina por la relación sinérgica de la pendiente del terreno (CA), el estado de la cobertura vegetal (CV) y la permeabilidad de la roca (CP). Que influyen de manera continua sobre el comportamiento de la escorrentía.

$$CK = CA + CV + C \quad (\text{Ecuación 7})$$

Cada uno de estos componentes se preparan a partir de una variable espacial continua, almacenada como una superficie que representa dichos cambios en el territorio, pudiendo evaluar su parámetro cuantitativo y espacial de manera simultánea en el cálculo aditivo de su índice.

Los niveles categóricos para cada una de las variables mencionadas en el cálculo de la escorrentía CK, varían según el comportamiento climático del área de estudio, de esta manera se propone usar el índice de aridez (*Ia*) propuesto por Marttne (1926) y ajustado para el cálculo del CK (Tardi & Vittorini, 1997), (Bauducco, Antonio de Luca, Dematteis, & Mascocco, 1992), como se presenta en la siguiente formulación:

$$Ia = \frac{\left(\frac{P}{T+10} + 12\frac{p}{t}\right)}{2} \quad (\text{Ecuación 8})$$

P = Precipitación media anual

T = Temperatura media anual

p = Precipitación media mensual del mes mas seco

t = Temperatura media mensual del mes mas seco

La propuesta del índice de escorrentía CK, indica que la clasificación de las variables utilizadas en su cálculo está condicionada al resultado del Índice de Aridez mencionado, presentando tres categorías de valores, la primera para: $Ia < 25$, la segunda: $25 < Ia < 40$ y por ultima: $Ia > 40$. En la **Tabla 5-2.27** se presenta los valores de clasificación propuestos y variación su dependiendo el resultado del *Ia*.

Tabla 5-2.27 Clasificación de parámetros en función de la variación del Índice de Aridez

| Índice de aridez (<i>I_a</i>) | <i>I_a</i> < 25 | 25 < <i>I_a</i> < 40 | <i>I_a</i> > 40 |
|---|---------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Pendiente (<i>C_a</i>) | | | |
| <i>C_{a1}</i> A>35% | 0.22 | 0.26 | 0.30 |
| <i>C_{a2}</i> 10%<A>35% | 0.12 | 0.16 | 0.20 |
| <i>C_{a3}</i> 3.5%<A>10% | 0.01 | 0.03 | 0.05 |
| <i>C_{a4}</i> A<3.5% | - | 0.01 | 0.03 |
| Cobertura vegetal (<i>C_v</i>) | | | |
| <i>C_{v1}</i> Roca desnuda | 0.26 | 0.28 | 0.30 |
| <i>C_{v2}</i> Pastizales | 0.17 | 0.21 | 0.25 |
| <i>C_{v3}</i> Tierra de cultivo, arbustos | 0.07 | 0.11 | 0.15 |
| <i>C_{v4}</i> Bosque de árboles altos | 0.03 | 0.04 | 0.05 |
| Permeabilidad (<i>C_p</i>) | | | |
| <i>C_{p1}</i> Impermeable | 0.21 | 0.26 | 0.30 |
| <i>C_{p2}</i> Media | 0.12 | 0.16 | 0.20 |
| <i>C_{p3}</i> Buena | 0.06 | 0.08 | 0.10 |
| <i>C_p</i> Elevada | 0.03 | 0.04 | 0.05 |

Fuente: Tardi & Vittorini (1997), Baducco et al (1992) y Sapdonni et al (2010)

El cálculo final de la escorrentía ® a partir del coeficiente CK, se obtiene con la precipitación media anual mínima, media y máxima para el área de estudio a partir de la siguiente consideración:

$$R = CK * P \quad (\text{Ecuación 9})$$

Las relaciones numéricas y espaciales presentadas en la metodología son desarrolladas a través del procesamiento algebraico de mapas, obteniendo para cada variable una superficie independiente y de igual forma entre sus interacciones. Las unidades espaciales del modelo ráster utilizado presentan una resolución de 12.5m para cada uno de sus lados, como unidad mínima de representación del área de estudio.

El sistema de referencia espacial utilizado para el desarrollo metodológico expuesto, obedece al sistema Magna – Sirgas Colombia Bogotá, de origen central. Con el cual se han elaborado las salidas gráficas y los cálculos numéricos de superficies.

Balance Hidrogeológico:

Este responde a las condiciones generales del sistema hídrico y calculado bajo los parámetros explicados anteriormente. La relación inversa media anual presentada para este balance se considera a partir de las superficies finales de precipitación media anual, evapotranspiración real media anual y escorrentía media anual, como se presenta a continuación:

$$I = P - E_{tr} - R \quad (\text{Ecuación 10})$$

Dónde:

$$\begin{aligned} I &= \text{Infiltración media anual} \\ P &= \text{Precipitación media anual} \\ E_{tr} &= \text{Evapotranspiración real media anual} \\ R &= \text{Escorrentía media anual} \end{aligned}$$

Recarga:

El potencial de recarga del acuífero se encuentra en función de la capacidad de infiltración obtenida en el balance anterior y la superficie que este representa. De esta manera se obtuvieron superficies de recarga para el área de estudio donde se observa la variabilidad de recarga y su comportamiento espacial, en función del tamaño de resolución mencionado de 12.5m de lado por pixel y el total como la suma de toda la superficie continua. La expresión de recarga se presenta a continuación:

$$\text{Recarga} = I * S \quad (\text{Ecuación 11})$$

Dónde:

$$\begin{aligned} I &= \text{Infiltración media anual} \\ S &= \text{Superficie de infiltración} \end{aligned}$$

• **Área de estudio**

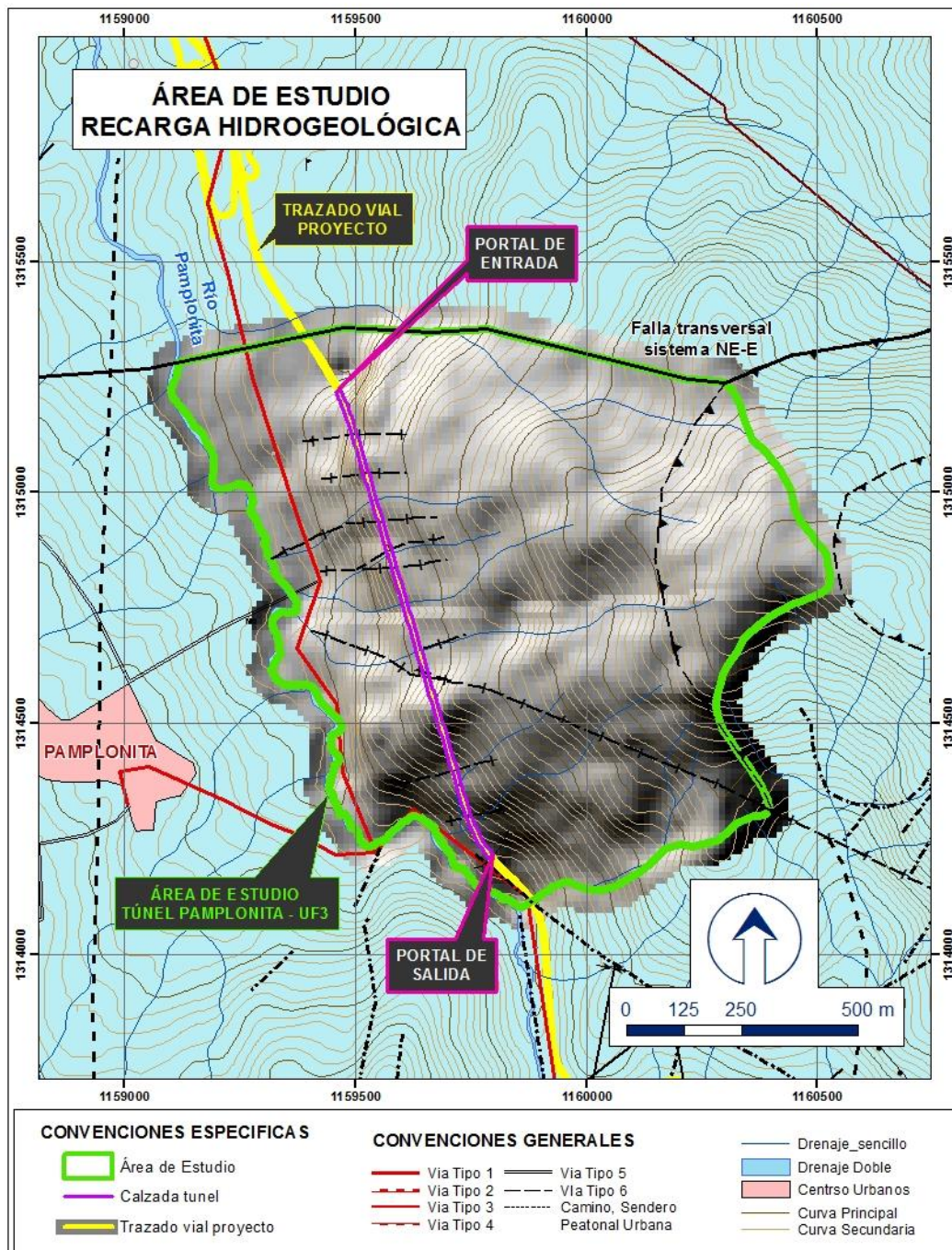
El área de estudio se encuentra asociada al paso y proyección del túnel ubicado en la unidad funcional 3 (UF3) del proyecto. Al costado oriental del centro poblado de Pamplonita la cual presenta una superficie de 117.67 ha.

El área de influencia del túnel se basó en la estructura hidrológica e hidrogeológica que componen el área, priorizando la corriente de flujo presente como el Río Pamplonita, las corrientes de menor grado y la geología estructural circundante como fallas y contactos de las unidades que componen el área de estudio. Ver **Figura 5-2.102**.

Al norte, se tuvo en cuenta la falla transversal del sistema NE-E, que se encuentra en dirección oeste a este y al sur con el Río Pamplonita y los lineamientos fotogeológicos encontrados. El trazado tiene en cuenta un alcance de más de 900 m en dirección oriental, parte más alta de la montaña (Condición de abatimiento).

Por el costado occidental se tuvo en cuenta el trazado del Río Pamplonita, en dirección sur a norte (teniendo en cuenta que esta corriente se encuentra por debajo de la cota del trazado de excavación del túnel). Por el costado oriental se llevó el área de influencia hasta la divisoria de agua, cubriendo el sistema de drenajes que se encuentran en esta dirección, aguas arriba del trazado del túnel, hasta encontrar la falla transversal del sistema NE-E, en el norte del área de estudio.

Figura 5-2.102 Área Hidrogeológica de Estudio



Fuente: Aecom – Concol, 2018

• Condiciones Climáticas

Las condiciones climáticas para el componente hidrogeológico fueron desarrolladas de manera particular para el área alrededor del túnel objeto del presente estudio. Los análisis se basan en la información media mensual multianual de las estaciones oficiales climatológicas del IDEAM. En la **Tabla 5-2.28** se referencia el tipo de estación y las condiciones de su posicionamiento.

La reconstrucción de los campos de lluvia y de temperatura permitió evaluar las condiciones locales del área de estudio y de manera simultánea su visión regional y formación en el territorio.

Tabla 5-2.28 Estaciones meteorológicas utilizadas

| CODIGO | NOMBRE | CAT | ENTIDAD | ESTE | NORTE | ALTITUD | P (mm) | T (°C) |
|----------|----------------------|-----|---------|------------|------------|---------|--------|--------|
| 16015030 | LA ESPERANZA | CO | IDEAM | 1170367,32 | 1329135,20 | 1817,7 | X | X |
| 16015020 | ISER PAMPLONA | AM | | 1158172,27 | 1307342,79 | 2286,0 | X | X |
| 16015090 | TAMA PARQUE NACIONAL | CP | | 1180559,20 | 1313099,14 | 2427,7 | X | X |
| 37015010 | SILOS | CO | | 1146262,08 | 1288985,79 | 2765 | X | X |
| 16020080 | CUCUTILLA | PM | | 1144008,39 | 1325115,63 | 1280 | X | |
| 16020110 | LA CALDERA | PM | | 1150092,40 | 1301104,15 | 2875 | X | |
| 37010010 | LABATECA | PM | | 1174154,22 | 1299092,93 | 1560 | X | |
| 37010030 | CACOTA | PM | | 1158362,04 | 1295936,51 | 2645 | X | |

CP: Climatológica Principal, CO: Climatológica Ordinaria, AM: Agrometeorologica

PM: Pluviométrica

Fuente: Aecom – Concol, 2018

Se registraron ocho estaciones de precipitación alrededor del territorio involucrado en el análisis, con principal ajuste por la estación: ISER PAMPLONA, que representa la estación más cercana al área de estudio del túnel de Pamplonita. Cuatro estaciones con posibilidad de registros de temperatura ajustaron la correlación inversa de la altitud con la temperatura en los valores medios, mínimos y máximos.

Se registraron ocho estaciones de precipitación alrededor del territorio involucrado en el análisis, con principal ajuste por la estación: ISER PAMPLONA, que representa la estación más cercana al área de estudio del túnel de Pamplonita. Cuatro estaciones con posibilidad de registros de temperatura ajustaron la correlación inversa de la altitud con la temperatura en los valores medios, mínimos y máximos.

- **Comportamiento de la Precipitación**

La variabilidad de la precipitación en la región se encuentra en un régimen bimodal que presenta sus mayores valores de lluvia en los meses de Abril a Mayo y en Octubre a Noviembre. Enero indica el primer periodo seco registrado en este régimen y en el mes de Julio se registra el segundo periodo seco de menor a igual magnitud. Los campos de lluvia sobre la región estudiada y su territorio circundante se encuentran en un rango anual de 27.97 mm y 184.19 mm, los cuales recogen la variabilidad media mensual multianual.

En la **Figura 5-2.103** se establecen las condiciones bajo una misma escala representando los meses de enero a junio, en lo cual se observa el rápido cambio en la oscilación media de las lluvias pasando de valores de 34 – 39 mm (Enero) a valores de 120 - 130 mm (Abril). Estas rápidas oscilaciones en las precipitaciones describen comportamientos variables fuertes que pueden ser acompañados por fuertes efectos durante condiciones de fenómenos regionales como el niño y la niña.

Los últimos seis meses del régimen de precipitación (**Figura 5-2.104**) establecen las condiciones más extremas del comportamiento de lluvias. Julio el segundo periodo seco y con menores precipitaciones promedio (45 – 53 mm) y octubre con picos que pueden llegar a los 164 – 180 mm. Con lo cual se permite inferir periodos de mayor atención sobre los últimos seis meses debido a los cambios en periodos secos que se pueden prolongar o viceversa con las condiciones fuertes de lluvia que alteran este ciclo promedio.

- **Comportamiento de la Temperatura**

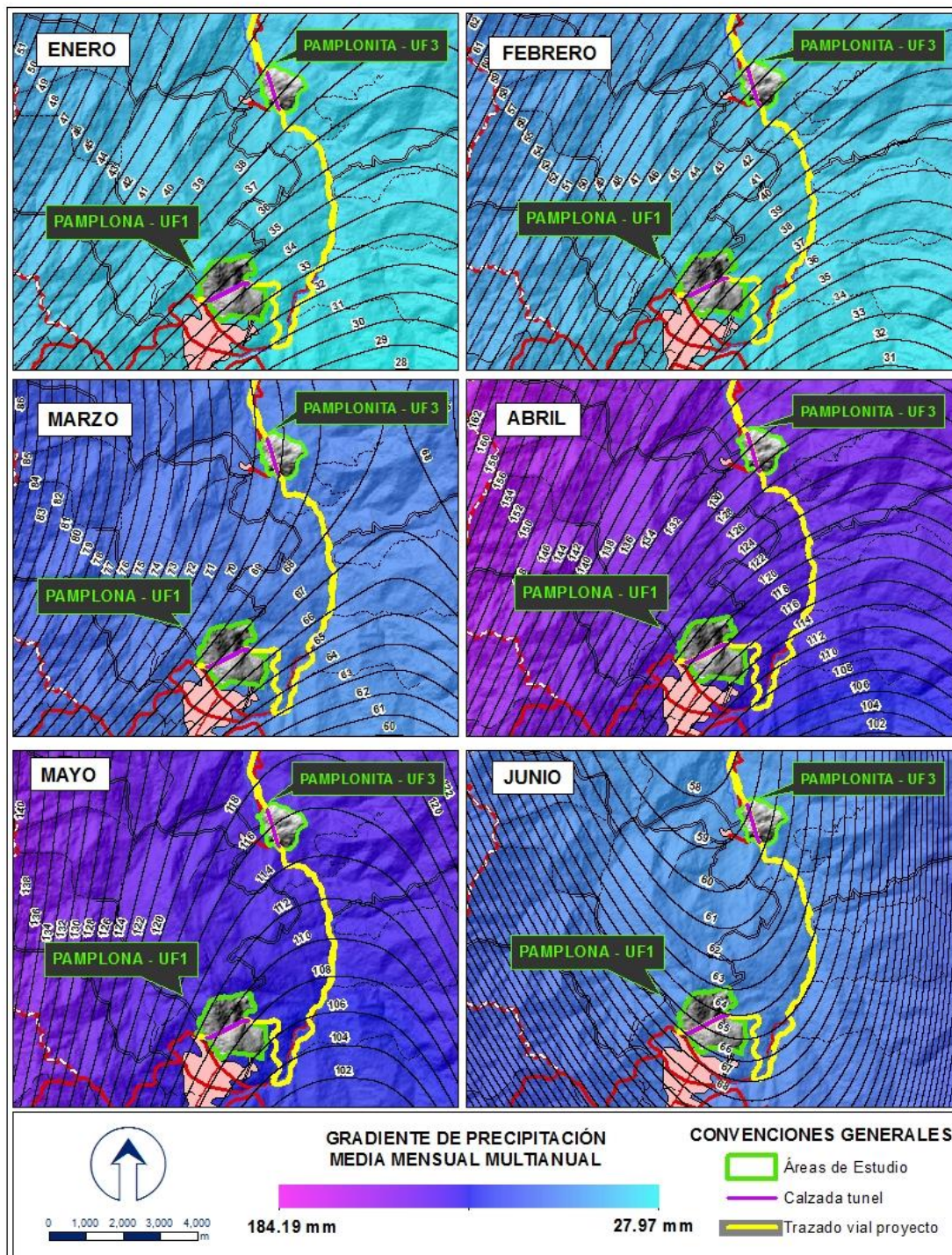
La temperatura es la variable de menor cambio temporal al ser comparada con las demás variables del sistema climático, aunque se representa con claridad los cambios de oscilación por la relación inversa de altura y temperatura.

Para las condiciones representadas en la región de estudio se reconstruyo el comportamiento inverso de la temperatura con respecto a los cambios de altura (**Figura 5-2.105**), para cada mes analizado en el régimen de temperatura).

Los comportamientos del régimen de temperatura muestran oscilaciones que responden de igual forma al patrón evaluado anteriormente con la precipitación, pero en condiciones de rangos menores. Tan solo el rango de oscilación para la temperatura es del 3% (**Figura 5-2.106**) elemento que distingue periodos de humedad mas no de estaciones en nuestro sistema climático regional (IDEAM, 2014).

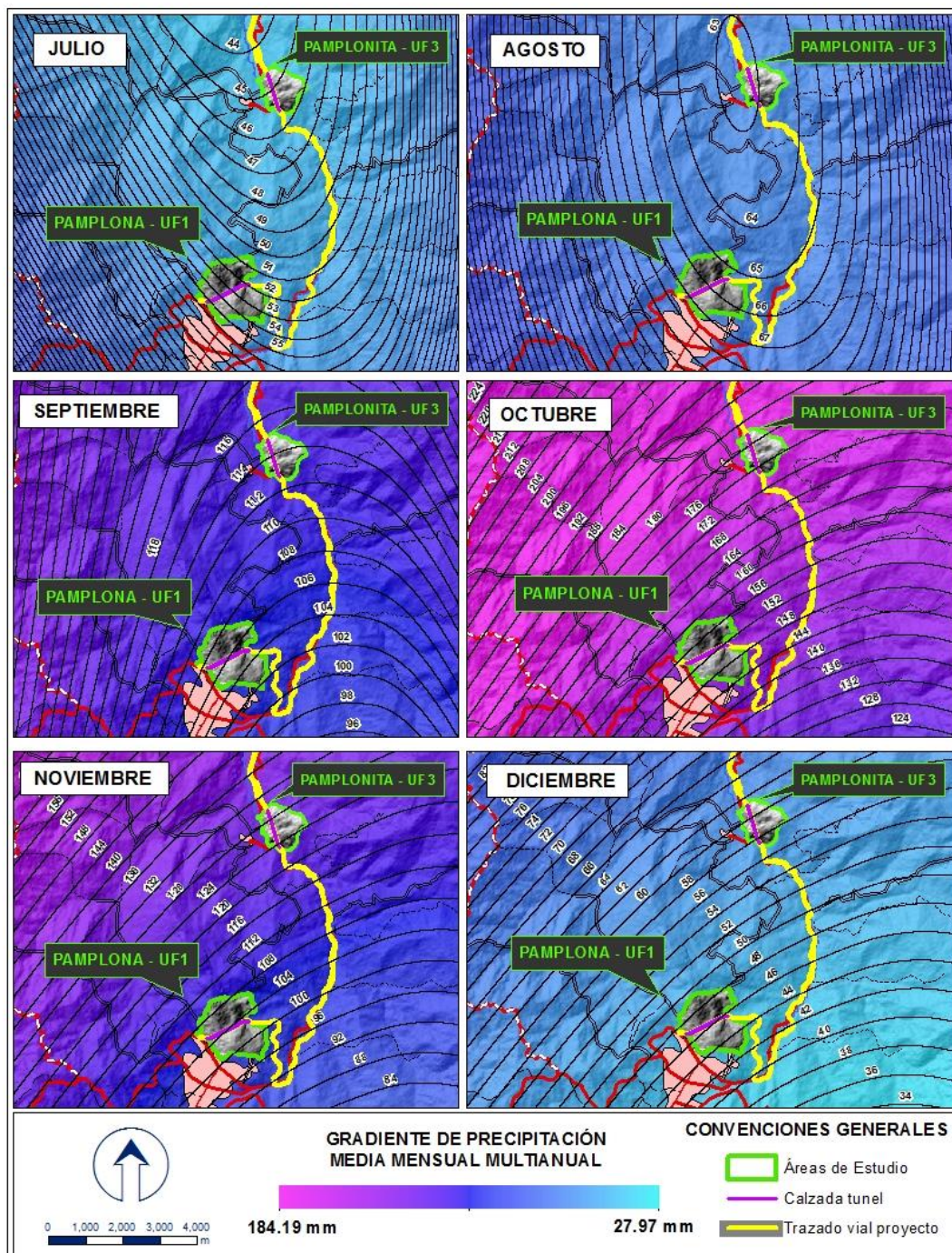
Se puede evidenciar la respuesta del cambio de temperatura en el desarrollo vertical de altitud sobre las áreas de estudio. Las condiciones del régimen oscilan entre 19.40 °C y 10.47 °C para todo el dominio espacial analizado, en esta relación altitudinal no se presentan cambios en la correlación calculada (**Figura 5-2.105**), con valores superiores al 95%.

Figura 5-2.103 Comportamiento de la Precipitación de enero a junio



Fuente: Aecom – Concol, 2018

Figura 5-2.104 Comportamiento de la Precipitación de julio a diciembre



Fuente: Aecom – Concol, 2018

Figura 5-2.105 Correlación inversa media mensual multianual

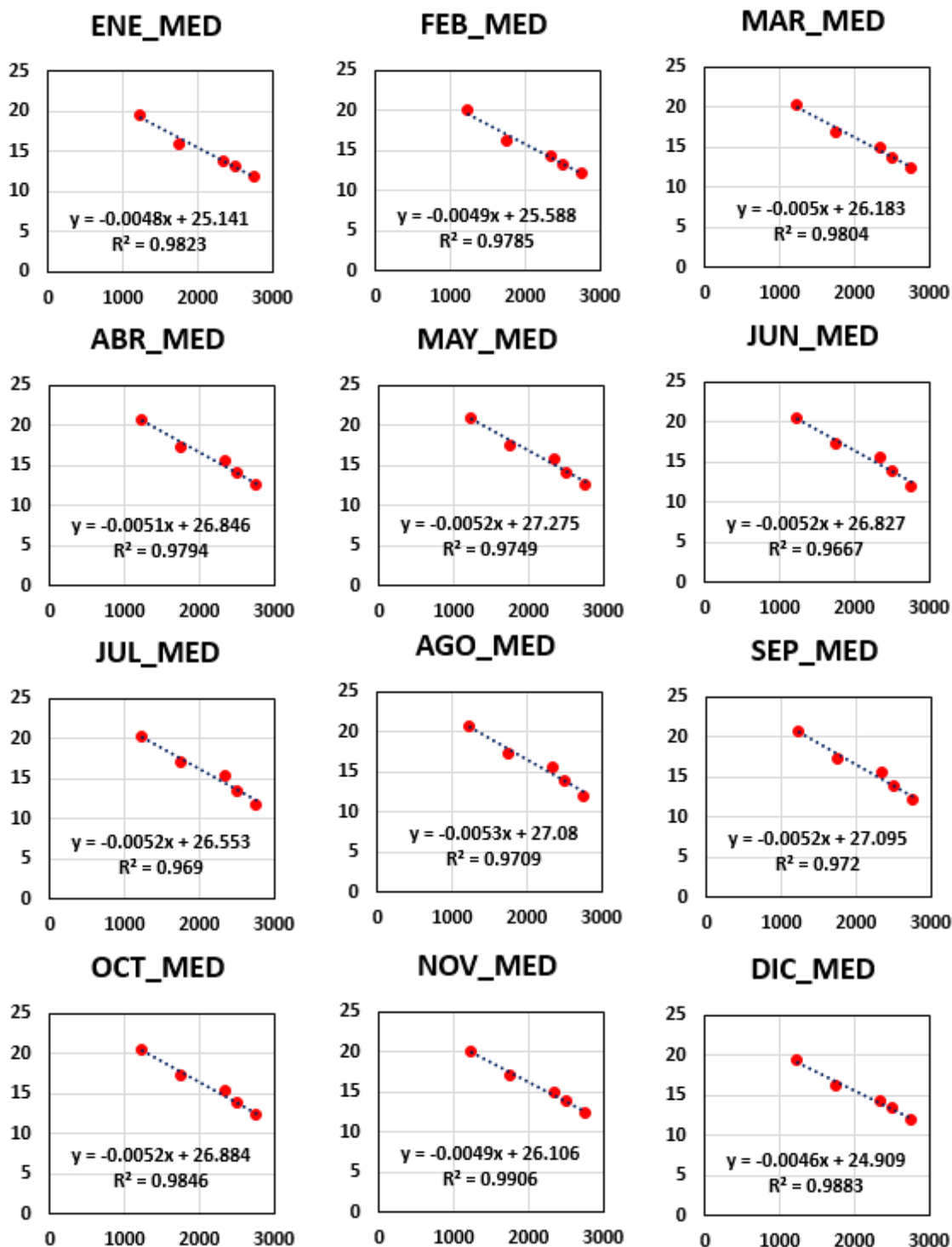
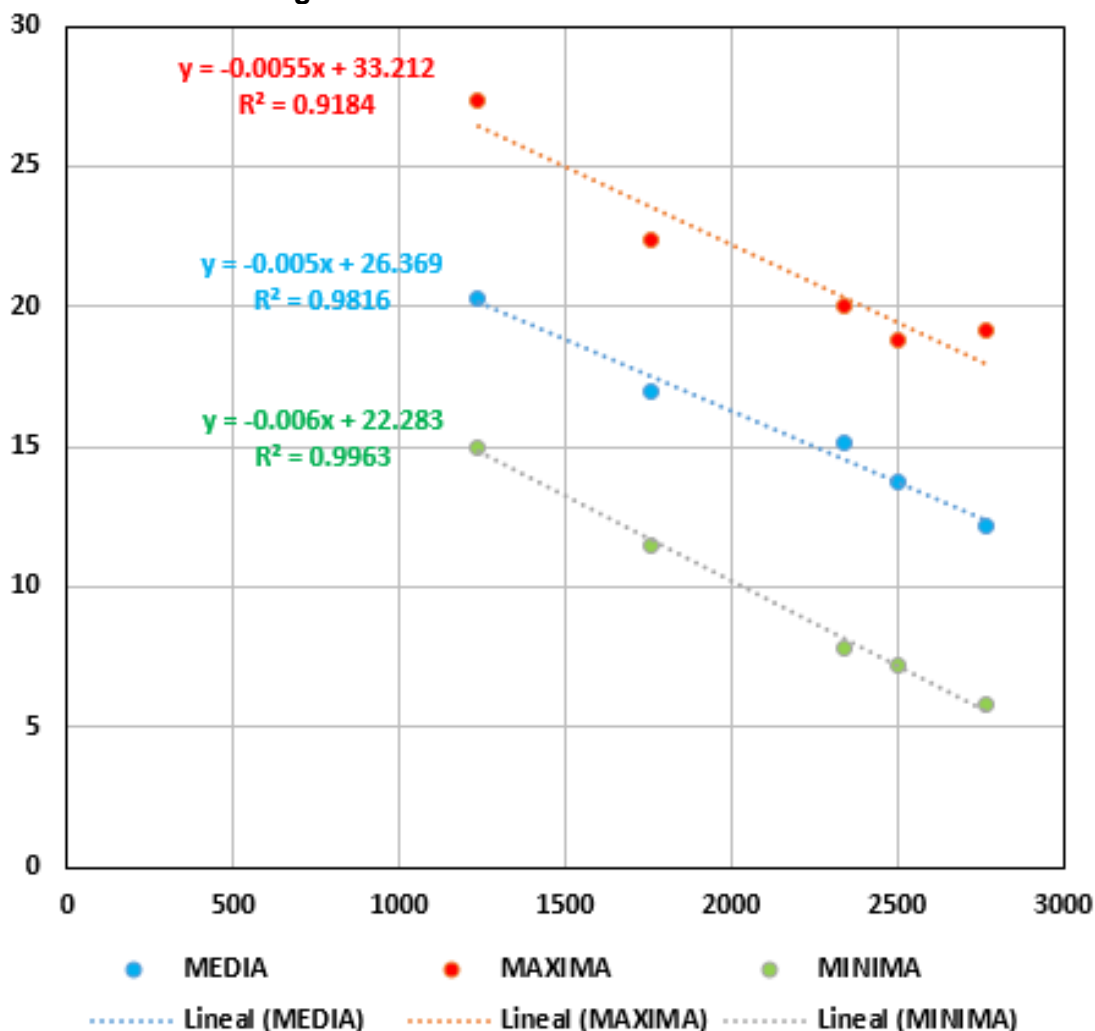


Figura 5-2.106 Correlación inversa anual

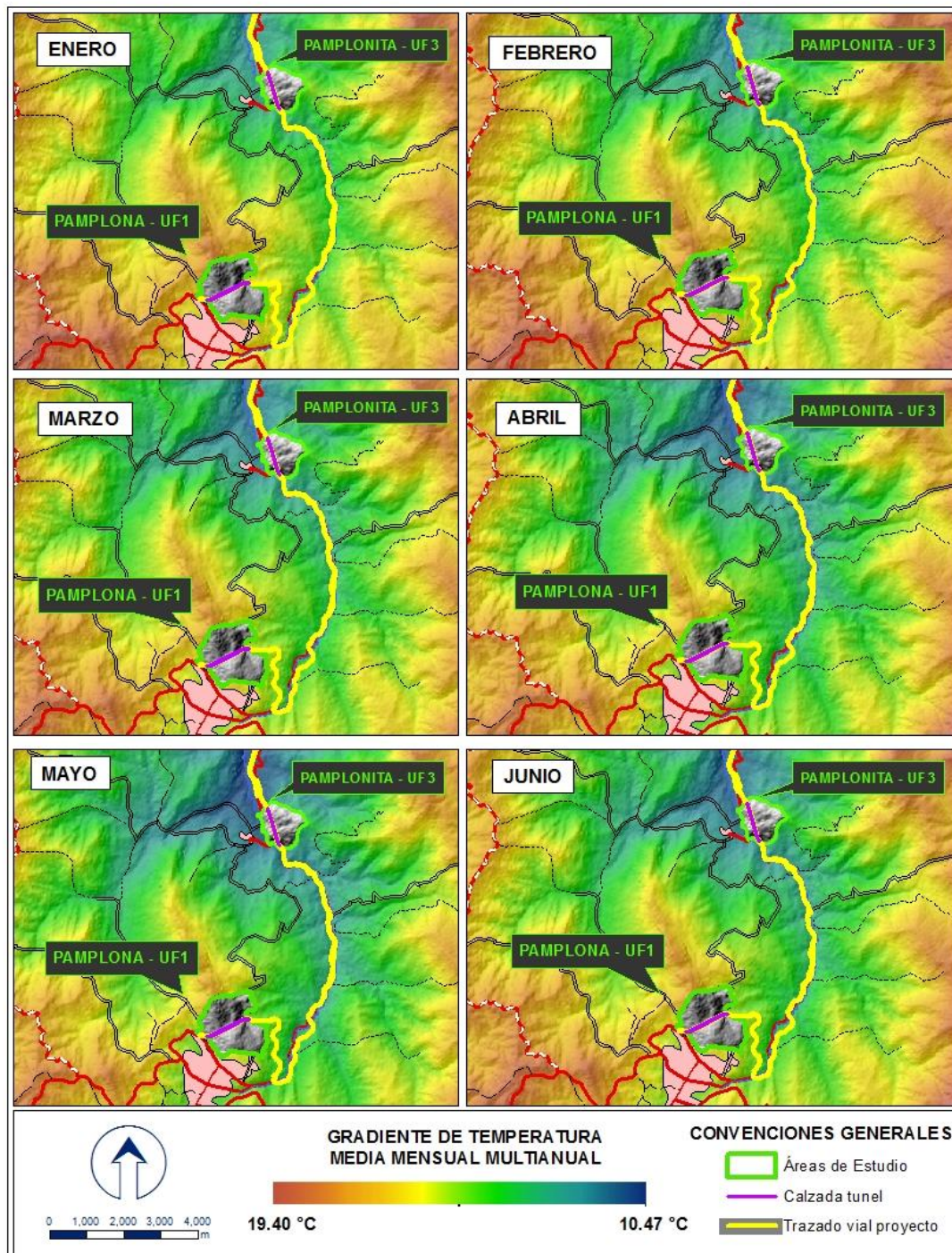


Fuente: Aecom – Concol, 2018

En la **Figura 5-2.107** se presenta el comportamiento de los primeros seis meses del régimen de temperatura, destacando una disminución difusa de esta variable en las condiciones de mayor precipitación entre los meses de Abril y Mayo debido a la relación de superiores contenidos de humedad en el ambiente, cuando se acerca Junio se empieza un incremento relacionado con el segundo periodo seco del régimen.

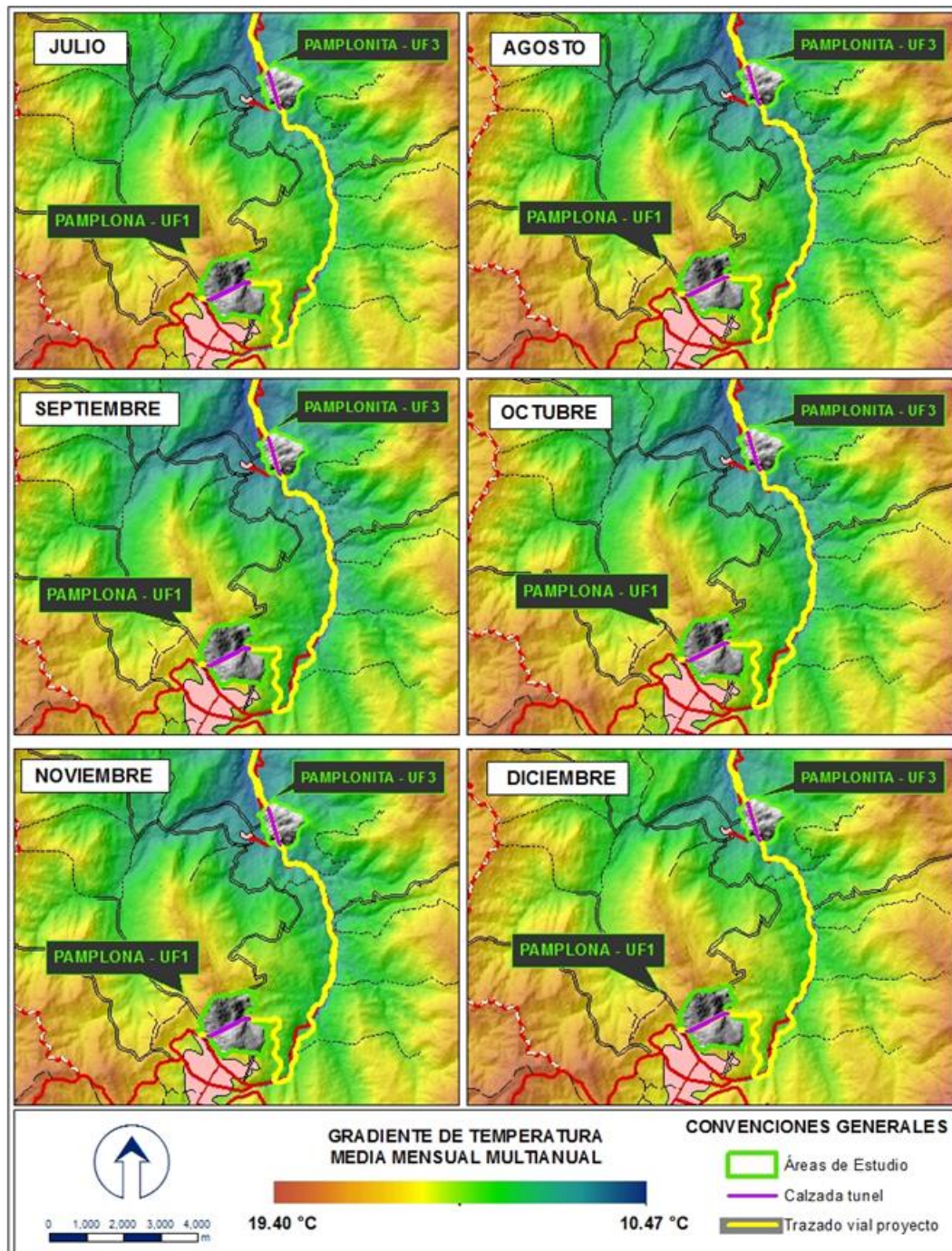
Los últimos seis meses del régimen medio mensual (**Figura 5-2.108**), permiten observar cambios más conspicuos en la temperatura, donde Julio se caracteriza por ser la mayor temperatura al igual que Enero. Comparado con Octubre en donde se registran los valores menor temperatura.

Figura 5-2.107 Comportamiento de la Temperatura de enero a junio



Fuente: Aecom – Concol, 2018

Figura 5-2.108 Comportamiento de la Temperatura de julio a diciembre

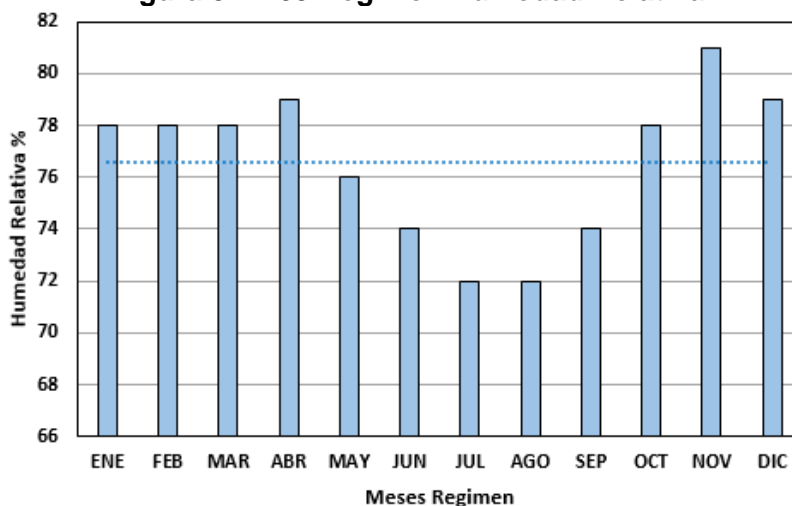


Fuente: Aecom – Concol, 2018

- **Comportamiento de la Humedad Relativa**

Las condiciones de humedad establecen relación directa con el comportamiento climático en el dominio espacial de estudio, el rango oscila entre el 72% y el 81% en valores medios de humedad. La relación de almacenaje de humedad a partir del mes de octubre, permite garantizar estas condiciones durante enero y febrero (**Figura 5-2.109**).

Figura 5-2.109 Régimen Humedad Relativa



Fuente: Aecom – Concol, 2018

Las condiciones de humedad relativa se incrementan durante el mes de marzo y el almacenaje de este primer periodo húmedo, no es suficiente para garantizar el mismo potencial en los meses de junio a septiembre, afectados por el periodo seco intermedio.

La caracterización espacial de esta variable también se encuentra desarrollada en superficies sobre las áreas de estudio, pero la similitud en el comportamiento con la temperatura permite dejar la tendencia en los regímenes presentados anteriormente, sin embargo en la **Figura 5-2.109** se observa el estado promedio del comportamiento del régimen medio mensual multianual.

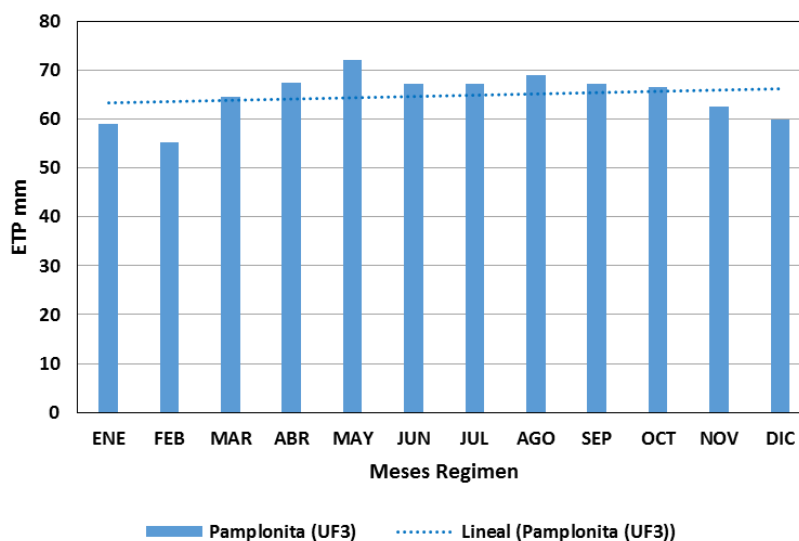
- **Comportamiento de la Evapotranspiración Potencial - ETP**

La evapotranspiración permite identificar la relación climática con los medios biológicos presentes en el área de estudio. En la **Figura 5-2.110** se presenta el comportamiento del régimen de evapotranspiración potencial en el túnel de Pamplonita de la UF3.

El túnel de Pamplonita (UF3), presenta un rango de evapotranspiración entre: 55 a 72 mm, en un rango de 1850 m.s.n.m, temperaturas un poco más altas y precipitación más alta para toda la región climática analizada (**Figura 5-2.103, Figura 5-2.104, Figura 5-2.107, Figura 5-2.108**). Sin embargo, en estas condiciones se encuentra en un clima de bajos

rendimientos de humedad general, por el aumento de las condiciones de evapotranspiración.

Figura 5-2.110 Régimen Evapotranspiración Potencial



Fuente: Aecom – Concol, 2018

La combinación de las variables climáticas, presentan un régimen orientado por el patrón bimodal de lluvias, debido a su mayor cambio entre periodos de menor a mayor humedad en el área de estudio.

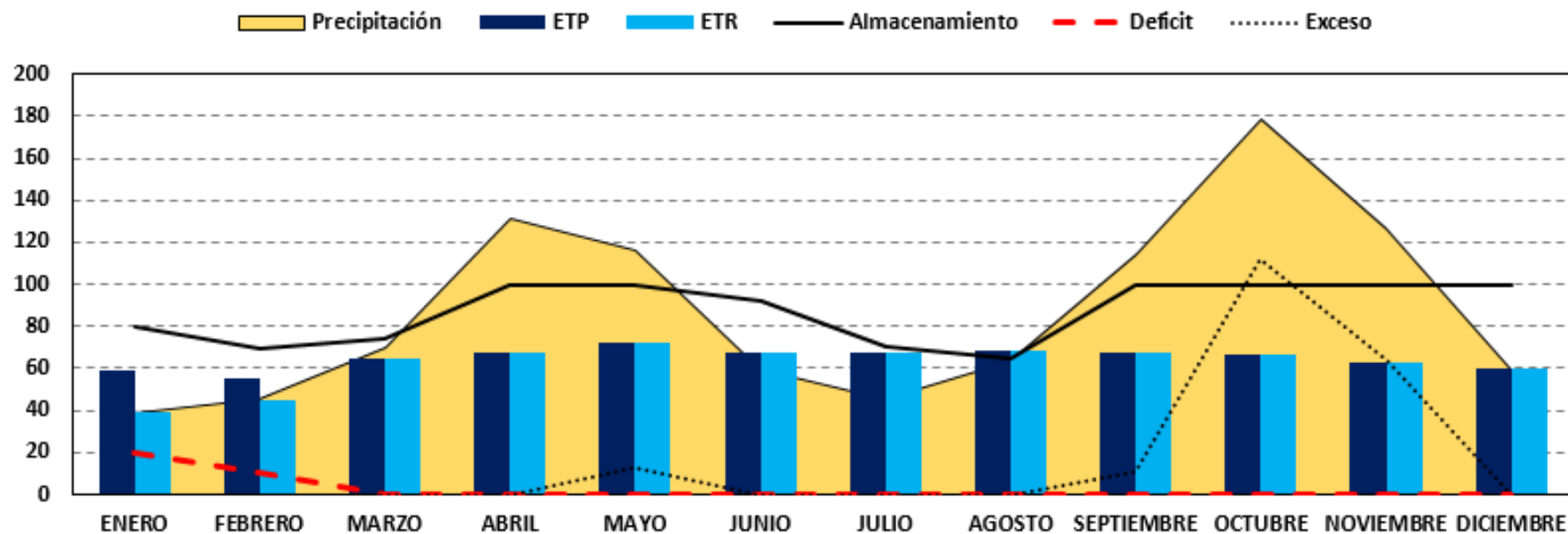
- **Balance Hidroclimatico**

En esta sección se presenta la síntesis climática de las variables presentadas anteriormente y su funcionamiento en conjunto sobre la región del área de estudio, llevando a una caracterización más sucinta y explicativa de las principales condiciones atmosféricas y del ciclo hidrológico involucrado más adelante en el proceso de recarga.

Las condiciones bimodales del régimen de precipitación son claramente observadas y su vínculo con el exceso calculado. El almacenamiento o condición de retención es homogénea a través del sistema. El déficit que se vinculan en condiciones de falta de humedad (cuando la ETR supera la ETP) no se presenta sobre las áreas de estudio indicando que la humedad siempre se encuentra en los niveles óptimos posibles según la variación de temperatura y humedad relativa.

Las condiciones de exceso se presentan sobre los periodos húmedos o de mayor precipitación, con una superior intensidad sobre los meses de septiembre a noviembre debido a la presencia de campos de lluvia de mayor intensidad, que terminan en escorrentía sobre el balance general.

Figura 5-2.111 Comportamiento Balance Hidroclimático



Fuente: Aecom – Concol, 2018

El balance hidroclimático permite verificar los estados y ajustes de la ETP calculada y llevarla a sus condiciones reales de ETR a través del régimen mensual multianual. Si las condiciones de precipitación superan la ETP calculada y el almacenamiento previo esta representara adecuadamente la ETR. Llevando los valores mensuales promedio multianuales a los reales anuales calculados para los balances de Infiltración inversa adelante presentados.

- **Escorrentía Superficial (Método Kennessey)**

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de aplicar el método Kennessey (1930), para la obtención de la escorrentía superficial en el área de estudio de la unidad funcional tres (**Ecuación 7**), destacando los comportamientos espaciales derivados de las variables utilizadas y sus clasificaciones finales.

- **Índice de Aridez de Marttne Ajustado (Ia)**

La relación de temperatura y precipitación anual y a su vez las de los meses más secos (**Ecuación 8**) generan el Índice de Aridez promedio para el área de estudio (**Tabla 5-2.27**). Indicando el uso de la columna numero 2 (**Tabla 5-2.29**) en la clasificación propuesta por la metodología Kennessey, para el área de recarga identificada en el trazado del túnel.

