



IMPACTO EN LAS CONDICIONES
GEOMORFOLÓGICAS CAUSADO
POR EL FENÓMENO DE LA NIÑA
2010-2011 EN EL ÁREA DEL
PROYECTO RUTA DEL SOL,
SECTOR 1, TRAMO 1

INFORME FINAL

AGOSTO DE 2013



Gall Zeidler Consultants
GEOTECHNICS | TUNNEL DESIGN | ENGINEERING

DISCLAIMER INFORME FINAL CONSULTORÍA REALIZADA POR LA FIRMA GALL ZEIDLER CONSULTANTS SOBRE EL TRAMO 1 DEL PROYECTO RUTA DEL SOL SECTOR 1.

El presente informe ha sido elaborado por Gall Zeidler Consultants LLC para la Agencia Nacional de Infraestructura y el Consorcio Vial Helios. Toda la información aquí presentada proviene de las referencias que en el mismo informe se presentan. Teniendo en cuenta el efecto vinculante y con sentido de arbitraje que se ha solicitado por las partes involucradas, es importante resaltar que el Capítulo Número 10, en el cual se resuelven las preguntas contractuales planteadas para la ejecución de la Consultoría, debe leerse en forma integral, toda vez que las respuestas emitidas son vinculantes entre sí. Igualmente se recomienda, no hacer aseveraciones basadas en la respuesta a una pregunta en particular en forma aislada, sin tener en cuenta la respuesta dada a las otras preguntas.

Este informe se limita al campo de las consideraciones de orden técnico, con el fin de resolver la diferencia contractual existente ente la Agencia Nacional de Infraestructura y el Concesionario Consorcio Vial Helios en el marco del Contrato de Concesión 002 de 2010 – Proyecto Ruta del Sol Sector 1 y como tal, se limita a resolver de manera motivada y concluyente, las preguntas formuladas por las partes, cuyo objetivo primordial es determinar los efectos que el denominado “*Fenómeno de la Niña*” ocurrido en el País a finales del año 2010 - último trimestre - y los primeros meses del año 2011 - primer cuatrimestre -, de manera concreta si el citado fenómeno pudo o no causar efectos en el terreno seleccionado para la construcción del Tramo 1 del Proyecto Ruta del Sol 1, entre Villeta - Intersección El Cune donde inicia el Sector 1 - y Guaduas - Intersección San Miguel donde termina el Tramo 1 del Sector 1-.

Las partes se obligaron a aceptar sin ninguna reserva y con carácter vinculante los resultados del presente informe, sin embargo el informe por tener carácter meramente técnico como se anotó, en ningún caso, se refiere a los efectos financieros o jurídicos que repercutan sobre el Contrato, por lo que del mismo no podrán derivarse modificaciones del alcance contractual. Así las cosas, en caso de requerirse modificaciones, éstas serán efectuadas en los términos y condiciones señalados en el Contrato y en la Ley Aplicable.



Gall Zeidler Consultants
 GEOTECHNICS | TUNNEL DESIGN | ENGINEERING

44345 Premier Plaza
 Oficina 210
 Ashburn, VA. 20147
 USA
 www.gzconsultants.com



AN	KZ	VG	08/26/2013	00	FINAL		
preparó	Revisó	Aprobó	Fecha	Rev.	Estado	Motivo de la revisión	
Ingeniero Especialista:			Axel Nitschke, Ph.D, PE.		Ingeniero Principal: Vojtech Gall. Ph.D, PE.		
Registro N°:			VA 047029		Registro N°: VA 025740		
Estado de la emisión		Final					
Tipo de Documento		Informe					
Área/Actividad		Consultoría					
Título		RUTA DEL SOL – SECTOR 1 – TRAMO 1					
Sub-título		Impacto en las Condiciones Geomorfológicas por el Fenómeno de La Niña 2010-2011					
Nombre del Documento							
1011 R 001 S FINAL							

CONTENIDO

1	Resumen Ejecutivo	9
2	Introducción y Antecedentes.....	21
2.1	Resumen del Trazado del Proyecto	21
2.2	Partes Contractuales y Entidades Involucradas.....	22
2.3	Fenómeno de La Niña 2010–2011	22
2.4	Objetivo de la Consultoría	23
3	Metodología	25
3.1	Enfoque Típico de Diseño de Carreteras en Áreas Rurales	25
3.2	Disciplinas Involucradas.....	26
3.3	Triángulo de Interacción.....	27
3.4	Impacto Meteorológico en los Parámetros de Diseño.....	28
3.5	Revisión de la Línea Base del Proyecto.....	29
3.5.1	Línea Base Pasada	30
3.5.2	Línea Base Presente	30
3.5.3	Cambios en la Línea Base	31
3.6	Cambio al Trazado.....	31
3.7	Estructura del Informe y del Enfoque	31
4	Descripción de Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1	34
4.1	Geología	34
4.1.1	Configuración Tectónica Regional.....	34
4.1.1.1	Estructuras Tectónicas del Área del Proyecto	36
4.1.2	Principales Formaciones Geológicas – Unidades Litológicas	38
4.1.3	Suelos Superficiales (Depósitos de Origen Cuaternario)	41
4.1.4	Riesgos Geológicos.....	42
4.1.4.1	Deslizamientos de Tierra y Desestabilización de la Laderas	42
4.1.4.2	Sismicidad	44
4.2	Geotecnia.....	46
4.2.1	Previsiones de Movimiento de Tierras – Diseño Geométrico	46
4.2.2	Entorno Geotécnico.....	47

4.2.3	Caracterización Geológica y Secciones Transversales Interpretadas .	50
4.2.4	Consideraciones Geotécnicas Sobre la Estabilidad de Taludes en Corte y en Relleno Estructural, Muros de Contención y Taludes Naturales Adyacentes.....	52
4.2.5	Evaluación Geotécnica - Resistencia y Meteorización de la Masa Rocosa y Causas de Inestabilidad de Taludes.....	67
4.2.6	Posibles Mecanismos de Falla – Consideraciones de Inestabilidad de Taludes.....	69
4.2.7	Comentarios sobre Parámetros Geotécnicos - Diseño Fase 2.....	70
4.2.8	Normativa Aplicable.....	72
4.3	Hidrología.....	76
4.3.1	Cuencas.....	76
4.3.2	Alcantarillas.....	81
4.3.3	Ríos y Cuencas Mayores.....	83
4.3.4	Datos Recientes de Inundación.....	84
4.3.5	Diseño de Inundación de Alcantarillas.....	85
4.3.6	Hidrogeología y Agua Subterránea.....	87
4.3.7	Permeabilidad.....	87
4.3.8	Taludes y Deslizamientos de Tierra.....	91
4.3.9	Impacto de La Niña.....	93
4.4	Uso del Suelo.....	95
4.4.1	Descripción General.....	95
4.4.2	Villeta.....	96
4.4.3	Guaduas.....	96
4.4.4	Reserva Nacional Natural San Francisco.....	97
4.4.5	Reserva Natural La Esmeralda.....	98
5	Información Climática General del Área del Proyecto.....	99
5.1	Estaciones de Medición Disponibles en la Región.....	99
5.2	Precipitación Mensual.....	101
5.3	Análisis de valores extremos.....	103
5.3.1	Análisis de Picos sobre Umbral.....	103

5.3.2	Distribuciones de Probabilidad	104
5.3.3	Análisis de valores extremos de precipitación en las estaciones El Tuscolo y Utica	104
5.4	La Niña 2010-2011.....	107
5.5	Resumen.....	114
6	Elementos estructurales de Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1	116
6.1	Parte 1 – Ascenso desde Villeta hacia el Túnel El Trigo – Portal oriental 118	
6.1.1	Puentes	119
6.1.2	Diseño del Trazado y de la Vía	120
6.1.3	Elementos estructurales del segmento 1-1	122
6.1.4	Elementos Estructurales del Segmento 1-2	124
6.1.5	Elementos estructurales del segmento 1-3	129
6.1.6	Elementos Estructurales del Segmento 1 - 4	134
6.2	Parte 2 – Túneles El Trigo y La Cumbre	138
6.2.1	Diseño del Trazado y de la Vía	138
6.2.2	Estructuras de Puentes	139
6.2.3	Túneles.....	140
6.2.4	Elementos Estructurales en el Segmento 2-1	140
6.2.5	Elementos Estructurales del Segmento 2-2	141
6.2.6	Elementos Estructurales del Segmento 2-3	142
6.3	Parte 3 – Descenso desde el Túnel La Cumbre hacia Guaduas	143
6.3.1	Diseño del Trazado y la Vía.	144
6.3.2	Estructuras de Puentes	145
6.3.3	Elementos Estructurales del Segmento 3-1	146
6.3.4	Elementos Estructurales del Segmento 3-2	149
7	Impactos Principales del Fenómeno de La Niña.....	152
7.1	Impacto Para la Sociedad Colombiana.....	152
7.1.1	Consecuencias del Fenómeno de La Niña 2010-2011	152
7.1.2	Plan Nacional de Desarrollo	157

7.1.3	Respuesta a Desastres en Colombia, Según lo Establecido en el PND.	158
7.2	Impacto en el Clima y la Geomorfología Local.....	162
7.2.1	Efectos de Eventos de Precipitación en Deslizamientos e Inundaciones	162
7.2.2	Efectos Irreversibles de Meteorización en el Comportamiento de Rocas Débiles y Propiedades en Ingeniería	165
7.2.3	Pronóstico de Deslizamientos de IDEAM	167
7.2.4	Inventario de Deslizamientos del IDEAM	168
7.2.5	Eventos de Lluvia a Largo Plazo	176
7.2.6	Hidrología.....	178
8	Vulnerabilidad a Eventos Climáticos Extremos.....	179
8.1	Antecedentes	179
8.2	Amenazas	181
8.3	Exposición.....	186
8.4	Sensibilidad (Susceptibilidad)	187
8.4.1	Cortes.....	188
8.4.2	Rellenos	190
8.4.3	Puentes	191
8.5	Resumen de Factores Clave para Vulnerabilidades Altas de Diferentes Tipos de Estructuras.	192
9	Registro de Riesgo de los Elementos Estructurales del Trazado	194
9.1	Enfoque del Manejo de Riesgos	194
9.2	Bases del Registro de Riesgos	194
9.2.1	Impacto del Riesgo.....	195
9.2.2	Probabilidad de Riesgo	197
9.2.3	Matriz de Riesgo.....	208
9.3	Registro de riesgos	210
9.3.1	Sección K0+000 - K 0+120.....	210
9.3.2	Sección K2+897 - K3+400.....	211
9.3.3	Sección 3+400 - 4+120	211

9.3.4	Sección K4+120 - K4+259.....	212
9.3.5	Sección K6+869 - K8+000.....	212
9.3.6	Sección K8+215 - K8+315.....	212
9.3.7	Sección K9+287 - K9+834.....	213
9.3.8	Sección K9+834 - K10+132.....	213
9.3.9	Sección K10+132 - K10+780.....	214
9.3.10	Sección K11+069 - K11+676.....	214
9.3.11	Sección K11+676 - K11+942.....	214
9.3.12	Sección K11+942 - K12+150.....	215
9.3.13	Sección K12+150 - K12+319.....	215
9.3.14	Sección K17+950 - K18+262.....	215
9.3.15	Sección K18+262 - K18+342.....	216
9.3.16	Sección K18+342 - K19+150.....	216
9.3.17	Sección K21+100 - K21+219.....	217
9.3.18	Sección K21+310 - K21+470.....	217
9.4	Resumen.....	217
10	Respuestas a las Preguntas Específicas.....	220
10.1	Existencia del hecho sobreviniente.....	220
10.1.1	Pregunta 1a.....	220
10.1.2	Pregunta 1b.....	223
10.1.3	Pregunta 1c.....	226
10.2	Soluciones Sobre el Trazado Actual.....	226
10.2.1	Pregunta 2a.....	226
10.2.2	Pregunta 2b.....	229
10.3	Razones Para Un Nuevo Trazado.....	230
	APÉNDICES.....	233
	REFERENCIAS.....	235
	INDICE DE FIGURAS.....	243
	INDICE DE TABLAS.....	246

1 Resumen Ejecutivo

El Proyecto Ruta del Sol es una Carretera en doble calzada que conectará Bogotá, la capital colombiana, con la Costa Atlántica. Este informe trata únicamente sobre el Tramo 1 del Sector 1, entre los municipios de Villeta y Guaduas en el Departamento de Cundinamarca.

El Tramo 1 de la Ruta del Sol - Sector 1 inicia con un ascenso en superficie hacia la montaña, continuando con dos túneles paralelos, un terraplén y un puente, para seguir con dos túneles paralelos. Después de esta sección, el trazado del Tramo 1 desciende hasta cercanías de Guaduas.

Las partes involucradas contractualmente en el Proyecto Ruta del Sol - Sector 1 son el propietario, Agencia Nacional de Infraestructura (ANI), anteriormente conocido como Instituto Nacional de Concesiones (INCO) y el concesionario, Consorcio Vial Helios (HELIOS). La propuesta económica para el diseño y construcción de los trabajos, presentada por HELIOS en el año 2009, se basó en el estudio de factibilidad realizado por International Finance Corporation (IFC), una compañía del Grupo Banco Mundial, con Ingeniería y Diseño de Euroestudios (EE). ANI adjudicó a HELIOS el proyecto en Diciembre de 2009.

Durante los últimos meses del año 2010 y primeros del año 2011, una variación climática periódica conocida como el Fenómeno de La Niña impactó el clima en varias regiones del mundo y del País. Inundaciones y Deslizamientos se reportaron a largo y ancho del país, a tal punto que el gobierno colombiano declaró la Situación de Desastre Nacional. De acuerdo al Índice Multivariado ENOS (MEI, por sus siglas en inglés), los eventos intensos de La Niña han ocurrido en al menos nueve ocasiones desde el año 1950, resultando en un promedio de recurrencia de alrededor de seis a siete años. La Niña hace referencia al enfriamiento periódico de la de la superficie del océano en el Pacífico Central y Centro-Oriental. La Niña representa la fase fría el ciclo ENOS, indicada en azul (índice negativo) en la Figura 1-1. De acuerdo al MEI, el evento de La Niña 2010-2011 es uno de los más pronunciados desde el año 1950.

