



Agencia Nacional de
Infraestructura



**CONCESIÓN RUTA DEL CACAO
ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL CONSTRUCCIÓN
CORREDOR VIAL BUCARAMANGA – BARRANCABERMEJA – YONDO**

CONTRATO DE CONCESIÓN APP 013 DE 2015

CONSULTOR

VOLUMEN XII

BOGOTÁ

MAYO 2016

AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA

CONTRATO DE CONCESIÓN BAJO EL ESQUEMA DE ASOCIACIÓN PÚBLICO

**ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL CONSTRUCCIÓN
CORREDOR VIAL BUCARAMANGA – BARRANCABERMEJA –YONDO**

LISTA DE DISTRIBUCIÓN

| DEPENDENCIA | No. DE COPIAS |
|---------------|---------------|
| INTERVENTORÍA | ORIGINAL |
| CONCESIONARIO | COPIA |
| | |

ESTADO DE REVISIÓN Y APROBACIÓN

| | | | | |
|--|---|--|--|--|
| Título Documento | | ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL CONSTRUCCIÓN CORREDOR VIAL BUCARAMANGA – BARRANCABERMEJA –YONDO | | |
| Documento No. | | AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA CÓDIGO CONCESIÓN- CONTRATO -ESPECIALIDAD- VERSIÓN | | |
| A P R O B A C I Ó N | Número de Revisión | | | |
| | Responsables por elaboración | NOMBRE | | |
| | | FIRMA | | |
| | | MAT: | | |
| | | FECHA | | |
| | Responsable por revisión y aprobación | NOMBRE | | |
| | | FIRMA | | |
| | | MAT: | | |
| FECHA | | | | |

AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA

CONTRATO DE CONCESIÓN BAJO EL ESQUEMA DE ASOCIACIÓN PÚBLICO

**CONCESIÓN RUTA DEL CACAO
VOLUMEN XII ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL CONSTRUCCIÓN
PROYECTO BUCARAMANGA – BARRANCABERMEJA –YONDO**

CONTROL DE MODIFICACIÓN DEL DOCUMENTO

| REVISIÓN | FECHA | DESCRIPCIÓN DE LA MODIFICACIÓN | OBSERVACIONES |
|----------|-------|--------------------------------|---------------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |

AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA

CONTRATO DE CONCESIÓN BAJO EL ESQUEMA DE ASOCIACIÓN PÚBLICO

**CONCESIÓN RUTA DEL CACAO
VOLUMEN XII ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL CONSTRUCCIÓN
PROYECTO BUCARAMANGA – BARRANCABERMEJA –YONDO**

TABLA DE CONTENIDO

| | Pág. |
|--|------|
| 5. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA..... | 10 |
| 5.1 MEDIO ABIOTICO..... | 10 |
| 5.1.1 Hidrogeología | 10 |

AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA

CONTRATO DE CONCESIÓN BAJO EL ESQUEMA DE ASOCIACIÓN PÚBLICO

**CONCESIÓN RUTA DEL CACAO
VOLUMEN XII ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL CONSTRUCCIÓN
PROYECTO BUCARAMANGA – BARRANCABERMEJA –YONDO**

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 5-1. Relación de puntos de agua identificados con su respectiva categoría..... | 14 |
| Tabla 5-2. Tabla Niveles piezométricos Túnel La Paz..... | 16 |
| Tabla 5-3. Tabla Niveles piezométricos Viaducto Rio Sucio..... | 17 |
| Tabla 5-4. Tabla Niveles piezométricos Túnel la Sorda | 17 |
| Tabla 5-5. Compilación Ensayos de infiltración realizados..... | 22 |
| Tabla 5-6. Puntos de muestreo para el sector del túnel La Paz. | 23 |
| Tabla 5-7. Puntos de muestreo para el sector del túnel La Sorda..... | 24 |
| Tabla 5-8. Parámetros, caracterizaciones y pruebas a realizar para cada punto de monitoreo..... | 25 |
| Tabla 5-9. Resultados análisis de agua en los manantiales del túnel La Paz, U F 6. | 28 |
| Tabla 5-10. Resultados registrados en los piezómetros localizados en el área de influencia del Túnel la Paz | 38 |
| Tabla 5-11. Resultados de los análisis de agua realizados en los manantiales del túnel la Sorda, Unidad Funcional 7..... | 42 |
| Tabla 5-12. Resultados de los análisis de agua realizados en los sondeos del túnel La Sorda, Unidad Funcional 7..... | 47 |
| Tabla 5-13. Unidades Hidrogeológicas sobre el área de influencia del proyecto..... | 60 |
| Tabla 5-14. Tabla de parámetros hidráulicos | 66 |
| Tabla 5-15 Modelo de datos de niveles piezométricos utilizado..... | 68 |
| Tabla 5-16. Modelo de datos de niveles piezométricos utilizado..... | 69 |
| Tabla 5-17. Tabla consolidad de Balance Hídrico para túnel La Paz. | 77 |
| Tabla 5-18. Tabla consolidad de Balance Hídrico para túnel La Sorda. | 79 |
| Tabla 5-19. Tabla consolidad de Balance Hídrico para túnel La Sorda. | 80 |
| Tabla 5-20. Zonificación de la disposición hidrogeológica asociada a la vulnerabilidad hidrogeológica por contaminación..... | 81 |
| Tabla 5-21. Zonificación de la disposición hidrogeológica asociada a la disponibilidad del recurso hídrico | 82 |
| Tabla 5-22. Grado de confinamiento hidráulico..... | 86 |
| Tabla 5-23. Ocurrencia del sustrato litológico. | 86 |
| Tabla 5-24. Distancia al nivel del agua subterránea..... | 86 |
| Tabla 5-25. Puntaje y grado de vulnerabilidad obtenida a partir del método GOD. | 86 |
| Tabla 5-26. Vulnerabilidad | 86 |

AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA

CONTRATO DE CONCESIÓN BAJO EL ESQUEMA DE ASOCIACIÓN PÚBLICO

CONCESIÓN RUTA DEL CACAO VOLUMEN XII ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL CONSTRUCCIÓN PROYECTO BUCARAMANGA – BARRANCABERMEJA –YONDO

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 5-1. Formato de inventario de aguas subterráneas..... | 12 |
| Figura 5-2. Puntos de agua encontradas en la fase de campo. | 13 |
| Figura 5-3. Distribución de puntos de agua identificados en la Unidad Funcional 5..... | 14 |
| Figura 5-4. Distribución de los puntos de agua identificados en la Unidad Funcional 6 (Área de influencia del Túnel La Paz)..... | 15 |
| Figura 5-5. Distribución de los puntos de agua identificados en la Unidad Funcional 7 (Área de influencia del Túnel La Sorda). | 15 |
| Figura 5-6. Localización de las tomografías realizadas..... | 18 |
| Figura 5-7. Proceso de toma de datos de las tomografías. | 19 |
| Figura 5-8. Tomografía obtenida con el software de modelización..... | 20 |
| Figura 5-9. Formato utilizado para el registro de información obtenida en las pruebas de infiltración..... | 21 |
| Figura 5-10. Localización de los puntos de muestreo para el sector del túnel La Paz..... | 24 |
| Figura 5-11. Localización de los puntos de muestreo para el sector del túnel La Sorda. . | 25 |
| Figura 5-12. Toma de muestras de agua | 27 |
| Figura 5-13. Análisis comparativo de Acidez – Túnel La Paz - Manantiales..... | 29 |
| Figura 5-14. Análisis comparativo de Alcalinidad Total - Túnel La Paz – Manantiales | 30 |
| Figura 5-15 Análisis comparativo de pH - Túnel La Paz - Manantiales | 31 |
| Figura 5-16. Análisis comparativo del color real - Túnel La Paz - Manantiales..... | 32 |
| Figura 5-17. Análisis comparativo de la conductividad eléctrica - Túnel La Paz – Manantiales..... | 32 |
| Figura 5-18. Análisis comparativo de la Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO5 - Túnel La Paz – Manantiales..... | 33 |
| Figura 5-19. Análisis comparativo de la Demanda Química de Oxígeno – DQO - Túnel La Paz – Manantiales..... | 34 |
| Figura 5-20. Análisis comparativo del oxígeno disuelto - Túnel La Paz – Manantiales..... | 34 |
| Figura 5-21. Análisis comparativo del oxígeno disuelto - Túnel La Paz – Manantiales..... | 35 |
| Figura 5-22. Análisis comparativo de Solidos Suspendidos Totales - Túnel La Paz – Manantiales..... | 36 |
| Figura 5-23. Análisis comparativo de Solidos Disueltos Totales - Túnel La Paz – Manantiales..... | 36 |
| Figura 5-24. Análisis comparativo de Coliformes Fecales - Túnel La Paz – Manantiales. . | 37 |
| Figura 5-25. Análisis comparativo de Coliformes Totales - Túnel La Paz – Manantiales.. | 37 |
| Figura 5-26. Análisis comparativo del Bario - Túnel La Paz – Piezómetros..... | 39 |
| Figura 5-27. Análisis comparativo del Cadmio Disuelto Túnel La Paz – Piezómetros. | 40 |

| | |
|---|----|
| Figura 5-28. Análisis comparativo de la Plata Disuelta Túnel La Paz – Piezómetros. | 40 |
| Figura 5-29. Análisis comparativo de la Plomo Disuelto Túnel La Paz – Piezómetros. | 41 |
| Figura 5-30. Análisis comparativo de la Acidez Total – Túnel La Sorda Manantiales. | 43 |
| Figura 5-31. Análisis comparativo de la Alcalinidad Total – Túnel La Sorda Manantiales. | 43 |
| Figura 5-32. Análisis comparativo de Potencial de Hidrogeno pH – Túnel La Sorda Manantiales. | 44 |
| Figura 5-33. Análisis comparativo de Color Real – Túnel La Sorda Manantiales. | 44 |
| Figura 5-34. Análisis comparativo de Conductividad Eléctrica – Túnel La Sorda Manantiales. | 45 |
| Figura 5-35. Análisis comparativo de Demanda Bioquímica de Oxígeno– Túnel La Sorda Manantiales. | 45 |
| Figura 5-36. Análisis comparativo de DQO – Túnel La Sorda Manantiales. | 46 |
| Figura 5-37. Análisis comparativo de Coliformes Totales – Túnel La Sorda Manantiales. | 46 |
| Figura 5-38. Análisis comparativo de Cadmio Disuelto – Túnel La Sorda Piezómetros. | 48 |
| Figura 5-39. Análisis comparativo de Plata Disuelta – Túnel La Sorda Piezómetros. | 49 |
| Figura 5-40. Análisis comparativo de Plomo Disuelto – Túnel La Sorda Piezómetros. | 50 |
| Figura 5-41. Precipitación del área de influencia. | 50 |
| Figura 5-42. Evaporación del área de influencia. | 51 |
| Figura 5-43. Ubicación de la unidad impermeable AF-Tpl2 sobre el alineamiento del Túnel La Paz en cercanías al portal de salida. | 53 |
| Figura 5-44. Ubicación de la unidad impermeable AF-Tpl2 cortada por el Túnel La Sorda, en su parte central. | 53 |
| Figura 5-45. Ubicación de la unidad impermeable AF-Tel5 cortada por el Túnel La Paz, hacia el K88+900 al K89+300. | 55 |
| Figura 5-46. Ubicación de las unidades de Acuifugos AF-Tee1 y AF-Tee3 al occidente del Túnel La Paz. | 55 |
| Figura 5-47. Selección de Polígonos para el área de trabajo. | 64 |
| Figura 5-48. Montaje de la grilla y del área de influencia del modelo geológico. | 64 |
| Figura 5-49. Vista Tridimensional de la grilla del modelo en sentido Norte - Sur. | 65 |
| Figura 5-50. Cuadro de unidades para los principales parámetros del modelo. | 66 |
| Figura 5-51. Definición de parámetros hidrogeológicos básicos para la capa superior de terreno. | 67 |
| Figura 5-52. Tabla para parámetros de almacenamiento de agua subterránea en el subsuelo. | 67 |
| Figura 5-53. Inclusión de puntos de cabeza conocida. | 68 |
| Figura 5-54. Mapa Hidrogeológico con Información relevante de Geología Estructural. | 69 |
| Figura 5-55. Localización de Zonas de Falla con ayuda de la aplicación Google Earth. | 70 |
| Figura 5-56. Cuadro de Validación de Datos de Capas del modelo. | 70 |
| Figura 5-57. Grilla del Modelo – Túnel La Paz. | 72 |
| Figura 5-58. Implementación del modelo conceptual – Túnel La Paz. | 72 |
| Figura 5-59. Grilla del Modelo – Túnel La Sorda. | 73 |
| Figura 5-60. Implementación del modelo conceptual – Túnel La Sorda. | 73 |
| Figura 5-61. Nivel Freático y Potenciales Hidráulicos a los 14 días de iniciar obra en abscisa. | 74 |
| Figura 5-62. Nivel Freático y Potenciales Hidráulicos a los 365 días de iniciar obra en abscisa. | 74 |
| Figura 5-63. Esquema de cortes para vistas laterales y longitudinales. | 75 |

| | |
|--|----|
| Figura 5-64. Vista Lateral de la Tabla de agua abatida para Túnel La Paz. | 75 |
| Figura 5-65. Vista Transversal de la Tabla de agua abatida para Túnel La Paz..... | 76 |
| Figura 5-66. Cuadro de Balance Hídrico (Balance de Masas) para túnel La Paz. | 76 |
| Figura 5-67. Vista Lateral de la Tabla de agua abatida para Túnel La Sorda..... | 77 |
| Figura 5-68. Vista Transversal de la Tabla de agua abatida para Túnel La Sorda | 78 |
| Figura 5-69. Cuadro de Balance Hídrico (Balance de Masas) para túnel La Sorda..... | 78 |
| Figura 5-70. Metodología GOD Para Evaluar el Índice de Vulnerabilidad de Contaminación de los Acuíferos. | 85 |

AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA

CONTRATO DE CONCESIÓN BAJO EL ESQUEMA DE ASOCIACIÓN PÚBLICO

**CONCESIÓN RUTA DEL CACAO
VOLUMEN XII ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL CONSTRUCCIÓN
PROYECTO BUCARAMANGA – BARRANCABERMEJA –YONDO**

INDICE DE ANEXOS

- Anexo A. Pruebas de infiltración
- Anexo B. Puntos de agua
- Anexo C. Red de monitoreo hidrogeológico BBY
- Anexo D. Tomografías
- Anexo E. Tabla afectación hidrogeología
- Lista de planos

5. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA

5.1 MEDIO ABIOTICO

5.1.1 Hidrogeología

El estudio hidrogeológico permite establecer el comportamiento de las aguas subterráneas en el área del proyecto bajo diversos escenarios y es la base para establecer medidas de mitigación de impactos ambientales en las fuentes del recurso hídrico.

Los estudios hidrogeológicos, toman como base los términos de referencia del Ministerio De Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). Fundamentalmente se siguen las indicaciones contenidas en la Resolución ANLA 751 del 26 de marzo de 2015

A continuación se hace un análisis hidrogeológico para la zona de estudio, comprendida en la Unidades Funcionales 5, 6 y 7 pertenecientes al corredor vial Bucaramanga – Barrancabermeja – Yondó (BBY).

5.1.1.1 Recopilación y análisis de la información existente

La información hidrogeológica presentada en este numeral es tomada de los documentos “Actualización de los diseños para licitación y del estudio de Impacto Ambiental del Proyecto Hidroeléctrico de Sogamoso–ISAGEN”, elaborada por INGETEC S.A en diciembre del 2008 y “Análisis Geológico, Estructural y Geomorfológico del Túnel La Paz”, elaborada por la Agencia Nacional De Infraestructura (ANI) en febrero de 2014. Con base en los criterios de Lohman S.W. et al (1970), que tienen en cuenta las recomendaciones del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) se relacionaron las Unidades geológicas localizadas dentro del área de influencia del proyecto con sus respectivas Unidades Hidrogeológicas.

De acuerdo a los documentos de referencia, fueron identificadas tres unidades hidrogeológicas aplicables al área del proyecto, conformadas por:

- **Unidad Hidrogeológica 1 (UH-I y UH-II) Acuíferos:** Unidades las cuales están en capacidad tanto de almacenar como transmitir agua subterránea económicamente aprovechable.
- **Unidad Hidrogeológica 2 (UH-III) Capa semipermeable semiconfinante:** Unidad que almacena y transmite agua en menor proporción que el acuífero.
- **Unidad Hidrogeológica 3 (UH-IV) Capa impermeable confinante:** Unidad que no almacena ni transmite agua subterránea.

La permeabilidad de las areniscas suele ser de una a tres veces menor que la de los sedimentos aluviales. Las areniscas cementadas con sílice son más compactas que las cementadas con materiales arcillosos, que son más friables y tienen mayor porosidad y

permeabilidad, casi todas las areniscas se clasifican como acuíferos, porque tienen transmisividad alta a media y proporcionan agua a los pozos y aljibes excavados en ellas.

Las condiciones hidrogeológicas generales del área de interés, se caracterizan por:

- Macizo conformado por rocas sedimentarias del Cretáceo Superior (lutitas) y del Terciario (Areniscas y arcillolitas), con cambios contrastantes de permeabilidad primaria.
- El área está afectada y condicionada estructuralmente por el flanco oriental del Sinclinal de Nuevo Mundo el cual que genera una alta uniformidad en la aptitud estructural de los estratos, esta estructura condiciona la formación de acuíferos confinados con fuerte inclinación.
- Las zonas de recarga están relacionadas mayoritariamente con los niveles de areniscas que alcanzan a aflorar en superficie y la red de drenaje que intersecta dichos niveles.

Conforme a lo identificado anteriormente, a continuación se realiza la descripción de las unidades hidrogeológicas relacionadas con este proyecto:

- **Acuíferos de extensión regional (UH-II):**

En la zona de estudio, los acuíferos presentes son fracturados, con buena producción de agua subterránea y conformados principalmente por areniscas, representativas de las Formaciones Esmeraldas (Tee) y La Paz (Tel).

Formación Esmeraldas (Tee): Acuífero de extensión regional con un espesor aproximado de 740 m, conformado principalmente por areniscas de grano fino e intercalaciones con arcillolitas, el cual reposa de manera concordante con la formación La Paz. El acuífero Esmeraldas recibe recarga de la lluvia principalmente sobre areniscas.

Formación La Paz (Tel): Acuífero de extensión regional con un espesor aproximado de 490 m, se destaca por conformar la serranía de La Paz y se encuentra conformada en su mayoría por areniscas y algunas intercalaciones con arcillolita. Recibe agua principalmente por lluvia sobre los estratos permeables de arenisca.

- **Capa semipermeable semiconfinante (UH-III):**

En el área de estudio, esta unidad principalmente se caracteriza por presentar poco contenido de agua, compuesta por capas semiconfinantes de rocas sedimentarias de arcillolitas y areniscas de la Formación Lizama (Tpl).

Formación Lizama (Tpl): Capa semiconfinante de extensión local, principalmente rocas permeables e impermeables correspondientes a arcillolitas grises y marrones, limolitas grises y areniscas de grano fino a medio color gris; la formación Lizama se encuentra dispuesta de manera concordante gradacional con la formación Umir.

Además, se presenta como anexo, el formato consolidado de inventario de puntos de agua obtenido sobre el área de influencia del proyecto en las Unidades Funcionales 5, 6 y 7 y en particular alrededor de los alineamientos superficiales de los Túneles de La Paz y La Sorda. Dentro de estos puntos de agua se tienen en cuenta nacimientos o manantiales, vaguadas, acumulaciones antrópicas, etc. **Anexo B.**

5.1.8.2.1 Actividades Desarrolladas

Durante la fase de campo fue realizado el inventario y registro de puntos de GPS y su relación con los sitios de emanación de agua subterránea, vaguadas, acumulaciones antrópicas entre otros, en los diferentes predios encontrados dentro de la zona de interés. También se han tenido en cuenta en este inventario estructuras tales como pilas, diques y piletas; la **Figura 5-2** muestra algunos ejemplos de las captaciones encontradas a lo largo de la fase de campo.

Figura 5-2. Puntos de agua encontradas en la fase de campo.



Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

5.1.8.2.2 Resultados Obtenidos Del Inventario

Se identificaron 600 puntos de agua referenciados con GPS, los cuales se encuentran distribuidos dentro de la zona de interés del proyecto y zonas aledañas pertenecientes a las Unidades Funcionales 5, 6 y 7. El total de los puntos identificados y su clasificación

por categoría se muestran en la **Tabla 5-1**.

A continuación se muestra la distribución de los puntos de agua identificados en la Unidad Funcional 5 (**Figura 5-3**), Unidad Funcional 6 (Área de influencia del Túnel La Paz) (**Figura 5-4**) y en la Unidad Funcional 7 (Área de influencia del Túnel La Sorda) (**Figura 5-5**). En estas figuras los puntos azules representan manantiales, los puntos celestes representan quebradas, las pilas y las vaguadas se identifican con puntos naranjas y rojos respectivamente, mientras que los jagüeyes se muestran en color verde.

Tabla 5-1. Relación de puntos de agua identificados con su respectiva categoría.

| Tipo Estación | Cantidad |
|---------------------------------|------------|
| Pozos Profundos y Cisternas (P) | 2 |
| Pilas (Pi) | 7 |
| Manantial/Dique (Md) | 9 |
| Jagüeyes/Estanques (J) | 31 |
| Quebradas (Q) | 51 |
| Vaguadas (V) | 364 |
| Manantiales y Nacederos (M) | 136 |
| Estaciones Totales | 600 |

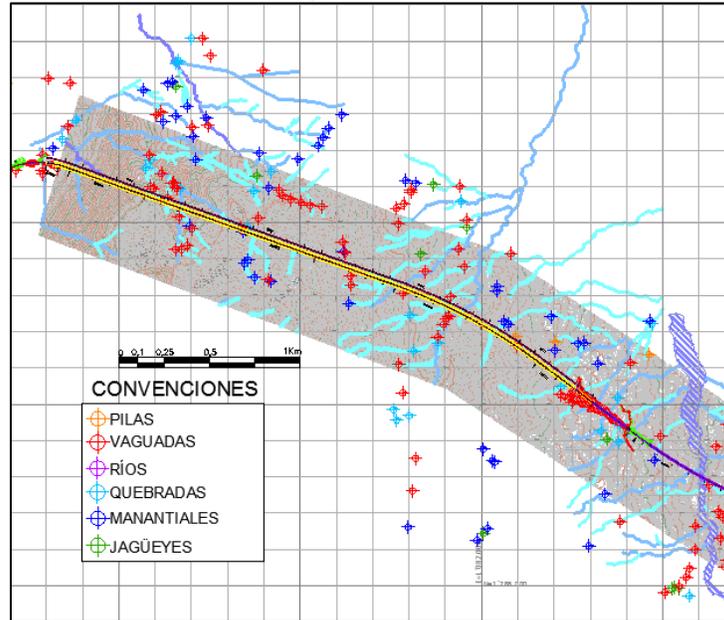
Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

Figura 5-3. Distribución de puntos de agua identificados en la Unidad Funcional 5.



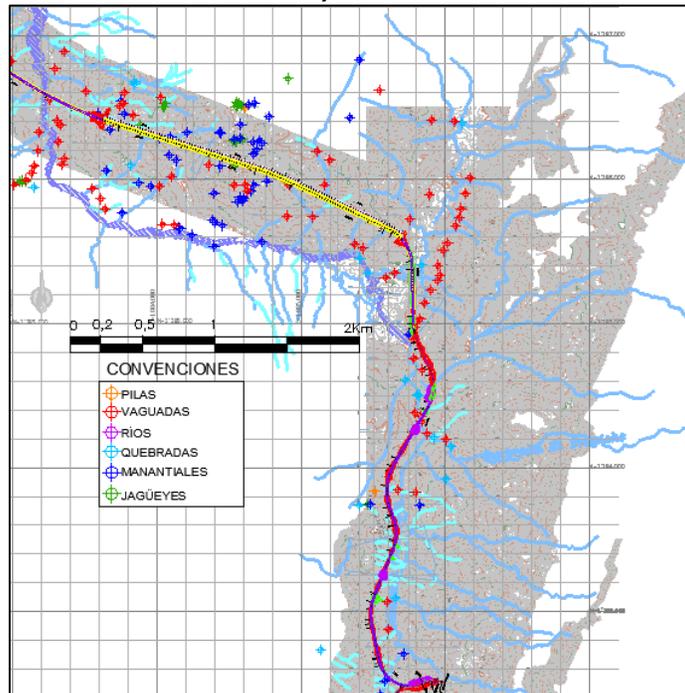
Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

Figura 5-4. Distribución de los puntos de agua identificados en la Unidad Funcional 6 (Área de influencia del Túnel La Paz).



Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

Figura 5-5. Distribución de los puntos de agua identificados en la Unidad Funcional 7 (Área de influencia del Túnel La Sorda).



Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

5.1.1.3 Trabajos y Exploraciones en campo

5.1.8.3.1 Seguimiento Niveles Piezométricos

Para el desarrollo del componente hidrogeológico se empleó información compilada de perforaciones realizadas, en las Unidades Funcionales 6 y 7, obteniendo información en varios aspectos, entre los cuales se destacan el geológico, estratigráfico, la información sobre niveles freáticos y piezómetros.

El seguimiento de los niveles piezométricos en las unidades funcionales de estudio, se realizó a partir de los sondeos culminados a lo largo del trazado de la vía, el procedimiento llevado a cabo para tomar la información correspondiente de niveles freáticos, fue con ayuda de un decámetro al cual en la punta se le añadió un peso para conocer el momento donde llegara a la tabla de agua y así poder tomar una medición en metros de la profundidad donde se encontró el nivel freático. Anexo C.

En las tablas 5-2, 5-3 y 5-4 se muestran los sondeos con sus respectivas coordenadas de los cuales se tomó el nivel freático para los túneles La Paz (Unidad Funcional 6) y la Sorda (Unidad Funcional 7) y para el Viaducto de Rio Sucio (Unidad Funcional 7).

Tabla 5-2. Tabla Niveles piezométricos Túnel La Paz

| TUNEL LA PAZ - UF6 | | | | |
|--------------------|-------------|-----------|-----------------------|-------------|
| CÓDIGO SONDEO | COORDENADAS | | NIVEL FREÁTICO TOMADO | |
| | ESTE | NORTE | 18 de Abril | 16 de Junio |
| S02 | 1.081.037 | 1.287.830 | - | - |
| S03 | 1.081.741 | 1.287.569 | - | 29 m |
| S04 | 1.082.462 | 1.287.123 | 6,73 m | 9 m |
| S05 | 1.082.622 | 1.287.003 | 6,3 m | 6,5 m |

Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

Tabla 5-3. Tabla Niveles piezométricos Viaducto Rio Sucio

| VIADUCTO RIO SUCIO - UF7 | | | | | | | |
|--------------------------|-------------|-----------|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| CÓDIGO SONDEO | COORDENADAS | | NIVEL FREÁTICO TOMADO | | | | |
| | ESTE | NORTE | 08 de Marzo | 10 de Marzo | 14 de Marzo | 18 de Abril | 16 de Junio |
| S1 | 1.082.742 | 1.286.909 | 1,6 m | 1,8 m | 1,96 m | 1,54 m | 1,3 m |
| S2 | 1.082.832 | 1.286.844 | 2,1 m | 2,37 m | 2,57 m | 2,7 m | 3 m |
| S3 | 1.082.923 | 1.286.779 | 1,8 m | 3,35 m | 4,6 m | 4,84 m | 2,5 m |
| S4 | 1.082.951 | 1.286.761 | 1,3 m | 1,43 m | 1,4 m | 0,68 m | 0,5 m |
| S5 | 1.082.978 | 1.286.742 | 0,5 m | 1,6 m | 2,5 m | 0,73 m | 0,2 m |
| S6 | 1.083.010 | 1.286.720 | - | 3,87 m | 3,1 m | 1,77 m | 1,5 m |
| S7 | 1.083.036 | 1.286.702 | 1 m | 1,24 m | 1,34 m | 2,2 m | 1 m |
| S8 | 1.083.063 | 1.286.687 | - | - | - | 4,86 m | 5 m |
| S9 | 1.083.097 | 1.286.666 | - | 5,3 m | 4,9 m | 4,58 m | 4,4 m |
| S10 | 1.083.161 | 1.286.629 | - | - | - | 10,2 m | 10 m |
| S11 | 1.083.266 | 1.286.571 | - | - | - | 9,4 m | 7,5 m |
| S12 | 1.083.337 | 1.286.535 | - | - | - | 4,53 m | 12,7 m |
| S13 | 1.083.373 | 1.286.518 | - | - | - | 6,77 m | 7 m |
| S14 | 1.083.410 | 1.286.501 | - | - | - | 7,3 m | 4 m |
| S15 | 1.083.446 | 1.286.484 | - | - | - | - | 6 m |
| S16 | 1.083.483 | 1.286.469 | - | - | - | 5,9 m | 6 m |
| S17 | 1.083.520 | 1.286.453 | - | - | - | 10,74 m | 3 m |

Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

Tabla 5-4. Tabla Niveles piezométricos Túnel la Sorda

| TUNEL LA SORDA - UF7 | | | | | | | |
|----------------------|-------------|-----------|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| CÓDIGO SONDEO | COORDENADAS | | NIVEL FREÁTICO TOMADO | | | | |
| | ESTE | NORTE | 08 de Marzo | 10 de Marzo | 14 de Marzo | 18 de Abril | 16 de Junio |
| TLS-S1 | 1.083.638 | 1.286.401 | 2,5 m | 2,54 m | 2,6 m | 2,38 m | 2 m |
| TLS-S2 | 1.084.425 | 1.286.148 | - | - | - | - | 33 m |
| TLS-S3 | 1.084.629 | 1.286.082 | - | - | - | 19,7 m | 18 m |
| TLS-S4 | 1.084.899 | 1.285.986 | - | - | - | 3,63 m | 2,2 m |
| TLS-S5 | 1.085.666 | 1.285.613 | - | - | - | 9,19 m | 8,3 m |

Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

5.1.8.3.2 Exploración Geofísica, Tomografías

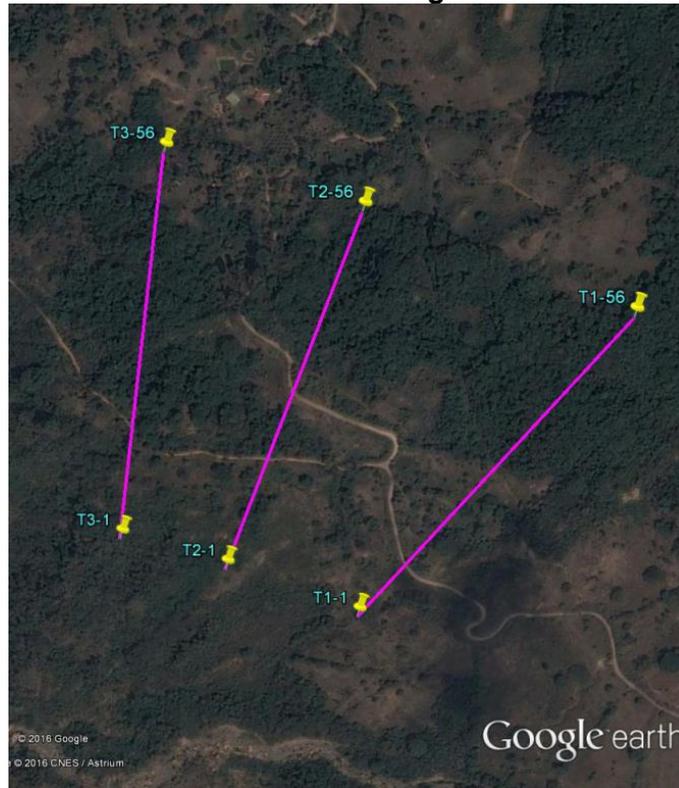
La información de tomografías realizadas anteriormente por la firma TECNOCONSULTA S.A en mayo del 2014 sobre los túneles de La Paz y La Sorda, se integraron como apoyo para el desarrollo de este estudio, a su vez, se integran resultados de tomografías transversales que fueron llevadas a cabo durante la ejecución de este proyecto como alcance de la empresa E.L.B. Geología y Vías S.A.S para cada uno de los túneles las cuales fueron distribuidas de manera uniforme sobre estos.