Tabla 5-2.29 Índice de Aridez de Marttne Ajustado para las áreas de estudio

| TÚNEL UF3 - PAMPLONITA | | | |
|------------------------|--------|-----------|------------|
| P (mm) | T (°C) | p (mm) | t (°C) |
| 1054.90 | 17.25 | 39.18 | 16.39 |
| | | Enero (*) | Enero (**) |
| Ia | 33.70 | | |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

- **Valoración de las Pendientes (CA)**

Las pendientes representan la medida morfométrica del modelo digital de terreno (DTM), la cual representa la altitud en función de la distancia. El comportamiento de la pendiente es clasificado en los criterios expuestos por la metodología Kennessey (**Tabla 5-2.27**).

El área de estudio de la UF3 – Pamplonita, distribuye sus categorías de pendiente de la siguiente manera: Un 80% para pendientes mayores al 35% y de 18 % para la categoría entre 10 y 35 %. Como se presenta en la **Figura 5-2.112**. El trazado del túnel se encuentra en medio de una ladera en la cual se concentran las altas pendientes, tan solo el 2% del área de estudio presenta pendientes inferiores al 10 %.

- Valoración de la Permeabilidad (CP)

Las condiciones de permeabilidad son ajustadas a partir de las propiedades hidrogeológicas de las unidades litológicas como se relaciona en la **Tabla 5-2.30**. La permeabilidad se distribuye entre valores de 0.08 a 0.22.

La UF3 – Pamplonita, tiene una mayor representatividad de la formación los Cuervos con un 46% de ocurrencia, sobre la sección central de la ladera principal en el área de estudio (**Figura 5-2.113**), seguido la formación Barco (24%), la formación Girón (12%) y la formación Colon-Mito Juan con el 3.5%.

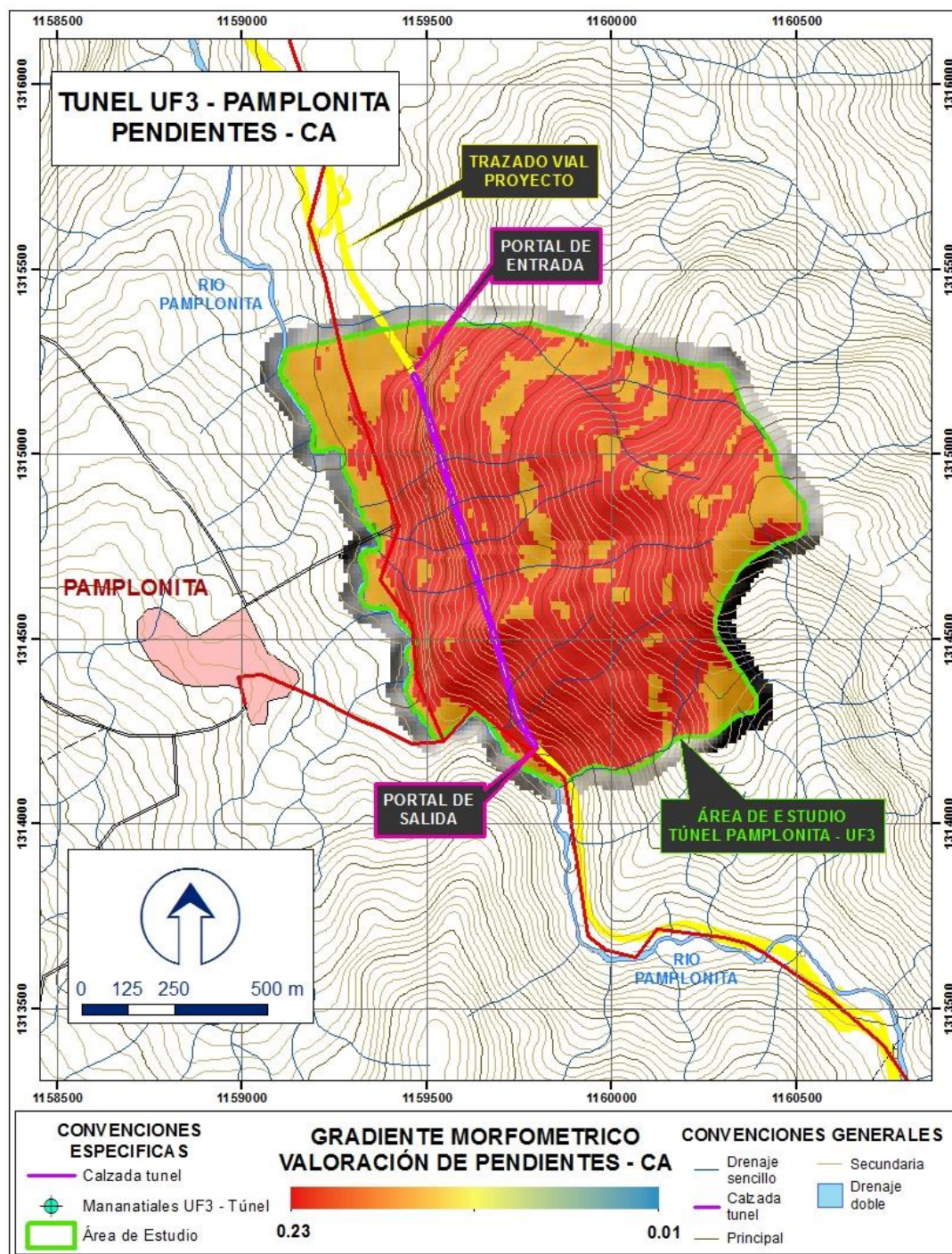
El 14.5% restante se encuentra asociado a los depósitos fluviales del Río Pamplonita en la margen occidental del área de estudio. En la **Tabla 5-2.30**, se relaciona la clasificación de permeabilidad de cada una de estas unidades.

Tabla 5-2.30 Clasificación de Permeabilidad en la Zona de Estudio de acuerdo con método Kennessy

| AREA DE ESTUDIO | FORMACIÓN GEOLOGICA | GRADO DE PERMEABILIDAD | CP |
|------------------------|---------------------------|------------------------|------|
| TÚNEL UF3 - PAMPLONITA | Abanico terraza, nivel 2 | Medio - Bueno | 0.08 |
| | Depósitos aluviales | Medio - Bueno | 0.08 |
| | Deposito Coluvial | Medio - Bueno | 0.08 |
| | Formación Colon-Mito Juan | Bajo | 0.22 |
| | Formación Girón | Bajo | 0.16 |
| | Formación Los Cuervos | Bajo | 0.22 |
| | Formación Barco | Bajo | 0.14 |

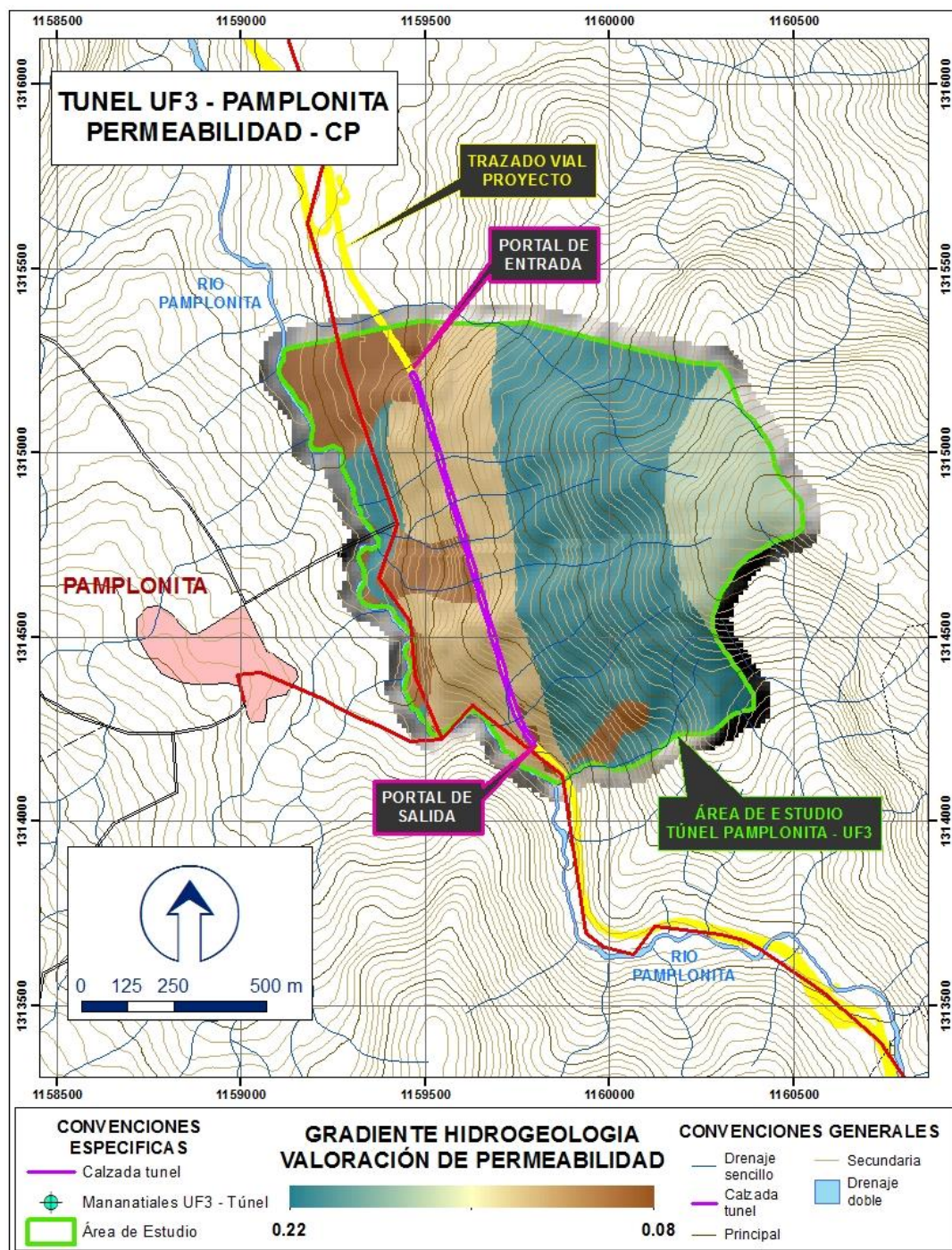
Fuente: Aecom – Concol, 2018

Figura 5-2.112 Clasificación de Pendientes (CA) – Pamplonita UF3



Fuente: Aecom – Concol, 2018

Figura 5-2.113 Clasificación de Permeabilidad (CP) – Pamplonita UF3



Fuente: Aecom – Concol, 2018

– Valoración de la Cobertura Vegetal y Uso del Suelo

Los elementos de cobertura vegetal y uso del suelo se actualizaron para el área de estudio basado en sus condiciones fisionómicas y desarrollo estructural a escala 1:5000. De esta manera se ha elaborado una relación directa con la clasificación propuesta en la metodología Kennessy como se muestra en la **Tabla 5-2.31**.

Tabla 5-2.31 Clasificación cobertura vegetal y uso del suelo en las zonas de estudio

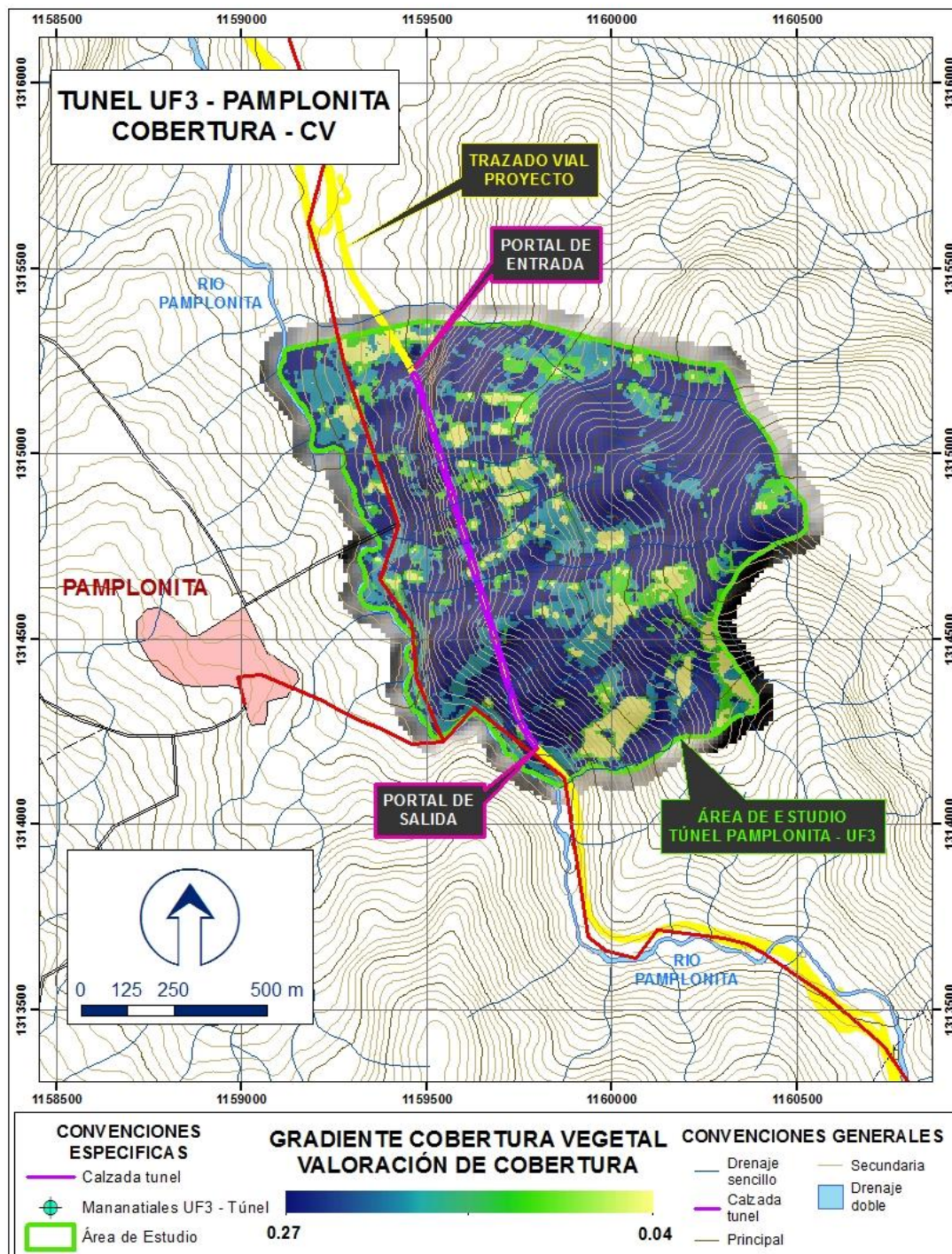
| CLASE CV | COBERTURA VEGETAL Y USO DEL SUELO | CV | TÚNEL UF3 - PAMPLONITA | |
|-----------------------------------|--------------------------------------|------|---------------------------|-------|
| | | | ha | % |
| Roca Desnuda | Suelo desnudo | 0.27 | 8.73 | 7.43 |
| Pastizales | Pastos Limpios | 0.18 | 11.27 | 9.58 |
| Tierras de cultivos y arbustos | Arbustos | 0.08 | 23.83 | 20.25 |
| Bosque de árboles altos | Vegetación Secundaria | 0.04 | 73.82 | 62.74 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

La vegetación secundaria (Bosque de árboles altos) representa la mayor participación en la UF3 – Pamplonita, con 63% de superficie (**Figura 5-2.114**). Los cuales se distribuyen a través de toda la ladera principal en el área de estudio, cubriendo de occidente a oriente, en pequeñas franjas asociadas a las pequeñas corrientes.

Las formaciones vegetales de baja estructura como los arbustos se distribuyen en un 20% y el suelo desnudo en 7% los cuales permiten una mayor escorrentía en los eventos de precipitación, debido a su baja capacidad de retención.

Figura 5-2.114 Clasificación de Cobertura Vegetal (CV) – Pamplonita UF3.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

- Coeficiente de Escorrentía – CK

Se obtiene el resultado del coeficiente de escorrentía a partir de la integración lineal (**Ecuación 7**) de las pendientes (CA), permeabilidad (CP) y cobertura vegetal (CV) con lo cual se registra el coeficiente de escorrentía distribuido espacialmente a través del área de estudio como se muestra en la **Tabla 5-2.32**.

El coeficiente de escorrentía promedio para el túnel de Pamplonita – UF3, registra un valor de 0.46 a través del área de estudio, debido a las pendientes altas predominantes, con lo cual se promueve una alta escorrentía. Sin embargo, se encuentran valores bajos sobre el sistema fluvial del Río Pamplonita, en el costado occidental del área de estudio (**Figura 5-2.115**).

- Escorrentía Superficial – R

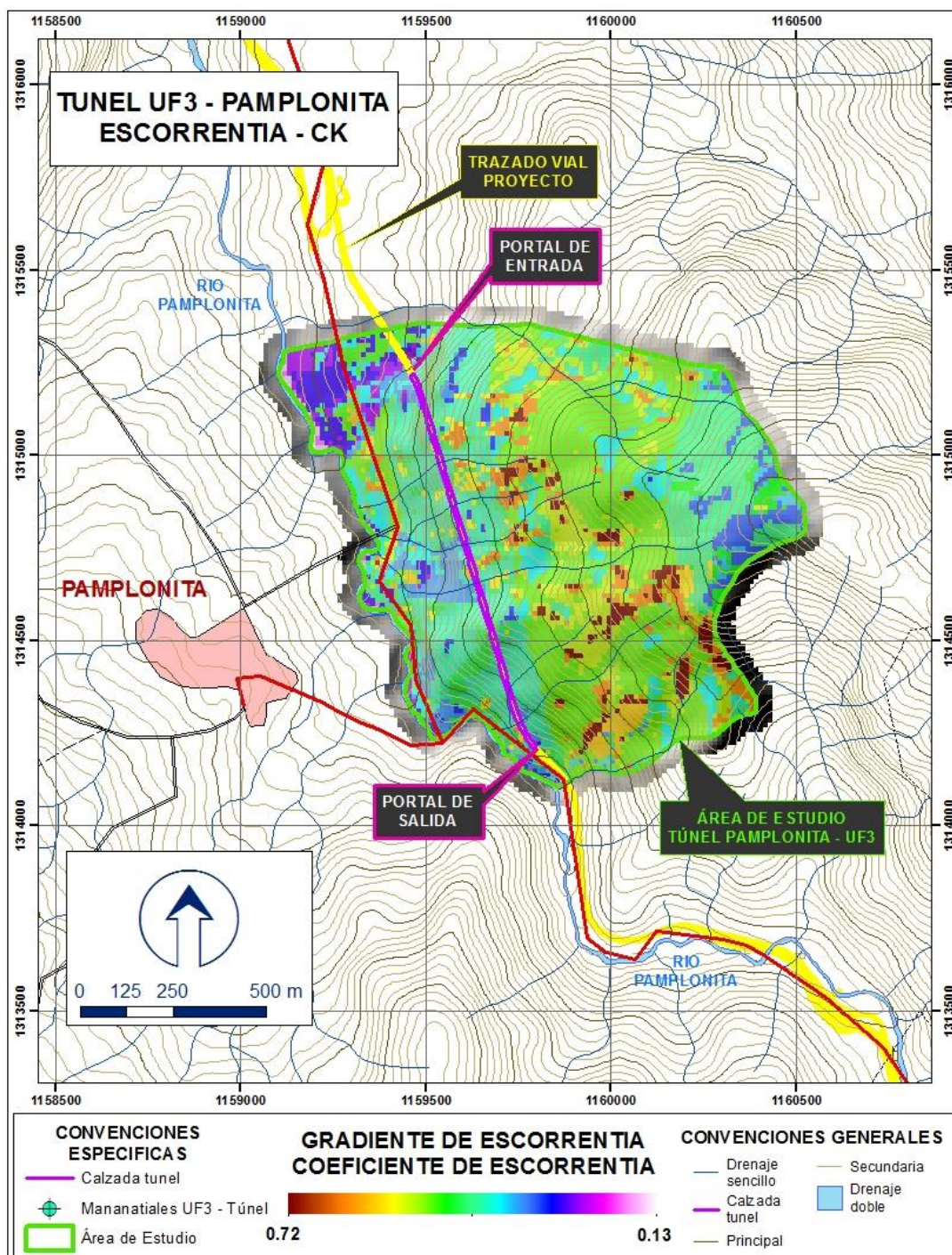
Las condiciones de escorrentía se obtienen a partir de la multiplicación de la precipitación anual sobre el coeficiente de escorrentía obtenido con la metodología Kennessey (**Ecuación 5**). En la **Tabla 5-2.32** se presentan las condiciones mínimas, media y máxima de escorrentía superficial obtenida para el área de estudio.

Tabla 5-2.32 Escorrentía Superficial – Régimen Anual

| VALOR | Túnel de Pamplonita UF3 |
|-------|-------------------------|
| | (mm/año) |
| Max | 751.93 |
| Med | 379.03 |
| Min | 237.32 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

Figura 5-2.115 Condición de Escorrentía Superficial (CK) – Pamplonita UF3



Fuente: Aecom – Concol, 2018

– Balance Hidrogeológico

El balance hidrogeológico planteado de manera inversa en el cálculo de la infiltración (**Ecuación 10**), permite obtener los valores de infiltración sobre el área de estudio.

El régimen de este comportamiento de infiltración es presentado en la **Tabla 5-2.33**.

Tabla 5-2.33 Régimen de Infiltración Anual

| VALOR | Túnel de Pamplonita UF3 |
|-------|-------------------------|
| | (mm/año) |
| Max | 280.12 |
| Med | 59.22 |
| Min | 0 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

Las condiciones de infiltración mínima responden a periodos de sequía marcados sobre el área de estudio, lo cual influye de manera drástica sobre los valores de infiltración que se pueden obtener en el balance inverso, llegando a una infiltración nula en el balance.

Acompañado por pendientes altas predominantes, que aumentan las condiciones de escorrentía a través de los tres escenarios evaluados.

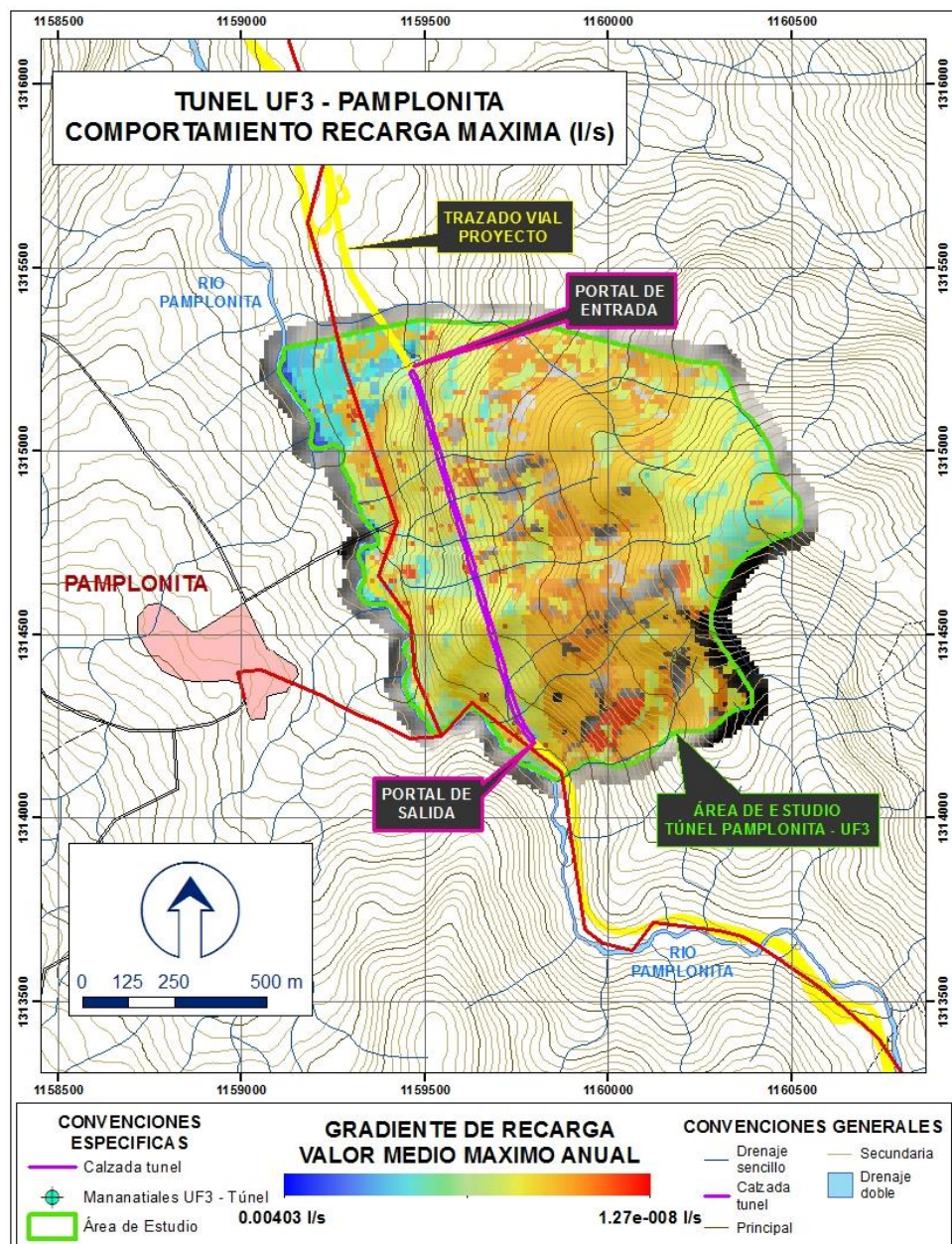
– Valoración de la Recarga

En este ítem se presenta el comportamiento final y síntesis del balance inverso hidrogeológico con el cual se comparan las condiciones de régimen anual máximas, medias y mínimas de la recarga sobre el área de estudio.

En las **Figura 5-2.116, Figura 5-2.117, Figura 5-2.118**, se observa el comportamiento final de la recarga (**Ecuación 11**) y su balance hidrogeológico anual a partir de los análisis climáticos expuestos.

En el último escenario de recarga (régimen mínimo de recarga, **Figura 5-2.118**), se presenta el área de estudio sin ninguna superficie de recarga y se observa la topografía y el área de estudio únicamente, como una media de comparación con los dos escenarios donde si se presenta recarga (escenario de máxima y media recarga).

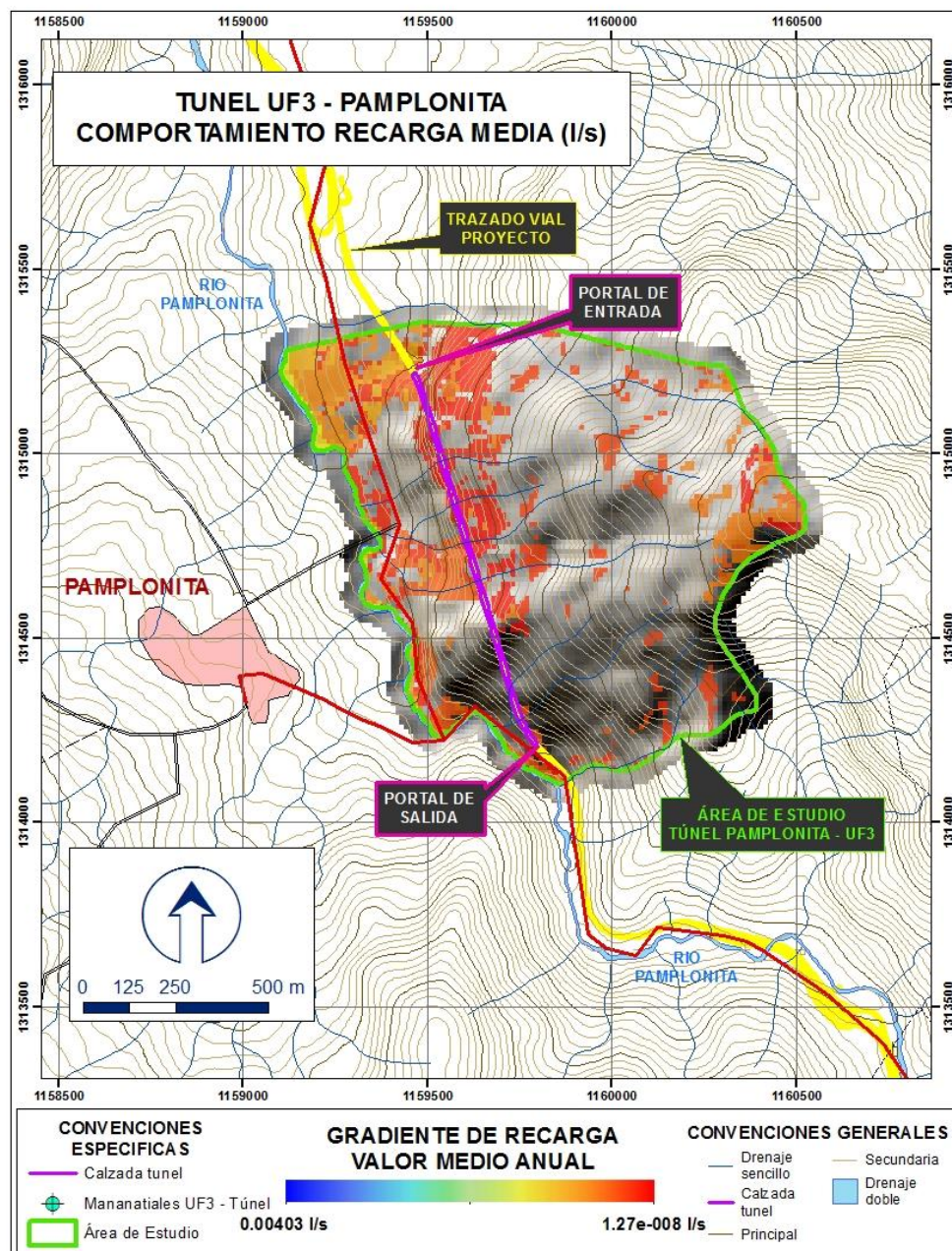
Figura 5-2.116 Régimen de Recarga Máxima – Túnel de Pamplonita UF3



| P | ETR | R | I |
|---------|--------|--------|--------|
| mm/año | mm/año | mm/año | mm/año |
| 1720.92 | 688.87 | 751.93 | 280.12 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

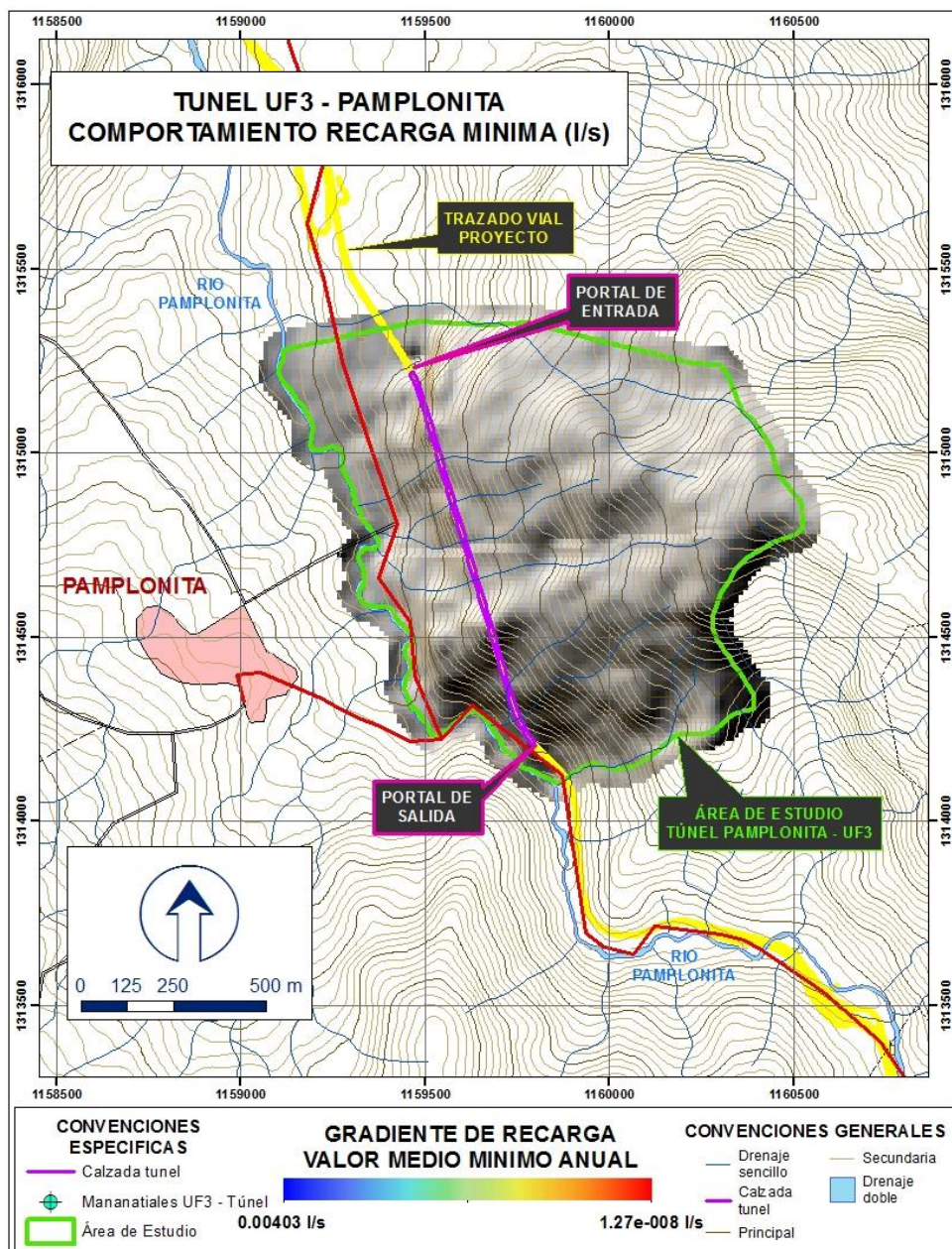
Figura 5-2.117 Régimen de Recarga Media – Túnel de Pamplonita UF3



| P | ETR | R | I |
|---------|--------|--------|--------|
| mm/año | mm/año | mm/año | mm/año |
| 1062.51 | 624.26 | 379.03 | 59.22 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

Figura 5-2.118 Régimen de Recarga Mínima – Túnel de Pamplonita UF3



| P | ETR | R | I |
|--------|--------|--------|--------|
| mm/año | mm/año | mm/año | mm/año |
| 522.2 | 284.88 | 237.32 | 0 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

5.1.8.13.4 Caracterización hidrodinámica de los terrenos y rocas interceptados por la excavación del túnel de Pamplonita.

La permeabilidad media de los complejos hidrogeológicos presentes en la zona de estudio de la UF3-4-5, así como aquellos interceptados por el túnel de Pamplonita, fue esquematizada utilizando la clasificación de la 'Association Française des Travaux En Souterrain' (AFTES), propuesta como una norma en 1992. Se ha seleccionado esta clasificación porque goza de amplia aceptación en la comunidad científica tanto en Europa como en América del Sur, además de representar coherentemente los rangos de permeabilidad esperados para las unidades geológicas presentes en la zona de estudio. Esta clasificación establece cuatro clases de permeabilidad crecientes, desde K1 hasta K4, como se ilustra en la **Tabla 5-2.34**.

Tabla 5-2.34. Descripción de la permeabilidad de acuerdo con la norma AFTES

| Clase | Permeabilidad en m/s | Descripción |
|-------|-----------------------|--------------------|
| K1 | $< 10^{-8}$ | de muy baja a baja |
| K2 | 10^{-8} a 10^{-6} | de baja a media |
| K3 | 10^{-6} a 10^{-4} | de media a alta |
| K4 | $> 10^{-4}$ | de alta a muy alta |

Fuente: AFTES 1992

Esta clasificación no es válida para roca cárstica, para las cuales es necesario utilizar una valoración específica. La permeabilidad de los macizos rocosos es anisotrópica y el flujo se da preferencialmente a lo largo de las discontinuidades.

En relación con la nota adjunta a la **Tabla 5-2.34**, se aclara que en la zona de estudio si bien es cierto se tiene presencia de rocas calizas, esto no constituye por sí mismo un ambiente cárstico propiamente dicho. Estos ambientes particulares tienen características muy claras que los identifican como: formación de dolinas, canales subterráneos, grutas, afloramientos de agua intermitentes de gran caudal generalmente ubicados en la parte baja del valle aluvial; condiciones que no fueron observadas en la zona de estudio. No obstante, si es posible encontrar un aumento de la permeabilidad debido a la disolución de las fracturas presentes en los materiales calcáreos, lo que podría denominarse como un pseudokarst. Por este hecho, la clasificación de la permeabilidad utilizando la propuesta de la AFTES es válida y se encuentra justificada su aplicación para los materiales presentes en la zona de estudio.

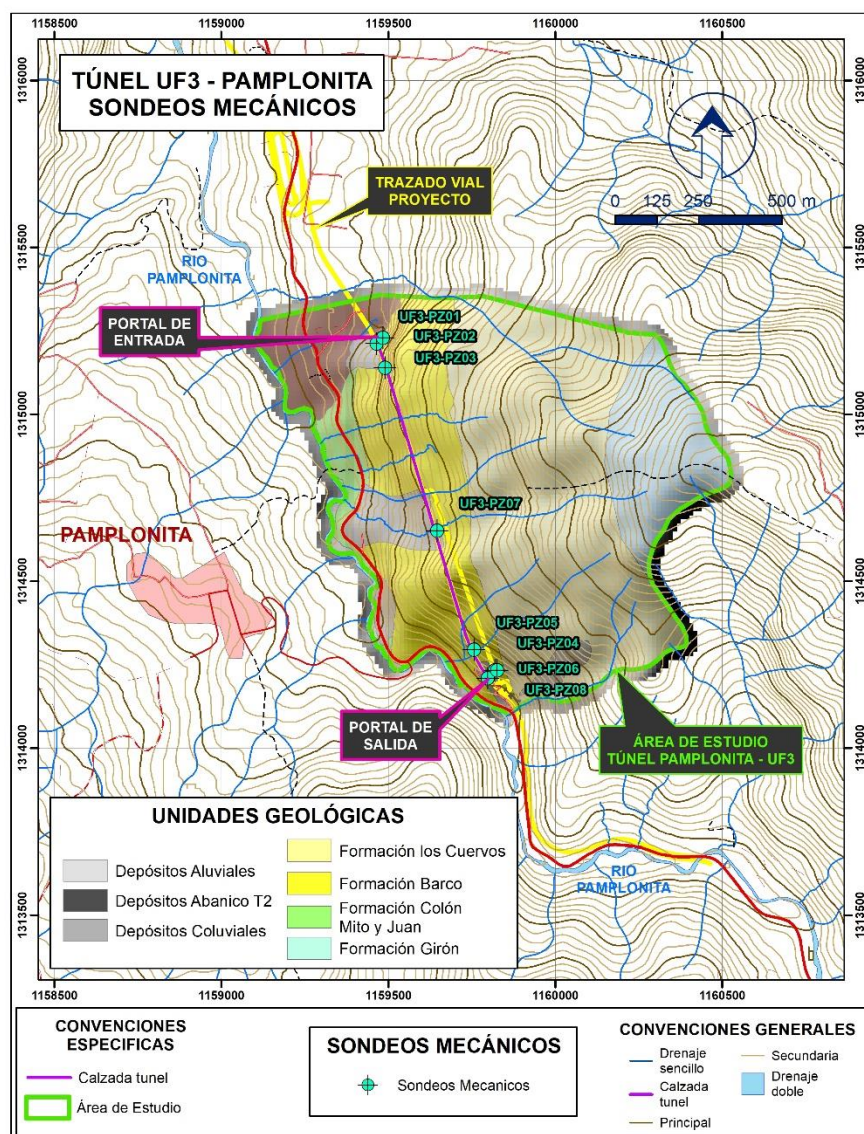
- Definición del grado de permeabilidad del macizo rocoso**

A lo largo del trazado del túnel se han llevado a cabo varios sondeos con recuperación continua de núcleos que, además de ser utilizados como piezómetros, sirvieron para la ejecución de pruebas hidráulicas.

De esta manera ha sido posible valorar el grado de permeabilidad del macizo rocoso a

diferentes niveles de profundidad incluyendo la cota del túnel. En la **Figura 5-2.119** se representan en planta la ubicación de los sondeos respecto al eje del túnel. Se observa que, aunque a lo largo del trazado la densidad de las investigaciones es muy buena, no sucede lo mismo para el resto de la ladera, a cada lado de su eje. Sin embargo, tomando como base los resultados obtenidos y el modelo geológico de referencia, se ha caracterizado en términos hidrogeológicos el área completa de estudio del túnel de Pamplonita.

Figura 5-2.119 Ubicación de los sondeos realizados sobre la traza del túnel de Pamplonita.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

La posición de los sondeos realizados en el eje del túnel se reporta en la sección longitudinal del trazado. Los sectores donde se ejecutaron las pruebas de permeabilidad también fueron localizados con el objeto de valorar su incidencia en función de la cota de la excavación (**Figura 5-2.120**). En la misma sección es posible tener una primera interpolación de la carga piezométrica por encima del túnel. Se observa que esta es por lo general baja aún en aquellos sectores donde se tienen coberturas mayores (**Figura 5-2.120**).

En la **Tabla 5-2.35** se reporta un análisis más detallado de todos los valores de permeabilidad medidos en el sector del túnel de Pamplonita, cuyo trazado intercepta una secuencia constituida por horizontes prevalentemente arcillosos (arcillolitas) y arenosos (areniscas cuarzosas de grano fino), alternados con niveles intermedios (areniscas+arcillolitas). Del análisis de los datos se evidencia que el campo de variación de la permeabilidad no aporta una sólida diferencia entre los diferentes litotipos. En este sentido se observa que los valores medios para los litotipos identificados se ubican en el mismo intervalo de variación ($1E-6$ m/s a $1E-7$ m/s). Se observa además que para los litotipos predominantemente arcillosos, en condiciones de poca fracturación, se obtienen valores puntuales de muy baja permeabilidad del orden de $1,1E-9$ m/s.

Por lo tanto, si, por un lado, se considera que dadas las condiciones de fracturación standard del macizo rocoso no es influyente hacer una distinción hidrodinámica entre los diferentes litotipos, por otra parte, para condiciones especiales de intensa fracturación, las areniscas presentan un grado de permeabilidad más elevado respecto a las arcillolitas probablemente relacionado con la deformación de tipo frágil, llegando a valores puntuales del orden de $7,1E-5$. En aquellos tramos en los cuales no se distingue un predominio de un litotipo sobre el otro, el comportamiento hidrodinámico de las arcillolitas predomina sobre aquellos de las areniscas.

No obstante, con el objeto de definir la variación de la permeabilidad a lo largo del eje del túnel, se han considerado dos subunidades hidrogeológicas, una relacionada con las areniscas y otra con las arcillolitas (ver **Tabla 5-2.37**). Los datos relacionados con los sectores en los cuales no domina un litotipo sobre el otro, toman en cuenta valores de permeabilidad intermedios entre los dos litotipos.

El intervalo de variación de la permeabilidad se ha definido con base en los litotipos que conforman la Fm. Barco en la cual se excavará el túnel de Pamplonita. Para cada subunidad hidrogeológica se definió el grado de fracturación que juega un rol fundamental en el comportamiento hidrodinámico del macizo rocoso.

El grado de fracturación del macizo rocoso se definió con base en la clasificación del índice RMR de Beniaowski corregido, descrito en el perfil geológico-geotécnico disponible. A cada clase de RMR se le ha atribuido en función del litotipo un valor de permeabilidad derivado del análisis estadístico de los valores deducidos de las pruebas hidráulicas ejecutadas en las perforaciones mecánicas realizadas, tal como se muestra en la **Tabla 5-2.36**.