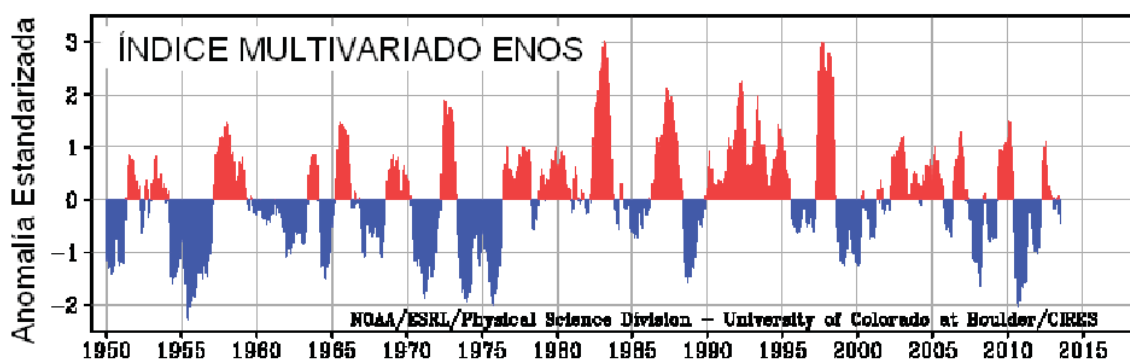


Figura 1-1. Índice Multivariado ENOS (MEI) entre los años 1950 y 2013 [ref. 316]

La Geomorfología del área por la cual el Tramo 1 cruza las montañas es, en general, altamente vulnerable a deslizamientos. La Geomorfología se define como “el estudio de las características físicas de la superficie de la tierra y su relación con las estructuras geológicas” (diccionario Oxford). Los deslizamientos recientes (años 2010–2011) y los históricamente observados a lo largo del área designada para el corredor del proyecto, así como otras características geológicas hacen el terreno vulnerable en términos de estabilidad de ladera a largo plazo, generaron una disputa técnica entre ANI y HELIOS sobre la influencia del fenómeno de La Niña sobre el diseño, la construcción, la seguridad, la sostenibilidad y la confianza de la operación de la Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1.

Gall Zeidler Consultants (GZ) ha sido comisionado por ANI y HELIOS para investigar el impacto causado por el Fenómeno de La Niña durante la temporada 2010-2011 y sus consecuencias sobre el desempeño a largo plazo de la Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1; respondiendo seis preguntas específicas, las cuales fueron formuladas de manera conjunta entre ANI y HELIOS. En julio de 2013 especialistas del equipo de GZ visitaron el área del proyecto y asistieron a reuniones con numerosas agencias gubernamentales en Bogotá, con la asistencia de ANI y HELIOS, a quienes reconocemos su colaboración. Durante la visita al sitio, los especialistas visitaron un total de 18 ubicaciones a lo largo del trazado del Proyecto, tomando nota de las condiciones geológicas y geomorfológicas actuales, así como sus potenciales cambios debidos a las estructuras del Tramo 1. La visita al sitio concluyó con un sobrevuelo en helicóptero sobre el Sector 1 completo, con atención especial a las principales características topográficas y geológicas a lo largo del trazado del Tramo 1.

GZ asignó a un equipo de expertos en las áreas de geología, meteorología, hidrología, ingeniería civil, estructural transporte e ingeniería geotécnica, quienes

trabajaron de manera articulada para la generación del presente informe multidisciplinario.

La interface entre la ingeniería geotécnica y la meteorología en general no es necesariamente la variable fundamental en proyectos de infraestructura, debido a que se definen y asumen parámetros razonablemente conservadores con respecto a la influencia meteorológica en la geotecnia. Sin embargo, para el caso especial de este proyecto, el Fenómeno de La Niña, como ocurrió en la temporada 2010-2011, presenta condiciones excepcionales.

Este informe presenta un resumen de antecedentes sobre el área del proyecto, el clima y el Diseño Fase 2 en los Capítulos 4, 5 y 6. El Diseño Fase 2 (actual) ha sido analizado en detalle. El Diseño Fase 2 lleva al Diseño Fase 1 (diseño preliminar) y lo desarrolla para finalizar la geometría del proyecto y suministrar diseños estructurales, incluyendo análisis suplementarios. Los Capítulos subsecuentes discuten el impacto específico del Evento La Niña 2010-2011 (en el Capítulo 7), la vulnerabilidad del diseño a eventos extremos meteorológicos (en el Capítulo 8) y un registro de riesgo (en el Capítulo 9). Finalmente, las respuestas a las seis preguntas específicas planteadas por ANI y HELIOS se dan en el Capítulo 10.

Geología

La configuración tectónica de Colombia es compleja debido a la convergencia de tres placas tectónicas, las cuales han producido extensos plegamientos, generando fallas y levantamientos de la corteza terrestre en el área del proyecto. Se encuentran dos principales Sistemas de Fallas, el Sistema de Fallas Quebrada Negra y el Sistema de Fallas de Bituima, y una falla importante llamada Falla Alto del Trigo. Todas con rumbo Norte – Sur y son cruzadas por el trazado. Una cuarta falla, con rumbo este – oeste, llamada Falla La Magdalena, es también cruzada por la vía.

Las formaciones rocosas de la parte más oriental de la vía son dominadas por depósitos marinos, los cuales incluyen importantes afloramientos (o exposiciones) de lodolitas de las formaciones Útica y Trincheras, entre otras. Hacia el occidente de la Falla Alto del Trigo presenta rocas más jóvenes de origen terrestre, la cual incluye las formaciones Hoyón y San Juan de Río Seco.

Depósitos de edad cuaternaria incluyendo aluviones y coluviones yacen sobre las formaciones rocosas en diversas áreas del trazado. Los depósitos aluviales se asocian con las rutas de drenaje de las quebradas y ríos locales, mientras que los depósitos coluviales se originan de las inestabilidades de las laderas en rocas sedimentarias frecuentemente débiles, de grano fino y altamente meteorizadas.

Depósitos de suelos residuales se encuentran también presentes en el área del proyecto.

Son diversos los factores que contribuyen al potencial de deslizamientos en el área de la Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1, e incluyen la litología subyacente, el grado de meteorización de las rocas más susceptibles, la presencia de fallas, el buzamiento de los estratos, los procesos fluviales, la presencia de aguas subterráneas y la pérdida de vegetación de las laderas. Los deslizamientos son frecuentes en Colombia, escarpes de antiguos deslizamientos se encuentran distribuidos en las laderas a lo largo del trazado. Grandes Movimientos en Masa, incluyendo el deslizamiento El Cune y el deslizamiento de San Francisco, aproximadamente en el K0+000 (justo antes del inicio del Tramo 1) y en el K18+300 respectivamente, han ocurrido. En ellos, una combinación de la composición litológica, fallas activas, alta saturación del terreno y niveles de aguas subterráneas han causado altos índices de meteorización, erosión y eventuales fallas de ladera. Estos factores probablemente crearán futuras fallas de ladera en la región.

Geotecnia

Una revisión de los resultados de la elaboración del mapa geológico y las perforaciones exploratorias llevadas a cabo en el área como parte del Diseño Fase 2 indica que una porción significativa de roca de sedimento marino en la parte oriental del Tramo 1, consistente en materiales arcillosos negros (plásticos, de grano fino). Estas rocas se degradan y meteorizan rápidamente al ser expuestas al aire y al agua, con pérdidas significativas de rigidez y resistencia. La parte occidental del trazado frecuentemente se compone de más areniscas, calizas y conglomerados que la parte oriental, la cual también contiene abundantes intercalaciones de material de grano fino que se meteoriza generando planos de debilidad.

La habilidad de mantener la estabilidad de cortes de alturas medias a altas, y las laderas naturales adyacentes, es de gran importancia para para el proyecto, especialmente considerando aquellas situadas en rocas débiles tales como lutitas y lodolitas que deben resistir variaciones climatológicas normales y extremas, por un periodo de tiempo de varios años a décadas (condición del Sector 1, Tramo 1). Este asunto se ve agravado en sitios donde la orientación (rumbo y buzamiento) de la estratificación, y las superficies de “resbalamiento” de los materiales de grano fino tienen componentes “hacia afuera del talud” (apuntando hacia el corte propuesto), lo cual puede estimular movimientos en masa y deslizamientos.

Dos mecanismos principales de falla han sido identificados. Uno es el deslizamiento/corrimiento de masas importantes de suelo de relativamente baja

densidad, saturados, que yacen sobre una superficie o plano inclinado de materiales rocosos relativamente más competentes. Los depósitos superficiales pueden incluir una combinación de suelos coluviales, aluviales y residuales. El espesor de este tipo de deslizamiento puede ser el espesor de los depósitos de suelos saturados que, en base a nuestra interpretación de las condiciones del lugar, podría tener varios metros de espesor dependiendo de la ubicación (por ejemplo: el deslizamiento de San Francisco reactivó de materiales coluviales de deslizamiento).

El segundo mecanismo principal de falla incluye deslizamientos de roca sobre una capa débil de lutitas o lodolitas (meteorizadas, húmedas y resbaladizas) en particular cuando el ángulo de buzamiento aparente de la roca sedimentaria está orientado hacia afuera del talud natural existente o excavado. Esto puede agravarse por la erosión del pie del talud. El espesor de la masa deslizante en este caso podría ser considerablemente mayor que el primer mecanismo y podría alcanzar espesores de unas pocas decenas de metros.

Hidrología

El trazado propuesto de la Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1 no cruza ningún río importante, pero está situado en las laderas distantes de valles fluviales por lo que cruza un gran número de pequeñas cuencas. Un total de 81 cruces de arroyos se han planeado. Los tamaños están diseñados para tormentas de 1 en cada 100 años con una duración de diez minutos para que coincida con el tamaño de cuencas. Para facilitar el mantenimiento y la construcción modular, se proponen alcantarillas tipo cajón estándar, con secciones transversales estandarizadas.

EL trazado cruza unos pocos ríos con cuencas más grandes, incluyendo la Quebrada El Cune en el K2+054 y K9+121, la Quebrada Honda en el K11+800, el Río San Francisco en el K14+900 y el K18+308 y el Río Honda en el K21+161, los cuales están siendo cruzados con viaductos o puentes de alto nivel, por lo que la capacidad de inundación del río es en gran medida irrelevante. Sin embargo, la profundidad de la cimentación de los puentes y la protección de los pilares de cimentación tendrán que considerar los niveles de inundación.

Los mejores registros de flujo de los ríos en la región son del Río Villeta en Tobia, donde existe un registro continuo de treinta años de buena calidad. La duración más larga (semanas o meses) de eventos de caudales de inundaciones entre el 2010 y 2011 parecen ser más importantes que los acontecimientos de corta duración debido a unos días de intensa lluvia. Las mediciones de agua subterránea tomadas durante los sondeos exploratorios indican frecuentemente condiciones de agua subterránea a pocos metros del nivel del terreno. No se conoce de algún monitoreo de los niveles de aguas subterráneas.

Los valores de permeabilidad (conductividad hidráulica saturada) abarcan una gama muy grande (órdenes de magnitud), pero indican que la permeabilidad es relativamente mayor a la esperada en suelos y rocas arenosas (5×10^{-5} a 1×10^{-3} m/s) y los valores son muy altos en el aluvión (1×10^{-3} a 3×10^{-2} m/s). No se conoce de ensayos de bombeo que hayan sido llevados a cabo.

El aspecto del drenaje de nuevos taludes en corte relacionados con la construcción de carreteras, o reducción de niveles aguas subterráneas a largo plazo, puede dar lugar a la pérdida del suministro de agua, particularmente cuando los suministros de agua locales se obtienen a partir de pozos poco profundos. Dichas situaciones se han observado regularmente en el pasado y son subsanadas previendo un suministro alternativo de agua o evitando, en lo posible, estos cortes.

Uso del Suelo

El Estudio de Impacto Ambiental del Diseño Fase 2 (EIA) identifica los principales usos del suelo en el corredor vial, que incluye 940 hectáreas de pastos, 856 hectáreas de cultivos y 520 hectáreas de bosque.

Las 2,872 hectáreas de la Reserva Nacional Natural San Francisco fueron establecidas para proteger los ecosistemas de la región Andina - norte, también tienen el objetivo de conservar y proteger la cuenca superior del Río San Francisco.

Clima

Dos estaciones Pluviométricas, una en Útica y una en El Tuscolo, cuentan con registros de precipitación desde el año 1981 al 2012. Los datos muestran una distribución bimodal de la precipitación, con un pico en los meses de Abril y Mayo, y un segundo pico entre Octubre y Noviembre. Los datos de precipitación para estas dos estaciones se utilizaron para obtener los valores extremos; los eventos diarios de uno cada diez años son 97mm y 116mm para Útica y El Tuscolo, respectivamente. La media acumulada anual para El Tuscolo es 1,564 mm; El año 2011 fue el más lluvioso y el año 2010 fue el quinto, en los treinta años de registros.

Elementos Estructurales

El esquema propuesto de Diseño Fase 2 incluye 18 grandes puentes y viaductos con todos los elementos estandarizados siempre que sea posible, por lo general incluyendo vigas postensadas tipo I, vigas cajón fundidas en sitio y una estructura

de tipo arco de acero. La mayoría de los estribos están soportados en apoyos simple sobre vigas cabezal y 2 caissons, y las columnas/pilares se integran con los elementos de cimentación.

Todas las estructuras son obras importantes, generalmente con múltiples luces de 40 metros. Entre el K8+215 y el K17+950, hay ocho estructuras que incluyen luces individuales entre 90 y 220 metros.