El procedimiento para realizar las tomografías incluye cuatro etapas de trabajo en donde se incluyeron las siguientes actividades:

- **Fase de Reconocimiento Lito-Estratigráfico y Estructural:** Realizada en los alrededores del área del proyecto, con el fin de reconocer la geología local, estratigrafía, geomorfología, inclinación (actitud) de las capas de roca en superficie y la

ubicación del sitio de interés; la **Figura 5-6** muestra la localización de las tomografías realizadas.

Figura 5-6. Localización de las tomografías realizadas.



Fuente: Google Earth. 2016

- **Fase de Adquisición de Datos:** Efectuada con la visita puntual al sitio del proyecto para planear la ubicación y ejecución de una (1) Tomografía Eléctrica 2D tipo Roll Along con 252 electrodos cada una y espaciados cada 10 m para un perfil de exploración de 2520 metros de longitud; la **Figura 5-7** evidencia el proceso realizado para la recolección de datos.

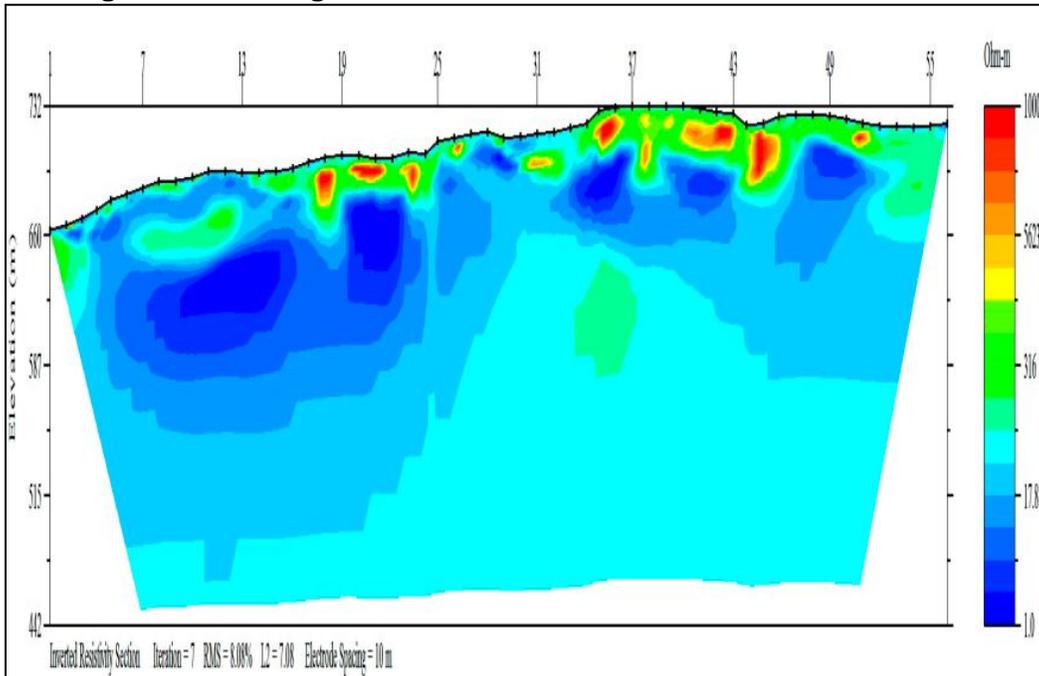
Figura 5-7. Proceso de toma de datos de las tomografías.



Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

- **Fase de Valoración de Información:** Revisión bibliográfica y análisis de la Información geológica existente de superficie y subsuelo, para el sector del estudio.
- **Fase de Procesamiento e Interpretación:** Con los datos adquiridos de las fases anteriores y utilizando software de inversión y modelización AGI EarthImager 2D para el procesamiento e interpretación de los datos de la Tomografía Eléctrica 2D, se correlacionaron los resultados con la información regional y local; la **Figura 5.8** muestra la tomografía obtenida con el software de modelización. En el **Anexo D** se presentan las diferentes tomografías obtenidas.

Figura 5-8. Tomografía obtenida con el software de modelización.



Fuente: TECNOCONSULTA S.A. 2014

5.1.8.3.3 Pruebas de Infiltración

Se realizaron pruebas de infiltración y registro de puntos de GPS distribuidos homogéneamente para poder determinar la permeabilidad en los sitios correspondientes en los diferentes predios que se encuentran en los sectores aledaños al corredor.

5.1.8.3.3.1 Actividades Desarrolladas

Una vez se han definido los lugares en los que se realizarán las pruebas de infiltración a lo largo de la zona de influencia del proyecto se retira la capa vegetal en una pequeña área de aproximadamente 0.25 m² y se excava un hueco de diámetro de 20 cm. (8") y 20 cm de profundidad en el que se introduce el molde que consiste un tubo cilíndrico metálico de 20 cm de diámetro. Después de introducir el molde en el agujero se llena con agua rápidamente hasta 20 cm de altura y alcanzada dicha altura de agua se da inicio a la prueba. Se toma un punto inicial definido como: Tiempo inicial (T0=0) y altura inicial (h0=20); seguido a esto se mide la altura de la tabla de agua en distintos intervalos de tiempo, cabe resaltar que los resultados de esta prueba depende en gran parte del material sobre el cual se realiza el ensayo.

Para registrar los resultados de estas pruebas se emplea el formato que se muestra a continuación en la **Figura 5-9**, donde se pueden compilar datos como el intervalo de tiempo, tiempo acumulado, altura medida, infiltración parcial, lámina de agua acumulada y velocidad de la infiltración.

Figura 5-9. Formato utilizado para el registro de información obtenida en las pruebas de infiltración

| INFORMACIÓN DE LA PRUEBA | |
|---|---|
| NOMBRE DEL PROYECTO: | CÓDIGO |
| Concesión corredor vial Bucaramanga - Barrancabermeja - Yondó | 2 |
| FECHA | LUGAR |
| 21/03/2016 | Unidad Funcional 7 |
| PUNTO GPS | COORDENADAS |
| P02 | E 1.085.038 |
| | N 1.285.742 |
| | COTA (m.s.n.m.) 700 |
| INSERCIÓN (cm) | DIÁMETRO (cm) |
| 20 | 20 |
| Sistema de Coordenadas | |
| Magna Sirgas Colombia Bogotá Este. | |
| COBERTURA VEGETAL | Baja, zona cubierta de pastos |
| OBSERVACIONES: | La prueba culminó en 2 horas, 30 minutos. |
| DATOS DE TERRENO Y CÁLCULOS | |
| Tiempo Acumulado | Intervalo de medición |
| 0 Seg | 0 |
| 30 Seg | 2 cm |
| 1 min | 2,6 cm |
| 2 min | 3,1 cm |
| 3 min | 3,5 cm |
| 4 min | 3,8 cm |
| 5 min | 4,1 cm |
| 7 min | 4,4 cm |
| 10 min | 4,7 cm |
| 15 min | 5,1 cm |
| 20 min | 5,5 cm |
| 25 min | 5,7 cm |
| 30 min | 5,9 cm |
| 45 min | 6,5 cm |
| 1 Hora | 6,9 cm |
| 1h, 15 min | 7,1 cm |
| 1h, 30 min | 7,4 cm |
| 1h, 45 min | 7,7 cm |
| 2 Horas | 8 cm |
| 2h, 15 min | 8,3 cm |
| 2h, 30 min | 8,6 cm |

Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

5.1.8.3.3.2 Resultados obtenidos del inventario

Empleando la metodología previamente descrita anteriormente se obtuvieron los siguientes resultados:

Se realizaron en total 31 pruebas de infiltración, las cuales fueron georeferenciadas con GPS, y se encuentran distribuidos a lo largo del eje principal del trazado de la vía y sus zonas aledañas, cuyo consolidado clasificado se relaciona en la **Tabla 5-3** y su registro se presenta en el **Anexo A**.

Tabla 5-5. Compilación Ensayos de infiltración realizados.

| Punto GPS | Medición Final (cm) | Este | Norte | Cota (m.s.n.m) | Observaciones |
|-----------|---------------------|-----------|-----------|----------------|-------------------------|
| 1 | 12,4 cm | 1.085.462 | 1.285.455 | 688 | Culminó en 2 h, 30 min |
| 2 | 8,6 cm | 1.085.038 | 1.285.742 | 700 | Culminó en 2 h, 30 min |
| 3 | 12,2 cm | 1.084.513 | 1.286.127 | 740 | Culminó en 2 h, 30 min |
| 4 | 14,6 cm | 1.084.571 | 1.286.422 | 767 | Culminó en 2 h, 30 min |
| 5 | 19,4 cm | 1.085.027 | 1.286.580 | 845 | Culminó en 11 min, 33 s |
| 6 | 9,1 cm | 1.083.875 | 1.286.244 | 780 | Culminó en 2 h, 30 min |
| 7 | 19,8 cm | 1.083.796 | 1.286.578 | 640 | Culminó en 1 h, 47 min |
| 8 | 7,1 cm | 1.083.634 | 1.286.335 | 566 | Culminó en 2 h, 30 min |
| 9 | 13,2 cm | 1.083.016 | 1.287.096 | 520 | Culminó en 2 h, 30 min |
| 10 | 20 cm | 1.082.366 | 1.287.686 | 601 | Culminó en 2 h, 14 min |
| 11 | 20 cm | 1.085.350 | 1.282.654 | 671 | Culminó en 1 h, 15 min |
| 12 | 19,3 cm | 1.085.494 | 1.283.274 | 750 | Culminó en 16 min, 30 s |
| 13 | 19,8 cm | 1.085.590 | 1.283.960 | 819 | Culminó en 46 min, 54 s |
| 14 | 18,9 cm | 1.085.897 | 1.284.603 | 750 | Culminó en 33 min, 4 s |
| 15 | 9,4 cm | 1.082.329 | 1.284.598 | 638 | Culminó en 2 h, 30 min |
| 16 | 7,1 cm | 1.085.334 | 1.288.850 | 763 | Culminó en 2 h, 30 min |
| 17 | 17,7 cm | 1.082.985 | 1.290.201 | 485 | Culminó en 2 h, 30 min |
| 18 | 19,4 cm | 1.081.655 | 1.286.747 | 847 | Culminó en 2 h, 9 min |
| 19 | 10 cm | 1.081.948 | 1.288.210 | 693 | Culminó en 2 h, 30 min |
| 20 | 20 cm | 1.080.685 | 1.286.293 | 916 | Culminó en 2 h |
| 21 | 19,7 cm | 1.080.917 | 1.286.908 | 1012 | Culminó en 12 min |
| 22 | 14,1 cm | 1.080.156 | 1.291.617 | 224 | Culminó en 2 h, 30 min |
| 23 | 1,4 cm | 1.079.392 | 1.290.121 | 368 | Culminó en 2 h, 30 min |
| 24 A | 13,9 cm | 1.079.354 | 1.288.937 | 994 | Culminó en 2 h, 30 min |
| 24 B | 8,1 cm | 1.081.259 | 1.288.578 | 631 | Culminó en 2 h, 30 min |
| 25 | 14,9 cm | 1.079.340 | 1.288.345 | 398 | Culminó en 1 min, 48 s |
| 26 | 19,10 cm | 1.079.014 | 1.287.896 | 421 | Culminó en 19 min, 10 s |
| 27 | 11,2 cm | 1.078.334 | 1.286.996 | 310 | Culminó en 2 h, 30 min |
| 28 | 11,9 cm | 1.284.450 | 1.075.376 | 329 | Culminó en 2 h, 30 min |
| 29 | 18,8 cm | 1.073.776 | 1.281.188 | 302 | Culminó en 12 min, 7 s |
| 30 | 17,7 cm | 1.072.572 | 1.278.449 | 203 | Culminó en 9 min, 54 s |

Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

5.1.1.4 Hidrogeoquímica

La información obtenida en las pruebas descritas a continuación, permiten analizar la distribución de los elementos químicos y su evolución espacial y temporal en un sistema hidrogeológico, con el fin de caracterizar el agua almacenada en los acuíferos y evaluar su origen e interacción con otros cuerpos de agua.

La composición físico-química del agua subterránea depende de las características litológicas y mineralógicas de la roca por la que circula. Generalmente la composición iónica del agua subterránea se relaciona con la roca fuente, aunque también otros factores como la composición de la lluvia, el clima, la concentración de CO₂ en el agua, el tiempo de contacto agua-roca, la presión y la temperatura, pueden controlar esa composición. La porosidad de la roca es un aspecto muy importante, dado que en las rocas porosas la mayor superficie de contacto permite más tiempo de interacción entre el

agua y la roca, mientras que en una roca masiva por la que el agua circula por medio de las fisuras, tiene menor contacto con la roca y por lo tanto menor posibilidad de reaccionar o disolver los minerales que allí se encuentran.

La composición química del agua no sólo depende de los factores descritos anteriormente si no que existen otro factores determinantes como son: evaporación y evapotranspiración; captura selectiva de iones por la vegetación; decaimiento de materia orgánica ($CH_2O + O_2 \Rightarrow H_2O + CO_2$), meteorización y disolución de carbonatos, de silicatos o minerales evaporíticos; precipitación de minerales en suelos o acuíferos; reacciones de intercambio iónico. También pueden afectar la Calidad natural del agua las cargas contaminantes generadas por actividades antrópicas como el manejo y disposición inadecuada de residuos sólidos y líquidos, el saneamiento in situ, las fuentes superficiales contaminadas, el riego y uso de agroquímicos.

La caracterización hidrogeoquímica del agua subterránea, superficial, y lluvia, en las Unidades Funcionales 6 y 7 en el área de influencia del Proyecto Corredor Vial Bucaramanga – Barrancabermeja – Yondó fue basada en el muestreo de 11 puntos de agua divididos en dos sectores importantes; El sector del Túnel La Paz, el cual comprendió 6 puntos de muestreo, donde 5 puntos correspondieron a nacimientos de agua y un punto correspondió a un sondeo realizado en la zona, y el sector del Túnel La Sorda, el cual comprendió 5 puntos de muestreo de los cuales 2 puntos pertenecieron a nacimientos de agua y 3 puntos a sondeos realizados en dicho sector.

5.1.8.4.1 Pruebas de Calidad de Agua

Para la realización de las pruebas, se requirió completar una tabla con el código de muestreo y sus coordenadas correspondientes, así mismo se ubicaron los puntos de muestreo en el mapa de la zona de estudio; A continuación se muestran los puntos de muestreo estadístico y en vista de planta perfil.

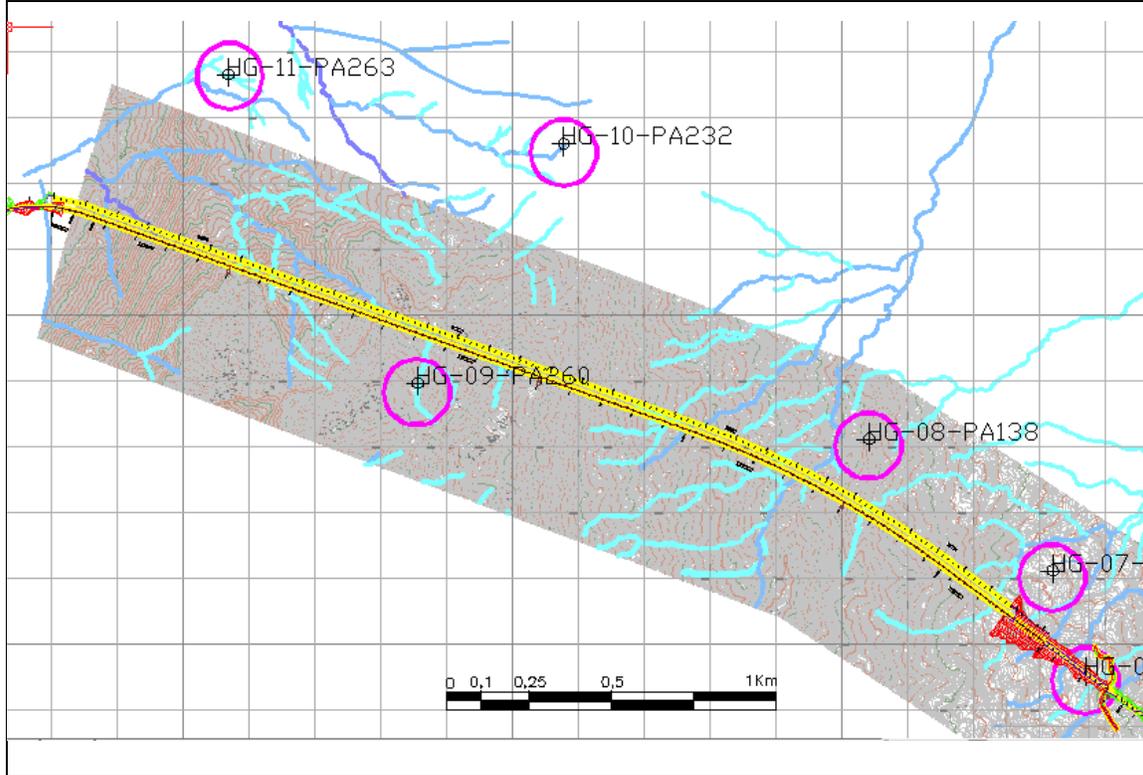
Tabla 5-6. Puntos de muestreo para el sector del túnel La Paz.

| SECTOR | PUNTO DE MUESTREO | CORDENADAS PLANAS | | CODIGO DE MUESTREO |
|--------------|-------------------|-------------------|-----------|--------------------|
| | | Y | X | |
| TÚNEL LA PAZ | HG-07-PA132 | 1.287.224 | 1.082.643 | P-1 |
| | HG-08-PA138 | 1.287.624 | 1.082.083 | P-2 |
| | HG-07-PA260 | 1.287.794 | 1.080.712 | P-3 |
| | HG-07-PA232 | 1.288.522 | 1.080.712 | P-4 |
| | HG-07-PA263 | 1.288.732 | 1.080.137 | P-5 |
| | HG-06-SND-01 | 1.286.910 | 1.082.742 | P-6 |

Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

Para el desarrollo de las pruebas de calidad de agua, en la Unidad Funcional 6, Túnel La Paz, se realizó la toma de muestras y análisis respectivo en cinco (5) manantiales, matriz aguas superficiales y un (1) piezómetro matriz aguas subterráneas.

Figura 5-10. Localización de los puntos de muestreo para el sector del túnel La Paz.



Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

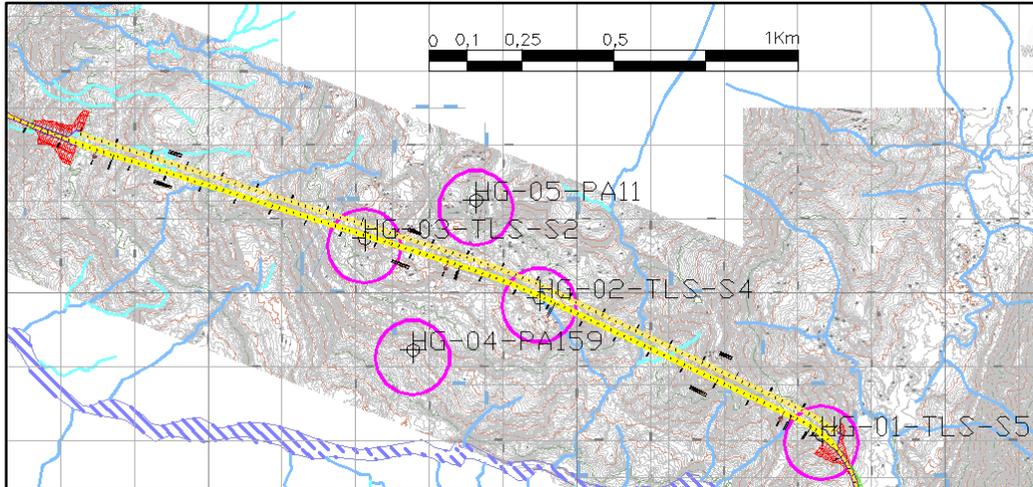
Tabla 5-7. Puntos de muestreo para el sector del túnel La Sorda.

| SECTOR | PUNTO DE MUESTREO | CORDENADAS PLANAS | | CODIGO DE MUESTREO |
|----------------|-------------------|-------------------|-----------|--------------------|
| | | Y | X | |
| TÚNEL LA SORDA | HG-04-PA159 | 1.285.845 | 1.084.556 | S-1 |
| | HG-05-PA11 | 1.286.251 | 1.084.727 | S-2 |
| | HG-03-TLS-S3 | 1.286.093 | 1.084.631 | S-3 |
| | HG-03-TLS-S4 | 1.285.986 | 1.084.899 | S-4 |
| | HG-03-TLS-S5 | 1.285.613 | 1.085.666 | S-5 |

Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

Para el desarrollo de las pruebas de calidad de agua, en la Unidad Funcional 7, Túnel La Sorda, se realizó la toma de muestras y análisis respectivo en dos (2) manantiales, matriz aguas superficiales y tres (3) piezómetros matriz referenciada como aguas subterráneas. **Figura 5-11.**

Figura 5-11. Localización de los puntos de muestreo para el sector del túnel La Sorda.



Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

Para la realización de las pruebas de calidad de agua, se incluyeron en los puntos de monitoreo, tres (3) tipos de caracterización: Caracterización Física, Caracterización Química y Caracterización Biológica. En la primera se establecen parámetros tales como, temperatura de la muestra, sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales, sólidos sedimentables, conductividad eléctrica, potencial de hidrógeno (pH), turbiedad y color real; la caracterización química se destacan parámetros como; oxígeno disuelto, Fosforo Total, Alcalinidad Total, Grasas y Aceites, determinación de mg/L de Cromo, Mercurio, Plomo, Níquel, entre otros; y por último en la caracterización biológica se identifican los parámetros, coliformes totales y coliformes fecales. En la **Tabla 5-5** se muestran cada una de las caracterizaciones, sus parámetros y las pruebas que se realizarán a cada uno de los puntos de monitoreo:

Tabla 5-8. Parámetros, caracterizaciones y pruebas a realizar para cada punto de monitoreo.

| Parametro | | Unidad de Medida | PUNTOS DE MONITOREO | | | | | | | | | | | |
|------------------------|------------------------------|------------------|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|
| | | | P-1 | P-2 | P-3 | P-4 | P-5 | P-6 | S-1 | S-2 | S-3 | S-4 | S-5 | |
| Caracterización Física | Temperatura | °C | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | Solidos Suspendidos Totales | mg/L | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | Solidos Disueltos Totales | mg/L | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | Solidos Sedimentables | ml/L-h | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | Conductividad Electrica | uS/cm | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | Pontencial de Hidrogeno - pH | Unidades de pH | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | Turbiedad | UNT | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | Color Real | m-1 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |

| Parametro | Unidad de Medida | PUNTOS DE MONITOREO | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---|---|
| | | P-1 | P-2 | P-3 | P-4 | P-5 | P-6 | S-1 | S-2 | S-3 | S-4 | S-5 | | |
| Caracterización Química | Oxígeno disuelto | mg/L O2 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | Demanda Química de Oxígeno - DQO | mg/L O2 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | Demanda Bioquímica de Oxígeno - DBO5 | mg/L O2 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | Nitrogeno Total Kjeldahl | NTK | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | Fosforo Total | mg/L P | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | Grasas y Aceites | mg/L | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | Alcalinidad Total | mg/L CaCO3 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | Acidez Total | mg/L CaCO3 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | Dureza Calcica | mg/L CaCO3 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | Dureza Total | mg/L CaCO3 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | Fenoles Totales | mg/L | - | - | - | - | - | x | - | - | x | x | x | x |
| | Arsenico | mg/L | - | - | - | - | - | x | - | - | x | x | x | x |
| | Bario | mg/L | - | - | - | - | - | x | - | - | x | x | x | x |
| | Cadmio | mg/L | - | - | - | - | - | x | - | - | x | x | x | x |
| | Cinc | mg/L | - | - | - | - | - | x | - | - | x | x | x | x |
| | Cromo | mg/L | - | - | - | - | - | x | - | - | x | x | x | x |
| | Cobre | mg/L | - | - | - | - | - | x | - | - | x | x | x | x |
| | Mercurio | mg/L | - | - | - | - | - | x | - | - | x | x | x | x |
| | Niquel | mg/L | - | - | - | - | - | x | - | - | x | x | x | x |
| | Plata | mg/L | - | - | - | - | - | x | - | - | x | x | x | x |
| Plomo | mg/L | - | - | - | - | - | x | - | - | x | x | x | x | |
| Selenio | mg/L | - | - | - | - | - | x | - | - | x | x | x | x | |
| Caracterización Bacteriológica | Coliformes Totales | NMP/100 ml | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| | Coliformes Fecales | NMP/100 ml | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |

Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

5.1.8.4.1.2 Análisis de la información obtenida

En este ítem se recopilan los resultados obtenidos en el análisis de los parámetros físico – químicos y biológicos, correspondientes a los puntos de monitoreo señalados en la **Tabla 5-5**, a fin de resumirlos mediante gráficos estadísticos y tablas de valores, facilitando su análisis comparativo con la normatividad vigente.

La fecha de recolección de las muestras, se realizó durante los días 16 y 17 de Abril de 2016, contándose con la participación del Laboratorio PSL Proanálisis LTDA (acreditado por el IDEAM NTC ISO – IEC 17025), dándose cumplimiento a los protocolos establecidos por el laboratorio y los contemplados por el IDEAM, para la toma de muestras de aguas simples y subterráneas (piezómetros). **Figura 5-12**.

Figura 5-12. Toma de muestras de agua



Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

5.1.8.4.1.2.1 Caracterización Hidrogeoquímica de la Unidad Funcional 6, Túnel La Paz.

De acuerdo a las muestras recolectadas en los puntos de monitoreo con área de influencia en el sector del Túnel de la Paz **Tabla 5-3**, se procedió a trasladar las muestras al Laboratorio PSL Proanálisis LTDA, mediante los protocolos establecidos en la cadena de custodia (conservación y preservación), para realizar los respectivos métodos de análisis en el laboratorio. (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater).

A continuación, en la **Tabla 5-6**, se describen los resultados obtenidos para los puntos de monitoreo realizados en los manantiales aferentes al área de influencia del Túnel La Paz:

Tabla 5-9. Resultados análisis de agua en los manantiales del túnel La Paz, U F 6.

| ANÁLISIS | IDENTIFICACIÓN DE LA(S) MUESTRA(S) | | | | | UNIDADES | MÉTODO DE ANÁLISIS | DECRETO 1594 DE 1984 (2) |
|-------------------------------|------------------------------------|--------|--------|-------|--------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| | P-1 | P-2 | P-3 | P-4 | P-5 | | | |
| Acidez | <6* | <6* | <6* | <6* | <6* | mg CaCO ₃ /L | S.M. 2310 B | * |
| Alcalinidad total | 26,7 | 144 | 2,7 | 13,1 | 3,7 | mg CaCO ₃ /L | S.M. 2320 B | * |
| Coliformes Fecales | 9 | <3 | 93 | 23 | 4 | NMP/100mL | S.M. 9223 B | 2.000 microorganismos /100 ml. |
| Coliformes totales | 930 | 240 | 24000 | 150 | 240 | NMP/100mL | S.M. 9223 B | 2.000 microorganismos /100 ml. |
| Color Real | 110 | <5* | 5,2 | 15,1 | <5* | UC | S.M. 2120 C | 20 |
| Conductividad eléctrica | 62,9 | 377 | 17,24 | 34,3 | 14,94 | µS/cm | S.M. 2510 B | * |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno | 12,4 | <1,1* | <1,1* | 9,4 | <1,1* | mg O ₂ /L | S.M. 5210 B; S.M. 4500-O G | * |
| Demanda Química de Oxígeno | 30,5 | <10,3* | <10,3* | 22,6 | <10,3* | mg O ₂ /L | S.M. 5220 C | * |
| Dureza Cálctica | 5,2 | 135 | <3* | 15,9 | 3,7 | mg CaCO ₃ / L | S.M. 3500-Ca B | * |
| Dureza total | 19,4 | 159 | <4,4* | 21,8 | <4,4* | mg CaCO ₃ / L | S.M. 2340 C | * |
| Fosforo Total | <0,05* | 0,096 | <0,05* | 0,059 | <0,05* | mg P/L | S.M. 4500-P E | * |
| Grasas y Aceites | <3,0* | <3,0* | <3,0* | <3,0* | <3,0* | mg/L | S.M. 5520-B | No Presencia Visible |
| Nitrógeno Total Kjeldahl | 2,4 | 1,7 | 1,5 | 1,9 | 1,7 | mg N/L | S.M 4500-N C | * |
| Oxígeno Disuelto | 4,96 | 7,44 | 6,4 | 6,6 | 7,65 | mg O ₂ /L | S.M. 4500-O G | * |

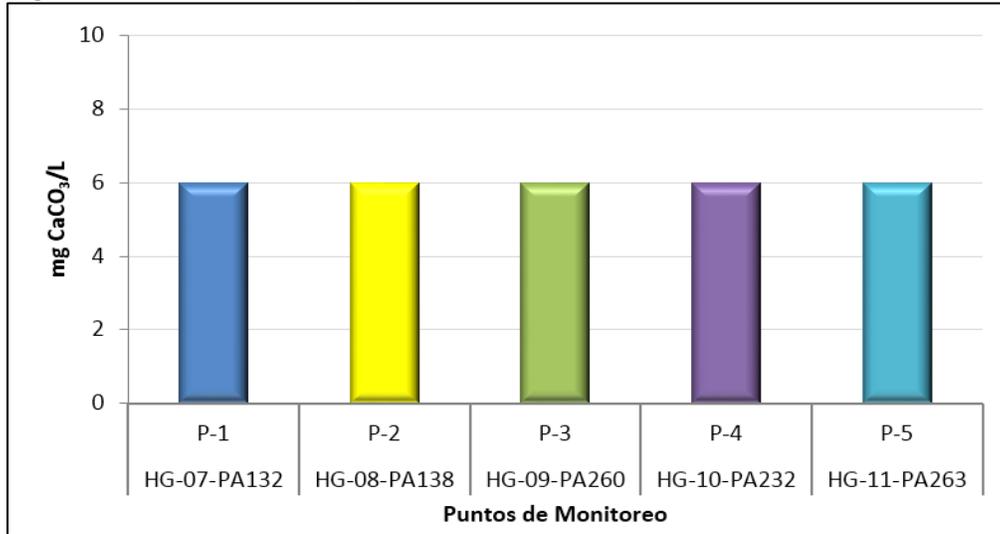
| ANÁLISIS | IDENTIFICACIÓN DE LA(S) MUESTRA(S) | | | | | UNIDADES | MÉTODO DE ANÁLISIS | DECRETO 1594 DE 1984 (2) |
|-----------------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|----------|--------------------|--------------------------|
| | P-1 | P-2 | P-3 | P-4 | P-5 | | | |
| pH | 6,58 | 7,61 | 5,14 | 6,8 | 5,23 | Und. pH | S.M. 4500-H+ B | 4,5 - 9,0 |
| Sólidos Disueltos Totales | 46,0 | 44,7 | 27,0 | 85,0 | 75,7 | mg/L | S.M. 2540 C | * |
| Sólidos Sedimentables | <0,1* | <0,1* | <0,1* | <0,1* | <0,1* | mL/L | S.M. 2540 F | * |
| Sólidos Suspendidos Totales | 42,8 | <5,5* | 51,7 | 108 | 7,0 | mg/L | S.M. 2540 D | * |
| Temperatura de la Muestra | 26,0 | 25,9 | 25,8 | 26,1 | 26,1 | °C | S.M. 2550 | * |
| Turbiedad | 7,7 | 6,4 | 17,7 | 84,5 | 7,8 | NTU | S.M. 2130.B | 190 |

Fuente: PSL PROANALISIS LTDA. 2016

En el análisis comparativo de la acidez total, se registraron valores por debajo de 6 mg CaCO₃/L, para cada uno los puntos de monitoreo - manantiales estudiados, estos resultados homogéneos, permiten determinar que una acidez débil está definida por un pH del agua que oscila entre los 4.3 y 8.3 unidades de potencial de hidrogeno, tal como sucede en los resultados obtenidos para este parámetro (pH). Este tipo de acidez presentada no tiene efecto en la salud humano. **Figura 5 -13.**

Por último, para la acidez no se establece un nivel permisible, tanto en la Resolución 2115 de 2007 “Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano”, así mismo en el Decreto 1594 de 1984 “por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos”.