Figura 5-2.120. Sección longitudinal del túnel de Pamplonita con indicación de los sondeos realizados, la profundidad alcanzada, los valores de permeabilidad obtenidos en los tramos de prueba y los niveles piezométricos medidos

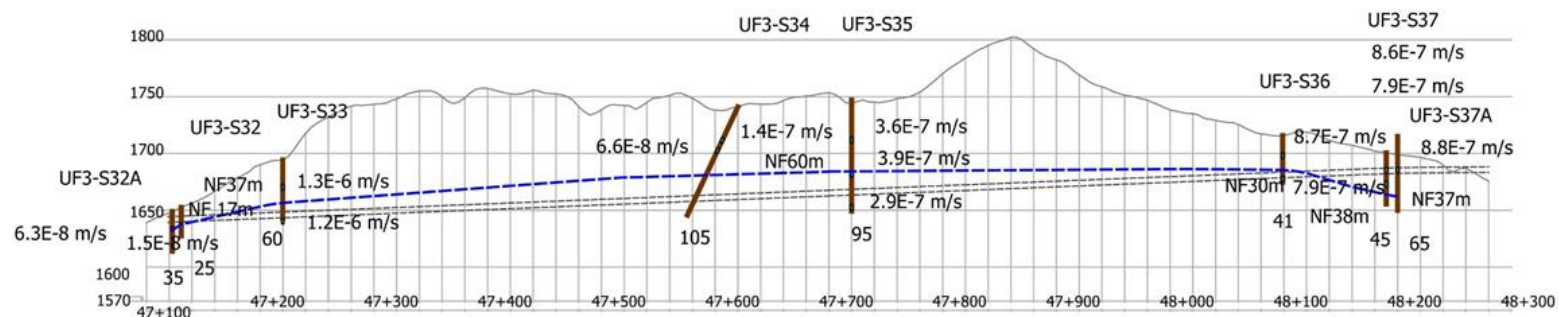
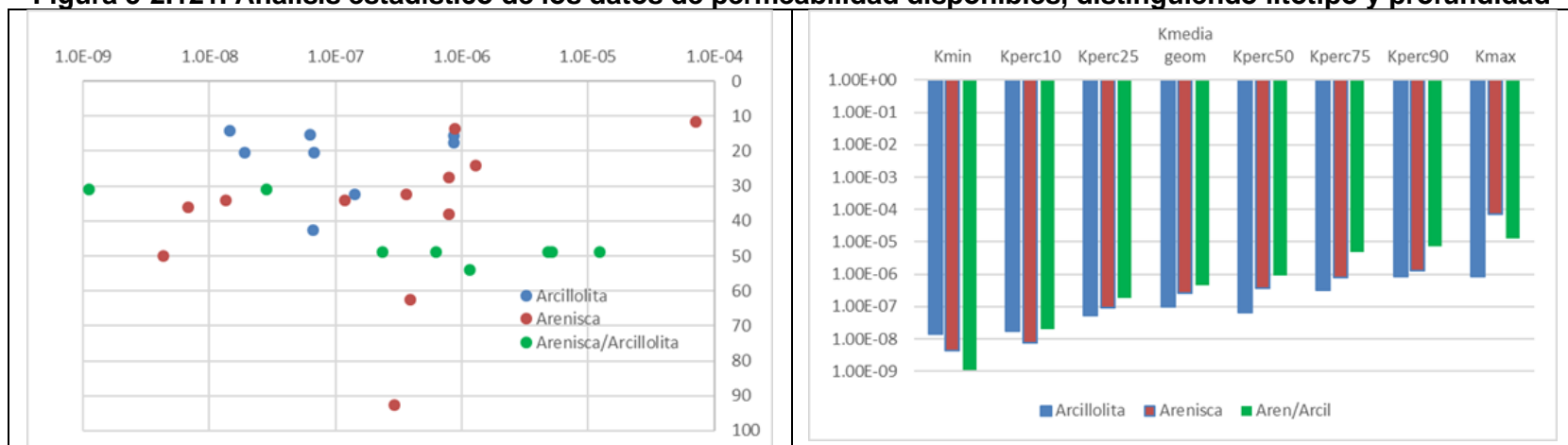


Figura 5-2.121. Análisis estadístico de los datos de permeabilidad disponibles, distinguiendo litotipo y profundidad



Fuente: Aecom – Concol, 2018


| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA |
| Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta | |

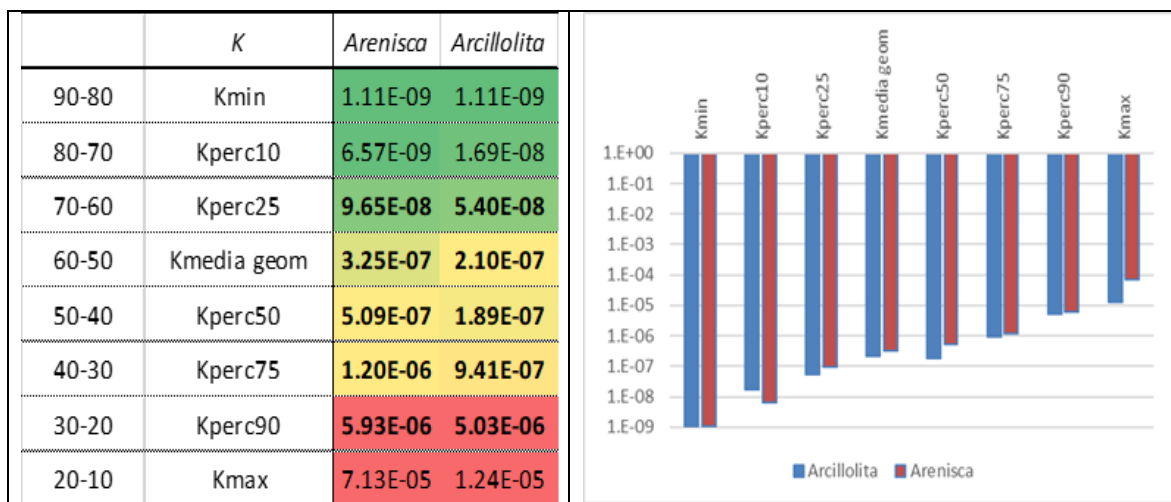
Tabla 5-2.35. Datos de caracterización hidrogeológica de las unidades geológicas interceptadas por el túnel (información primaria).

| Sondeo código | PK (--) | Tramo | | | Prueba tipo | K m/s | Geología (--) | Litología (--) | Fract. (--) | RQD min (--) | Meteor. (--) |
|---------------|------------|-------|------|-----|-------------|---------|---------------|------------------------------|-------------|--------------|--------------|
| desde | hasta | m | | | | | | | | | |
| UF3-S32 | K47+130,63 | 13,5 | 15 | 1,5 | Lefranc | 1,5E-08 | Fm de Barco | Arcillolita | M-H | 40 | W3 |
| UF3-S32A | K47+122,80 | 13,5 | 17,2 | 3,7 | Lefranc | 6,3E-08 | Fm de Barco | Arcillolita | M-H | 50 | W4 |
| UF3-S32A | K47+122,80 | 6 | 35 | 29 | Slug | 1,9E-08 | Fm de Barco | Arcillolita | - | - | - |
| UF3-S32A | K47+122,80 | 6 | 35 | 29 | Slug | 6,8E-08 | Fm de Barco | Arcillolita | - | - | - |
| UF3-S34 | K47+606,11 | 30 | 35 | 5 | Lugeon | 1,4E-07 | Fm de Barco | Arcillolita | H | 0 | W4 |
| UF3-S34 | K47+601,89 | 40 | 45 | 5 | Lugeon | 6,6E-08 | Fm de Barco | Arcillolita | H | 0 | W4 |
| UF3-S37 | K48+190,00 | 13 | 18 | 5 | Lugeon | 8,6E-07 | Fm de Barco | Arcillolita | H | 10 | W2 |
| UF3-S36 | K48+098,96 | 15 | 20 | 5 | Lugeon | 8,7E-07 | Fm de Barco | Arcillolita/Breccia de falla | M | 50 | W2 |
| UF3-S33 | K47+219,86 | 21,5 | 26,5 | 5 | Lugeon | 1,3E-06 | Fm de Barco | Arenisca | M | 20 | W2 |
| UF3-S35 | K47+720,00 | 30 | 35 | 5 | Lugeon | 3,6E-07 | Fm de Barco | Arenisca | M | 60 | W2 |
| UF3-S35 | K47+720,00 | 60 | 65 | 5 | Lugeon | 3,9E-07 | Fm de Barco | Arenisca | M | 70 | W2 |
| UF3-S35 | K47+720,00 | 90 | 95 | 5 | Lugeon | 2,9E-07 | Fm de Barco | Arenisca | H | 0 | W2 |
| UF3-S35 | K47+720,00 | 40 | 60 | 20 | Slug | 4,3E-09 | Fm de Barco | Arenisca | - | - | - |
| UF3-S36 | K48+098,96 | 35,5 | 40,5 | 5 | Lugeon | 7,9E-07 | Fm de Barco | Arenisca | M | 100 | W1 |
| UF3-S36 | K48+098,96 | 28 | 40 | 12 | Slug | 1,3E-08 | Fm de Barco | Arenisca | - | - | - |
| UF3-S36 | K48+098,96 | 28 | 40 | 12 | Slug | 1,2E-07 | Fm de Barco | Arenisca | - | - | - |
| UF3-S37 | K48+190,00 | 25 | 30 | 5 | Lugeon | 7,9E-07 | Fm de Barco | Arenisca | M-H | 30 | W2 |
| UF3-S37 | K48+190,00 | 27 | 45 | 18 | Slug | 6,8E-09 | Fm de Barco | Arenisca | - | - | - |
| UF3-S37A | K48+200,00 | 10 | 13 | 3 | Lefranc | 7,1E-05 | Fm de Barco | Arenisca | M-H | 30 | W3 |
| UF3-S37A | K48+200,00 | 11 | 16 | 5 | Lugeon | 8,8E-07 | Fm de Barco | Arenisca | H | 10 | W2 |
| UF3-S33 | K47+219,86 | 51,5 | 56,5 | 5 | Lugeon | 1,2E-06 | Fm de Barco | Arenisca/Arcillolita | M-H | 50 | W2 |
| UF3-S33 | K47+219,86 | 6 | 56 | 50 | Slug | 2,8E-08 | Fm de Barco | Arenisca/Arcillolita | - | - | - |
| UF3-S33 | K47+219,86 | 6 | 56 | 50 | Slug | 1,1E-09 | Fm de Barco | Arenisca/Arcillolita | - | - | - |
| UF3-S37A | K48+200,00 | 38 | 60 | 22 | Slug | 6,2E-07 | Fm de Barco | Arenisca/Arcillolita | - | - | - |
| UF3-S37A | K48+200,00 | 38 | 60 | 22 | Slug | 2,4E-07 | Fm de Barco | Arenisca/Arcillolita | - | - | - |
| UF3-S37A | K48+200,00 | 38 | 60 | 22 | Bombeo | 1,2E-05 | Fm de Barco | Arenisca/Arcillolita | - | - | - |
| UF3-S37A | K48+200,00 | 38 | 60 | 22 | Bombeo | 5,2E-06 | Fm de Barco | Arenisca/Arcillolita | - | - | - |
| UF3-S37A/B2 | K48+200,00 | 34 | 64 | 30 | Bombeo | 4,9E-06 | Fm de Barco | Arenisca/Arcillolita | - | - | - |

NOTA: Ver **Tabla 5-2.11** para ver equivalencia de sondeos con piezómetros instalados y sus respectivas coordenadas.

Fuente: Aecom – Concol, 2018

Tabla 5-2.36 Campo de variación de la permeabilidad asociada a las clases de roca de acuerdo con el índice RMR



Fuente: Aecom – Concol, 2018

En la **Tabla 5-2.37** se indican los valores de permeabilidad mínimos, medios y máximos considerados para cada subunidad hidrogeológica.

Tabla 5-2.37. – Campo de variación de la permeabilidad asociada al grado de fracturación del macizo rocoso.

| Permeabilidad del macizo rocoso a la cota del túnel (m/s) | | | | | |
|---|----------------|-------------|-----------------------|------------------|-----------|
| Subunidad hidrogeológica | Geología | Litotipo | Grado de fracturación | | |
| | | | Bajo | Medio (Standard) | Alto |
| | | | 60<RMR<70 | 50<RMR<40 | 30<RMR<20 |
| FB1a | Form. de Barco | Arenisca | 1E-07 | 5E-07 | 6E-06 |
| FB1b | | Arcillolita | 5E-08 | 2E-07 | 5E-06 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

En la **Tabla 5-2.38** se reportan los valores de permeabilidad obtenidos a lo largo del eje del túnel en función del modelo geológico – geomecánica de referencia.

Tabla 5-2.38. – Permeabilidad atribuida a los tramos de túnel para condiciones geológico-geomecánicas homogéneas. Grado de fracturación H=Alto; M=Medio y L=Bajo.

| Geología | | | Progresiva | | 70-60 | 60-50 | 50-40 | 40-30 | 30-20 | Tramo acuífero atravesado | Conductibilidad hidráulica |
|----------------|-------------|-------|------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------------------|-------------------------------|
| Roca | | Falla | desde | hasta | RMR | | | | | L | K0 |
| | | | m | m | % | | | | | m | m/s |
| Fm Barco (E1b) | Arcillolita | | K47+140 | K47+220 | 0% | 48% | 45% | 7% | 0% | 80 | 5,4E-08 |
| | Arenisca | | K47+220 | K47+230 | 26% | 62% | 6% | 6% | 0% | 10 | 9,7E-08 |
| | Arenisca | F | K47+230 | K47+240 | 0% | 0% | 0% | 70% | 30% | 10 | 5,1E-07 |
| | Arenisca | | K47+240 | K47+295 | 26% | 62% | 6% | 6% | 0% | 55 | 9,7E-08 |
| | Arcillolita | F | K47+295 | K47+305 | 0% | 0% | 0% | 80% | 20% | 10 | 1,9E-07 |
| | Arenisca | | K47+305 | K47+415 | 26% | 68% | 6% | 0% | 0% | 110 | 9,7E-08 |
| | Arenisca | F | K47+415 | K47+420 | 0% | 0% | 0% | 80% | 20% | 5 | 5,1E-07 |
| | Arcillolita | F | K47+420 | K47+425 | 0% | 0% | 0% | 80% | 20% | 5 | 1,9E-07 |
| | Arcillolita | | K47+425 | K47+515 | 0% | 23% | 0% | 77% | 0% | 90 | 1,9E-07 |
| | Arenisca | F | K47+515 | K47+525 | 0% | 23% | 0% | 77% | 0% | 10 | 5,1E-07 |
| | Arenisca | | K47+525 | K47+640 | 4% | 77% | 9% | 10% | 0% | 115 | 9,7E-08 |
| | Arcillolita | | K47+640 | K47+690 | 23% | 23% | 20% | 24% | 10% | 50 | 5,4E-08 |
| | Arenisca | F | K47+690 | K47+700 | 0% | 0% | 0% | 0% | 100% | 10 | 5,1E-07 |
| | Arenisca | | K47+700 | K47+750 | 32% | 26% | 22% | 19% | 1% | 50 | 9,7E-08 |
| | Arenisca | F | K47+750 | K47+760 | 0% | 0% | 29% | 66% | 5% | 10 | 5,1E-07 |
| | Arenisca | | K47+760 | K47+970 | 15% | 65% | 8% | 12% | 0% | 210 | 9,7E-08 |
| | Arenisca | F | K47+970 | K47+980 | 0% | 0% | 0% | 90% | 10% | 10 | 5,1E-07 |
| | Arcillolita | | K47+980 | K48+075 | 0% | 32% | 27% | 27% | 14% | 95 | 5,4E-08 |
| | Arenisca | F | K48+075 | K48+085 | 0% | 0% | 0% | 0% | 100% | 10 | 5,1E-07 |
| | Arcillolita | | K48+085 | K48+150 | 0% | 40% | 11% | 39% | 10% | 65 | 3,2E-07 |
| | Arcillolita | F | K48+150 | K48+160 | 0% | 15% | 30% | 40% | 15% | 10 | 2,1E-07 |
| | Arenisca | | K48+160 | K48+200 | 0% | 78% | 5% | 12% | 5% | 40 | 9,7E-08 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

Los valores de permeabilidad indicados en la Tabla anterior fueron utilizados para el cálculo analítico del caudal esperado en el túnel de Pamplonita.

- **Análisis de la carga hidráulica en correspondencia con el eje del túnel**

A lo largo del eje del túnel los sondeos realizados fueron acondicionados con tubos piezométricos en modo tal de poder medir el nivel del agua subterránea y por lo tanto la carga hidráulica a la cota de la excavación.

Se encuentran disponibles las mediciones realizadas entre el mes de enero y mayo del 2018. Estas mediciones se reportan en la **Tabla 5-2.40**.

Los datos disponibles indican que el nivel freático que se desarrolla en el macizo rocoso determina una carga hidráulica reducida, que llega a ser nula cerca a los portales, mientras que en la zona central del túnel alcanza valores de hasta 30 m.

El desarrollo de la superficie piezométrica en correspondencia con el eje del túnel evidencia una carga hidráulica máxima del orden de 30 metros (**Figura 5-2.121**). En los sectores de los portales la superficie piezométrica se ubica en una cota inferior respecto a la clave del túnel. Es por lo tanto de esperar que la excavación de los tramos con baja cobertura se realice por encima del nivel freático; sin embargo, el grado de conocimiento respecto a la oscilación de la superficie piezométrica no permite descartar la posibilidad que bajo determinadas condiciones de mayores precipitaciones el nivel freático alcance una cota por encima del túnel. Asumiendo un enfoque del lado de la seguridad, los valores de carga hidráulica mostrados en la **Tabla 5-2.40** han sido utilizados para valorar las condiciones hidráulicas durante la excavación o para el cálculo del caudal esperado en el túnel en el corto plazo.

Tabla 5-2.39 – Valoración de la carga hidráulica en correspondencia con el eje del túnel de Pamplonita.

| <i>Progresiva</i> | | <i>Carga hidráulica</i> |
|-------------------|--------------|-------------------------|
| <i>desde</i> | <i>hasta</i> | <i>H0</i> |
| <i>m</i> | <i>m</i> | <i>m</i> |
| K47+140 | K47+220 | 0 - 10 |
| K47+220 | K47+295 | 5 - 15 |
| K47+295 | K47+415 | 10 - 20 |
| K47+415 | K47+750 | 20 - 30 |
| K47+750 | K47+970 | 10 - 20 |
| K47+970 | K48+085 | 5 - 15 |
| K48+085 | K48+200 | 0 - 10 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

Tabla 5-2.40. Datos piezométricos disponibles. Se muestran los valores de profundidad del nivel freático y de carga hidráulica sobre la clave del túnel (m).

| Sondeo | UF3-S32 | UF3-S32A | UF3-S33 | UF3-S35 | UF3-S36 | UF3-S37 | UF3-S37A |
|------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Fecha | Prof. (m suelo) | nivel de agua (m suelo) | nivel de agua (m suelo) | nivel de agua (m suelo) | nivel de agua (m suelo) | nivel de agua (m suelo) | nivel de agua (m suelo) |
| El (mslm) | | | | | | | |
| 22/01/2018 | 17,0 | 15,0 | 41,0 | | | 42,0 | 10,9 |
| 21/02/2018 | 18,6 | 17,1 | 43,6 | | 33,5 | 31,2 | |
| 28/02/2018 | 18,5 | 17,3 | 43,6 | | 33,5 | 31,3 | |
| 13/03/2018 | | | | | | 38,9 | |
| 15/03/2018 | 16,0 | 14,8 | 42,6 | | 33,6 | | |
| 26/03/2018 | 18,2 | 17,0 | 40,4 | 83,6 | 33,8 | 38,4 | 19,2 |
| 27/03/2018 | 18,4 | 17,0 | 40,61 | 81,79 | 33,85 | 38,5 | 21,81 |
| 28/03/2018 | 18,4 | 17,1 | 40,7 | 80,3 | 33,9 | 38,5 | 23,1 |
| 2/04/2018 | 16,5 | 17,1 | 40,74 | | 33,55 | 38,57 | 23,64 |
| 3/04/2018 | 17,2 | 17,1 | 41,33 | 71,61 | 33,58 | 38,61 | 24,35 |
| 4/04/2018 | 17,5 | 17,1 | | 69,55 | | 38,62 | 25,1 |
| 5/04/2018 | 12,8 | 17,1 | 39,802 | 69,732 | | | |
| 6/04/2018 | 15,1 | 17,1 | 20,95 | 60,28 | 33,09 | 38,45 | 26,4 |
| 9/04/2018 | 17,1 | 17,1 | 28,85 | 60,38 | 33,53 | 38,5 | 36,97 |
| 9/04/2018 | | | 29,42 | | | | |
| 10/04/2018 | | | 31,65 | 60,38 | 33,65 | 38,54 | 37,07 |
| 11/04/2018 | 17,4 | 17,0 | 33,58 | | | 38,845 | 37,77 |

| Sondeo | UF3-S32 | UF3-S32A | UF3-S33 | UF3-S35 | UF3-S36 | UF3-S37 | UF3-S37A |
|------------|--------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Fecha | Prof. (m suelo) | nivel de agua (m suelo) | nivel de agua (m suelo) | nivel de agua (m suelo) | nivel de agua (m suelo) | nivel de agua (m suelo) | nivel de agua (m suelo) |
| 12/04/2018 | | | | | | 38,68 | 29,12 |
| 13/04/2018 | | | | | | 38,45 | 32,02 |
| 16/04/2018 | 15,5 | 17,0 | 26,08 | 60,25 | 26,44 | 38,26 | 34,61 |
| 17/04/2018 | 15,8 | 17,1 | 27,66 | 60,25 | 26,86 | 38,31 | 34,97 |
| 18/04/2018 | 16,0 | 17,1 | 30,62 | 60,27 | 27,41 | 38,3 | 35,2 |
| 19/04/2018 | 16,2 | 17,1 | 32,59 | 60,3 | 28,02 | 38,31 | 35,58 |
| 20/04/2018 | 16,3 | 17,1 | 33,93 | | 28,58 | 38,27 | 35,75 |
| 23/04/2018 | 16,8 | 17,2 | 36,52 | 60,33 | 29,73 | 38,4 | 36,18 |
| 24/04/2018 | 16,8 | 17,2 | 36,68 | 60,33 | 30,03 | 38,36 | 36,34 |
| 25/04/2018 | 16,9 | 17,3 | 36,89 | | 30,07 | 38,28 | |
| 26/04/2018 | 17 | 17,28 | 37,09 | 60,33 | 30,17 | 38,23 | 36,6 |
| 27/04/2018 | 17,09 | 17,28 | 37,41 | | 30,3 | 38,23 | 24,18 |
| 28/04/2018 | | | | | | 38,2 | 26,01 |
| 30/04/2018 | 17,4 | 17,36 | 38,39 | 60,34 | 30,77 | 38,45 | 26,87 |
| 1/05/2018 | 17,52 | 17,39 | 38,7 | 60,34 | 30,99 | 38,49 | 27,25 |
| 2/05/2018 | | | | | | 38,55 | 27,67 |
| 3/05/2018 | 17,28 | 17,38 | 39,03 | 60,88 | 31,59 | 38,5 | 27,97 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

NOTA: Ver Tabla 5-2.11 para ver equivalencia de sondeos con piezómetros instalados y sus respectivas coordenadas.

- **Valoración analítica del caudal esperado en el túnel de Pamplonita**

En la bibliografía existen diferentes soluciones analíticas para valorar la presencia del agua de infiltración en los túneles. Estas ecuaciones analíticas se dividen en dos grupos principales: i) aquellas que consideran el caudal estabilizado o, dicho de otra manera, el caudal que se obtiene a largo plazo, cuando el sistema hidrogeológico ha alcanzado un estado de equilibrio, y ii) aquellas que consideran caudales transitorios o, dicho de otra manera, el caudal que se obtiene a corto plazo, cuando el sistema hidrogeológico no se ha estabilizado.

La solución analítica en la que se basa el método es la propuesta por Goodman et al. (1965):

$$Q_i = (2\pi K_i H_0) / \ln((2H_0)/r_0) L_i \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde,

Q_i = caudal drenado en el tramo de túnel (l/s)
 K_i = conductividad hidráulica del tramo de túnel (m/s)
 H_0 = carga hidráulica a la cota del túnel (m)
 L_i = tramo acuífero interceptado (m)
 r_0 = radio del túnel (m)

El caudal global drenado en el túnel, a largo plazo, será igual a la suma del caudal drenado en cada tramo de túnel con características hidrogeológicas homogéneas.

La comparación de los caudales medidos en túneles ya excavados con aquellos obtenidos de las soluciones analíticas frecuentemente utilizadas, como aquella de Goodman, permite concluir que ésta última proporciona generalmente una sobrestimación del caudal esperado a largo plazo. Esto sobre todo se debe al hecho que la ecuación de Goodman toma en cuenta una carga hidráulica estática, que, en el presente caso, ha sido considerado el valor de la cota piezométrica medida en cada uno de los piezómetros instalados y funcionales, resumidos en la **Tabla 5-2.40**.

Las ecuaciones analíticas permiten la obtención de un valor de referencia para el caudal esperado en el corto plazo, sin embargo, tienden a sobreestimar el caudal a largo plazo, especialmente para los túneles profundos. Esto se debe principalmente a que en estas soluciones se desprecia el efecto de la carga litostática sobre los parámetros hidrogeológicos, en particular, sobre la conductividad hidráulica. De hecho, la apertura de las fracturas y la permeabilidad del macizo disminuyen con el incremento de los esfuerzos efectivo. La ley de Terzaghi muestra que los esfuerzos efectivos σ' , pueden aumentar por dos razones: el aumento de los esfuerzos totales σ o la disminución de las presiones de poros p .

$$\sigma' = \sigma - p \quad (\text{Ecuación 13})$$

En el ámbito de los túneles profundos, la reducción de la permeabilidad del macizo rocoso y en consecuencia del caudal drenado, es causada por:

- El aumento de los esfuerzos totales σ y de los esfuerzos efectivos σ' con el aumento de la profundidad de la obra subterránea (esto no siempre se cumple en zonas con fallas y estructuras verticales que presentan esfuerzos heterogéneo y anisotrópicos).
- La disminución de la presión de poros p debido al drenaje causado por el túnel

Estos efectos no se pueden incluir en la ecuación analítica para el cálculo del caudal debido a que la reducción de la permeabilidad es diferente para cada punto del macizo rocoso. Sin embargo, el caudal calculado con un método analítico Q_0 puede ser multiplicada por un

factor de reducción α que tiene en cuenta el efecto de la disminución de la presión de poros sobre la permeabilidad para obtener el caudal reducido en función de esta:

$$Q_{rid} = Q_0 \alpha \quad (\text{Ecuación 14})$$

A partir de la ley de Louis (1969):

$$K(h) = K_0 e^{-3b(h_0-h)} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Perrochet (2007) ha desarrollado el siguiente factor de reducción analítico:

$$\alpha = \frac{Q_{rid}}{Q_0} = \frac{1 - e^{-3b(h_0-h)}}{3b(h_0-h)} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Donde $K(h)$ es la conductividad hidráulica en función del potencial de presión h , K_0 es la conductividad hidráulica cuando el potencial de presión h corresponde al potencial inicial h_0 y b es un parámetro que describe la resistencia elástica de las fracturas al aplastamiento y es una función del módulo elástico. En la valoración realizada, la definición del valor b se ha llevado a cabo tomando en consideración los valores del módulo elástico atribuido a las rocas y terrenos a lo largo del túnel.

En la formulación de las valoraciones llevadas a cabo en el ámbito del presente estudio:

- Q_0 es considerado el valor del caudal que será drenado en el túnel a corto tiempo o durante la fase de excavación.
- Q_{rid} representa por el contrario, el valor del caudal esperado en el túnel, una vez el sistema acuífero/túnel se ha estabilizado o a largo plazo, después de finalizada la excavación del túnel.

La dependencia de la porosidad de las fracturas a la presión efectiva es un proceso físico que también puede ocurrir en profundidades reducidas. Sin embargo, a medida que la profundidad disminuye, este efecto se vuelve casi insignificante.

Cuando la profundidad y las presiones de poros aumentan se reduce el caudal drenado por el túnel y el efecto sobre la conductividad hidráulica y sobre el flujo se vuelven importantes. No obstante, esta tendencia podría no ser tan evidente en macizos fracturados o zonas de fallas geológicas.

Para la valoración del caudal de agua drenada en los túneles se han definido los siguientes elementos (la valoración se ha hecho tramo por tramo):

- Definición de las cargas hidráulicas en correspondencia con el eje del túnel.

- Identificación de las subunidades hidrogeológicas con comportamiento hidrodinámico homogéneo a lo largo del trazado de los túneles.
- Definición de los intervalos de variación de la permeabilidad para cada una de las subunidades hidrogeológicas definidas.

La previsión del ingreso de agua en el interior del túnel, presentado en el capítulo correspondiente del presente informe, se refiere a un régimen tanto a corto como a largo plazo. El corto plazo se refiere a la etapa constructiva y el largo plazo a los años sucesivos después de terminada la excavación.

En definitiva, el intervalo del caudal a largo plazo, valorado en correspondencia con el eje del túnel, varía entre un valor mínimo y un valor máximo. En este caso específico, el valor mínimo representa las condiciones más favorables conexas con cargas hidráulicas H_0 mínimas en el que algunos tramos de túnel resultan ser excavados por encima del nivel freático. Sin embargo, es necesario recordar que el factor de reducción del caudal a largo plazo es más importante para cargas hidráulicas mayores. Esta condición es evidente a partir de los resultados de las evaluaciones analíticas presentadas en el próximo capítulo.

• Resultados del cálculo analítico

En la **Tabla 5-2.41** se reportan todos los datos de “input” y de “output” de la valoración del caudal con método analítico. En los párrafos siguientes, por otro lado, se reportan los análisis del caudal a corto y largo plazo.

Se precisa que el cálculo analítico del caudal no toma en cuenta la limitación de la recarga de la superficie del caudal drenado en el túnel (abatimiento del nivel piezométrico). Por este motivo, la valoración analítica conlleva a una sobreestimación del caudal calculado a largo plazo, el cual generalmente se afecta significativamente por la tasa de recarga del sistema acuífero-túnel. No obstante, dada la escasa carga hidráulica del túnel (<30m) este impacto para el túnel de Pamplonita no es de gran relevancia.

Sin embargo, este tipo de valoración ha sido considerada por el cálculo del caudal realizado a través del modelo numérico. El resultado de este cálculo se presenta en el capítulo siguiente.

Tomando en cuenta lo antes indicado se reporta a continuación el caudal calculado a corto y largo plazo con el método analítico que probé una estimación del caudal esperado en el túnel de Pamplonita.

Tabla 5-2.41. Cálculo analítico del caudal esperado en el túnel de Pamplonita a corto plazo.

| Formación | Roca | Falla | desde | hasta | G.F. | H0m | H0M | r | L | K0 | Q corto plazo | | b med | f min | f max | QLP min | QLP max |
|-------------|-------------|-------|---------|---------|------|------|------|-----|-----|---------|---------------|---------|----------|-------|-------|---------|---------|
| | | | m | m | | m | m | m | m | m/s | l/s/10m | l/s/10m | - | % | % | l/s | l/s |
| Barco (E1b) | Arcillolita | | K47+140 | K47+220 | L | 0 | 10 | 5,8 | 80 | 5,4E-08 | 0 | 0,03 | 3.00E-03 | 0% | 5% | 0,00 | 0,22 |
| Barco (E1b) | Arenisca | | K47+220 | K47+230 | L | 2,5 | 12,5 | 5,8 | 10 | 9,7E-08 | 0 | 0,1 | 3.00E-03 | 0% | 6% | 0,00 | 0,05 |
| Barco (E1b) | Arenisca | F | K47+230 | K47+240 | H | 5 | 15 | 5,8 | 10 | 5,1E-07 | 0,3 | 0,3 | 1.00E-02 | 7% | 19% | 0,2 | 0,3 |
| Barco (E1b) | Arenisca | | K47+240 | K47+295 | L | 5 | 15 | 5,8 | 55 | 9,7E-08 | 0,1 | 0,1 | 3.00E-03 | 2% | 7% | 0,3 | 0,3 |
| Barco (E1b) | Arcillolita | F | K47+295 | K47+305 | H | 7,5 | 17,5 | 5,8 | 10 | 1,9E-07 | 0,1 | 0,1 | 1.00E-02 | 10% | 22% | 0,1 | 0,1 |
| Barco (E1b) | Arenisca | | K47+305 | K47+415 | L | 10 | 20 | 5,8 | 110 | 9,7E-08 | 0,0 | 0,1 | 3.00E-03 | 5% | 9% | 0,5 | 0,7 |
| Barco (E1b) | Arenisca | F | K47+415 | K47+420 | H | 12,5 | 22,5 | 5,8 | 5 | 5,1E-07 | 0,3 | 0,4 | 1.00E-02 | 16% | 27% | 0,05 | 0,07 |
| Barco (E1b) | Arcillolita | F | K47+420 | K47+425 | H | 12,5 | 22,5 | 5,8 | 5 | 1,9E-07 | 0,1 | 0,1 | 1.00E-02 | 16% | 27% | 0,02 | 0,03 |
| Barco (E1b) | Arcillolita | | K47+425 | K47+515 | H | 12,5 | 22,5 | 5,8 | 90 | 1,9E-07 | 0,1 | 0,1 | 1.00E-02 | 16% | 27% | 0,7 | 1,0 |
| Barco (E1b) | Arenisca | F | K47+515 | K47+525 | H | 15 | 25 | 5,8 | 10 | 5,1E-07 | 0,3 | 0,4 | 1.00E-02 | 19% | 29% | 0,2 | 0,3 |
| Barco (E1b) | Arenisca | | K47+525 | K47+640 | L | 15 | 25 | 5,8 | 115 | 9,7E-08 | 0,06 | 0,07 | 3.00E-03 | 7% | 11% | 0,6 | 0,8 |
| Barco (E1b) | Arcillolita | | K47+640 | K47+690 | L | 12,5 | 22,5 | 5,8 | 50 | 5,4E-08 | 0,03 | 0,04 | 3.00E-03 | 6% | 10% | 0,1 | 0,2 |
| Barco (E1b) | Arenisca | F | K47+690 | K47+700 | H | 12,5 | 22,5 | 5,8 | 10 | 5,1E-07 | 0,3 | 0,3 | 1.00E-02 | 13% | 24% | 0,2 | 0,3 |
| Barco (E1b) | Arenisca | | K47+700 | K47+750 | L | 10 | 20 | 5,8 | 50 | 9,7E-08 | 0,05 | 0,06 | 3.00E-03 | 5% | 9% | 0,2 | 0,3 |
| Barco (E1b) | Arenisca | F | K47+750 | K47+760 | H | 7,5 | 17,5 | 5,8 | 10 | 5,1E-07 | 0,3 | 0,3 | 1.00E-02 | 10% | 22% | 0,2 | 0,3 |
| Barco (E1b) | Arenisca | | K47+760 | K47+970 | L | 5 | 15 | 5,8 | 210 | 9,7E-08 | 0,1 | 0,06 | 3.00E-03 | 2% | 7% | 1,1 | 1,1 |
| Barco (E1b) | Arenisca | F | K47+970 | K47+980 | H | 2,5 | 12,5 | 5,8 | 10 | 5,1E-07 | 0 | 0,3 | 1.00E-02 | 0% | 16% | 0,00 | 0,27 |
| Barco (E1b) | Arcillolita | | K47+980 | K48+075 | L | 0 | 10 | 5,8 | 95 | 5,4E-08 | 0 | 0,03 | 3.00E-03 | 0% | 5% | 0,00 | 0,26 |
| Barco (E1b) | Arenisca | F | K48+075 | K48+085 | H | 0 | 10 | 5,8 | 10 | 5,1E-07 | 0 | 0,3 | 1.00E-02 | 0% | 13% | 0,00 | 0,26 |
| Barco (E1b) | Arenisca | | K48+085 | K48+150 | M | 0 | 10 | 5,8 | 65 | 3,2E-07 | 0 | 0,16 | 5.00E-03 | 0% | 7% | 0,0 | 1,1 |
| Barco (E1b) | Arcillolita | F | K48+150 | K48+160 | M | 0 | 10 | 5,8 | 10 | 2,1E-07 | 0 | 0,11 | 5.00E-03 | 0% | 7% | 0,00 | 0,11 |
| Barco (E1b) | Arenisca | | K48+160 | K48+200 | L | 0 | 10 | 5,8 | 40 | 9,7E-08 | 0 | 0,05 | 3.00E-03 | 0% | 5% | 0,00 | 0,20 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

En donde:

| | |
|---------|--|
| GF | : Grado de Fracturación |
| H0m | : Carga Hidráulica - valor mínimo |
| H0M | : Carga Hidráulica - valor máximo |
| r | : Radio Túnel |
| L | : Tramo acuífero atravesado |
| K0 | : Conductibilidad hidráulica |
| b med | : Resistencia elástica de la roca |
| f min | : Factor de reducción caudal - efecto de disminuir la presión de poros (min) |
| f max | : Factor de reducción caudal - efecto de disminuir la presión de poros (max) |
| QLP min | : Caudal largo plazo sin limitación de la recarga - modelo numérico (min) |
| QLP max | : Caudal largo plazo sin limitación de la recarga - modelo numérico (max) |

Corto plazo o durante construcción:

Los caudales a corto plazo se expresan en l/s/10 m de túnel excavado. Representan los caudales esperados en el frente de excavación y están destinados a disminuir con el tiempo y, a veces, a desaparecer completamente en función de su conexión con las áreas de alimentación de los circuitos hídricos subterráneos. Los valores suministrados a corto plazo deben ser interpretados como valores de caudal específico (no pico) para un tramo de 10 m próximos al frente de excavación.

Los caudales calculados a lo largo del túnel muestran como las condiciones hidráulicas previstas son más o menos constantes a lo largo de todo el túnel. Si se excluyen los tramos próximos a los portales, donde los caudales serán nulos si se excava por encima del nivel freático, los caudales a corto plazo son por lo general bajos, inferiores a 1 l/s/10m. Estos valores pueden llegar a incrementarse considerablemente durante la excavación del túnel si se interceptan discontinuidades más permeables (p.e. $k=1,3E-5$ m/s) en correspondencia con las cargas hidráulicas mayores (p.e. 20-30 m), en estos casos pueden llegar a presentarse caudales de pico del orden de 10 l/s/10m en el túnel. En la **Tabla 5-2.42** se indican los caudales a corto plazo a lo largo del túnel de Pamplonita.

Tabla 5-2.42 – Valores de caudales específicos a corto plazo a lo largo del túnel de Pamplonita (valores mínimos y máximos).

| Geología | | Progresiva | | Caudal corto plazo | |
|-------------|----------|------------|---------|--------------------|---------|
| Roca | Falla | desde | hasta | Q0min | Q0max |
| | | m | m | l/s/10m | l/s/10m |
| Arcillolita | | K47+140 | K47+220 | 0 | 0,03 |
| Arenisca | | K47+220 | K47+230 | 0 | 0,1 |
| Arenisca | F | K47+230 | K47+240 | 0,3 | 0,3 |
| Arenisca | | K47+240 | K47+295 | 0,1 | 0,1 |
| Arcillolita | F | K47+295 | K47+305 | 0,1 | 0,1 |

| Geología | | Progresiva | | Caudal corto plazo | |
|-------------|----------|------------|---------|--------------------|---------|
| Roca | Falla | desde | hasta | Q0min | Q0max |
| | | m | m | l/s/10m | l/s/10m |
| Arenisca | | K47+305 | K47+415 | 0,0 | 0,1 |
| Arenisca | F | K47+415 | K47+420 | 0,3 | 0,4 |
| Arcillolita | F | K47+420 | K47+425 | 0,1 | 0,1 |
| Arcillolita | | K47+425 | K47+515 | 0,1 | 0,1 |
| Arenisca | F | K47+515 | K47+525 | 0,3 | 0,4 |
| Arenisca | | K47+525 | K47+640 | 0,06 | 0,07 |
| Arcillolita | | K47+640 | K47+690 | 0,03 | 0,04 |
| Arenisca | F | K47+690 | K47+700 | 0,3 | 0,3 |
| Arenisca | | K47+700 | K47+750 | 0,05 | 0,06 |
| Arenisca | F | K47+750 | K47+760 | 0,3 | 0,3 |
| Arenisca | | K47+760 | K47+970 | 0,1 | 0,06 |
| Arenisca | F | K47+970 | K47+980 | 0 | 0,3 |
| Arcillolita | | K47+980 | K48+075 | 0 | 0,03 |
| Arenisca | F | K48+075 | K48+085 | 0 | 0,3 |
| Arenisca | | K48+085 | K48+150 | 0 | 0,16 |
| Arcillolita | F | K48+150 | K48+160 | 0 | 0,11 |
| Arenisca | | K48+160 | K48+200 | 0 | 0,05 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018.

Largo plazo sin considerar la limitación de la recarga

Los caudales a largo plazo representan la evolución en el tiempo del caudal a corto plazo una vez que este último se encuentre estabilizado en equilibrio con el drenaje creado a través del túnel. Se suministran en l/s y deben entenderse como los caudales esperados a lo largo de todos los tramos homogéneos. En este caso, es posible evaluar un valor de flujo global para todo el túnel.

Como se ha indicado precedentemente, la reducción de los caudales en el tiempo está directamente conexas con la calidad del macizo rocoso (aquí definido por el módulo elástico) y por la tasa de recarga, no considerada en el cálculo analítico, pero si en la simulación numérica. En particular, a cada tramo homogéneo se le ha atribuido un valor de módulo elástico específico acorde con la valoración geológica y geomecánica provista.

A propósito de la incidencia de la carga hidráulica sobre la valoración del factor de reducción del caudal, se enfatiza que este último será aún más importante a medida que la carga hidráulica sea mayor; en otras palabras, se tendrá un porcentaje de reducción más importante para cargas hidráulicas mayores en correspondencia de las cuales se tiene normalmente el caudal a corto plazo más alto. Por lo tanto, los caudales bajos relacionados con cargas hidráulicas reducidas permanecen más constantes en el tiempo, mientras las

entradas de agua que suceden en correspondencia con zonas de mayor carga hidráulica sufrirán una reducción más significativa.

Tomando en consideración lo antes expuesto, se ha procedido con la valoración de los caudales a largo plazo para el túnel de Pamplonita, los cuales se indican en la **Tabla 5-2.43** y varían entre 4,4 y 8,1 l/s.

Tabla 5-2.43 – Valores de caudales estabilizados a largo plazo a lo largo del túnel de Pamplonita sin considerar limitación de la recarga (valores mínimos y máximos).

| Geología | | Progresiva | | Caudal largo plazo | |
|-------------|----------|------------|---------|--------------------|-------|
| Roca | Falla | desde | hasta | Q1min | Q1max |
| | | m | m | l/s | l/s |
| Arcillolita | | K47+140 | K47+220 | 0 | 0,2 |
| Arenisca | | K47+220 | K47+230 | 0 | 0,05 |
| Arenisca | F | K47+230 | K47+240 | 0,2 | 0,3 |
| Arenisca | | K47+240 | K47+295 | 0,3 | 0,3 |
| Arcillolita | F | K47+295 | K47+305 | 0,07 | 0,10 |
| Arenisca | | K47+305 | K47+415 | 0,5 | 0,7 |
| Arenisca | F | K47+415 | K47+420 | 0,0 | 0,1 |
| Arcillolita | F | K47+420 | K47+425 | 0,02 | 0,0 |
| Arcillolita | | K47+425 | K47+515 | 0,7 | 1,0 |
| Arenisca | F | K47+515 | K47+525 | 0,2 | 0,3 |
| Arenisca | | K47+525 | K47+640 | 0,6 | 0,8 |
| Arcillolita | | K47+640 | K47+690 | 0,1 | 0,2 |
| Arenisca | F | K47+690 | K47+700 | 0,2 | 0,3 |
| Arenisca | | K47+700 | K47+750 | 0,2 | 0,3 |
| Arenisca | F | K47+750 | K47+760 | 0,2 | 0,3 |
| Arenisca | | K47+760 | K47+970 | 1 | 1,1 |
| Arenisca | F | K47+970 | K47+980 | 0 | 0,3 |
| Arcillolita | | K47+980 | K48+075 | 0 | 0,3 |
| Arenisca | F | K48+075 | K48+085 | 0 | 0,3 |
| Arenisca | | K48+085 | K48+150 | 0 | 1 |
| Arcillolita | F | K48+150 | K48+160 | 0 | 0,1 |
| Arenisca | | K48+160 | K48+200 | 0 | 0,2 |
| | | | | 4,4 | 8,1 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018.

Largo plazo considerando la limitación de la recarga valorada con la modelación numérica:

No obstante, como se ha indicado anteriormente, los valores reportados en la **Tabla 5-2.43** no consideran la limitación de la recarga del sistema acuífero-túnel en relación con el caudal drenado por el túnel y por lo tanto los valores tienden a sobreestimarse.

No obstante, gracias a la modelación numérica y valoración de la recarga ha sido posible valorar el caudal drenado por el túnel de Pamplonita a largo plazo considerando la recarga efectiva del sistema acuífero-túnel interceptado por la obra subterránea.

Una vez el túnel ha sido excavado, la permeabilidad del macizo rocoso atravesado comprendida y la baja tasa de infiltración desde la superficie, pueden determinar el abatimiento del nivel piezométrico en correspondencia con el eje del túnel. Al largo plazo, el caudal drenado en el túnel varía en el tiempo hasta estabilizarse después de 10 años, en particular resultan los siguientes valores:

- ✓ Después de 1 año de excavado el túnel de Pamplonita el caudal total resulta del orden de 2,2 l/s.
- ✓ Después de 5 años de excavado el túnel de Pamplonita el caudal total resulta del orden de 1,6 l/s.
- ✓ Después de 10 años de excavado el túnel de Pamplonita el caudal total resulta del orden de 1 l/s.

Por lo que en términos generales se recomienda manejar un caudal a largo plazo < 5 l/s.


En la **Tabla 5-2.44** se reportan los resultados finales de cálculo del caudal esperado en el túnel. Es posible apreciar, tramo por tramo, la evolución en el tiempo del caudal a corto plazo valorado con método analítico y el caudal a largo plazo en el que se ha tenido en cuenta el aporte del modelo numérico.

Vale la pena aclarar que los valores calculados de caudales a corto y largo plazo están estrechamente ligados a las condiciones geotécnicas del macizo rocoso y cargas hidráulicas que se prevén encontrar durante la excavación del túnel de Pamplonita.

Si estas variables cambian, o varían respecto a lo originalmente previsto, los valores de caudales calculados deben ser revisados y actualizados. En otras palabras, la fiabilidad del modelo hidrogeológico está estrechamente ligada a la fiabilidad del modelo geológico y geotécnico de referencia del túnel.

Tabla 5-2.44. Cálculo del caudal esperado en el túnel (valoración analítica) a largo plazo con aplicación de la valoración numérica.

| Geología | | Progresiva | | Q1 Goodman (largo plazo) | | | | Q. Largo Plazo (1 año) | | | Q. Largo Plazo (5 años) | | | Q. Largo Plazo (10 años) | | |
|----------------|-------------|------------|---------|--------------------------|------|---------|------|------------------------|---------|-------|-------------------------|---------|-------|--------------------------|---------|-------|
| Roca | Falla | desde | hasta | min | | max | | red | | | red | | | red | | |
| | | m | m | l/s/10m | l/s | l/s/10m | l/s | % | l/s/10m | l/s | % | l/s/10m | l/s | % | l/s/10m | l/s |
| Fm Barco (E1b) | Arcillolita | K47+140 | K47+220 | 0 | 0 | 0,03 | 0,2 | 25% | 0,01 | 0,055 | 18% | 0,005 | 0,04 | 10% | 0,003 | 0,02 |
| Fm Barco (E1b) | Arenisca | K47+220 | K47+230 | 0 | 0 | 0,05 | 0,05 | 25% | 0,01 | 0,013 | 18% | 0,01 | 0,01 | 10% | 0,01 | 0,01 |
| Fm Barco (E1b) | Arenisca | F K47+230 | K47+240 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 25% | 0,07 | 0,073 | 18% | 0,05 | 0,05 | 10% | 0,03 | 0,03 |
| Fm Barco (E1b) | Arenisca | K47+240 | K47+295 | 0,05 | 0,3 | 0,05 | 0,3 | 25% | 0,01 | 0,076 | 18% | 0,01 | 0,05 | 10% | 0,01 | 0,03 |
| Fm Barco (E1b) | Arcillolita | F K47+295 | K47+305 | 0,07 | 0,07 | 0,10 | 0,1 | 25% | 0,03 | 0,029 | 18% | 0,02 | 0,02 | 10% | 0,01 | 0,01 |
| Fm Barco (E1b) | Arenisca | K47+305 | K47+415 | 0,04 | 0,5 | 0,06 | 0,7 | 25% | 0,02 | 0,173 | 18% | 0,01 | 0,1 | 10% | 0,01 | 0,07 |
| Fm Barco (E1b) | Arenisca | F K47+415 | K47+420 | 0,05 | 0,05 | 0,1 | 0,1 | 25% | 0,04 | 0,022 | 18% | 0,03 | 0,03 | 10% | 0,02 | 0,02 |
| Fm Barco (E1b) | Arcillolita | F K47+420 | K47+425 | 0,02 | 0,02 | 0,03 | 0,03 | 25% | 0,02 | 0,008 | 18% | 0,01 | 0,01 | 10% | 0,01 | 0,007 |
| Fm Barco (E1b) | Arcillolita | K47+425 | K47+515 | 0,07 | 0,7 | 0,1 | 1,0 | 25% | 0,03 | 0,293 | 18% | 0,02 | 0,2 | 10% | 0,01 | 0,1 |
| Fm Barco (E1b) | Arenisca | F K47+515 | K47+525 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 25% | 0,09 | 0,093 | 18% | 0,07 | 0,07 | 10% | 0,04 | 0,04 |
| Fm Barco (E1b) | Arenisca | K47+525 | K47+640 | 0,05 | 0,6 | 0,07 | 0,8 | 25% | 0,02 | 0,202 | 18% | 0,01 | 0,1 | 10% | 0,01 | 0,08 |
| Fm Barco (E1b) | Arcillolita | K47+640 | K47+690 | 0,03 | 0,1 | 0,04 | 0,2 | 25% | 0,01 | 0,047 | 18% | 0,01 | 0,03 | 10% | 0,004 | 0,02 |
| Fm Barco (E1b) | Arenisca | F K47+690 | K47+700 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 25% | 0,09 | 0,088 | 18% | 0,06 | 0,06 | 10% | 0,04 | 0,04 |
| Fm Barco (E1b) | Arenisca | K47+700 | K47+750 | 0,04 | 0,2 | 0,06 | 0,3 | 25% | 0,02 | 0,078 | 18% | 0,01 | 0,06 | 10% | 0,01 | 0,03 |
| Fm Barco (E1b) | Arenisca | F K47+750 | K47+760 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 25% | 0,08 | 0,078 | 18% | 0,06 | 0,06 | 10% | 0,03 | 0,03 |
| Fm Barco (E1b) | Arenisca | K47+760 | K47+970 | 0,05 | 1,1 | 0,05 | 1,1 | 25% | 0,01 | 0,290 | 18% | 0,01 | 0,209 | 10% | 0,01 | 0,12 |
| Fm Barco (E1b) | Arenisca | F K47+970 | K47+980 | 0 | 0 | 0,3 | 0,3 | 25% | 0,07 | 0,068 | 18% | 0,05 | 0,05 | 10% | 0,03 | 0,03 |
| Fm Barco (E1b) | Arcillolita | K47+980 | K48+075 | 0 | 0 | 0,03 | 0,3 | 25% | 0,01 | 0,065 | 18% | 0,005 | 0,05 | 10% | 0,00 | 0,03 |
| Fm Barco (E1b) | Arenisca | F K48+075 | K48+085 | 0 | 0 | 0,3 | 0,3 | 25% | 0,06 | 0,065 | 18% | 0,05 | 0,05 | 10% | 0,03 | 0,03 |
| Fm Barco (E1b) | Arenisca | K48+085 | K48+150 | 0 | 0 | 0,2 | 1,1 | 25% | 0,04 | 0,268 | 18% | 0,03 | 0,193 | 10% | 0,02 | 0,11 |

| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA |
| Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta | |

| Geología | | | Progresiva | | Q1 Goodman (largo plazo) | | | | Q. Largo Plazo (1 año) | | | Q. Largo Plazo (5 años) | | | Q. Largo Plazo (10 años) | | |
|----------------|-------------|-------|------------|---------|--------------------------|-----|---------|-----|------------------------|---------|-------|-------------------------|---------|------|--------------------------|---------|------|
| Roca | | Falla | desde | hasta | min | | max | | red | | | red | | | red | | |
| | | | m | m | l/s/10m | l/s | l/s/10m | l/s | % | l/s/10m | l/s | % | l/s/10m | l/s | % | l/s/10m | l/s |
| Fm Barco (E1b) | Arcillolita | F | K48+150 | K48+160 | 0 | 0 | 0,1 | 0,1 | 25% | 0,03 | 0,027 | 18% | 0,02 | 0,02 | 10% | 0,01 | 0,01 |
| Fm Barco (E1b) | Arenisca | | K48+160 | K48+200 | 0 | 0 | 0,05 | 0,2 | 25% | 0,01 | 0,049 | 18% | 0,01 | 0,04 | 10% | 0,00 | 0,02 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

Dónde:

- Q. Largo Plazo (1 año) : Filtro numérico - caudales Largo Plazo (1 año) con limitación de la recarga entregada para el modelo numérico
Q. Largo Plazo (5 años) : Filtro numérico - caudales Largo Plazo (5 años) con limitación de la recarga entregada para el modelo numérico
Q. Largo Plazo (10 años) : Filtro numérico - caudales Largo Plazo (10 años) con limitación de la recarga entregada para el modelo numérico

5.1.8.14 Probabilidad de afectación de los puntos de agua existentes en el área del túnel según método DHI

Este capítulo abarca la previsión, expresada en términos probabilísticos, del potencial de afectación de los puntos de agua localizados en el área de influencia del túnel de Pamplonita, debido a la excavación de esta obra subterránea.