Se planea que todas las cimentaciones sean con caissons excavados, fundidos en sitio, de diámetro variable entre 1.2m y 3.5m, y por lo general de 15 a 30 metros de profundidad. Los cimientos deberán penetrar los materiales coluviales y estar firmemente empotrados en roca competente. La profundidad final de los caissons no ha sido determinada aún. La roca de cimentación corresponde generalmente a lutitas susceptibles a la meteorización rápida, lo que potencialmente plantea problemas de desempeño a largo plazo.

Muchas de las estructuras a lo largo del trazado se encontrarán en cercanías a deslizamientos de tierra, movimientos de masas y fallas geológicas y tienen una o más de estas características cerca de sus estribos. Estas estructuras deben ser diseñadas en consecuencia, considerando el problema de su vulnerabilidad a precipitaciones extremas y altos niveles de aguas subterráneas. Las estructuras de los puentes no parecen ser vulnerables a las inundaciones debido a que generalmente estos tienen grandes luces libres por encima de los lechos de arroyos y ríos.

Impactos

Basados en los datos del área del proyecto del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el año 2011 fue el año más húmedo y el 2010 fue el quinto más húmedo en treinta años de registros de la estación El Tuscolo. Estos años húmedos consecutivos son significativos en términos de inundaciones catastróficas, particularmente en el norte de Colombia.

En el área del proyecto, la lluvia acumulada para el mes de abril de 2011 (491 mm) fue un evento extremo y la lluvia más alta en cualquier mes en esos treinta años de registros. Esto se correlaciona con un número extremo de deslizamientos (23 en el Departamento de Cundinamarca); en particular, la alta precipitación de abril 18 a abril 23 de 2011 (60.0mm y 60.8mm, respectivamente) coincide con un número significativo de deslizamientos (ocho el 18 de Abril de 2011 y nueve el 23 de Abril de 2011). Sin embargo, los eventos de precipitación diaria de abril 18 y abril 23 de 2011 no son aisladamente eventos extremos; precipitaciones extremas diarias serían superiores a 116 mm o un evento de 1 en 10 años.

Pre-humedecimiento o precipitaciones antecedentes son un factor a analizar sobre la aparente contradicción en la probabilidad de eventos diarios anteriormente descrita. Las condiciones antecesoras han sido analizadas y sugieren que las lluvias acumuladas por 6 días consecutivos produjeron los eventos más extremos en Abril de 2011. Los 3 meses anteriores tuvieron precipitaciones mensuales ligeramente por encima del promedio.

Antes de abril de 2011, se presentaron precipitaciones por encima de los promedios e inundaciones en el norte de Colombia, aunque las mediciones en el área del proyecto (en El Tuscolo) no fueron eventos extremos; solamente un 20% por encima del promedio entre noviembre y diciembre de 2010. Aun así, un número importante de deslizamientos (15) fueron reportados localmente entre Octubre y Diciembre.

A principios del año 2010, hubo importantes valores de precipitación entre abril y julio. El año 2009 tuvo precipitaciones por debajo del promedio, los años 2008 y 2007 no fueron excepcionales. En 2006 se presentó un fenómeno de La Niña débil, pero ocurrieron un gran número de deslizamientos en el Departamento de Cundinamarca (11 en abril y 19 en mayo). Estos deslizamientos se correlacionan con precipitaciones por debajo del promedio para los meses de abril y mayo, pero por encima del promedio para el mes anterior (252 mm en marzo de 2006).

En conclusión, un periodo de pre-humedecimiento de alrededor de una semana a un mes es probablemente lo más significativo. Siendo así, las inundaciones catastróficas del norte de Colombia en 2010 y los deslizamientos en el área del proyecto en abril de 2011 son eventos separados dentro de La Niña 2010-2011.

Vulnerabilidad

La vulnerabilidad se define como el grado en que un sistema es susceptible a efectos adversos de variaciones climáticas y de fenómenos meteorológicos extremos. Incrementos en duración e intensidad de precipitación potencialmente incrementará las amenazas de los elementos estructurales del proyecto. Estas amenazas incluyen deslizamientos, movimientos en masa e inundaciones. Dado el terreno montañoso del corredor, algunos de los cortes propuestos, además de las laderas naturales, son muy empinados y, por tanto, susceptibles a importantes deslizamientos y movimientos en masa. Algunas de las laderas naturales existentes pueden encontrarse actualmente en una condición marginal de estabilidad y no necesariamente requieren un fuerte estímulo climático para desestabilizarse.

La Parte 1 de la vía (K0+000 a K12+382) asciende alrededor de la divisoria de la Quebrada El Cune a lo largo de laderas empinadas, cuyas formaciones rocosas

son principalmente consistentes de varios tipos de lutitas y lodolitas, las cuales son altamente susceptibles a meteorización.

Se han identificado 39 inestabilidades, en su mayoría relativamente superficiales (varios metros) a lo largo del trazado propuesto para la Parte 1 y varios de los estratos se anticipa que tendrán buzamientos adversos hacia afuera del talud. Deslizamientos en mayor escala son usualmente asociados con rocas altamente fracturadas y meteorizadas, como resultado de fallas existentes. Aproximadamente el 65% de la Parte 1 del trazado está diseñada con cortes con alturas hasta de 85 metros. Por tanto, la Parte 1 es altamente vulnerable a movimientos en masa y deslizamientos.

La vulnerabilidad de los puentes frente a los deslizamientos en esta parte del trazado es relativamente alta y es discutida en el Capítulo 9.

Se estima que una porción significativa del Sector 1, Tramo 1 tiene una probabilidad alta de sufrir impactos importantes al funcionamiento y utilidad si este tramo se ve afectado por un evento extremo, requiriendo reconstrucciones sustanciales para que la vía pudiese ser reabierta al servicio.

Las secciones de túneles, Parte 2 del Sector 1, Tramo 1, son consideradas de significativamente menor riesgo, a excepción de los cortes para los portales. En La Parte 3, desde el K16+000 hasta Guaduas, previas inestabilidades naturales de la ladera se encuentran entre el K19+650 y el final del Tramo 1. La característica dominante en la Parte 3 es el enorme deslizamiento de San Francisco, entre el K17+500 y el K19+500, el cual está relacionado con la Falla La Magdalena, y se reactivó durante el evento de La Niña 2010-2011. Este deslizamiento se puede volver a reactivar en el futuro con aún mayor potencial de impacto sobre las estructuras del Proyecto planeadas en esta sección.

La porción restante de la Parte 3 del trazado, la cual es subyacida por rocas sedimentarias terrestres con gran participación de areniscas, conglomerados y calizas, es generalmente más estable que la Parte 1, con la excepción de área del deslizamiento de San Francisco. Entre el K16+580 y el K17+500, un deslizamiento (registrado en mapas geológicos) coincide con un corte alto adyacente a una falla, con estrado buzando desfavorablemente y por tanto el área es considerada de alto riesgo.

Registro de Riesgo

El área del proyecto Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1 se localiza en un entorno inherentemente vulnerable con respecto a las condiciones geológicas, geotécnicas y climatológicas, debido a la interacción de la alta precipitación, prevalencia de

materiales litológicos débiles y las extensas fallas. Estos factores proporcionan los componentes necesarios para el desarrollo de la inestabilidad.

Movimientos en masa, deslizamientos e inundaciones han sido identificados como las principales amenazas derivadas de fenómenos meteorológicos extremos en el área del proyecto. Un procedimiento semi-cuantitativo se ha desarrollado para determinar la probabilidad de que cada amenaza cause un impacto de medio o alto riesgo, lo cual permite la generación de un perfil de riesgo a lo largo del trazado.

Basado en el perfil de riesgo y sus datos de respaldo, la gran área del deslizamiento de San Francisco entre el K17+500 y el K19+500 es, con certeza, el área de más alto riesgo en el proyecto, alcanzando los límites de lo que generalmente se considera prohibitivo. La magnitud del deslizamiento activo, el cual es el resultado de la Falla La Magdalena, hace extremadamente difícil mitigar tanto su riesgo como su impacto, lo cual podría conducir a una destrucción de la vía y de los puentes una vez se reactive este deslizamiento.

El ascenso a lo largo del flanco occidental del valle El Cune, desde el K8+000 hasta el Túnel El Trigo, plantea la segunda sección más crítica. Consiste en una serie de cortes altos y puentes a lo largo de empinadas laderas inestables formadas por lutitas débiles, en un área dominada por la presencia del Sistema de Fallas de Bituima, la cual se considera activa. La distribución de riesgo indica áreas limitadas de riesgo bajo o medio dentro de un área mayor de alto riesgo para movimientos en masa y la única área de riesgo medio para el desarrollo de deslizamientos más profundos, con excepción de puntos críticos de deslizamientos definidos en el diseño. La densidad lineal de movimiento en masa (aquí definida como: el número de áreas de movimientos en masa por unidad de longitud a lo largo del trazado) es la más alta a lo largo del proyecto y su impacto puede llegar a ser considerable si los eventos se materializan al mismo tiempo.

La sección del K3+000 al K4+200 presenta elevados riesgos de deslizamientos, generados principalmente por la abundancia de lutitas y la presencia de deslizamientos históricos a lo largo del trazado. En general, los deslizamientos más profundos son menos frecuentes en la medida en que la frecuencia disminuye con el tamaño. Aunque eventos como La Niña con alteran el umbral requerido para que se desarrollen deslizamientos, su efecto es significativo debido a que aumentan la frecuencia de fenómenos de remoción en masa y, por tanto, su probabilidad y riesgo. Remoción en masas incluye ambos procesos, “movimientos en masas” de relativamente menor profundidad, y “deslizamientos” de relativamente mayor profundidad.

La última parte del trazado, del K21+000 al final del proyecto, es una sección de alto riesgo para movimientos en masa, resultando principalmente de la ocurrencia de movimientos en masa de tamaño importante a lo largo del trazado.

Por otra parte, la sección de los túneles (K12+382 a K16+118) representa la sección con más bajo riesgo en el trazado, debido a la mínima exposición a variaciones climáticas y por tanto poca vulnerabilidad a las amenazas asociadas con eventos climáticos extremos. La única excepción de toda la sección es el Puente San Francisco Alto, el cual puede ser impactado por inundaciones y por tanto es considerado de riesgo medio para esta amenaza específica. La sección del portal occidental del Túnel La Cumbre al área del deslizamiento de San Francisco es un segmento de relativamente bajo riesgo para movimientos en masa, en general debido a la prevalencia de tipos de rocas más competentes.

Respuestas

Las respuestas a las preguntas formuladas de manera conjunta por ANI y HELIOS se presentan al final de informe (Capítulo 10), teniendo prioridad sobre este Resumen Ejecutivo. Algunos puntos que se tratan son:

Los cambios geomorfológicos son permanentes, procesos continuos, típicamente ocurren durante periodos largos de tiempo. Otros cambios geomorfológicos como deslizamientos, pueden ser generados por cambios ocurridos en corto plazo, incluyendo terremotos y eventos de precipitación extrema.

El evento de La Niña 2010-2011 fue un evento climatológico extremo en términos de precipitación acumulada mensual, como se mencionó anteriormente, pero en términos generales, no fue el evento de La Niña más extremo alguna vez observado. Por tanto, se considera muy probable que eventos similares o peores de La Niña sean observados durante el periodo de diseño esperado de Ruta del Sol (posiblemente 30 a 50 años).

Durante el evento de La Niña 2010-2011 se documentó la reactivación del deslizamiento San Francisco. Además, una acumulación de deslizamientos a lo largo de la existente Ruta Nacional 50, cercana al corredor del Proyecto, se evidenció entre el 18 y el 23 de abril de 2011. Los análisis sugieren que estos deslizamientos fueron generados tanto por fuertes eventos de precipitación de corto plazo como por precipitación por encima del promedio por periodos de varios días a semanas. En esta área, abril de 2011 no solo presenta los registros de periodos de pluviosidad entre 6 y 20 días más altos, sino que también presenta los registros más altos de días consecutivos con precipitación durante el periodo analizado (1982 – 2012). Adicionalmente, abril de 2011 tuvo un periodo de 20 días continuos de lluvia, mientras que la intensidad de lluvias diarias incrementó hacia el final del periodo. En el caso de los deslizamientos documentados en la

Ruta Nacional 50, una afectación geomorfológica durante el evento de La Niña 2010-2011 se hizo evidente, lo cual, debido a la similitud de condiciones geológicas en el área del Proyecto, pareciera generalizado a toda el área del mismo.

El trazado propuesto cruza por formaciones geológicas débiles, orientadas adversamente, y vulnerable al proceso geológico de meteorización, y cuenta con numerosos cortes altos y de pendiente empinada, haciendo por tanto el trazado vulnerable a inestabilidad de taludes. La posibilidad de mitigar las dificultades y consecuencias de cortes altos y de pendiente empinada dentro del corredor dado parece ser bastante limitada.

A partir del evento de La Niña de 2010-2011, y como consecuencia de ello, el Gobierno Colombiano ha dado una dirección clara para Proyectos de Infraestructura y Transporte en Colombia. El trazado propuesto para la Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1, en nuestro concepto, no cumple con los requerimientos para una infraestructura sustentable y segura para Colombia. Recomendamos modificar el Diseño propuesto y aprobado para el Sector 1, Tramo 1. El trazado actual ya se encuentra cercano al óptimo posible, lo cual no permite suficiente flexibilidad para las necesarias futuras mitigaciones. En conclusión, y en directa respuesta a las preguntas del Capítulo 10, recomendamos el desarrollo de un nuevo trazado.

El trazado modificado debe no correr paralelo, sub-paralelo o incluso en cercanías a fallas. Cortes altos y áreas inestables deben ser evitados. La Falla La Magdalena y el deslizamiento San Francisco (entre otras áreas de roca potencialmente fracturadas) son dos características geológicas que plantearán retos significativos para el diseño, el cual, en su disposición actual, no proporciona una solución segura, sostenible y duradera en el largo plazo (más de 20 años).