Figura 5-13. Análisis comparativo de Acidez – Túnel La Paz - Manantiales



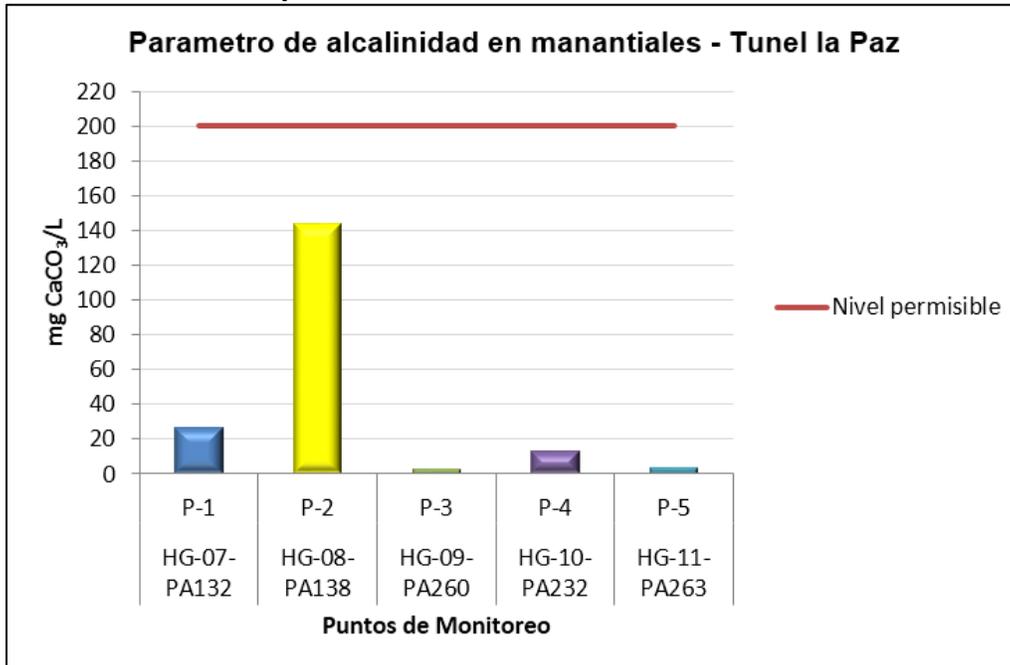
Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

Sobre la alcalinidad total, se constituye como la capacidad que tiene el agua para reaccionar con un agente ácido, a partir de la disolución de rocas calizas que contribuyen con bicarbonatos, carbonatos, e hidróxidos de Ca, Mg, Na, Fe y otros elementos.

En el caso del parámetro de alcalinidad total, se obtuvieron resultados entre el rango de [2,7 - 144 mg CaCO₃/L], destacándose que en el punto P-2 (HG-08-PA138) se evidencia el resultado más elevado y en el punto P-3 (HG-09-PA260) se registra las concentración mínima.

De acuerdo a los valores reportados para la alcalinidad total, se realizó un análisis comparativo con respecto a la Resolución 2115 de 2007, en la cual se establecen rangos de alcalinidad de 200 mg/l de CaCO₃, lo que permite deducir que todos los resultados cumplen con la norma para consumo humano. **Figura 5 -14.**

Figura 5-14. Análisis comparativo de Alcalinidad Total - Túnel La Paz – Manantiales



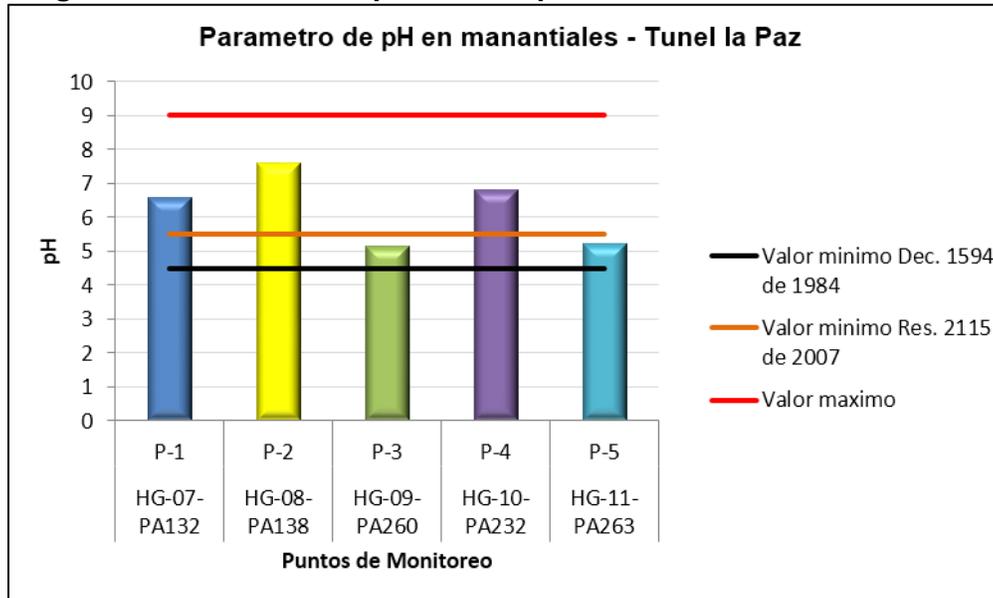
Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

Sobre los resultados obtenidos en las unidades de potencial de hidrógeno, un valor de pH entre 5,5 y 9,0 parece brindar protección para los peces de agua dulce y los invertebrados que habitan en el fondo.

El pH del agua determinará los efectos tóxicos de estas sustancias, en caso de que los tengan. De acuerdo a los valores reportados se evidencia un rango entre [5,14 – 7,61 pH], permitiendo establecer que dos (2) puntos, que no se encuentran dentro del rango permitido para el consumo humano [6,5 – 9,0 pH - Resolución 2215 de 2005], el primero es P-3 (HG-09-PA260), registrando un pH de 5,14 y el otro es P-5 (HG-11-PA263), con un valor de 5,23 pH, a diferencia que estos dos puntos, si garantizan los niveles permisibles de pH para la preservación de la flora y la fauna en aguas dulces, tal como se establece en el Decreto 1594 de 1984 [4,5 – 9,0 pH].)

Por último los demás puntos se encuentran dentro de los valores admisibles para el consumo humano y la preservación de la de la flora y la fauna en aguas dulces cálidas.
Figura 5 -15.

Figura 5-15 Análisis comparativo de pH - Túnel La Paz - Manantiales



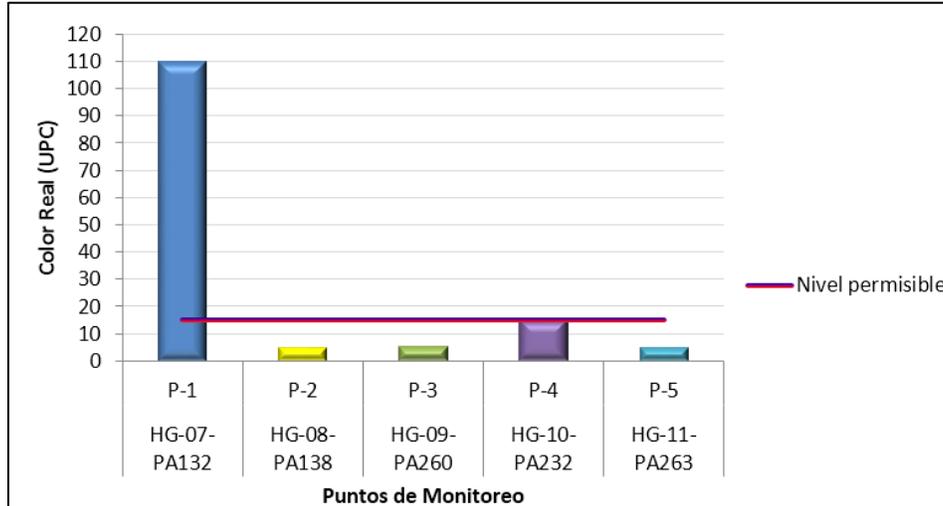
Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

El color del agua está determinado por la presencia de sustancias orgánicas y/o minerales. El análisis se realiza comparando la muestra con un patrón que contiene distintas cantidades de platino y cobalto, (UPC - Unidades de Platino – Cobalto). Se obtuvieron valores entre < 5 – 110 UPC, lo que permite establecer un análisis comparativo con la normatividad ambiental vigente.

Con respecto a la Resolución 2115 de 2007, en donde se determina un nivel permisible de 15 UPC para el consumo humano, se analiza que los puntos P-1 (HG-07-PA132) con un valor de 110 UPC y el punto P-3 (HG-10-PA232), el cual registro un dato de 15,1 UPC, se encuentran por encima de este rango, estableciendo como aguas no aptas para el consumo humano. **Figura 5 -16.**

La conductividad es un parámetro de la propiedad que poseen las soluciones acuosas para conducir la corriente eléctrica. Esta propiedad depende de la presencia de iones, su concentración, movilidad, valencia y de la temperatura de la medición. La conductividad eléctrica es proporcional al contenido de sales disueltas. El análisis comparativo de la conductividad registra valores que oscilan entre [14,94 – 377 μ S/cm] en los cinco (5) manantiales evaluados en el área de influencia del Túnel la Paz.

Figura 5-16. Análisis comparativo del color real - Túnel La Paz - Manantiales

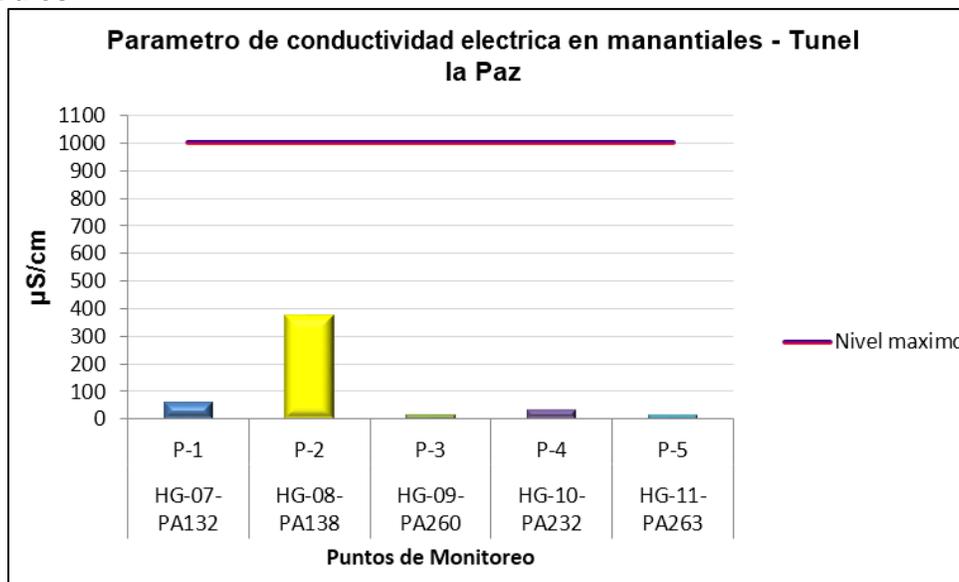


Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

Con relación a la Resolución 2115 de 2007, en donde se establece un nivel máximo de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, para el consumo humano, se determina que todos los resultados reportados se encuentran dentro del rango permitido por dicha normatividad.

El punto de monitoreo que presenta el valor más alto es el P-2 (HG-08-PA138) y el resultado más bajo obtenido durante los puntos monitoreados, se evidenció en el punto P-5 (HG-11-PA263). **Figura 5 -17.**

Figura 5-17. Análisis comparativo de la conductividad eléctrica - Túnel La Paz – Manantiales.

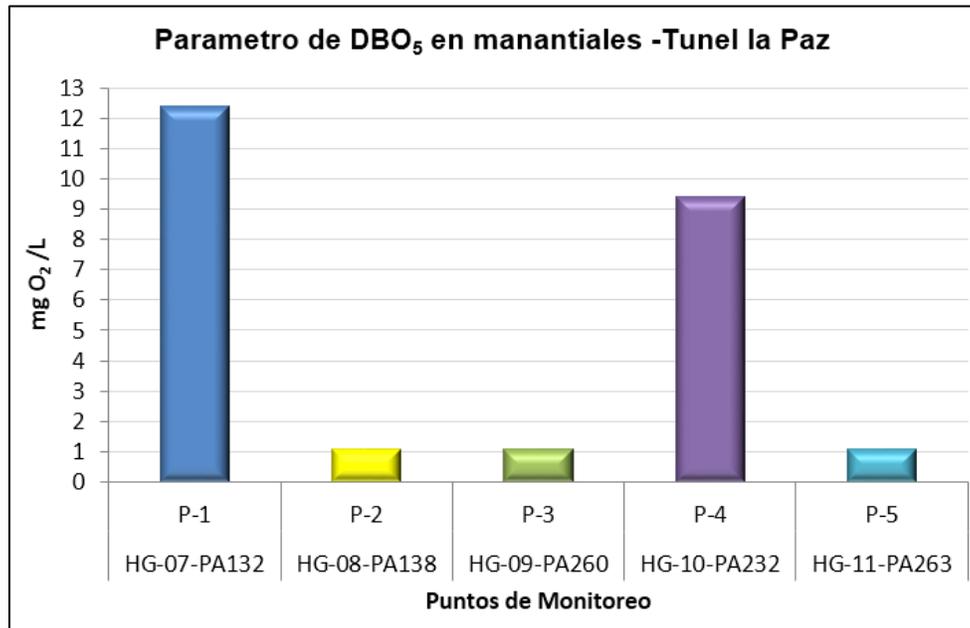


Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016.

La DBO₅ es la cantidad de oxígeno empleado por los microorganismos a lo largo de un periodo de cinco días para descomponer la materia orgánica de las aguas a una temperatura de 20 °C. Con relación a este parámetro se obtuvieron resultados establecidos entre el rango de [$< 1,1 - 12,4 \text{ mg O}_2 /\text{L}$], obteniéndose el valor más alto en el punto P-1 (HG-07-PA132).

En materia de análisis comparativo con la norma, para la DBO5 no se establece un nivel permisible, tanto en la Resolución 2115 de 2007 niveles admisibles para el consumo humano y en el Decreto 1594 de 1984 en donde se establecen los valores permisibles para la preservación de la flora y la fauna en aguas dulces cálidas. **Figura 5 -18.**

Figura 5-18. Análisis comparativo de la Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO5 - Túnel La Paz – Manantiales.



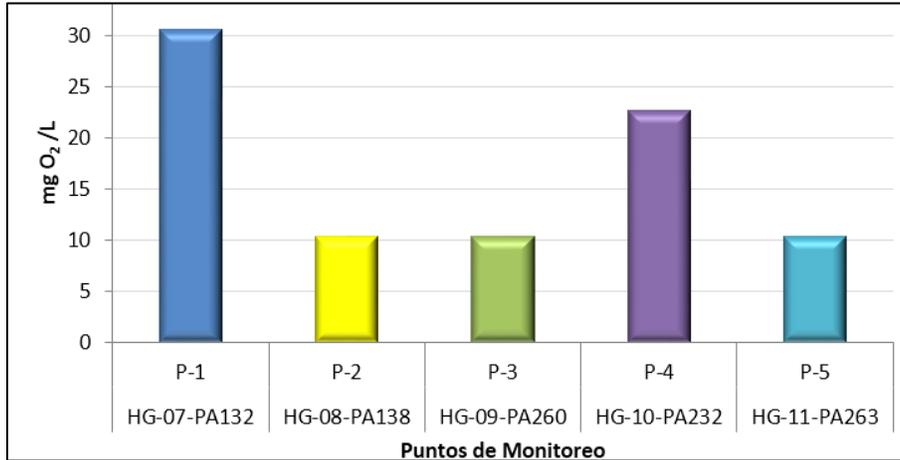
Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

La DQO es la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica por medio de dicromato en una solución ácida y convertirla en dióxido de carbono y agua. El valor de la DQO es siempre superior al de la DBO₅ porque muchas sustancias orgánicas pueden oxidarse químicamente, pero no biológicamente.

La DQO se usa para comprobar la carga orgánica de aguas residuales que, o no son biodegradables o contienen compuestos que inhiben la actividad de los microorganismos.

El análisis comparativo del parámetro DQO, sobre las muestras tomadas y analizadas, refleja un intervalo de valores [$10,3 - 30,5$], identificándose el punto P-1 (HG-07-PA132), con el resultado más elevado $30,5 \text{ mg O}_2 /\text{L}$ y presentando un homogeneidad en las concentraciones reportadas en los puntos P-2, P-3 y P-5, con datos que no superan los $10,3 \text{ mg O}_2 /\text{L}$. **Figura 5 -19.**

Figura 5-19. Análisis comparativo de la Demanda Química de Oxígeno – DQO - Túnel La Paz – Manantiales.

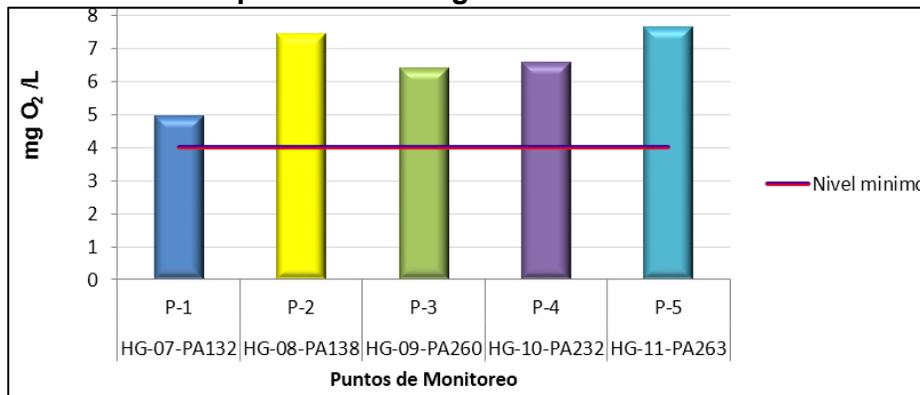


Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

El análisis de oxígeno disuelto mide la cantidad de oxígeno gaseoso (O₂) disuelto en una solución acuosa. El oxígeno entra en el agua por difusión del aire circundante, por aireación (movimiento rápido) y como producto de desecho de la fotosíntesis. El oxígeno es un elemento necesario para todas las formas de vida. Los procesos naturales de purificación de corrientes de agua requieren niveles de oxígeno adecuados para posibilitar las formas de vida aeróbicas. Cuando los niveles de oxígeno disuelto en el agua están por debajo de 4,0 mg/l, la vida acuática está en peligro, tal como lo establece el Decreto 1594 de 1984 en donde se establecen los valores permisibles para la preservación de la flora y la fauna en aguas cálida dulce.

Las concentraciones reportadas para el oxígeno disuelto varían entre [4,96 – 7,65 mg O₂ /L], estos resultados permiten determinar, que todos los puntos analizados cumplen con los niveles requeridos para la de la flora y la fauna en aguas cálida dulce. **Figura 5 -20.**

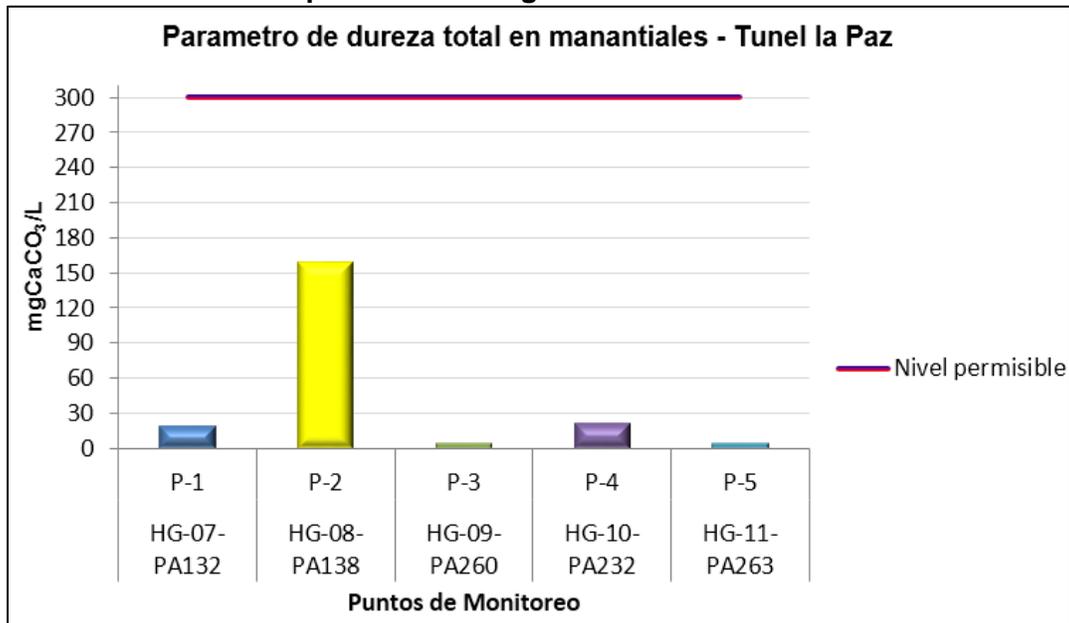
Figura 5-20. Análisis comparativo del oxígeno disuelto - Túnel La Paz – Manantiales.



Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

En cuanto a los valores de dureza total, se registran valores entre [$<4,4 - 159 \text{ mgCaCO}_3/\text{L}$], estos registros se compararon con el valor máximo aceptable para el consumo humano (Res. 2115/07) que exige un valor máximo de 300 mg /L de CaCo_3 , determinándose niveles tolerables para el consumo en la totalidad de los puntos de muestro realizados en manantiales en el área de influencia de la Unidad Funcional 6 Túnel la Paz. **Figura 5 -21.**

Figura 5-21. Análisis comparativo del oxígeno disuelto - Túnel La Paz – Manantiales.



Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

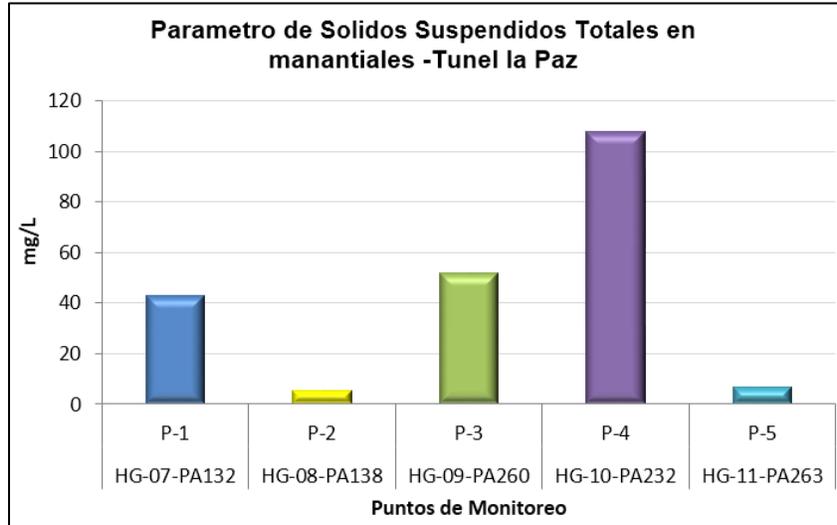
En el análisis comparativo de concentraciones de Fósforo Total se obtuvieron valores que oscilan entre $0,05$ y $0,096 \text{ mg}$ de P/L , destacándose una uniformidad en las concentraciones obtenidas para todos los puntos de aguas analizados, y los cuales se encuentran por debajo de del Valor Máximo permisible para flora y fauna de $5,0$, tal como lo establece el Decreto 1594 de 1984.

Para el caso de grasas y aceites no se advierte de la presencia de concentraciones visibles de este parámetro en las muestras analizadas.

Los sólidos sedimentables corresponden a los sólidos de menor tamaño presentes en el agua que no alcanzan a sedimentarse. En el análisis comparativo de Sólidos Suspendidos se obtuvieron valores entre [$<5,5 - 108 \text{ mg/L}$], destacándose el punto P- 4, con la concentración más elevada. **Figura 5 -22.**

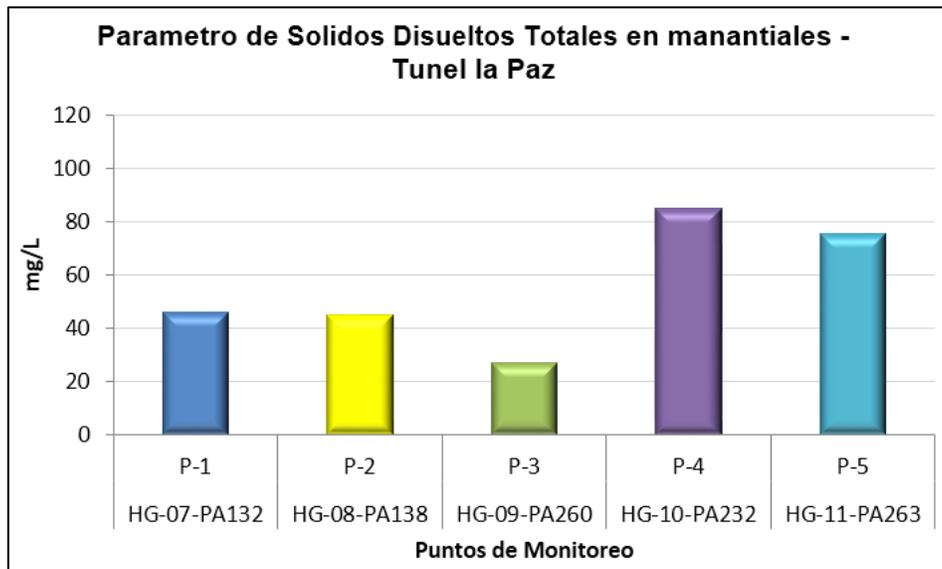
A nivel de Sólidos disueltos totales, su análisis comparativo reporta resultados entre el rango de [$27,0 - 85,0 \text{ mg/L}$], indicando que el punto con la concentración más alta en materia de solidos disueltos totales se encuentra en el punto P-4 (HG-10-PA232). **Figura 5 -23.**

Figura 5-22. Análisis comparativo de Solidos Suspendidos Totales - Túnel La Paz – Manantiales.



Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

Figura 5-23. Análisis comparativo de Solidos Disueltos Totales - Túnel La Paz – Manantiales.



Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

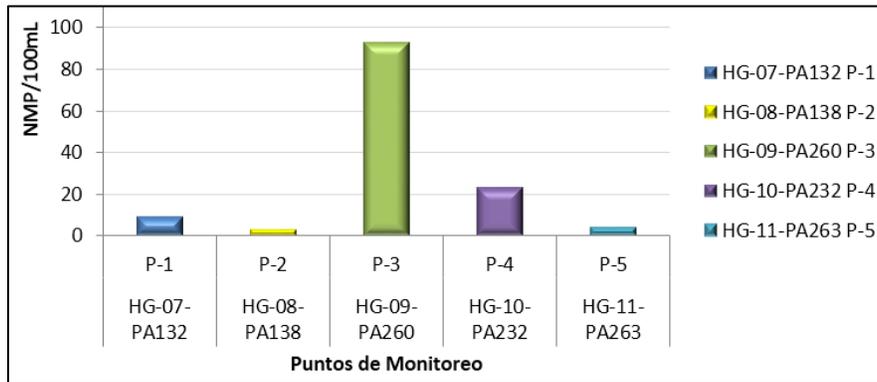
Con relación al parámetro de solidos sedimentables, no se presentan datos significativos, que permitan realizar un análisis comparativo de la información obtenida.

A nivel de la temperatura de la muestra se destaca que la velocidad de las reacciones químicas y bioquímicas se incrementa considerablemente con el aumento de la temperatura, en particular con la solubilidad del oxígeno.

En el análisis de Temperatura se registra un valor uniforme para los diferentes sectores monitoreados, con un promedio de 26°C. Estos valores se analizaron y se compararon con la norma (Decreto 1594 de 1984), la cual solo registra valores asimilables en la parte de fauna y flora que pacta un valor menor a 40°C.

En materia de caracterización microbiológica, se analizó el parámetro de coliformes fecales, obteniéndose resultados que oscilan entre [$<3 - 93$ NMP/100mL], teniendo como nivel permisible para la preservación de la flora y la fauna una concentración de [2000 NMP/100mL], lo que permite inferir, que todos los resultados obtenidos cumplen con lo señalado en el marco normativo referenciado. **Figura 5 -24.**

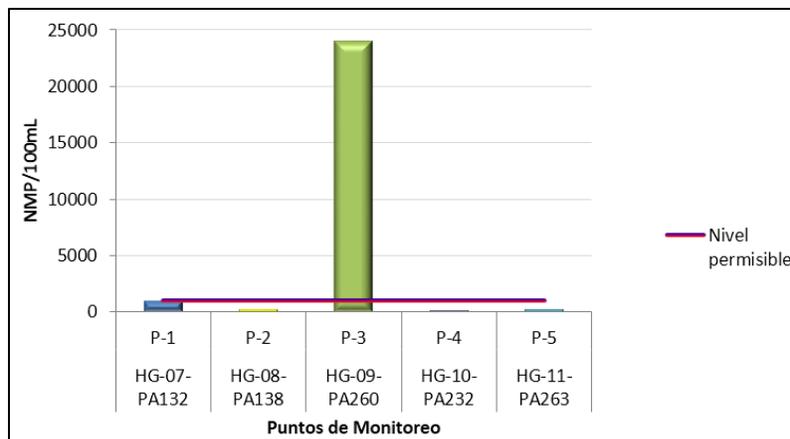
Figura 5-24. Análisis comparativo de Coliformes Fecales - Túnel La Paz – Manantiales.



Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

A nivel de Coliformes Totales las muestras tomadas, reflejan un intervalo de valores entre 150 a 24000 NMP/100 mL observándose los valores más altos en el punto P-3, el cual posiblemente puede estar expuesto a actividades agropecuarias, que contribuyen a que se presenten estos valores tan significativos. **Figura 5 -25.**

Figura 5-25. Análisis comparativo de Coliformes Totales - Túnel La Paz – Manantiales.



Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

Los niveles permisibles, están determinados por un concentración de [1000 NMP/100 mL] para valores admisibles para el consumo humano. A continuación, en la **Tabla 5-7** se describen los resultados obtenidos para los piezómetros registrados en el área de influencia del Túnel La Paz:

Tabla 5-10. Resultados registrados en los piezómetros localizados en el área de influencia del Túnel la Paz

| ANÁLISIS | IDENTIFICACIÓN DE LA(S) MUESTRA(S) | UNIDADES | MÉTODO DE ANÁLISIS | DECRETO 1594 DE 1984 (2) |
|-------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| | P-6 | | | |
| Acidez | <6* | mg CaCO ₃ /L | S.M. 2310 B | * |
| Alcalinidad total | 16,8 | mg CaCO ₃ /L | S.M. 2320 B | * |
| Arsénico | <0,008* | mg As/L | S.M. 3114 B | 0,05 |
| Bario | <0,15* | mg Ba/L | S.M. 3111 D | 1,0 |
| Cadmio Disuelto | <0,035* | mg Cd/L | S.M. 3111 B | 0,01 |
| Coliformes Fecales | 9 | NMP/100mL | S.M. 9223 B | 2.000 microorganismos /100 ml. |
| Coliformes totales | 11000 | NMP/100mL | S.M. 9223 B | 2.000 microorganismos /100 ml. |
| Cobre Disuelto | <0,034* | mg Cu/L | S.M. 3111 B | * |
| Color Real | 38,0 | UC | S.M. 2120 C | 20 |
| Cromo Disuelto | <0,05* | mg Cr/L | S.M. 3111 B | 0,05 |
| Conductividad eléctrica | 86,4 | µS/cm | S.M. 2510 B | * |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno | 42,7 | mg O ₂ /L | S.M. 5210 B; S.M. 4500-O G | * |
| Demanda Química de Oxígeno | 79,2 | mg O ₂ /L | S.M. 5220 C | * |
| Dureza Cálrica | 11,2 | mg CaCO ₃ / L | S.M. 3500-Ca B | * |
| Dureza total | 18,4 | mg CaCO ₃ / L | S.M. 2340 C | * |
| Fenoles Totales | <0,06* | mg Fenol/L | S.M. 5530 B; S.M. 5530 D | 0,002 |
| Fosforo Total | 0,137 | mg P/L | S.M. 4500-P E | * |
| Grasas y Aceites | <3,0* | mg/L | S.M. 5520-B | No Presencia Visible |
| Níquel | <0,085* | mg Ni/L | S.M. 3111 B | 0,2 |
| Nitrógeno Total Kjeldahl | 1,6 | mg N/L | S.M. 4500-N C | * |
| Oxígeno Disuelto | 2,2 | mg O ₂ /L | S.M. 4500-O G | * |
| pH | 5,89 | Und. pH | S.M. 4500-H+ B | 4,5 - 9,0 |
| Plata Disuelta | <0,03* | mg Ag/L | S.M. 3111 B | 0,05 |

| ANÁLISIS | IDENTIFICACIÓN DE LA(S) MUESTRA(S) | UNIDADES | MÉTODO DE ANÁLISIS | DECRETO 1594 DE 1984 (2) |
|-----------------------------|---------------------------------------|----------|-----------------------|-----------------------------|
| | P-6 | | | |
| Plomo Disuelto | <0,15* | mg Pb/L | S.M. 3111 B | 0,05 |
| Selenio | <0,008* | mg Se/L | S.M. 3114 B | 0,01 |
| Sólidos Disueltos Totales | 97,0 | mg/L | S.M. 2540 C | * |
| Sólidos Sedimentables | 1,0 | mL/L | S.M. 2540 F | * |
| Sólidos Suspendidos Totales | 360 | mg/L | S.M. 2540 D | * |
| Temperatura de la Muestra | 26,1 | °C | S.M. 2550 | * |
| Turbiedad | 67,8 | NTU | S.M. 2130.B | 190 |
| Zinc | <0,013* | mg Zn/L | S.M.3111 B | 2 |

Fuente: PSL PROANALISIS LTDA. 2016

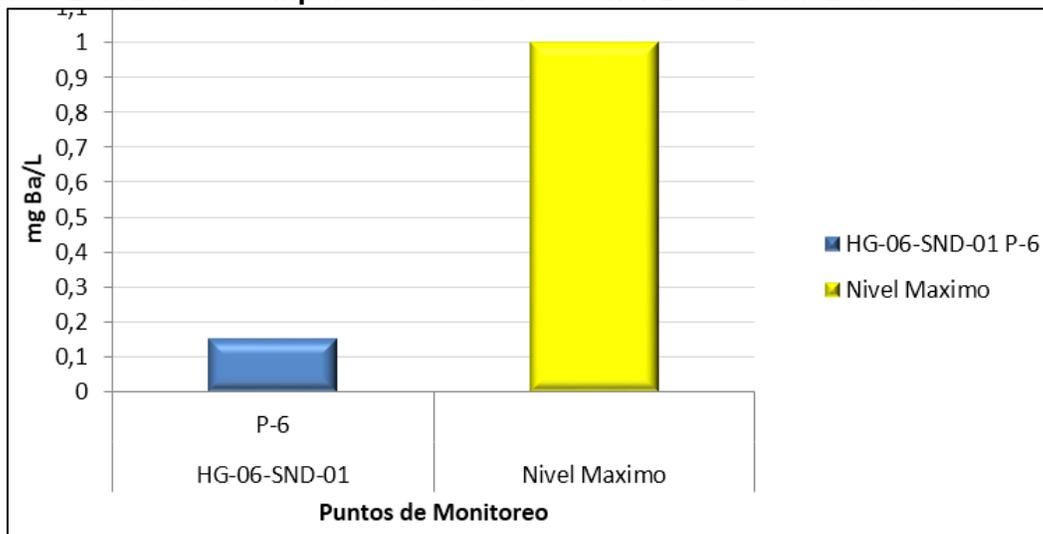
Con respecto al análisis de la matriz aguas subterráneas, se realizó la toma de muestras y el análisis respectivo, al piezómetro identificado como P-6 (HG-06-SND-01), tal como se relaciona en la **Tabla 5-3 Puntos de muestreo para el sector del túnel La Paz.**

Para destacar en el análisis de las aguas subterráneas, a diferencia de los manantiales evaluados, en esta matriz se tuvo en cuenta incluir para el análisis parámetros como metales y metaloides.

Para el parámetro arsénico, se obtuvieron resultados inferiores a 0,008 mg As/L, resultando concentraciones inferiores a los niveles establecidos en el Decreto 1594 de 1984, en donde se determinan niveles máximos permisibles de 0,05 mg As/L.

Para el caso del metal Bario, se registró un valor menor a 0,15 mg Ba/L, lo que permite analizar que este resultado se encuentra en un nivel aceptable, de acuerdo a las concentraciones máximas permisibles para este parámetro, estipulados en 1,0 mg Ba/L.
Figura 5 -26.

Figura 5-26. Análisis comparativo del Bario - Túnel La Paz – Piezómetros.



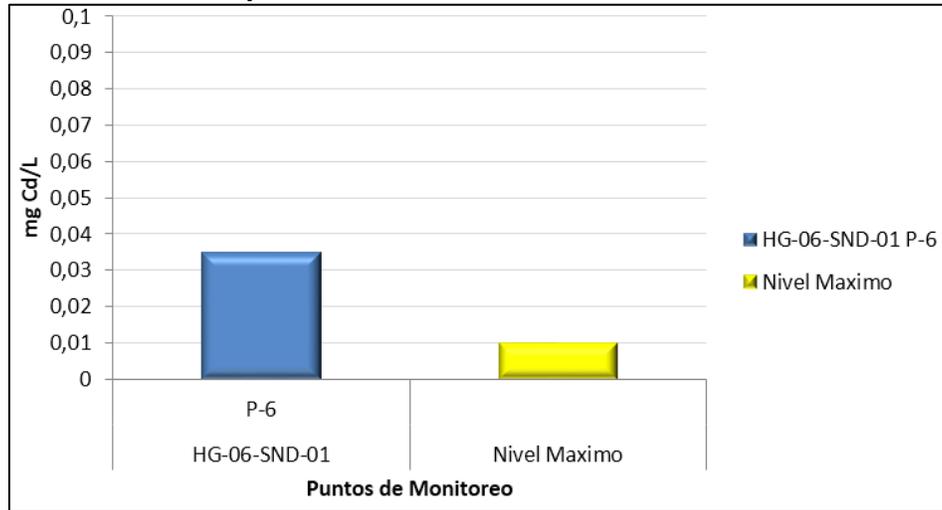
Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

Con referencia a la concentración reportada para el parámetro de Cadmio Disuelto (Cd), se registró un valor de < 0,035 mg Cd/L, superando los niveles máximos establecidos para este metal, fijados en 0,01 mg Cd/L por el Decreto 1594 de 10984, esta situación debe ser analizada y comparada con otros muestreos posteriores para determinar su trazabilidad. **Figura 5 -27.**

Sobre la concentración obtenida para el Cobre disuelto, se registró valores aceptables como < 0,034 mg Cu/L, el cual se ubica por debajo del nivel permisible establecido para este parámetro [1,0 mg Cu/L] señalado por la norma.

Esta misma situación, se presenta para el valor reflejado para el Cromo Disuelto (Cr), en donde se obtuvo una concentración menor a 0,05 mg Cr/L, encontrándose inferior a lo requerido por la norma a 0,05 mg Cr/L.

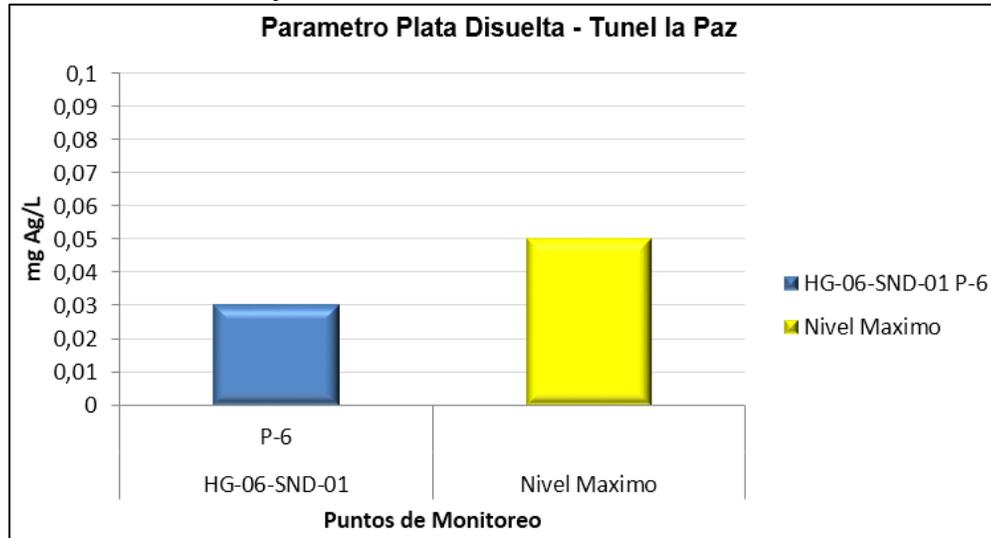
Figura 5-27. Análisis comparativo del Cadmio Disuelto Túnel La Paz – Piezómetros.



Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

Continuando con el análisis de los metales y metaloides, se reporta un valor para la Plata Disuelta inferior <0,03 mg Ag/L, para el piezómetro analizado, evidenciándose por debajo del nivel permitido de 0,05 mg Ag/L. **Figura 5 -28.**

Figura 5-28. Análisis comparativo de la Plata Disuelta Túnel La Paz – Piezómetros.

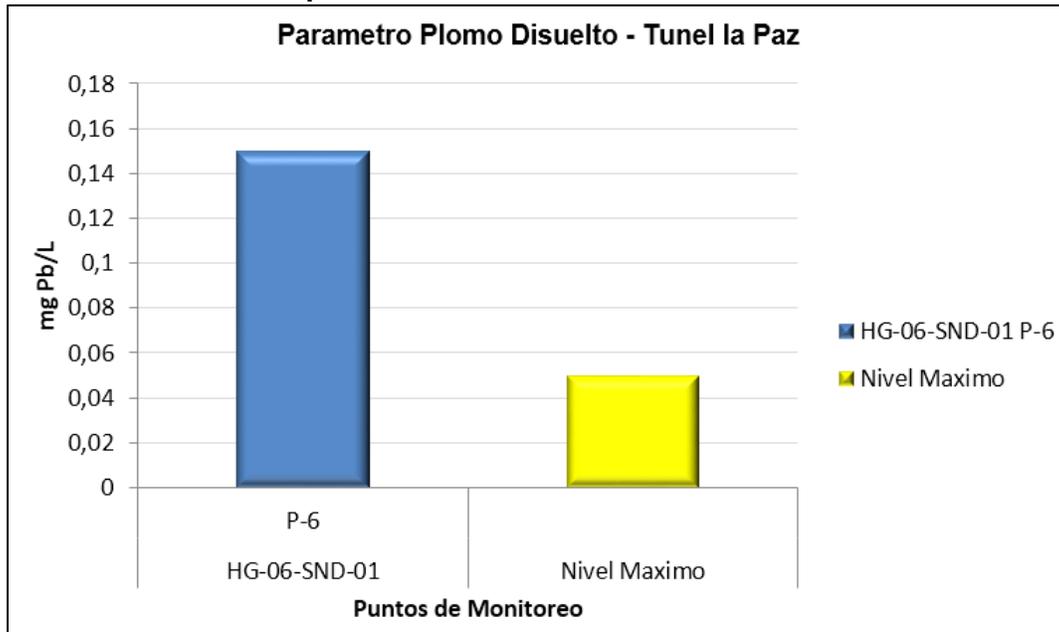


Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

Sobre la concentración reportada para el plomo disuelto, se determina que se encuentra por encima de los límites permitidos, a partir de una concentración establecida en < 0,15 mg Pb/L, si se compara con la norma que señala un nivel máximo permisible para el ser humano en 0,05 mg Pb/L. **Figura 5 -29.**

Es importante resaltar que si el plomo hace contacto con aguas salinas, se pueden llegar a formar sales insolubles (sulfatos, carbonatos principalmente).

Figura 5-29. Análisis comparativo de la Plomo Disuelto Túnel La Paz – Piezómetros.



Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

Sobre la concentración reportada para el Selenio (Se), se registró un valor menor de 0,008 mg Se/L, lo que permite deducir que se encuentra en un nivel aceptable, por encontrarse por debajo del límite máximo admisible, estipulado por la norma en 0,01 mg Se/L.

Por ultimo en materia de caracterización química de los metales y metaloides analizados, se encuentra el Zinc, parámetro que reportó un resultado de < 0,013 mg Zn/L, infiriéndose en una concentración aceptable, si se analiza con la norma, la cual fija un nivel máximo de 2 mg Zn/L.

5.1.8.4.1.2.1 Caracterización Hidrogeoquímica Túnel La Sorda UF-7.

A fin de dar cumplimiento al Ítem de pruebas de calidad de aguas, se realizó en el Unidad Funcional 7, Túnel la Sorda, la toma de muestras y su respectivo análisis de laboratorio, a los puntos de monitoreo descritos en la **Tabla 5-4**.

Estableciéndose dos (2) puntos de monitoreo en manantiales y tres (3) piezómetros – aguas subterráneas, en el área de influencia del Túnel la Sorda.

Para iniciar, se relacionan las concentraciones obtenidas para la matriz aguas superficial – manantiales. A continuación se muestra en la **Tabla 5-8**.

Tabla 5-11. Resultados de los análisis de agua realizados en los manantiales del túnel la Sorda, Unidad Funcional 7.

| ANÁLISIS | IDENTIFICACIÓN DE LA(S) MUESTRA(S) | | UNIDADES | MÉTODO DE ANÁLISIS | DECRETO 1594 DE 1984 (2) |
|-------------------------------|------------------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| | S-1 | S-2 | | | |
| Acidez | <6 ⁺ | <6 ⁺ | mg CaCO ₃ /L | S.M. 2310 B | * |
| Alcalinidad total | 18,3 | 3,6 | mg CaCO ₃ /L | S.M. 2320 B | * |
| Coliformes Fecales | 43 | 43 | NMP/100mL | S.M. 9223 B | 2.000 microorganismos /100 ml. |
| Coliformes totales | >24000 | 1100 | NMP/100mL | S.M. 9223 B | 2.000 microorganismos /100 ml. |
| Color Real | 9,0 | <5 ⁺ | UC | S.M. 2120 C | 20 |
| Conductividad eléctrica | 368 | 23,2 | µS/cm | S.M. 2510 B | * |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno | 6,4 | <1,1 ⁺ | mg O ₂ /L | S.M. 5210 B; S.M. 4500-O G | * |
| Demanda Química de Oxígeno | 12,0 | <10,3 ⁺ | mg O ₂ /L | S.M. 5220 C | * |
| Dureza Cálctica | 116 | <3,0 ⁺ | mg CaCO ₃ / L | S.M. 3500-Ca B | * |
| Dureza total | 132 | <4,4 ⁺ | mg CaCO ₃ / L | S.M. 2340 C | * |
| Fosforo Total | 0,083 | <0,05 ⁺ | mg P/L | S.M. 4500-P E | * |
| Grasas y Aceites | <3,0 ⁺ | <3,0 ⁺ | mg/L | S.M. 5520-B | No Presencia Visible |
| Nitrógeno Total Kjeldahl | 2,2 | 1,2 | mg N/L | S.M. 4500-N C | * |
| Oxígeno Disuelto | 6,52 | 5,68 | mg O ₂ /L | S.M. 4500-O G | * |
| pH | 6,83 | 5,11 | Und. pH | S.M. 4500-H+ B | 4,5 - 9,0 |

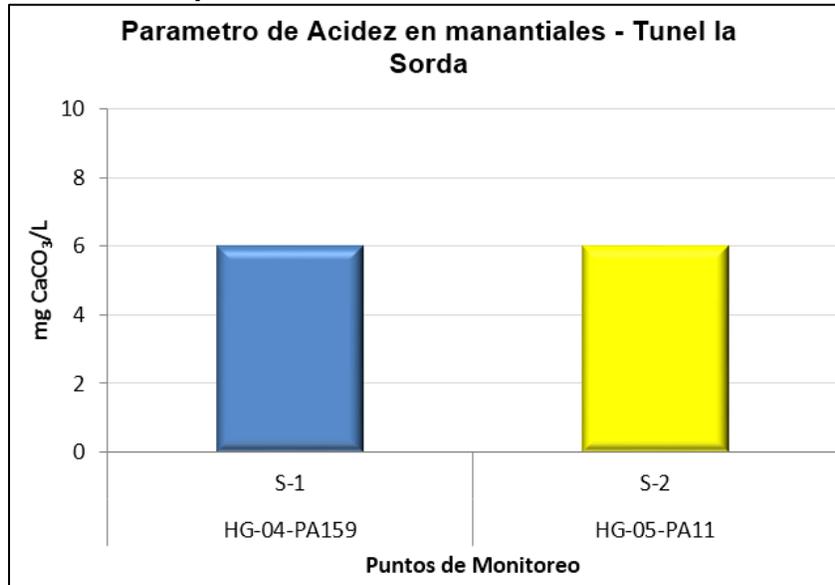
| ANÁLISIS | IDENTIFICACIÓN DE LA(S) MUESTRA(S) | | UNIDADES | MÉTODO DE ANÁLISIS | DECRETO 1594 DE 1984 (2) |
|-----------------------------|------------------------------------|-------------------|----------|--------------------|--------------------------|
| | S-1 | S-2 | | | |
| Sólidos Disueltos Totales | 286 | 17,0 | mg/L | S.M. 2540 C | * |
| Sólidos Sedimentables | <0,1 ⁺ | <0,1 ⁺ | mL/L | S.M. 2540 F | * |
| Sólidos Suspendidos Totales | 185 | <5,5 ⁺ | mg/L | S.M. 2540 D | * |
| Temperatura de la Muestra | 26,3 | 26,2 | °C | S.M. 2550 | * |
| Turbiedad | 3,9 | <1,8 ⁺ | NTU | S.M. 2130.B | 190 |

Fuente: PSL PROANALISIS LTDA. 2016

En materia de análisis comparativo de la acidez total, se registraron valores por debajo de 6 mg CaCO₃/L, para cada uno los puntos de monitoreo - manantiales analizados. **Figura 5 -30.**

En términos de alcalinidad total, se registraron resultados entre el rango de [3,6 – 18,3 mg CaCO₃/L], destacándose que en el punto S-2 (HG-05-PA11) se evidencia con el resultado más bajo y en el punto S-1 (HG-04-PA159) se registra las concentración más alta reportada.

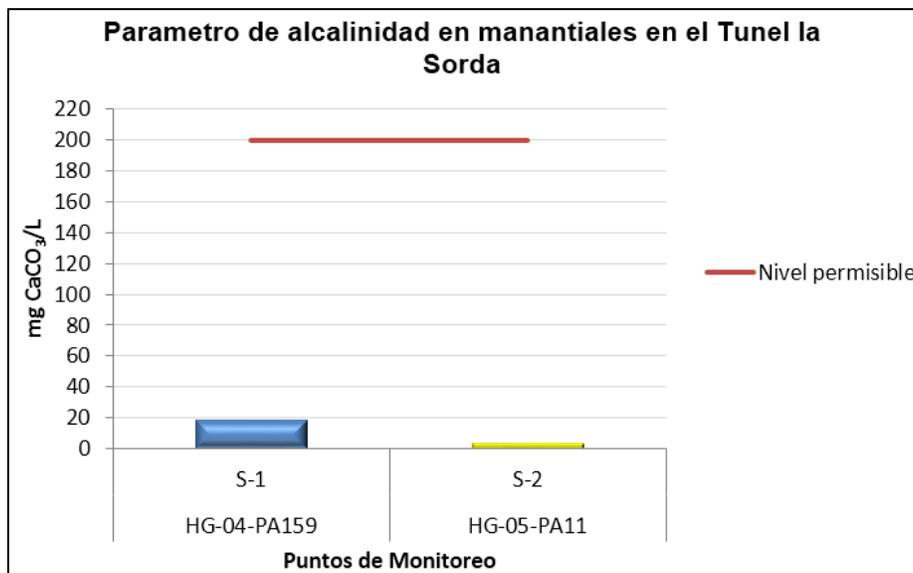
Figura 5-30. Análisis comparativo de la Acidez Total – Túnel La Sorda Manantiales.



Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

De acuerdo a los valores reportados para la alcalinidad total, se realizó un análisis comparativo con respecto a la Resolución 2115 de 2007, en la cual se establecen rangos de alcalinidad de 200 mg/l de CaCO₃, lo que permite deducir que todos los resultados cumplen con la norma para consumo humano. **Figura 5 -31.**

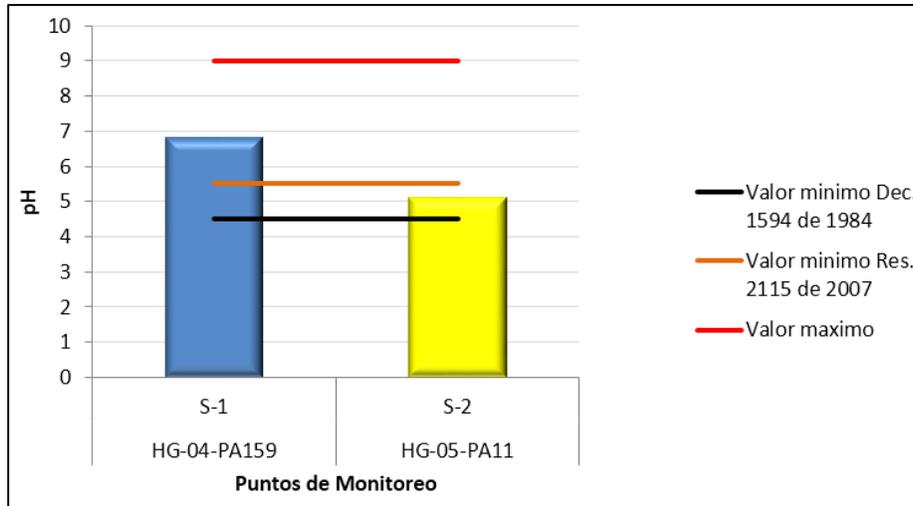
Figura 5-31. Análisis comparativo de la Alcalinidad Total – Túnel La Sorda Manantiales.



Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

Para el parámetro de pH, los valores registrados están dados de la siguiente manera, para el punto S-1 [6,83 pH] y para S-2 [5,11 pH], lo que permite deducir, que el resultado reportado en el Punto S-2, se encuentra por fuera del intervalo permitido para el consumo humano. **Figura 5 -32.**

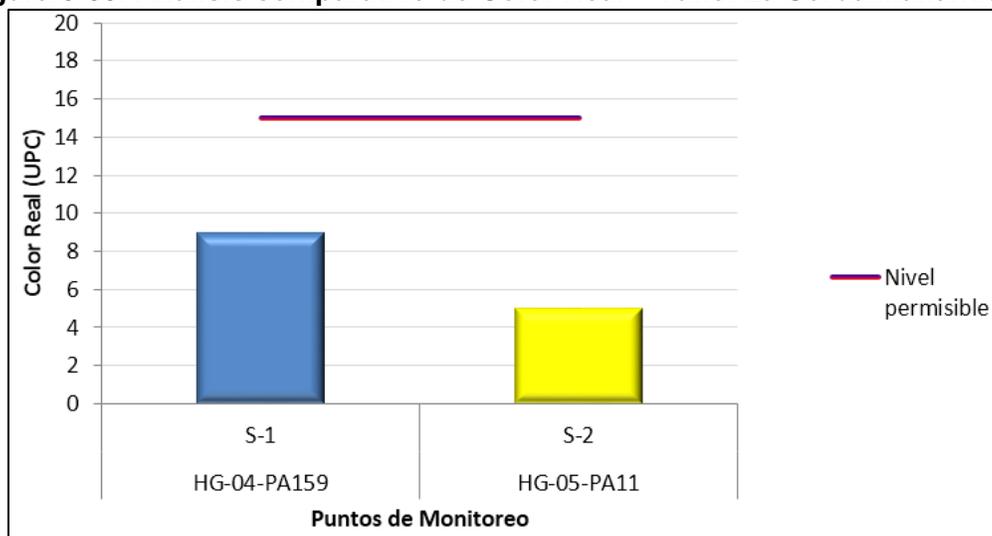
Figura 5-32. Análisis comparativo de Potencial de Hidrogeno pH – Túnel La Sorda Manantiales.



Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

Para el Color Real, se obtuvieron valores entre < 5 – 9 UPC, lo que permite establecer un análisis comparativo con la normatividad ambiental vigente, determinado por su cumplimiento dentro del nivel permisible establecido por la norma. **Figura 5 -33.**

Figura 5-33. Análisis comparativo de Color Real – Túnel La Sorda Manantiales.

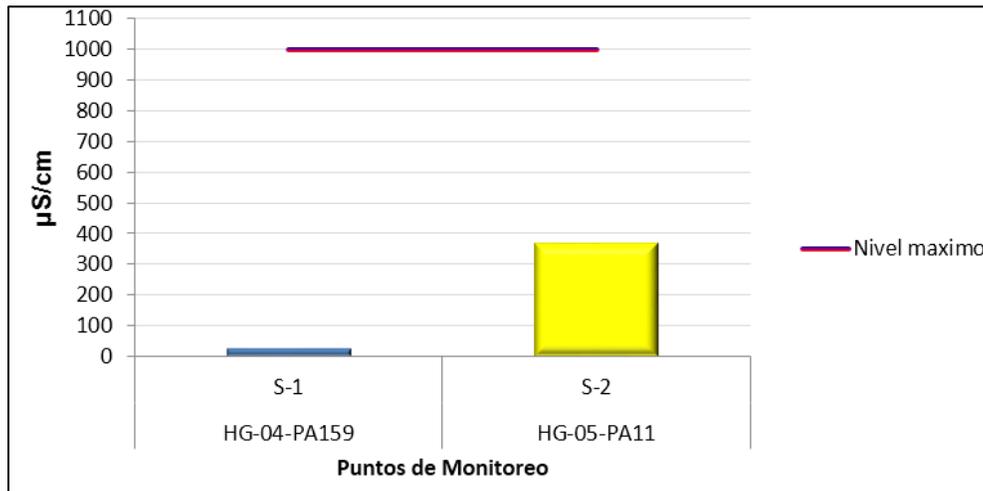


Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016.

El análisis comparativo de la conductividad eléctrica registra valores que oscilan entre [23,2 – 368 $\mu\text{S}/\text{cm}$] en los manantiales evaluados en el área de influencia del Túnel La Sorda.

Con relación a la Resolución 2115 de 2007, en donde se establece un nivel máximo de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, para el consumo humano, se determina que todos los resultados reportados se encuentran dentro del rango permitido por dicha normatividad. **Figura 5 -34.**

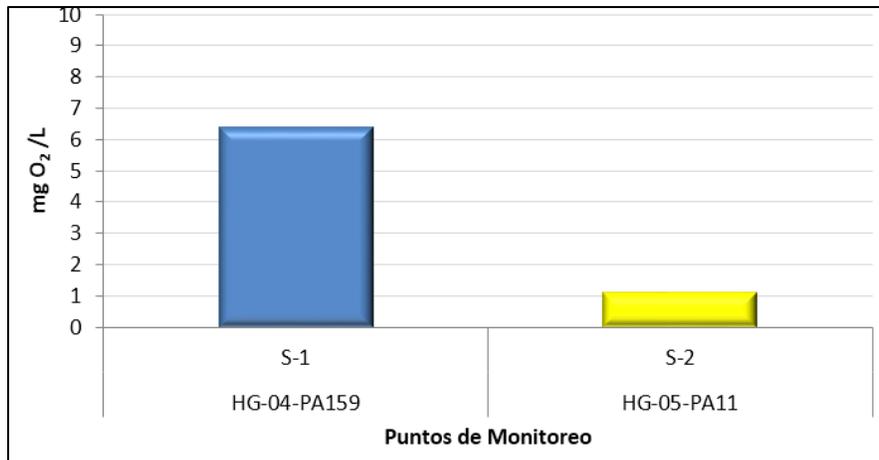
Figura 5-34. Análisis comparativo de Conductividad Eléctrica – Túnel La Sorda Manantiales.



Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

Sobre la DBO_5 , para este parámetro se obtuvieron resultados establecidos entre el rango de [$< 1,1 - 6,5 \text{ mg O}_2 / \text{L}$], obteniéndose el valor más alto en el punto S-1 (HG-04-PA159). **Figura 5 -35.**

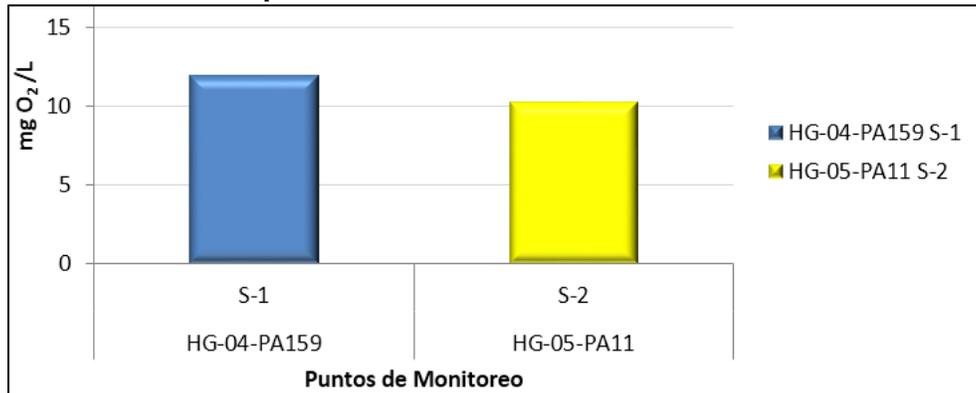
Figura 5-35. Análisis comparativo de Demanda Bioquímica de Oxígeno– Túnel La Sorda Manantiales.



Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

El análisis comparativo del parámetro DQO, sobre las muestras tomadas y analizadas, se refleja un rango de concentraciones de [$<10,3 - 12 \text{ mg O}_2/\text{L}$]. Ver **Figura 5 -36**.

Figura 5-36. Análisis comparativo de DQO – Túnel La Sorda Manantiales.

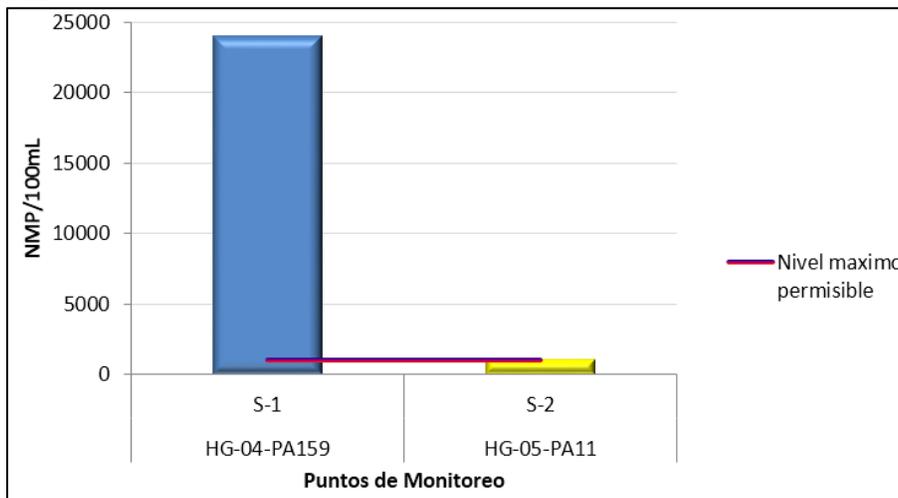


Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

En términos de caracterización microbiológica, se analizó el parámetro de coliformes fecales, obteniéndose resultados homogéneos para ambas muestras [$43 \text{ NMP}/100\text{mL}$], teniendo como nivel permisible para la preservación de la flora y la fauna una concentración de [$2000 \text{ NMP}/100\text{mL}$], lo que permite inferir, que todos los resultados obtenidos cumplen con lo señalado en el marco normativo referenciado

A nivel de Coliformes Totales las muestras tomadas, reflejan un intervalo de valores entre 1100 a $< 24000 \text{ NMP}/100 \text{ mL}$, observándose los valores más altos en el punto S-1, el cual posiblemente puede estar expuesto a actividades agropecuarias, que contribuyen a que se presenten estos valores tan significativos. **Figura 5 -37**.