El análisis de la probabilidad de afectación se ha llevado a cabo sobre 18 puntos de agua ubicados en el área adyacente al túnel y sus inmediaciones. Estos puntos de agua fueron seleccionados entre aquellos identificados durante el inventario realizado en época húmeda e intermedia y constituyen una muestra representativa de los recursos hídricos presentes en la zona de influencia del túnel. El análisis y los resultados obtenidos para el túnel de Pamplonita fueron hechos bajo la condición constructiva de túnel drenante.

La metodología de cálculo utilizada para este análisis es conocida como *Drawdown Hazard Index* (DHI, Dematteis et al., 2001, Torri & Dematteis, 2007), fue presentada en el congreso mundial de túneles organizado por AITES ITA en el 2001, celebrado en Milano-Italia, y provee una definición probabilística acerca de la ocurrencia del fenómeno de afectación de los recursos hídricos debido a la excavación de obras subterráneas.

En el párrafo siguiente se describe en detalle la metodología DHI.

En la literatura existente, el tema relacionado con la probabilidad de afectación de puntos de agua en superficie debido a la construcción específica de túneles es tratado generalmente mediante enfoques cualitativos y subjetivos o mediante la aplicación de modelos numéricos de flujo enfocados a casos específicos.

El método DHI utilizado en el presente estudio para valorar la probabilidad de afectación de las fuentes de aguas localizadas en superficie debido a la construcción del túnel de Pamplonita, representa el único método, según el conocimiento de los autores, que permite obtener un resultado mediante un proceso estandarizado y verificable. A manera de ejemplo se cita la valoración que algunos autores reconocidos han hecho del método en cuestión, como por ejemplo Vincenzi et al. (2010) quien ilustra una comparación del método DHI con el modelo numérico de flujo.

Por las razones antes expuestas se concluye como el método DHI aplicado en el presente estudio del componente hidrogeológico, constituye el método idóneo para llevar a cabo la valoración de afectación aquí relacionada, dado que fue concebido específicamente para este fin y el mismo ha sido aplicado con éxito en estudios análogos realizados para diferentes túneles como por ejemplo túnel del Perthus (España-Francia), túnel Torino-Lyon (Italia-Francia), túnel Villardaine Bourget (Francia) y túnel Terzo Valico (Italia).

En Colombia ha sido aplicado en el marco del desarrollo de estudios de impacto ambiental para los siguientes túneles: túneles de oriente en vía Medellín – Río Negro (dos túneles

viales), túneles ruta del sol, sector 1, tramo 1 (16 túneles viales), túneles vía al Mar2 (14 túneles viales), túneles carretera Bogotá – Villavicencio, sector Chirajara – Bijagual (5 túneles), entre otros.

En la **Tabla 5-2.48** del presente informe, se calcula el valor DHI para los puntos de agua localizados en la zona de influencia del túnel de Pamplonita.

5.1.8.14.1 Método del cálculo

A continuación, se presenta la descripción del método para la valoración del índice de probabilidad de afectación de los puntos de agua subsuperficial y subterránea (DHI).

El sistema *acuífero – túnel* es analizado detalladamente por ocho (8) variables, que están relacionadas con el fenómeno de abatimiento del nivel freático y de la afectación de los puntos de agua presentes en superficie.

Entre estas ocho (8) variables, cuatro (4) de ellas se definen como variables fundamentales del sistema, y se refieren a las condiciones hidrogeológicas a cota del túnel en el tramo de proyección del punto de agua en superficie, y las cuatro (4) restantes son considerados como factores claves, y se relacionan con las características geométricas y geológicas que conectan el punto de agua en superficie con el túnel en profundidad.

Con el fin de realizar el cálculo del índice de la probabilidad de afectación de los puntos de agua (DHI), a cada punto se le asigna un valor numérico para cada una de las variables antes descritas, valores que representan las condiciones hidrogeológicas típicas para aquel punto de agua en particular.

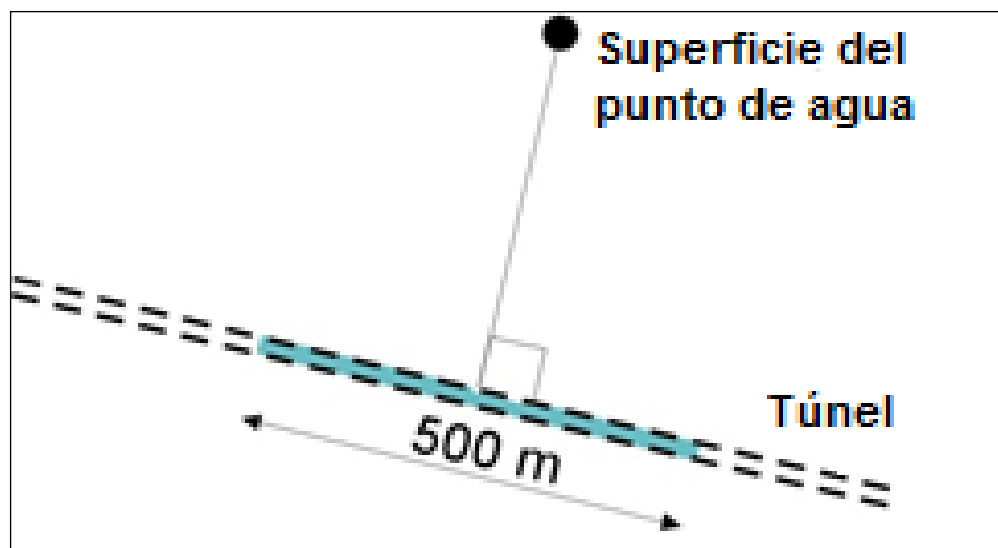
La asignación del valor numérico de la variable obedece siempre al siguiente criterio; valores bajos para las condiciones de menor probabilidad de afectación y valores altos para aquella de mayor probabilidad.

Tal método de atribución de los valores de la variabilidad requiere, obviamente, tratar puntos de agua localizados geográficamente de manera unívoca, y para los cuales sea posible una proyección puntual sobre el trazado del túnel.

- **Esquema de proyección del punto de agua sobre el túnel**

Dado que todas las variables del sistema se relacionan con las condiciones geomecánicas e hidrogeológicas previstas a lo largo del trazado del túnel, es necesario proyectar, en planta, cada punto de agua sobre el trazado mismo, como se indica en la **Figura 5-2.122**.

Figura 5-2.122. Esquema de la relación geométrica entre la posición del punto de agua considerado y el tramo de túnel de referencia.



Fuente: Dematteis et. al, 2001 y 2007

En presencia de zonas de fallas o de estructuras geológicas permeables particulares, con orientación no perpendicular al túnel, la distancia del túnel ha sido considerada a lo largo de la estructura misma, porque se supone que el hipotético flujo de agua que podría drenar al punto en análisis tendrá lugar en esta dirección. En este caso, la proyección del punto recae en correspondencia con la intersección de la zona de falla con el túnel.

Para los puntos de agua en proximidad de los portales, cuya proyección perpendicular al trazado cae fuera del trazado mismo, la proyección se ha hecho sobre la última progresiva del túnel más cercana al punto.

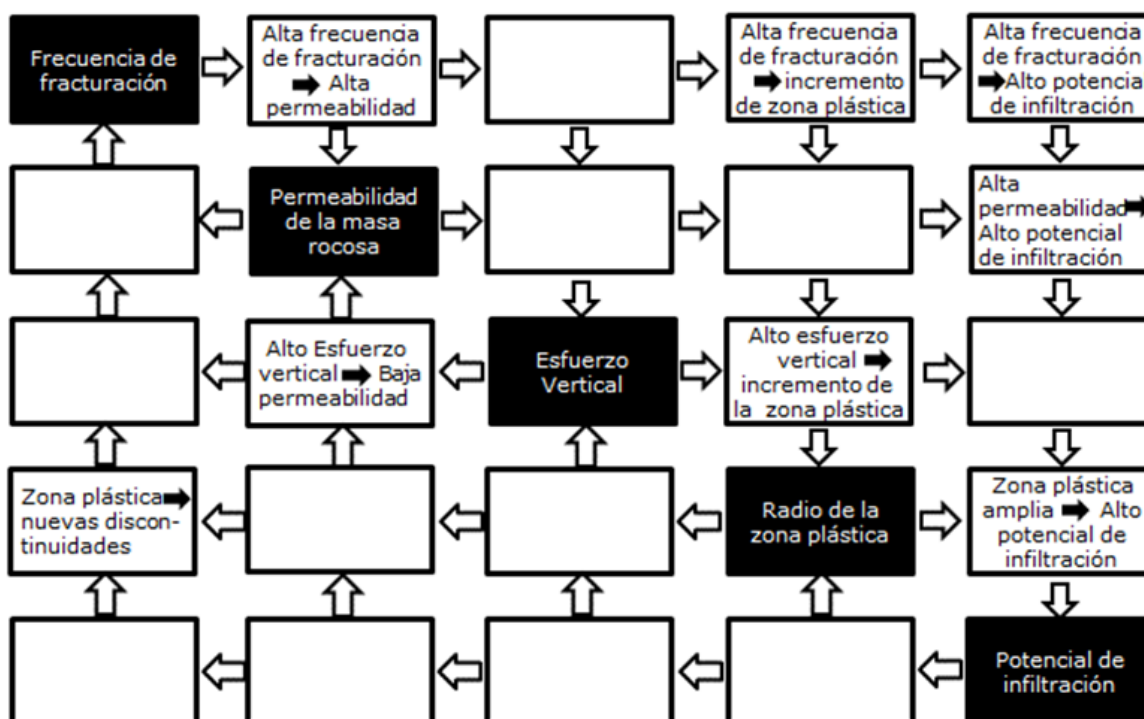
La proyección en planta de cada punto de agua sobre el trazado ha permitido determinar la progresiva de referencia del punto de agua, y obtener los valores de las variables con base en las condiciones geológicas e hidrogeológicas previstas a lo largo del eje del túnel. Los valores han sido asignados considerando una franja de 250 m entorno a la proyección del punto de agua sobre el eje, porque se considera que las interacciones mayores se manifestarán sobre este intervalo.

5.1.8.14.2 Descripción de las variables del sistema

- **Variables fundamentales del sistema**

La interacción entre las cuatro variables fundamentales del sistema *acuífero-túnel* se describe en la matriz de la **Figura 5-2.123** mediante relación de causa-efecto entre las mismas variables. La interacción entre ellas determina el potencial de drenaje que el tramo de túnel examinado tiene sobre los puntos de agua (PI).

Figura 5-2.123. Ejemplo conceptual de la matriz del sistema Acuífero-túnel



Fuente: Dematteis et. al, 2001 y 2007

Frecuencia de fracturación (FF):

La presencia de fracturas mayores o menores que interceptan el túnel, condicionan directamente la posibilidad de drenaje que ellas tienen sobre el macizo. De este modo, una mayor fracturación determina una mayor permeabilidad y, en consecuencia, una mayor posibilidad de flujo al interior del túnel. Adicionalmente, la frecuencia de fracturación afecta directamente dos de las variables fundamentales descritas a continuación: la permeabilidad del macizo y la amplitud de la zona plástica sobre el contorno de la excavación subterránea (que aumenta con la misma). La caracterización ha sido hecha con base en el perfil geológico y geotécnico de referencia del proyecto y con los nuevos datos geológicos obtenidos durante la campaña de investigaciones del presente estudio, identificándose sectores caracterizados por la presencia de roca sana, roca fracturada y zonas de fallas.

Permeabilidad del macizo (MK):

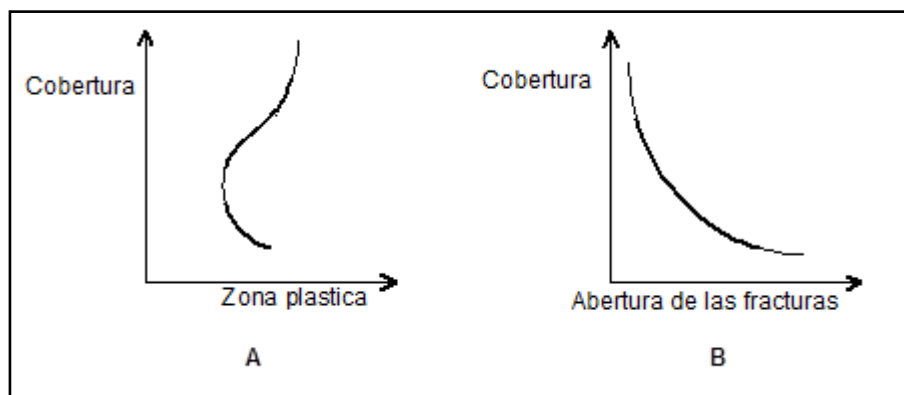
se trata del grado de permeabilidad asignado a los diferentes complejos hidrogeológicos reconocidos en el sistema *acuífero-túnel* e interceptados por el túnel. Tal variable toma en cuenta tanto la permeabilidad debida al componente homogéneo de la fracturación (conductividad de cada fractura en particular), como la permeabilidad intrínseca de la matriz

rocosa y describe un grado de permeabilidad equivalente de todo el sistema.

Espesor de la cobertura (OV):

El espesor de la cobertura influye en el efecto drenante del túnel ya sea en el entorno de la excavación, en la zona plástica, como en el macizo mismo, donde se observa un progresivo cierre de la fractura con la profundidad debido a la variación de las condiciones de esfuerzos locales. En la **Figura 5-2.124** se muestra un ejemplo del modelo conceptual.

Figura 5-2.124. Esquema de la influencia que la cobertura tiene sobre la amplitud de la zona plástica que se forma entorno de una excavación subterránea (A) y, a la escala del macizo, sobre la abertura media de las fracturas (B).



Fuente: Dematteis et. al, 2001 y 2007

Amplitud de la zona plástica (PZ):

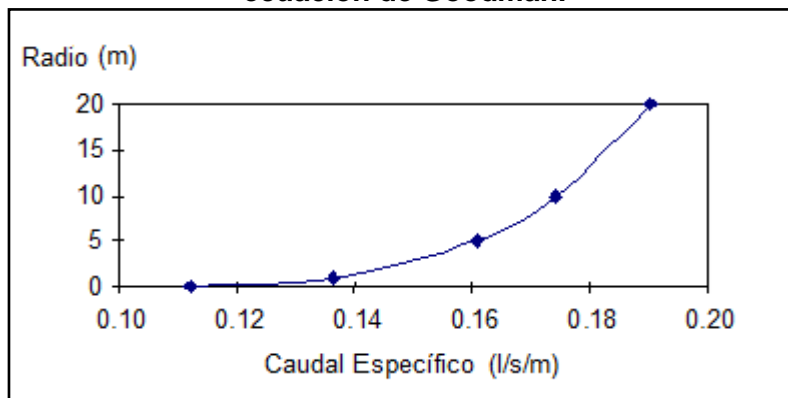
La zona plástica que se forma en el contorno de la excavación por efecto de la perturbación del campo local de esfuerzos corresponde a una franja de roca intensamente fracturada y por lo tanto de mayor permeabilidad; de amplitud variable entre 1 y 2 a 3 veces el diámetro de la excavación. La extensión de la zona plástica está en función del diámetro del túnel, del espesor de la cobertura, de la técnica de excavación adoptada y, más en general, de las características geomecánicas del macizo. El valor numérico de la variable PZ ha sido asignado en cada caso considerado a partir de las características geomecánicas del macizo rocoso.

Desde el punto de vista hidrogeológico, la zona plástica puede ser entendida como un volumen de roca donde aumenta el potencial drenante de la excavación, implicando un aumento del efecto drenante del túnel. La variación del efecto drenante al variar las dimensiones de la zona plástica puede ser simulado, en una primera aproximación, con enfoques analíticos tomados de la literatura (p.e. túnel que drena un acuífero no perturbado infinitamente extenso en un medio homogéneo, GOODMAN et al., 1965, BRUCE et al., 1980, ALBERTS & GUSTAFSON, 1983).

Asumiendo, por ejemplo, una conductividad hidráulica del macizo rocoso del orden de 10^{-6}

m/s y una carga hidráulica al nivel del túnel igual a 100 m, resulta como el radio del túnel influye de manera significativa en la cantidad de agua drenada (ver **Figura 5-2.125**). Si se asume que en la zona plástica la permeabilidad sea superior en uno o más órdenes de magnitud a aquella del macizo, entonces, al efecto drenante de la excavación se sumara a aquel de la zona plástica circunscrita en su contorno.

Figura 5-2.125. Relación entre el radio del túnel y el caudal drenado aplicando la ecuación de Goodman.



Fuente: Goodman et. al, 1965

En el caso que nos ocupa, en la valoración de la variable PZ se ha considerado una zona plástica de amplitud equivalente a dos veces el radio de la excavación.

- **Factores claves del sistema**

Distancia del túnel (DT):

Esta variable ha sido valorada determinando la distancia entre el punto de agua y el túnel. Para esto se considera la proyección en planta y la diferencia de cota. En presencia de zonas de falla, la distancia al túnel ha sido considerada a lo largo de la zona de falla, porque se supone que el hipotético flujo de agua que podría drenar al punto en análisis circulará a lo largo de esta dirección. Con base en la experiencia obtenida en contextos hidrogeológicos análogos, han sido asignados valores diversos para clases de distancia DT, asumiendo que, para distancias inferiores a 200 m, el efecto es máximo, y para distancias superiores a 5000 m, el efecto es despreciable.

Intersección con canales de permeabilidad alta (CP):

Esta variable toma en consideración la presencia de zonas de elevada conductividad hidráulica entre el punto de agua y el túnel. Desde un punto de vista geológico, este caso puede estar representado por zonas de falla, zonas de intensa fracturación, o por niveles con disolución química, carsismo o pseudo-carsismo. En el caso en el cual uno de estos canales de alta permeabilidad conecte hidráulicamente un punto de agua en superficie con el túnel, se crea una continuidad ideal entre los dos puntos. En estas condiciones la

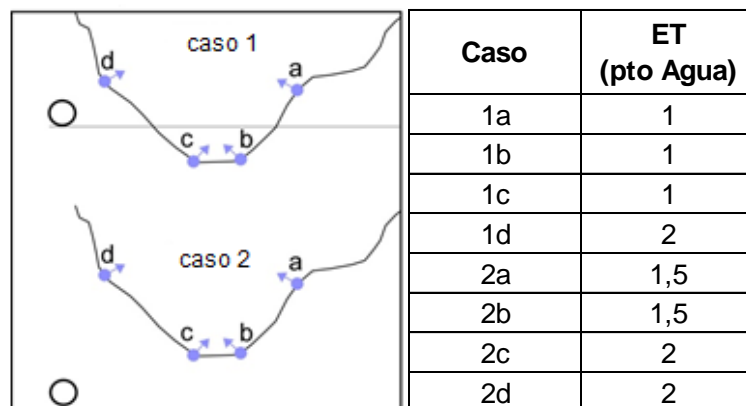
probabilidad de afectación del punto de agua crece drásticamente.

Para el caso en estudio se ha asumido una conexión punto de agua/túnel para todos aquellos puntos de agua situados a una distancia inferior o igual a 50 m de una zona de falla. En el contexto geológico interceptado por el túnel de Pamplonita, es posible la presencia de fenómenos de pseudo-carsismo especialmente en la formación Tibú-Mercedes.

Efecto topográfico (ET):

Se trata de una variable que considera el aspecto morfológico del contexto en el que se sitúa el punto de agua en evaluación. La recíproca posición del punto de agua y el túnel respecto al perfil topográfico de la ladera puede influir en la probabilidad de ocurrencia del fenómeno de drenaje. En el esquema conceptual de la **Figura 5-2.126** se muestran los casos posibles, así como su respectiva valoración numérica. El valor asignado a la variable ET asume valor de 1 para las condiciones de menor probabilidad de afectación y un valor de 2 para aquella de mayor probabilidad.

Figura 5-2.126. Esquema conceptual del efecto topográfico (ET). En la tabla de la izquierda se muestran los valores que asume ET para puntos de agua.



Fuente: Dematteis et. al, 2001 y 2007

En el caso de los puntos de agua, que pueden estar localizados sea sobre la ladera como en su parte inferior (pie), y por lo tanto no en el fondo del valle, se distinguen ocho (8) casos diferentes, que toman en cuenta la ubicación del punto de agua y el túnel sobre la misma ladera o sobre laderas diferentes y su recíproca posición en cota.

Tipo de puntos de agua (TS):

Esta variable valora el tipo de relación que el punto de agua tiene con el sistema de flujo hídrico subterráneo. Se distinguen tres tipos: superficiales, profundos y mixtos. En el caso de los puntos de agua superficiales (en adelante subsuperficiales) la manifestación hídrica

es alimentada desde los terrenos de cobertura cuaternaria o desde una variación local de la intensidad de fracturación y alteración de la parte cortical del sustrato; la surgencia hídrica en este caso se localiza frecuentemente en correspondencia con cambios morfológicos de la ladera y es alimentada por sistemas de flujos locales.

Los puntos de agua profundos son generalmente alimentados por sistemas de flujos más extensos, desarrollados al interior del macizo rocoso; los cuales pueden emerger en correspondencia con límites de permeabilidad representados por fallas o por contactos tectónicos o estratigráficos, muchos de ellos evidenciados por cambios fuertes en la topografía. Los puntos de agua mixtos representan un caso intermedio, presentando alimentación ya sea subsuperficial como profunda, con porcentajes variables.

En el caso en examen no se han encontrado casos de puntos de agua alimentados clara y exclusivamente por circuitos profundos en el área interceptada por el trazado del túnel de Pamplonita. Por lo tanto, todos los puntos censados han sido clasificados en su gran mayoría como subsuperficiales, con aportes menos relevantes de flujos mixtos.

Los puntos de agua con alimentación mixta representan un caso intermedio, contienen alimentación ya sea superficial como profunda, con porcentajes variables. La valoración asignada es la siguiente: 1a-punto de agua subsuperficial (1), 1b-Punto de agua Intermedio (1,5) y 1c-Puntos de agua Profundo (2).

A diferencia de las demás variables, que relacionan el punto de agua con la condición prevista a lo largo del túnel, el tipo de alimentación (TS) es específico de cada punto de agua examinado, independientemente de la presencia del túnel en análisis.

- **Definición del índice de las variables**

En la **Tabla 5-2.45** se definen las ocho (8) variables y su índice correspondiente, necesario para el cálculo del DHI.

Tabla 5-2.45. Descripción de las ocho (8) variables del sistema acuífero-túnel y definición de los índices correspondientes para los puntos de agua.

| Código | Descripción | Valor numérico |
|--------|-------------------------------|---|
| FF | Frecuencia de fracturación | 1 = fallas principales y/o zona de fracturación con desarrollo de morfología cárstica; 0,75 = zona de mayor fracturación y/o alteración hidrotermal (sin morfología cárstica); 0,1 = ausencia de fallas principales y/o zonas de fracturación y disolución. |
| MK | Permeabilidad del macizo | 0,9 = permeabilidad de alta a muy alta; 0,75 = permeabilidad alta; 0,5 = permeabilidad media; 0,25 = permeabilidad baja; 0,1 = permeabilidad baja a muy baja. |
| OV | Espesor de la cobertura | 0,9 = cobertura < 50 m; 0,5 = 50 m < cobertura < 100 m; 0,2 = 100 m < cobertura < 500 m; 0,1 = cobertura > 500 m |
| PZ | Extensión de la zona plástica | 1 = radio zona plástica > diámetro túnel; 0 = radio zona plástica < diámetro túnel. |

| Código | Descripción | Valor numérico |
|--------|---|--|
| DT | Distancia del túnel | 1,9 = dist. eje. < 200 m; 1,5 = 200 m < dist. eje. < 500 m; 1,2 = 500 m < dist. eje. < 1000 m; 1,1 = 1000 m < dist. eje. < 5000 m; 0 = dist. eje. > 5000 m |
| CP | Intersección canales con de permeabilidad | 2 = intersección con fallas mayores y/o zona de disolución con desarrollo de régimen hidrodinámico de tipo cárstico; 1,5 = presunta intersección (p.e. falla evidenciada en planta, pero no en el perfil, o puntos en el tramo de una zona de falla, sin la certeza que esté conectado a ella; 1 = ninguna intersección. |
| ET | Efecto topográfico | 2 = distancia vertical > 0 y misma ladera; 1 = túnel parietal y otra ladera o distancia vertical < 0 y misma ladera; 1,5 = distancia vertical > 0 y otra ladera. |
| TS | Tipo de Pto de agua | 2 = Puntos de agua profundo (alimentada desde el sustrato rocoso); 1,5 = puntos de agua mixto; 1 = puntos de agua subsuperficial (alimentada principalmente desde depósitos cuaternarios o cobertura del macizo rocoso). |

Fuente: Dematteis et. al, 2001 y 2007

• Definición del grado de afectación

El potencial de drenaje (PI), calculado de la matriz de la **Tabla 5-2.48**, es definido por la siguiente ecuación:

$$PI = (41 \cdot FF + 22 \cdot MK + 17 \cdot OV + 20 \cdot PZ) / 100 \quad (\text{Ecuación 17})$$

Los factores multiplicadores de las variables fundamentales que aparecen en la ecuación anterior han sido calculados mediante una matriz de interacción binaria y una matriz de interacción global.

El índice de probabilidad de afectación (DHI) es el producto del potencial de drenaje (PI) para los factores claves, normalizados respecto a su valor máximo:

$$DHI = PI \cdot CP \cdot TS \cdot DT \cdot ET \cdot 100 / DHI_{\max} \quad (\text{Ecuación 18})$$

El DHI_{\max} , que se obtiene de la condición teórica de mayor probabilidad de afectación del punto de agua (DT = 1,9; CP = 2; TS = 2; ET = 2; FF = 1; MK = 0,9; OV = 0,9; PZ = 1) es igual a 1460,72.

Con el fin de obtener un valor normalizado entre 0 y 1, se procede a relacionar cada punto de agua en examen con el máximo valor teórico indicado en el párrafo anterior (1460,72).

El valor DHI obtenido de esta manera, teóricamente variable entre 0 y 1, ha sido reagrupado en tres clases de probabilidad de afectación basado en una retroalimentación realizada sobre túneles ya excavados como por ejemplo el túnel Perthus localizado entre España-Francia y el túnel Villarodaine Bourget localizado en Francia (Torri & Dematteis, 2007). En la **Tabla 5-2.46** se indican las tres clases.

Tabla 5-2.46. Grado de probabilidad de afectación de los puntos de agua.

| DHI | DESCRIPCIÓN |
|-----|--------------------------|
| 1 | Muy Baja a imperceptible |
| 2 | Baja |
| 3 | De Media a Alta |

Fuente: Dematteis et. al, 2001 y 2007

5.1.8.14.3 Resultados

En este capítulo se resumen los resultados correspondientes al estudio de impacto sobre los puntos de agua representativos presentes en el área circundante al túnel de Pamplonita. El método empleado para su valoración corresponde al DHI (*Drawdown Hazard Index*), antes descrito.

Del análisis de la distribución de las distintas clases de probabilidad de afectación para los 18 puntos de agua representativos objeto de este análisis en la zona circundante al túnel de Pamplonita, resultó lo siguiente (ver **Tabla 5-2.47**):

- 16 puntos de agua resultan con un índice DHI igual a 1, es decir, en ellos no se prevé afectación o ésta es despreciable desde el punto de vista probabilístico. Estos puntos representan el 83% del total de puntos relacionados con los túneles del corredor vial.
- 2 puntos de agua resultan con un índice DHI igual a 2, es decir, en ellos se prevé una probabilidad de afectación baja. Estos puntos representan el 17% del total.
- 0 puntos de agua resultan con un índice DHI igual a 3, es decir, en ningún punto de agua se prevé una probabilidad de afectación media a alta.

Tabla 5-2.47. Potencial de impacto sobre los puntos de agua representativos localizados en la zona de influencia del túnel de Pamplonita.

| DHI | DESCRIPCIÓN | CANTIDAD | % |
|-------|--------------------------|----------|------|
| 1 | Muy baja a imperceptible | 10 | 83% |
| 2 | Baja | 2 | 17% |
| 3 | Alta | 0 | 0% |
| TOTAL | | | 100% |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

En la Tabla 5.2.49 se muestran los puntos de agua subterránea que presentan alguna probabilidad de afectación, especificando el tipo de punto y el caudal medido.

Tabla 5-2.48. Cálculo valor DHI para los puntos de agua representativos en el túnel de Pamplonita.

| CODE | TYPE | KEY FACTORS OF WATER-POINTS | | | | FUNDAMENTAL VARIABLES OF THE SYSTEM | | | | | RESULTS | |
|----------|-------------|-----------------------------|-----------------------|------------------|--------------------|-------------------------------------|------------------------|------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------|
| | | Distance from the Tunnel | Permeability Channels | Water-point type | Topographic Effect | Fracture Frequency | Rock Mass Permeability | Overburden | Plastic Zone Radius | Potential of Inflow | Drawdown Hazard Index | |
| | | DT | CP | TS | ET | FF | MK | OV | PZ | PI | DHI value | DHI class |
| UF3-PA01 | manantial | 1,5 | 1 | 1,5 | 2 | 0,00 | 0,25 | 0,9 | 1 | 0,41 | 0,13 | 1 |
| UF3-PA06 | manantial | 1,2 | 1 | 1 | 2 | 0,00 | 0,25 | 0,5 | 1 | 0,34 | 0,06 | 1 |
| UF3-PA07 | resurgencia | 1,2 | 1 | 1 | 2 | 0,00 | 0,25 | 0,5 | 1 | 0,34 | 0,06 | 1 |
| UF3-PA08 | manantial | 1,2 | 1 | 1 | 2 | 0,00 | 0,25 | 0,9 | 1 | 0,41 | 0,07 | 1 |
| UF3-PA28 | resurgencia | 1,9 | 1,5 | 1 | 1 | 1,00 | 0,5 | 0,5 | 1 | 0,81 | 0,19 | 2 |
| UF3-PA29 | manantial | 1,9 | 1 | 1,5 | 1 | 0,00 | 0,25 | 0,5 | 1 | 0,34 | 0,08 | 1 |
| UF3-PA30 | interflujo | 1,9 | 1 | 1 | 2 | 0,00 | 0,25 | 0,5 | 1 | 0,34 | 0,09 | 1 |
| UF3-PA32 | interflujo | 1,9 | 1 | 1 | 2 | 0,00 | 0,25 | 0,5 | 1 | 0,34 | 0,09 | 1 |
| UF3-PA52 | resurgencia | 1,5 | 1 | 1 | 2 | 0,00 | 0,25 | 0,9 | 1 | 0,41 | 0,08 | 1 |
| UF3-PA53 | resurgencia | 1,5 | 1 | 1 | 2 | 0,00 | 0,25 | 0,9 | 1 | 0,41 | 0,08 | 1 |
| UF3-PA54 | resurgencia | 1,5 | 1,5 | 1 | 2 | 1,00 | 0,25 | 0,5 | 1 | 0,75 | 0,23 | 2 |
| UF3-PA55 | antropico | 1,5 | 1 | 1 | 2 | 0,00 | 0,25 | 0,5 | 1 | 0,34 | 0,07 | 1 |
| UF3-PA61 | resurgencia | 1,9 | 1 | 1 | 2 | 0,00 | 0,25 | 0,5 | 1 | 0,15 | 0,01 | 1 |
| UF3-PA62 | resurgencia | 1,9 | 1 | 1 | 2 | 0,00 | 0,25 | 0,5 | 1 | 0,12 | 0,01 | 1 |
| UF3-PA63 | manantial | 1,9 | 1 | 1 | 2 | 0,00 | 0,25 | 0,5 | 1 | 0,17 | 0,02 | 1 |
| UF3-PA64 | manantial | 1,9 | 1 | 1 | 2 | 0,00 | 0,25 | 0,5 | 1 | 0,14 | 0,01 | 1 |
| UF3-PA65 | manantial | 1,9 | 1 | 1 | 2 | 0,00 | 0,25 | 0,5 | 1 | 0,13 | 0,03 | 1 |
| UF3-PA66 | resurgencia | 1,9 | 1 | 1 | 2 | 0,00 | 0,25 | 0,5 | 1 | 0,11 | 0,02 | 1 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

Tabla 5-2.49. Puntos de agua representativos según probabilidad de impacto DHI localizados en la zona de influencia del túnel de Pamplonita.

| CÓDIGO | TIPO DE PUNTO | Fecha | Caudal (l/s) | Permanencia | Usuarios | Valor DHI |
|----------|---------------|--------|----------------------|-----------------|----------|-----------|
| UF3-PA01 | Manantial | nov-17 | 0,079 | Perenne | SI | 1 |
| | | jul-18 | 0,0177 | | | |
| UF3-PA06 | Manantial | nov-17 | 0,027 | Perenne | NO | 1 |
| | | jul-18 | 0,028 | | | |
| UF3-PA07 | Resurgencia | nov-17 | 0,074 | Perenne | NO | 1 |
| | | jul-18 | 0,025 | | | |
| UF3-PA08 | Manantial | nov-17 | 0,010 | Perenne | SI | 1 |
| | | jul-18 | 0,125 | | | |
| UF3-PA28 | Resurgencia | nov-17 | 0,109 | Sin Información | NO | 2 |
| | | jul-18 | - | | | |
| UF3-PA29 | Manantial | nov-17 | 0,13 | Sin Información | NO | 1 |
| | | jul-18 | 0,2 | | | |
| UF3-PA30 | Interflujo | nov-17 | 0,04 | Intermitente | NO | 1 |
| | | jul-18 | Humedad | | | |
| UF3-PA32 | Interflujo | jul-18 | No se puede encausar | Intermitente | NO | 1 |
| UF3-PA52 | Resurgencia | abr-18 | 0.024 | Perenne | SI | 1 |
| UF3-PA53 | Resurgencia | abr-18 | 0.08 | Perenne | NO | 1 |
| UF3-PA54 | Resurgencia | abr-18 | 0.025 | Perenne | NO | 2 |
| UF3-PA55 | Antropico | abr-18 | 0,021 | Perenne | SI | 1 |
| UF3-PA61 | Resurgencia | abr-18 | 0.13 | Perenne | NO | 1 |
| UF3-PA62 | Resurgencia | abr-18 | 0.14 | Perenne | NO | 1 |
| UF3-PA63 | Manantial | abr-18 | 0.98 | Perenne | NO | 1 |
| UF3-PA64 | Manantial | abr-18 | 0.91 | Perenne | NO | 1 |
| UF3-PA65 | Manantial | abr-18 | 1.02 | Perenne | NO | 1 |
| UF3-PA66 | Resurgencia | abr-18 | 0.99 | Perenne | NO | 1 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018.

5.1.8.14.4 Medidas de prevención, mitigación y compensación específicas para el área del túnel.

Medidas de Prevención en el área del túnel

Con el objetivo de evitar la existencia de conductos de flujo directo que puedan generar un drenaje de las aguas del macizo hacia el túnel, se prevé la clausura de los piezómetros en el tramo inferior de 20 metros sobre la cota clave del túnel, de manera previa al inicio de las excavaciones.

La clausura de la franja inferior de los piezómetros se realiza mediante la intrusión de una lechada de concreto con aditivo retardante y aditivo impermeabilizante, de tal forma que se selle completamente el ducto generado al interior del tubo en la sección de interés.

Medidas de Protección en el área del túnel

Aplican las mismas medidas definidas para los puntos generales en el numeral 5.1.8.11.3

Medidas de Mitigación en el área del túnel

Las medidas de mitigación más efectivas encaminadas a disminuir la potencial afectación que la obra subterránea pudiera ejercer sobre los diferentes puntos de agua y recursos hídricos presentes en superficie, son aquellas que se planifican y ejecutan simultáneamente con la construcción del túnel.

Según los resultados de estas medidas y eventuales hallazgos de conductos saturados de mayor tamaño al esperado (caudales más altos a los caudales críticos, que se encuentren en las perforaciones de avanzada), se prevén también medidas de mitigación contingentes.

En este sentido se indican a continuación las medidas de mitigación consideradas para el túnel de Pamplonita.

-1. Medidas de Mitigación Estándar en el área del túnel

a. Excavación parcial o por etapas en terrenos de calidad geotécnica pobre a muy pobre (RMR<45), incluidas zonas de falla.

En el túnel de Pamplonita estos terrenos lo constituyen principalmente las arcillolitas y areniscas muy meteorizadas y cizalladas que en mayor o menor grado integran la formación Barco que serán interceptadas por el túnel (E1b).

Las posibles medidas de mitigación a aplicar se relacionan directamente con los

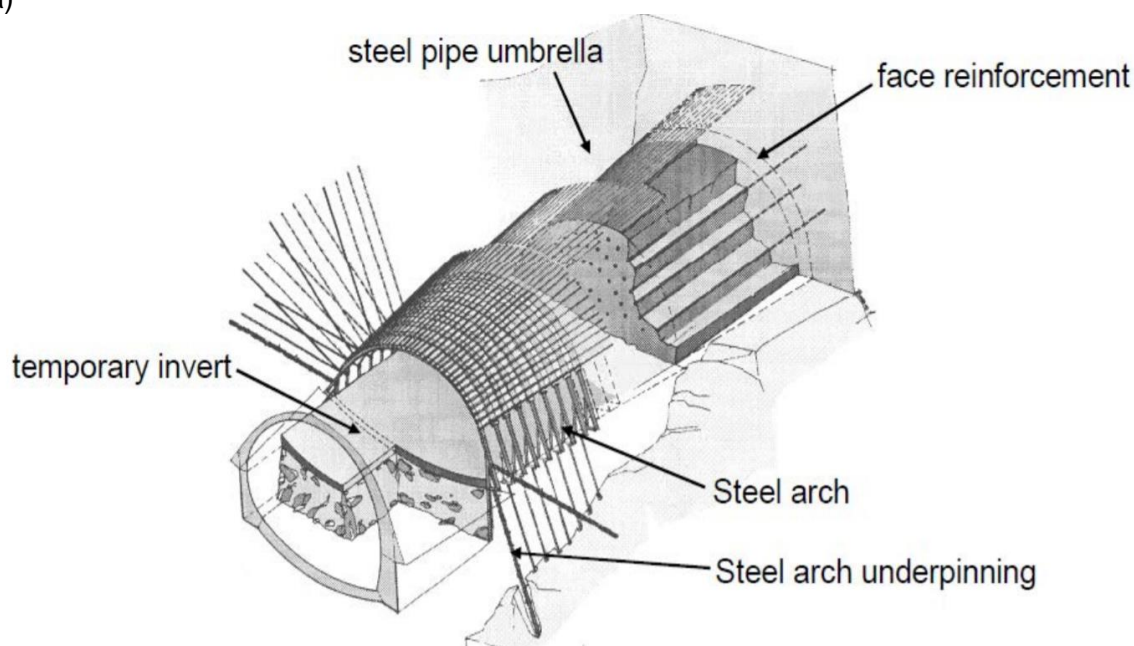
procedimientos constructivos, desde dos variantes, una del propio proceso de la voladura y otra del cambio de metodología constructiva.

Para minimizar la aureola de perturbación alrededor del túnel y asegurar la estabilidad de la excavación en estos terrenos complejos y con potencial drenante, la excavación se podrá ejecutar mediante avances en sección completa con pases de entre 0,5 a 1,0 m de longitud, disminuyendo las cargas efectivas de material explosivo y adaptando en lo posible los esquemas de tiro, o en su caso mediante medios mecánicos, dependiendo de las condiciones reales observadas en el frente de trabajo. Podrá optarse por avances bajo paragua de micropilotes en clave, de hasta 12m de longitud, que den soporte a la clave y hombros del túnel. Todo ello previa inspección y evaluación de los frentes diariamente por parte de personal facultado en la toma de decisiones del equipo de construcción.

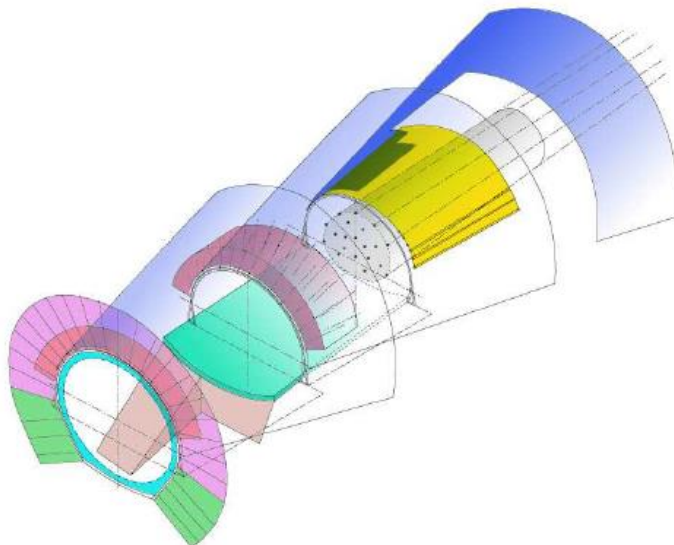
En la **Figura 5-2.127** se muestra una secuencia esquemática que ilustra de manera general el proceso por etapas antes descrito y en la **Figura 5-2.128** se muestra una sección tipo específica considerada para el túnel de Pamplonita (sección SC-Va).

Figura 5-2.127. (a y b) Secuencia de excavación por etapas en terrenos de muy mala calidad geotécnica. NATM.

(a)

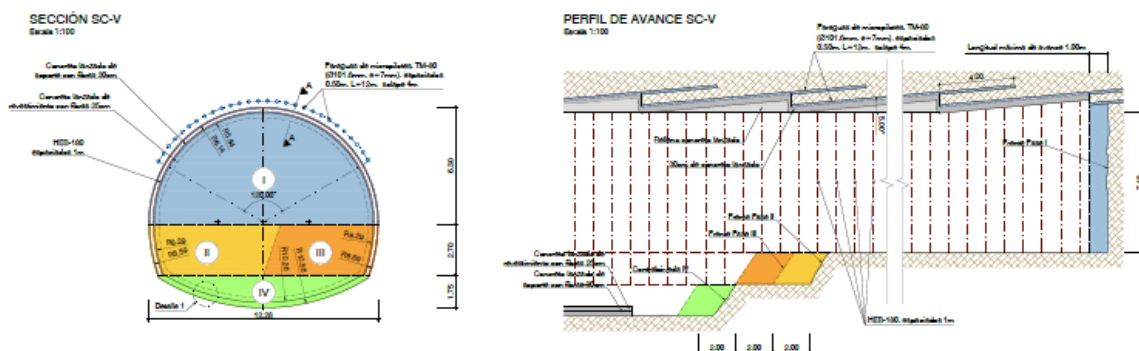


b)



Fuente: Geodata S.p.A.

Figura 5-2.128. Túnel de Pamplonita, sección tipo SC-V, secuencia de excavación por etapas en terrenos de muy pobre calidad geotécnica. NATM.



Fuente: Informe IX Túnel de Pamplonita_UF3_02, Geoconsult 2018

b. Excavación con técnica especial de voladuras para terrenos de calidad geotécnica regular ($45 < \text{RMR} < 60$), buena ($60 < \text{RMR} < 75$) y muy buena ($\text{RMR} > 75$).

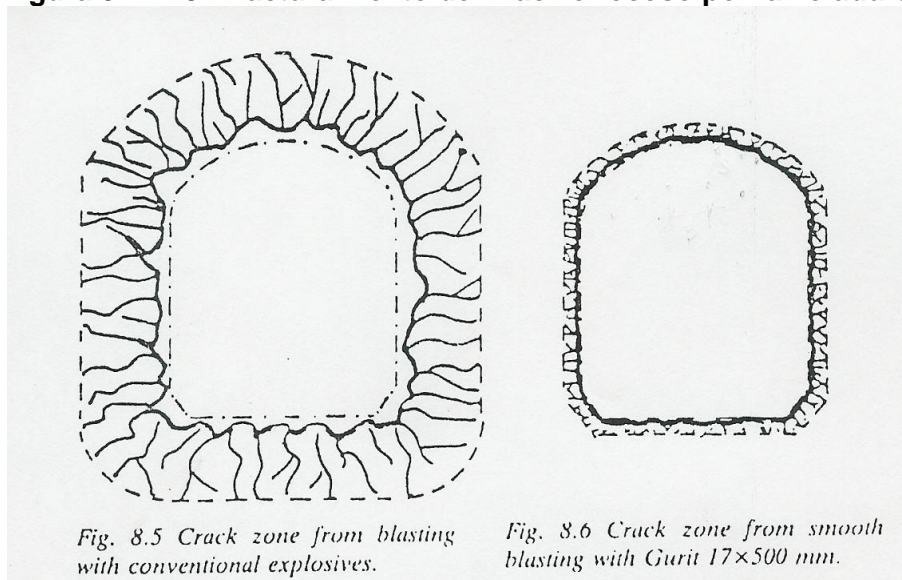
En el túnel de Pamplonita estos terrenos lo constituyen principalmente los diferentes niveles de areniscas y arcillolitas consolidadas que integran en mayor o menor grado las formaciones geológicas que serán interceptadas por el túnel, pertenecientes a la Formación Barco.

Para el abatimiento de la roca en terrenos de calidad regular hasta muy buena, se utilizará

la técnica conocida como “smooth blasting” o voladuras lisas, la cual prevé, entre otros aspectos, el uso de cargas desacopladas, según esquema de tiro adoptado y menor cantidad de explosivo por metro lineal en aquellos barrenos ubicados en el perímetro del túnel (incluso uso de precorte), que finalmente determinarán la línea de excavación. Esto con el propósito de limitar o controlar la zona de fracturación debida a la propagación de la onda explosiva en el macizo rocoso. Limitando de esta manera la extensión de la zona de fracturación o perturbación en torno al túnel excavado y en consecuencia el efecto drenante del mismo.

En la **Figura 5-2.129**, se ilustra esquemáticamente el efecto de la onda explosiva en un macizo rocoso cuando se utilizan explosivos convencionales y explosivos desacoplados previstos en las voladuras lisas (smooth blasting).

Figura 5-2.129. Fracturamiento del macizo rocoso por la voladura.



Fuente: Indumil.

-2. Medidas de Mitigación Contingentes en el área del túnel

Se realizan sólo en el caso que los caudales de infiltración superen los caudales críticos y que las medidas estándar de mitigación no sean suficientes para controlar la filtración de aguas desde el macizo, por encima de dichos caudales críticos. Es necesario tener presente que los bajos caudales de infiltración que se esperan a medida que se avanza mediante los métodos de excavación previstos, permiten suponer que las medidas estándar serán efectivas para lograr mantener un nivel de sello hidráulico razonable en las paredes del túnel.

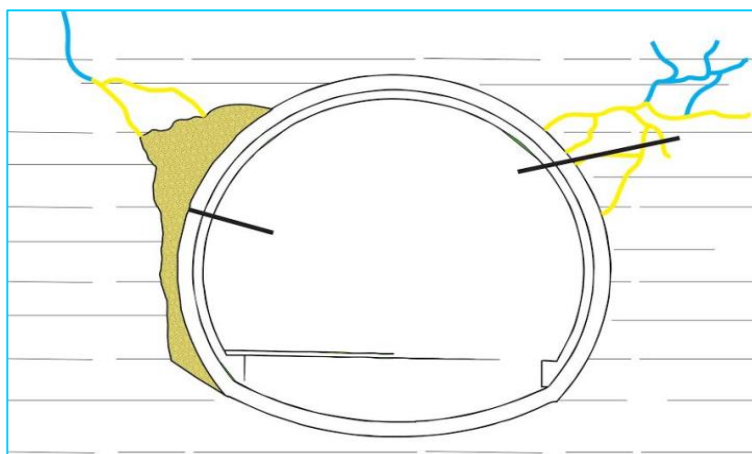
Inyecciones de impermeabilización del macizo rocoso.

No obstante, lo antes indicado, una medida de choque para mitigar un eventual efecto drenante significativo del túnel sobre su entorno consiste en el tratamiento a través de inyecciones de las zonas de falla y/o zonas más fracturadas a través de las cuales se detecten o se observen flujos puntuales significativos.

En el presente documento se propone un protocolo para implementar las eventuales medidas de impermeabilización relacionadas con inyecciones en los sitios hidrogeológicamente más críticos, sin entrar en el diseño particular de las mismas.

Como esquematización conceptual de este procedimiento, se presenta en la **Figura 5-2.130** un dibujo con la representación del llenado de fisuras como sello hidráulico, donde se muestra en amarillo el material que se inyecta para generar el sello y en azul el volumen de agua retenido en las fisuras al interior del macizo gracias al sello aplicado. En color café se observa un eventual relleno estructural del cuerpo del túnel el cual se utiliza como elemento constructivo mas no como sello hidráulico.

Figura 5-2.130. Post-inyecciones de impermeabilización contingentes.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

Consideraciones Generales de las inyecciones de impermeabilización

En los sectores de excavación del túnel de Pamplonita en los cuales de acuerdo con el modelo geológico, geomecánico e hidrogeológico se prevé la presencia de zonas de fallas, zonas más fracturadas y/o zonas de mayor permeabilidad del macizo rocoso a través de las cuales se pueden instaurar flujos significativos con el potencial de abatir el nivel piezométrico y afectar los recursos hídricos subterráneos y/o superficiales, se recomienda mantener una especial atención a los caudales de infiltración encontrados pues es en aquellas zonas donde se podría evidenciar con mayor probabilidad un aumento del caudal

de infiltración por encima del caudal crítico del tramo. Los sectores potencialmente críticos son reportados en la **Tabla 5-2.50**.