Es recomendable, desde la perspectiva de una larga vida útil, evitar ciertas áreas altamente vulnerables, en lugar de intentar mitigar los impactos de potenciales movimientos en masa y deslizamientos. Esta recomendación satisface además la directiva del DNP para la construcción de nuevas Infraestructuras, emitida posteriormente al reconocimiento de los impactos negativos de eventos climatológicos extremos, específicamente el fenómeno de La Niña 2010-2011.

2 Introducción y Antecedentes

2.1 Resumen del Trazado del Proyecto

La Ruta del Sol es una carretera de más de 1.000 kilómetros de largo que conecta la capital de Colombia, Bogotá, con la costa Atlántica y el Mar Caribe en el Norte. La carretera consta de dos carriles en cada dirección. A lo largo de su trazado, la Ruta del Sol une otras grandes ciudades de Colombia. La mayoría de los bienes del país se transporta por camión, por lo tanto, la Ruta del Sol es esencial para la infraestructura del país y su desarrollo económico.

El proyecto Ruta del Sol está dividido en tres sectores. El Sector 1 tiene 78 km de largo y es el más corto, sin embargo corresponde a la sección técnicamente más desafiante de las tres secciones y serpentea a través de terrenos montañosos. Mientras el Sector 1 ofrece una nueva ruta, los Sectores 2 y 3 constituyen la rehabilitación y ampliación de las carreteras existentes. El Sector 2 es el sector más largo con 528 km de longitud y Sector 3 es ligeramente más corto con una longitud total de 465 km.

El Sector 1 se estructuró como una concesión a mediano plazo por un periodo de siete años (cuatro años para el diseño y la construcción y tres años para la operación). La intención es reabrir la licitación como una concesión de peaje en una fecha futura.

El Sector 1 incluye tres subsecciones; Tramo 1, Tramo 2 y Tramo 3. El Tramo 1 comienza en K0+000 y termina en K21+000. El Tramo 1 conecta las ciudades de Villeta y Guaduas y atraviesa la parte occidental del sistema montañoso oriental de Colombia, denominado Cordillera Oriental. El Tramo 1 se inicia en la intersección denominada El Cune, ubicado en el PR64 de la Ruta Nacional 50 y termina en cercanías al municipio de Guaduas en la intersección de San Miguel. El Tramo 1 comienza con un ascenso en la superficie a través de montañas por aproximadamente 12.5 km. Este segmento es seguido por dos túneles paralelos con una longitud aproximada de 2.2 km, una sección de relleno y puente de aproximadamente 510 m y dos túneles paralelos adicionales de 1 km de longitud. Luego de este conjunto de túneles, el alineamiento desciende hasta el final del Tramo 1 en cercanías al municipio de Guaduas. Los Tramos 2 y 3 en dirección a El Korán están actualmente en construcción. Ambas secciones tienen aproximadamente 56 km de largo y continúan en la superficie ascendiendo hacia el municipio de Guaduas. A partir de este punto, el alineamiento sigue el curso del Río Negro hasta aproximadamente el K54, donde la carretera se desvía del río y sigue al nivel de la superficie a través de terreno montañoso hasta llegar a El Korán.

Este informe está dirigido únicamente al primer subsector de Ruta del Sol, Sector 1, entre Villeta y Guaduas (Tramo 1). Otras partes de la Ruta del Sol no son objeto de este informe.

2.2 Partes Contractuales y Entidades Involucradas

Los socios contractuales de Sector 1 de la Ruta del Sol son el propietario, Agencia Nacional de Infraestructura (ANI), anteriormente conocido como Instituto Nacional de Concesiones (INCO) y el contratista, Consorcio Vial Helios (Helios), un consorcio liderado por el Grupo Solarte y Concreto S.A. de Colombia junto con IECSA S.A. de Argentina.

La propuesta de costos presentada por HELIOS en el 2009 se basó en un estudio de viabilidad realizado por la Corporación Financiera Internacional (IFC), una compañía del grupo del Banco Mundial, con el apoyo del diseñador Euroestudios (EE). ANI adjudicó el Sector 1 a HELIOS en enero de 2010. La solicitud de la licencia ambiental requerida por la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) está incluida en las obligaciones del Contratista, junto con el diseño, la construcción y la adquisición de tierras.

2.3 Fenómeno de La Niña 2010–2011

Durante los últimos seis meses del año 2010 y los primeros cuatro meses del año 2011, una anomalía climática estacional, conocida como el fenómeno de La Niña, afectó al país a tal punto que el gobierno de Colombia la calificó de catástrofe nacional.

El fenómeno de El Niño, Oscilación del Sur (ENOS) y los mecanismos que causan esta oscilación climática permanecen siendo poco entendidos. El ciclo de ENOS se refiere a las variaciones año a año, coherentes y a veces muy fuertes, en la temperatura de la superficie del mar, las lluvias convectivas, la presión del aire en superficie y la circulación atmosférica que se producen a través del Océano Pacífico ecuatorial. El Niño y La Niña representan extremos opuestos del ciclo ENOS. El Niño se refiere a las temperaturas de la superficie del mar por encima del nivel medio que se desarrollan periódicamente a través del Pacífico ecuatorial centro-oriental y en ocasiones se conoce como un "episodio cálido del Pacífico". La Niña se refiere al enfriamiento periódico en la temperatura de la superficie del mar en el Pacífico ecuatorial central y centro-oriental. La Niña representa la fase fría del ciclo ENOS, y en ocasiones se conoce como un "episodio frío del Pacífico".

La Oscilación del Sur se refiere al componente atmosférico el cual es una fluctuación a gran escala en la presión del aire entre el occidente y el oriente del

Pacífico tropical. Las dos variantes están acopladas: la fase oceánica cálida, El Niño, acompaña una presión de aire anormalmente alta en el Pacífico occidental, mientras que la fase fría, La Niña, acompaña una presión de aire anormalmente baja en el Pacífico occidental. En períodos extremos estos patrones climáticos pueden causar fenómenos meteorológicos extremos acompañados de inundaciones o sequías en muchas regiones del mundo. Los países que bordean el Océano Pacífico, entre ellos Colombia, pueden ser los más afectados.

En la fase de La Niña, la alberca de agua fría en el Pacífico oriental se intensifica y los vientos alisios se fortalecen, lo que da lugar a precipitaciones superiores al nivel medio.

Con base en el Índice Oceánico del Niño (ONI) proporcionado por el Centro de Predicción Climática (CPC), el evento de La Niña 2010-2011 se considera un caso intenso, pero no un evento específicamente extraordinario en los últimos 30 años.

No obstante, el fenómeno de La Niña 2010-2011 es potencialmente uno de los más fuertes jamás observado con base al Índice Multivariado ENOS (MEI, por sus siglas en inglés). El MEI se basa en seis variables diferentes que incluyen la presión del nivel del mar, el viento zonal y meridional, la temperatura superficial del mar, la temperatura superficial del aire y la fracción total de nubosidad del cielo. Este se describe con mayor detalle en el capítulo climático (Capítulo 5) de este informe.

2.4 Objetivo de la Consultoría

A lo largo de Colombia se reportaron inundaciones y deslizamientos de tierra como resultado del Fenómeno de La Niña 2010-2011. El área del proyecto de la Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1, entre Villeta y Guaduas, en general parece ser un área más vulnerable que otras a deslizamientos de tierra. Los deslizamientos observados a lo largo del área designada del proyecto y otras características geológicas que podrían hacer que el terreno sea vulnerable en términos de estabilidad a largo plazo, resultó ser objeto de una discusión técnica entre ANI y HELIOS sobre la influencia del fenómeno de La Niña en el diseño, construcción, factibilidad operativa, sostenibilidad y seguridad de la Ruta del Sol en esta área.

En un esfuerzo por resolver amistosamente la discusión, las partes han convenido en incluir la renombrada firma internacional consultora de ingeniería Gall Zeidler Consultores (GZ - con Oficina principal en Ashburn Virginia, EEUU), con especial experiencia en la materia. El objetivo de GZ es responder a seis preguntas, formuladas conjuntamente por las dos partes contratantes e investigar el impacto causado por el fenómeno de La Niña durante la temporada 2010-2011 y sus

consecuencias en el desempeño a largo plazo de la Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1.

Las preguntas se agrupan en tres grandes temas. Estos temas representan (1) la existencia de un evento superviniente, (2) la solución del trazado contractual y (3) las razones para un nuevo trazado.

El primer tema acerca del evento superviniente está enfocado en preguntar sobre si La Niña 2010-2011 afectó a las condiciones geomorfológicas y cuando; y si como consecuencia se recomienda un cambio en el trazado contractual aprobado, teniendo en cuenta aspectos técnicos como vulnerabilidad, riesgo, estabilidad, contractibilidad, y sostenibilidad del proyecto Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1.

La segunda pregunta se refiere a las recomendaciones para modificar el trazado dentro o fuera del corredor contractual. La última pregunta se refiere a las razones técnicas para cambios en el trazado, en caso de ser recomendado en la sección anterior.

El Resumen Ejecutivo resalta los resultados principales y a lo largo del Capítulo 10 se proporcionan las respuestas a las preguntas planteadas. Todas las declaraciones que figuran en este informe se basan en un análisis y una evaluación de la información disponible.

El informe ilustra el enfoque adoptado y responde a cada pregunta de manera no ambigua para evitar posibles interpretaciones erróneas.

Por último, la intención de este informe es proporcionar una base para el arbitraje para que ambas partes se permitan resolver el argumento técnico y los asuntos en disputa asociados.

3 Metodología

3.1 Enfoque Típico de Diseño de Carreteras en Áreas Rurales

La construcción de vías nuevas en áreas rurales, como Ruta del Sol, es altamente dependiente de las condiciones del terreno a lo largo del trazado de la vía. En áreas montañosas, como las que se encuentran en Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1, entre Villeta y Guaduas, diferentes elementos de diseño tales como rellenos en grandes volúmenes, cortes profundos, puentes, túneles, obras de manejo de aguas subterráneas y medidas para el mejoramiento del suelo son típicas y frecuentemente aplicadas.

En línea con el Diccionario Oxford, la Geomorfología está aquí definida como el estudio de las características físicas de la superficie de la tierra y su relación con las estructuras geológicas. Todos los elementos del diseño de una carretera, incluyendo rellenos, cortes, puentes, túneles, mejoramiento de suelos, pavimentos, drenaje, etc., los cuales serán referidos como los “elementos estructurales”, los cuales son altamente dependientes de la topografía, de las propiedades geotécnicas y de las características geomorfológicas existentes en el área del proyecto. Mientras que la topografía, junto con la alineación gobiernan la localización, cantidad, tamaño y naturaleza de estos elementos estructurales, las propiedades geotécnicas, incluyendo la hidrogeología, dictan e imponen las condiciones para el diseño estructural de dichos elementos, incluyendo medidas de soporte y mejoramiento del suelo.

Mientras más certera y exacta sea la información geotécnica y mientras más favorables sean las condiciones geomorfológicas, más sostenible y rentable será la construcción. De modo contrario, información inexacta sobre las condiciones del suelo y condiciones geomorfológicas desfavorables pueden ocasionar esfuerzos adicionales para mejorar las condiciones de soporte de suelos y/o aplicación de medidas de mejoramiento de la subrasante.

En este contexto, “mejoramientos de suelo” hace referencia a las técnicas para mejorar las propiedades del suelo. Usualmente, las propiedades que se modifican y se mejoran son la resistencia al corte, la rigidez y la permeabilidad. También pueden incluir medidas para manejar condiciones desfavorables de aguas subterráneas. En el peor escenario, estas medidas adicionales se vuelven excesivas y dejan de ser viables desde una perspectiva técnica y/o económica y requieren cambios en el trazado de la vía.

3.2 Disciplinas Involucradas

La influencia de las condiciones de suelo previstas en el diseño de la carretera y su sostenibilidad a largo plazo es el tema central de la consultoría. Con el objetivo de realizar una evaluación y valoración objetivas del problema, se han aplicado métodos científicos de diferentes disciplinas.

La Geotécnica es la rama de la ingeniería civil que se ocupa del comportamiento y propiedades de los materiales de la tierra en relación con la ingeniería.

La Ingeniería Geotécnica toma principios de mecánica de suelos y rocas y de la ingeniería geológica para evaluar y valorar:

- Materiales y Condiciones de la superficie.
- Propiedades relevantes físicas/mecánicas y químicas de los materiales.
- Riesgos y peligros geotécnicos.
- Inestabilidad de laderas/taludes naturales y artificiales y de depósitos de suelo, bajo condiciones estáticas y sísmicas.
- Riesgos asociados con las condiciones específicas del sitio
- Monitoreo de las condiciones del sitio, construcción de cimentaciones y movimientos de tierra.

El área de la ingeniería relacionada con el diseño y construcción de movimientos de tierra, cimentaciones estructurales y estructuras es la Civil. La Ingeniería Civil es la disciplina profesional que trata el diseño, la construcción y el mantenimiento del entorno físico natural y construido, incluyendo vías, puentes, túneles, rellenos y cortes. En general, y particularmente en el proyecto Ruta del Sol, ingenieros geotécnicos e ingenieros civiles trabajan estrechamente.

La Geología es la ciencia que comprende el estudio de la tierra, las rocas que la componen y los procesos geomorfológicos por los cuáles cambian. La geología ofrece una idea de la historia de la tierra ya que proporciona la primaria evidencia de la tectónica de placas, la historia evolutiva de la vida y climas pasados. Un área de la geología especialmente relevante para este proyecto es la hidrología, y especialmente la hidrogeología, para este proyecto. Hidrogeología es el estudio del movimiento, distribución y calidad del agua en la tierra. Hidrogeología es el área de la geología que trata la distribución y movimiento de aguas subterráneas en suelos y en rocas de la corteza terrestre.