Figura 5-37. Análisis comparativo de Coliformes Totales – Túnel La Sorda Manantiales.



Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016.

Los niveles permisibles, están determinados por un concentración de [1000 NMP/100 mL] para valores admisibles para el consumo humano.

A continuación, en la **Tabla 5-12** se describen los resultados obtenidos para los piezómetros registrados en el área de influencia del Túnel la Sorda:

Con relación al análisis de la matriz aguas subterráneas, se realizó la toma de muestras y el análisis respectivo, de los piezómetros localizados en el área de influencia de la Unidad Funcional7, Túnel la Sorda, identificados como S-3 (HG-03-TLS-S3), S-4 (HG-02-TLS-S4), y S-5 (HG-01-TLS-S5), tal como se relaciona en la **Tabla 5-12**.

Para el análisis de las aguas subterráneas, a diferencia de los manantiales evaluados, en esta matriz se tuvo en cuenta la inclusión de parámetros como metales y metaloides.

Para el caso del Arsénico, se obtuvieron resultados inferiores a 0,008 mg As/L, resultando concentraciones inferiores a los niveles establecidos en el Decreto 1594 de 1984, en donde se determinan niveles máximos permisibles de 0,05 mg As/L.

Con respecto al Bario, se registró un valor menor a 0,15 mg Ba/L, lo que permite analizar que este resultado se encuentra en un nivel aceptable, de acuerdo a las concentraciones máximas permisibles para este parámetro, estipulados en 1,0 mg Ba/L.

Tabla 5-12. Resultados de los análisis de agua realizados en los sondeos del túnel La Sorda, Unidad Funcional 7.

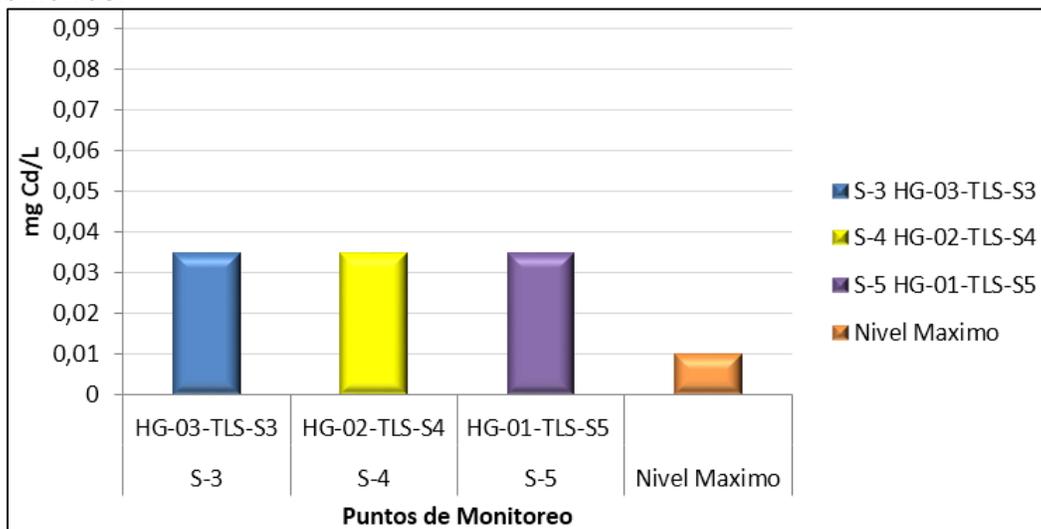
| ANÁLISIS | IDENTIFICACIÓN DE LA(S) MUESTRA(S) | | | UNIDADES | MÉTODO DE ANÁLISIS | DECRETO 1594 DE 1984 (2) |
|-------------------------------|---------------------------------------|---------|---------|--------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|
| | S-3 | S-4 | S-5 | | | |
| Acidez | <6* | <6* | <6* | mg CaCO ₃ /L | S.M. 2310 B | * |
| Alcalinidad total | 235 | 42,6 | 405 | mg CaCO ₃ /L | S.M. 2320 B | * |
| Arsénico | <0,008* | <0,008* | <0,008* | mg As/L | S.M. 3114 B | 0,05 |
| Bario | <0,15* | <0,15* | <0,15* | mg Ba/L | S.M. 3111 D | 1,0 |
| Cadmio Disuelto | <0,035* | <0,035* | <0,035* | mg Cd/L | S.M. 3111 B | 0,01 |
| Coliformes Fecales | 2300 | 93 | 150 | NMP/100mL | S.M. 9223 B | 2,000 microorganismos /100 ml. |
| Coliformes totales | >240000 | >24000 | >24000 | NMP/100mL | S.M. 9223 B | 2,000 microorganismos /100 ml. |
| Cobre Disuelto | 0,039 | <0,034* | <0,034* | mg Cu/L | S.M. 3111 B | * |
| Color Real | 797 | <5* | 6,4 | UC | S.M. 2120 C | 20 |
| Cromo Disuelto | <0,05* | <0,05* | <0,05* | mg Cr/L | S.M. 3111 B | 0,05 |
| Conductividad eléctrica | 756 | 104 | 1069 | μS/cm | S.M. 2510 B | * |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno | 190 | 39,7 | 68,8 | mg O ₂ /L | S.M. 5210 B; S.M. 4500-O G | * |
| Demanda Química de Oxígeno | 330 | 73,4 | 121 | mg O ₂ /L | S.M. 5220 C | * |
| Dureza Cálrica | 118 | 47,9 | 336 | mg CaCO ₃ / L | S.M. 3500-Ca B | * |
| Dureza total | 127 | 52,5 | 528 | mg CaCO ₃ / L | S.M. 2340 C | * |

| ANÁLISIS | IDENTIFICACIÓN DE LA(S) MUESTRA(S) | | | UNIDADES | MÉTODO DE ANÁLISIS | DECRETO 1594 DE 1984 (2) |
|-----------------------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | S-3 | S-4 | S-5 | | | |
| Fenoles Totales | <0,06 ⁺ | <0,06 ⁺ | <0,06 ⁺ | mg Fenol/L | S.M. 5530 B; S.M. 5530 D | 0,002 |
| Fosforo Total | 0,208 | 0,082 | <0,05 ⁺ | mg P/L | S.M. 4500-P E | * |
| Grasas y Aceites | 40,8 | 3,0 | <3,0 ⁺ | mg/L | S.M. 5520-B | No Presencia Visible |
| Níquel | <0,085 ⁺ | <0,085 ⁺ | <0,085 ⁺ | mg Ni/L | S.M. 3111 B | 0,2 |
| Nitrógeno Total Kjeldahl | 3,1 | 2,0 | 1,9 | mg N/L | S.M 4500-N C | * |
| Oxígeno Disuelto | 0,5 | 3,9 | 2,06 | mg O ₂ /L | S.M. 4500-O G | * |
| pH | 6,80 | 6,62 | 7,16 | Und. pH | S.M. 4500-H+ B | 4,5 - 9,0 |
| Plata Disuelta | <0,03 ⁺ | <0,03 ⁺ | <0,03 ⁺ | mg Ag/L | S.M. 3111 B | 0,05 |
| Plomo Disuelto | <0,15 ⁺ | <0,15 ⁺ | <0,15 ⁺ | mg Pb/L | S.M. 3111 B | 0,05 |
| Selenio | <0,008 ⁺ | <0,008 ⁺ | <0,008 ⁺ | mg Se/L | S.M. 3114 B | 0,01 |
| Sólidos Disueltos Totales | 390 | 64,3 | 558 | mg/L | S.M. 2540 C | * |
| Sólidos Sedimentables | 2,0 | 1,0 | 1,0 | mL/L | S.M. 2540 F | * |
| Sólidos Suspendidos Totales | 604 | 299 | 253 | mg/L | S.M. 2540 D | * |
| Temperatura de la Muestra | 26,2 | 26,0 | 26,4 | °C | S.M. 2550 | * |
| Turbiedad | 410 | 148 | 1284 | NTU | S.M. 2130.B | 190 |
| Zinc | <0,013 ⁺ | <0,013 ⁺ | <0,013 ⁺ | mg Zn/L | S.M.3111 B | 2 |

Fuente: PSL PROANALISIS LTDA. 2016

Para el parámetro de Cadmio Disuelto (Cd), se registró un valor de < 0,035 mg Cd/L, superando los niveles máximos establecidos para este metal, fijados en 0,01 mg Cd/L por el Decreto 1594 de 10984, esta situación debe ser analizada y comparada con otros muestreos posteriores para determinar su trazabilidad. **Figura 5 -38.**

Figura 5-38. Análisis comparativo de Cadmio Disuelto – Túnel La Sorda Piezómetros.



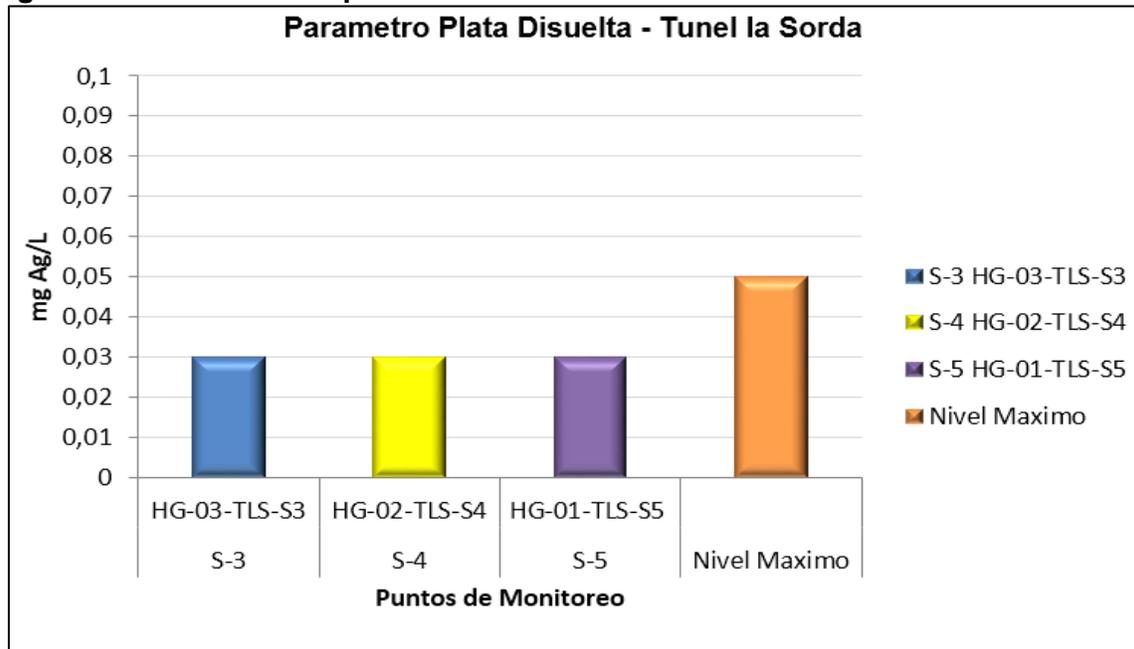
Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

La concentración obtenida para el Cobre disuelto, se registró valores aceptables como < 0,034 mg Cu/L a 0,039 mg Cu/L, los cuales se localizan por debajo del nivel máximo permisible establecido para este parámetro [1,0 mg Cu/L] señalado por la norma.

De igual manera, se da la concentración reflejada para el Cromo Disuelto (Cr), en donde se obtuvo una concentración menor a 0,05 mg Cr/L, encontrándose inferior a lo requerido por la norma a 0,05 mg Cr/L.

Continuando con el análisis de los metales y metaloides, se reporta un valor para la Plata Disuelta inferior <0,03 mg Ag/L, para el piezómetro analizado, evidenciándose por debajo del nivel permitido de 0,05 mg Ag/L. **Figura 5 -39.**

Figura 5-39. Análisis comparativo de Plata Disuelta – Túnel La Sorda Piezómetros.

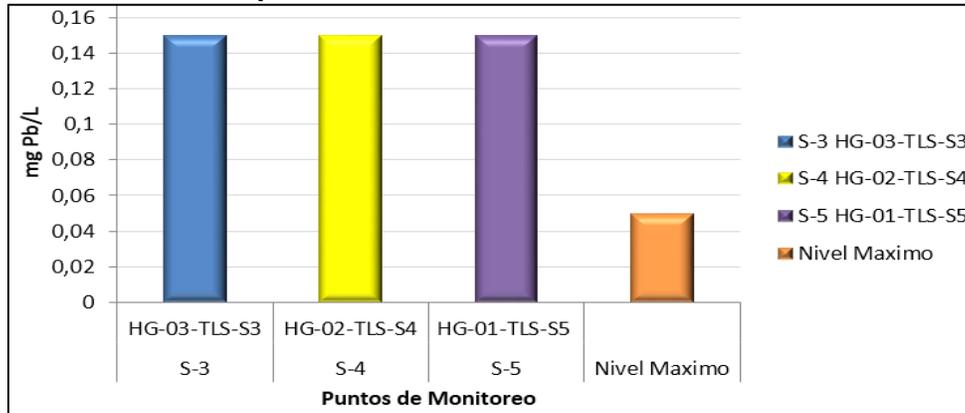


Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

Por último, en materia de análisis fisicoquímico y bacteriológico sobre la concentración reportada para el plomo disuelto, se determina que se encuentra por encima de los límites permitidos, a partir de una concentración establecida en < 0,15 mg Pb/L, si se compara con la norma que señala un nivel máximo permisible para el ser humano en 0,05 mg Pb/L. **Figura 5 -40.**

Para la concentración reportada para el Selenio (Se), se registró un valor menor de 0,008 mg Se/L, para la totalidad de la muestras analizadas, deduciendo que se encuentran en un nivel aceptable, por encontrarse por debajo del límite máximo admisible, estipulado por la norma en 0,01 mg Se/L.

Figura 5-40. Análisis comparativo de Plomo Disuelto – Túnel La Sorda Piezómetros.



Fuente: ELB Geología Y Vías. 2016

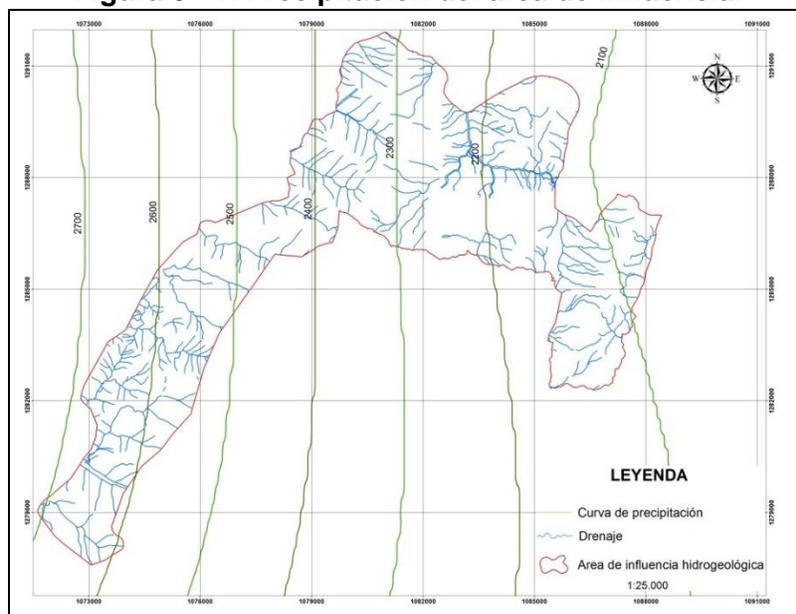
Por finalizar, la caracterización química de los metales y metaloides analizados, se encuentra el Zinc, parámetro que reportó un resultado de < 0,013 mg Zn/L para todas las muestras evaluadas, infiriéndose en una concentración aceptable, si se analiza con la norma, la cual fija un nivel máximo de 2 mg Zn/L.

5.1.1.5 Análisis de la información generada dentro del proyecto

5.1.1.5.1 Información climática

5.1.8.5.1.1 Precipitación

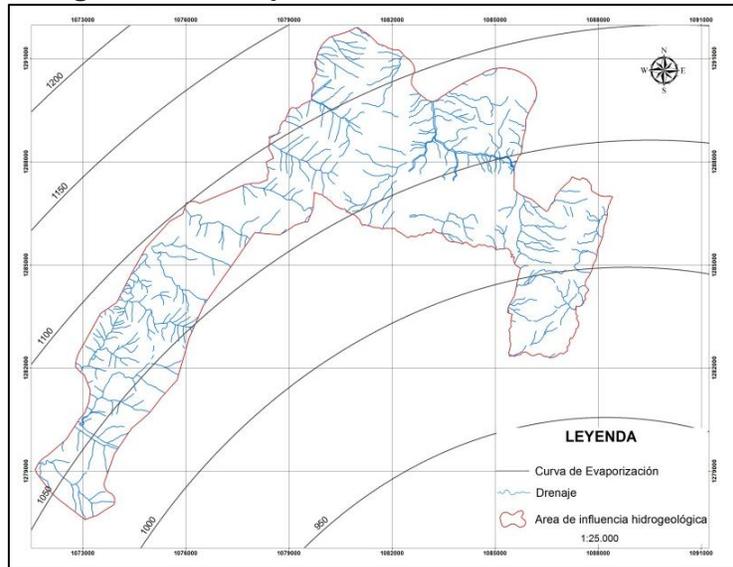
Figura 5-41. Precipitación del área de influencia.



Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

5.1.8.5.1.2 Evaporación

Figura 5-42. Evaporación del área de influencia.



Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

5.1.1.6 Modelo hidrogeológico conceptual

El modelo hidrogeológico conceptual es la representación de los elementos que controlan el comportamiento del flujo subterráneo, permitiendo proyectar diferentes escenarios frente al desarrollo y ejecución del proyecto vial en estudio. Las condiciones geológicas y fisiográficas condicionan las propiedades hidráulicas y configuración geométrica de cada uno de los elementos o unidades hidrogeológicas analizadas y descritas a continuación.

5.1.1.6.1 Unidades hidrogeológicas

Dada la presencia de rocas sedimentarias con alta variabilidad litológica y de permeabilidad, que facilitan la identificación de acuíferos, la definición de unidades hidrogeológicas tomo como premisa el tipo de litología dominante junto al espesor de los diferentes miembros o segmentos litológicos dentro de cada unidad estratigráfica. A continuación se presenta la descripción de las unidades hidrogeológicas que se esquematizan en planta y en los perfiles geológicos longitudinales de los dos túneles proyectados en orden de menor a mayor grado de productividad e importancia hidrogeológica:

- Acuífugos

Corresponde a unidades hidrogeológicas subterráneas que por sus condiciones litológicas y de permeabilidad son incapaces de absorber o transmitir agua. Su importancia radica en su potencial confinamiento para aguas subterráneas en capas infrayacentes permeables.

A nivel del área de influencia definida para este proyecto se han considerado como

unidades de Acuifugos, dado el predominio de arcillolitas y lutitas arcillosas con niveles locales de carbón, las formaciones Paja (Kip), Simití (Kis) y Umir (Ksu) del Cretáceo y niveles arcillosos potentes dentro de las formaciones terciarias Lizama (AF-Tpl2), La Paz (AF-Tel1 y AF-Tel5) y Esmeraldas (AF-Tee1 y 3).

✓ *Acuifugo o Capa impermeable confinante Formación Paja*

En primer término la Formación Paja (AF-Kip), definida litológicamente como una sucesión de shales negros micáceos, limosos, ligeramente calcáreos y con laminación fina; con un espesor de aproximadamente 400 m sobre la zona del proyecto, constituye el basamento impermeable o acuifugo a nivel regional que cubre toda el área de influencia desde el punto de vista hidrogeológico.

Se localiza sobre el extremo oriental del área de influencia del Tramo 2 (UF5, 6 y 7) constituyendo la base de un monoclinal donde controla posibles flujos de agua en areniscas y calizas de la suprayacente formación Tablazo.

✓ *Acuifugo o Capa impermeable confinante Formación Simití*

La Formación Simití (AF-Kis), está también constituida por shale gris o negro, localmente calcáreo y concrecionario. Localmente, cerca al techo de la formación, se encuentran capas delgadas de calizas concrecionarias formadas. Su espesor en la zona de influencia del proyecto se estima alrededor de los 550 m, constituyendo el sustrato confinante para las capas suprayacentes de la Formación La Luna en particular los niveles de caliza altamente fracturados y replegados.

Esta unidad por su carácter impermeable limita la ocurrencia de manantiales originados a partir de la formación Tablazo en el flanco oriental del Sinclinal de Nuevo Mundo (UF7 y UF8).

✓ *Acuifugo o Capa impermeable confinante Formación Umir*

La Formación Umir (AF-Ksu), unidad impermeable de gran espesor, consiste a nivel litológico de shales grises a negros, carbonosos, micáceos, con concreciones ferruginosas; lutitas grises a gris oscuras, carbonosas, con nódulos ferruginosos; intercalaciones de areniscas y limolitas, grises, carbonosas, micáceas y niveles importantes de carbón. La parte inferior de la formación Umir contiene shale gris azulosos a negros, con laminaciones carbonáceas y micáceas. La parte superior está compuesta por shale blando, gris oscuro a gris verdoso con unas pocas capas de areniscas duras de grano fino y mantos de carbón.

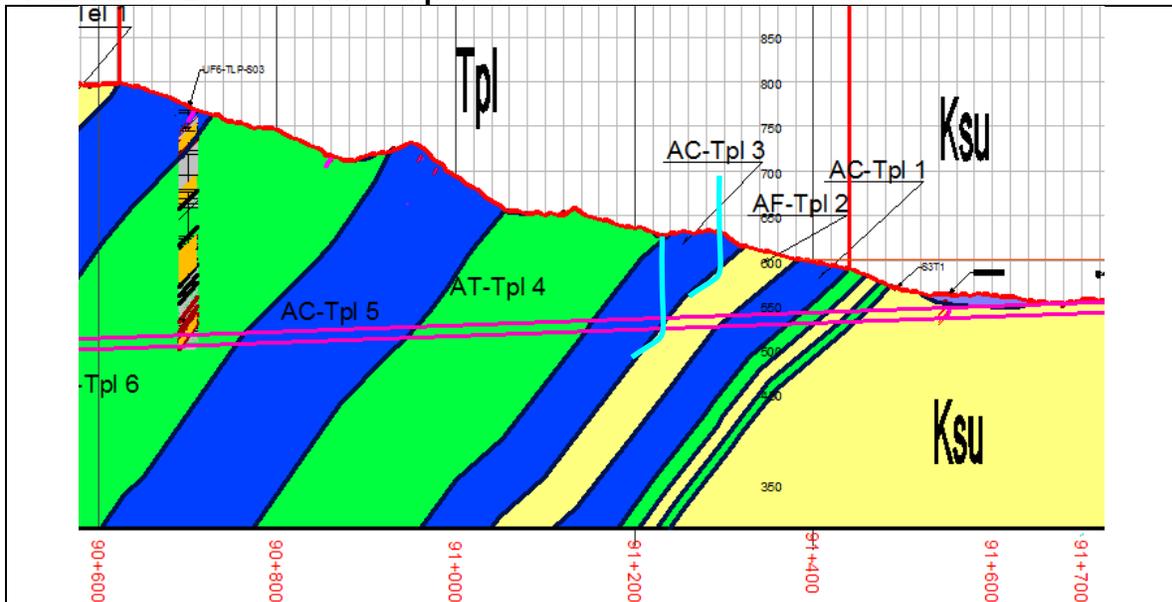
Su espesor se ha calculado entre 1000 y 1400 m para la zona de estudio; clasificándose los niveles superiores de esta unidad como Acuitardos por la presencia de niveles delgados de areniscas de grano fino. Constituye el sustrato confinante para los niveles inferiores de areniscas de la Formación Lizama y para las aguas subterráneas aferentes al proyectado túnel de La Sorda.

✓ *Acuifugo o Capa impermeable confinante Formación Lizama (AF-Tpl2)*

La Formación Lizama a nivel general consta de 1.225 m en intercalaciones de arcillolitas compactas con colores variables entre el rojo y el carmelita y de areniscas, macizas y de color gris verdoso. Las areniscas tienden a ser de grano más grueso en la parte superior.

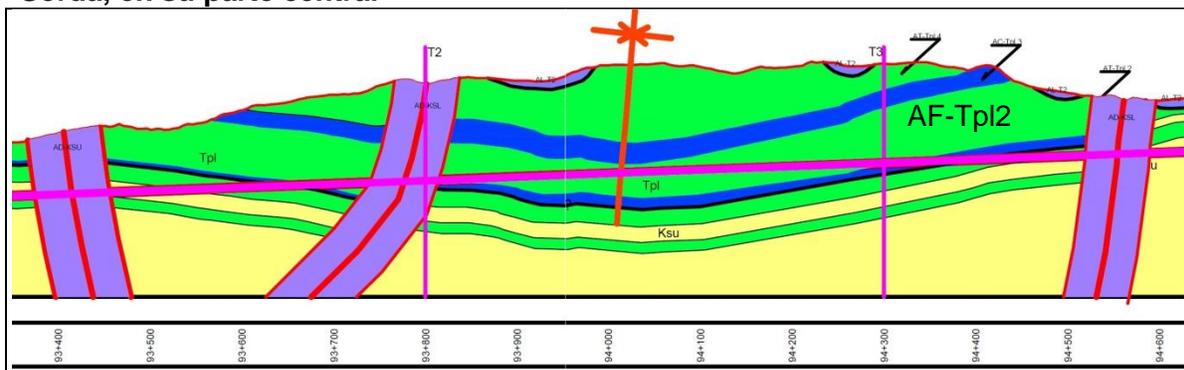
De acuerdo con las exploraciones realizadas sobre el alineamiento del túnel La Sorda, se ha identificado hacia la base de esta unidad un nivel potente de arcillolitas masivo alrededor de 50 m de espesor de colores gris rojizo a gris verdoso que suprayace un nivel basal de areniscas e infrayace un nivel superior de areniscas de grano medio. Este nivel se ha definido como la unidad hidrogeológica AF-Tpl2. **Figura 5-43 y 5-44.**

Figura 5-43. Ubicación de la unidad impermeable AF-Tpl2 sobre el alineamiento del Túnel La Paz en cercanías al portal de salida



Fuente: ELB GEOLOGÍA Y VÍAS SAS. 2016

Figura 5-44. Ubicación de la unidad impermeable AF-Tpl2 cortada por el Túnel La Sorda, en su parte central



Fuente: ELB GEOLOGÍA Y VÍAS SAS. 2016

Por su ubicación en la parte central del Túnel La Sorda, es de gran importancia como capa confinante inferior del nivel de areniscas de la misma formación denominado Acuífero Confinado AC-Tp13.

✓ *Acuífugos o Capas impermeables confinantes Formación La Paz (AF-Tel1 y Tel 5)*

La Formación La Paz se compone de areniscas grises conglomeráticas, macizas y de conglomerados con intercalaciones de grandes paquetes de arcillas grises estas últimas constituyen los niveles de Acuífugos o capas impermeables confinantes.

El miembro basal Toro consta de unas arcillas duras de color crema a rosado, de 30 m de espesor; es considerado en varios campos petrolíferos como un horizonte clave por su continuidad, denominado en este estudio como AF-Tel1.

El citado miembro Toro (AF-Tel1), se proyecta que será cortado por el Túnel de La Paz en forma perpendicular y con fuerte buzamiento (45 a 50°) entre el K90+200 al K90+300 en una longitud aproximada de 60 m.

De otra parte hacia el centro de la formación y de acuerdo a los reconocimientos de campo y al perfil topográfico se identifican dos niveles potentes de arcillolitas (>100 m) con un nivel delgado de areniscas intermedias denominado AF-Tel 5 con un espesor global mayor a los 300 m y que de acuerdo a las proyecciones estructurales será cortado alrededor del K88+900 al K89+300 con el buzamiento de las capas mayor a los 52°, constituyéndose en los niveles confinantes más importantes dentro de la formación.
Figura 5-45.

✓ *Acuífugos o Capas impermeables confinantes Formación Esmeraldas (AF-Tee1 y Tee 3)*

La Formación Esmeraldas presenta un espesor aproximado de 1.300 m disminuyendo hacia el oeste a 175 m. Está compuesta por arcillas grises con manchas rojas y carmelitas con intercalaciones de areniscas finas grises y verdosas.

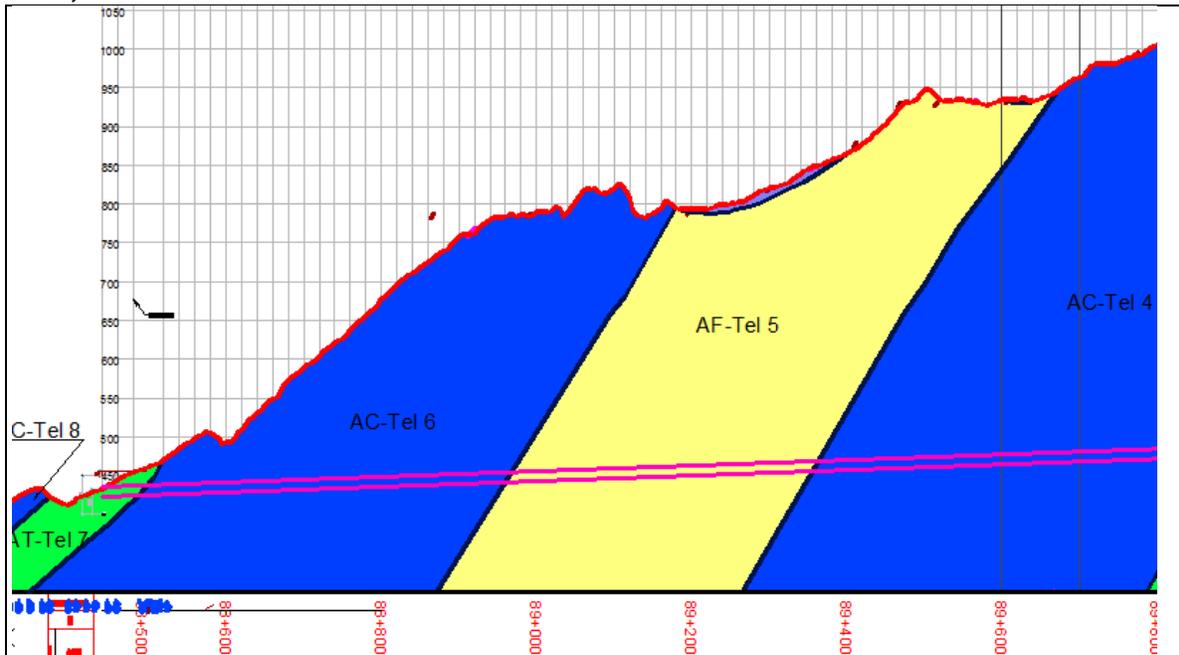
Dado su carácter mayoritariamente arcilloso e impermeable dominan sobre esta unidad capas impermeables de Acuífugos hacia la base y centro de la unidad. Estos Acuífugos han sido denominados AF-Tee1 y AF-Tee3; el primero constituye la base de la formación y la capa confinante superior de los acuíferos de la Formación La Paz con un espesor inferido de 120 m; el segundo más espeso constituye la parte central de la unidad y posee un espesor inferido mayor a los 200 m. **Figura 5-46.**

- Acuitardos

Corresponde a unidades hidrogeológicas subterráneas semiconfinantes que por sus condiciones litológicas y de permeabilidad contienen cierto volumen de agua pero lo transmiten muy lentamente o en menor proporción que los acuíferos, si bien su utilidad como fuente de aguas subterráneas no es muy alta, bajo condiciones geológicas y geomorfológicas particulares pueden constituir zonas de recarga importante para

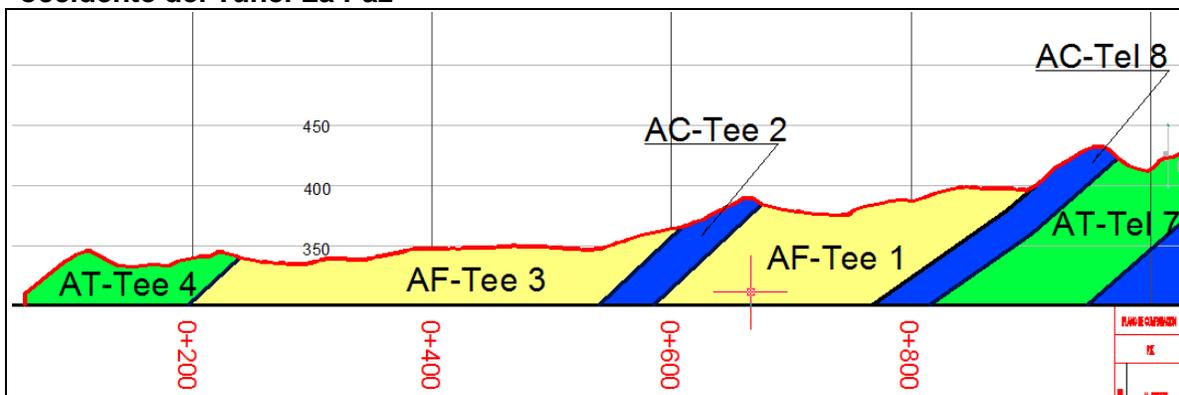
acuíferos infrayacentes.