Tabla 5-2.50. Tramos del túnel de Pamplonita donde de acuerdo con el perfil geológico y geotécnico se prevé encontrar zonas de fallas y/o zonas de mayor fracturación y/o zonas de mayor permeabilidad.

| Geología | | | Progresiva | | Longitud Tramo |
|----------------|-------------|---|------------|------------|----------------|
| Roca | Falla | | desde | hasta | |
| | | | m | m | |
| Fm Barco (E1b) | Arenisca | F | K47+230,00 | K47+240,00 | 10,00 |
| | Arcillolita | F | K47+295,00 | K47+305,00 | 10,00 |
| | Arenisca | F | K47+415,00 | K47+420,00 | 5,00 |
| | Arcillolita | F | K47+420,00 | K47+425,00 | 5,00 |
| | Arenisca | F | K47+515,00 | K47+525,00 | 10,00 |
| | Arenisca | F | K47+690,00 | K47+700,00 | 10,00 |
| | Arenisca | F | K47+750,00 | K47+760,00 | 10,00 |
| | Arenisca | F | K47+970,00 | K47+980,00 | 10,00 |
| | Arenisca | F | K48+075,00 | K48+085,00 | 10,00 |
| | Arcillolita | F | K48+150,00 | K48+160,00 | 10,00 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

La identificación preventiva de estas zonas de falla y/o zonas de mayor fracturación que eventualmente interconecten zonas saturadas y semisaturadas con el túnel, se muestran en el perfil geológico e hidrogeológico (Anexo 5.1.3.8). Se recomienda que estas zonas potencialmente críticas sean sistemáticamente controladas durante el avance de la excavación, con observación directa de cada nuevo frente, por personal especializado del equipo de construcción y levantamiento de una ficha control de las distintas observaciones como diaclasas, presencia de agua, RMR, RQD, juntas y demás aspectos a tener en cuenta.

En determinado caso, ante casos de presencia importante de caudal de infiltración, podrían llegar a realizarse perforaciones exploratorias ejecutadas por delante del frente, que permitan la verificación directa de la presión y cantidad de agua presente en el macizo.

En el caso que se requieran las intervenciones de impermeabilización a través de inyecciones en las zonas de falla, zonas fracturadas y/o zonas de mayor permeabilidad presentes en el macizo rocoso, donde la presencia de las filtraciones de agua sean notorias (según umbrales de caudales críticos), se debe prever el uso de diferentes tipos de

lechadas estables de baja densidad y con grado de fluidez variable, de acuerdo a la permeabilidad del terreno tratado; utilizando cemento ordinario para permeabilidades de altas a medias y microcementos de granulometría adecuada para permeabilidades medias a bajas.

Protocolo propuesto de aplicación de las inyecciones

Considerando el hecho que la aplicación de inyecciones implica la inclusión de materiales ajenos al macizo rocoso y aunque el nivel de contaminación de estos es considerado bajo, de todas formas, en los tramos de túnel previstos en la **Tabla 5-2.50** resulta conveniente limitar su uso a aquellos sectores que realmente lo requieran, en caso de que se haga indispensable su implementación.

Con este propósito se propone a continuación un protocolo de aplicación de las inyecciones, que toma en cuenta las reales condiciones geológicas, estructurales, hidrogeológicas y constructivas encontradas durante la excavación del túnel. Este protocolo es aplicable tanto en suelo como en roca, en aquellas condiciones que se detecten sean necesarias aplicar por problemas de sostenimiento del frente de excavación o por ser actuaciones necesarias para preservar condiciones hidrogeológicas actuales.

- Paso 0, Aseguramiento de la excavación. De acuerdo con el tipo de terreno encontrado y el agua de infiltración presente entre el frente de excavación y los últimos 10 m de túnel excavado (incluido el frente mismo), se procede a asegurar el tramo de túnel excavado mediante la instalación oportuna del soporte o sostenimiento previsto en el diseño o el que se considere luego del levantamiento geomecánico realizado por personal calificado.
- Paso 1, Caso en el cual no se considera necesario el uso de inyecciones. Se da en el caso de que no se presente flujo de agua proveniente del macizo rocoso o esta sea muy escaso, donde se tenga un caudal observado por debajo de los parámetros que definen el caudal crítico. No se considera necesario realizar ningún pretratamiento del terreno y se podrá continuar con la excavación de este tramo de túnel.
- Paso 2, Caso en el cual se debe proceder con la implementación de inyecciones. Si esto se requiere por la presencia de agua existente en el avance, donde se presente un flujo de agua con un caudal mayor al caudal crítico del tramo (definido precedentemente) proveniente del macizo rocoso o terreno, se deberá proceder con la aplicación de inyecciones de acuerdo con el diseño que para tal efecto haya sido considerado, esto, antes de dar continuidad a la excavación o avance del túnel.

El diseño de las inyecciones deberá tomar en cuenta el tipo de terreno o macizo rocoso encontrado y la presencia de agua proveniente del mismo. Se deben definir con claridad como mínimo los siguientes aspectos:

- a. Extensión de la aureola de impermeabilización alrededor de la excavación.

- b. Cantidad de barrenos a ejecutar en el perímetro de la excavación (distancia radial entre barrenos).
- c. Longitud, diámetro, traslapes, direccionalidad e inclinación de los barrenos.
- d. Diseño de la mezcla a emplear (tipos de materiales a emplear, granulometría, relación A/C, control de calidad, entre otros), parámetros y criterios de inyección (caudal, volumen, presión, entre otros), metodología de inyección (ascendente, descendente, entre otros), registros de parámetros de inyección, definición de los equipos de inyección (perforadora, bombas, mezcladores, circuitos de inyección, obturadores, entre otros).
- e. Las inyecciones se realizarán hasta alcanzar la condición de que el flujo remanente de agua no supere el caudal crítico ($Q_{\text{remanente}} \leq Q_{\text{crítico}}$) o hasta que la presión de inyección de la lechada en la última perforación realizada de máximo 6 m de longitud, sobrepase la presión inicial de la primera inyección ejecutada en el área, con flujo de agua superior al caudal crítico, en un 75%.

Durante la construcción del túnel por cada frente de excavación, se clasificará geomecánicamente el macizo rocoso o terreno encontrado (p.e. utilizando RMR, Q). Mientras que, en superficie, se recomienda, realizar simultáneamente el monitoreo previsto en los puntos de agua y cursos de aguas superficiales que integran la red de monitoreo.

Igualmente se realizará por parte del área de ingeniería la medición del caudal de infiltración con determinación de parámetros fisicoquímicos in situ para estas aguas (conductividad, PH, temperatura, ORP, oxígeno disuelto), a través de las perforaciones con barreno ejecutadas para las voladuras. Sin embargo, se tendrá presente no interferir con las actividades del frente de excavación, así como realizar las pruebas in situ preferiblemente en horas de relevo.

Todos los datos recopilados deben ser analizados integralmente como mínimo cada 50 m de túnel excavado; esto con el objeto de retroalimentar las previsiones realizadas en los estudios hidrogeológicos, particularmente en lo que respecta a la actualización de los caudales críticos. Las inyecciones previstas pueden ser optimizadas durante la excavación del túnel con base en las reales condiciones geológicas e hidrogeológicas encontradas, debidamente evidenciadas y analizadas.

Medidas de Compensación en el área del túnel

En el supuesto poco probable de que no sean efectivas las medidas de mitigación definidas, se prevén medidas de compensación convencionales o “estándar” y medidas de compensación contingentes o “especiales”.

La **Tabla 5-2.51** ilustra la estrategia de intervenciones a prever para la compensación del riesgo en función de la probabilidad de ocurrencia de la afectación de los recursos hídricos. Estas intervenciones se deben enfocar de acuerdo con el uso que tengan los puntos de agua y el potencial de afectación de acuerdo con la metodología DHI.

Tabla 5-2.51. Descripción del tipo de intervención en relación con la probabilidad de impacto atribuida a los puntos de agua analizados.

| Clase DHI | Probabilidad | Intervención sugerida |
|-----------|--------------|---|
| 1 | despreciable | Ningún tipo de intervención prevista |
| 2 | baja | Prever el diseño de intervenciones o estrategias que permitan el aprovisionamiento de agua potable alternativo de emergencia y transitorio de acuerdo con el uso que la comunidad les da a las fuentes de agua. |
| 3 | media - alta | Prever el diseño de intervenciones o estrategias que permitan el aprovisionamiento de agua potable alternativo permanente de acuerdo con el uso que la comunidad les da a las fuentes de agua. |

Fuente: Dematteis et. al, 2001 y 2007

Las intervenciones sugeridas han sido clasificadas como intervenciones de emergencia, transitorias y definitivas.

- Las intervenciones de emergencia permiten el aprovisionamiento provisional con fuentes alternas (p.e. carrotanques), pueden ser previstas también como medidas de mitigación sólo para los puntos de agua clasificados con probabilidad de impacto bajo (DHI=2).
- Las intervenciones transitorias contemplan la conexión a redes de acueducto existentes, una vez conocida la real magnitud del impacto. Este tipo de intervención se prevé sólo para los puntos de agua clasificados con impacto bajo (DHI=2). Mientras se aplica la medida transitoria bien podría continuar operando la utilización de vehículos cisterna con una frecuencia establecida a un plazo definido.
- Las intervenciones de aprovisionamiento de agua como alternativa permanente contemplan la conexión a nuevas fuentes o nuevas redes, para ser construidos en el caso que las condiciones lo ameriten, una vez conocida la real magnitud del impacto. Este tipo de intervención se prevé sólo para los puntos de agua clasificados con impacto medio a alto (DHI=3). Una medida transitoria bien podría convertirse en una solución definitiva si la disponibilidad del recurso hídrico satisface la demanda o servir de paliativo mientras se aplica la medida permanente.

-1. Medidas de Compensación Convencionales

Aplican las mismas medidas definidas para los puntos generales en el numeral 5.1.8.11.3

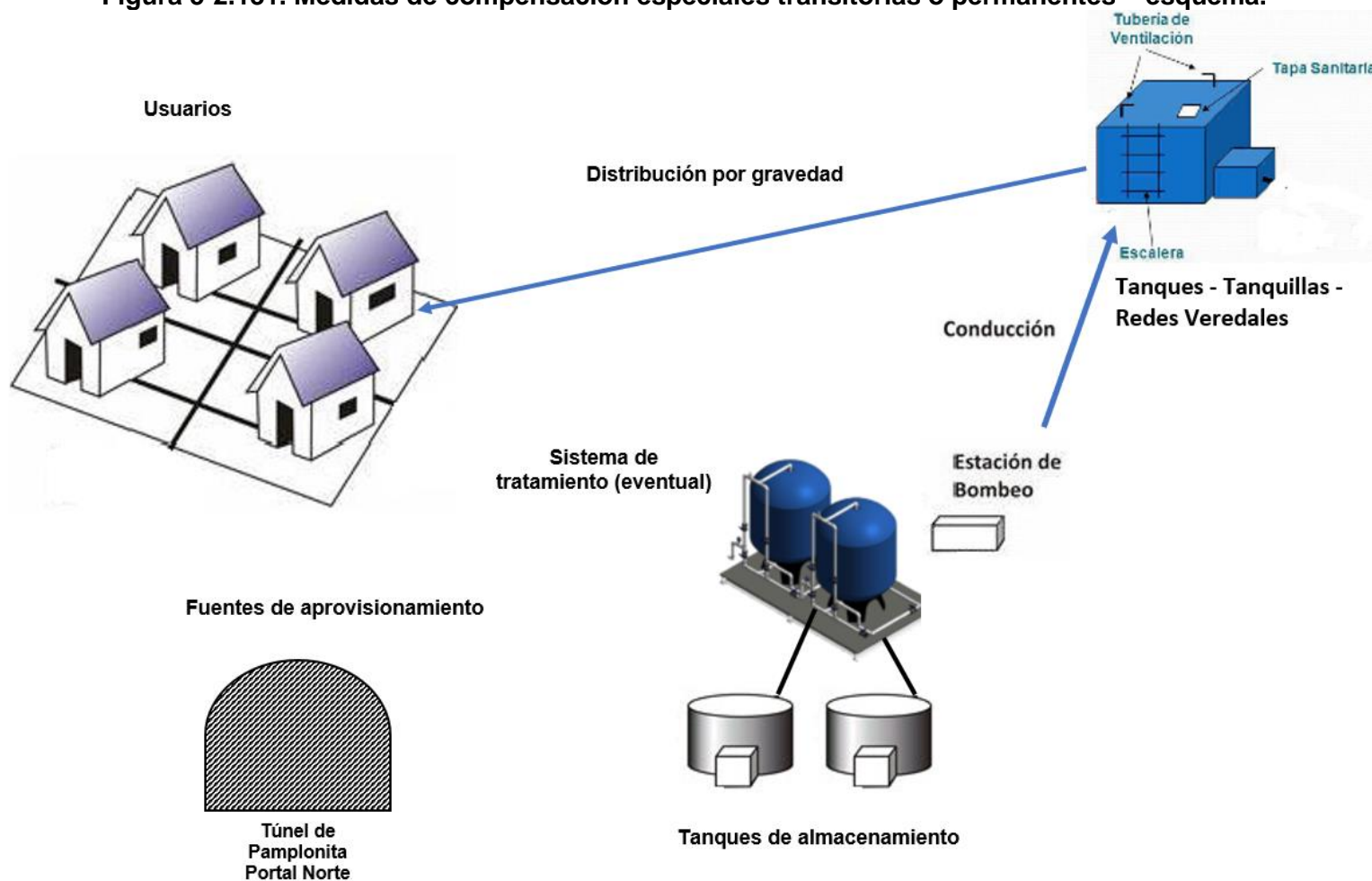
Las medidas citadas requerirán para su implementación viabilidad técnica y económica avalada por parte del Concesionario.

-2. Medidas de Compensación Contingentes

En el caso del túnel de Pamplonita es posible prever como medidas compensatorias especiales en el caso que las circunstancias lo requieran, tanto de carácter provisional o permanente, el aprovisionamiento de agua proveniente de la excavación del túnel. Para este caso específico se puede llegar a utilizar bien sea el agua drenada durante el proceso constructivo o el agua proveniente de perforaciones específicas ejecutada en el interior del túnel. Siempre que sea posible se recomienda utilizar el agua derivada del segundo caso, dado que al ser un flujo puntual es posible conducirlo directamente hasta la zona de acopio o tratamiento evitando su contaminación con el agua industrial, facilitándose de esta manera su depuración o tratamiento en el caso que fuera necesario aplicarlo.

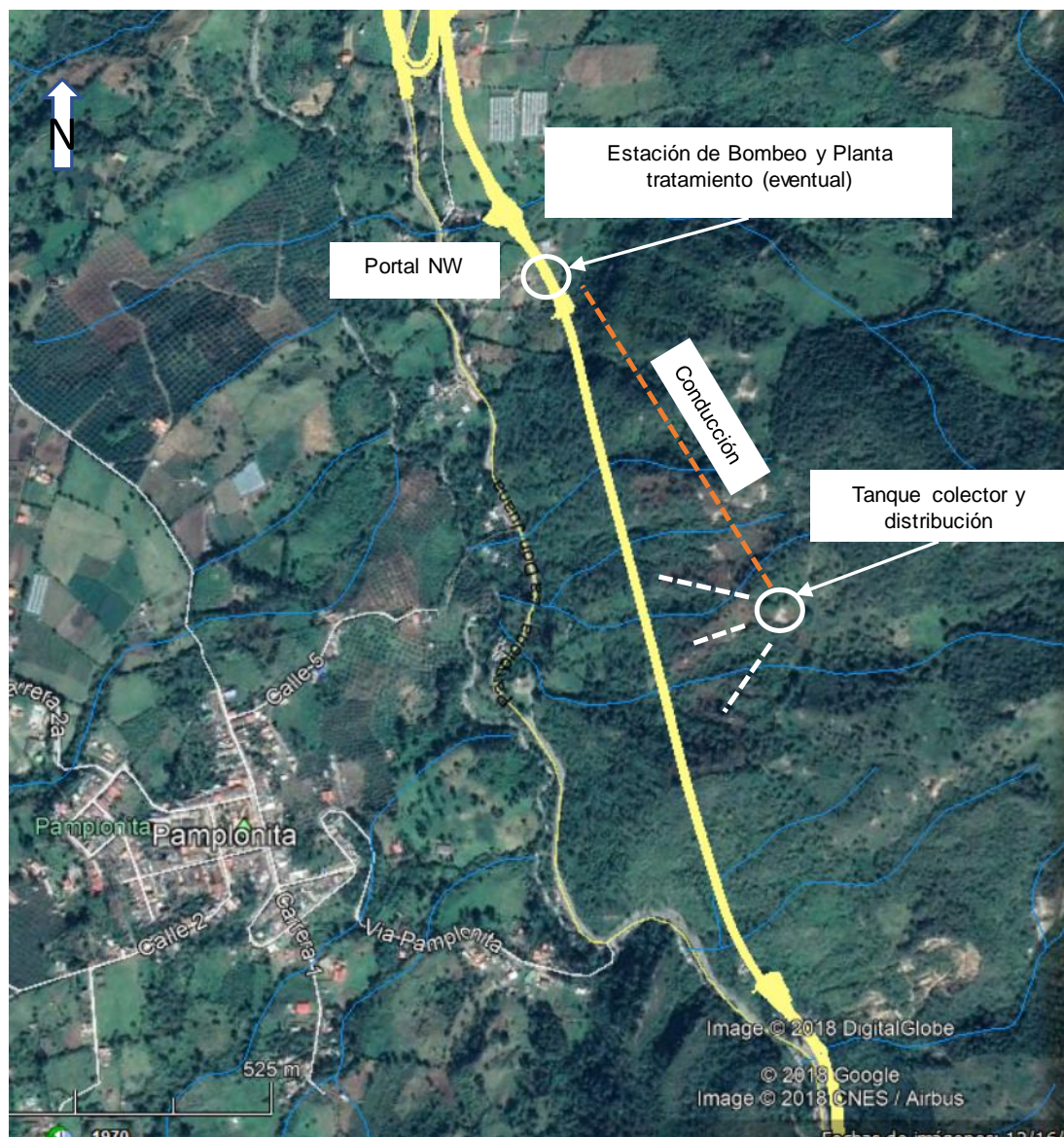
De acuerdo con la inclinación de la pendiente del túnel de Pamplonita el agua que se capte en su interior o que sea drenada durante su excavación fluirá hacia el portal NW, y es posible establecer un sistema similar al mostrado en la **Figura 5-2.131**, el cual servirá como medida provisional y/o permanente para el suministro de agua en caso de evidenciarse un impacto significativo en los recursos hídricos a causa de la excavación del túnel de Pamplonita. En la **Figura 5-2.132** se muestran los principales puntos que integran la primera medida de compensación prevista. Otra alternativa se presenta en la **Figura 5-2.133**.

Figura 5-2.131. Medidas de compensación especiales transitorias o permanentes – esquema.



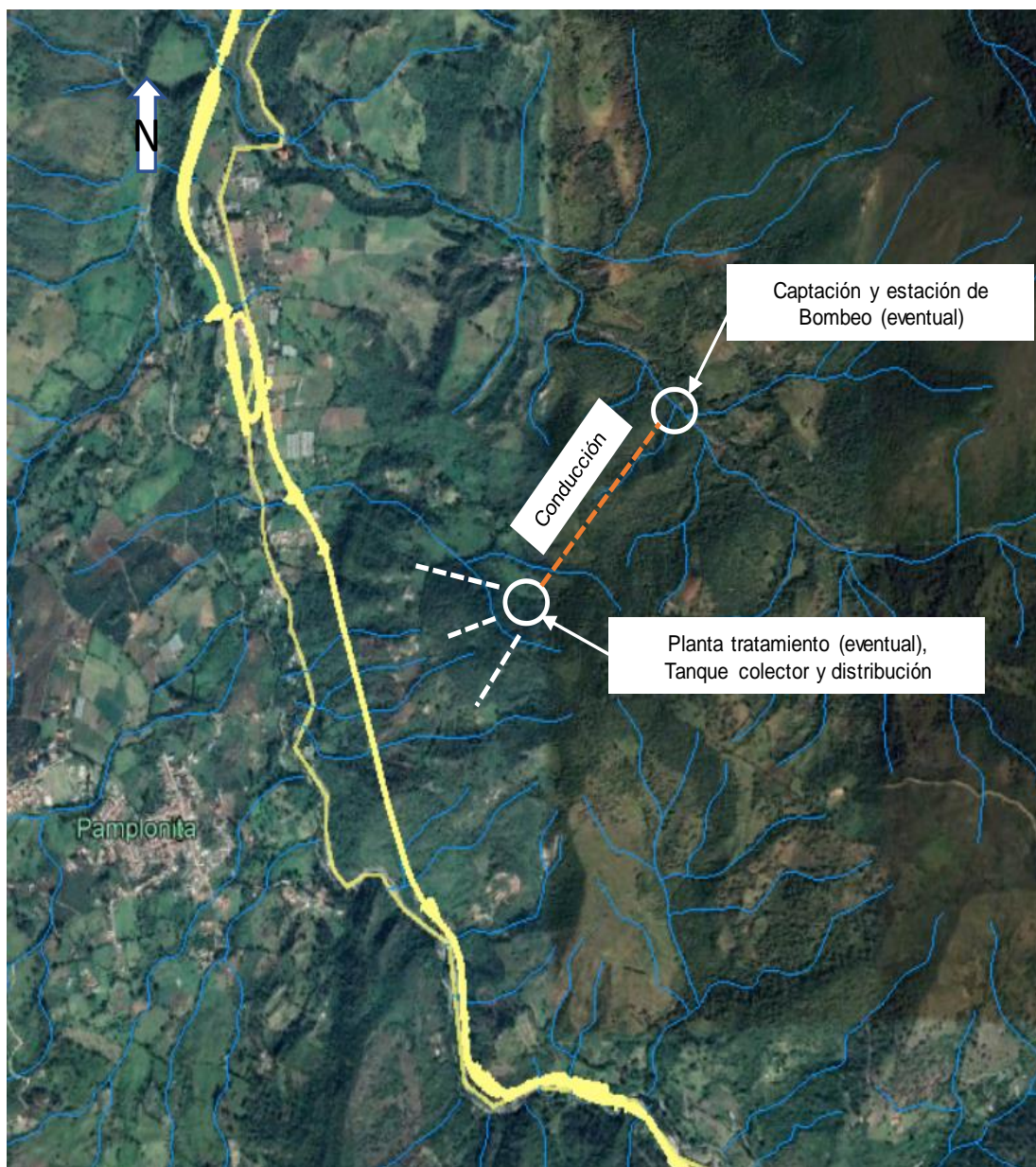
Fuente: Adaptación del sistema implementado en el Túnel 8, Ruta del Sol, 2018 (Cortesía gestión ambiental Túnel 8).

Figura 5-2.132. Medidas de compensación estándar transitorias o permanentes – localización (1).



Fuente: Aecom – Concol, 2018

Figura 5-2.133. Medidas de compensación estándar transitorias o permanentes – localización (2).



Fuente: Aecom – Concol, 2018

Medidas contingentes alternativas

En el caso en que las circunstancias de línea base se alteren previamente al inicio de las obras y en el que todas las estrategias de medidas de manejo previstas no logren a cabalidad el efecto deseado, se pueden aplicar las siguientes medidas.

A nivel de conservación de caudales superficiales:

- Canalización de las quebradas o sello hidráulico en enrocado para evitar infiltración del agua que discurre por los cauces hacia el macizo.
- Colocación de tubería o mangueras para transportar el agua de las quebradas en los tramos afectados sobre el túnel, para conservar el flujo.

A nivel de aumento de la recarga al macizo:

- Construcción de micropresas sobre los cauces.
- Implementación de campos de infiltración de aguas naturales.

En el caso en que se verifiquen descensos acelerados en los niveles piezométricos medidos sobre el túnel, se propone instalar micropresas elaboradas con sacos de suelo-cemento o bolsacretos, a intervalos de entre 20 y 30 metros y con alturas de 1.5 m, sobre los cauces principales asociados a las escorrentías superficiales en el área sobre el túnel o en sus inmediaciones, de tal forma que las escorrentías superficiales generadas por eventos de lluvias sean retenidas el mayor tiempo posible sobre puntos en el cauce en material permeable con lo que se aumenta la infiltración a través de dicho material en dirección vertical hacia la zona más permeable del macizo. Esta estrategia se aplicaría de manera paralela a las mencionadas anteriormente.

5.1.8.15 Modelo numérico del flujo subsuperficial y subterráneo Túnel de Pamplonita

5.1.8.15.1 Introducción

El uso de la simulación numérica de los flujos subterráneos en el ámbito del estudio de impacto ambiental conexo con la realización del túnel de Pamplonita nace de la exigencia de verificar las condiciones hidrogeológicas observadas en campo y deducidas del análisis de los datos a disposición que han permitido definir el modelo hidrogeológico conceptual. A continuación, se describen los elementos de base considerados en la construcción de las secciones a lo largo de las cuales se han realizado los modelos numéricos.

Los análisis cruzados de los datos disponibles han puesto en evidencia una serie de

elementos específicos que describen un contexto hidrogeológico complejo que difícilmente puede ser subestimado y simplificado a través de una representación tridimensional de gran escala que corra el riesgo de no considerar elementos estructurales e hidrodinámicos que influyen en modo determinante en la organización y distribución de los flujos subterráneos entorno al trazado del túnel. Además, como normalmente se verifica en el diseño de obras viales de carácter lineal, las investigaciones exploratorias se concentran a lo largo del trazado y no permiten tener elementos suficientes para caracterizar el modelo geológico e hidrogeológico de referencia a escala regional lo cual es determinante para la correcta implementación de un modelo tridimensional.

Por estos motivos, es más efectivo utilizar un enfoque numérico de tipo 2D con sección vertical capaz de simular las condiciones de flujo específicas alrededor del túnel, representando con suficiente detalle las estructuras evidenciadas por las investigaciones disponibles sin que la incertidumbre de las condiciones de flujo a gran escala influyan fuertemente en el entorno más próximo al túnel, el cual, como ya mencionado concentra la mayoría de las investigaciones realizadas y por lo tanto el mayor grado de conocimiento.

El modelo numérico ha sido construido en modo coherente con el modelo conceptual presentado en el capítulo 5.1.8.12, y con las características hidrogeológicas valoradas mediante trabajo de campo, ejecución de pruebas en perforaciones y análisis de los datos obtenidos durante los inventarios de puntos de agua. El cálculo numérico toma en consideración además los resultados de la prospección geoelectrica y la valoración de la recarga de los acuíferos.

Por las razones expuestas se aplicó el enfoque de la modelización numérica 2D con sección vertical con el objeto de aprovechar al máximo la información primaria disponible, la cual se encuentra concentrada a lo largo de la traza del túnel y alcanza su cota en profundidad. De este modo las simulaciones de los circuitos hídricos en roca se realizan con un mejor detalle, permitiendo verificar su interacción con la presencia del túnel y los posibles impactos sobre los puntos de agua vinculados con los terrenos de cobertura o acuíferos subsuperficiales (tipo de puntos de agua). Adicionalmente, este tipo de análisis numérico se cruza con la metodología DHI (Drawdown Hazard Index) que sigue un camino separado, pero persigue el mismo fin en lo que ha valoración de impactos se refiere. Otro aspecto importante que complementa la modelación 2D realizado en el presente informe lo constituye la valoración de la recarga a través del método Kennessy, explicado en el capítulo 5.1.8.12.3, con lo cual no se le confía a una sola herramienta de análisis la valoración hidrogeológica del túnel de Pamplonita.

Han sido seleccionadas tres secciones en cortes verticales en correspondencia con los sectores más representativos hidrogeológicamente del túnel de Pamplonita. Estas secciones son.

- Sección numérica_S1

Localización en el túnel: PK48+089

Sondeo/piezómetro de referencia: S36-PZ07
Condición de cobertura: Baja cobertura (30 metros)
Carga hidráulica: 0-10 m (nivel piezométrico cercano o en correspondencia con la clave del túnel)
Condición hidrogeológica analizada: Flujo en roca en condiciones de baja carga hidráulica.

- Sección numérica_S2

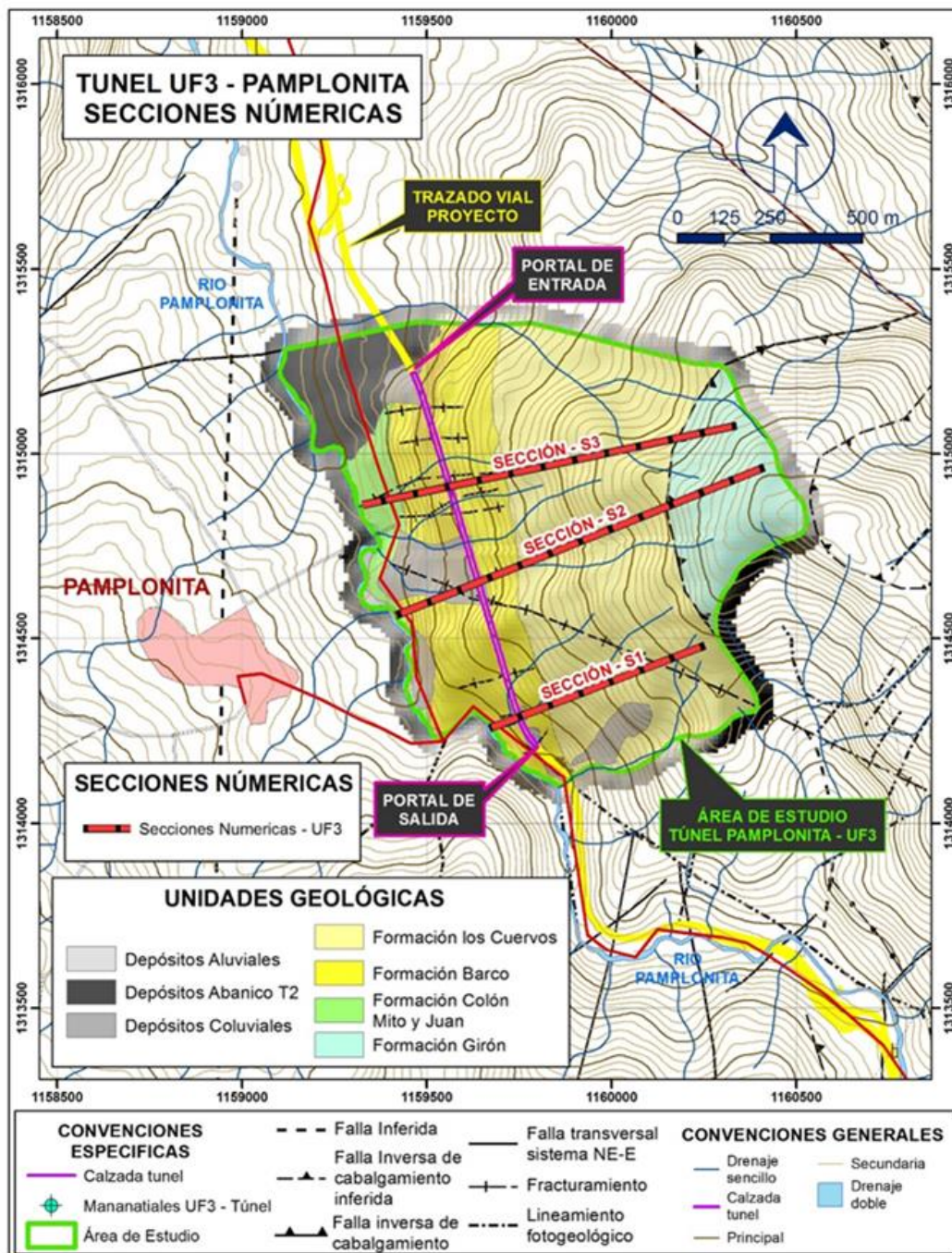
Localización en el túnel: PK47+700
Puntos de agua en superficie: UF3-PA54
Sondeo/piezómetro de referencia: S35
Condición de cobertura: Cobertura media-alta (80 metros)
Carga hidráulica: 10-15 m
Condición hidrogeológica analizada: Distribución de los flujos a lo largo de una falla e interacción entre flujos en roca y flujos colgados en superficie que alimentan los puntos de agua cerca al eje del túnel

- Sección numérica_S3

Localización en el túnel: PK47+570
Punto de agua en superficie: UF3-PA29
Condición de cobertura: Cobertura media a alta (85 metros)
Carga hidráulica: 15-20 m
Condición hidrogeológica analizada: Distribución de los flujos a lo largo de una falla e interacción entre flujos en roca y flujos colgados en superficie que alimentan los puntos de agua en la parte baja del valle del Río Pamplonita.

Las tres secciones antes descritas se ilustran en la **Figura 5-2.134**.

Figura 5-2.134 Trazado del eje de las secciones a través de las cuales se realizaron los modelos numéricos en sección vertical.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

5.1.8.15.2 Principales elementos considerados en la simulación numérica.

Las secciones consideradas representan las condiciones hidrogeológicas más representativas que serán encontradas durante la excavación del túnel de Pamplonita. Los elementos de "input" se derivan directamente del modelo hidrogeológico conceptual precedentemente elaborado y han permitido validar los resultados obtenidos en función de los siguientes elementos:

- ✓ Geometría del acuífero, distinguiendo zonas saturadas o parcialmente saturadas de aquellas secas utilizando el resultado de:
 - Tomografías eléctricas longitudinales y perpendiculares al túnel de Pamplonita
 - Líneas sísmicas;
- ✓ Permeabilidades de las unidades hidrogeológicas derivadas de información primaria (pruebas in situ tipo Lefranc, Lugeon y slug), a través de las cuales se profundizó en el conocimiento del comportamiento hidráulico de:
 - Basamento rocoso;
 - Zonas de falla;
 - Horizontes de alteración del basamento rocoso (suelos residuales);
 - Depósitos cuaternarios de origen aluvial y coluvial principalmente.
- ✓ Recarga de los acuíferos (régimen pluviométrico), derivada del estudio específico de valoración de la recarga realizado para el túnel de Pamplonita;
- ✓ Zona de descarga natural del nivel freático y piezométrico (Puntos de agua y cursos de aguas superficiales); derivada del inventario de puntos de agua y conocimiento hidrográfico del sector;
- ✓ Límites a flujo nulo (límites laterales y de base de las unidades hidrogeológicas), tomados considerando el entorno geológico e hidrogeológico de la zona de estudio, en particular la presencia del mayor elemento hidrográfico representado por el Río Pamplonita.

Para cada sección numérica se ha considerado la geometría del túnel de Pamplonita.

- ✓ Diámetro de la sección tipo;
- ✓ Cobertura topográfica.

La simulación numérica se realizó tomando únicamente la sección del túnel de Pamplonita por ser este la principal obra subterránea que al superar ampliamente la sección de la galería condicionará en su entorno las direcciones del flujo subterráneo.

El comportamiento de las secciones ha sido seleccionado en modo tal de poder representar los puntos de agua en superficie con la finalidad de poder valorar la interacción entre la excavación del túnel y estos puntos de agua;

Los resultados obtenidos permiten su valoración y seguimiento durante las sucesivas fases de construcción de las obras sea a corto como a largo plazo. Particularmente, considerando los siguientes elementos:

- ✓ Variación del nivel piezométrico;
- ✓ Variación de las direcciones de flujo;
- ✓ Caudales esperados al interior de los túneles;
- ✓ Variación de los regímenes hidráulicos de los principales puntos de agua presente en la zona de influencia del proyecto.
- ✓ Variación del macizo rocoso realmente encontrado durante construcción del túnel

5.1.8.15.3 Método de modelación

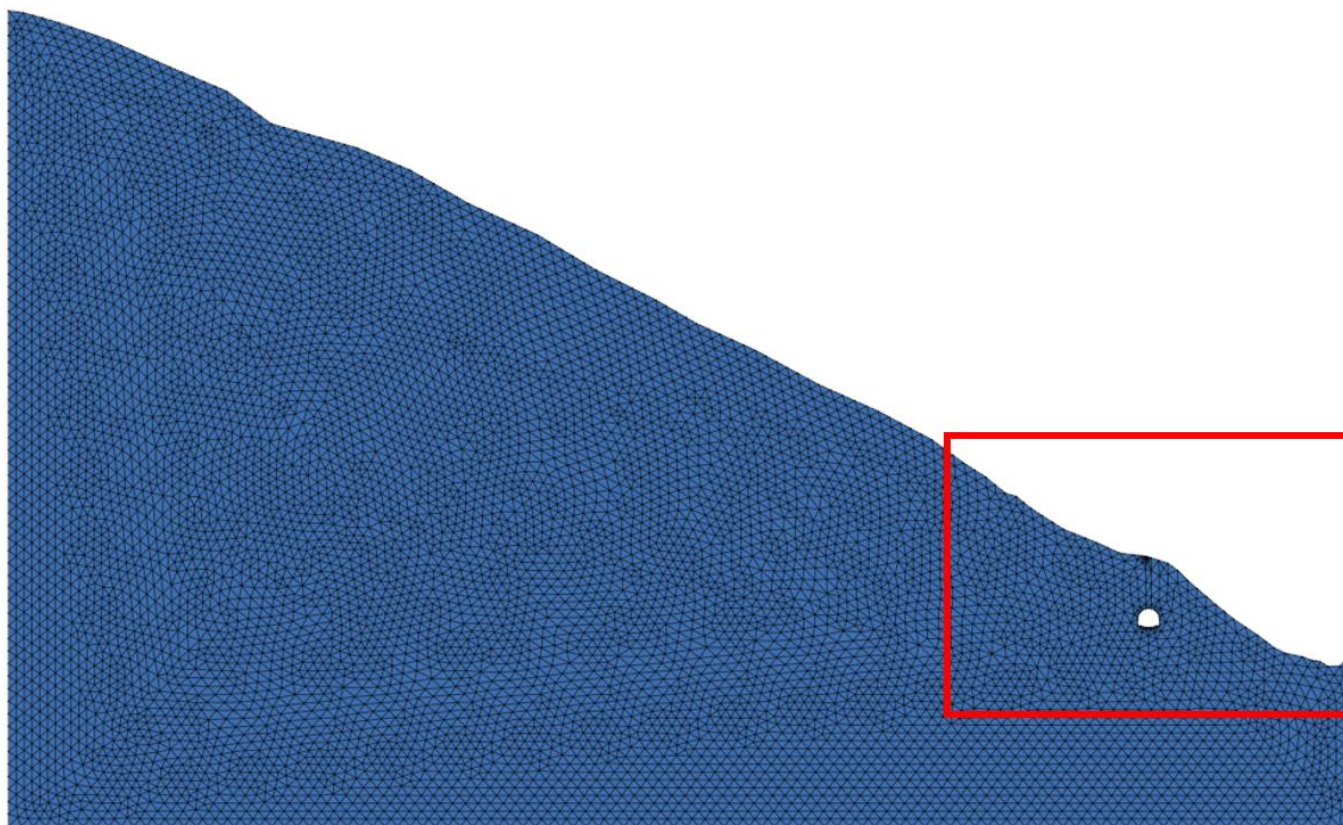
Los tres modelos numéricos fueron realizados en dos etapas:

1. Fase de calibración en estado estacionario con condiciones de contorno coherentes con el modelo conceptual elaborado con base en los datos disponibles;
2. Fase de simulación en estado transitorio de las condiciones de drenaje que se genera con la excavación del túnel. El efecto dren del túnel de Pamplonita ha sido verificado en diferentes tiempos, comenzando desde la apertura de la excavación y en particular para los siguientes momentos:
 - a. 1 día
 - b. 10 días
 - c. 100 días
 - d. 1 año;
 - e. 2 años
 - f. 5 años
 - g. 10 años

El modelo numérico ha sido construido utilizando el método de elementos finitos, código Feflow 7.0 (Wasy AG, Berlin) que aplica la ley de Darcy en todas sus partes. El código Feflow es uno de los más potentes, reconocidos y ampliamente aceptados por la comunidad científica internacional, además, el hecho de utilizar elementos finitos permite una mejor discretización de los elementos a modelar dando mayor fiabilidad a los resultados.

La discretización del dominio de simulación ha sido hecha aplicando una grilla de celdas triangulares realizando un afinamiento de la grilla en inmediaciones del túnel, a lo largo de los contactos geológicos y hacia la superficie topográfica, esto con el fin de poder simular con mayor maniobrabilidad los flujos en correspondencia con aquellos sectores donde se prevé una mayor curvatura de las líneas de flujo. En las figuras que siguen se muestran las grillas a lo largo de las tres secciones consideradas. Los recuadros en rojo indican el encuadre utilizado usado para mostrar en detalle los elementos del modelo cerca al túnel.

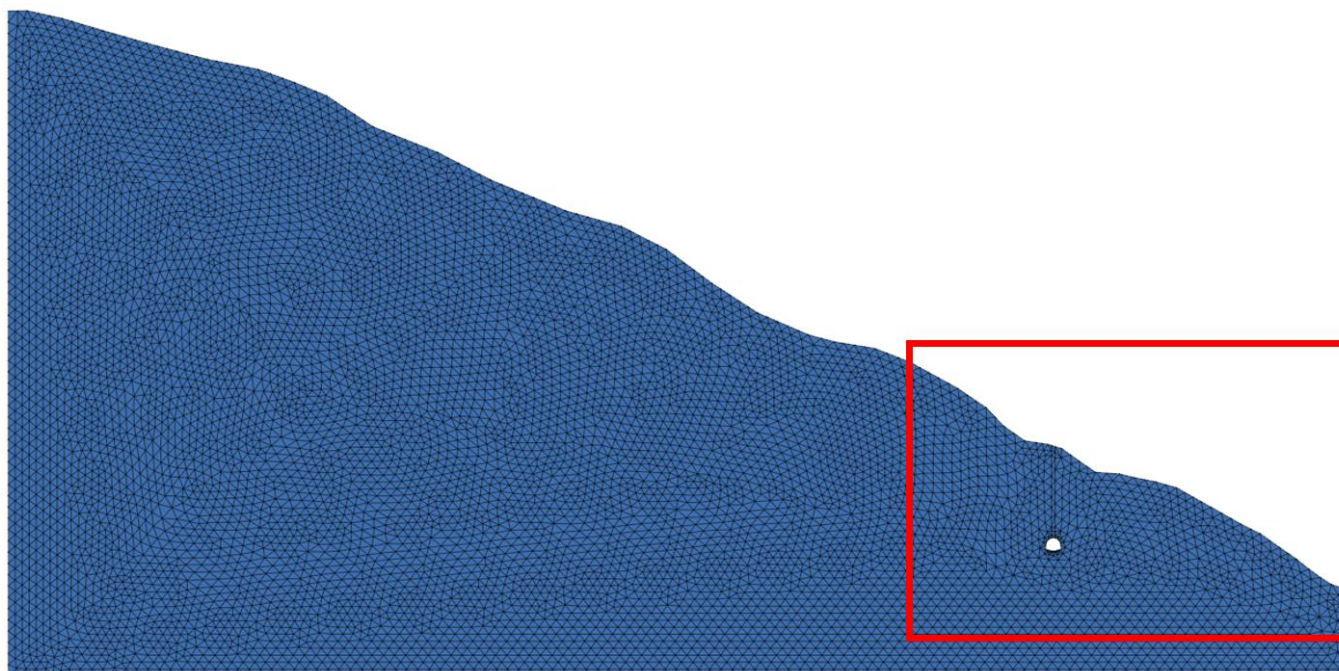
Figura 5-2.135 Grilla utilizada para el modelo numérico a lo largo de la sección S1.



Nótese el mayor detalle de la grilla en correspondencia con la superficie topográfica y del sector en el cual será excavado el túnel para simulación en condiciones de flujo "post-operam". Numero de celdas: 22'925; número de nodos: 11'631.

Fuente: Aecom – Concol, 2018

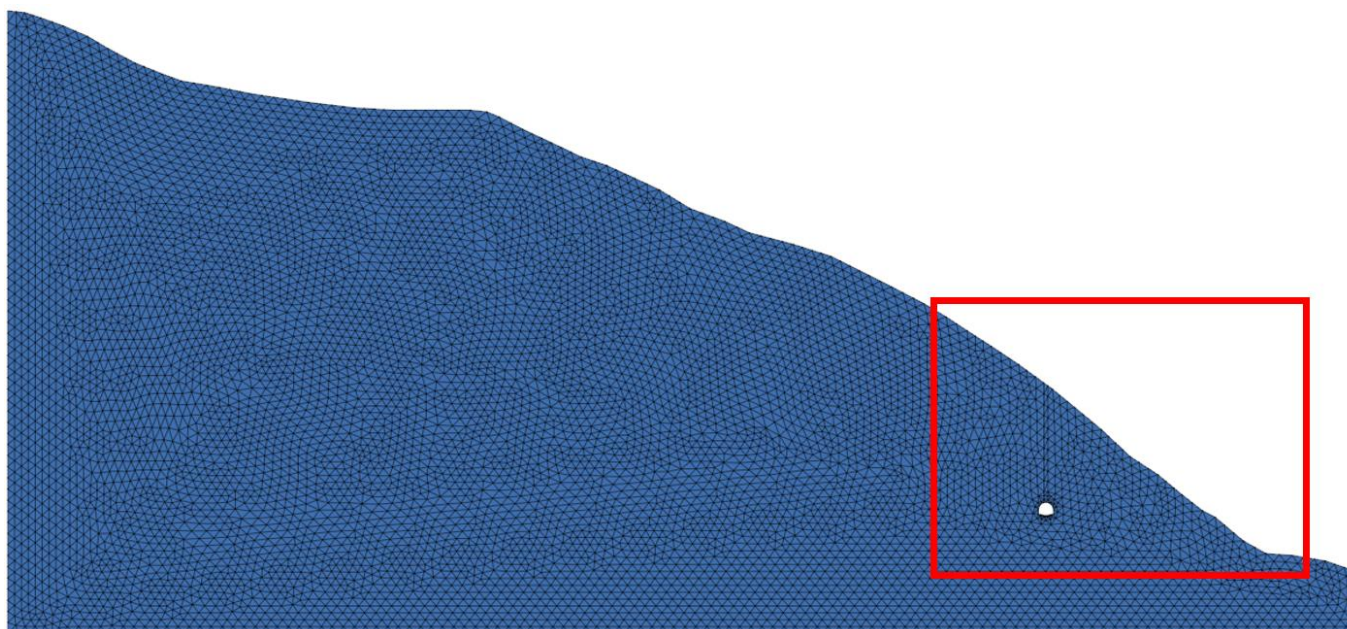
Figura 5-2.136 Grilla utilizada para el modelo numérico a lo largo de la sección S2.



Se nota el mayor detalle de la grilla en correspondencia con la superficie topográfica y del sector en el cual será excavado el túnel para simulación en condiciones de flujo “post-operam”. Numero de celdas: 60'433; número de nodos: 30'576.

Fuente: Aecom – Concol, 2018

Figura 5-2.137 Grilla utilizada para el modelo numérico a lo largo de la sección S3.



Se nota el mayor detalle de la grilla en correspondencia con la superficie topográfica y del sector en el cual será excavado el túnel para simulación en condiciones de flujo "post-operam". Numero de celdas: 46'791; número de nodos: 23'714.

Fuente: Aecom – Concol, 2018

La extensión lateral de las secciones ha sido considerada de acuerdo con el modelo hidrogeológico conceptual, teniendo en cuenta además la cobertura y carga hidráulica por encima del túnel. Hacia el noroccidente (NE), las secciones han sido prolongadas hasta el límite hidrográfico de la cuenca que involucra el macizo rocoso en el cual será excavado el túnel. A continuación, se relaciona cada sección en particular:

- ✓ El límite NE de la sección S1 se encuentra a aprox. 500 m del eje del túnel, la cobertura en este caso es reducida y del orden de aprox. 30 m.
- ✓ El límite NE de la sección S2, se encuentra a unos 800 m del eje del túnel; la cobertura en este caso es de aprox. 80 m, que representa la cobertura más frecuente a lo largo del trazado del túnel;
- ✓ El límite NE de la sección S3, se encuentra a unos 800 m del eje del túnel; la cobertura en este caso es de aprox. 85 m,

Hacia el sector sureste (SW), la simulación se ha realizado considerando el límite hidráulico representado por el Río Pamplonita que drena el acuífero en roca interceptado por la excavación del túnel.

A tales límites, en las condiciones de flujo simulado tanto en sentido NE como SW, la perturbación sobre los flujos subterráneos debido al efecto drenante del túnel es nula.

5.1.8.15.4 Parametrización, corrida y calibración del modelo

Los tres modelos fueron calibrados en estado estacionario con el fin de simular las condiciones hidrodinámicas no perturbadas verificando las condiciones de contorno en modo tal de poder simular la presencia de puntos de agua y los piezómetros que se encuentran alineados a lo largo de las secciones teniendo en cuenta los resultados del estudio de recarga.