Meteorización es el término geológico para la descomposición o disolución de rocas y minerales en la superficie de la tierra. Agua, hielo, ácidos, sal, plantas, animales y cambios de temperatura, o una combinación de los anteriores, son causas de meteorización. Sin embargo, en la escala geológica de tiempo, el proceso de meteorización es típicamente largo, y usualmente no incluye cambios en corto plazo del clima o fenómenos meteorológicos especiales. No obstante, el

evento de La Niña 2010-2011 impactó la geomorfología en toda Colombia dentro un periodo de tiempo corto. Es por esto que el vínculo entre geología y meteorología toma gran importancia en este tema.

Los fenómenos meteorológicos son observables mediante eventos climatológicos, los cuáles son evaluados y valorados por la ciencia de Meteorología. Estos eventos están ligados a las variables existentes en la atmósfera terrestre como temperatura, presión atmosférica, vapor de agua, y los gradientes e interacciones de cada variable y cómo cambian con el tiempo. Son estudiados diferentes modelos para determinar cómo sistemas a nivel local, regional y global, impactan el tiempo y el clima. El clima se refiere a las condiciones climáticas promedio durante un periodo de tiempo. Hidrometeorología es la rama de la meteorología e hidrología que estudia la transferencia de agua y energía entre la superficie del suelo y la atmósfera baja. En este informe, climatología, meteorología e hidrometeorología son resumidas bajo el término Meteorología.

3.3 Triángulo de Interacción

Para el proyecto Ruta del Sol, aspectos múltiples de las disciplinas involucradas han interactuado entre sí. Para visualizar esta interacción, se presenta la Figura 3-1, Triángulo de Interacción. Cada una de las cuatro disciplinas previamente discutidas – Geología, Meteorología, Ingeniería Civil e Ingeniería Geotécnica – tiene una influencia marcada en el proyecto.

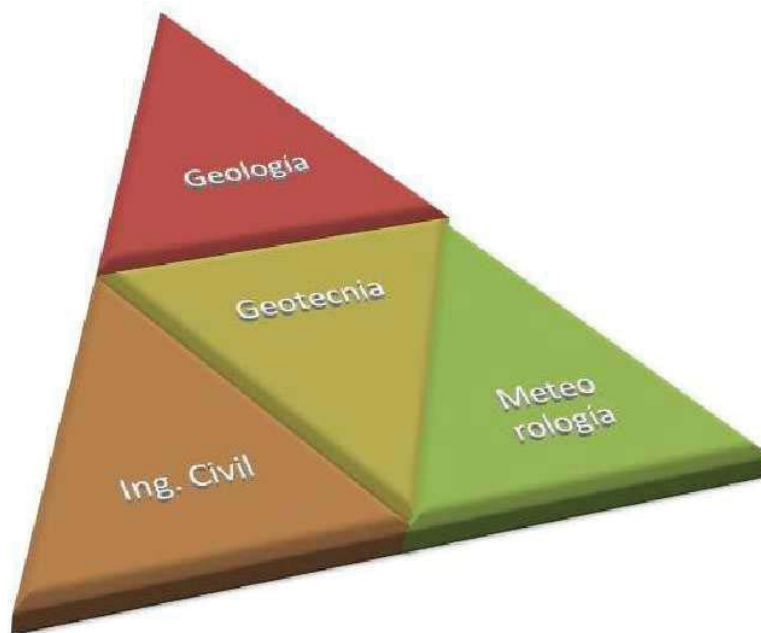


Figura 3-1. Triángulo de Interacción.

Un estudio profundo de la interfaz entre la Ingeniería Geotécnica y las disciplinas que afectan el núcleo central de nuestro asunto, se vuelve crucial para lograr un entendimiento suficiente de los problemas y establecer la base para responder las preguntas planteadas. La gráfica muestra un total de tres interfaces relacionadas con la Geotecnia.

Los proyectos de carreteras, usualmente incluyen dos tipos de interfaces: la interfaz Geología / Geotecnia y la interfaz Geotecnia / Ingeniería Civil. Las características geológicas existentes se valoran con base en informes y mapas geológicos, así como en programas de exploración en campo específicos del proyecto. El propósito de esta evaluación es establecer parámetros geotécnicos, que servirán de base para el diseño y la construcción.

La línea Base geotécnica es entonces usada para el diseño de trazados viales así como para el diseño de las estructuras propuestas. El diseño es un proceso iterativo de múltiples fases, el cual se refina y se detalla con cada revisión. La información se transfiere en ambas direcciones en la interfaz entre Ingeniería Civil y Geotecnia. En un estudio de Factibilidad, un diseño preliminar es desarrollado, este diseño se denomina Diseño Fase 1. Con base en esta fase, se desarrolla el Diseño Fase 2, el cual incluye información adicional de detalle, la geometría final del proyecto y un diseño estructural básico. Durante el desarrollo del proceso de diseño la información disponible es compilada y condensada; incertidumbres iniciales asociadas con los parámetros de diseño tales como parámetros geotécnicos o evaluación de cargas se reducen a un mínimo.

3.4 Impacto Meteorológico en los Parámetros de Diseño

Las estructuras civiles son diseñadas para un denominado “Periodo de Diseño” o “Periodo de Servicio”. La línea base de diseño, incluye las suposiciones de carga o parámetros de diseño geotécnicos, los cuáles son asumidos para ser válidos, mínimo para el periodo de diseño definido. Una evaluación más profunda de los efectos meteorológicos en las cargas o en las propiedades geotécnicas como base para el diseño no es necesaria, ya que los patrones climáticos son bien conocidos y periódicamente repetitivos, y el impacto de la meteorización es considerado un proceso de largo plazo en relación con el Periodo de Diseño.

Los parámetros de diseño geotécnicos son usualmente definidos de manera conservadora con valores esperados, y son asumidos para ser cuasi-estacionarios durante el Periodo de Diseño del proyecto. Por tanto la interfaz entre la Ingeniería Geotécnica y la Meteorología no es típicamente de gran interés siendo que las

suposiciones más extremas y por tanto conservadoras con respecto a la influencia del clima ya han sido definidas.

Sin embargo, para el proyecto en estudio, el fenómeno de La Niña ocurrido en la temporada de 2010-2011 pareciera haber inducido cambios geomorfológicos, y debe ser investigado si desencadenó un cambio imprevisto en las suposiciones previas asumidas en los modelos geotécnicos básicos. Potencialmente, aun así, las suposiciones conservadoras de diseño podrían haberse excedido y en este caso deben ser revisadas y reevaluadas. Este cambio tendría una influencia considerable en el diseño y construcción del proyecto Ruta del Sol.

El núcleo central del alcance del trabajo es por tanto analizar la influencia de La Niña 2010-2011 y sus impactos en el proyecto.

3.5 Revisión de la Línea Base del Proyecto

El evento de La Niña 2010-2011 fue un evento extraordinario, el cual desencadenó la necesidad de una revisión minuciosa de la Línea Base del diseño del proyecto. A pesar del hecho de que La Niña 2010-2011 fue un evento de corta duración – en relación con el Periodo de Diseño de la vía – se hace importante valorar si futuros eventos tendrán un impacto similar o peor sobre los elementos estructurales de Ruta del Sol, una vez construida. Si este es el caso, se requeriría revisar la línea base del proyecto y un cambio en el trazado podría llegar a ser necesario o recomendable para asegurar la sostenibilidad y la seguridad de la Ruta del Sol.

La influencia de La Niña 2010-2011 es por tanto investigada bajo dos diferentes perspectivas: 1) retrospectivamente, mediante una evaluación a posteriori del área del proyecto, y 2) prospectivamente, dando recomendaciones sobre cómo enfrentar las futuras condiciones climáticas extremas para el Periodo de Diseño previsto para el área del proyecto Ruta del Sol.

Por consiguiente dos diferentes escenarios de Líneas Base son estudiados, denominados como “Línea Base Pasada” y “Línea Base Presente”. La comparación entre los dos escenarios de línea base, y la evaluación de los cambios desde una línea base hacia la otra permite concentrarnos en el impacto que el cambio en la línea base representa para el proyecto, y permite desarrollar respuestas a las preguntas específicas del informe. La evaluación está apoyada en una valoración metodológica de riesgo, la cual aporta una guía y una base para el estudio.

3.5.1 Línea Base Pasada

La Línea Base Pasada relaciona la fase de licitación y el diseño desarrollado por HELIOS en el Diseño Fase 2. Para un entendimiento de la metodología general es importante destacar que en esta etapa toda la información reunida en etapas del proyecto posteriores al fenómeno de La Niña 2010-2011 no se tiene en cuenta para la valoración de la Línea Base pasada. El enfoque es el entendimiento de las suposiciones relacionadas con los parámetros geotécnicos y el modelo geológico general utilizado para el diseño de las estructuras en el periodo previo al evento de La Niña 2010-2011. Usando el Triángulo de Interacción el informe señala cuáles suposiciones geotécnicas se derivaron de la información geológica y cómo dichas suposiciones fueron usadas para definir el trazado de la ruta y el diseño de las estructuras de ingeniería.

La información utilizada para la Línea Base Pasada es desarrollada con base en documentos que muestran la información de diseño antes de la segunda temporada de lluvia de 2010, es decir, antes del evento de La Niña 2010-2011.

3.5.2 Línea Base Presente

El proyecto ha sido desarrollado a partir de la información ahora disponible disponible sobre La Niña 2010-2011 y sus consecuencias, partiendo de la Línea Base Pasada. La cantidad y precisión de la información disponible se ha incrementado debido a la participación de las numerosas partes involucradas, tanto en el proyecto como en toda Colombia, abordando el impacto del Fenómeno de La Niña 2010-2011; el área directa del proyecto fue estudiada a raíz de las secuelas de La Niña 2010-2011. El estado de la información para la Línea Base Presente es entonces el momento de la preparación de este informe, esencialmente julio de 2013.

Además de la información disponible antes del evento de La Niña 2010-2011, la información derivada durante o después del evento es admitida y evaluada para el escenario de la Línea Base Presente. En este escenario la interacción entre Meteorología y Geotecnia se hace crucial. La influencia directa del clima durante La Niña 2010-2011 en la geomorfología en el área del proyecto es evaluada y valorada. Se resaltan el impacto, los cambios requeridos a los diseños de las estructuras de ingeniería, o su localización dentro del corredor.

La Línea Base Presente refleja además cómo el proyecto Ruta del Sol debe ser diseñado y construido considerando toda la información disponible hoy.

3.5.3 Cambios en la Línea Base

Un análisis de las dos diferentes Líneas Base permite una clara identificación de los cambios y, a su vez, aporta un apoyo claro a la metodología. Cada cambio es identificado y evaluado separadamente y se resalta si es o no la causa de un cambio geomorfológico, la causa de revisión a un parámetro geotécnico o constituye una característica que cambió como resultado del evento de La Niña 2010-2011.

Este enfoque nos permite responder la pregunta N° 1 sobre si La Niña generó o no un cambio geomorfológico, lo cual haría recomendable un cambio al diseño Fase 2. Estaremos también en capacidad de valorar si la factibilidad, sostenibilidad, vulnerabilidad, riesgo y confiabilidad del trazado contractual se han afectado o si la estabilidad de las laderas/taludes naturales o diseñadas, se ha impactado.

3.6 Cambio al Trazado

El trazado en Diseño Fase 1 proporcionado por ANI y el diseño fase 2 desarrollado por HELIOS son bastante similares y muestran, desde una perspectiva amplia del proyecto, cambios menores tales como algunas desviaciones localizadas.

Por tanto, las evaluaciones de Línea Base Pasada y Presente se basan en el trazado Fase 2, el cual no es sujeto a cambio durante el proceso de evaluación de este informe.

En todo caso, en un paso independiente se discuten cambios en el trazado. Estos hacen referencia a los retos técnicos actuales y futuros. Este paso se basa en los modelos de predicción reconocidos actualmente y el pronóstico resultante de si el fenómeno de La Niña 2010-2011 fue un acontecimiento aislado extraordinario, o si eventos similares o peores se esperarán durante el periodo de vida del proyecto.

3.7 Estructura del Informe y del Enfoque

La consultoría y este informe están basados en la documentación entregada por ANI y HELIOS a través del servidor ftp de ANI al comienzo del periodo de consultoría. Una lista de los documentos recibidos se incluye en la lista de referencias.

Durante el 8 y el 9 de julio de 2013, miembros del equipo de GZ visitaron la zona del proyecto. La visita al proyecto fue coordinada, acompañada y guiada por miembros de ANI y HELIOS. Adicionalmente, el trazado fue inspeccionado durante un sobrevuelo en helicóptero en la tarde del 9 de julio de 2013. La visita a sitio y el sobrevuelo están documentados en el Apéndice N° 1, titulado "Informe de Visita al Sitio. Ruta del Sol, Sector 1. Julio de 2013."

Además, entre el 9 y el 12 de Julio de 2013, miembros del equipo de GZ visitaron varias agencias gubernamentales en Bogotá. Estas visitas fueron programadas por ANI. Cada visita está documentada en forma de minutas ejecutivas de reunión, en el Apéndice N° 2. Parcialmente, información adicional fue suministrada directamente por las agencias bien durante las reuniones o posterior a las mismas. Toda la información proporcionada por dichas agencias está también en la lista de referencias del presente informe.

La gran cantidad de información entregada por ANI incluye más de 8,000 archivos electrónicos. La información fue revisada y analizada de tal manera que se capturara la información necesaria durante el periodo de consultoría para desarrollar, de manera exhaustiva y profunda, las respuestas a las preguntas específicas del alcance del informe.

Información general y constatable sobre el proyecto Ruta del Sol se resume en el capítulo 4. La información se ha estructurado en los subcapítulos Geología, Geotecnia, Hidrología y Uso del Suelo, y estipula la base de análisis.

El capítulo 5 proporciona una descripción del clima en el área del proyecto. Hace también una descripción general de los patrones típicos de clima y de las anomalías del fenómeno de La Niña 2010-2011, basándose en información disponible del área del proyecto.