Figura 5-45. Ubicación de la unidad impermeable AF-Tel5 cortada por el Túnel La Paz, hacia el K88+900 al K89+300



Fuente: ELB GEOLOGÍA Y VÍAS SAS. 2016

Figura 5-46. Ubicación de las unidades de Acuíferos AF-Tee1 y AF-Tee3 al occidente del Túnel La Paz



Fuente: ELB GEOLOGÍA Y VÍAS SAS. 2016

En la zona de estudio y en particular sobre las secciones longitudinales de los túneles La Sorda y La Paz, se presentan condiciones estructurales particulares como la presencia de una estructura sinclinal con su eje hacia el centro del túnel La Sorda, mientras que en el túnel de La Paz, la continuidad de los estratos y su fuerte buzamiento inferen unas condiciones de flujo relevantes con dirección a los alineamientos de los túneles.

A nivel del área de influencia definida para este proyecto se han considerado como unidades de Acuitardos, sectores donde se presentan de manera alternada niveles de

arcillolitas que alternan en menor proporción con areniscas y calizas. De la misma forma en función de su espesor se clasifican como de baja (AT2) o moderada (AT1) productividad, los niveles de Acuitardos hacia el techo de la formación Umir, la totalidad de las formaciones Tablazo (AT1-Kit) y La Luna (AT1-Ksl) del Cretáceo y niveles o segmentos locales dentro de las formaciones terciarias Lizama (AT1-Tpl4 y 6), La Paz (AT1-Tel3 y AT2-Tel7) y Esmeraldas (AT1-Tee4 y 3).

✓ *Acuitardo o Capa semiconfinante Formación Tablazo*

La Formación Tablazo (AT1-Kit) presenta una alta variabilidad litológica correspondiendo a una alternancia de areniscas de grano fino a medio, amarillas a marrones claras, intercaladas con niveles gruesos de shale gris oscuro micáceo y caliza gris, dura, masiva y fosilífera (bivalvos). Su espesor para la zona de estudio (UF8) se ha proyectado alrededor de los 300 m; confinados en su base al oriente por el Acuífugo de Paja (AF-Kip) y en el Techo al occidente por el Acuífugo Simití (AF-Kis), todo dentro del flanco oriental del Sinclinal de Nuevo Mundo.

Dentro de esta unidad se destacan los niveles de areniscas con espesores de 5 a 10 m y niveles de calizas con evidencias de disolución posibilitando flujos kársticos en profundidad; siendo clasificado a nivel general como un acuitardo de moderada productividad

✓ *Acuitardo o Capa semiconfinante Formación La Luna – AT1-Ksl*

La Formación La Luna (AT-Ksl) se caracteriza por presentar una estratificación delgada con capas por lo general con espesores menores a 40 cm; condición que la ha conducido a un alto grado de fracturamiento frente a los esfuerzos compresivos generados sobre el macizo rocoso y una permeabilidad secundaria relevante. Litológicamente corresponde a shales grises intercalados con calizas que presentan concreciones calcáreas de sección transversal elíptica, además chert, lutitas silíceas y capas fosfáticas hacia el tope (miembro Galembó). Su espesor en la zona de estudio oscila alrededor de los 450 m constituyendo un monoclinado limitado al occidente por la Falla de San Vicente y al oriente por una estructura local configurando un contacto fallado con la Formación Simití.

Se destaca la escasez de nacimientos de agua en las laderas que conforman esta unidad; sin embargo se concibe como una zona de recarga y un acuitardo de moderada productividad dadas la configuración espacial de la red de drenaje con dirección paralela a la estratificación y el espesor global de la unidad.

✓ *Acuitardos o Capas semiconfinantes Formación Umir (AT2-Ksu2 y AT2-Ksu 4)*

La Formación Umir como se expresó en párrafos anteriores presenta en el techo en los últimos 50 m infrayacentes a la formación Lizama unas pocas capas de areniscas duras de grano fino, limolitas arenosas y mantos de carbón que alternan con shale gris oscuro carbonoso. Los espesores de los estratos de areniscas no sobrepasan los 2 m, siendo clasificados como acuitardos de baja productividad.

✓ *Acuitardos o Capas semiconfinantes Formación Lizama (AT1-Tpl4 y Tpl6)*

La Formación Lizama a nivel general se caracteriza por la presencia de litologías alternantes de arcillolitas y areniscas en su parte media y baja, con predominio de las primeras. Estos sectores presentan espesores entre 150 y 200 m, infiriéndose unas productividades medias tanto en el sector del Túnel La Sorda como en el de La Paz. Estos sectores son intervenidos de manera aproximada por el Túnel La Paz entre el K90+500 a K90+700 y el K90+900 al K91+100 y en el túnel de La Sorda se localizan por encima de su cota clave. **Figura 5-43.**

✓ *Acuitardos o Capas semiconfinantes Formación La Paz (AT 1-Tel3 y AT2-Tel 7)*

La Formación La Paz en su parte media y hacia el techo de la misma presenta sectores con intercalaciones importantes de arcillolitas y areniscas siendo clasificados como Acuitardos de media productividad (AT1-Tel3) y de baja productividad (AT2-Tel 7) interceptadas por el Túnel La Paz hacia el K80+900 al K90+100 y hacia el portal de entrada del túnel respectivamente.

✓ *Acuitardos o Capas semiconfinantes Formación Esmeraldas (AT1-Tee3 y AT2-Tee6)*

La Formación Esmeraldas mayoritariamente arcillosa presenta sectores intermedios con paquetes de areniscas que resaltan la morfología del piedemonte de la Serranía de La Paz, estos sectores han sido interpretados como acuitardos de baja productividad AT1-Tee4 y Tee6, destacándose que sobre este último transcurre el corredor vial del K76 al K84+500. Se destaca también la escasez de nacimientos o aljibes en dichos sectores.

- Acuíferos

Se define un acuífero como aquella unidad hidrogeológica capaz de almacenar (porosidad) y transmitir agua susceptible de ser explotada en cantidades económicamente apreciables para atender diversas necesidades.

Si admitimos que los acuíferos reciben agua de la precipitación (aunque puede recibirla por otras vías), se pueden definir tres zonas: zona de alimentación o recarga, zona de circulación y zona de descarga.

La zona de alimentación es aquella donde el agua de precipitación se infiltra. La zona de descarga es la zona donde el agua sale del acuífero, como puede ser un manantial o la descarga al mar o a un río. La zona de circulación es la parte comprendida entre la zona de alimentación y la zona de descarga.

Se presentan varias clases de acuíferos en función de su confinamiento:

✓ *Acuíferos libres*

También llamados no confinados o freáticos; en ellos existe una superficie libre y real del agua encerrada, que está en contacto con el aire y a la presión atmosférica. Entre la

superficie del terreno y el nivel freático se encuentra la zona no saturada la cual varía en función de las condiciones de pluviosidad que determinan la recarga por infiltración.

El nivel freático define el límite de saturación del acuífero libre y coincide con la superficie piezométrica. Su posición no es fija sino que varía en función de las épocas secas o lluviosas. Si perforamos total o parcialmente la formación acuífera, la superficie obtenida por los niveles de agua de cada pozo forman una superficie real: superficie freática o piezométrica, que coinciden.

Se citan a continuación los acuíferos libres reportados para la zona de influencia del proyecto.

- *Acuíferos Libres Tipo 1 Depósitos aluviales y fluviotorrenciales*

Comprende depósitos fluviotorrenciales gravosoportados rellenando cañadas de fuerte a moderadas pendientes longitudinales con bloques rocosos subangulares de gran tamaño y vacíos, que permiten un fácil flujo y circulación de aguas subterráneas. En segundo término se presentan depósitos aluviales aledaños a las corrientes de agua con morfología plana a ligeramente inclinada, localizados en el pie de ladera de macizos rocosos; su relación y afectación por el proyecto es mínima en la medida que no serán interceptados por obras subterráneas y que solo serán afectados en el sector de la quebrada La Sorda (UF7- K85+300 a K85+600) donde se proyecta un terraplén de 20 m de altura máxima que puede compactar localmente estos depósitos.

- *Acuíferos Libres Tipo 2 Depósitos Coluviales*

De menor importancia hidrogeológica por presencia de nacimientos o aljibes; sin embargo de mayor importancia por constituir zonas de recarga de acuíferos infrayacentes, sus condiciones morfológicas facilitan la retención de agua, aunque por sus características texturales, mayoritariamente limoarcillosos limitan el flujo interno de aguas subterráneas haciéndolo lento; por tal razón son clasificados de productividad baja y no tienen influencia sobre los túneles proyectados al quedar por debajo de la rasante proyectada y en general sobre todo el corredor vial (UF5 a UF7).

- ✓ *Acuíferos confinados*

También llamados cautivos, a presión o en carga; en ellos el agua está sometida a una presión superior a la atmosférica y ocupa totalmente los poros o huecos de la formación geológica, saturándola totalmente. No existe zona no saturada.

Si perforamos, el nivel de agua asciende hasta situarse en una determinada posición que coincide con el nivel de saturación del acuífero en el área de recarga. Si la topografía es tal que la boca del pozo está por debajo del nivel del agua, el pozo es surgente o artesiano; si no es así el nivel del agua ascenderá hasta el nivel correspondiente, pero no será surgente. La superficie piezométrica es una superficie ideal resultante de unir todos los niveles en diferentes perforaciones que capten el acuífero.

En la zona de estudio y en particular sobre las secciones longitudinales de los túneles se han identificado acuíferos de diferente espesor y profundidad sobre bancos o paquetes espesos y continuos de areniscas cuarzosas, arcósicas y conglomeráticas de las formaciones Lizama y La Paz, los que adicional a sus condiciones litológicas y texturales presentan condiciones estructurales para el almacenamiento y flujo de aguas subterráneas.

- *Acuíferos Formación Lizama (AC1-Tpl 5, 7 y AC2-Tpl1, 3)*

Agrupados en acuíferos de muy alta productividad (AC1-Tpl 5 y 7) con espesores mayores a 90 m localizados hacia la parte media y techo de la formación, caracterizados por la presencia de areniscas de grano medio a grueso y colores gris verdoso a amarillento con algunas laminaciones de arcillolitas grises.

De otro lado hacia la base y parte media inferior de esta formación se presenta paquetes de menor espesor (<50 m) de areniscas de grano fino a medio gris verdosas clasificadas como acuíferos de alta productividad.

A nivel de los túneles la totalidad de estos acuíferos son cortados por el túnel de La Paz en su parte final, mientras en el de La Sorda solo es cortado en su parte central y más baja (sinclinal de Naranjo) el acuífero AC2-Tpl1 y el AC2-Tpl3 se encuentra muy cercano a la solera del túnel en su parte central.

- *Acuíferos Formación La Paz (AC1-Tel 2, 4, 6 y AC2-Tel 8)*

Los acuíferos de la Formación La paz se presentan de manera alternada sobre niveles de acuitardos y acuíferos de la misma formación constituyendo a nivel general en un acuífero multicapa de gran importancia regional, dentro de toda el área de influencia del Sinclinal de Nuevo Mundo.

Se clasifican como de muy alta productividad los niveles AC1-Tel 2, 4 y 6 con espesores de 100 a 400 m, con litologías de areniscas cuarzosas y arcósicas de grano medio a grueso y conglomeráticas sin cemento y niveles conglomeráticos cuarzosos, con estratificación gruesa a muy gruesa. Estos niveles serán cortados en la primera mitad del Túnel La Paz del K88+500 al K89+800 y constituyen el sector de mayor afectación a nivel hidrogeológico por el proyecto vial.

De otra parte el acuífero AC2-Tel8 de menor espesor no será cortado por el túnel sino en un sector a cielo abierto aledaño al portal de entrada del Túnel La Paz y sobre la ladera estructural del K86+900 al K87+500, infiriéndose una mínima afectación por su escasa zona de recarga a nivel local.

- *Acuíferos Formación Esmeraldas (AC2-Tee2)*

Finalmente sobre la Formación Esmeralda se proyecta la intervención a cielo abierto de un nivel de areniscas de aproximadamente 30 m de espesor clasificado como un acuífero de alta a media productividad, que será cortada transversalmente a cielo abierto (UF5)

alrededor del K86+250, con una mínima afectación por su escasa zona de recarga.

En la **Tabla 5-10** se relaciona de manera consolidada las diferentes unidades hidrogeológicas de la zona de influencia del proyecto sobre las unidades funcionales UF5 a UF7.

Tabla 5-13. Unidades Hidrogeológicas sobre el área de influencia del proyecto

| Productividad | Nombre | Nomenclatura | Litología | Estratigrafía | Identificador | Permeabilidad |
|---------------|--------------------------------------|--------------|---|---------------|-----------------|---------------|
| Muy baja | Acuífugos | AF | Arcillolitas, lutitas arcillosas y niveles de carbón | Kip | AF-Kip | Primaria |
| | | | | Kis | AF-Kis | |
| | | | | Ksu | AF-Ksu 1 y 3 | |
| | | | | Tee | AF-Tee 1 y3 | |
| | | | | Tpl | AF-Tpl 2 | |
| | | | | Tel | AF-Tel 1 y 5 | |
| Media | Acuitardos de Gran espesor | AT1 | Arcillolitas con intercalaciones de areniscas | Kit | AT2-Kit | |
| | | | | Ksl | AT2-Ksl | |
| | | | | Tpl | AT1-Tpl 4,6 | |
| | | | | Tel | AT1-Tel 3 | |
| | | | | Tee | AT1-Tee 3 y 6 | |
| | | | | Tom | AT1-Tom1 | |
| Baja | Acuitardos de poco espesor | AT2 | | Ksu | AT2-Ksu2 y 4 | |
| | | | | Tel | AT2-Tel 7 | |
| Baja | Acuíferos libres tipo 2 | AL2 | Depósitos coluviales | Qc | AL2-Qc | |
| | | | Depósitos antrópicos - rellenos | Qant | AL2-Qant | |
| Media | Acuíferos libres tipo 1 | AL1 | Depósitos aluviales | Qal | AL1-Qal | |
| | | | Depósitos fluviotorrenciales | Qft | AL1-Qft | |
| Muy Alta | Acuíferos confinados de gran espesor | AC1 | Areniscas masivas de grano medio a conglomeráticas | Tpl | AC1- Tpl 5 y 7 | |
| | | | | Tel | AC1-Tel 2,4 y 6 | |
| Alta | Acuíferos confinados de poco espesor | AC2 | Areniscas masivas de grano medio a conglomeráticas | Tpl | AC2-Tpl 1 y 3 | |
| | | | | Tel | AC2- Tel 7 | |
| | | | | Tee | AC2- Tee2 | |
| Media | Acuíferos diaclásicos | AD | Rocas indiferenciadas fracturadas por fallas geológicas | Variable | AD | Secundaria |

5.1.1.6.2 Áreas de Recarga

Las áreas de recarga definidas dentro del modelo hidrogeológico conceptual, guardan relación con condiciones particulares de tipo morfológico, morfométrico, climatológico, litológico y estructural, por lo cual se han establecido diferentes criterios de zonas o áreas, descritos a continuación:

En primer término hay que ubicar las zonas de recarga con respecto al corredor vial y en particular a los niveles de rasante en cada sector o unidad funcional; es así como muchas zonas de recarga relacionadas con depósitos coluviales o aluviales no serán intervenidas por el proyecto al encontrarse mayoritariamente en la parte baja de las laderas. Se describen a continuación los tipos de zonas de recarga diferenciados para el área de influencia del proyecto:

- Zonas de recarga por sectores coluviales, aluviales y fluviotorrenciales

Materiales sin consolidar con porosidad primaria alta a moderada dispuestos sobre zonas de baja pendiente donde se facilita la infiltración de aguas de escorrentía y su paso a acuíferos confinados o macizos rocosos permeables en profundidad.

A nivel del proyecto y en particular sobre el área aferente a los túneles, no se presentan cuerpos cuaternarios importantes sobre el Túnel de La Paz; sin embargo la red de drenaje que disecta la serranía de La Paz, tiende a seguir planos de diaclasamiento principal que junto a la presencia de depósitos fluviotorrenciales tiende a permitir la infiltración de aguas de escorrentía hacia acuíferos en profundidad.

En el Túnel de La Sorda hay una mayor influencia en cuanto a su cobertura superficial, por encima de los portales del túnel se presentan depósitos coluviales que alimentan acuíferos de areniscas de la formación Lizama en profundidad, en particular sobre los niveles Tel 1 y Tel 3 definidos como acuíferos y el nivel Tel 2 definido como acuitardo.

- Zonas de recarga inducida por escurrimiento e infiltración sobre macizos rocosos fracturados

Teniendo en cuenta las condiciones estructurales y tectónicas sobre el área de influencia del proyecto, se presenta una tendencia NE de fallas inversas y plegamientos trasversales al sector de túneles (Formaciones Lizama y La Paz) y paralelas a los sectores de corte sobre las formaciones La Luna y Esmeralda, con sistemas preferenciales de fracturamiento NWW perpendiculares a las estructuras NE.

Por lo anterior la red de drenaje tiende a seguir los citados patrones estructurales y constituyen zonas de recarga a este tipo de acuíferos diaclásicos y a otros confinados que se entrecruzan a mayor profundidad.

- Zonas altas con morfología ondulada y de baja pendiente y buena cobertura vegetal

Dadas las condiciones pluviométricas del área de influencia con precipitaciones alrededor de los 2500 mm, aun bajo suelos de menor permeabilidad, se presentan infiltraciones de la escorrentía particularmente en zonas de pendientes bajas a moderadas y con una buena cobertura vegetal.

Estos sectores tienden a presentarse de manera puntual y con poca extensión sobre la serranía de La Paz y en mayor extensión sobre el sector del túnel de La Sorda.

5.1.1.6.3 Áreas de Descarga

Las áreas de descarga están asociadas a la orientación que adquieren los flujos al encontrarse en su trayectoria con cuerpos acuitardos y acuifugos en los que la infiltración es difícil o imposible. Siempre cuando el nivel freático (la superficie del agua subterránea) llega a la superficie del terreno, se forma un manantial. Estos puntos de descarga del agua subterránea dependen de la situación geológica del lugar y producen varios tipos de manantiales.

Los manantiales encontrados en la zona de influencia del proyecto se asocian a la alternancia de estratos con contrastes de permeabilidad, o a la disección de acuíferos por la red de drenaje. Los primeros son más comunes sobre el área del Túnel La Sorda (UF6) sobre el contacto de niveles arenosos de la formación Lizama con suelos de baja permeabilidad coluviales o niveles de lutitas de la formación Umir.

También se destacan la presencia de manantiales sobre laderas erosionales de la formación Esmeralda donde se presentan capas alternantes de areniscas y arcillolitas.

De otra parte en el sector de la Serranía de La Paz, en zonas de fuerte pendiente donde los acuíferos de la formación La Paz son disectados por la red de drenaje se presentan numerosos aljibes o puntos de descarga, así como en las entalladuras superiores de los drenajes con laderas estructurales o frentes de disección del macizo rocoso.

5.1.1.6.4 Áreas de Transito

En las partes medias de las laderas transita el agua que se infiltró desde las partes altas, eventualmente pueden recibir en esas laderas aportes de corrientes superficiales influentes, pero en general se puede considerar que las partes medias altas de las laderas son esencialmente zonas de aguas en tránsito, en particular sobre los sectores de mayor pendiente de los acuíferos.

Estas aguas en tránsito fluyen esencialmente dentro de acuíferos confinados o en zona de alto grado de fracturamiento del macizo rocoso. Las aguas de escorrentía también son aguas en tránsito que discurren sobre la superficie de las laderas y no logran infiltrarse ya sea por la presencia de la cobertura impermeable o por la alta pendiente.

El tránsito de aguas también puede ocurrir a lo largo de los planos de falla o de cizallas locales, que son zonas de fracturación alta con espacios intersticiales suficientes para que fluya el agua a lo largo de dichas zonas.

5.1.1.7 Modelo hidrogeológico numérico

El modelo Hidrogeológico numérico es un componente fundamental para la definición del impacto ambiental (cuantificación y medidas de mitigación). El aspecto fundamental es crear una herramienta para medir el cambio en la disponibilidad de agua debido a las obras del proyecto vial.

5.1.1.7.1 Obtención Del Modelo Numérico

Para la modelación de flujo en los túneles se aplica el método de Marshall (2013) consistente en la suposición de realización de una excavación progresiva en acuífero no confinado. Aplica principio de superposición y discretización.

Específicamente en cuanto a la construcción, corrida y calibración del modelo se siguen los pasos indicados a continuación.

- ✓ Determinación del software a utilizar
- ✓ Definición de grilla de trabajo.
- ✓ Cargue de aspectos físicos y geométricos en 3D.
- ✓ Definición de capas y estructuras hidrogeológicas.
- ✓ Cargue de propiedades físicas por capas o estructuras definidas.
- ✓ Cargue de datos hidrológicos
- ✓ Inclusión de elementos puntuales conocidos (pozos, bocatomas, etc)
- ✓ Determinación de escenarios a modelar
- ✓ Configuración de modos de corrida
- ✓ Corrida, ajustes y calibración
- ✓ Generación de salidas o reportes

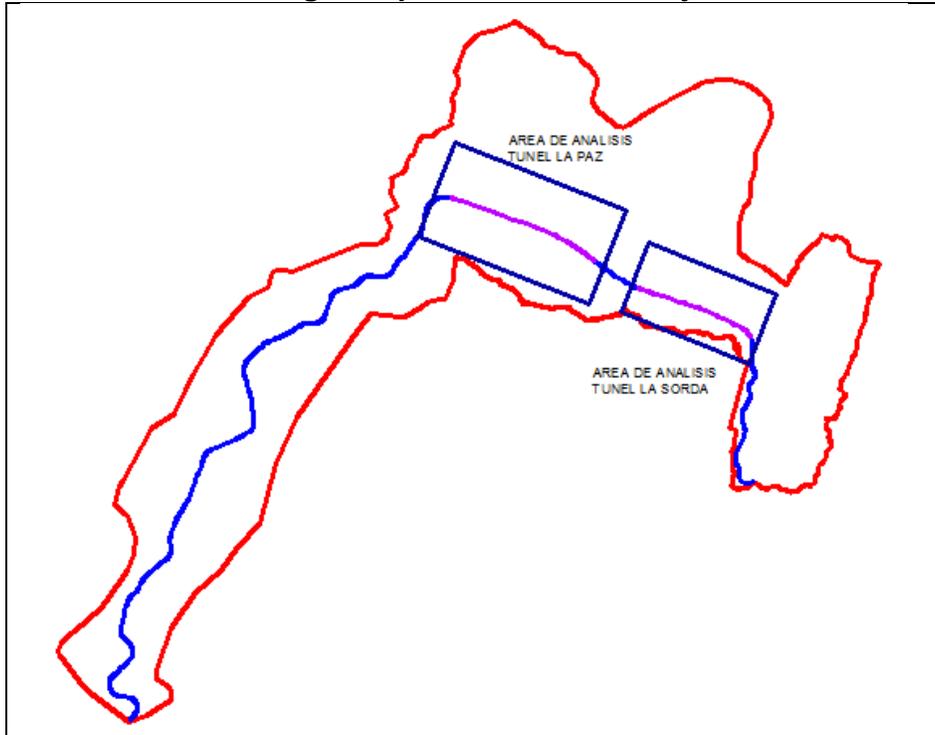
El software utilizado es el Modflow 2005 el cual fue desarrollado por el USGS y el cual es de uso libre a través de diferentes visores y aplicativos de ejecución y visualización. Se seleccionó esta herramienta por su calidad de resultados comprobada (amplio soporte), facilidad de uso, disponibilidad y compatibilidad con los desarrollos del mismo tipo que se utilizan en el país.

5.1.1.7.2 Espacio de trabajo

El espacio de trabajo definido involucra toda el área del proyecto de las unidades funcionales UF5, UF6 y UF7, la cual está definida en las **Figura 5-45** y **5-46**, mostradas a continuación.

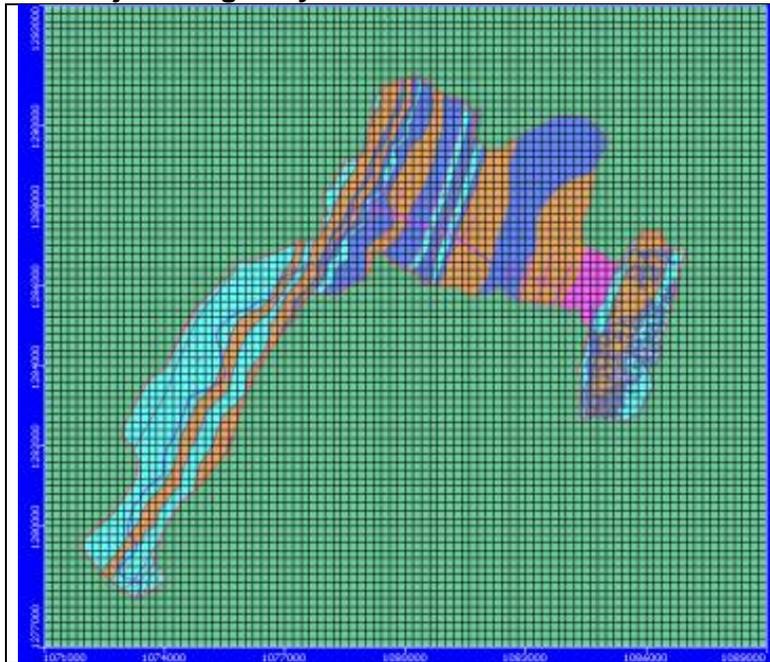
El área del modelo y la correspondiente ventana cartográfica se definieron de manera que agrupara completamente las localizaciones de las obras a realizar, para el Túnel La Paz el área de modelación seleccionada es de 7.724.195 m² (7.7 Km²) y para el túnel La Sorda el área mide 4.344.859 m² (4.3 Km²)

Figura 5-47. Selección de Polígonos para el área de trabajo



Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

Figura 5-48 Montaje de la grilla y del área de influencia del modelo geológico

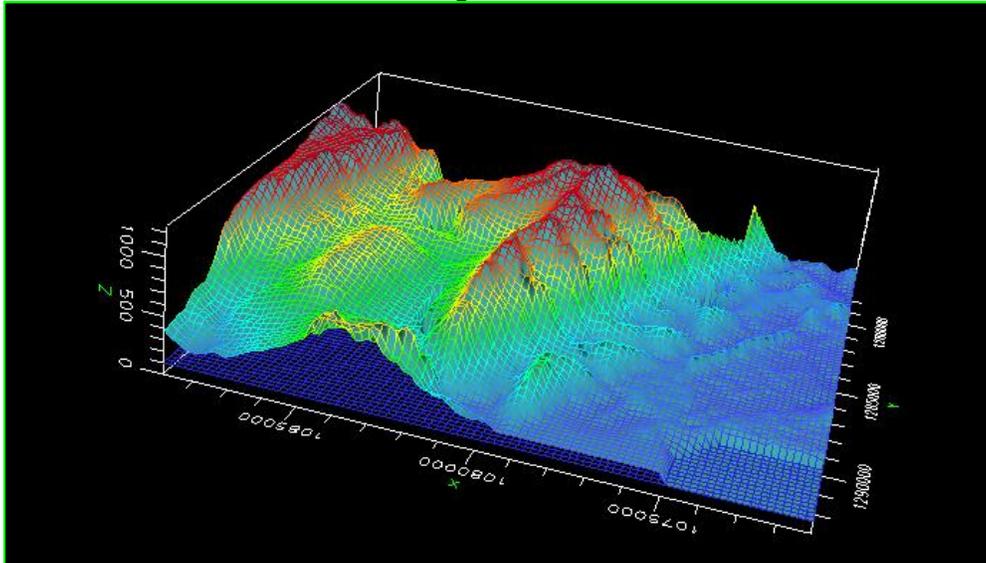


Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

Con información geológica de detalle proveniente de estudios de Fase 2 y de los estudios geológicos realizados actualmente a nivel de Fase 3, se delimita el área de influencia hidrogeológica pues se aplican condiciones estructurales de la geología que determinan cuencas subterráneas. Estas cuencas delimitan un perímetro un poco diferente al perímetro de las cuencas superficiales, y son las que finalmente se pueden afectar en diferentes medidas por la construcción del proyecto.

Las afectaciones del agua subterránea corresponden fundamentalmente a la caída en los niveles piezométricos por drenaje en los niveles inferiores de la tabla de agua, y la ruptura de las líneas de flujo con lo cual zonas de almacenamiento y explotación pueden quedar desconectadas de la zona de recarga

Figura 5-49. Vista Tridimensional de la grilla del modelo en sentido Norte - Sur



Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

5.1.1.7.3 Parametrización

Según las características particulares de cada componente de los estratos del terreno correspondientes a las unidades hidrogeológicas y a las capas superficiales, se obtuvieron y se introdujeron al modelo los valores característicos de manera regional. A medida que se calibra el modelo estos valores variarán tanto a nivel regional como a nivel zonal.

A partir del balance hidrológico se utilizaron valores regionales de 2.245 mm/año para la precipitación y 814 mm/año para la evapotranspiración, como parámetros representativos para el área de análisis del Túnel La Paz. Se utilizaron valores regionales de 2.174 mm/año para la precipitación y 824 mm/año para la evapotranspiración, como parámetros representativos para el área de análisis del Túnel La Sorda. En la **Tabla 5-11** se indican los parámetros fundamentales de arranque que se utilizaron.