Los datos piezométricos disponibles en las áreas adyacentes a las zonas consideradas en las simulaciones indican una profundidad variable del nivel piezométrico. Por lo tanto, con el fin de calibrar el modelo se ha considerado que las condiciones de flujo simuladas deben permitir la verificación de la superficie piezométrica de acuerdo con las mediciones reportadas en la **Tabla 5-2.52**.

Tabla 5-2.52. Resultados de las calibraciones de los modelos considerando los valores de la cota piezométrica medida en el eje del túnel.

| Sección (código) | Piezómetro (código) | cota medida nivel piezométrico (msnm) | cota simulada nivel piezométrico (msnm) | diferencia (m) |
|---------------------|------------------------|--|--|-------------------|
| S1 | S36 | 1688,7 | 1690,2 | 1,46 |
| S2 | S35 | 1684,2 | 1685,6 | 1,34 |

| Sección (código) | Piezómetro (código) | cota medida nivel piezométrico (msnm) | cota simulada nivel piezométrico (msnm) | diferencia (m) |
|---------------------|---------------------------------|--|--|-------------------|
| S3 | Nivel de Agua sobre el túnel | 1677 | 1677,8 | 0,79 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

En el caso de la sección No. 3, al no contar con medidas piezométricas, se ha optado por calibrar el modelo utilizando la proyección de la superficie piezométrica indicada en el perfil hidrogeológico elaborada con base en los datos obtenidos de los piezómetros instalados.

La calibración en todos los casos considerados presenta valores de cálculo del nivel piezométrico muy cercanos a aquellos obtenidos con mediciones directas, con diferencias comprendidas entre 0,80 y 1,5 m; por lo que se considera satisfactoria la calibración realizada.

En la **Figura 5-2.138** se muestran los diagramas de dispersión derivados de las simulaciones realizadas.

De hecho, la reconstrucción del comportamiento de la superficie piezométrica se realizó a través de una detallada calibración de la permeabilidad en dominios diferentes dentro del macizo y horizonte alterado del basamento.

Además, se ha considerado oportuno, dada la particular configuración de la topografía, discriminar porciones de topografía caracterizados por una tasa de infiltración específica, tal como se ha evidenciado en el estudio del balance hidrogeológico.

- **Condiciones de contorno**

En régimen permanente, los valores iniciales de potencial no ejercen ninguna influencia en el resultado final siendo este representativo de un estado de equilibrio final. Los potenciales iniciales constituyen el punto de partida del cálculo iterativo realizado por el programa. Los valores de potencial impuestos no cambian durante el cálculo.

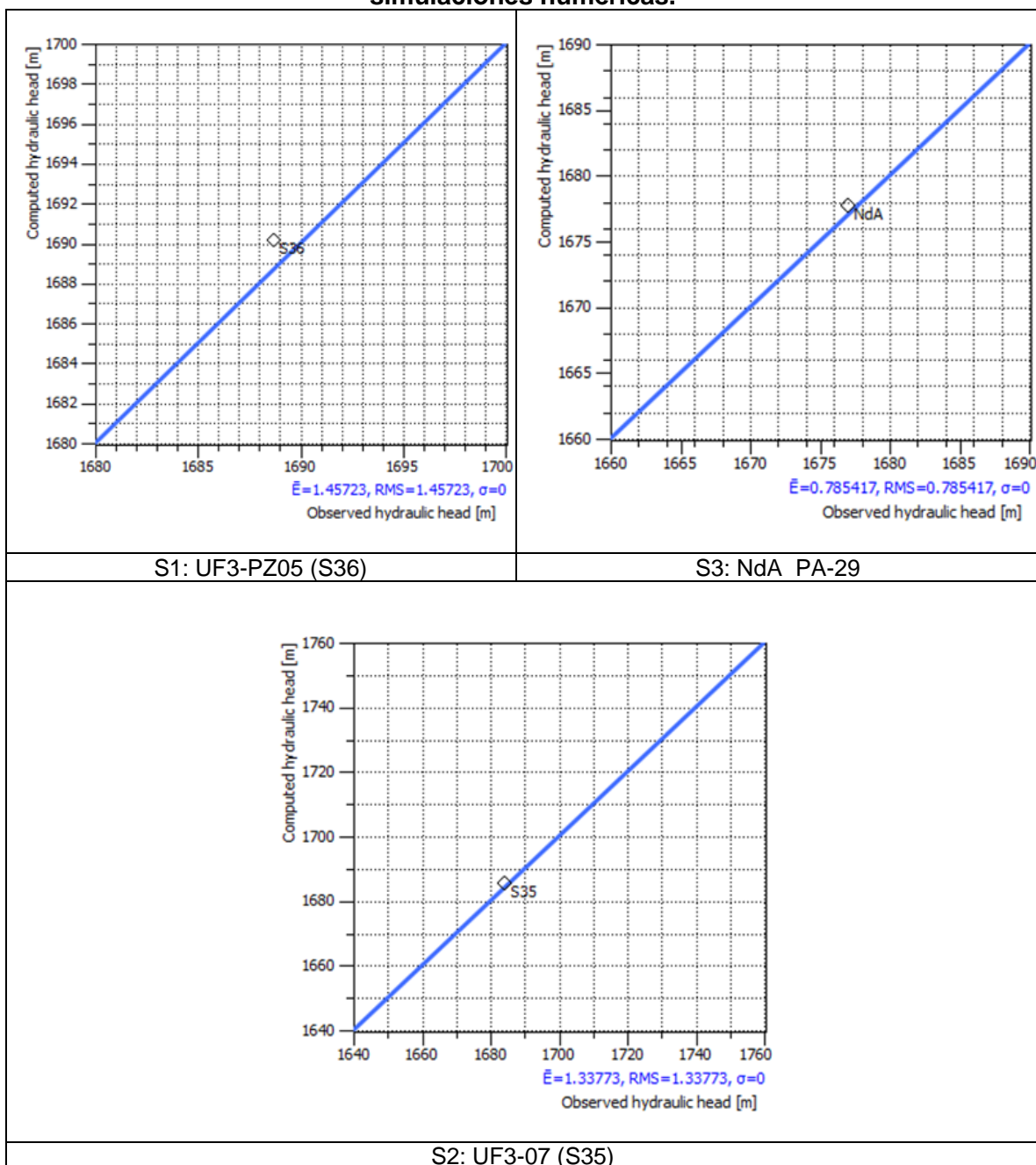
La geometría de los flujos hídricos subterráneos se reconstruyó imponiendo condiciones de flujo al contorno con el fin de simular la recarga por infiltración desde superficie y para simular la presencia de los puntos de agua presentes a lo largo de la sección del modelo.

Límites de flujo nulo

En el modelo los límites laterales y aquellos de base fueron considerados a flujo nulo, es decir, comparables a los límites impermeables. Los límites laterales fueron fijados a una distancia más allá de la cual no existe alteraciones de los flujos debido al efecto drenante de la obra subterránea.

El límite inferior a flujo nulo se justifica por la baja permeabilidad de la roca del basamento que disminuye con la profundidad.

Figura 5-2.138. Diagramas de dispersión de las medidas piezométricas medidas a lo largo del eje del túnel en correspondencia con las secciones consideradas para simulaciones numéricas.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

Límites de flujo impuestos

A lo largo de la superficie topográfica se ha impuesto un flujo de ingreso en modo tal de poder simular la infiltración que recarga el acuífero. La presencia de puntos de agua alimentados por la napa se ha simulado imponiendo a los nodos correspondientes una restricción adicional: la inversión del flujo (de adentro hacia afuera) a través del nodo en el que la cota de la superficie piezométrica supera la cota del nodo mismo.

A partir del estudio de infiltración, donde se reportan resultados de recarga máxima (280mm/año), media (59mm/año y mínima (0mm/año), se han identificado sectores de mayor y menor recarga por infiltración desde superficie. Por lo que a lo largo de las secciones numéricas se han considerado estos rangos de recarga reportados tratando de guardar la mayor coherencia posible en función de la calibración del modelo numérico.

En todos los casos, el valor medio ponderado de infiltración eficaz a lo largo de las tres secciones es de aprox. 138 mm/año.

- **Conductividad hidráulica**

La calibración del modelo se hizo atribuyendo valores de conductividad hidráulica diferentes a los distintos complejos hidrogeológicos que fueron identificados en el modelo hidrogeológico conceptual y obtenidos de las pruebas de permeabilidad realizadas. El macizo rocoso a la cota del túnel de Pamplonita ha sido dividido a su vez en subunidades hidrogeológicas, tal como expuesto en la descripción del modelo conceptual. Para los pocos complejos hidrogeológicos de los cuales no se dispone de medida directa, la caracterización hidrodinámica ha sido hecha mediante comparación con contextos hidrogeológicos similares y comparables

La sección S1 ha sido calibrada considerando un modelo hidrostático coherente con lo reportado a lo largo del perfil hidrogeológico en correspondencia con el eje del túnel de Pamplonita. La Formación Barco ha sido subdividida en litotipos arcillosos y arenosos coherentemente con lo reportado en el sondeo S36. La permeabilidad para sus litotipos prevalentemente arenosos ha sido considerada entre 1E-7 y 5E-7, mientras que para los litotipos prevalentemente arcillosos la permeabilidad considerada varía entre 5E-8 y 2E-7. El sector ubicado en cotas superiores, perteneciente a la Formación los Cuervos ha sido considerado como constituido por un litotipo dominante con permeabilidad media igual a 2E-7 m/s.

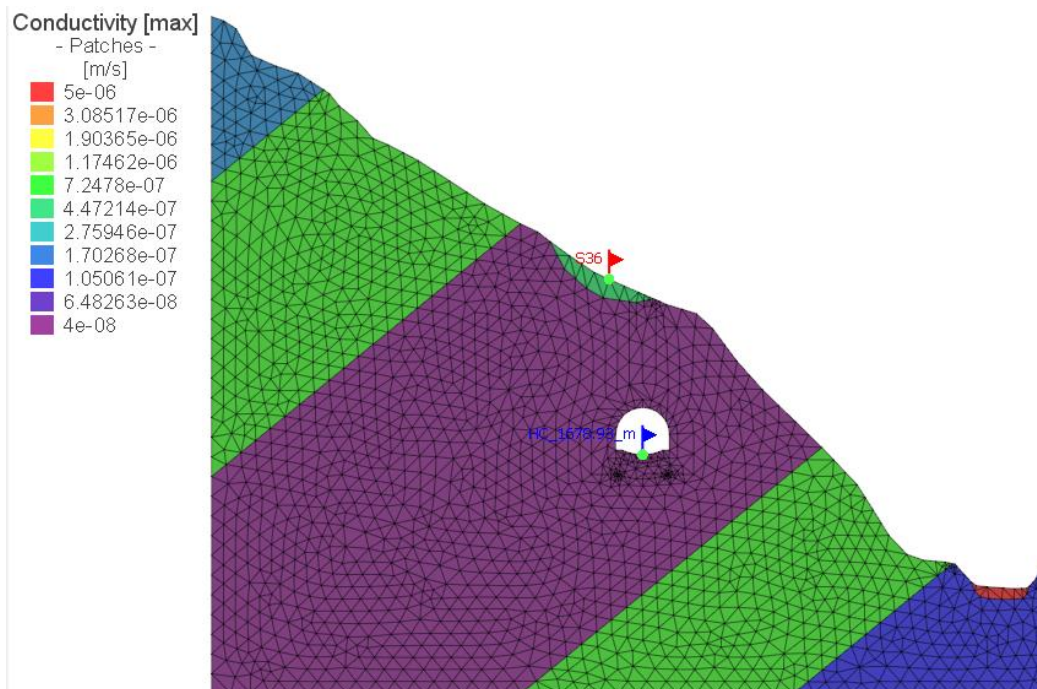
Tabla 5-2.53. Valores de Permeabilidad Hidráulica a lo largo de la sección S1.

| Sección S1 - Formación | K (m/s) | Sondeo |
|---|-------------|---------|
| Depositos coluviales cuaternarios (Qc) | 1E-6 | - |
| Depósitos de talud y derrubios (abanicos) | 5E-6 | - |
| Form. de Barco (Arcillolitas) | 5E-8 / 2E-7 | S33-S34 |
| Form. de Barco (Areniscas) | 1E-7 / 5E-7 | S35-S36 |
| Form. los Cuervos | 2E-7 | - |

NOTA: Ver **Tabla 5-2.11** para ver equivalencia de sondeos con piezómetros instalados y sus coordenadas.

Fuente: Aecom – Concol, 2018

Figura 5-2.139. Valores de permeabilidad hidráulica a lo largo de la sección S1.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

La permeabilidad del macizo rocoso ha sido considerada decreciente con la profundidad y en particular se ha interpretado que el fondo del valle del Río Pamplonita representa el nivel de base de los flujos que circulan en el mismo basamento y que, en el fondo del valle aflora el macizo rocoso menos permeable. De hecho, se ha considerado que el acuífero en roca sea en todos los casos drenado en el cauce del Río Pamplonita.

A lo largo de la sección se ha considerado además que el basamento rocoso se encuentra cubierto por una delgada costra de depósitos cuaternarios, especialmente de origen coluvial. Su permeabilidad media ha sido considerada del orden de $1\text{E-}6$ m/s. En correspondencia con el fondo del valle del Río Pamplonita se ha considerado la presencia de depósitos de origen mixto como depósitos de talud y derrubios (abanicos) con permeabilidad del orden de $5\text{E-}6$ m/s.

La sección S2 prevé que la permeabilidad del acuífero en roca se encuentre influenciado por una mayor fracturación conexas con la presencia de una zona de falla indicada en el perfil geológico de referencia y que intercepta el trazado del túnel de Pamplonita a la altura de la PK47+700 aprox. En este caso se ha optado por atribuir el valor más elevado del intervalo de permeabilidad considerado para el litotipo presente a lo largo de la sección.

Tabla 5-2.54. Valores de Permeabilidad Hidráulica a lo largo de la sección S2.

| Sección S2 - Formación | K (m/s) | Sondeo |
|--|-----------|---------|
| Depositos coluviales cuaternarios (Qc) | 1E-6-1E-7 | - |
| Depósitos de talud y derrubios (abanicos) | 5E-6 | - |
| Suelo residual (Sr) - Limos y limos-arcillosos | 1E-9 | - |
| Form. de Barco (Arcillolitas fracturadas) | 2E-7 | S33-S34 |
| Form. de Barco (Arcillolitas) | 5E-8 | S33-S34 |
| Form. de Barco (Areniscas fracturadas) | 5E-7 | S35-S36 |
| Form. de Barco (Areniscas) | 1E-7 | S35-S36 |
| Form. los Cuervos | 2E-7 | - |
| Form. Giron | 2E-7 | |

NOTA: Ver **Tabla 5-2.11** para ver equivalencia de sondeos con piezómetros instalados y sus coordenadas.

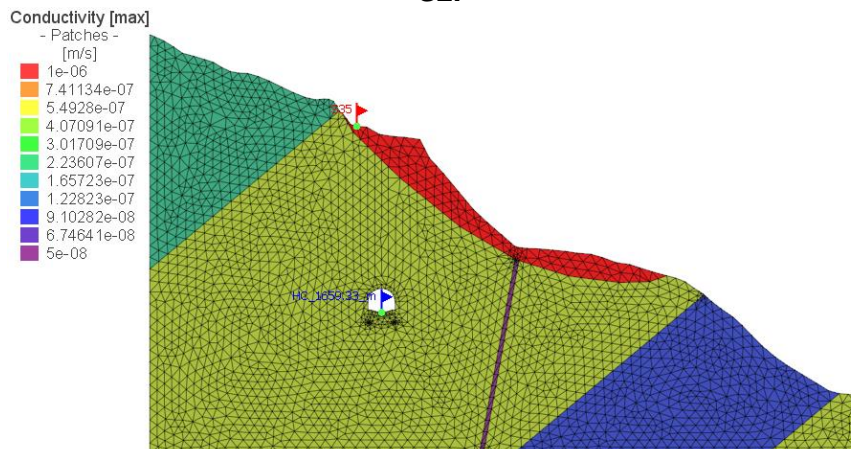
Fuente: Aecom – Concol, 2018

Al igual que en el caso de la sección S1, la permeabilidad del macizo rocoso ha sido considerada decreciente con la profundidad y en particular se ha interpretado que el fondo del valle del Río Pamplonita representa el nivel de base de los flujos que circulan en el mismo basamento y que, en el fondo del valle aflora el macizo rocoso menos permeable. De hecho, se ha considerado que el acuífero en roca sea en todos los casos drenado en el cauce del Río Pamplonita.

En la **Figura 5-2.139**, como en el caso precedente, es posible observar que a los estratos más profundos se les ha atribuido una permeabilidad inferior respecto a aquellos más superficiales.

Los depósitos cuaternarios que alimentan el punto de agua UF3-PA54 han sido aislados del acuífero en roca considerando un contraste de permeabilidad entre depósitos superficiales y el sustrato rocoso, representado por un horizonte de suelo residual de composición prevalentemente arcillosa y que puede ser entendido como un lecho poco permeable de los acuíferos colgados que se forman en superficie. La presencia de este horizonte poco permeable permite la formación de flujos subsuperficiales no dependientes necesariamente de los flujos más profundos que tienen lugar en el sustrato rocoso más o menos fracturado.

Figura 5-2.140. Distribución de la permeabilidad hidráulica a lo largo de la sección S2.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

La **sección S3** presenta un modelo geológico de referencia muy similar a los dos anteriores. Se ha por lo tanto considerado un acuífero en roca constituido por la alternancia de niveles más permeables (areniscas) y niveles menos permeables (arcillolitas).

Para obtener la calibración del modelo se consideraron los siguientes valores de permeabilidad hidráulica por cada sección. Al igual que en el caso de las secciones anteriores, la permeabilidad del macizo rocoso ha sido considerada decreciente con la profundidad y en particular se ha interpretado que el fondo del valle del Río Pamplonita representa el nivel de base de los flujos que circulan en el mismo basamento y que, en el fondo del valle aflora el macizo rocoso menos permeable. De hecho, se ha considerado que el acuífero en roca sea en todos los casos drenado en el cauce del Río Pamplonita.

En la **Figura 5-2.139**, como en los casos precedentes, es posible observar que a los estratos más profundos del sustrato rocoso se les ha atribuido una permeabilidad inferior respecto a los estratos más superficiales.

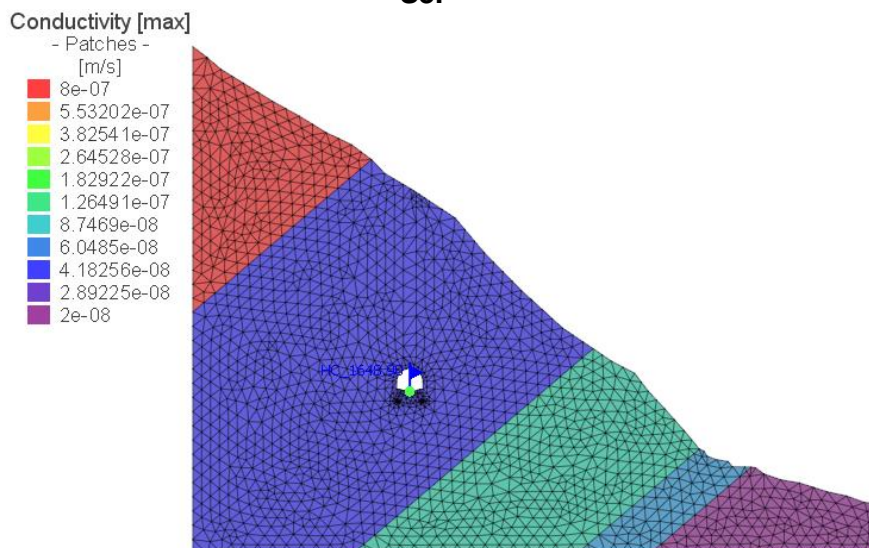
Tabla 5-2.55. Valores de Permeabilidad Hidráulica a lo largo de la sección S3.

| Sección S3 - Formación | K (m/s) | Sondeo |
|---|-------------|-------------|
| Areniscas (fracturada y muy fracturada, falla) | 8E-7 | S17 |
| Depositos Coluviales | 5E-6 / 5E-7 | S15/S19/S20 |
| Arcillolitas (fracturada y muy fracturada, falla) | 4E-8 / 1E-7 | S17/S19 |
| Suelo residual (Sr) - Limos y limos-arcillosos | 1E-9 / 1E-8 | S15A/S21A |
| Gauge de falla | 1E-9 / 1E-8 | - |

NOTA: Ver **Tabla 5-2.11** para ver equivalencia de sondeos con piezómetros instalados y sus coordenadas.

Fuente: Aecom – Concol, 2018

Figura 5-2.141. Distribución de la permeabilidad hidráulica a lo largo de la sección S3.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

- **Coeficiente de almacenamiento y rendimiento específico**

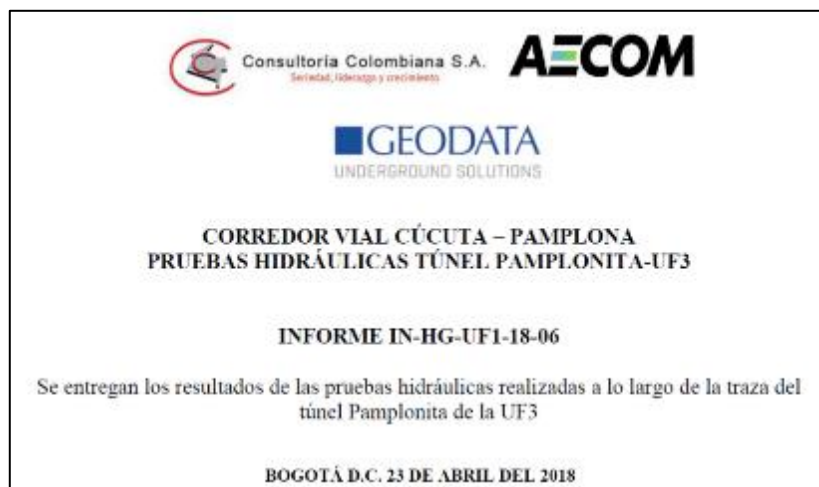
Dado que el coeficiente de almacenamiento “S” es un parámetro utilizado para acuíferos confinados, no es posible calcular directamente dicho coeficiente para la formación Barco. Esta formación geológica presenta un comportamiento de acuífero libre en la zona del túnel, aspecto evidenciado no solo por la exposición de la roca en superficie, sino en la instalación de piezómetros de Casagrande, en donde los resultados en la medición de la cabeza piezométrica para dicha formación son idénticos al nivel freático del área.

Sin embargo, un parámetro equivalente para la condición encontrada en el macizo rocoso es el de “porosidad eficaz” o “rendimiento específico”, “Sy”, dado que dicho parámetro es el que se considera cuando existe un almacenamiento de agua subterránea en forma de acuífero libre, tal y como es el caso de la geología local de la formación Barco para el mencionado sector

En la **Figura 5-2.146** se ilustra el gráfico correspondiente en donde se obtienen este y otros parámetros generales para el túnel de Pamplonita, a partir de las pruebas de bombeo y recuperación. El valor del rendimiento específico para la formación Barco es de $S_y=0.35$. El valor del S_y se calcula a partir de la curva de tiempos largos la cual se aproxima con base en el registro de datos de la prueba de bombeo.


Las pruebas de terreno que permiten el calculo del rendimiento específico (Sy) asi como de otros parámetros hidráulicos se pueden encontrar en el ANEXO 5.1.3.9 “PRUEBAS HIDRAULICAS TUNEL PAMPLONITA”. En las siguientes figuras se muestra el encabezado de los reportes correspondientes.

Figura 5-2.142. Soportes de pruebas físicas realizadas - Informe




Fuente. Pruebas Hidráulicas Túnel Pamplonita – UF3 2018. Concol.

Figura 5-2.143. Soportes de Pruebas Físicas Realizadas – Datos Obtenidos en Pruebas de Bombeo (Lecturas Pozo Observación)

| | | | |
|--|----------|--|------------------|
|  Estudios Hidrogeológicos y Ambientales Transversal 27 # 53C-20, Bogotá D.C. 8459884 | | Pumping Test Data Report | |
| | | Project: PB y PS CONCESIÓN CUCUTA-PAMPLONA | |
| | | Number: | |
| | | Client: GEODATA | Page 1 |
| Data observed at: UF3-S37A | | Pumping Test: | PRUEBA DE BOMBEO |
| Distance from PW: 5 [m] | | Pumping Well: | UF3-S37-B2 |
| Depth to Static WL: 37.98 [m] | | Casing radius: | 0.0508 [m] |
| Location: Pamplona y Pamplonita, Norte de Sant | | Boring radius: | 0.0762 [m] |
| Recorded by: EH&A S.A.S. | | Screen length: | 22 [m] |
| Date: 07/05/2018 | | Aquifer Thickness: | 22 [m] |
| | Time [s] | Depth to WL [m] | Drawdown [m] |
| 1 | 0 | 37.98 | 0.00 |
| 2 | 935 | 38.10 | 0.12 |
| 3 | 940 | 38.10 | 0.12 |
| 4 | 945 | 38.10 | 0.12 |
| 5 | 950 | 38.10 | 0.12 |
| 6 | 955 | 38.10 | 0.12 |
| 7 | 960 | 38.11 | 0.13 |
| 8 | 965 | 38.11 | 0.13 |


Fuente. Pruebas Hidráulicas Túnel Pamplonita – UF3 2018. Concol.

Figura 5-2.144. Soportes de Pruebas Físicas Realizadas – Datos Obtenidos en Pruebas de Recuperación (Lecturas Pozo Observación)

| | | | |
|--|------------|--|--------------|
|  Estudios Hidrogeológicos y Ambientales Transversal 27 # 53C-20, Bogotá D.C. 6459884 | | Pumping Test Data Report | |
| | | Project: PB y PS CONCESIÓN CUCUTA-PAMPLONA | |
| | | Number: | |
| | | Client: GEODATA | Page 1 |
| Data observed at: UF3-S37A | | Pumping Test: RECUPERACIÓN | |
| Distance from PW: 5 [m] | | Pumping Well: UF3-S37-B2 | |
| Depth to Static WL: 37,98 [m] | | Casing radius: 0,0508 [m] | |
| Location: Pamplona y Pamplonita, Norte de Sant | | Boring radius: 0,0762 [m] | |
| Recorded by: EH&A S.A.S. | | Screen length: 22 [m] | |
| Date: 07/05/2018 | | Aquifer Thickness: 22 [m] | |
| | Time [min] | Depth to WL [m] | Drawdown [m] |
| 1 | 128,333 | 38,53 | 0,55 |
| 2 | 128,417 | 38,53 | 0,55 |
| 3 | 128,5 | 38,53 | 0,55 |
| 4 | 128,583 | 38,53 | 0,55 |
| 5 | 128,667 | 38,53 | 0,55 |
| 6 | 128,75 | 38,53 | 0,55 |
| 7 | 128,833 | 38,53 | 0,55 |
| 8 | 128,917 | 38,53 | 0,55 |

Fuente. Pruebas Hidráulicas Túnel Pamplonita – UF3 2018. Concol.

Figura 5-2.145. Soportes de Pruebas Físicas Realizadas – Datos Obtenidos en Pruebas de Bombeo (Lecturas Pozo Bombeo)

| | | | |
|--|------------|--|--------------|
|  Estudios Hidrogeológicos y Ambientales Transversal 27 # 53C-20, Bogotá D.C. 6459884 | | Pumping Test Data Report | |
| | | Project: PB y PS CONCESIÓN CUCUTA-PAMPLONA | |
| | | Number: | |
| | | Client: GEODATA | Page 1 |
| Data observed at: UF3-S37A. | | Pumping Test: RECUPERACIÓN BOMBEO | |
| Distance from PW: 5 [m] | | Pumping Well: UF3-S37-B2 | |
| Depth to Static WL: 37,35 [m] | | Casing radius: 0,0508 [m] | |
| Location: Pamplona y Pamplonita, Norte de Sant | | Boring radius: 0,0762 [m] | |
| Recorded by: EH&A S.A.S. | | Screen length: 22 [m] | |
| Date: 07/05/2018 | | Aquifer Thickness: 22 [m] | |
| | Time [min] | Depth to WL [m] | Drawdown [m] |
| 1 | 0 | 58,95 | 21,60 |
| 2 | 0,5 | 57,09 | 19,74 |
| 3 | 1 | 56,45 | 19,10 |
| 4 | 1,5 | 56,44 | 19,09 |
| 5 | 2 | 56,39 | 19,04 |
| 6 | 2,5 | 56,37 | 19,02 |
| 7 | 3 | 56,35 | 19,00 |
| 8 | 3,5 | 56,23 | 18,88 |

Fuente. Pruebas Hidráulicas Túnel Pamplonita – UF3 2018. Concol.

El rendimiento específico se halla a partir de la geometría de la gráfica, aplicando la siguiente ecuación, para el método de Newman.

$$S_y = \frac{Tt}{t_y r^2}$$

En donde:

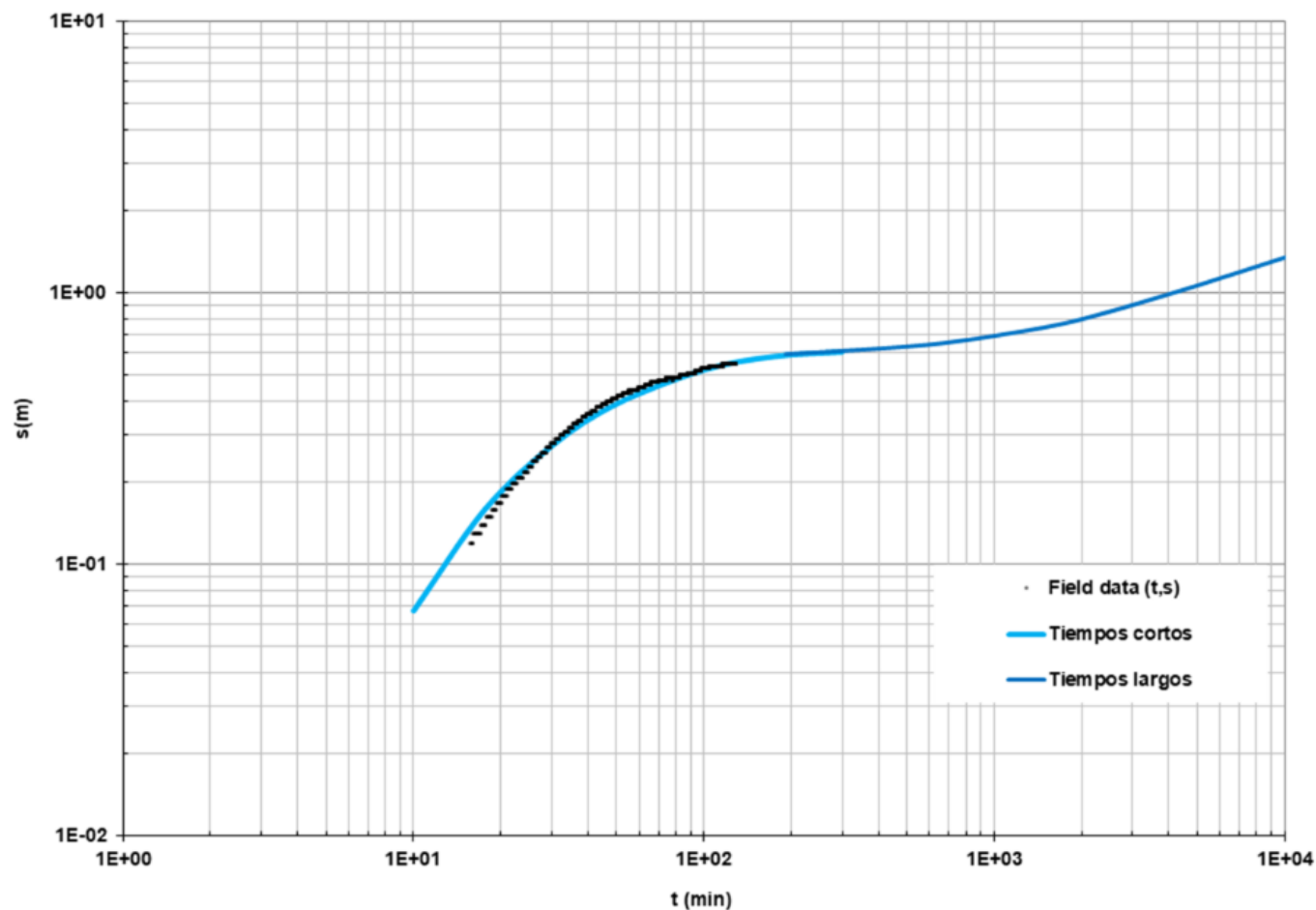
- T: Transmisividad (m²/s)
t: Tiempo de descenso tardío a partir de la gráfica (min)
ty: Tiempo adimensional sobre gráfica teórica (adim)
r: Distancia entre el pozo de bombeo y el pozo de observación. (m)

Al aplicar la ecuación se tienen los valores indicados a continuación:

T=1.44E-04 (m²/s), t=1332 (min), ty=0.74 (adim), r²=44.49 (m²), **Sy=0.35 (adim)**

Como se puede observar, los resultados del análisis de las pruebas físicas son concluyentes en cuanto a que la formación Barco en el tramo del túnel de Pamplonita constituye un acuífero libre tipo acuitado, lo cual es compatible con el análisis geológico e hidrogeológico realizado para este macizo rocoso.

Figura 5-2.146. Gráfica de tiempos extendidos para la prueba de bombeo.

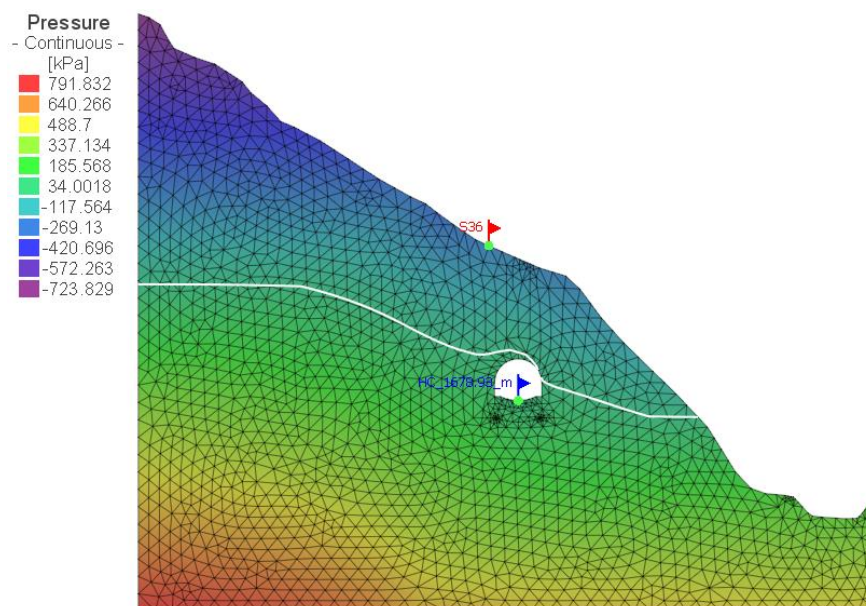


Fuente: Unión Vial Río Pamplonita 2019.

- Simulación en estado estacionario (condición “anteoperam”)

Desde la **Figura 5-2.147** y hasta la **Figura 5-2.148** se representan las condiciones en estado estacionario, es decir, sin considerar la presencia del túnel.

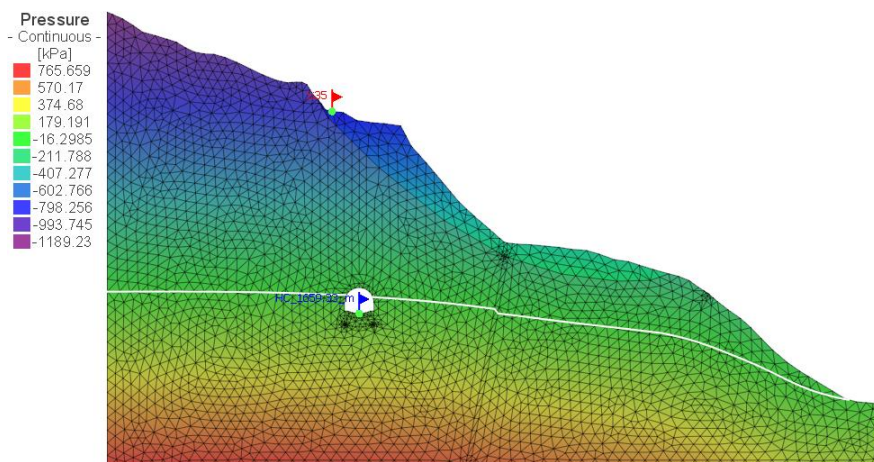
Figura 5-2.147. Simulación en estado estacionario a lo largo de la sección S1.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

En la **Figura 5-2.148** se observa que el nivel freático en roca se encuentra conexo con la descarga en el fondo del valle del Río Pamplonita. La cual permanece aparentemente aislada de los flujos superficiales que, de acuerdo con lo evidenciado durante las campañas de inventario y análisis hidroquímicos no presentan anomalías o características fisico-químicas propias de flujos profundos.

Figura 5-2.148. Simulación en estado estacionario a lo largo de la sección S2.

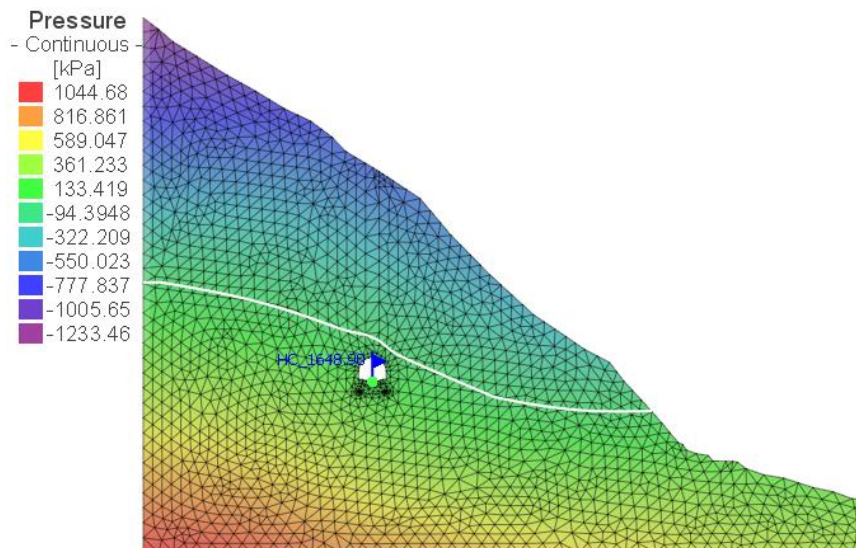


Fuente: Aecom – Concol, 2018

La simulación a lo largo de la sección S2 pone en evidencia la distribución de los flujos superficiales dado por la presencia de horizontes de suelos residuales que localmente tienen el potencial de aislar los estratos de depósitos cuaternarios al interior de los cuales se instauran circuitos subsuperficiales que alimentan puntos de agua como el UF3-PA54 involucrado en la presente simulación (ver **Figura 5-2.149**).

Los flujos regionales en roca son alimentados desde la superficie a través de las zonas de fracturación creadas generalmente por la presencia de fallas geológicas que muchas veces sirven de límites entre unidades geológicas. El agua muestreada en los piezómetros presenta generalmente características de aguas poco mineralizadas, evidenciando una descarga activa en el sustrato que, como ya ha sido notado, se instauran a lo largo de las zonas de fracturación alimentando el Río Pamplonita que representa el nivel base en la zona de estudio.

Figura 5-2.149. Simulación en estado estacionario a lo largo de la sección S3.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

La sección S3 presenta una falda en roca que es drenada por el Río Pamplonita (a la derecha de la sección). En la misma sección se evidencia que la posición del punto de agua UF3-PA29 en proximidad del fondo del valle, determina la posibilidad que se cree una alimentación mixta en parte conexas con la vinculación directa del agua de lluvia desde la superficie y en parte de los flujos en roca que en este sector se encuentran próximos a la superficie topográfica.

5.1.8.15.5 Resultados del modelo numérico

Una vez calibrado el modelo en régimen estacionario, se ha procedido con la simulación en estado transitorio considerando el inicio de la excavación del túnel respecto a cada una de las secciones. El efecto drenante del túnel ha sido verificado desde el momento de la apertura de la excavación para los siguientes intervalos tiempo:

- Corto plazo
 - $t_0 = 0$ días
 - $t_1 = 1$ día
 - $t_2 = 10$ días
- Mediano plazo
 - $t_3 = 100$ días (aproximadamente 3 meses)

- t4 = 365 días (1 año)
- t5 = 730 días (2 años)
- Largo plazo
 - t6 = 1825 días (5 años)
 - t7 = 3650 días (10 años)

Las simulaciones realizadas a largo plazo se asimilan al régimen estabilizado.

Los resultados de las simulaciones permiten valorar el caudal esperado en el túnel en régimen transitorio (corto plazo) y estabilizado (largo plazo), así como la variación de la superficie piezométrica y los potenciales impactos en superficie. En esta fase no se ha realizado ninguna valoración de la excavación en condiciones de macizo rocoso tratado con inyecciones.

Los resultados gráficos de las simulaciones se muestran desde la **Figura 5-2.147** hasta la **Figura 5-2.154**. Mientras que para cada intervalo de tiempo simulado, se proveen los resultados numéricos en términos de variaciones de caudal en el túnel y del caudal de los puntos de agua presentes a lo largo de las secciones.

También se muestran los gráficos de las variaciones piezométricas simuladas en los piezómetros presentes a lo largo de las secciones y utilizadas en la fase de calibración antes descrita.

En lo que respecta a la valoración del caudal esperado en el túnel, vale la pena hacer un breve comentario acerca de la comparación de los resultados obtenidos a través de las simulaciones numéricas y aquellos calculados con método analítico.

En este sentido se observa que mientras los valores de caudal calculados en el corto plazo presentan una buena coherencia, no pasa lo mismo para los valores simulados a largo plazo. En este último caso se evidencia una mayor discrepancia, resultando mayores aquellos valores obtenidos con método analítico.

Esta diferencia que puede ser significativa se debe al hecho que el modelo analítico considera que una vez sucedido el drenaje del acuífero la disminución de la presión intersticial determina una disminución de la permeabilidad del macizo rocoso. Por lo que la disminución del caudal drenado por el túnel en el tiempo está supeditado al cierre de las fracturas y a la consecuente disminución de la permeabilidad más que al abatimiento de la carga hidráulica por encima del túnel.

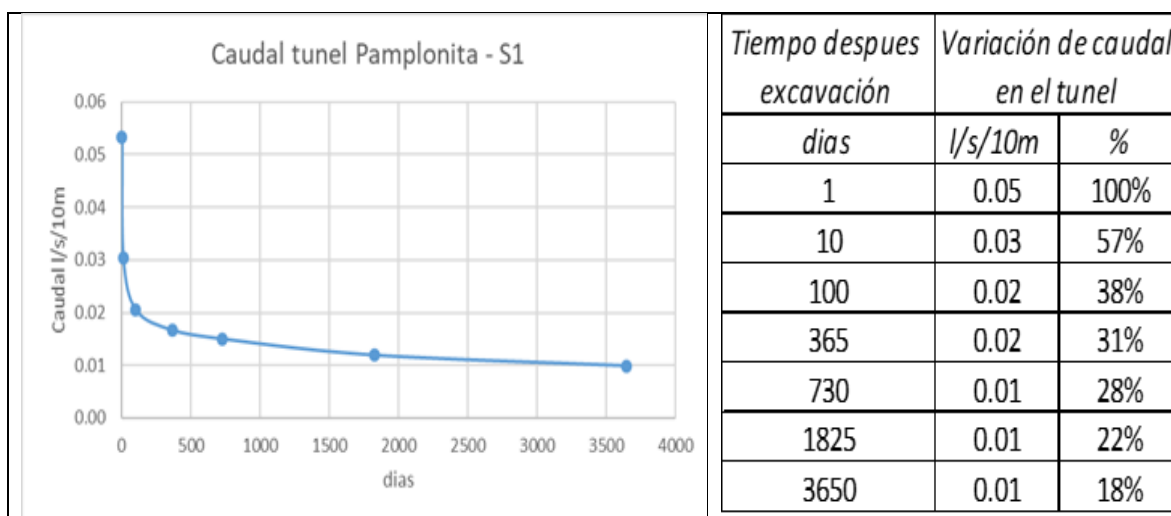
En el modelo numérico, sin embargo, este tipo de fenómeno no se considera y la disminución del caudal está exclusivamente relacionada con la disminución de la carga hidráulica. En consecuencia, el caudal a largo plazo valorado a través del modelo numérico es por lo general más bajo respecto a aquel obtenido con el método de cálculo analítico.

- **Sección S1**

Caudal drenado en el túnel:

En la **Tabla 5-2.56** se muestra la curva de abatimiento del caudal en el túnel.

Tabla 5-2.56. Curva de abatimiento del caudal esperado en el túnel en correspondencia con la sección S1.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

El caudal a corto plazo, después de un día de la apertura de la excavación, es de aprox. 0.05 l/s/10m de túnel (**Tabla 5-2.56**). De acuerdo con la valoración realizada con el método analítico en correspondencia con la misma abscisa de la sección S1 (PK48+089), los valores obtenidos están entre 0.0 y 0.16 l/s/10 m de túnel, es decir, los dos métodos arrojan valores similares.

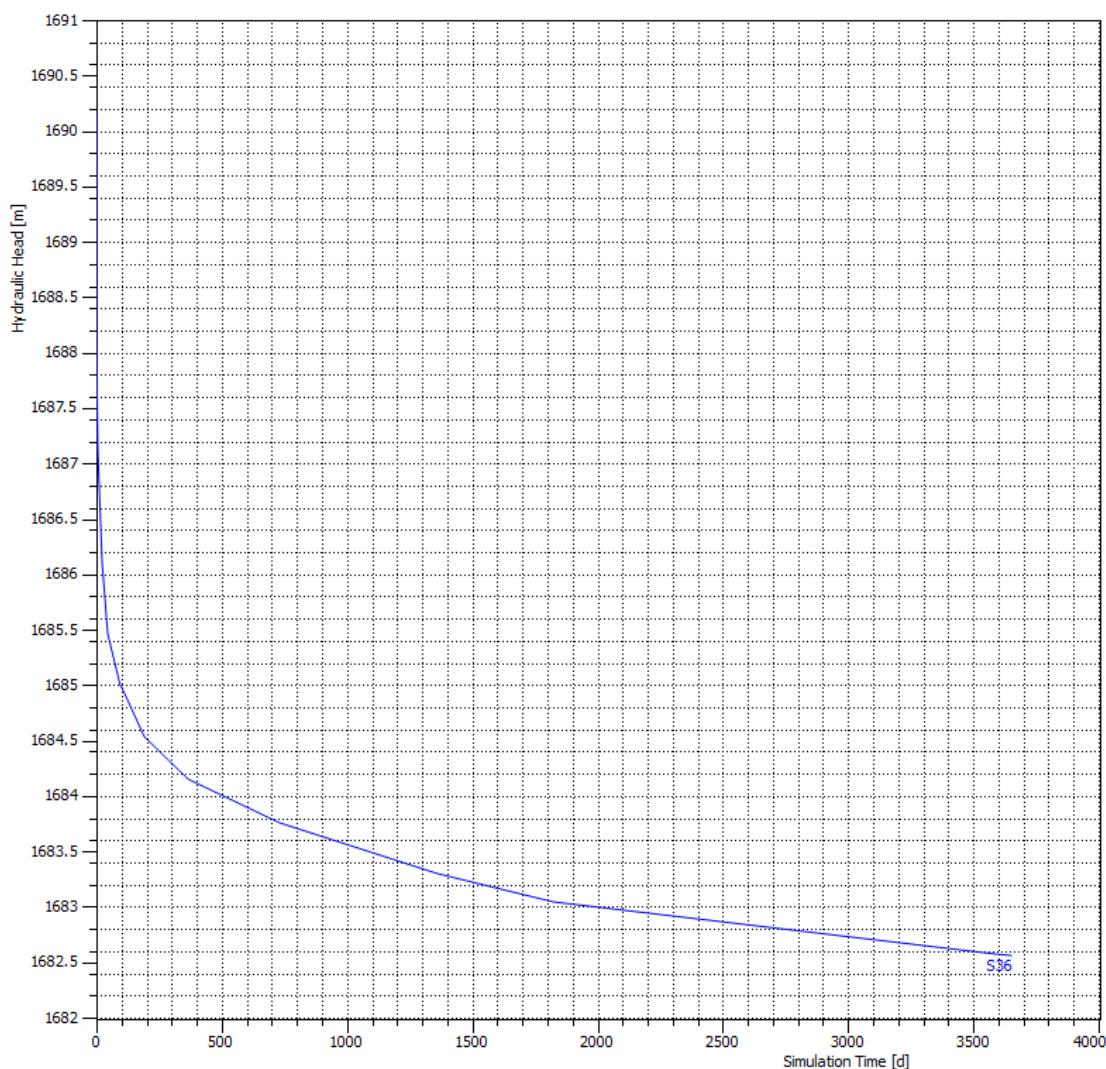
Sin embargo, se debe tener en cuenta que este último valor ha sido calculado considerando una carga hidráulica sobre el eje del túnel igual a 10 m. La medida piezométrica indica que el nivel de la superficie piezométrica se ubica aproximadamente a la cota del túnel y que presenta de manera conservadora una oscilación de ± 10 m respecto al valor medio.