El capítulo 6 describe los elementos estructurales del trazado. El capítulo se divide en las siguientes partes principales: ascenso desde Villeta hasta el Túnel El Trigo; la sección de los dos túneles, y el descenso hacia Guaduas, basándose en la descripción del Diseño Fase 2. Sin embargo, también se resaltan los cambios al diseño Fase I, donde los hubiere. Se presenta cada estructura junto con sus parámetros más importantes.

El objetivo de los capítulos 4, 5 y 6 es el de presentar un trasfondo real del área del proyecto, el clima y el diseño basado en la información proporcionada por ANI y por HELIOS. Estos capítulos presentan antecedentes de hecho para la discusión del impacto de La Niña 2010-2011 en el corredor.

En el capítulo 7, se discute el impacto específico del fenómeno de La Niña 2010-2011 sobre el corredor y el área del proyecto. Se suministra Información real, tanto como esté disponible.

El capítulo 8 discute la vulnerabilidad de los elementos estructurales del diseño fase 2 frente a eventos climatológicos extremos. El primer subcapítulo discute la vulnerabilidad de las estructuras a nivel de terreno, cortes, rellenos, puentes y túneles en términos generales. El siguiente subcapítulo discute cada elemento estructural descrito en el capítulo 6, y su vulnerabilidad a eventos climatológicos y subsecuentes impactos como inundaciones, erosiones, movimientos en masa, deslizamientos, cambio de nivel freático, etc. Un enfoque cualitativo ha sido

escogido para valorar la vulnerabilidad con relación a la probabilidad del impacto de un evento así como las potenciales consecuencias de los elementos estructurales. Adicionalmente, se establecen posibles medidas de mitigación para evitar o para mitigar las consecuencias de dichos eventos.

En el capítulo 9, se desarrolla un inventario de riesgo de los elementos estructurales del trazado. Se introduce un procedimiento general de manejo del riesgo y de valoración de un específico nivel de riesgo.

Después de esta evaluación y valoración profunda de la problemática, se contestan, en el capítulo 10, las preguntas específicas que constituyen el alcance del trabajo. La contestación se hace de una manera clara y concisa para evitar malas interpretaciones. Las respuestas son respaldadas y basadas en los argumentos técnicos y hechos investigados, analizados y elaborados en el presente informe.

4 Descripción de Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1

4.1 Geología

4.1.1 Configuración Tectónica Regional

El trazado del Proyecto Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1 se encuentra localizado en el costado occidental de la Cordillera Oriental, un cinturón orogénico intracontinental en la parte norte de la Cordillera de los Andes al centro de Colombia y parte de la provincia fisiográfica denominada Cinturón Andino. La Cordillera Oriental, que se extiende 750 km desde el Ecuador hasta Venezuela, es la más larga y ancha de las tres ramas de los Andes [303] y está compuesta principalmente por rocas sedimentarias deformadas del Mesozoico y Cenozoico sobre un basamento poli-metamórfico (ver Capítulo 4.1.2 para las descripciones litológicas) [306].

La geodinámica de Colombia es altamente compleja, controlada por la convergencia de las placas tectónicas de Nazca, Caribe y Sudamericana, así como el bloque de Chocó (CB, también conocido como el Arco del Baudó - Panamá o el bloque Panamá - Chocó), el cual fue empujado sobre la margen suroccidental de América del Sur durante el Cenozoico y es contemporáneo con el inicio de la principal fase tectónica "Andina", que comenzó hace aproximadamente 10.5 millones de años [305]. Hacia las afueras de la costa del Pacífico Colombiano, al occidente de la zona del Proyecto, la placa de Nazca se subduce (es decir, se desplaza) hacia el occidente bajo la placa Paleo - Caribe (restos de la colisión entre el bloque del Chocó y la placa Sudamericana) y posteriormente bajo la placa de Sudamericana a una velocidad de aproximadamente 60 mm por año. Esta subducción es responsable de la actividad sísmica profunda a lo largo de la trinchera colombiana, así como el volcanismo activo observado hoy en las cordilleras Central y Occidental. Por el contrario, la subducción no-magmática suroriental de la placa del Caribe bajo la placa Sudamericana, a una tasa aproximada de 20 mm por año, está relacionada con moderados a altos niveles de sismicidad poco profunda en la Cordillera Oriental. Esta subducción, combinada con el movimiento hacia el sureste de la placa Sudamericana contra el Bloque Norandino (NAB), delimitado por la Falla Santa Marta-Bucaramanga (SMB) en el norte y la Falla de Ibagué (IF, por sus siglas en inglés) en el sur, resulta en el empuje de la Cordillera Oriental sobre el Cratón Precámbrico sudamericano más estable (conocido como el escudo de los Llanos) [304].

Este complejo esquema de interacción multi-placa ha producido extensos pliegues y fallas a lo largo de la Cordillera Oriental y por lo tanto, a lo largo del área del Proyecto. Los sistemas de fallas principales están generalmente orientados en

sentido norte-sur a lo largo de la región, tales como el Sistema de Fallas Salinas y el Sistema de Fallas de la Falla Frontal de la Cordillera Oriental (FFS) que delimitan las márgenes oriental y occidental de la cordillera, respectivamente. El FFS marca el infra-cabalgamiento activo de la Cordillera Oriental por el escudo de los Llanos. Además, las fuerzas de compresión relacionadas con el movimiento de la placa de Sudamericana en relación con el bloque Norandino han creado componentes oblicuas y de rumbo (desplazamiento lateral) en la dinámica regional, lo que resulta en un conjunto secundario de fallas en dirección oriente-occidente a nororiente-suroeste a lo largo del área del Proyecto (por ejemplo, Falla La Magdalena juntos con sus fallas y lineamientos asociados) [305].

La Figura 4-1 muestra la geodinámica del noroccidente de América del Sur. El área del Proyecto se encuentra en el extremo occidental de la Cordillera Oriental (CE) que está delimitado por el sistema de Fallas Salinas al occidente y el Sistema de la Falla Frontal de la Cordillera Oriental hacia el oriente. El Bloque Norandino (NAB) está limitado por la Falla de Santa Marta-Bucaramanga (SMB) en el norte, y la Falla Ibagué (IF) en el sur. También se ilustra el movimiento de las placas Nazca y del Caribe en relación con la placa Sudamericana. La sección transversal muestra la subducción de la placa de Nazca bajo el bloque de Chocó (CB) / placa Paleo-Caribe (PCP), el cual se introduce bajo la placa Sudamericana.

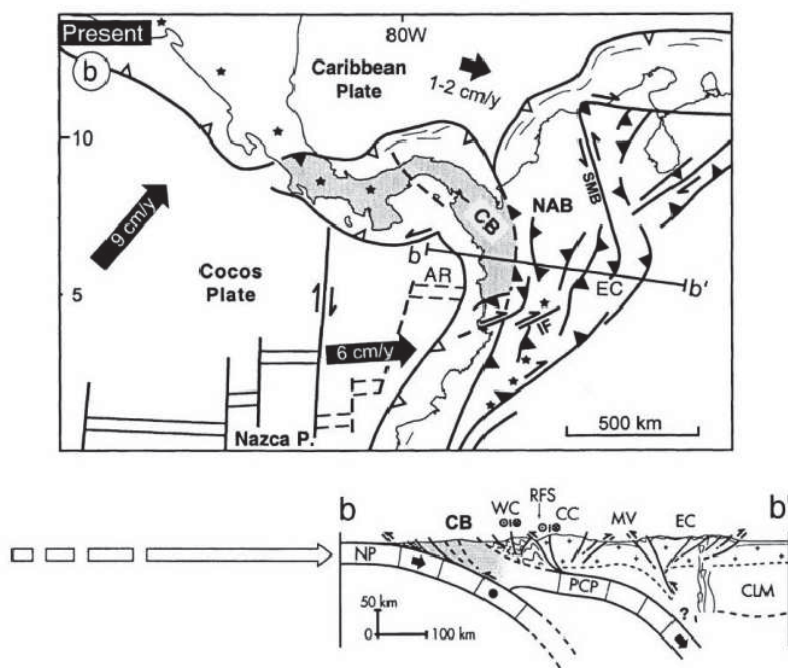


Figura 4-1. Geodinámica del Noroccidente de Suramérica [305]

4.1.1.1 Estructuras Tectónicas del Área del Proyecto

A continuación se enumera la localización de los cinturones de cabalgamiento, sistemas de fallas y fallas principales que están en contacto directo o indirecto con el trazado de la Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1. Para obtener información sobre la actividad sísmica histórica de estas características estructurales consultar el Capítulo 4.1.4.2. La Figura 4-2 a su vez provee un mapa geológico que representa las principales características estructurales a lo largo del trazado de la Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1.

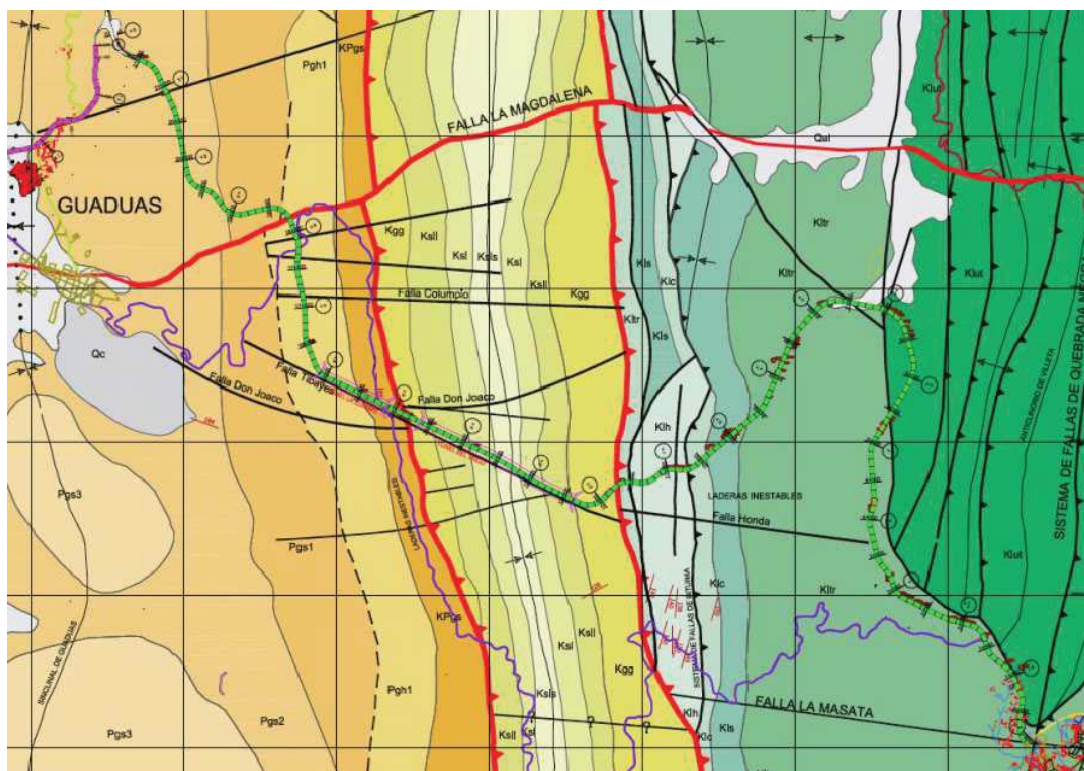


Figura 4-2. Mapa Geológico del área del proyecto.

A partir de aproximadamente K0+000 a K5+500, el trazado (Línea verde de la Figura 4-2) sigue el extremo sur del Sistema de Fallas de Quebrada Negra, un sistema de fallas de cabalgamiento que compone el núcleo central del Anticlinal de Villeta, los cuales están orientados aproximadamente norte a sur. Este sistema tiene aproximadamente 3 km de ancho y subyace la Formación Útica (consultar Capítulo 4.1.2 para una descripción de las unidades litológicas del área del Proyecto). Entre el K0+000 a K3+000 y K5+500 a K7+000, el trazado se construirá

directamente en materiales de la Formación Útica del Sistema de Fallas de Quebrada Negra.

El Sistema de Fallas de Bituima es un segundo sistema de fallas de cabalgamiento y lineamientos situados al oriente del Sistema de Fallas de Quebrada Negra, entre aproximadamente K10+500 y K11+700. Este sistema de fallas está orientado norte a sur y es parte del Sistema de Fallas Salinas. Con aproximadamente un kilómetro de ancho, el sistema marca el borde occidental del Anticlinorio de Villeta. El extremo más occidental del sistema está marcado por la Falla de Bituima, la cual intersecta el trazado entre aproximadamente K10+700 y K11+700. La Falla de Bituima tiene un buzamiento pronunciado hacia el oriente y con orientación norte-sur con una longitud total de aproximadamente 180 km. Las características geomorfológicas de la Falla de Bituima incluyen características morfológicas cuaternarias bien desarrolladas, incluyendo crestas y arroyos controlados por fallas [304]. Las unidades geológicas primarias del Sistema de Fallas de Bituima corresponden a las formaciones Socotá, Capotes e Hiló. Al occidente de la Falla de Bituima se encuentra el Sinclinal de Bituima.

La Falla de Alto del Trigo es la última falla principal situada en la zona del Proyecto y se encuentra en el lado occidental del Sinclinal de Bituima. Esta falla tiene un buzamiento hacia el oriente con un ángulo moderado a alto, cruza el trazado entre las abscisas K14+700 y K15+000 aproximadamente y así como el Sistema de Fallas de Bituima, es parte del Sistema de Fallas Salinas. Los sinclinales a ambos lados de la Falla del Alto del Trigo (Sinclinal de Guaduas al oriente y Sinclinal de Bituima al occidente) sugieren una compresión oblicua a lo largo de la falla. Esta falla tiene aproximadamente 118 km de largo con orientación norte a sur a lo largo del área de Proyecto. Las características geomorfológicas de esta falla incluyen una línea de falla bien definida con escarpes antiguos, collados, facetas triangulares, drenajes alineados y depósitos aluviales estancados (confinados) [304]. Los materiales de los grupos Guaguaquí y Olini componen el sinclinal de Bituima hacia el oriente, mientras que las Formaciones Hoyón y San Juan de Río Seco componen el borde oriental del Sinclinal Guaduas al occidente.