Tabla 5-14. Tabla de parámetros hidráulicos

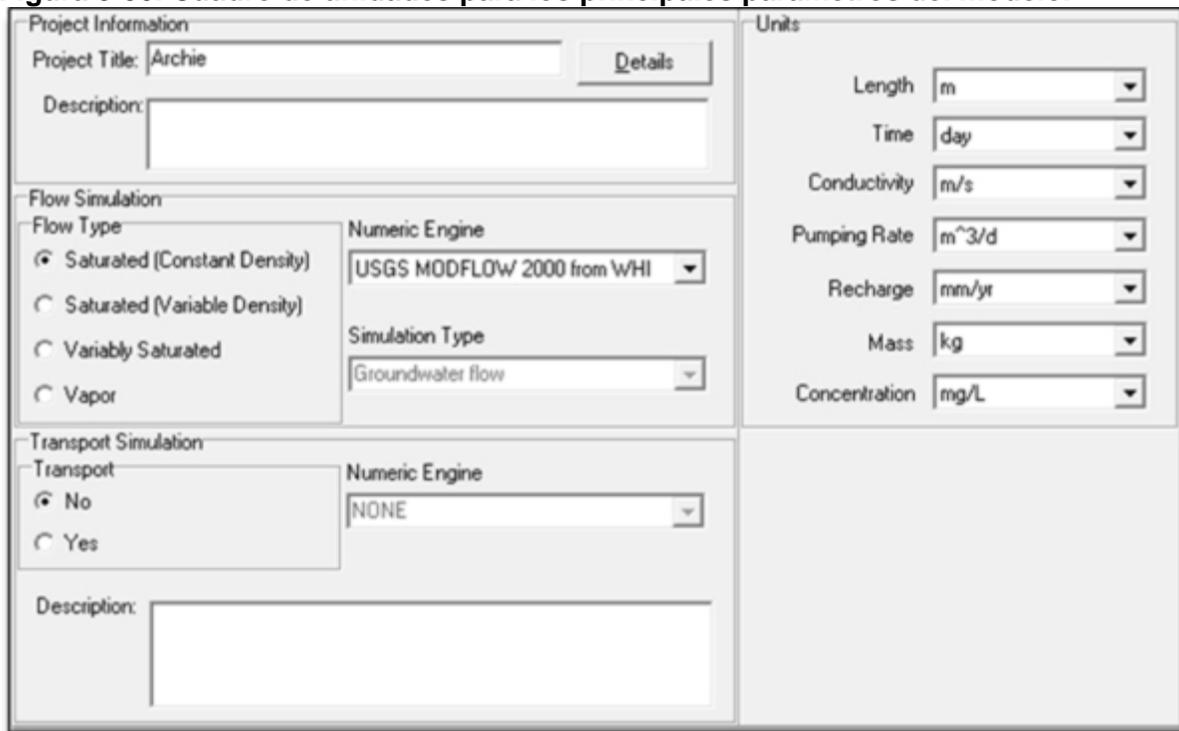
| LOCALIZACIÓN | | | | | VALOR PROMEDIO DE PARÁMETROS | | | | | |
|--------------|-----------|-------|--------|--------|------------------------------|----------|----------|------|-------|------|
| Túnel | Formación | Tramo | PK1 | PK2 | Kxy (m/s) | Kz (m/s) | Ss | Sy | P.Tot | P.Ef |
| La Paz | Paz | 1 | 88+500 | 90+750 | 2.74E-06 | 2.74E-07 | 5.40E-05 | 0.22 | 0.38 | 0.16 |
| | Lizama | 2 | 90+750 | 91+362 | 8.40E-07 | 8.40E-08 | 6.20E-06 | 0.18 | 0.28 | 0.15 |
| | Umir | 3 | 91+362 | 91+700 | 4.20E-06 | 4.20E-07 | 5.60E-05 | 0.21 | 0.34 | 0.16 |
| La Sorda | Umir | 1 | 93+000 | 93+660 | 3.45E-06 | 3.45E-07 | 3.80E-05 | 0.20 | 0.32 | 0.18 |
| | Lizama | 2 | 93+660 | 94+390 | 5.70E-07 | 5.70E-08 | 9.80E-06 | 0.19 | 0.27 | 0.19 |
| | Umir | 3 | 94+390 | 95+100 | 2.76E-06 | 2.76E-07 | 4.70E-05 | 0.23 | 0.34 | 0.17 |

En esta tabla los parámetros corresponden específicamente a:

- ✓ (Kxy) Conductividad Hidráulica Horizontal
- ✓ (Kz) Conductividad Hidráulica Vertical
- ✓ (Ss) Almacenamiento Específico
- ✓ (Sy) Capacidad Específica o Rendimiento
- ✓ (P.Tot) Porosidad Total
- ✓ (P Ef) Porosidad Efectiva

En las siguientes tablas se muestran algunas fases del procedimiento de introducción de parámetros hidrogeológicos en el modelo.

Figura 5-50. Cuadro de unidades para los principales parámetros del modelo.



The image shows a software interface with the following sections:

- Project Information:** Project Title: Archie, Description: (empty field), Details button.
- Flow Simulation:**
 - Flow Type:
 - Saturated (Constant Density)
 - Saturated (Variable Density)
 - Variably Saturated
 - Vapor
 - Numeric Engine: USGS MODFLOW 2000 from WHI
 - Simulation Type: Groundwater flow
- Transport Simulation:**
 - Transport:
 - No
 - Yes
 - Numeric Engine: NONE
 - Description: (empty field)
- Units:**
 - Length: m
 - Time: day
 - Conductivity: m/s
 - Pumping Rate: m³/d
 - Recharge: mm/yr
 - Mass: kg
 - Concentration: mg/L

Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

Figura 5-51. Definición de parámetros hidrogeológicos básicos para la capa superior de terreno.

| Default Parameters | | | |
|--------------------|--------|-------|--|
| Parameter Name | Value | Units | |
| Kx | 0.0001 | m/s | |
| Ky | 0.0001 | m/s | |
| Kz | 1E-5 | m/s | |
| Ss | 1E-5 | 1/m | |
| Sy | 0.20 | | |
| Eff. Por. | 0.15 | | |
| Tot. Por. | 0.30 | | |
| Recharge | 1233 | mm/yr | |
| Evapotranspiration | 628.61 | mm/yr | |
| Extinction Depth | 0.9 | m | |

Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

Figura 5-52 Tabla para parámetros de almacenamiento de agua subterránea en el subsuelo.

| Storage - [Assign Window] | | | | |
|---------------------------|-------|-------|--------------------|--|
| Zone # | | 1 | New | |
| Name | Value | Units | Description | |
| Ss | 1E-5 | [1/m] | Specific storage | |
| Sy | 0.2 | [-] | Specific yield | |
| Eff. Por. | 0.15 | [-] | Effective porosity | |
| Tot. Por. | 0.3 | [-] | Total porosity | |

Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

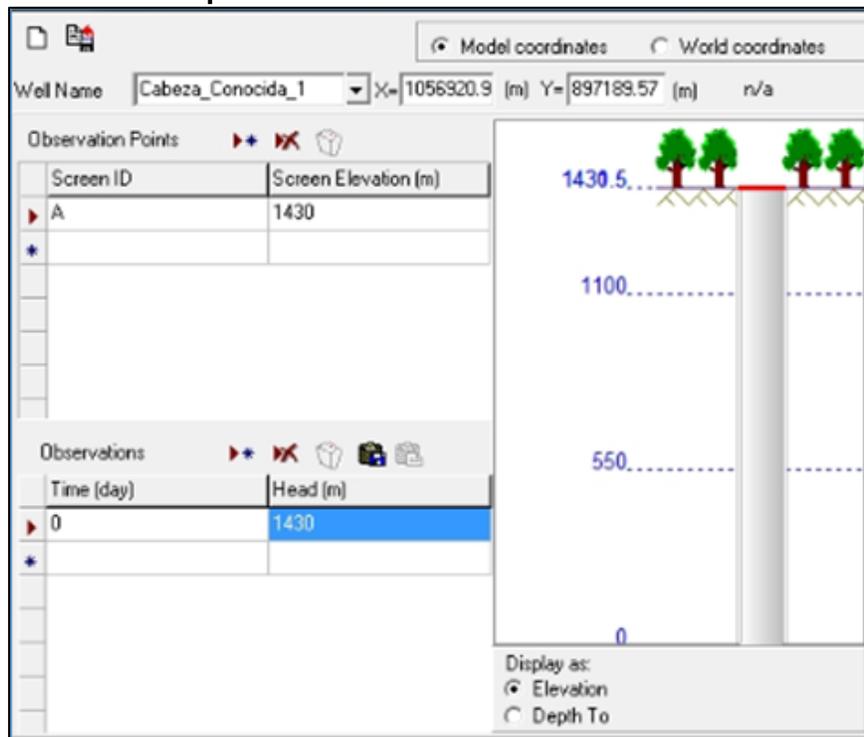
Para definir los niveles piezométricos y las tablas de agua de referencia, se utilizaron datos de lecturas en los puntos de los sondeos y durante la realización de las pruebas de Lugeon, así como la información de las Tomografías Geoelectricas. También se tuvo como referencia la localización de puntos de agua los cuales son la evidencia d zonas de descarga o de contacto de la tabla de agua con el nivel del terreno.

Tabla 5-15 Modelo de datos de niveles piezométricos utilizado.

| Empresa | Equipo | Sondeo | Código Sondeo | Localización | COORDENADAS | | Fecha Inicio | Fecha Fin | Profundidad inicio | Profundidad Fin | Nivel Freático | |
|---------|---------|--------|---------------|--------------------|-------------|-----------|--------------|------------|--------------------|-----------------|----------------|-------|
| | | | | | NORTE | ESTE | | | | | Inicial | Final |
| BAC | Fraste | 5 | UF7-SE5 | Viaducto Rio sucio | 1,286,742 | 1,082,978 | 01/03/2016 | 01/03/2016 | 33.85 | 37.55 | 10.4 | 10.4 |
| BAC | Fraste | 5 | UF7-SE5 | Viaducto Rio sucio | 1,286,742 | 1,082,978 | 02/03/2016 | 02/03/2016 | 33.85 | 37.55 | 10.4 | 10.4 |
| BAC | ACKER | 6 | UF7-SE6 | Viaducto Rio sucio | 1,286,720 | 1,083,010 | 03/03/2016 | 03/03/2016 | 9.3 | 9.3 | 0 | 0 |
| BAC | ACKER | 7 | UF7-SE7 | Viaducto Rio sucio | 1,286,702 | 1,083,036 | 01/03/2016 | 01/03/2016 | 24 | 28 | 2 | 2 |
| BAC | ACKER | 7 | UF7-SE7 | Viaducto Rio sucio | 1,286,702 | 1,083,036 | 02/03/2016 | 02/03/2016 | 24 | 28 | 2 | 2 |
| BAC | ACKER | 8 | UF7-SE8 | Viaducto Rio sucio | 1,286,687 | 1,083,063 | 11/03/2016 | 11/03/2016 | 1.5 | 10.6 | 0 | 2.5 |
| BAC | ACKER | 8 | UF7-SE8 | Viaducto Rio sucio | 1,286,687 | 1,083,063 | 15/03/2016 | 15/03/2016 | 19.9 | 26.6 | 4 | |
| BAC | ACKER | 8 | UF7-SE8 | Viaducto Rio sucio | 1,286,687 | 1,083,063 | 16/03/2016 | 16/03/2016 | 26.6 | 35.3 | 4 | |
| BAC | Fraste | 10 | UF7-SE10 | Viaducto Rio sucio | 1,286,629 | 1,083,161 | 09/03/2016 | 09/03/2016 | 11.1 | 19 | 6.5 | 10.2 |
| BAC | Fraste | 10 | UF7-SE10 | Viaducto Rio sucio | 1,286,629 | 1,083,161 | 10/03/2016 | 10/03/2016 | 19 | 24.4 | 10.2 | |
| BAC | Fraste | 10 | UF7-SE10 | Viaducto Rio sucio | 1,286,629 | 1,083,161 | 12/03/2016 | 12/03/2016 | 24.4 | 24.4 | 2 | |
| BAC | Fraste | 10 | UF7-SE10 | Viaducto Rio sucio | 1,286,629 | 1,083,161 | 15/03/2016 | 15/03/2016 | 30.3 | 37 | 5.8 | |
| BAC | ROLATEC | 11 | UF7-SE11 | Viaducto Rio Sucio | 1,286,571 | 1,083,266 | 11/03/2016 | 11/03/2016 | 2.55 | 14.2 | 3.2 | 7.2 |
| BAC | ROLATEC | 11 | UF7-SE11 | Viaducto Rio Sucio | 1,286,571 | 1,083,266 | 12/03/2016 | 12/03/2016 | 14.2 | 20 | 3.5 | |
| BAC | ROLATEC | 11 | UF7-SE11 | Viaducto Rio Sucio | 1,286,571 | 1,083,266 | 14/03/2016 | 14/03/2016 | 20 | 23.8 | 9.5 | |
| BAC | ROLATEC | 11 | UF7-SE11 | Viaducto Rio Sucio | 1,286,571 | 1,083,266 | 15/03/2016 | 15/03/2016 | 23.8 | 29.4 | 7.5 | |
| BAC | ROLATEC | 11 | UF7-SE11 | Viaducto Rio Sucio | 1,286,571 | 1,083,266 | 16/03/2016 | 16/03/2016 | 29.4 | 34.95 | 6.2 | |
| BAC | Fraste | 12 | UF7-SE12 | Viaducto Rio sucio | 1,286,535 | 1,083,337 | 18/03/2016 | 18/03/2016 | 14.2 | 22 | 3 | |
| BAC | Fraste | 12 | UF7-SE12 | Viaducto Rio sucio | 1,286,535 | 1,083,337 | 19/03/2016 | 19/03/2016 | 22 | 25.64 | 3 | |
| BAC | Fraste | 12 | UF7-SE12 | Viaducto Rio sucio | 1,286,535 | 1,083,337 | 30/03/2016 | 30/03/2016 | 28.4 | 30 | no detectado | |
| BAC | Fraste | 13 | UF7-SE13 | Viaducto Rio sucio | 1,286,518 | 1,083,373 | 28/03/2016 | 28/03/2016 | 25.64 | 28.4 | 4 | |
| BAC | Fraste | 13 | UF7-SE13 | Viaducto Rio sucio | 1,286,518 | 1,083,373 | 01/04/2016 | 01/04/2016 | 6.2 | 11.5 | 1 | |
| BAC | Fraste | 13 | UF7-SE13 | Viaducto Rio sucio | 1,286,518 | 1,083,373 | 02/04/2016 | 02/04/2016 | 11.5 | 16.1 | 4 | |
| BAC | Fraste | 13 | UF7-SE13 | Viaducto Rio sucio | 1,286,518 | 1,083,373 | 04/04/2016 | 04/04/2016 | 16.1 | 21.65 | 6 | |
| BAC | Fraste | 13 | UF7-SE13 | Viaducto Rio sucio | 1,286,518 | 1,083,373 | 05/04/2016 | 05/04/2016 | 21.65 | 24.18 | 5 | |

Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

Figura 5-53. Inclusión de puntos de cabeza conocida



Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

5.1.1.7.4 Información Hidrológica

En la siguiente tabla se presenta el consolidado de la información hidrológica relevante para el modelo numérico.

Tabla 5-16. Modelo de datos de niveles piezométricos utilizado.

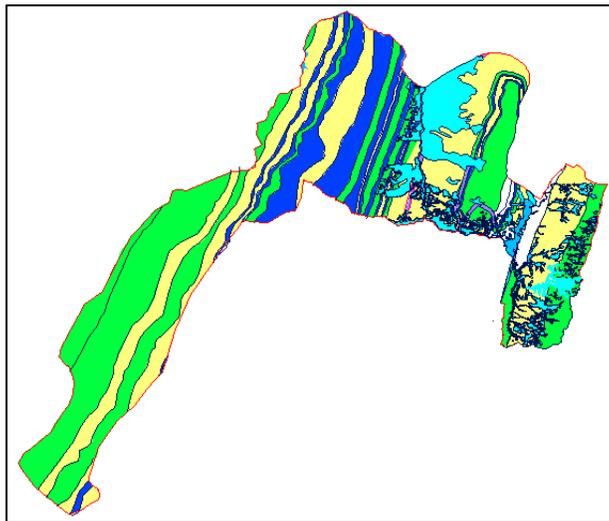
| Parámetro | Túnel L a Paz (*) | Túnel La Sorda (*) |
|-----------------------------|-------------------|--------------------|
| Evaporación | 1050 | 997 |
| Precipitación | 2245 | 2174 |
| Transpiración | 413 | 386 |
| Evapotranspiración | 1463 | 1383 |
| Evapotranspiración efectiva | 814 | 824 |
| Escorrentía | 203 | 173 |
| Infiltración (Recarga) | 1228 | 1177 |

Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

5.1.1.7.5 Cargue de aspectos estructurales

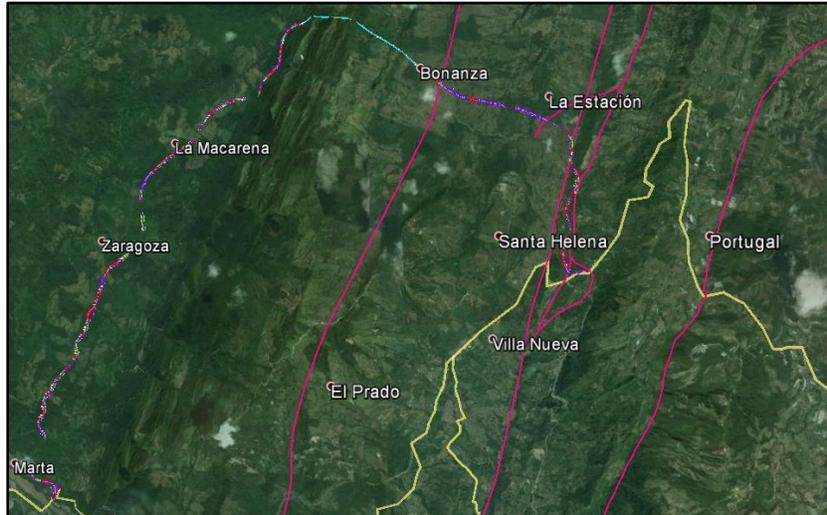
La información de geología estructural se involucra en el modelo numérico al definir contactos geológicos que delimitan la estratigrafía y las fallas que se han obtenido del estudio geológico. Para realizar el proceso se definen los elementos tridimensionales de contacto y luego se establecen “regiones” mediante conjuntos tridimensionales de celdas contenidas entre dichos contactos los cuales representan los diferentes estratos y grupos diferenciables de suelos.

Figura 5-54. Mapa Hidrogeológico con Información relevante de Geología Estructural.



Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

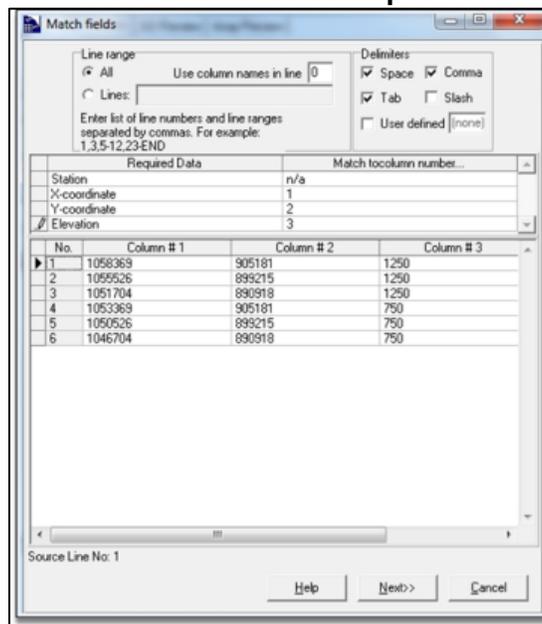
Figura 5-55. Localización de Zonas de Falla con ayuda de la aplicación Google Earth.



Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

Para realizar el cargue de la información estructural se realizan validaciones a los datos de entrada para suprimir la inclusión de inconsistencias en el modelo, lo cual se realiza mediante un proceso de depuración del cual se extrae el cuadro de diálogo mostrado a continuación. En cuanto a Zonas de Conductividad y Parámetros asociados, se tomó el promedio de los valores conocidos dentro de una misma Formación Geológica, para no saturar el Modelo.

Figura 5-56. Cuadro de Validación de Datos de Capas del modelo



Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

5.1.1.7.6 Implementación de aspectos del balance hídrico

La ecuación general del balance hídrico aplicable a un volumen de control como el que se ha definido es la siguiente:

$$AF = AI + P + Vspi + Vsti - Ev - Tr - Vsps - Vsts + I$$

En donde:

- ✓ AF: Almacenamiento final
- ✓ AI: Almacenamiento inicial
- ✓ P: Precipitación
- ✓ Vspi: Volúmenes de agua superficial que ingresan
- ✓ Vsti: Volúmenes de agua subterránea que ingresan
- ✓ Ev: Evaporación
- ✓ Tr: Evapotranspiración
- ✓ Vsps: Volúmenes de agua superficial que salen
- ✓ Vsts: Volúmenes de agua subterránea que salen
- ✓ C: Consumos aplicando el coeficiente de retorno
- ✓ I: Incertidumbre o error de cierre admisible

Los valores para los parámetros del Balance Hídrico se han tomado de acuerdo con los escenarios presentados en el informe de avance del Estudio Hidrológico. El período de análisis es de un año considerando que éste corresponde a ciclos hidrológicos regulares completos, con lo que se logra datos medios consolidados en cada una de las variables de interés.

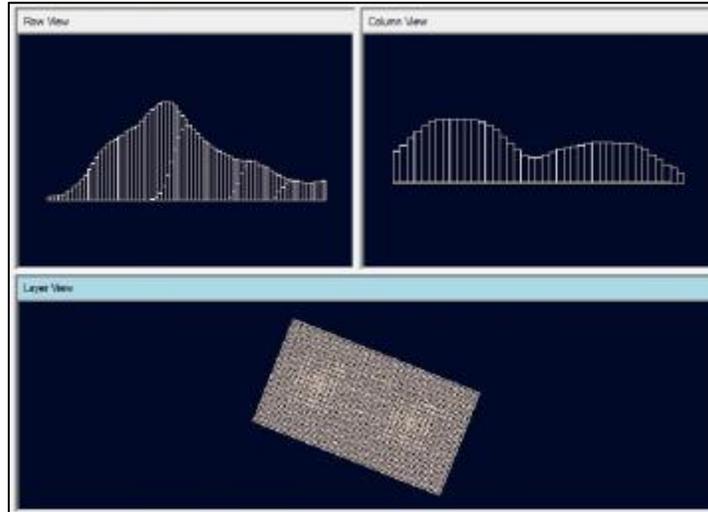
Los resultados del balance hídrico se encuentran discriminados en las tablas y cuadros de los Resultados de la Modelación al final de este numeral.

5.1.1.7.7 Corrida del modelo numérico

El modelo se corrió definiendo como base un escenario estándar en modo de Flujo Estable o Continuo (Steady-State) para un período de un año (365 días) al ser el periodo básico de los ciclos hidrológicos así como el periodo estándar de consolidación de la información utilizada. Inicialmente se realizaron corridas a un día y luego se calibrar se llevaron a 365 días. También se definieron escenarios de corridas en modo de Flujo Variado Transitorio (Transient) con 10 períodos (Time-Steps) incrementales para analizar y validar el cambio gradual en el almacenamiento en el acuífero por introducción de la obra de los túneles.

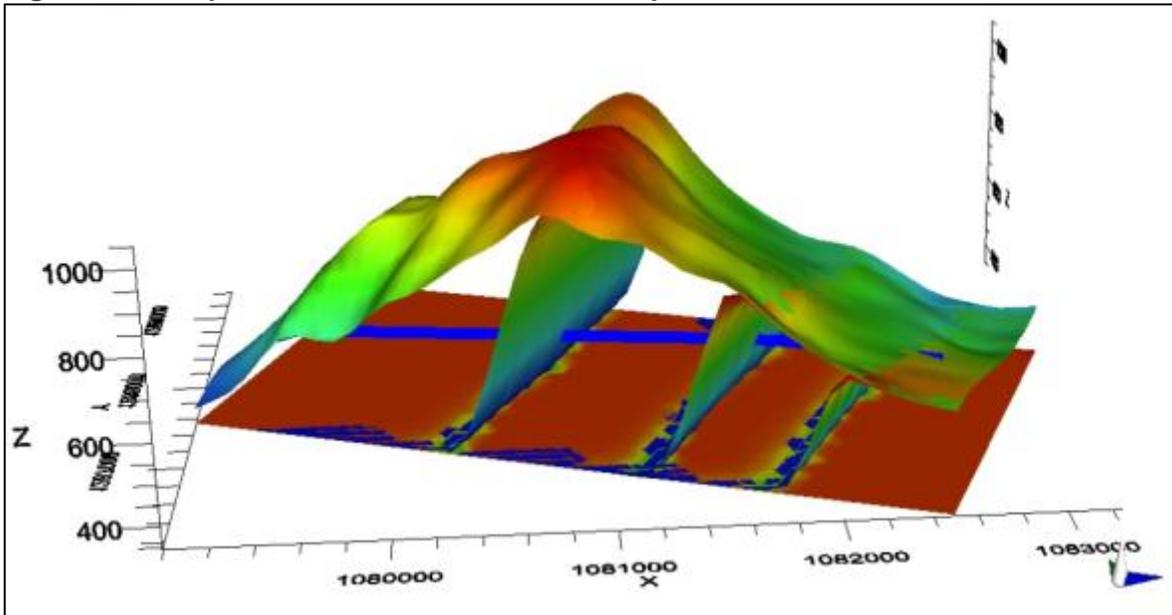
A continuación se muestra la configuración geométrica general para la corrida del modelo den los túneles. En color azul se ve el Túnel la Paz y en color naranja el Túnel La Sorda.

Figura 5-57. Grilla del Modelo – Túnel La Paz



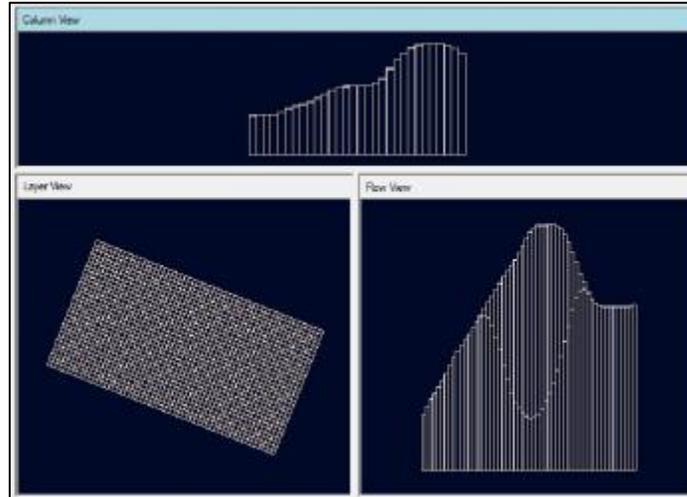
Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

Figura 5-58. Implementación del modelo conceptual – Túnel La Paz



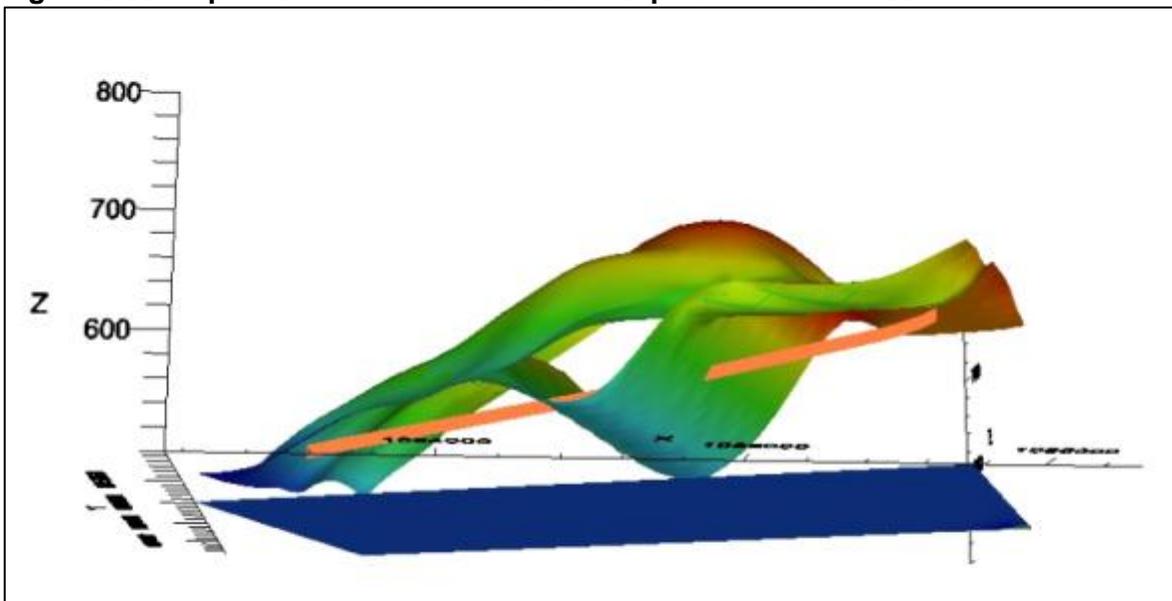
Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

Figura 5-59. Grilla del Modelo – Túnel La Sorda



Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

Figura 5-60. Implementación del modelo conceptual – Túnel La Sorda



Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

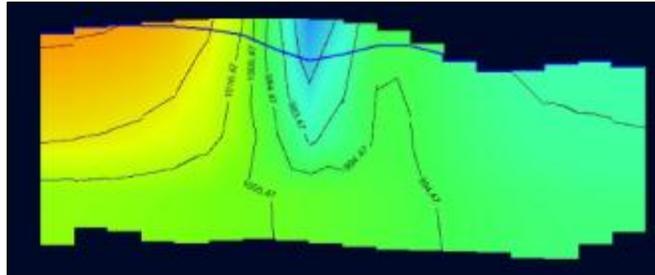
5.1.1.7.8 Resultados del modelo numérico

Los resultados del modelo se obtienen en modo de figuras, cuadros y tablas. Las figuras corresponden a la visualización de las cargas hidráulicas y los niveles freáticos a través de cortes transversales y longitudinales realizados en el volumen de control. Los cuadros y tablas son presentaciones del balance hídrico.

Al final del capítulo se presenta la conclusión fundamental correspondiente a los caudales residuales de los túneles en el escenario de mayor flujo posible esperado.

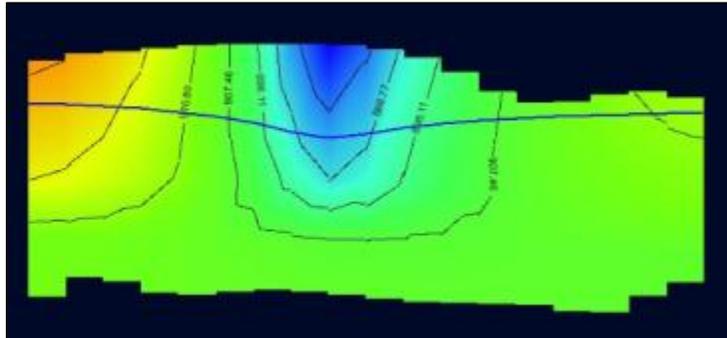
En cuanto a las figuras, a continuación se presenta una muestra del comportamiento del nivel freático en la zona media del túnel La Sorda, mediante cortes transversales tomados en diferentes momentos de la corrida en modo Transiente. El eje del túnel está al centro de las gráficas. En ellas se observa que hay un descenso irre recuperable en la tabla de agua.

Figura 5-61. Nivel Freático y Potenciales Hidráulicos a los 14 días de iniciar obra en abscisa.



Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

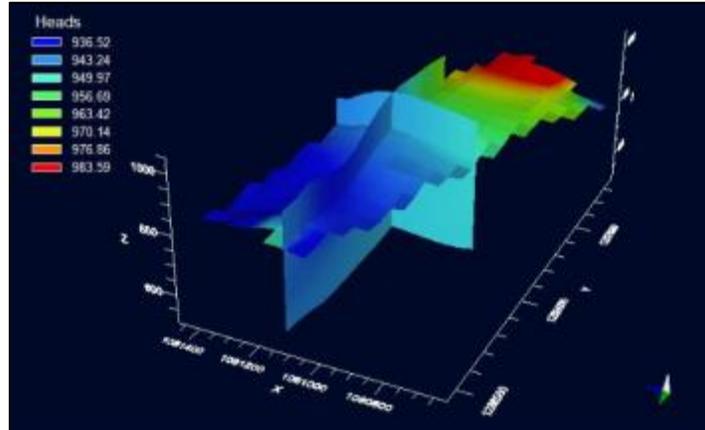
Figura 5-62. Nivel Freático y Potenciales Hidráulicos a los 365 días de iniciar obra en abscisa.



Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

Con el propósito de dar claridad sobre lo representado en las vistas de sección transversal (lateral) y longitudinal, en la siguiente figura se indica la localización correspondiente de forma genérica, correspondiente a los planos verticales allí mostrados.

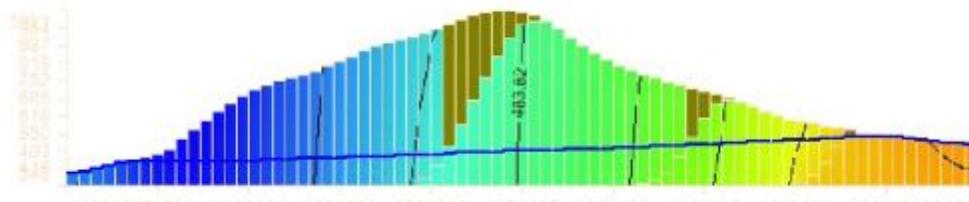
Figura 5-63. Esquema de cortes para vistas laterales y longitudinales.



Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

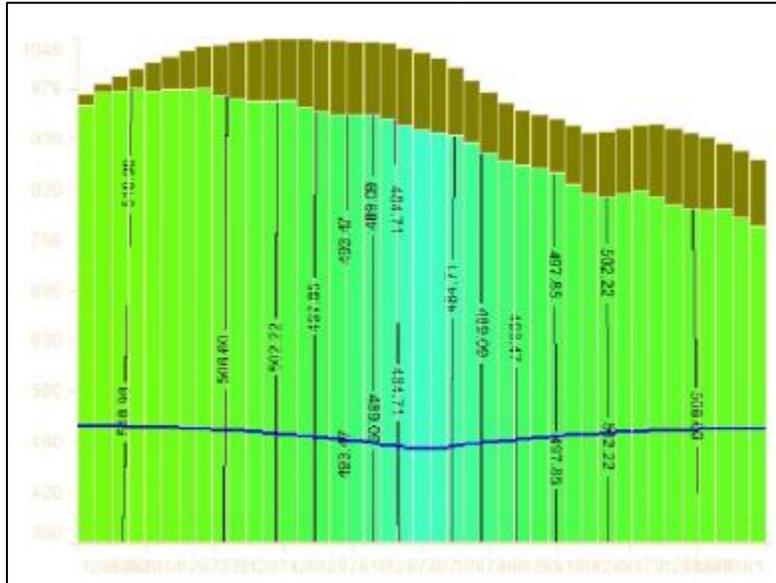
Específicamente para cada túnel se muestran a continuación los cortes conceptuales y el balance hídrico en forma de cuadros y en forma de tablas. La línea del nivel freático se muestra en azul en su estado final luego de un año luego de la acción de abatimiento efectuada por el túnel, considerando que éste no tiene sello hidráulico.

Figura 5-64. Vista Lateral de la Tabla de agua abatida para Túnel La Paz.



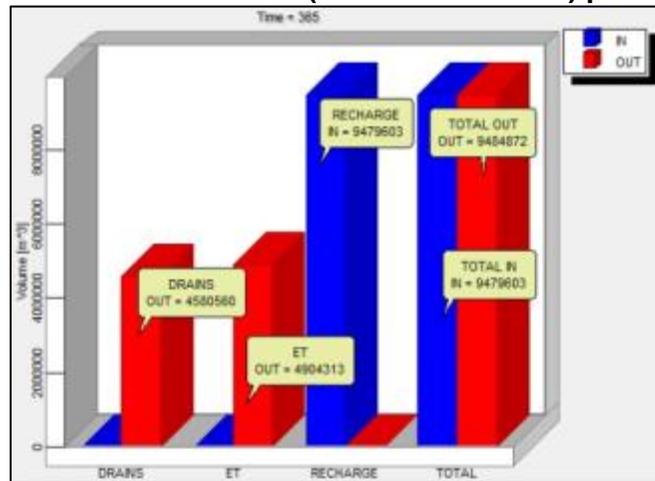
Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

Figura 5-65. Vista Transversal de la Tabla de agua abatida para Túnel La Paz.



Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

Figura 5-66. Cuadro de Balance Hídrico (Balance de Masas) para túnel La Paz.



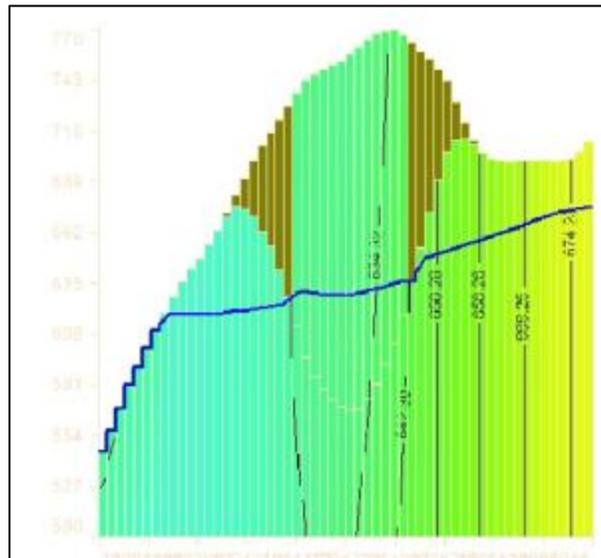
Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

Tabla 5-17. Tabla consolidada de Balance Hídrico para túnel La Paz.

| CUMULATIVE VOLUMES | | L**3 | RATES FOR THIS TIME STEP | | L**3/T |
|------------------------------|--|---------------------|------------------------------|--|-------------------|
| IN: | | | | | |
| --- | | | --- | | |
| STORAGE = | | 0.0000 | STORAGE = | | 0.0000 |
| CONSTANT HEAD = | | 0.0000 | CONSTANT HEAD = | | 0.0000 |
| DRAINS = | | 0.0000 | DRAINS = | | 0.0000 |
| ET = | | 0.0000 | ET = | | 0.0000 |
| RECHARGE = | | 9479603.0000 | RECHARGE = | | 25971.5156 |
| TOTAL IN = | | 9479603.0000 | TOTAL IN = | | 25971.5156 |
| OUT: | | | | | |
| --- | | | --- | | |
| STORAGE = | | 0.0000 | STORAGE = | | 0.0000 |
| CONSTANT HEAD = | | 0.0000 | CONSTANT HEAD = | | 0.0000 |
| DRAINS = | | 4580559.5000 | DRAINS = | | 12549.4785 |
| ET = | | 4904312.5000 | ET = | | 13436.4727 |
| RECHARGE = | | 0.0000 | RECHARGE = | | 0.0000 |
| TOTAL OUT = | | 9484872.0000 | TOTAL OUT = | | 25985.9512 |
| IN - OUT = | | -5269.0000 | IN - OUT = | | -14.4355 |
| PERCENT DISCREPANCY = | | -0.06 | PERCENT DISCREPANCY = | | -0.06 |

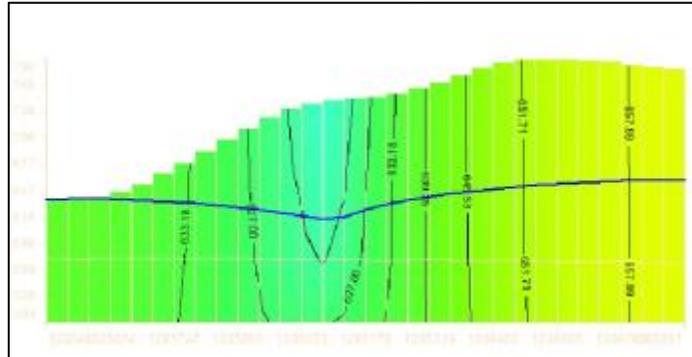
Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

Figura 5-67. Vista Lateral de la Tabla de agua abatida para Túnel La Sorda.



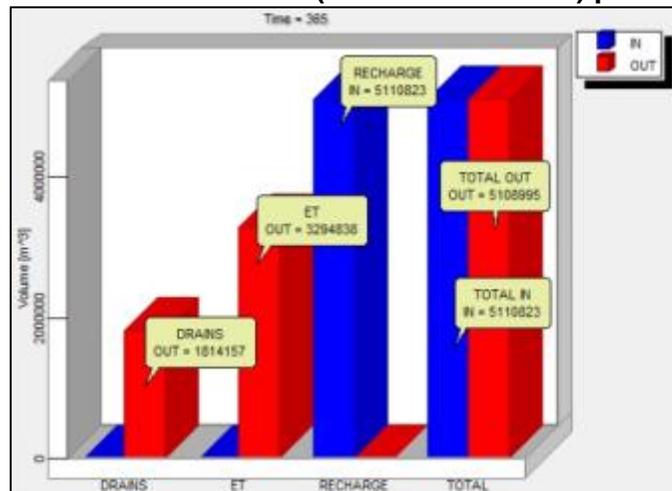
Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

Figura 5-68. Vista Transversal de la Tabla de agua abatida para Túnel La Sorda



Fuente: ELB Geología y Vías. 2016.

Figura 5-69. Cuadro de Balance Hídrico (Balance de Masas) para túnel La Sorda.



Fuente: ELB Geología y Vías. 2016.

Tabla 5-18. Tabla consolidada de Balance Hídrico para túnel La Sorda.

| VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1 IN STRESS PERIOD 1 | | | | |
|---|--|--------------|--------------------------|------------|
| CUMULATIVE VOLUMES | | L**3 | RATES FOR THIS TIME STEP | |
| | | | L**3/T | |
| IN: | | | IN: | |
| --- | | | --- | |
| STORAGE = | | 0.0000 | STORAGE = | 0.0000 |
| CONSTANT HEAD = | | 0.0000 | CONSTANT HEAD = | 0.0000 |
| DRAINS = | | 0.0000 | DRAINS = | 0.0000 |
| ET = | | 0.0000 | ET = | 0.0000 |
| RECHARGE = | | 5110823.0000 | RECHARGE = | 14002.2549 |
| TOTAL IN = | | 5110823.0000 | TOTAL IN = | 14002.2549 |
| OUT: | | | OUT: | |
| --- | | | --- | |
| STORAGE = | | 0.0000 | STORAGE = | 0.0000 |
| CONSTANT HEAD = | | 0.0000 | CONSTANT HEAD = | 0.0000 |
| DRAINS = | | 1814156.6250 | DRAINS = | 4970.2920 |
| ET = | | 3294838.0000 | ET = | 9026.9531 |
| RECHARGE = | | 0.0000 | RECHARGE = | 0.0000 |
| TOTAL OUT = | | 5108994.5000 | TOTAL OUT = | 13997.2451 |
| IN - OUT = | | 1828.5000 | IN - OUT = | 5.0098 |
| PERCENT DISCREPANCY = | | 0.04 | PERCENT DISCREPANCY = | 0.04 |

Fuente: ELB Geología y Vías. 2016.

Como uno de los resultados finales de mayor interés se presenta en la siguiente tabla el consolidado del cálculo de los caudales residuales apoyado en el modelo hidrogeológico numérico.

En cuanto a los valores encontrados para los caudales residuales en los túneles, se ha realizado socialización entre el grupo de trabajo que desarrolló el proyecto, así como con diseñadores externos, encontrando valores de referencia que permiten validar los datos calculados. Estos se indican a continuación.

- Proyecto túnel vehicular del río Manso: Hasta 450 L/s de caudal residual (construcción)
- Proyecto túnel vehicular de La Línea: Hasta 1200 L/s de caudal residual (construcción)
- Proyecto túneles vía Mulaló - Loboguerrero: Hasta 300 L/s de caudal residual (diseño)

Se debe tener en cuenta que en los dos primeros proyectos indicados no se realizó aislamiento hidráulico a los túneles mediante inyecciones.

Tabla 5-19. Tabla consolidad de Balance Hídrico para túnel La Sorda.

CÁLCULO DE CAUDAL RESIDUAL TÚNEL LA PAZ

| LOCALIZACIÓN | | | | | PARÁMETROS | | | | | | | CONSTRUCCIÓN | | | OPERACIÓN | | |
|--------------|-----------|-------|--------|--------|-----------------|-----------|-------|----------|-------------|------------|-------------------------|------------------------------|------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------|--|
| Túnel | Formación | Tramo | PK1 | PK2 | L (m) | Techo (m) | r (m) | k (m/s) | H.Const (m) | H.Oper (m) | Q (m ³ /s/m) | Q (m ³ /s/tramo) | Q (l/s/tramo) | Q (m ³ /s/m) | Q (m ³ /s/tramo) | Q (l/s/tramo) | |
| La Paz | Paz | 1 | 88+500 | 90+750 | 2250,0 | 381,1 | 5,4 | 2,74E-06 | 95,3 | 5,90 | 4,6E-04 | 1,04 | 1035,8 | 1,3E-04 | 0,29 | 292,4 | |
| La Paz | Lizama | 2 | 90+750 | 91+362 | 612,0 | 215,2 | 5,4 | 8,40E-07 | 57,9 | 5,90 | 1,0E-04 | 0,06 | 61,0 | 4,0E-05 | 0,02 | 24,4 | |
| La Paz | Umir | 3 | 91+362 | 91+700 | 338,0 | 9,5 | 5,4 | 4,20E-06 | 8,04 | 5,90 | 1,9E-04 | 0,07 | 65,7 | 2,0E-04 | 0,07 | 67,3 | |
| | | | | | 3200,0 | | | | | | | 1,16 | 1162,6 | | | | |
| | | | | | Long (m) | | | | | | | m³/s/túnel | l/s/túnel | | | | |

CÁLCULO DE CAUDAL RESIDUAL TÚNEL LA SORDA

| LOCALIZACIÓN | | | | | PARÁMETROS | | | | | | | CONSTRUCCIÓN | | | OPERACIÓN | | |
|--------------|-----------|-------|--------|--------|-----------------|-----------|-------|----------|-------------|------------|-------------------------|------------------------------|------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------|--|
| Túnel | Formación | Tramo | PK1 | PK2 | L (m) | Techo (m) | r (m) | k (m/s) | H.Const (m) | H.Oper (m) | Q (m ³ /s/m) | Q (m ³ /s/tramo) | Q (l/s/tramo) | Q (m ³ /s/m) | Q (m ³ /s/tramo) | Q (l/s/tramo) | |
| La Sorda | Umir | 1 | 93+000 | 93+660 | 660,0 | 54,1 | 5,4 | 3,45E-06 | 46,4 | 5,90 | 3,5E-04 | 0,23 | 233,4 | 1,6E-04 | 0,11 | 108,0 | |
| La Sorda | Lizama | 2 | 93+660 | 94+390 | 730,0 | 118,1 | 5,4 | 5,70E-07 | 105,3 | 5,90 | 1,0E-04 | 0,08 | 75,1 | 2,7E-05 | 0,02 | 19,7 | |
| La Sorda | Umir | 3 | 94+390 | 95+100 | 710,0 | 60,4 | 5,4 | 2,76E-06 | 53,7 | 5,90 | 3,1E-04 | 0,22 | 221,1 | 1,3E-04 | 0,09 | 92,9 | |
| | | | | | 2100,0 | | | | | | | 0,53 | 529,7 | | | | |
| | | | | | Long (m) | | | | | | | m³/s/túnel | l/s/túnel | | | | |

NOTA: El cálculo se realiza considerando un drenaje total en condición inicial. Durante la construcción del túnel en realidad éste se drena a medida que se excava por lo que el caudal real aumenta de "0" a aproximadamente 1/2 del caudal total calculado, dependiendo de la velocidad de excavación y el cruce de contactos geológicos. Durante la operación el caudal calculado supone una carga hidráulica constante por lo que en general el caudal estará por debajo de éste valor máximo. Para los cálculos se ha supuesto una permeabilidad compuesta, es decir, el efecto conjunto de la permeabilidad primaria y la permeabilidad secundaria. Para el cálculo del caudal residual en operación se supone que el túnel no ha sido sellado hidráulicamente.

Fuente: ELB Geología y Vías. 2016.

5.1.1.8 Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación

5.1.1.8.1 Análisis Regional

Existen diferentes aproximaciones y métodos para la evaluación de la vulnerabilidad hidrológica del área de influencia de un proyecto o caso de estudio. Asimismo, existen diferentes objetivos de la clasificación según la orientación de las actividades a involucrar. Estas pueden ser, por ejemplo, obras puntuales o lineales de explotación de hidrocarburos, rellenos sanitarios, embalses, canales de riego, puertos, redes de servicios públicos, entre otros. En este caso, la solución se orienta fundamentalmente a la vulnerabilidad de las aguas subterráneas debido a la afectación de un área de influencia por un proyecto lineal.

La clasificación adoptada se muestra en las tablas a continuación. Esta clasificación permite valorar efectos reales de este tipo de proyecto de acuerdo con una escala medible teniendo en cuentas las zonas en riesgo y su impacto según la sensibilidad de las aguas subterráneas

Tabla 5-20. Zonificación de la disposición hidrogeológica asociada a la vulnerabilidad hidrogeológica por contaminación.

| ZONIFICACIÓN DE LA DISPOSICIÓN HIDROGEOLÓGICA ASOCIADA A LA VULNERABILIDAD HIDROGEOLÓGICA POR CONTAMINACION | | SENSIBILIDAD |
|---|---|--------------|
| Zonas de Mayor Interés hidrogeológico | -Acuíferos no confinados -Acuíferos asociados a suelos permeables. | Alta 4 |
| Zonas de Moderado Interés hidrogeológico | - Acuíferos semiconfinados - Acuíferos asociados a suelos semipermeables. | Media 3 |
| Zonas de bajo Interés hidrogeológico | - Capas semipermeables con niveles permeables - Zonas de escorrentía y recarga - Capas impermeables - Acuíferos asociados a suelos impermeables. | Baja 2 |

Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

Tabla 5-21. Zonificación de la disposición hidrogeológica asociada a la disponibilidad del recurso hídrico.

| ZONIFICACIÓN DE LA VULNERABILIDAD HIDROGEOLÓGICA POR DISPONIBILIDAD DEL RECURSO HIDRICO | | SENSIBILIDAD |
|---|---|--------------|
| Zonas de Mayor Interés hidrogeológico | - Fuentes hídricas con alta vocación de producción y con bajo o medio potencial de recarga. - | Alta 4 |
| Zonas de Moderado Interés hidrogeológico | - Fuentes hídricas con alta vocación de producción y con alto potencial de recarga. - Fuentes hídricas con media vocación de producción. | Media 3 |
| Zonas de bajo Interés hidrogeológico | - Fuentes hídricas con baja o nula vocación de producción. | Baja 2 |

Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

Los métodos de evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación se agrupan en cuatro modelos los cuales serán descritos a continuación.

- Modelos de simulación: Emplean ecuaciones numéricas que simulan los procesos de transporte por los que se rigen los contaminantes; son utilizados para la evaluación de vulnerabilidad específica.
- Métodos estadísticos: Los métodos estadísticos son empleados para cuantificar la vulnerabilidad de la contaminación del agua subterránea determinando la dependencia o la relación estadística entre la contaminación observada, las condiciones ambientales observadas que pueden o no caracterizar vulnerabilidad y las actividades relacionadas con el uso del suelo, que sean fuentes potenciales de la contaminación. Una vez un modelo de esta dependencia o de la relación se ha desarrollado con análisis estadístico, la probabilidad de la contaminación puede ser evaluada. La vulnerabilidad se expresa como probabilidad de contaminación. Cuanta más alta es la probabilidad de contaminación, más alta será la vulnerabilidad.
- Métodos paramétricos: Están basados en la combinación de diferentes parámetros (litología, suelo, espesor de la zona no saturada, etc.), y se utilizan para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca. Cada parámetro es puntuado cuantitativamente y se les pueden asignar distinto valor de ponderación para determinar el resultado final que es un índice numérico de vulnerabilidad (iV).
- Ambientes Hidrogeológicos. Evalúan la vulnerabilidad de grandes ambientes hidrogeológicos en términos cualitativos, utilizando una superposición de mapas temáticos. Es aplicable cuando la información básica específica es inadecuada o escasa.

La selección y aplicación de cualquiera de los métodos mencionados dependerá de la información existente, de la densidad de puntos de información y de la escala de evaluación.

5.1.8.8.2 Métodos de Evaluación

Los métodos de evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación se agrupan en los cuatro modelos descritos a continuación.

- Modelos de simulación. Usan ecuaciones numéricas que simulan los procesos de transporte por los que se rigen los contaminantes. Son utilizados para la evaluación de la vulnerabilidad específica.
- Métodos estadísticos. Los métodos estadísticos son utilizados para cuantificar la vulnerabilidad de la contaminación de la agua subterránea determinando la dependencia o la relación estadística entre la contaminación observada, las condiciones ambientales observadas que pueden o no caracterizar vulnerabilidad y las actividades relacionadas con el uso del suelo, que sean fuentes potenciales de la contaminación (por el uso del fertilizante y ocurrencia séptica del tanque). Una vez un modelo de esta dependencia o de la relación se ha desarrollado con análisis estadístico, la probabilidad de la contaminación puede ser evaluada. La vulnerabilidad se expresa como probabilidad de contaminación. Cuanta más alta es la probabilidad de contaminación, más alta será la vulnerabilidad.
- Métodos de superposición e índices (o paramétricos). Están basados en la combinación de diferentes parámetros (litología, suelo, espesor de la zona no saturada, etc.), y se utilizan para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca. Cada parámetro es puntuado cuantitativamente y se les pueden asignar distinto valor de ponderación para determinar el resultado final que es un índice numérico de vulnerabilidad (iV).
- Ambientes Hidrogeológicos. Evalúan la vulnerabilidad de grandes ambientes hidrogeológicos en términos cualitativos, utilizando una superposición de mapas temáticos. Es aplicable cuando la información básica específica es inadecuada o escasa.

La selección y aplicación de cualquiera de los métodos mencionados dependerá de la información existente, de la densidad de puntos de información y de la escala de evaluación.

5.1.8.8.3 Método GOD

El sistema de indexación GOD, es aplicable a áreas de trabajo con escasa información, con irregular distribución de datos o con incertidumbre de la información. Esta metodología comprende tres parámetros: G, O y D; cuyos valores son asignados de acuerdo con la contribución en la defensa a la contaminación, los cuales se describen a continuación:

- G (Groundwater occurrence) Corresponde al grado de confinamiento hidráulico con la identificación del tipo de acuífero, su índice puede variar entre 0 y 1. El

modo de ocurrencia varía entre la ausencia de acuíferos (evaluado con índice 0) en el extremo izquierdo y la presencia de un acuífero libre o freático (evaluado como índice 1) en el extremo derecho, pasando por acuíferos artesianos, confinados y semiconfinados.

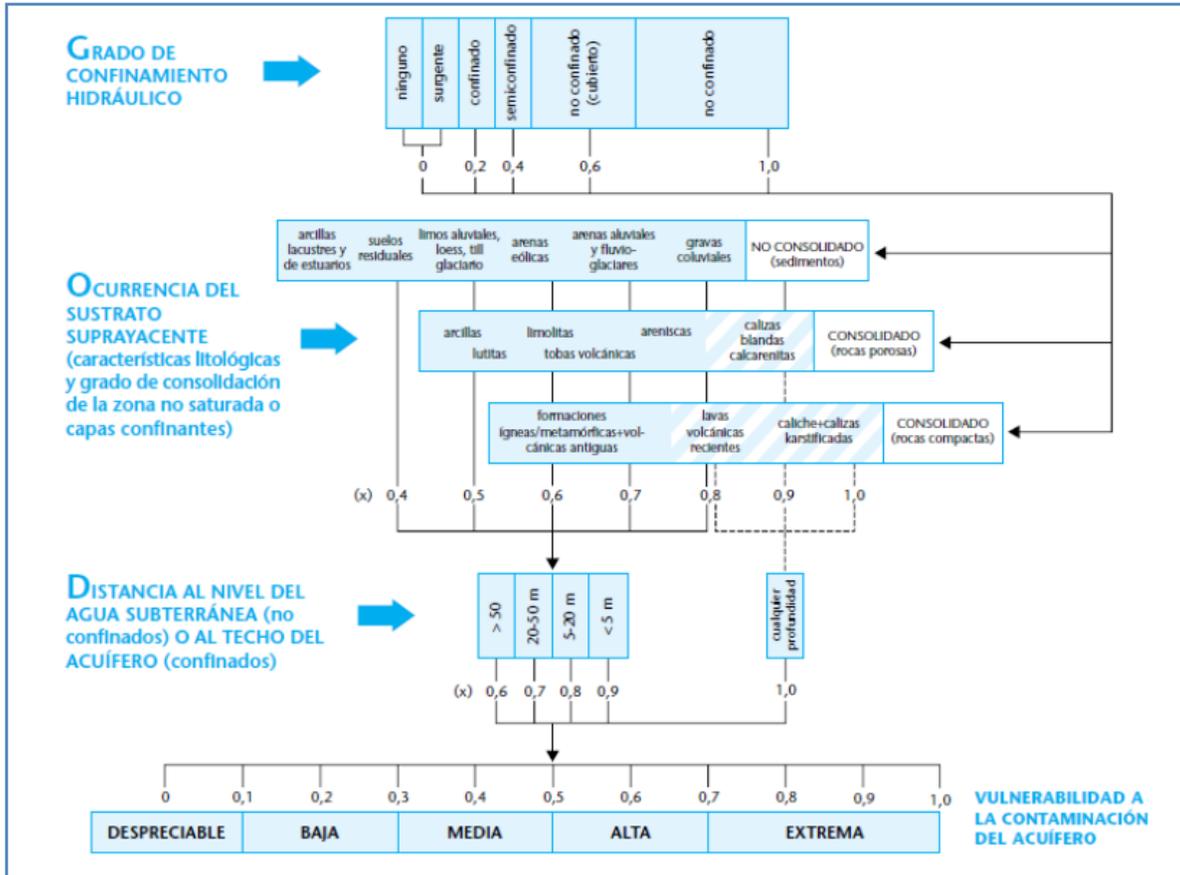
- O (Overall aquifer class) Corresponde a la caracterización de la zona no saturada del acuífero o de las capas confinantes. Los índices más bajos (0,4) corresponden a los materiales no consolidados, mientras que los más altos (0,9 – 1,0) corresponden a rocas compactas fracturadas o karstificadas.
- D (Depth). Se refiere a la profundidad del nivel freático en acuíferos libres o a la profundidad del techo del acuífero, en los confinados. Los índices más bajos (0,6) corresponden a acuíferos libres con profundidad mayor a 50 m; mientras que los índices altos (1,0) corresponden a acuíferos que independientemente de la profundidad se encuentran en medios fracturados. Para el caso de los acuíferos libres la profundidad del nivel estático está sujeta a la oscilación natural.

El índice de vulnerabilidad GOD se obtiene, entonces, de multiplicar los valores asignados a cada parámetro:

$$iV_{GOD} = G \times O \times D.$$

Los resultados del cálculo del iV pueden variar $<0,1$ y $1,0$, obteniendo las categorías de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación.

Figura 5-70. Metodología GOD Para Evaluar el Índice de Vulnerabilidad de Contaminación de los Acuíferos.



Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

Evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del utilizando la metodología GOD

Para el caso del acuífero en el Valle Medio del Río Sucio, éste se comporta como un Acuífero Libre. De acuerdo a lo anterior, al parámetro “G” se le asigna un valor de 1.0. Al Parámetro “O” el valor de 1 y al Parámetro “D” se le asigna un valor de 1.0.

Por consiguiente tenemos la siguiente operación:

$$iV_{GOD} = 1 \times 1 \times 1 = 1$$

Según lo anterior para el índice de Vulnerabilidad del Acuífero asociado a la zona ELB-1 se calcula un valor de 1, por lo tanto se determina que la vulnerabilidad a la contaminación es Muy Alta.

Los resultados de la evaluación de la vulnerabilidad se encuentran resumidos en un mapa de Vulnerabilidad Local.

Tabla 5-22. Grado de confinamiento hidráulico.

| NINGUNO (SIN ACUIFERO) | SURGENTE | CONFINADO | SEMICONFINADO | NO CONFINADO CUBIERTO | NO CONFINADO DESCUBIERTO |
|------------------------|----------|-----------|---------------|-----------------------|--------------------------|
| 0 | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 1 |

Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

Tabla 5-23. Ocurrencia del sustrato litológico.

| No permeables | Muy poco permeables | Poco permeables | Poco a medianamente permeables | Medianamente Permeables | Media a altamente permeables | Altamente permeables |
|---------------|---------------------|-----------------|--------------------------------|-------------------------|------------------------------|----------------------|
| 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 |

Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

Tabla 5-24. Distancia al nivel del agua subterránea.

| > 100 metros | 20 – 100 metros | 5 – 20 metros | < 5 metros | Muy permeables |
|--------------|-----------------|---------------|------------|----------------|
| 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1 |

Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

Tabla 5-25. Puntaje y grado de vulnerabilidad obtenida a partir del método GOD.

| PUNTAJE VULNERABILIDAD | |
|------------------------|----------|
| 0.7 – 1.0 | Muy alta |
| 0.5 – 0.7 | Alta |
| 0.3 – 0.5 | Moderada |
| 0.1 – 0.3 | Baja |
| < 0.1 | Muy baja |

Fuente: ELB Geología y Vías. 2016

Para la tabla de vulnerabilidad se determinaron algunos aspectos importantes como son: el grado de confinamiento hidráulico (GCH), ocurrencia del sustrato suprayacente (OSS), distancia al nivel del agua subterránea (DNAS) y el tipo de unidad hidrogeológica para así poder generar una evaluación y determinar el nivel de vulnerabilidad ya sea moderada, alta y muy alta. **Tabla 5-26**

Tabla 5-26. Vulnerabilidad

| ZONA AFECTACION | TIPO | LIMITES | GCH | OSS | DNAS | PTOS | EVALUACIÓN |
|-----------------|----------------------------------|----------|-----|-----|------|------|------------|
| | | K73,+900 | | | | | |
| ZV_01 | Confinado | K74,+199 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 0,5 | Alta |
| ZV_02 | Acuifugo | K74,+531 | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 0,6 | Alta |
| ZV_03 | Acuitardo | K75,+776 | 0,6 | 0,7 | 0,9 | 0,4 | Moderada |
| ZV_04 | Acuifugo | K76,+228 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,3 | Moderada |
| ZV_05 | Acuitardo | K80,+901 | 0,8 | 0,6 | 0,8 | 0,4 | Moderada |
| ZV_06 | Acuifugo | K81,+846 | 0,8 | 0,6 | 0,8 | 0,4 | Moderada |
| ZV_07 | Acuitardo | K83,+899 | 0,6 | 0,8 | 0,7 | 0,3 | Moderada |
| ZV_08 | Acuifugo | K85,+014 | 0,6 | 0,8 | 0,8 | 0,4 | Moderada |
| ZV_09 | Acuitardo | K85,+464 | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 0,4 | Moderada |
| ZV_10 | Acuifugo | K85,+748 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 0,5 | Alta |
| ZV_11 | Acuifugo - Confinado | K86,+400 | 0,8 | 0,7 | 0,9 | 0,5 | Alta |
| ZV_12 | Confinado | K87,+036 | 0,7 | 0,7 | 0,8 | 0,4 | Moderada |
| ZV_13 | Acuifugo | K87,+855 | 0,6 | 0,8 | 0,7 | 0,3 | Moderada |
| ZV_14 | Acuitardo | K88,+174 | 0,6 | 0,8 | 0,8 | 0,4 | Moderada |
| ZV_15 | Confinado | K88,+837 | 0,9 | 0,7 | 1 | 0,6 | Alta |
| ZV_16 | Acuifugo | K89,+347 | 0,9 | 0,8 | 1 | 0,7 | Muy Alta |
| ZV_17 | Confinado | K89,+916 | 0,9 | 0,8 | 1 | 0,7 | Muy Alta |
| ZV_18 | Confinado - Acuitardo | K91,+001 | 0,9 | 0,6 | 1 | 0,5 | Alta |
| ZV_19 | Acuifugo | K91,+821 | 0,9 | 0,7 | 0,9 | 0,6 | Alta |
| ZV_20 | Libre | K92,+509 | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 0,4 | Moderada |
| ZV_21 | Libre - Acuitardo | K93,+130 | 0,9 | 0,7 | 1 | 0,6 | Alta |
| ZV_22 | Confinado | K93,+508 | 0,9 | 0,8 | 1 | 0,7 | Muy Alta |
| ZV_23 | Acuitardo | K94,+265 | 0,9 | 0,6 | 1 | 0,5 | Alta |
| ZV_24 | Alternancia Confinado - Libre | K94,+753 | 0,9 | 0,7 | 1 | 0,6 | Alta |
| ZV_25 | Acuifugo | K95,+551 | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 0,4 | Moderada |
| ZV_26 | Confinado | K96,+206 | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 0,4 | Moderada |
| ZV_27 | Acuitardo | K98,+489 | 0,7 | 0,8 | 0,8 | 0,4 | Moderada |
| ZV_28 | Acuifugo | K98,+765 | 0,8 | 0,8 | 0,8 | 0,5 | Alta |

Fuente: ELB Geología y Vías. 2016