El modelo numérico a largo plazo indica un fuerte decrecimiento del caudal que, en régimen estabilizado, después de 10 años de la apertura de la excavación, se reduce hasta estabilizarse en aproximadamente 0,01 l/s/10m de túnel. Lo cual se traduce en un abatimiento completo de la piezométrica hasta la cota del túnel.

Potenciales impactos en superficie:

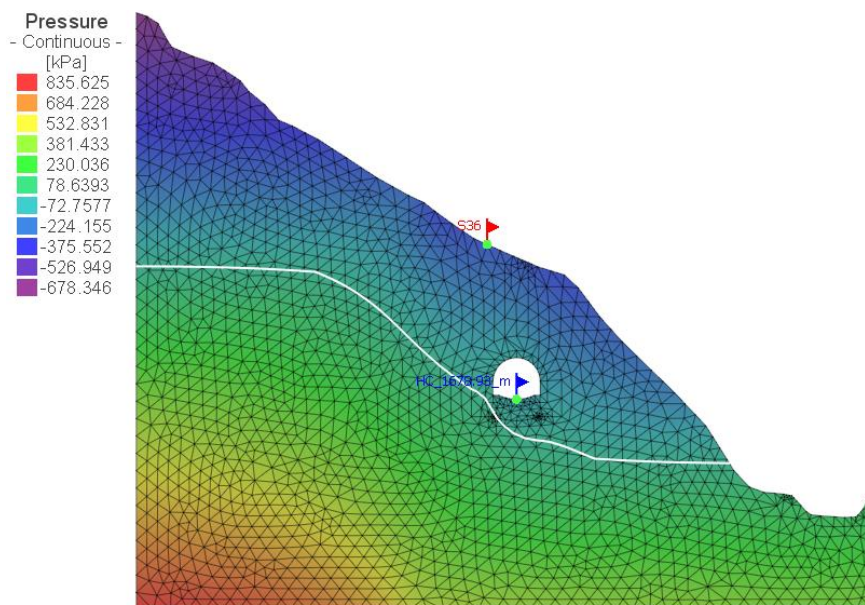
Los potenciales impactos en superficie han sido valorados en función de la variación del nivel de la falda piezométrica medida en el piezómetro UF3-PZ05 representado en la **Figura 5-2.150**. La curva de abatimiento sigue el decrecimiento del caudal drenado por el túnel. El nivel piezométrico se ubica en la base de los hastiales del túnel después de 10 años de la apertura de la excavación (Ver **Figura 5-2.151**).

Figura 5-2.150. Variación del nivel piezométrico simulado en el piezómetro UF3-PZ05



Fuente: Aecom – Concol, 2018

Figura 5-2.151. Simulación de los flujos en estado transitorio a lo largo de la sección S1 con presencia del túnel (10 años).



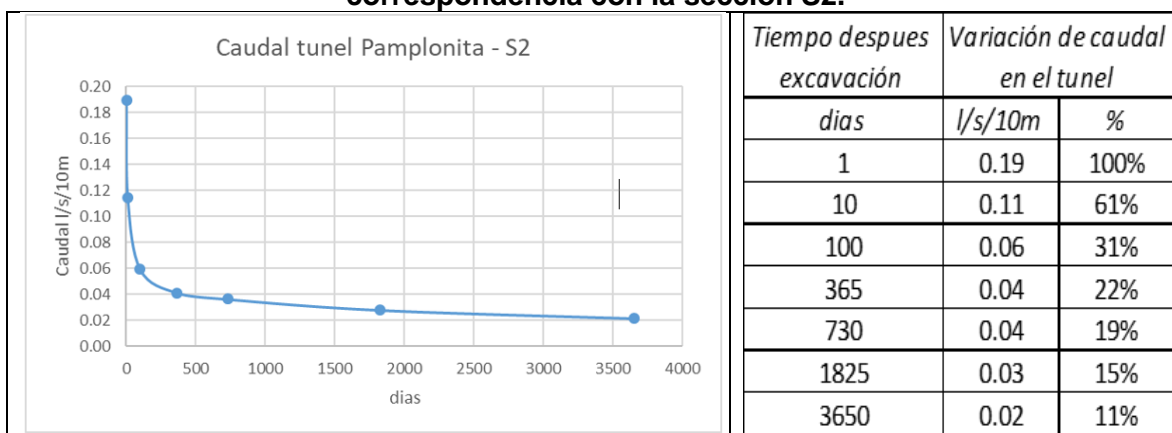
Fuente: Aecom – Concol, 2018

- **Sección S2**

Caudal drenado en el túnel:

En la **Tabla 5-2.57** se muestra la curva de abatimiento del caudal en el túnel.

Tabla 5-2.57. Curva de abatimiento del caudal esperado en el túnel en correspondencia con la sección S2.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

El caudal a corto plazo, después de un día de la apertura de la excavación, es de aprox. 0.2 l/s/10m de túnel (**Tabla 5-2.56**). De acuerdo con la valoración realizada con el método analítico en correspondencia con la misma abscisa de la sección S2 (PK47+700), los valores obtenidos están entre 0.3 l/s/10 m de túnel, es decir, los dos métodos arrojan valores similares.

También es este caso se debe tener en cuenta que este último valor ha sido calculado considerando dos escenarios de carga hidráulica, uno coincidente con la carga hidráulica media medida en el piezómetro UF3-PZ07 (nivel piezométrico 10 m por encima de la clave) y uno más conservador representado por una carga de hasta 20 m por encima del túnel; en este último escenario, el caudal valorado con el método analítico llega a aprox. 0.5 l/s/10m a corto plazo.

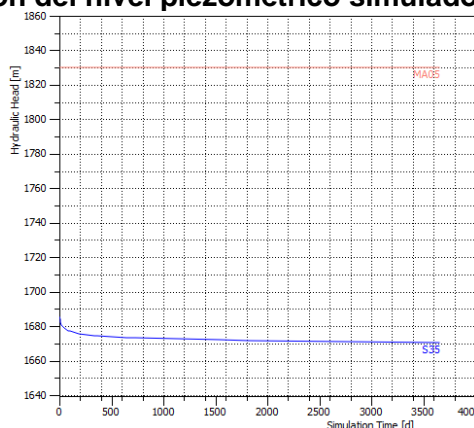
El modelo numérico a largo plazo indica un fuerte decrecimiento del caudal que, en régimen estabilizado, después de 10 años de la apertura de la excavación, se reduce hasta estabilizarse en aproximadamente 0,02 l/s/10m de túnel. Lo cual se traduce en un abatimiento completo de la piezométrica hasta la cota del túnel.

Potenciales impactos en superficie:

Los potenciales impactos en superficie fueron valorados en función de la variación porcentual del caudal del punto de agua UF3-PA54 que se encuentra a lo largo de la sección 2 (S2). El punto de agua se ubica a aprox. 150 m hacia el SE respecto al eje del túnel. No obstante, esta corta distancia desde un punto de vista geológico-estructural, su circuito de circulación resulta en parte aislado por un nivel de suelo residual que permite la existencia de circuitos hídricos subsuperficiales reduciendo el grado de conexión directa de estos con los flujos en roca que se desarrollan en la porción del macizo rocoso en el cual tiene lugar la excavación del túnel.

En la **Figura 5-2.152** se nota que el efecto del drenaje no tiene incidencia en términos de cota topográfica sobre el punto en el cual emerge el punto de agua UF3-PA54.

Figura 5-2.152. Variación del nivel piezométrico simulado en el piezómetro PZ06.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

En el próximo párrafo se analizan los potenciales impactos en términos de caudal. Tal condición, valorada en el modelo hidrogeológico conceptual ha sido incorporada en la elaboración del modelo numérico.

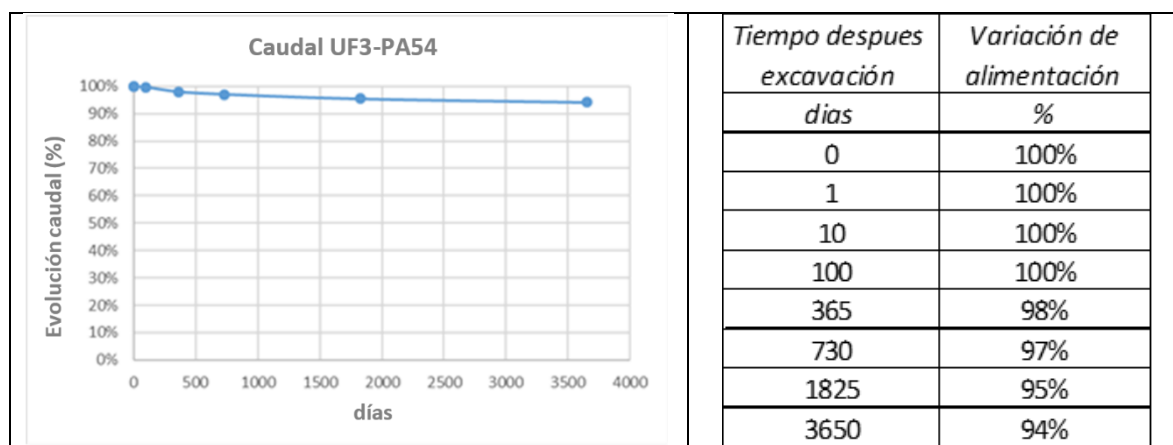
El modelo numérico muestra que la perturbación de los flujos inducidos por el túnel determina un mínimo drenaje de los circuitos que alimentan el punto de agua.

En la **Tabla 5-2.58** se indica que la cuota de alimentación de del punto de agua que se desarrolla a lo largo de la sección disminuye en apenas un 5% aprox. a largo plazo (10 años), mientras que en los primeros 100 días después de la apertura de la excavación no se observa una disminución apreciable (0-2%).

La falta de la cuota de alimentación del punto de agua UF3-PA54 no implica que este se seque. El impacto sobre el punto de agua se manifestará por lo tanto con una disminución de caudal entre 5-10 %.

Tal condición se debe al hecho que el modelo considera la alimentación del punto de agua con un grado significativo de independencia respecto al acuífero en roca. Sin embargo, el leve impacto mencionado se relaciona con la despresurización del macizo rocoso que puede llegar a transmitirse también en superficie.

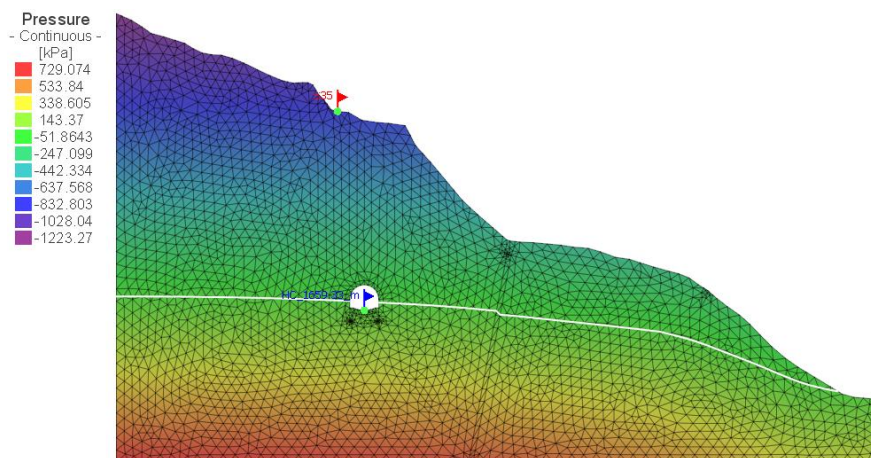
Tabla 5-2.58. Curva de alimentación del punto de agua UF3-PA54 a lo largo de la sección S2.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

En la **Figura 5-2.153** se representan los flujos a largo plazo (10 años) y se observa que el túnel drena los circuitos en roca mientras que el punto de agua UF3-PA54 permanece alimentado por los circuitos subsuperficiales.

Figura 5-2.153. Simulación de los flujos en estado transitorio a lo largo de la sección S2 con presencia del túnel (10 años).



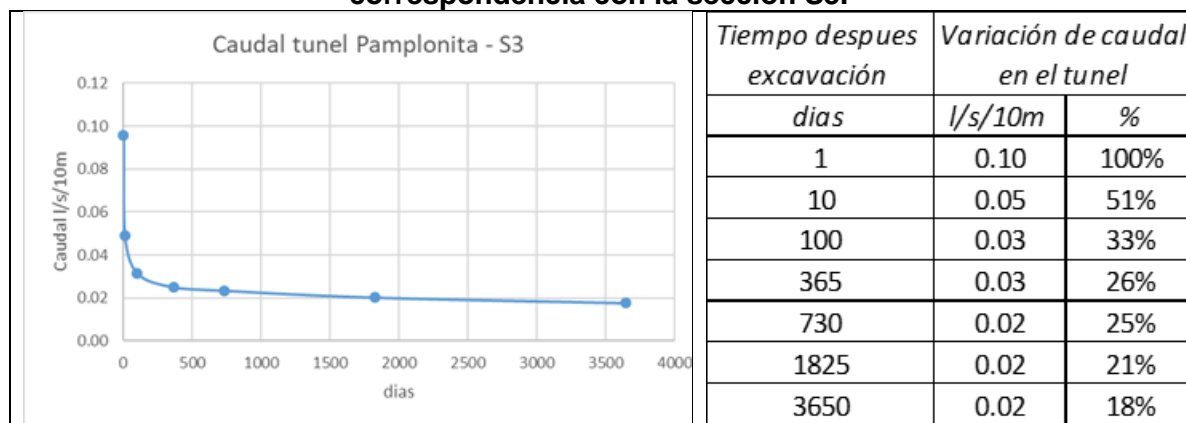
Fuente: Aecom – Concol, 2018

- **Sección S3**

Caudal drenado en el túnel:

En la **Tabla 5-2.59** se muestra la curva de abatimiento del caudal en el túnel.

Tabla 5-2.59. Curva de abatimiento del caudal esperado en el túnel en correspondencia con la sección S3.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

El caudal a corto plazo, después de un día de la apertura de la excavación, es de aprox. 0.1 l/s/10m de túnel (**Tabla 5-2.59**). De acuerdo con la valoración realizada con el método analítico en correspondencia con la misma abscisa de la sección S3 (PK47+570), los valores obtenidos están entre 0.6-0.7 l/s/10m de túnel.

El modelo numérico a largo plazo indica un fuerte decrecimiento del caudal que, en régimen estabilizado, después de 10 años de la apertura de la excavación, se reduce hasta estabilizarse en aproximadamente 0,02 l/s/10m de túnel. Lo cual se traduce en un abatimiento completo de la piezométrica hasta la cota del túnel.

Potenciales impactos en superficie:

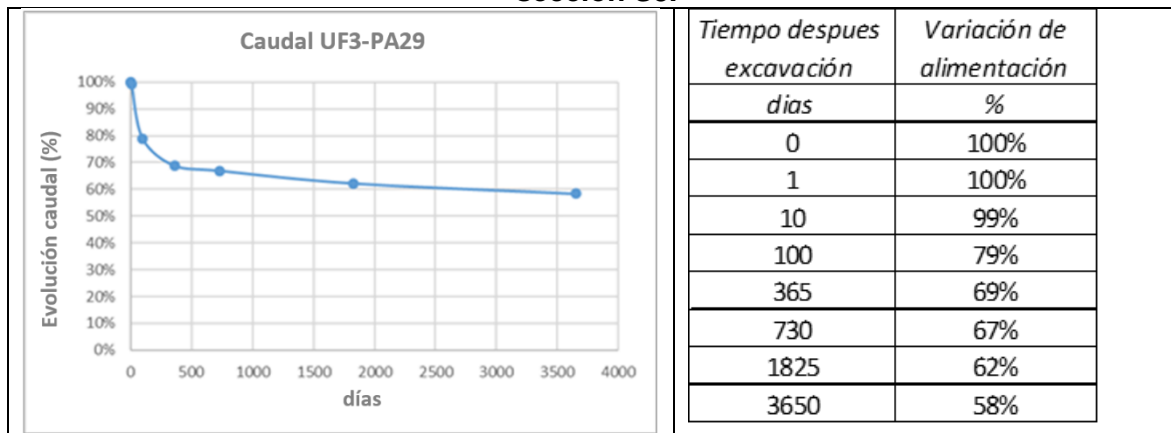
Los potenciales impactos en superficie fueron valorados en función de la variación porcentual del caudal del punto de agua UF3-PA29 que se encuentra a lo largo de la sección 3 (S3). El punto de agua se ubica a aprox. 150 m hacia el SW respecto al eje del túnel (en cota inferior).

La cota del punto de agua (1653 msnm) resulta ligeramente inferior a la cota del túnel (1658 msnm). La alimentación de este punto de agua está en gran parte garantizada por los flujos subsuperficiales que circulan a lo largo de la ladera en correspondencia con la sección S3 simulada en el presente modelo numérico. No obstante, el modelo calibrado con el nivel piezométrico interpolado en correspondencia con el eje del túnel considera la posibilidad que parte de la alimentación de este punto de agua derive de flujos en roca (ver parágrafo de simulación en estado estacionario).

El modelo en roca muestra que la perturbación de los flujos inducidos por el túnel determina el drenaje de los circuitos en roca y la despresurización del sistema de equilibrio entre la superficie piezométrica y el consecuente drenaje de parte de los circuitos subsuperficiales que en este caso no permanecen completamente aislados de aquellos más profundos.

En la **Tabla 5-2.60** se indica que la cuota de alimentación del punto de agua UF3-PA29 ubicado en correspondencia con la sección S3 se reduce en aprox. un 40% después de 10 años de la apertura de la excavación. Los impactos después de 100 días del inicio de la excavación son de aprox. un 20% respecto a las condiciones de flujo no perturbado.

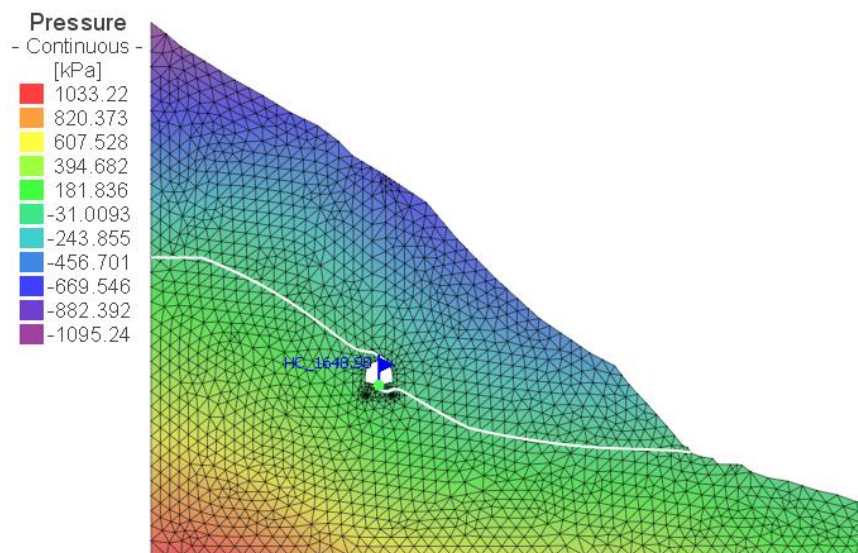
Tabla 5-2.60. Curva de alimentación del punto de agua UF3-PA29 a lo largo de la sección S3.



Fuente: Aecom – Concol, 2018

En la **Figura 5-2.154** se representan los flujos a largo plazo (10 años) y se observa que el túnel drena los circuitos en roca mientras que el punto de agua UF3-PA29 permanece alimentado por los circuitos subsuperficiales.

Figura 5-2.154. Simulación de los flujos en estado transitorio a lo largo de la sección S3 con presencia del túnel (10 años).

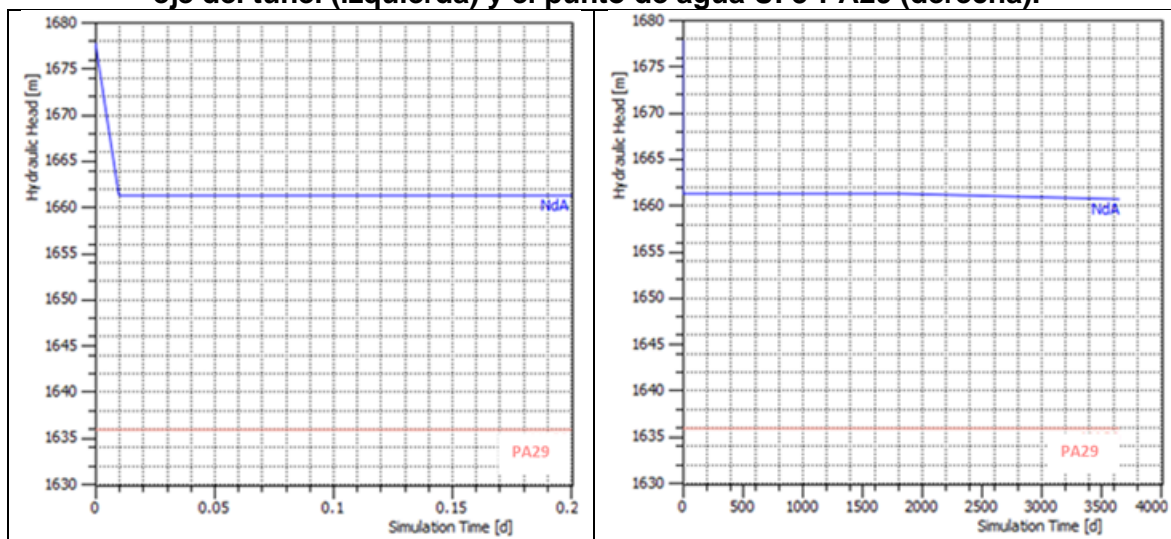


Fuente: Aecom – Concol, 2018

En la **Figura 5-2.155** se nota que el efecto del drenaje no tiene un efecto significativo en términos de cota topográfica sobre el punto en el cual emerge el punto de agua UF3-PA29,

mientras que en correspondencia con el eje del túnel el nivel se abate hasta la base de los hastiales del túnel.

Figura 5-2.155. Variación del nivel piezométrico simulado en correspondencia con el eje del túnel (izquierda) y el punto de agua UF3-PA29 (derecha).



NdA: Nivel del Agua

Fuente: Aecom – Concol, 2018

5.1.8.15.6 Caudal crítico

El trazado del túnel se caracteriza por presentar una carga hidráulica generalmente baja y descolgada de la cobertura topográfica. Se observa de hecho que la carga hidráulica sea nula en correspondencia con los portales y que puede alcanzar valores máximos entre 20 y 30 m en la parte central del túnel.

De acuerdo con la valoración realizada a través de las simulaciones numéricas y el cálculo analítico del caudal esperado a corto plazo en el túnel de Pamplonita se define el caudal crítico tomando en consideración los sectores hidrogeológicamente más críticos representados por zonas de fallas geológicas reportadas en el perfil geológico geotécnico del túnel. En la **Tabla 5-2.61** se muestran los valores de caudal críticos establecidos. El valor de caudal crítico se expresa por lo tanto en términos de volumen de agua drenada después de un día de excavación.

Al término de un día de excavación, el caudal total no debe ser mayor al caudal máximo diario (m³/día) definido a partir del caudal específico (l/s/10 m de túnel) para cada tramo en particular. En estos términos, el caudal real puede haber superado el umbral mínimo y cumplir con el máximo diario dependiendo del tiempo de la respuesta para el taponamiento de las discontinuidades filtrantes.

Tabla 5-2.61. Caudal crítico establecido para el túnel de Pamplonita.

| Geología | | | Progresiva | | Longitud Tramo | Caudal crítico | |
|----------------|-------------|-------|------------|---------|----------------|----------------|------------|
| Roca | | Falla | desde | hasta | | l/s/10m | m³/día/10m |
| | | | m | m | | | |
| Fm Barco (E1b) | Arenisca | F | K47+230 | K47+240 | 10,00 | 0,1 | 9 |
| | Arcillolita | F | K47+295 | K47+305 | 10,00 | 0,04 | 3 |
| | Arenisca | F | K47+415 | K47+420 | 5,00 | 0,1 | 11 |
| | Arcillolita | F | K47+420 | K47+425 | 5,00 | 0,05 | 4 |
| | Arenisca | F | K47+515 | K47+525 | 10,00 | 0,1 | 11 |
| | Arenisca | F | K47+690 | K47+700 | 10,00 | 0,1 | 11 |
| | Arenisca | F | K47+750 | K47+760 | 10,00 | 0,1 | 9 |
| | Arenisca | F | K47+970 | K47+980 | 10,00 | 0,1 | 8 |
| | Arenisca | F | K48+075 | K48+085 | 10,00 | 0,1 | 8 |
| | Arcillolita | F | K48+150 | K48+160 | 10,00 | 0,04 | 3 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

5.1.8.15.7 Consideraciones finales

A continuación, se relacionan los principales elementos que fueron considerados en la construcción del modelo numérico realizado siguiendo el enfoque 2D en sección vertical.

Principales características del acuífero en roca

Consiste principalmente de rocas de origen sedimentario que forman una alternancia más o menos densa de niveles de composición arenosa y arcillosa e intermedias. Por lo tanto, se han distinguido 2 subunidades hidrogeológicas principales que presentan una variabilidad interna de la permeabilidad y que se ilustran en la **Tabla 5-2.37**. Estas distinciones se realizaron no sólo en función de la formación geológica a la que pertenecen sino más bien en relación con la litología, su composición granulométrica, su reología y, obviamente, con base en los datos de permeabilidad disponibles.

La permeabilidad obtenida a través de pruebas in situ realizadas en perforaciones mecánicas evidencian una permeabilidad media comprendida entre 5E-7 m/s a 1E-7 m/s para los litotipos arenosos y de 2E-7 a 5E-8 m/s para aquellos más arcillosos. Estos valores son analizados y en la

Tabla 5-2.36 se entrega una propuesta estadística de todos los datos obtenidos a través de las pruebas de permeabilidad realizadas en el sustrato rocoso, en los sondeos ejecutados a lo largo de la traza del túnel.

De este análisis se evidencia que el macizo rocoso en el cual será excavado el túnel se caracteriza por presentar una permeabilidad de baja a media de acuerdo con la clasificación de la norma AFTES.

La superficie piezométrica medida en los piezómetros instalados a lo largo de la traza se presenta generalmente a profundidad significativa y generalmente descolgada de la superficie topográfica. La posición de la superficie piezométrica por encima de la cota del túnel se ilustra en la **Figura 5-2.120**. Se trata de una superficie piezométrica que drena en el fondo del valle del Río Pamplonita y de recarga generalmente reducida, tal como lo evidencia el estudio de valoración de la recarga presentado en el capítulo 5.1.8.12.3.

Desde un punto de vista hidroquímico, el agua muestreada en los sondeos presenta una conductividad eléctrica que varía entre 24 y 405 microS/cm indicando una baja mineralización. Se trata por lo tanto de agua conexas con circuitos poco profundos y rápidos, con un tiempo de residencia breve y poca interacción con la matriz sólida del acuífero en roca.

El modelo geológico de referencia pone en evidencia la presencia de zonas de fallas o mayor fracturación perpendiculares al trazado del túnel que pueden llegar a inducir a un incremento de la permeabilidad del macizo rocoso que será interceptado por el túnel. Regionalmente se tiene un marco tectónico complejo influenciado por el sistema de fallas regionales conocido como Pamplona - Chitagá en dirección dominante N-S.

Principales características de los acuíferos superficiales

Los datos disponibles indican que los puntos de agua inventariados son en la mayoría de los casos de tipo perenne y que algunos de ellos son utilizados para fines domésticos. En particular, los puntos de agua UF3-PA01, UF3-PA03, UF3-PA04 y UF3-PA54 tienen mayor relevancia en este sentido.

Los datos hidrodinámicos de los puntos de agua inventariados, muestreados y analizados indican que los circuitos que los alimentan son principalmente de tipo subsuperficial, rápidos y limitados.

Aparentemente, el retículo hidrográfico menor por encima del túnel se encuentra poco desarrollado y se activa especialmente durante precipitaciones importantes. Los puntos de agua, al parecer tienen mayor permanencia, aunque el caudal sea generalmente bajo ($Q < 1$ l/s).

La correlación entre conductividad eléctrica y mineralización del agua en términos de TDS (Total Dissolved Solids) indican que el agua muestreada se clasifica como agua poco mineralizada ($TDS \leq 50$ mg/l) y mineral ($50 < TDS \leq 500$ mg/l); el valor máximo es de 200 mg/l. La medida de actividad redox indica un ambiente oxidante ($Eh > 0$ mV).

La subsistencia de los acuíferos superficiales generalmente no conexas con el nivel piezométrico en roca, pero suficientemente desarrollados para garantizar la permanencia del punto de agua; sugieren que estos se encuentran limitados en la base por horizontes de baja permeabilidad que en las condiciones de equilibrio hidráulico actual les dan la

característica de acuífero colgado.

Los niveles de baja permeabilidad que constituyen el lecho de los acuíferos colgados están constituidos por los horizontes de alteración del sustrato rocoso que forma un material arcillo-limoso continuo, pero de potencia limitada; los valores de permeabilidad obtenidos de las pruebas Lefranc evidencian un valor de permeabilidad reducido del orden de 1E-8 m/s;

Los acuíferos superficiales se encuentran por su parte constituidos por espesores considerables de material coluvial y abanicos de permeabilidad muy variable. La alimentación de estos acuíferos proviene en su mayor parte de la precipitación.

Los acuíferos superficiales donde se alojan los flujos que alimentan los puntos de agua han sido representados en el modelo numérico adoptado y la simulación en régimen estacionario ha sido calibrada además del nivel piezométrico del acuífero en roca, considerando también la presencia de los puntos de agua en superficie.

5.1.8.16 Red de Monitoreo

Se propone a continuación una red de monitoreo representativa de la calidad y cantidad de agua superficial y subterránea presente a lo largo de las Unidades Funcionales 3-4-5. Entre los puntos de agua censados, se ha identificado una serie representativa del contexto hidrológico e hidrogeológico, que se sugiere controlar en el tiempo para monitorear las variaciones de caudal del agua superficial y subterránea, así como la evolución de sus parámetros fisicoquímicos in situ (conductividad eléctrica, temperatura, pH) y de calidad.

La Red de Monitoreo se convierte en una Línea Base, que aportará información para el conocimiento, la evaluación y el control de la situación hidrogeológica del área de estudio.

Se propone dar inicio a este monitoreo antes del comienzo de las excavaciones de las obras, continuarlo durante su fase constructiva y como mínimo durante un año después de terminada la construcción de las UF3-4-5.

5.1.8.16.1 Criterios de Selección de Puntos para la Red de Monitoreo

- Criterios Generales:

La selección de los puntos de la red de monitoreo se basa en criterios específicos del proyecto, en los resultados del presente estudio hidrogeológico y en concordancia con algunas recomendaciones generales establecidas por la Organización Meteorológica Mundial (1994). Cada criterio corresponde a la valoración de cada una de las variables que se requieren a continuación.

- i. Determinar la profundidad del nivel freático.
- ii. Determinar la dirección del flujo del agua subterránea.

- iii. Medición de los caudales de los principales cursos de agua superficial en términos de afectación del caudal por la presencia de la obra.
- iv. Determinar la relación con cuerpos mineralizados de aguas subterráneas.
- v. Calibrar modelos de cuencas hidrogeológicas.
- vi. Prever los niveles de agua y la composición química en base a diversos planes de gestión del acuífero.
- vii. Supervisar la explotación del agua y la recarga superficial.

Las observaciones, mediciones, y otras actividades se planean de acuerdo con los objetivos y propósitos para los que está diseñada la red. Las mediciones del nivel y/o cantidad (caudal) de agua son uno de los varios parámetros requeridos para desarrollar modelos predictivos de sistemas de aguas subterráneas. En términos generales se tienen en cuenta dos tipos de monitoreo.

- i. Monitoreo de la cantidad del recurso hídrico (A): monitoreo de los puntos de agua censados en las UF-3-4-5 (naturales y antrópicos).
- ii. Monitoreo de la calidad del recurso hídrico (B): Monitoreo de puntos de agua en general con el objeto de evidenciar su calidad antes, durante y después de construidas las obras. En este tipo de monitoreo se incluyen los puntos de agua subsuperficial y subterránea descritos en el capítulo 5.1.8.8.4.

- Criterios Particulares para la Vía Cúcuta-Pamplona (UF3-4-5):

La selección de los puntos de agua subsuperficial y de agua subterránea para el monitoreo, y frecuencia de medición, obedece a los siguientes criterios particulares del proyecto:

- i. Puntos de agua Nivel 2 y 3 de acuerdo con el criterio de valoración del potencial de afectación de los puntos de agua por la presencia de la nueva vía a cielo abierto y túnel.
- ii. Usos que los habitantes le dan a los puntos de agua.
- iii. Permanencia del punto de agua.
- iv. Puntos de agua con mayores caudales.
- v. Puntos de agua con anomalías térmicas.
- vi. Distancia del punto de agua a la obra en proyecto (se han privilegiado los puntos más cercanos a los ejes del nuevo trazado vial).
- vii. Distribución homogénea de los puntos de agua en los litotipos más representativos.
- viii. Cierres de cuencas y/o microcuencas para los puntos sobre cursos de aguas superficiales (AS).

La selección de los puntos sobre cursos de aguas superficiales obedece básicamente a un solo criterio:

- i. Todos aquellos cursos de aguas que son interceptados por el nuevo trazado vial. Los puntos de control se ubican aguas abajo del flujo superficial que se prevé será interceptado por el nuevo trazado vial.

En el monitoreo de puntos de aguas superficiales se han incluido aquellos cursos de agua presentes en la red hidrográfica interceptados por el trazado del túnel en superficie. De acuerdo con las observaciones de campo la mayoría de estos cursos de agua se activan solamente en épocas de mayores precipitaciones. Se han incluido en la red de monitoreo justamente para evidenciar su permanencia o no antes del inicio de la construcción de la obra subterránea.

5.1.8.16.2 Puntos de agua seleccionados para integrar la red de monitoreo propuesta

Tomando en cuenta los criterios y consideraciones mencionados anteriormente, se ha definido una red de monitoreo constituida inicialmente por 103 puntos de agua, mostrados en la **Tabla 5-2.63** y **Tabla 5-2.64** y **Tabla 5-2.65**, representados por 61 puntos de agua (PA), 8 piezómetros y 34 puntos sobre cursos de aguas superficiales (AS). Estos últimos se conciliarán por los propuestos en el componente de hidrología para llegar a una sola propuesta de puntos, en el capítulo de medidas de manejo.

Los puntos inicialmente identificados para la red de monitoreo pueden aumentar o disminuir dependiendo del comportamiento evidenciado durante las mediciones realizadas coherentemente con el posible comportamiento estacional de los puntos seleccionados.

- Tipo de puntos y tipo de mediciones (monitoreo tipo A):

A continuación, se describen los tipos de puntos y de mediciones que deben llevarse a cabo en los puntos de agua seleccionados por el monitoreo de tipo A (**Tabla 5-2.62**)

Tabla 5-2.62 Tipo de punto de control y mediciones relacionadas con el monitoreo tipo A de los puntos de agua seleccionados

| Medición | Pozo/aljibe | Piezómetro | Curso de agua | Manantial | Flujo subsuperficial | Resurgencia |
|---------------------------|-------------|------------|---------------|-----------|----------------------|-------------|
| Caudal | | | X | X | X | X |
| Nivel de agua | X | X | | | | |
| Parámetros Físicoquímicos | X | X | X | X | X | X |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

Debido a que en el inventario realizado en la zona de influencia de las UF3-4-5 no se encontraron pozos ni aljibes, el monitoreo se plantea solamente en puntos de aguas subsuperficial y subterránea, incluyendo piezómetros y en puntos ubicados sobre cursos de aguas superficiales.

Por otro lado, los tipos de mediciones a realizar en los puntos de control identificados en la **Tabla 5-2.62** para monitoreo Tipo A, son las siguientes:

- i. **Caudal:** se debe medir en los puntos de agua y cursos de agua superficial, con el fin de controlar las oscilaciones estacionales y correlacionar las eventuales disminuciones con las actividades constructivas del proyecto.
- ii. **Nivel de la napa (eventual):** se mide en los piezómetros con el fin de controlar las oscilaciones estacionales del nivel piezométrico y correlacionar las eventuales disminuciones especialmente en correspondencia con los cortes o taludes más altos del proyecto.
- iii. **Parámetros físicoquímicos:** Se tomarán medidas de control en todos los puntos de monitoreo relacionadas con la conductividad eléctrica del agua, la temperatura y el pH.



| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA |
| Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta | |


Tabla 5-2.63 Puntos de agua subsuperficial y subterránea que integran la red de monitoreo.

| Pto de Agua (ID PA) | Tipo de Punto | Coordenadas Magna Sirgas (origen Bogotá) | | | Distancia Horizontal al eje | Obra más cercana | Abscisa Perímetro (Referencia) | Nivel de Afectación | Tipo de Monitoreo | |
|---------------------|---------------|--|-----------|-----------|-----------------------------|------------------|--------------------------------|---------------------|-------------------|----|
| | | ID | E | N | ELEV | | | | A | B |
| UF3-PA01 | MANANTIAL | | 1,160,160 | 1,314,278 | 1,868 | 323 | Tunel | K48+150 | 1 | OK |
| UF3-PA02 | RESURGENCIA | | 1,160,029 | 1,313,981 | 1,763 | 115 | Vía | K48+470 | 1 | OK |
| UF3-PA03 | RESURGENCIA | | 1,160,027 | 1,314,126 | 1,777 | 137 | Tunel | K48+320 | 1 | OK |
| UF3-PA04 | RESURGENCIA | | 1,160,099 | 1,314,170 | 1,818 | 219 | Tunel | K48+300 | 1 | OK |
| UF3-PA06 | MANANTIAL | | 1,160,002 | 1,315,124 | 1,906 | 484 | Tunel | K47+360 | 1 | OK |
| UF3-PA07 | RESURGENCIA | | 1,160,103 | 1,315,191 | 1,910 | 601 | Tunel | K47+340 | 1 | OK |
| UF3-PA08 | MANANTIAL | | 1,159,991 | 1,315,376 | 1,863 | 547 | Tunel | K47+150 | 1 | OK |
| UF3-PA10 | INTERFLUJO | | 1,160,450 | 1,313,709 | 1,737 | 48 | Vía | K49+000 | 1 | OK |
| UF3-PA11 | INTERFLUJO | | 1,160,251 | 1,313,731 | 1,731 | 15 | Vía | K49+028 | 3 | OK |
| UF3-PA12 | MANANTIAL | | 1,159,373 | 1,317,920 | 1,495 | 54 | Vía | K44+235 | 2 | OK |
| UF3-PA13 | MANANTIAL | | 1,159,496 | 1,318,414 | 1,500 | 129 | Vía | K43+690 | 1 | OK |
| UF3-PA15 | INTERFLUJO | | 1,159,200 | 1,320,633 | 1,327 | 13 | Vía | K41+326 | 2 | OK |
| UF3-PA16 | INTERFLUJO | | 1,159,140 | 1,320,926 | 1,313 | 50 | Vía | K41+010 | 1 | OK |
| UF3-PA17 | INTERFLUJO | | 1,159,174 | 1,321,257 | 1,297 | 11 | Vía | K40+661 | 3 | OK |
| UF3-PA18 | INTERFLUJO | | 1,159,246 | 1,321,403 | 1,303 | 37 | Vía | K40+501 | 1 | OK |
| UF3-PA19 | RESURGENCIA | | 1,159,234 | 1,321,629 | 1,299 | 8 | Vía | K40+284 | 3 | OK |
| UF3-PA20 | RESURGENCIA | | 1,159,213 | 1,322,250 | 1,274 | 18 | Vía | K39+663 | 1 | OK |
| UF3-PA21 | RESURGENCIA | | 1,159,156 | 1,324,321 | 1,194 | 20 | Vía | K37+466 | 2 | OK |
| UF3-PA23 | RESURGENCIA | | 1,159,329 | 1,326,132 | 1,187 | 116 | Vía | K35+635 | 1 | OK |
| UF3-PA25 | RESURGENCIA | | 1,159,059 | 1,315,768 | 1,574 | 92 | Vía | K46+500 | 1 | OK |
| UF3-PA26 | MANANTIAL | | 1,159,040 | 1,315,930 | 1,573 | 78 | Vía | K46+335 | 1 | OK |

| Pto de Agua (ID PA) | Tipo de Punto | Coordenadas Magna Sirgas (origen Bogotá) | | | Distancia Horizon- tal al eje | Obra más cercana | Abscisa Perímetro (Referencia) | Nivel de Afectación | Tipo de Monitoreo | |
|------------------------|---------------|---|-----------|-------|--|---------------------|--------------------------------------|------------------------|-------------------|----|
| | | E | N | ELEV | | | | | A | B |
| UF3-PA27 | INTERFLUJO | 1,159,025 | 1,315,966 | 1,588 | 81 | Vía | K46+278 | 1 | OK | |
| UF3-PA28 | RESURGENCIA | 1,159,476 | 1,314,833 | 1,666 | 104 | Tunel | K47+480 | 1 | OK | |
| UF3-PA29 | MANANTIAL | 1,159,407 | 1,314,880 | 1,635 | 156 | Tunel | K47+400 | 1 | OK | |
| UF3-PA30 | INTERFLUJO | 1,159,532 | 1,314,703 | 1,683 | 87 | Tunel | K47+620 | 1 | OK | |
| UF3-PA31 | INTERFLUJO | 1,159,241 | 1,321,375 | 1,310 | 41 | Vía | K40+530 | 1 | OK | |
| UF3-PA32 | INTERFLUJO | 1,159,708 | 1,315,024 | 1,836 | 173 | Tunel | K47+380 | 1 | OK | |
| UF3-PA33 | MANANTIAL | 1,159,021 | 1,315,955 | 1,613 | 90 | Vía | K46+290 | 1 | OK | |
| UF3-PA39 | ANTROPICO | 1,159,183 | 1,320,459 | 1,351 | 23 | Vía | K41+500 | 3 | OK | |
| UF3-PA40 | ANTROPICO | 1,159,185 | 1,320,519 | 1,346 | 26 | Vía | K41+450 | 2 | OK | |
| UF4-PA01 | MANANTIAL | 1.161.314 | 1.338.265 | 878 | 130 | Vía | K21+138 | 1 | OK | OK |
| UF4-PA02 | MANANTIAL | 1.161.348 | 1.338.268 | 862 | 109 | Vía | K21+126 | 1 | OK | OK |
| UF4-PA03 | MANANTIAL | 1.161.368 | 1.338.283 | 842 | 106 | Vía | K21+105 | 1 | OK | |
| UF4-PA06 | MANANTIAL | 1.160.022 | 1.335.864 | 964 | 397 | Vía | K25+277 | 1 | OK | OK |
| UF4-PA08 | RESURGENCIA | 1.161.374 | 1.338.299 | 843 | 116 | Vía | K21+090 | 1 | OK | |
| UF4-PA11 | INTERFLUJO | 1.159.459 | 1.328.012 | 1094 | 83 | Vía | K33+644 | 1 | OK | |
| UF4-PA12 | INTERFLUJO | 1.159.513 | 1.327.909 | 1177 | 147 | Vía | K33+738 | 1 | OK | OK |
| UF4-PA13 | RESURGENCIA | 1.158.748 | 1.329.639 | 1092 | 8 | Vía | K31+803 | 3 | OK | |
| UF4-PA14 | RESURGENCIA | 1.159.531 | 1.332.952 | 969 | 33 | Vía | K28+244 | 1 | OK | OK |
| UF4-PA15 | INTERFLUJO | 1.159.592 | 1.333.433 | 1012 | 42 | Vía | K27+750 | 3 | OK | |
| UF4-PA16 | RESURGENCIA | 1.159.712 | 1.333.818 | 952 | 0 | Vía | K27+345 | 3 | OK | |
| UF4-PA17 | RESURGENCIA | 1.159.599 | 1.335.645 | 920 | 31 | Vía | K25+466 | 1 | OK | OK |
| UF4-PA18 | RESURGENCIA | 1.159.611 | 1.335.667 | 916 | 19 | Vía | K25+445 | 1 | OK | |

| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA |
| Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta | |

| Pto de Agua (ID PA) | Tipo de Punto | Coordenadas Magna Sirgas (origen Bogotá) | | | Distancia Horizontal al eje | Obra más cercana | Abscisa Perímetro (Referencia) | Nivel de Afectación | Tipo de Monitoreo | |
|---------------------|---------------|--|-----------|-------|-----------------------------|------------------|--------------------------------|---------------------|-------------------|----|
| | | E | N | ELEV | | | | | A | B |
| UF4-PA19 | RESURGENCIA | 1.159.617 | 1.335.784 | 910 | 11 | Vía | K25+327 | 3 | OK | |
| UF4-PA20 | RESURGENCIA | 1.159.701 | 1.337.421 | 898 | 32 | Vía | K23+664 | 3 | OK | |
| UF4-PA21 | RESURGENCIA | 1.159.789 | 1.337.629 | 894 | 40 | Vía | K23+420 | 3 | OK | OK |
| UF4-PA22 | RESURGENCIA | 1.159.665 | 1.336.910 | 890 | 39 | Vía | K24+161 | 2 | OK | |
| UF4-PA23 | RESURGENCIA | 1.160.238 | 1.338.278 | 906 | 141 | Vía | K22+750 | 1 | OK | OK |
| UF4-PA24 | INTERFLUJO | 1.161.679 | 1.338.620 | 826 | 50 | Vía | K20+613 | 1 | OK | OK |
| UF4-PA25 | RESURGENCIA | 1.161.398 | 1.339.352 | 880 | 162 | Vía | K19+735 | 1 | OK | |
| UF4-PA26 | RESURGENCIA | 1.161.472 | 1.339.425 | 861 | 74 | Vía | K19+706 | 1 | OK | |
| UF4-PA27 | RESURGENCIA | 1.161.521 | 1.339.444 | 833 | 25 | Vía | K19+693 | 3 | OK | |
| UF4-PA28 | RESURGENCIA | 1.161.519 | 1.339.462 | 823 | 27 | Vía | K19+677 | 3 | OK | OK |
| UF4-PA29 | RESURGENCIA | 1.161.547 | 1.339.714 | 835 | 40 | Vía | K19+435 | 3 | OK | |
| UF4-PA30 | MANANTIAL | 1.161.325 | 1.338.283 | 862 | 135 | Vía | K21+125 | 1 | OK | OK |
| UF4-PA31 | RESURGENCIA | 1.161.978 | 1.341.194 | 751 | 21 | Vía | K17+725 | 1 | OK | |
| UF4-PA32 | RESURGENCIA | 1.161.979 | 1.341.162 | 748 | 19 | Vía | K17+758 | 1 | OK | |
| UF4-PA33 | RESURGENCIA | 1.158.991 | 1.330.654 | 1016 | 2 | Vía | K30+717 | 3 | OK | |
| UF4-PA34 | INTERFLUJO | 1.159.671 | 1.336.990 | 887 | 31 | Vía | K24+085 | 1 | OK | |
| UF4-PA44 | INTERFLUJO | 1.158.485 | 1.335.607 | 1018 | 1138 | Vía | K23+039 | 1 | OK | |
| UF4-PA45 | INTERFLUJO | 1.159.006 | 1.335.491 | 1036 | 623 | Vía | K24+843 | 1 | OK | |
| UF4-PA51 | MANANTIAL | 1,161,978 | 1,341,184 | 772 | 20 | Vía | K17+720 | 1 | OK | |
| UF4-PA54 | RESURGENCIA | 1,161,967 | 1,338,970 | 882 | 315 | ZODME 402 | K20+380 | 3 | OK | |
| UF4-PA75 | RESURGENCIA | 1,159,812 | 1,334,234 | 945 | 17 | Vía | K26+910 | 3 | OK | |
| UF4-PA86 | ALJIBE | 1,159,195 | 1,328,552 | 1,056 | 28 | Vía | K33+050 | 3 | OK | |

| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA |
| Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta | |

| Pto de Agua (ID PA) | Tipo de Punto | Coordenadas Magna Sirgas (origen Bogotá) | | | Distancia Horizontal al eje | Obra más cercana | Abscisa Perímetro (Referencia) | Nivel de Afectación | Tipo de Monitoreo | |
|---------------------|---------------|--|-----------|------|-----------------------------|------------------|--------------------------------|---------------------|-------------------|---|
| | | E | N | ELEV | | | | | A | B |
| UF5-PA01 | RESURGENCIA | 1.162.753 | 1.344.287 | 924 | 1633 | Zodme 533 | K15+600 | 1 | OK | |
| UF5-PA02 | INTERFLUJO | 1.165.266 | 1.343.588 | 846 | 229 | Acceso Zodme 724 | K13+319 | 1 | OK | |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