La Falla La Magdalena es una falla de rumbo (con desplazamiento lateral) con orientación oriente-occidente, situada principalmente hacia el norte del área del Proyecto y que cruza el trazado perpendicularmente en aproximadamente K18+200. La Falla La Magdalena intersecta el Sistema de Fallas de Quebrada Negra, el Sistema de Fallas de Bituima y la Fallas Bituima y Alto del Trigo aproximadamente en forma perpendicular.

Varios fallas de rumbo más pequeñas con orientación oriente-occidente y nororiente-suroriente y fallas no confirmadas (lineamientos) se encuentran a lo largo de la Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1 en forma paralela, oblicua o cruzando el trazado. Los nombres de fallas y lineamientos incluyen: Falla La Masata

(K0+000), Falla Honda (K3+500 a K4+100), Falla San Isidro (K10+400), Falla Tibayes (K12+000 a K16+000), Falla Don Joaco (K14+500 a K15+000) y Falla Columpio (K17+200). Las fallas sin nombre y posibles fallas y lineamientos que entran en contacto directo o indirecto con el trazado se encuentran aproximadamente en las abscisas K8+850, K9+100, K11+100 a K11+200, K12+000 a K12+200, K13+200, K13+600, K17+650, K17+900 y K20+900.

4.1.2 Principales Formaciones Geológicas – Unidades Litológicas

A lo largo del trazado del Proyecto, rocas sedimentarias marinas y terrestres son los materiales dominantes. Los planos de estratificación dentro de estas unidades generalmente están orientadas norte-sur o norte-nororiente y sur-suroriente, con estratos buzando hacia el occidente, con excepción de las rocas sedimentarias que comprenden el sinclinal de Bituima (grupos Guaguaquí y Olini), las cuales buzando hacia el oriente. La Figura 4-2 adjunta (o la Figura 1 del informe de Visita al Sitio, Apéndice 1) presenta un mapa de las unidades geológicas subyacentes del área del Proyecto.

Empezando en el K0+000 cerca de Villeta en el costado oriental y continuando hasta aproximadamente el K11+700, el trazado atraviesa una serie de rocas sedimentarias de origen marino las cuales componen el Anticlinorio de Villeta. La secuencia litológica de rocas, comenzando desde la más antigua, es la siguiente:

La **Formación Útica** (en el mapa geológico, Kih) está compuesta por areniscas arcósicas de edad Jurásica y arenitas sublíticas de grano fino a conglomerado con lodolitas y limolitas inter-estratificadas (intercaladas). Calizas micríticas negras están presentes cerca de la parte superior de la unidad [107]. Entre aproximadamente K5+500 y K7+600, el trazado será construido directamente en los materiales de la Formación Útica. Las areniscas y arenitas sublíticas intactas son más estables que los interestratos de lodolitas y limolitas de grano fino, las cuales son más susceptibles a la meteorización. Las Calizas micríticas también son susceptibles a la meteorización debido a que el agua disuelve el cementante de cal del cual están compuestas. La Formación Útica es la única unidad geológica que comprenden el Anticlinorio de Villeta (consultar Capítulo 4.1.1); este sistema de fallas de cabalgamiento indudablemente ha deformado y plegado los materiales de la Formación Útica así como ha incrementado su permeabilidad y por lo tanto, el aumento de la susceptibilidad a la meteorización de las areniscas de grano más grueso, las arenitas sublíticas y las lodolitas, limolitas, calizas y biomicritas de grano más fino.

Más de 8 km del trazado de la Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1 (desde aproximadamente K0+000 al K5+500 y K7+000 al K9+700) son subyacidos por la **Formación Trincheras** (Kitr) de la edad Cretácica inferior, descrita como lodolitas

calcáreas y silíceas negras con intercalaciones esporádicas de calizas de varios tamaños [107]. Las rocas sedimentarias de grano fino de esta formación son muy fisibles, rompiéndose fácilmente en el estado no meteorizado a lo largo los planos de estratificación. Estos materiales también son altamente susceptibles a la meteorización y se desintegran fácilmente con la mano. Consulte el Informe de Visita al Sitio, Paradas 3 y 4 (Apéndice 1) para ver ejemplos de los materiales típicos de la Formación de Trincheras.

La **Formación Socotá** (Kis) subyace el trazado desde aproximadamente K9+700 a K10+400 y es similar a la Formación Trincheras que también contiene lodolitas silíceas y calcáreas, pero a diferencia de los materiales de la Formación Trincheras, incluye interestratificaciones (intercalaciones) de capas de grano fino a areniscas de cuarzo conglomerádico con cemento calcáreo [107]. Los materiales de grano fino de esta unidad geológica son altamente susceptibles a la meteorización.

La **Formación Capotes** (Kic) se encuentra a lo largo del trazado de la Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1 entre aproximadamente K10+400 a K10+700 y de nuevo entre K11+500 y K11+700. Esta unidad de la roca se describe como lodolitas y limolitas negras con algunos niveles de concreciones [107]. Como con los materiales de grano fino de las formaciones de Trincheras y Socotá, los materiales de esta unidad son débiles y muy susceptibles a la meteorización.

La **Formación Hiló** (Kih) yace entre los dos bloques de material Capotes, entre aproximadamente K10+700 y K11+500. Los materiales de esta unidad se describen como limolitas y lodolitas calcáreas fisibles, que a veces son silíceas o contienen capas de calizas arenosas. Dentro de esta unidad de roca también están presentes calizas y areniscas calcáreas de grano fino con intercalaciones lodolitas, así como intercalaciones esporádicas de materiales micríticos [107]. Estas rocas son finamente laminadas en capas paralelas a sub-paralelas. Consulte la Parada 11 del Informe de Visita al Sitio (Apéndice 1) para un ejemplo de los materiales típicos de la Formación Hiló. Como con los materiales de las anteriores formaciones geológicas, los materiales de la Formación Hiló también son débiles y altamente susceptibles a la meteorización.

A medida que el trazado de la Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1 continúa hacia el occidente, aproximadamente en K11+700, entra en el Sinclinal de Bituima. Esta estructura está compuesta por rocas sedimentarias de los grupos Guaguaquí y Olini, que son de origen terrestre. Estos se describen de la siguiente manera:

El **Grupo Guaguaquí** (Kgg) del Cretácico superior se compone de lodolitas calcáreas negras con concreciones calcáreas e intercalaciones de limolitas silíceas, cuarzo microcristalino (“chert”) y caliza, y a veces son arenosas [107]. Capas ocasionales de carbón están presentes en esta formación. El trazado cruza

esta unidad de roca entre aproximadamente K11+700 y K12+400 y de nuevo entre aproximadamente K14+500 y K14+900. Estos materiales son altamente susceptibles a la meteorización, aunque “chert” es típicamente resistente a la meteorización y la erosión.

El **Grupo Olini** (Kso) se subdivide en tres facies. La primera de ellas es la más antigua: una capa de chert conocida como la Formación Lidita Inferior (Ksli), la cual contiene capas delgadas, ondulantes de chert y limo silíceo. La segunda de estas facies (Ksl) es una capa de limolitas silíceas con capas intercaladas de arenitas de cuarzo de grano fino; el tercer miembro del grupo Olini (Ksls) contiene capas intercaladas de arenisca de grano fino a medio, además de limolitas silíceas. El trazado cruza estos materiales entre aproximadamente K12+400 y K14+500 en el centro del Sinclinal Bituima. Las limolitas de esta facie son susceptibles a la meteorización; Aunque cherts y areniscas del grupo Olini son resistentes a la meteorización cuando están intactos, el sinclinal de Bituima es atravesado varias veces por fallas orientadas oriente-occidente y noroccidente-suroriente y lineamientos (consultar el capítulo 4.1.1.1), lo cuales además aumentan la permeabilidad y la susceptibilidad de la masa rocosa a la meteorización y la erosión.

La **Formación Seca** (KPgs) del Cretácico Superior, que ocurre a lo largo del trazado entre aproximadamente K14+900 y K15+500, se compone de lodolitas y arcillolitas marrón-grisáceas a rojas con nódulos de caliche y capas intercaladas de arenita de cuarzo de grano fino a medio [107]. Los materiales de grano fino de esta formación son susceptibles a la meteorización. En áreas a lo largo de este trazado, que han sido deformadas por fallas y lineamientos, los materiales de grano grueso de la Formación Seca también son susceptibles a la meteorización.

La **Formación Hoyón** (Pgh) está presente a lo largo del trazado de la Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1 desde aproximadamente K15+500 a K18+300. Esta unidad de roca se subdivide en tres facies; según el mapa geológico, sólo el primero de estos (Pgh-1) se encuentra a lo largo del trazado del Proyecto. El Pgh-1 se compone de capas gruesas a muy gruesas de conglomerados polimíctico, compuestos por clastos tamaño grava y bloques de diferentes composiciones litológicas, así como las areniscas de cuarcíticas. Los otros dos miembros de la formación Hoyón constan de arcillolitas con capas esporádicas de los conglomerados polimícticos con clastos tamaño grava o guijarro (Pgh-2) y los conglomerados polimícticos compuestos por clastos tamaño grava y guijarros, intercalados con areniscas y lodolitas de cuarzo intercaladas (Pgh-3) [107]. En su forma intacta, estos materiales son generalmente competentes y resistentes a la meteorización, sin embargo las intercalaciones de arcillolitas y lodolitas de Pgh-2 y Pgh-3 son susceptibles a la meteorización. Estos materiales yacen al occidente de la Falla del Alto del Trigo y son atravesadas por la Falla La Magdalena, las cuales

sin duda los han deformado a través de episodios de movimiento, aumentando su permeabilidad y por lo tanto, su susceptibilidad a la meteorización.

La **Formación San Juan de Rio Seco** (Pgs) es la última de las unidades geológicas que subyacen el trazado de la Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1. Esta formación se subdivide en cuatro miembros, dos de los cuales están presentes en el área del Proyecto según el mapa geológico. El miembro de mayor edad de éstos, denominado Pgs-1 se encuentra a lo largo del trazado entre aproximadamente K18+300 y K19+200 y se describe como areniscas conglomeráticas con gránulos aglomerados. El Pgs-2, que subyace a la Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1 de K19+200 hasta el final del trazado en el K21+600, está compuesto de capas intercaladas de arcillolitas y lodolitas con diferentes espesores e intercapas medianas a gruesas de arenitas sublíticas de grano fino a grueso [107]. Como en el caso del miembro Pgh-1 de la Formación Hoyón, estos dos miembros yacen en cercanías a la Falla de Alto del Trigo y la Falla La Magdalena, las cuales probablemente los han deformado a un estado en que han aumentado su permeabilidad y por lo tanto, su susceptibilidad a la meteorización.

El miembro Pgs-3 se compone de capas delgadas de areniscas de grano medio a grueso y arenitas sublíticas. El miembro Pgs-4 se compone de arcillolitas con capas delgadas, intercaladas de arenitas de cuarzo de grano mediano a grueso y arenitas sublíticas. Según el mapa geológico (Figura 4-2), el trazado de la Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1 no entra en contacto con los miembros Pgs-3 o Pgs-4 [107]. Los materiales de grano fino de estos miembros son altamente susceptibles a la meteorización y la permeabilidad y susceptibilidad a la meteorización de estos miembros incluyendo materiales de grano fino y grueso, aumenta con la proximidad a las principales fallas de cabalgamiento y rumbo dentro del área del Proyecto (es decir, Falla del Alto del Trigo y Falla La Magdalena).

4.1.3 Suelos Superficiales (Depósitos de Origen Cuaternario)

Cubriendo las unidades geológicas a lo largo del trazado del Proyecto se encuentran depósitos aluviales y coluviales de edad cuaternaria (Qal y Qco, respectivamente).

Comenzando en aproximadamente K2+200 y continuando hasta aproximadamente K10+500, el trazado entra y sale frecuentemente del contacto con los depósitos aluviales y coluviales; los depósitos aluviales trazan los valles del Río Quebrada Honda, Quebrada del Cune y Quebrada San Fernando, así como sus pequeños arroyos y torrentes tributarios. Los depósitos coluviales son atribuidos a inestabilidades de laderas dentro de las rocas sedimentarias de grano fino, débiles y altamente meteorizadas de las formaciones Trincheras, Socotá, Capotes e Hiló. En esta sección del trazado también se encuentra entre el Sistema

de Fallas de Quebrada Negra hacia el oriente y la Falla de Bituima y el Sistema asociado de Fallas de Bituima al occidente (consultar Capítulo 4.1.1.1).

Entre aproximadamente K13+000 y K14+800 el trazado cruza una zona de material coluvial, que subyace rocas sedimentarias de los grupos Guaguaquí y Olini en el Sinclinal de Bituima. El sinclinal yace entre la Falla del Alto del Trigo y la Falla de Bituima que corresponden a fallas de cabalgamiento (consultar Capítulo 4.1.1.1).

El trazado cruza la Falla La Magdalena (consulte el capítulo 4.1.1.1) y el deslizamiento San Francisco entre aproximadamente K17+500 y K18+500; aunque representada en el mapa geológico yaciendo sobre rocas de los miembros más antiguos de las formaciones Hoyón y San Juan de Río Seco (Pgh-1 y Pgs-1, respectivamente), una visita al sitio del Proyecto reveló que los materiales que componen el deslizamiento son de naturaleza coluviales (consultar Parada 17 en el Informe de Visita al Sitio, Apéndice 1). Este material está directamente relacionado con el deslizamiento de San Francisco. Consultar el Capítulo 4.1.1.1 para obtener información sobre el origen de estos materiales coluviales.