Tabla 5-2.64 Piezómetros que integran la red de monitoreo del túnel de Pamplonita y correspondencia con puntos de sondeo.

| Sondeo Referencia (ID) | Código Definitivo (Pto agua) | Prof. (m) | Coordenadas origen Magna Sirgas Bogotá | | | Fecha | Nivel medido de agua (m) |
|------------------------|------------------------------|-----------|--|-----------|-------|--------|--------------------------|
| | | | E | N | ELEV | | |
| UF3 - S33 | UF3-PZ01 | 60 | 1,159,465 | 1,315,212 | 1,663 | may-18 | 38,7 |
| | | | | | | jul-18 | 41,76 |
| UF3-S32A | UF3-PZ02 | 35 | 1,159,484 | 1,315,229 | 1,662 | may-18 | 17,39 |
| | | | | | | jul-18 | 19,6 |
| UF3 - S32 | UF3-PZ03 | 25 | 1,159,491 | 1,315,139 | 1,709 | may-18 | 17,52 |
| | | | | | | jul-18 | 18,77 |
| UF3-S37A | UF3-PZ04 | 45,3 | 1,159,820 | 1,314,233 | 1,720 | may-18 | 37,35 |
| | | | | | | jul-18 | 39,92 |
| UF3-S36 | UF3-PZ05 | 40 | 1,159,758 | 1,314,295 | 1,726 | may-18 | 30,99 |
| | | | | | | jul-18 | 36,23 |
| UF3-S37 | UF3-PZ06 | 45 | 1,159,799 | 1,314,209 | 1,697 | may-18 | 38,55 |
| | | | | | | jul-18 | 40,06 |
| UF3-S35 | UF3-PZ07 | 95 | 1,159,647 | 1,314,651 | 1,700 | may-18 | 60,34 |
| | | | | | | jul-18 | 62,8 |
| UF3-S37A-B2 | UF3-PZ08 | 60 | 1,159,827 | 1,314,233 | 1,717 | may-18 | 27,25 |
| | | | | | | jul-18 | 39,5 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018



| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA |
| Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta | |


Tabla 5-2.65 Puntos de agua representados por puntos sobre cursos de aguas superficiales que integran la red de monitoreo de las UF3-4-5.

| ID Punto | Vereda | Municipio | Punto de monitoreo | Nombre Curso de agua | Ubicación Obra | Este | Norte | Monitoreo tipo A | Monitoreo tipo B |
|----------|--------------|------------|--------------------|-------------------------------|----------------|-----------|-----------|------------------|------------------|
| AS_1 | La Hojancha | Pamplonita | P21 | Rio Pamplonita | Vía | 1,160,437 | 1,313,647 | OK | OK |
| AS_2 | El Colorado | Pamplonita | P23 | NN-111 | Vía | 1,159,876 | 1,314,108 | OK | OK |
| AS_3 | S/I | Pamplonita | AS_3 | Qda NN | Túnel | 1,159,897 | 1,314,126 | OK | |
| AS_4 | S/I | Pamplonita | AS_4 | Qda NN | Túnel | 1,159,727 | 1,314,264 | OK | |
| AS_5 | S/I | Pamplonita | AS_5 | Qda NN | Túnel | 1,159,639 | 1,314,655 | OK | |
| AS_6 | S/I | Pamplonita | AS_6 | Qda NN | Túnel | 1,159,609 | 1,314,761 | OK | |
| AS_7 | S/I | Pamplonita | AS_7 | Qda NN | Túnel | 1,159,576 | 1,314,865 | OK | |
| AS_8 | S/I | Pamplonita | AS_8 | Qda NN | Túnel | 1,159,541 | 1,314,980 | OK | |
| AS_9 | S/I | Pamplonita | AS_9 | Qda NN | Túnel | 1,159,404 | 1,315,387 | OK | |
| AS_10 | San Rafael | Pamplonita | P26 | Le_001 | Vía | 1,159,444 | 1,315,266 | OK | OK |
| AS_11 | San Antonio | Pamplonita | P27 | Quebrada Santa Helena | Vía | 1,159,170 | 1,316,556 | OK | OK |
| AS_12 | San Antonio | Pamplonita | P29 | Quebrada La Cucalina | Vía | 1,159,366 | 1,317,746 | OK | OK |
| AS_13 | San Antonio | Pamplonita | P30 | NN-121 | Vía | 1,159,276 | 1,317,914 | OK | OK |
| AS_14 | Buenos Aires | Pamplonita | P33 | Quebrada la Teja | Vía | 1,159,398 | 1,319,961 | OK | OK |
| AS_15 | Buenos Aires | Pamplonita | P37 | Quebrada Tulantá (Carpintero) | Vía | 1,159,156 | 1,320,717 | OK | OK |
| AS_16 | La Palmita | Pamplonita | P38 | C-1 | Vía | 1,159,103 | 1,321,027 | OK | OK |
| AS_17 | La Palmita | Pamplonita | P39 | NN-127 | Vía | 1,159,212 | 1,321,494 | OK | OK |
| AS_18 | La Palmita | Pamplonita | P40 | Quebrada de Jiménez | Vía | 1,159,056 | 1,323,233 | OK | OK |
| AS_19 | La Palmita | Pamplonita | P41 | Quebrada La Regada | Vía | 1,159,212 | 1,323,415 | OK | OK |
| AS_20 | Matajira | Pamplonita | P44 | Quebrada La Estrella | Vía | 1,159,079 | 1,324,724 | OK | OK |
| AS_21 | Matajira | Pamplonita | P45 | Quebrada de Medio Lado | Vía | 1,159,039 | 1,325,787 | OK | OK |
| AS_22 | Matajira | Pamplonita | P46 | Quebrada el Trébol | Vía | 1,159,141 | 1,326,309 | OK | OK |
| AS_24 | El Volcán | Pamplonita | P49 | NN-133 | Vía | 1,159,184 | 1,327,213 | OK | OK |
| AS_31 | Zarcuta | Bochalema | P62 | Quebrada el Laurel | Vía | 1,159,014 | 1,330,442 | OK | OK |

| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA |
| Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta | |

| ID Punto | Vereda | Municipio | Punto de monitoreo | Nombre Curso de agua | Ubicación Obra | Este | Norte | Monitoreo tipo A | Monitoreo tipo B |
|----------|----------------|-----------|--|-------------------------|----------------|-----------|-----------|------------------|------------------|
| AS_32 | Zarcuta | Bochalema | UF3_4_5 PUNTO 63 Lago Coordillera Country Club | Le_006 | Vía | 1,159,068 | 1,330,793 | OK | OK |
| AS_33 | Peñaviva | Bochalema | P72 | Le_007 | Vía | 1,159,773 | 1,333,702 | OK | OK |
| AS_34 | Peñaviva | Bochalema | UF3_4_5 PUNTO 75 Quebrada Chiracoque | Quebrada Chiracoca | Vía | 1,159,646 | 1,335,032 | OK | OK |
| AS_35 | Calaluna | Bochalema | UF3_4_5 PUNTO 78 | Le_008 | Vía | 1,159,568 | 1,336,264 | OK | OK |
| AS_36 | Calaluna | Bochalema | UF3_4_5 PUNTO 79 | Quebrada Llano Bonito-1 | Vía | 1,159,583 | 1,336,347 | OK | OK |
| AS_37 | Naranjales | Bochalema | UF3_4_5 PUNTO 85 Quebrada Suarez | Quebrada La Suarez | Vía | 1,161,594 | 1,339,234 | OK | OK |
| AS_38 | Nueva Donjuana | Chinácota | UF3_4_5 PUNTO 89 QUEBRADA ISCALA | Quebrada Iscalá | Vía | 1,163,014 | 1,342,524 | OK | OK |
| AS_39 | Corozal | Chinácota | UF3_4_5 PUNTO 90 QUEBRADA LA HONDA | Quebrada La Honda | Vía | 1,164,369 | 1,343,263 | OK | OK |
| AS_40 | La Hojancha | Chinácota | Punto 1 Vertimiento túnel 2 | Rio Pamplonita | Vía | 1,159,291 | 1,315,352 | OK | OK |
| AS_41 | La Hojancha | Chinácota | Punto 2 Vertimiento túnel 2 | NN116 | Vía | 1,159,816 | 1,314,124 | OK | OK |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta |
|--|--|

- Tipo de puntos y tipo de mediciones (monitoreo tipo B):

El monitoreo tipo B se hace en afloramientos y en cursos de aguas superficiales. Los parámetros seleccionados, de tipo hidrogeoquímico y bacteriológico, corresponden a los indicados en la Tabla de la Resolución 751 de marzo del 2017, emitida por Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, los cuales se presentan en la **Tabla 5-2.66**.

Tabla 5-2.66 Parámetros del monitoreo tipo B según las especificaciones de la Tabla 5 de la Resolución N. 0751 del 2015.

| | |
|-------------------------|---|
| Caracterización Física | Componente Agua |
| | Temperatura (°C). |
| | Sólidos suspendidos totales (mg/L), disueltos totales (mg/L), sedimentables (ml/L-h). |
| | Conductividad eléctrica (uS/cm). |
| | Potencial de Hidrógeno - pH (unidades de pH). |
| | Turbiedad (UNn). |
| Caracterización Química | Componente Agua |
| | Oxígeno disuelto (OD) (mo/L O ₂). |
| | Demanda Química de Oxígeno (DQO) (mg/L O ₂). |
| | Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco (5) días (DB0 ₅) 'mg/L O ₂). |
| | Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK). |
| | Fósforo Total (mg/L P). |
| | Grasas y aceites (mg/L). |
| | Alcalinidad Total (mg/L CaCO ₃) y Acidez Total (mg/L CaCO ₃). |
| | Dureza Cálrica (mg/L CaCO ₃) y Dureza Total (mg/L CaCO ₃). |
| | Fenoles Totales (mg/L). |
| | Metales y Metaloides (Arsénico, Bario, Cadmio, Zinc, Cromo, Cobre, Mercurio, Níquel, Plata, Plomo, Selenio) (mg/L). * |

| Caracterización Biológica | Componente Agua |
|------------------------------|----------------------------------|
| | Coliformes totales (NMP/100 ml). |
| | Coliformes fecales (NMP/100 ml). |

Fuente: Tabla 5 Resolución N. 0751 del 2015

Los análisis de calidad de agua deben realizarse a través de laboratorios acreditados por el IDEAM, o la entidad responsable de su acreditación, tanto para la toma de muestras como para el análisis de los parámetros indicados en la **Tabla 5-2.66**.

5.1.8.16.3 Frecuencia de las mediciones

El monitoreo debería hacerse en el mismo periodo de tiempo para todos los puntos de agua seleccionados, con frecuencia variable de acuerdo con los parámetros a medir:

- Con frecuencia mensual hasta trimestral para la medición del caudal y parámetros fisicoquímicos en puntos de agua subsuperficial y subterránea, cursos de aguas superficiales y eventualmente en piezómetros (monitoreo tipo A). Para este último en el caso corresponde la medición del nivel piezométrico/freático con la misma frecuencia indicada.
- Una medición antes del inicio de las obras, durante construcción y después de terminadas las obras para el análisis químico en los puntos de agua seleccionados (monitoreo tipo B). Se debe procurar incluir los dos periodos climáticos más frecuentes de la región.

En la **Tabla 5-2.67** se indica para cada punto su relativa frecuencia de medición antes, durante y después de la construcción de la obra.

Se aclara que el cronograma del monitoreo previsto está estrechamente ligado al cronograma de construcción de la obra, por lo que el mismo puede ser adaptado o modificado de acuerdo con los cambios que se introduzcan al programa de construcción.



| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA |
| Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta | |


Tabla 5-2.67 Frecuencia de medición red de monitoreo de las UF3-4-5

| IDENTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS A MONITOREAR | | | | Obra más | Nivel | ANTES DE CONSTRUCCIÓN | | DURANTE CONSTRUCCIÓN | | OPERACIÓN | |
|---|---------------|---------|---------|----------|------------|--------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | | | Próxima | afectación | (1 año, 6 meses o menos) | | (Tiempo total construcción UF3-4-5) | | 1 AÑO | |
| CODIGO | TIPO DE PUNTO | E | N | (---) | (---) | Monitoreo Tipo A | Monitoreo Tipo B | Monitoreo Tipo A | Monitoreo Tipo B | Monitoreo Tipo A | Monitoreo Tipo B |
| UF3-PA01 | MANANTIAL | 1160160 | 1314278 | Tunel | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PA02 | RESURGENCIA | 1160029 | 1313981 | Vía | 1 | Mensual | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| UF3-PA03 | RESURGENCIA | 1160027 | 1314126 | Tunel | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PA04 | RESURGENCIA | 1160099 | 1314170 | Tunel | 1 | Mensual | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| UF3-PA06 | MANANTIAL | 1160002 | 1315124 | Tunel | 1 | Mensual | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| UF3-PA07 | RESURGENCIA | 1160103 | 1315191 | Tunel | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PA08 | MANANTIAL | 1159991 | 1315376 | Tunel | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PA10 | INTERFLUJO | 1160450 | 1313709 | Vía | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PA11 | INTERFLUJO | 1160251 | 1313731 | Vía | 3 | Mensual | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| UF3-PA12 | MANANTIAL | 1159373 | 1317920 | Vía | 2 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PA13 | MANANTIAL | 1159496 | 1318414 | Vía | 1 | Mensual | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| UF3-PA15 | INTERFLUJO | 1159200 | 1320633 | Vía | 2 | Mensual | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| UF3-PA16 | INTERFLUJO | 1159140 | 1320926 | Vía | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PA17 | INTERFLUJO | 1159174 | 1321257 | Vía | 3 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PA18 | INTERFLUJO | 1159246 | 1321403 | Vía | 1 | Mensual | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| UF3-PA19 | RESURGENCIA | 1159234 | 1321629 | Vía | 3 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PA20 | RESURGENCIA | 1159213 | 1322250 | Vía | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PA21 | RESURGENCIA | 1159156 | 1324321 | Vía | 2 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PA23 | RESURGENCIA | 1159329 | 1326132 | Vía | 1 | Mensual | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| UF3-PA25 | RESURGENCIA | 1159059 | 1315768 | Vía | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PA26 | MANANTIAL | 1159040 | 1315930 | Vía | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |


| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA |
| Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta | |

| IDENTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS A MONITOREAR | | | | Obra más Próxima | Nivel afectación | ANTES DE CONSTRUCCIÓN (1 año, 6 meses o menos) | | DURANTE CONSTRUCCIÓN (Tiempo total construcción UF3-4-5) | | OPERACIÓN 1 AÑO | |
|---|---------------|-----------|-----------|------------------|------------------|---|------------------|---|------------------|--------------------|------------------|
| CODIGO | TIPO DE PUNTO | E | N | (---) | (---) | Monitoreo Tipo A | Monitoreo Tipo B | Monitoreo Tipo A | Monitoreo Tipo B | Monitoreo Tipo A | Monitoreo Tipo B |
| UF3-PA27 | INTERFLUJO | 1159025 | 1315966 | Vía | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PA28 | RESURGENCIA | 1159476 | 1314833 | Tunel | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PA29 | MANANTIAL | 1159407 | 1314880 | Tunel | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PA30 | INTERFLUJO | 1159532 | 1314703 | Tunel | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PA31 | INTERFLUJO | 1159241 | 1321375 | Vía | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PA32 | INTERFLUJO | 1159708 | 1315024 | Tunel | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PA33 | MANANTIAL | 1159021 | 1315955 | Vía | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PA39 | ANTROPICO | 1159183 | 1320459 | Vía | 3 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PA40 | ANTROPICO | 1159485 | 1320519 | Vía | 3 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF4-PA01 | MANANTIAL | 1.161.314 | 1.338.265 | Vía | 1 | Mensual | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| UF4-PA02 | MANANTIAL | 1.161.348 | 1.338.268 | Vía | 1 | Mensual | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| UF4-PA03 | MANANTIAL | 1.161.368 | 1.338.283 | Vía | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF4-PA06 | MANANTIAL | 1.160.022 | 1.335.864 | Vía | 1 | Mensual | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| UF4-PA08 | RESURGENCIA | 1.161.374 | 1.338.299 | Vía | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF4-PA11 | INTERFLUJO | 1.159.459 | 1.328.012 | Vía | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF4-PA12 | INTERFLUJO | 1.159.513 | 1.327.909 | Vía | 1 | Mensual | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| UF4-PA13 | RESURGENCIA | 1.158.748 | 1.329.639 | Vía | 3 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF4-PA14 | RESURGENCIA | 1.159.531 | 1.332.952 | Vía | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF4-PA15 | INTERFLUJO | 1.159.592 | 1.333.433 | Vía | 3 | Mensual | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| UF4-PA16 | RESURGENCIA | 1.159.712 | 1.333.818 | Vía | 3 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF4-PA17 | RESURGENCIA | 1.159.599 | 1.335.645 | Vía | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |


| IDENTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS A MONITOREAR | | | | Obra más | Nivel | ANTES DE CONSTRUCCIÓN | | DURANTE CONSTRUCCIÓN | | OPERACIÓN | |
|---|---------------|---------------|---------------|-----------|------------|--------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | | | Próxima | afectación | (1 año. 6 meses o menos) | | (Tiempo total construcción UF3-4-5) | | 1 AÑO | |
| CODIGO | TIPO DE PUNTO | E | N | (--) | (--) | Monitoreo Tipo A | Monitoreo Tipo B | Monitoreo Tipo A | Monitoreo Tipo B | Monitoreo Tipo A | Monitoreo Tipo B |
| UF4-PA18 | RESURGENCIA | 1.159.61 1 | 1.335.66 7 | Vía | 1 | Mensual | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| UF4-PA19 | RESURGENCIA | 1.159.61 7 | 1.335.78 4 | Vía | 3 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF4-PA20 | RESURGENCIA | 1.159.70 1 | 1.337.42 1 | Vía | 3 | Mensual | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| UF4-PA21 | RESURGENCIA | 1.159.78 9 | 1.337.62 9 | Vía | 3 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF4-PA22 | RESURGENCIA | 1.159.66 5 | 1.336.91 0 | Vía | 2 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF4-PA23 | RESURGENCIA | 1.160.23 8 | 1.338.27 8 | Vía | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF4-PA24 | INTERFLUJO | 1.161.67 9 | 1.338.62 0 | Vía | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF4-PA25 | RESURGENCIA | 1.161.39 8 | 1.339.35 2 | Vía | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF4-PA26 | RESURGENCIA | 1.161.47 2 | 1.339.42 5 | Vía | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF4-PA27 | RESURGENCIA | 1.161.52 1 | 1.339.44 4 | Vía | 3 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF4-PA28 | RESURGENCIA | 1.161.51 9 | 1.339.46 2 | Vía | 3 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF4-PA29 | RESURGENCIA | 1.161.56 8 | 1.339.69 8 | Vía | 3 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF4-PA30 | MANANTIAL | 1.161.32 5 | 1.338.28 3 | Vía | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF4-PA31 | RESURGENCIA | 1.161.97 8 | 1.341.19 4 | Vía | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF4-PA32 | RESURGENCIA | 1.161.97 9 | 1.341.16 2 | Vía | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF4-PA33 | RESURGENCIA | 1.158.99 1 | 1.330.65 4 | Vía | 3 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF4-PA34 | INTERFLUJO | 1.159.67 1 | 1.336.99 0 | Vía | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF4-PA44 | INTERFLUJO | 1.158.48 5 | 1.335.60 7 | Vía | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF4-PA45 | INTERFLUJO | 1.159.00 6 | 1.335.49 1 | Vía | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF4-PA51 | MANANTIAL | 1.161.97 8 | 1.341.18 4 | Vía | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF4-PA54 | RESURGENCIA | 1.161.96 7 | 1.338.97 0 | Zodme 402 | 3 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |

| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA |
| Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta | |

| IDENTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS A MONITOREAR | | | | Obra más | Nivel | ANTES DE CONSTRUCCIÓN | | DURANTE CONSTRUCCIÓN | | OPERACIÓN | |
|---|---------------|-----------|-----------|------------------|------------|--------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | | | Próxima | afectación | (1 año. 6 meses o menos) | | (Tiempo total construcción UF3-4-5) | | 1 AÑO | |
| CODIGO | TIPO DE PUNTO | E | N | (---) | (---) | Monitoreo Tipo A | Monitoreo Tipo B | Monitoreo Tipo A | Monitoreo Tipo B | Monitoreo Tipo A | Monitoreo Tipo B |
| UF4-PA75 | RESURGENCIA | 1,159,812 | 1,334,234 | Vía | 3 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF4-PA86 | ALJIBE | 1,159,195 | 1,328,552 | Vía | 3 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF5-PA01 | RESURGENCIA | 1162753 | 1344287 | Zodme 533 | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF5-PA02 | INTERFLUJO | 1165266 | 1343588 | Acceso Zodme 724 | 1 | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PZ01 | Piezómetro | 1.159.465 | 1.315.212 | Túnel | N/A | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PZ02 | Piezómetro | 1.159.484 | 1.315.229 | Túnel | N/A | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PZ03 | Piezómetro | 1.159.491 | 1.315.139 | Túnel | N/A | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PZ04 | Piezómetro | 1.159.820 | 1.314.233 | Túnel | N/A | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PZ05 | Piezómetro | 1.159.758 | 1.314.295 | Túnel | N/A | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PZ06 | Piezómetro | 1.159.799 | 1.314.209 | Túnel | N/A | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PZ07 | Piezómetro | 1.159.647 | 1.314.651 | Túnel | N/A | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| UF3-PZ08 | Piezómetro | 1.159.827 | 1.314.233 | Túnel | N/A | Mensual | | Trimestral | | Semestral | |
| AS_1 | Curso de agua | 1.160.437 | 1.313.647 | Vía | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| AS_2 | Curso de agua | 1.159.838 | 1.314.106 | Vía | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| AS_3 | Curso de agua | 1.159.897 | 1.314.126 | Túnel | N/A | Trimestral | | Trimestral | | Semestral | |
| AS_4 | Curso de agua | 1.159.727 | 1.314.264 | Túnel | N/A | Trimestral | | Trimestral | | Semestral | |
| AS_5 | Curso de agua | 1.159.639 | 1.314.655 | Túnel | N/A | Trimestral | | Trimestral | | Semestral | |
| AS_6 | Curso de agua | 1.159.609 | 1.314.761 | Túnel | N/A | Trimestral | | Trimestral | | Semestral | |
| AS_7 | Curso de agua | 1.159.576 | 1.314.865 | Túnel | N/A | Trimestral | | Trimestral | | Semestral | |
| AS_8 | Curso de agua | 1.159.541 | 1.314.980 | Túnel | N/A | Trimestral | | Trimestral | | Semestral | |
| AS_9 | Curso de agua | 1.159.404 | 1.315.387 | Túnel | N/A | Trimestral | | Trimestral | | Semestral | |
| AS_10 | Curso de agua | 1.159.444 | 1.315.266 | Vía | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |

| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta |
|--|--|

| IDENTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS A MONITOREAR | | | | Obra más Próxima | Nivel afectación | ANTES DE CONSTRUCCIÓN (1 año, 6 meses o menos) | | DURANTE CONSTRUCCIÓN (Tiempo total construcción UF3-4-5) | | OPERACIÓN 1 AÑO | |
|---|---------------|-----------|-----------|------------------|------------------|---|------------------|---|------------------|--------------------|------------------|
| CODIGO | TIPO DE PUNTO | E | N | (---) | (---) | Monitoreo Tipo A | Monitoreo Tipo B | Monitoreo Tipo A | Monitoreo Tipo B | Monitoreo Tipo A | Monitoreo Tipo B |
| AS_11 | Curso de agua | 1.159.170 | 1.316.556 | Via | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| AS_12 | Curso de agua | 1.159.366 | 1.317.746 | Via | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| AS_13 | Curso de agua | 1.159.276 | 1.317.914 | Via | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| AS_14 | Curso de agua | 1.159.398 | 1.319.961 | Via | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| AS_15 | Curso de agua | 1.159.156 | 1.320.717 | Via | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| AS_16 | Curso de agua | 1.159.103 | 1.321.027 | Via | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| AS_17 | Curso de agua | 1.159.212 | 1.321.494 | Via | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| AS_18 | Curso de agua | 1.159.056 | 1.323.233 | Via | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| AS_19 | Curso de agua | 1.159.212 | 1.323.415 | Via | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| AS_20 | Curso de agua | 1.159.079 | 1.324.724 | Via | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| AS_21 | Curso de agua | 1.159.039 | 1.325.787 | Via | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| AS_22 | Curso de agua | 1.159.141 | 1.326.309 | Via | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| AS_24 | Curso de agua | 1.159.184 | 1.327.213 | Via | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| AS_31 | Curso de agua | 1.159.014 | 1.330.442 | Via | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| AS_32 | Curso de agua | 1.159.068 | 1.330.793 | Via | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| AS_33 | Curso de agua | 1.159.773 | 1.333.702 | Via | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| AS_34 | Curso de agua | 1.159.646 | 1.335.032 | Via | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| AS_35 | Curso de agua | 1.159.568 | 1.336.264 | Via | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| AS_36 | Curso de agua | 1.159.583 | 1.336.347 | Via | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| AS_37 | Curso de agua | 1.161.594 | 1.339.234 | Via | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| AS_38 | Curso de agua | 1.163.014 | 1.342.524 | Via | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| AS_39 | Curso de agua | 1.164.369 | 1.343.263 | Via | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |

| | |
|--|--|
|  Unión Vial Río Pamplonita <small>Una Compañía de Sacyr Concesiones</small> | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA DOBLE CALZADA PAMPLONA-CÚCUTA, UF 3 - 4 - 5 SECTOR PAMPLONITA - LOS ACACIOS CAPITULO 5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA - HIDROGEOLOGÍA |
| Centro: Corredor Vial Doble Calzada Pamplona - Cúcuta | |

| IDENTIFICACIÓN DE LOS PUNTOS A MONITOREAR | | | | Obra más Próxima | Nivel afectación | ANTES DE CONSTRUCCIÓN (1 año, 6 meses o menos) | | DURANTE CONSTRUCCIÓN (Tiempo total construcción UF3-4-5) | | OPERACIÓN 1 AÑO | |
|---|---------------|---------------|---------------|------------------|------------------|---|------------------|---|------------------|--------------------|------------------|
| CODIGO | TIPO DE PUNTO | E | N | (--) | (--) | Monitoreo Tipo A | Monitoreo Tipo B | Monitoreo Tipo A | Monitoreo Tipo B | Monitoreo Tipo A | Monitoreo Tipo B |
| AS_40 | Curso de agua | 1.159.29 1 | 1.315.35 2 | Via | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| AS_41 | Curso de agua | 1.159.81 6 | 1.314.12 4 | Via | N/A | Trimestral | una vez | Trimestral | una vez | Semestral | una vez |
| Nomenclatura utilizada: Monitoreo tipo A (Caudal, parámetros físico-químicos "in situ" y/o nivel piezométrico). Se debe hacer en el período de tiempo que anteceda el inicio de la obra. Lo ideal es que este periodo fuera un ciclo climático de un año, pero depende de las condiciones propias del proyecto. | | | | | | | | | | | |
| Monitoreo tipo B (Una medición antes, durante y después de terminadas las obras (según indicaciones dadas en la Tabla 5 de la resolución 0751 del 2015 del MADS)) | | | | | | | | | | | |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

5.1.8.17 Conclusiones

5.1.8.17.1 Resultado del inventario de puntos de agua UF3-4-5

El inventario de puntos de agua realizado en noviembre-diciembre del 2017 con sus respectivas campañas complementarias realizadas durante los meses de abril y julio del 2018, arrojó los siguientes resultados:

- ✓ Fueron identificados un total de 165 puntos de agua aflorantes existentes (153 de estos son naturales y 12 antrópicos) en la zona de influencia de la UF3-4-5 (incluida la zona del túnel de Pamplonita). Los cuales aportan un caudal total aproximado de 57.81 l/s (jul_2018/2019).
- ✓ Se identificaron 12 puntos de agua antrópicos correspondientes a excavaciones de diferente tipo.
- ✓ Se tienen 8 piezómetros ubicados sobre el eje del túnel de Pamplonita.
- ✓ Los puntos de agua naturales inventariados se caracterizan por presentar en su mayoría caudales individuales bajos a muy bajos, 85% de ellos inferiores a 0,67 l/s, con excepción de algunos puntos que presentan caudales mayores, entre los que se encuentran UF3-P13=0.76l/s, UF4-PA02=1.5l/s, UF4-PA22≈4l/s, UF4-PA26=1.17l/s y UF4-PA31≈4l/s.

Los bajos caudales son indicativos de una circulación poco profunda, presente generalmente en los depósitos cuaternarios y en las zonas alteradas y fracturadas del macizo rocoso.

De acuerdo con la clasificación de Marotta e Sica (1933) basada en la temperatura del agua resulta lo siguiente, para los 165 puntos aflorantes inventariados, sin contar los piezómetros.

- ✓ Existen 29 puntos de agua que caen en la clasificación de aguas frías (temp. <20 °C),
- ✓ Existen 122 puntos de agua que caen en la clasificación de aguas hipotermas (temp. entre 20 y 30°C),
- ✓ Existen 9 puntos de agua que caen en la clasificación de aguas termales (temp. entre 30 y 40°C),
- ✓ Existen 5 puntos de agua que caen en la clasificación de aguas hipertermales (temp. >40 °C).
- ✓ Las aguas de los 8 piezómetros se encuentran en el rango de temperatura de aguas frías.

Se debe tener en cuenta que la temperatura de los puntos de agua puede presentar variaciones dependiendo de la época del año e interacción con la recarga superficial.

5.1.8.17.2 Resultado de los análisis hidrogeoquímicos

La mayoría de los puntos de agua muestreados presentan características de aguas subsuperficiales alimentadas por circuitos cortos poco profundos, con facies hidrogeoquímicas principales de tipo Calcico-Sulfático a Calcico-Bicarbonáticas con algunos puntos de agua con facies mixtas. Las características de estas facies indican aguas de circuitos subsuperficiales influenciadas por la disolución de yeso y de rocas carbonáticas.

El agua analizada se clasifica en su mayoría como poco mineralizada u oligomineral, típica de circuitos de flujo rápido, desarrollado al interior de los depósitos cuaternarios y parte más meteorizada del macizo rocoso donde el tiempo de residencia del agua en el acuífero es breve, excepto por los manantiales que reciben aguas termales de mayores profundidades como lo demuestran su temperatura de muestreo y potencial redox.

5.1.8.17.3 Modelo hidrogeológico conceptual (Túnel y vía a cielo abierto)

El principal elemento hidrográfico de la zona de influencia de la UF3-4-5, lo constituye el Río Pamplonita. El cual representa un límite hidrogeológico caracterizado morfológicamente por un típico valle intramontano, cuyas laderas actúan como zonas de descarga, hacia las cuales confluye la mayor parte del flujo subsuperficial y subterráneo presente en la zona de estudio.

En la mayor parte de la zona de influencia de las UF3-4-5 existe lo que podría llamarse un “acuífero superficial”, fracturado, discontinuo y heterogéneo de limitado interés hidrogeológico; el cual contiene una napa libre, constituido por depósitos cuaternarios y de alteración del macizo rocoso. Infrayaciendo este acuífero superficial se encuentran presentes formaciones geológicas de diferentes edades y composición que por sus características intrínsecas se les ha atribuido diferentes comportamientos hidrogeológicos en función de su capacidad para almacenar y transmitir agua subterránea. En este sentido, la zona de estudio se caracteriza por presentar unidades hidrogeológicas con limitado a ningún interés hidrogeológico.

5.1.8.17.4 Vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos presentes en la UF3-4-5

De los cinco (5) rangos de vulnerabilidad que contempla el método GOD, aplicado en la valoración realizada, resultan cuatro (4) escenarios probables:

- ✓ **Vulnerabilidad Muy baja** (0,0-0,1): Vulnerabilidad Muy Baja: Abarca el 32.95% de la zona y en general son zonas con rocas de baja permeabilidad y pendientes moderadas y altas que impiden una rápida absorción de contaminantes.
- ✓ **Vulnerabilidad baja** (0,1-0,3): 41.89% de la zona presenta esta vulnerabilidad y se halla en zonas con pendiente moderadas, terrenos con permeabilidad baja y un nivel

freático profundo o moderado por encima de los 40m.

- ✓ **Vulnerabilidad Moderada** (0,3-0,5): El 22.02% de toda la zona se halla con una vulnerabilidad alta, en general corresponde a las zonas menor pendiente además de terrenos con mayor permeabilidad y un nivel freático por encima de los 10 m.
- ✓ **Vulnerabilidad Alta** (0,5 -0,7): Esta área corresponde al 3.13% de toda la zona, y correspondiente a unidades de roca con baja cementación, pendientes muy bajas y alta permeabilidad, además de un nivel freático más cercano a la superficie.

5.1.8.17.5 riesgo de contaminación del acuífero por el desarrollo de las actividades y obras planteadas.

Una vez analizado el riesgo se encontró que concordantemente con el análisis de vulnerabilidad, la mayor cantidad de la zona presenta una vulnerabilidad muy baja (96.70%), baja (5.33%) y moderada (0.14%) esto se debe a la presencia de pendientes moderadas y fuertes en la zona.

5.1.8.17.6 Valoración del potencial de afectación de los puntos de agua relacionados con la vía a cielo abierto y zodmes.

Una vez aplicados los criterios para definir el potencial de afectación de los puntos de agua censados en vía a cielo abierto, por la presencia de las obras que integran la UF3-4-5, se tiene que:

- ✓ 108 de los 145 puntos de agua censados en vía a cielo abierto resultan con un nivel de afectación igual a 1. Lo que indica que la posibilidad de resultar afectados es muy baja a imperceptible.
- ✓ 11 de los 145 puntos de agua censados en vía a cielo abierto resultan con un nivel de afectación igual a 2. Lo que indica que la posibilidad de resultar afectados es baja a media.
- ✓ 26 de los 145 puntos de agua censados en vía a cielo abierto resultan con un nivel de afectación igual a 3. Lo que indica que la posibilidad de resultar afectados es alta a muy alta. Corresponde con puntos de agua ubicados dentro del polígono de intervención de la obra proyectada.

5.1.8.17.7 Valoración del potencial de afectación de los puntos de agua relacionados con el túnel de Pamplonita aplicando la metodología DHI.

Fueron valoradas mediante la metodología DHI (Drawdown Hazards Index) las probabilidades de impacto de la excavación del túnel de Pamplonita sobre los puntos de agua presentes en superficie e identificados mediante los inventarios realizados. La valoración se hizo considerando el túnel como un elemento drenante, es decir, sin tratamiento de inyección del macizo rocoso. El resultado se resume a continuación:

- ✓ 16 de los 18 puntos de agua sensibles (excluyendo piezómetros) censados en la zona del túnel resultan con un índice DHI igual a 1, es decir, en ellos no se prevé afectación o ésta es despreciable desde el punto de vista probabilístico. Estos puntos representan el 83% del total de puntos relacionados con los túneles del corredor vial.
- ✓ 2 de los 18 puntos de agua sensibles (excluyendo piezómetros) censados en la zona del túnel resultan con un índice DHI igual a 2, es decir, en ellos se prevé una probabilidad de afectación baja. Estos puntos representan el 17% del total.
- ✓ 0 puntos de agua sensibles (excluyendo piezómetros) censados en la zona del túnel resultan con un índice DHI igual a 3, es decir, en ningún punto de agua se prevé una probabilidad de afectación alta.

5.1.8.17.8 Medidas de mitigación y compensación.

Fueron definidas medidas específicas de mitigación y/o compensación para los puntos de agua, las cuales se encuentran desarrolladas en las correspondientes fichas de manejo compiladas en el capítulo correspondiente dentro del presente EIA.

5.1.8.17.9 Cálculo del caudal esperado en el túnel de Pamplonita

La previsión del caudal esperado a corto plazo en el túnel de Pamplonita fue realizada aplicando un enfoque analítico a la sectorización hidrogeológica prevista en el modelo geológico, geomecánico e hidrogeológico de referencia. Estos valores fueron corroborados a través de las simulaciones numéricas realizadas en el túnel.

Para las condiciones de hidráulicas previstas los caudales específicos esperados a corto plazo indica valores que oscilan entre 0 y 0,37 l/s/10m, estos valores pueden llegar a incrementarse en varios órdenes de magnitud si durante la construcción del túnel se interceptan discontinuidades más permeables a las previstas en el estudio, por ejemplo, $Q_{max}=7-8$ l/s/10 para una carga hidráulica de 25 m y una $K=1E-5$ m/s.

Al largo plazo, el caudal drenado en el túnel varía en el tiempo hasta estabilizarse después de 5-10 años de excavado el túnel. En particular una vez aplicado al método analítico los resultados del modelo numérico, se tiene un caudal al largo plazo <5 l/s (caudal total con túnel excavado).

5.1.8.17.10 Zonas potencialmente críticas hidrogeológicamente en el túnel de Pamplonita

Corresponde con los sectores de excavación del túnel de Pamplonita en los cuales, de acuerdo con el modelo geológico, geomecánico e hidrogeológico se prevé la presencia de zonas de fallas, zonas más fracturadas y/o zonas de mayor permeabilidad del macizo rocoso a través de las cuales se pueden conectar el túnel con la superficie. Estas zonas son las indicadas en la tabla siguiente.

Tabla 5-2.68. Zonas potencialmente críticas en el túnel de Pamplonita

| Geología | | | Progresiva | | Longitud Tramo | Caudal crítico | |
|----------------|-------------|-------|------------|---------|----------------|----------------|----|
| Roca | Falla | desde | hasta | l/s/10m | | m³/día/10m | |
| | | m | m | | | | |
| Fm Barco (E1b) | Arenisca | F | K47+230 | K47+240 | 10,00 | 0,1 | 9 |
| | Arcillolita | F | K47+295 | K47+305 | 10,00 | 0,04 | 3 |
| | Arenisca | F | K47+415 | K47+420 | 5,00 | 0,1 | 11 |
| | Arcillolita | F | K47+420 | K47+425 | 5,00 | 0,05 | 4 |
| | Arenisca | F | K47+515 | K47+525 | 10,00 | 0,1 | 11 |
| | Arenisca | F | K47+690 | K47+700 | 10,00 | 0,1 | 11 |
| | Arenisca | F | K47+750 | K47+760 | 10,00 | 0,1 | 9 |
| | Arenisca | F | K47+970 | K47+980 | 10,00 | 0,1 | 8 |
| | Arenisca | F | K48+075 | K48+085 | 10,00 | 0,1 | 8 |
| | Arcillolita | F | K48+150 | K48+160 | 10,00 | 0,04 | 3 |

Fuente: Aecom – Concol, 2018

5.1.8.17.11 Modelo numérico del flujo subterráneo presente en el túnel de Pamplonita

Los análisis realizados a través de la modelación numérica se han llevado a cabo teniendo en cuenta una serie de modelos 2D en régimen permanente utilizando el módulo de cálculo de elementos finitos FEFLOW (versión 7.0.4) y considerando las condiciones hidrogeológicas más representativas que se prevé serán encontradas durante la excavación del túnel de Pamplonita.

La permanencia de los puntos de agua inventariados en la zona de influencia del túnel de Pamplonita, bajo la acción drenante de la obra subterránea, dependerá de la permeabilidad del horizonte arcillosos y limoso que constituye el lecho confinante de los flujos subsuperficiales que los alimentan. Considerando una permeabilidad del orden de $1E-8$ m/s a $1E-9$ m/s los circuitos subsuperficiales no evidencian impactos significativos, indicando una sustancial independencia de los circuitos más profundos interceptados por el túnel. Este hecho es coherente con la poca carga hidráulica existente sobre el eje del túnel de Pamplonita (no mayor a 25 m), representada a su vez por un nivel piezométrico abatido y descolgado de la superficie.

5.1.8.17.12 Red de monitoreo

Se propone una red de monitoreo representativa de la **calidad y cantidad** de agua superficial (AS) y subsuperficial (PA) y Subterránea (PZ) presente a lo largo de las UF3-4-5. Con los puntos de agua seleccionados se pretende monitorear las variaciones de caudal del agua superficial, subsuperficial y subterránea, así como la evolución de sus parámetros fisicoquímicos in situ (conductividad eléctrica, temperatura, pH) y de calidad (parámetros

hidrogeoquímicos).

Fueron seleccionados un total de 109 puntos representados así:

- ✓ 67 puntos de agua (PA)
- ✓ 8 piezómetros (PZ)
- ✓ 34 puntos sobre cursos de aguas superficiales (AS).

Se propone dar inicio a este monitoreo antes del comienzo de las excavaciones de las obras, continuarlo durante su fase constructiva y como mínimo durante un año después de terminada la construcción de las UF3-4-5.

En el capítulo de medidas de manejo los puntos sobre cursos de aguas superficiales (AS) se concilian con los propuestos en el estudio de hidrología para llegar a una sola propuesta consolidada de monitoreo de puntos de AS.

5.1.8.18 Recomendaciones

Se recomienda instrumentar los siguientes piezómetros con dispositivos tipo Divers con el propósito de obtener mediciones continuas del nivel piezométrico antes, durante y después de la construcción del túnel.

- ✓ UF3-PZ01
- ✓ UF3-PZ07
- ✓ UF3-PZ08

Durante la construcción del túnel se recomienda, por cada frente de excavación, realizar un número representativo de ensayos de permeabilidad a través de las perforaciones realizadas, medir el caudal de infiltración presente y sus parámetros físicoquímicos in situ (conductividad, pH, temperatura, ORP) y clasificar geomecánicamente el macizo rocoso o terreno encontrado (p.e. utilizando RMR, Q). Mientras que, en superficie, se recomienda, realizar simultáneamente el monitoreo previsto en los puntos de agua y cursos de aguas superficiales que integran la red de monitoreo.

Se recomienda que todos los datos recopilados sean analizados inicialmente cada 50 m de túnel excavado; esto con el objeto de retroalimentar las previsiones realizadas en los estudios hidrogeológicos, particularmente en lo que respecta a la actualización del caudal crítico.

5.1.8.19 Referencias bibliográficas

AFTES, 1992. Recomendations for a description of rock masses useful for examining the stability of the underground works, Working group n°1 geology-geotechnical engineering, Manager M. Panet.

AFTES GT32-2 (2012). Recommandation de l'AFTES n° GT32.R2F1 - Recommandations sur la caractérisation des incertitudes et des risques géologiques, hydrogéologiques et géotechniques, Tunnels et espace souterrain, 274-314.

ALBERTS C. and Gustafson G. (1983). Undermarksbyggande i svagt berg- 4 Vattenproblem och tätningsåtgärder, in BeFo.

ANAGNOSTOU, G. (1995). "The Influence of Tunnel Excavation on the hydraulic head", International Journal for numerical and analytical method in geomechanics, Vol 19, 725-746.

APPELO C.A.J. & Postma D. (2006). Geochemistry, groundwater and pollution. Second edition.

BARAZZUOLI P., Costantini A., Grassi S., Lazzarotto A., Micheluccini M., Piantelli F., Salleolini M., Sandrelli F., Squarci p., Taffi L., Veronesi G., 1987. L'energia geotermica in provincia di Siena. Amministrazione provinciale di Siena.

BAUDUCCO F., De Luca D. A., Dematteis A., Masciocco L. (1992). La valutazione delle potenzialità idriche di un bacino alpino: l'esempio della Valle Varaita, Il Conv. Naz. Giov. Ric. Geol. Appl., Viterbo.

BERESNEV, I.A., Hruby, C., Davis, C. (2002) "Exploration Geophysics". Journal of Applied Geophysics, 49. 245-254.

BIANCHI, G.W., Perello, P., Venturini, G. & Dematteis, A., 2009. Determination of reliability in geological forecasting for Túnel projects: The method of the R-index and its application on two case studies. WTC 2009, Proceedings of the ITA-AITES World Túnel Congress, Budapest. Castilla Gomez, Jorge, Herrera Herbert Juan (2012). El proceso de exploración minera mediante sondeos. E.T.S. De ingenieros de minas de Madrid. Madrid 2012.

COLOMBETTI A. & Mattioli M., 1991. Calcolo del deflusso in un bacino idrografico con metodo indiretto. Un esempio nel bacino del fiume Panaro. *Riun. Giov. Ric. Geol. Appl. Milaño*.

CUSTODIO, E. (1983) Hidráulica de captaciones de agua subterránea. En: Hidrología Subterránea. Pp 969-981. Custodio, E. y M.R Llamas (Eds). Omega, 2 tomos, 2350 pp.

DE MARTONNE E., 1926. Une nouvelle function climatologique: l'indice de aridité. La meteorologie, 449-458.

DEMANET, D., Pirard, E., RenardY, F., Jongmans, D. (2001). Application and processing of geophysical images for mapping faults. Computers & Geosciences 27. 1031-1037.

DEMATTEIS A., Kalamaras G., Eusebio A., 2001. A System Approach for Evaluating

Springs Drawdown Due to Tùneling. AITES/ITA World Tùnels Congress 2001 (Milan, 9-12 june 2001), Accepted.

EPA (1993). Suggested Operating Procedures for Aquifer Pumping Tests.

E Preziosi • G Giuliano •R Vivona, (2010) Natural background levels and threshold values derivation for naturally As, V and F rich groundwater bodies: a methodological case study in Central Italy. *Environ Earth Sci*, 61:885–897 DOI 10.1007/s12665-009-0404-y

FOSTER, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M. and Paris, M., 2002. Groundwater Quality Protection: a Guide for Water Utilities, Municipal Authorities and Environment Agencies. World Bank Publication, Washington D.C., USA, 103 pp.

FOSTER, S.S.D., 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: W.v. Duijvenbooden and H.G.v. Waegeningh (Editors), *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants*, Noordwijk, The Netherlands, pp. 69-86.

GALLIPOLI M.R., Lapenna V., Lorenzo P., Mucciarelli M., Perrone A., Piscitelli S., Sdao F. (2000). Comparison of geological and geophysical prospecting techniques in the study of a landslide in southern Italy.

GOODMAN R. E., Moya D. G., Van Schalkwyk A. Y Javandel I. (1965). Ground water inflows during Tùnel driving, *Eng. Geology* 2, no. 1: 39-56.

http://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/umweltthemen/wasser/Grundwasser/conference/Presentations/22_pm_11_A_Blum.pdf

IDEAM, 2011. Marco conceptual y metodolùgico para las evaluaciones regionales del agua. Informe final: Contrato IDEAM No 035 de 2011.

INGEOMINAS Mapa geolùgico Plancha 147 Medellín Oriental, escala 1: 50.000, memoria explicativa. Bogotá: Ingeominas, 2005. 314 p.

JACOB C. (1947) – Drawdown test to determine effective radius of artesian well. American Society of Civil Engineers, Transactions 112 (Paper 2321), pp 1047-1064.

JIMÉNEZ SALAS, J.A; J.L. De Justo Y A.A Serrano (1981). *Geotecnia y Cimientos II: Mecánica del suelo y de las rocas*. Ed Rueda, 1188 pp.

KENNESSEY B., 1930. Lefolyasi tényszok és retencik. *Vizugy*, Kuziemények.

MOLINERO J., Samper J., Juanes R., (2002). "Numerical modeling of the transient hydrogeological response produced by tunnel construction in fractured bedrocks", *Engineering Geology* 64, 369-386, (2002).

Meybeck, M. (1987) Global Chemical Weathering of Surficial Rocks Estimated from River

Dissolved. American Journal of Science, 287, 401-428.

NORWEGIAN TUNELLING SOCIETY (2011) - Rock Mass Grouting in Norwegian Tunelling. Publication No. 20, 105 pp.

Organización Metereológica Mundial, 1994. Guía de prácticas hidrogeológicas. Adquisición y proceso de datos, análisis, predicción y otras aplicaciones. Quinta edición.

PERROCHET P., Dematteis A. "Modeling transient discharge into a tunnel drilled in a heterogeneous formation", ground water 45, No. 6: 786-790. (2005).

PIPER, A.M. (1953). A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water Analysis. Washington D.C.

RAYMER J. INGEO TÚNELES Libro 15 (2008). Estimación de la afluencia de agua en túneles en roca dura – el problema de la permeabilidad: Carlos López Jimeno, Madrid.

STRAHLER A. N., 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topology. *Geological Society of America Bulletin* 63 (11): 1117-1142.

THEIS C. V. (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Trans. Amer. Geophys. Union*, 2, pp 519-524.

TORRI, R., Dematteis, A. (2007). "Drawdown hazard of springs and wells in Túneling: predictive model and verification" Proc. XXXV IAH Congress, Groundwater and Ecosystems, Lisbon 17-21 Sept. 2007, 10 pp.

TURC, L., 1954. Le bilan d'eau des sols. Relation entre la précipitation, l'évaporation et l'écoulement. *Ann. Agron.* 5, 491-569.