4.1.4 Riesgos Geológicos

4.1.4.1 Deslizamientos de Tierra y Desestabilización de la Laderas

Varios factores contribuyen al potencial de desestabilización de taludes y movimientos de masas a lo largo del trazado del Proyecto. Estos incluyen la litología subyacente, proximidad a estructuras tectónicas, ángulo de buzamiento y dirección planos de estratificación, procesos aluviales y agua sub-superficial, incluyendo variaciones estacionales normales en los niveles de agua subterránea, efectos de filtración y drenaje, y pérdida de vegetación de laderas.

Los materiales dominantes a lo largo de la zona del Proyecto son rocas sedimentarias de grano fino, mayormente lodolitas y arcillolitas, que son de naturaleza extremadamente susceptible a la meteorización. Estos materiales están presentes en todas las unidades litológicas a lo largo del trazado de la Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1, pero en particular en las formaciones Trincheras, Socotá, Capotes e Hiló. Además, muchas de las unidades rocosas en la zona del Proyecto contienen cementante calcáreo, caliza y materiales micríticos, que también son susceptibles a la meteorización debido a que el agua disuelve el calcio contenido en sus estructuras mineralógicas. Los sistemas con materiales débiles de grano fino y grueso interestratificados, tales como los materiales del Sinclinal de Bituima (formaciones Guaguaquí y Olini), así como las formaciones Hoyón y San Juan de Río Seco, son particularmente susceptibles a la falta de taludes cuando los interestratos de materiales débiles, de grano fino, se saturan de agua y comienzan a desintegrarse. Los estratos más competentes y resistentes a la erosión que se

encuentran sobre estas zonas debilitadas, tendrán luego un mayor potencial de movimientos de masas a medida que se deslizan a través de los materiales meteorizados, de grano fino. Este mecanismo particular es responsable del origen de los materiales en el deslizamiento de San Francisco (K17+500 a K18+500).

Aunque en el sitio del Proyecto los materiales de grano fino son generalmente más susceptibles a la meteorización, los materiales de grano más grueso a lo largo del trazado, incluyendo las arenitas sublíticas, areniscas y conglomerados, que han sido deformados en zonas de fallas (es decir, Falla La Magdalena, Falla de Alto del Trigo y la Falla Bituima) también están expuestos a un mayor potencial de meteorización a medida que van siendo triturados y perturbados, aumentando su permeabilidad. La multitud de fallas en toda la región ha impactado cada unidad litológica a lo largo del trazado del Proyecto debido a procesos de deformación, corte y rotura de tal manera que ha aumentado su permeabilidad. El aumento en la permeabilidad indica que una unidad de roca, desde materiales de grano fino débiles a areniscas, arenitas sublíticas y conglomerados más competentes, es susceptible a una mayor tasa de meteorización que si permanecen intactos. Esto podría conducir a un mayor riesgo de deslizamientos y desestabilización de taludes a lo largo del trazado del Proyecto.

El ángulo de buzamiento y el rumbo (orientación) de los planos de estratificación también contribuyen a la posibilidad de falla de taludes en laderas naturales y artificiales (por ejemplo, cortes). En laderas donde el plano de estratificación está orientado cuesta abajo, existe más potencial de falla de taludes que en aquellos en que las discontinuidades buzan hacia el interior del talud.

Una tasa alta de meteorización equivale a una reducción en la resistencia de la masa de roca que crea un potencial para desestabilización de taludes y movimientos en masa en forma de reptación de ladera, deslizamiento y flujo de tierra. Debe notarse que los deslizamientos son comunes en toda Colombia, incluyendo el área del Proyecto. Escarpes de deslizamientos antiguos están extendidos en las laderas a lo largo del trazado de la Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1. Grandes movimientos en masa en las proximidades de la zona del Proyecto, incluyendo el deslizamiento del El Cune y el deslizamiento de San Francisco en aproximadamente K0+000 (adyacente y hacia fuera de la zona del proyecto) y K17+500, respectivamente, han ocurrido donde una combinación de la composición litológica y presencia de fallas activas ha causado altas tasas de meteorización, erosión y eventual falla de taludes. Estos factores son comunes y tienen el potencial de crear fallas de taludes futuras en toda la región.

Otros factores relacionados con la falla de taludes en la zona del Proyecto incluyen la erosión de los ríos y arroyos, condiciones del agua subterránea (hidrostática y fuerzas de filtración) y la pérdida de vegetación en las laderas a lo largo del trazado. Los ríos erosionan lentamente el pie de taludes a lo largo de sus

orillas, lo que eventualmente lleva a la desestabilización y falla de taludes adyacentes. Los períodos de fuertes o intensas lluvias aumentan dramáticamente tanto la frecuencia como la magnitud de la falta de taludes a lo largo de las orillas de ríos y arroyos debido a los grandes volúmenes de agua se movilizan a través de cauces fluviales en breves períodos de tiempo. Consulte el Informe de Visita al Sitio, Paradas 3 y 4 para fotografías que representan este comportamiento. En lo que respecta al Proyecto, estructuras construidas con sus cimentaciones en áreas susceptibles a la erosión de río (es decir, pilares de puentes y viaductos) se enfrentarán a los impactos potenciales de los procesos fluviales naturales debido a que estas áreas continuarán erosionándose. El agua subterránea puede afectar las tasas de meteorización y erosión de los materiales a lo largo del trazado, particularmente de los materiales de grano fino de las formaciones Útica, Trincheras, Socotá, Capotes e Hiló que se desintegran rápidamente cuando se exponen al agua por largos períodos de tiempo. Para acuíferos más superficiales (freáticos), que se encuentran dentro de suelos residuales y materiales aluviales y coluviales a lo largo del trazado, la capacidad de estos materiales para retener agua disminuye hasta el punto donde eventos de lluvia en exceso pueden conducir a la inestabilidad y eventual falla de taludes. Ver Capítulo 4.3 para obtener más información acerca de la Hidrología del área del Proyecto.

Finalmente, la pérdida de vegetación a lo largo del trazado del Proyecto aumenta las posibilidades de falla de taludes y movimientos en masa. Las raíces de la vegetación aumentan la capacidad del material para retener agua, así como ofrecen protección contra la erosión ya que estabilizan el suelo. Históricamente, las laderas en toda la región a través del cual se encuentra el trazado del proyecto han sido fuertemente cubiertas por vegetación con plantas, arbustos y árboles tropicales y subtropicales. Durante aproximadamente los últimos 50 años se ha observado una mayor deforestación de estas laderas a medida que el terreno ha sido despejada para el cultivo de caña de azúcar y otras cosechas. Esto ha llevado a un creciente potencial de desestabilización de taludes. Consulte el Capítulo 4.4 para obtener información sobre el uso actual de la tierra a lo largo de la zona del Proyecto.

4.1.4.2 Sismicidad

La sismicidad en Colombia generalmente es controlada por zonas de subducción de las placas del Caribe y Nazca al occidente y norte de la zona del Proyecto respectivamente, así como la deformación intracontinental poco profunda a lo largo de fallas reactivadas con orientación norte-noroccidente dentro de las cordilleras. La sismicidad por lo tanto se concentra principalmente en las zonas costeras y montañosas del país [305]. Estas zonas sísmicas tienden a ocurrir a menor profundidad y es especialmente característico de la actividad sísmica en la Cordillera Oriental y posteriormente, dentro del área del Proyecto. Algunas de

estas fallas reactivadas (removilizadas) no han sido todavía identificados o totalmente estudiadas. En el área del Proyecto, el Sistema de Bituima, Falla Bituima y los miembros de la Falla del Alto del Trigo del Sistema de Fallas Salinas parecen ser un centro de actividad sísmica [304].

El movimiento a lo largo de la Falla Bituima está restringido la era cuaternaria temprano, hace 1.6 a 0.75 millones de años. Basado en características morfológicas de deformación, la tasa de deslizamiento de esta falla se estima en inferior a 0.2 mm por año (USGS, 2000) con un intervalo de recurrencia que puede oscilar entre 3.000 y 30.000 años.

El movimiento más reciente a lo largo de la Falla del Alto del Trigo también se estima en la era cuaternaria, en algún momento en los últimos 1.6 millones de años. Con base en la cantidad de desplazamiento de características neotectónicas, la tasa de deslizamiento se estima inferior a 0,2 mm por año (USGS, 2000) con un intervalo de recurrencia que puede oscilar entre 10.000 y 400.000 años [304].

También es importante mencionar el segmento de Bucaramanga, una zona de actividad sísmica concentrada al nororiente de la zona del Proyecto relacionado con la subducción de la placa del Caribe bajo el Cratón sudamericano más estable. El segmento de Bucaramanga se divide en dos partes: el segmento norte de Bucaramanga muestra una losa que subduce con un ángulo de buzamiento de 27°W, mientras que el segmento sur de Bucaramanga muestra una placa más escarpada con un ángulo de buzamiento de 40°W y un espesor de placa de aproximadamente 20 km. Dentro del segmento sur de Bucaramanga se encuentra el nido sísmico Bucaramanga (BSN), el cual corresponde a una concentración de actividad sísmica aproximadamente 275 km al nororiente de la zona del Proyecto. La actividad en el BSN está agrupada en pequeño volumen de 13 x 18 x 12 km a una profundidad de 160 km [305].

Terremotos importantes se han producido históricamente en Colombia; el más reciente evento que ocurrió en cercanías de la Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1 es el terremoto Tauramena (M6.5), un evento superficial que tuvo lugar el 19 de enero de 1995 aproximadamente 170 km al oriente de Villeta. El terremoto de Tauramena fue producido a lo largo de un plano escarpado inclinado asociado con el Sistema de Fallas de Guaicaramo, parte del Sistema de Fallas de la Falla Frontal de la Cordillera Oriental (FFS) [305]. Terremotos seguirán ocurriendo a través de Colombia y aquellos ocurran cerca del área del Proyecto aumentarán el potencial de meteorización y falla de taludes en las laderas de materiales de grano fino tanto como grueso, que ya se están debilitadas debido la combinación de deformación por movimientos de falla y subsecuentemente, el aumento de la permeabilidad, y meteorización, causando deslizamientos de tierra y otros movimientos en masa.

4.2 Geotecnia

4.2.1 Previsiones de Movimiento de Tierras – Diseño Geométrico

El diseño geométrico incluye largas secciones con importantes movimientos de tierras (cortes, rellenos estructurales para terraplenes y muros de contención de tierras) a lo largo del trazado contractual, lo cual es de principal interés en materia de ingeniería geotécnica. Los movimientos de tierras propuestos se muestran en planos de la Fase 2 del Diseño, N^o 6321-00-DGW-PP-T1-001I al -031I (calzada izquierda) y 6321-00-DGW-PP-T1-001D al -031D (calzada derecha), respectivamente [118]. La Tabla 4-1 de este informe proporciona un resumen de los trabajos de movimiento de tierra previstos, amenazas geológicas y elementos fundamentales del diseño, desde un punto de vista geotécnico.

Con el propósito de discutir varios aspectos de dicho movimiento de tierras (tales como altura máxima y pendiente promedio de los taludes) y otras estructuras del proyecto, los cortes y terraplenes propuestos como parte del Diseño Fase 2 para la Ruta del Sol Sector 1, Tramo 1, fueron subdivididos de acuerdo a la magnitud de los cortes y terraplenes y el tipo de estructuras propuestas. Detalles adicionales sobre las estructuras del proyecto, sistemas de cimentación para puentes, viaductos se proporcionan en el Capítulo 6 “Elementos Estructurales del Trazado” y, en mayor detalle, en la Tabla A3-1 (incluida en Apéndice 3).

Los principales riesgos geológicos se describen en forma general en el Capítulo 4.1, incluyendo varias formas de movimientos de masas, deslizamientos, flujos de tierras y reptación, fallas (activas e inactivas) que cruzan el trazado de la carretera, inundaciones y erosión.

Tabla 4-1. Resumen de Principales Trabajos de Movimientos de Tierras y Amenazas Geológicas – Sector 1, Tramo 1, Diseño Fase 2

Segmento	Abscisa	Altura Máxima de Taludes en Cortes (Figura 4-4)	Pendiente Promedio de Taludes en Corte, V:H	Altura Máxima de Taludes en Terraplén (Figura 4-5)	Pendiente Promedio de Taludes en Terraplén, V:H	Fracción de Lutitas y lodolitas en Perforaciones (Figura 4-3)	Angulo de Buzamiento Aparente Afectando Taludes Izquierdos en Corte (Figura 4-3)	Angulo de Buzamiento Aparente Afectando Taludes Derechos en Corte (Figura 4-3)	Amenazas Geológicas, Notas
	(Km)	(m)	(No.)	(m)	(No.)	(%)	(grados)	(grados)	
1	0+000 a 1+950	12 – 62	0.3:1 a 2.5:1	14 – 31	0.5:1 a 1.0:1	15 - 75	55 – 85	8 - 35	Cruce de Zona del Sistema de Fallas Quebrada Negra.
2	1+950 a 6+610	12 – 50	0.3:1 a 1.3:1	10 - 28	0.4:1 a 1.0:1	50 – 90	17 – 30	20 - 32	Trazado paralelo a la Falla Quebrada Negra y Taludes Inestables.
3	6+610 a 9+290	13 – 22	0.4:1 a 1.5:1	15 - 29	0.4:1 a 1.4:1	25 - 100	74	65	Taludes Inestables.
4	9+290 a 12+370	33 – 85	1.1:1 a 2.0:1	22 - 29	0.7:1 a 1.0:1	10 - 95	21	22 -24	Cruce de la Falla Bituima
5	12+370 a 16+118	N/A	N/A	12	N/A	80	N/A	N/A	Cruce de la Falla Altos del Trigo y trazado paralelo o cercano a las Fallas Tibayes y Don Joaco. Túneles El Trigo, La Cumbre y Puente Altos del Trigo.
6	16+118 a 19+000	20 – 78	0.7:1 a 2.4:1	10 - 29	0.5:1 a 1.0:1	N/A	63	3 - 15	Cruce de la Falla La Magdalena, varios lineamientos geológicos y el deslizamiento de San Francisco.
7	19+000 a 21+600	25 – 36	0.6:1 a 2.4:1	10 – 20	0.5:1 a 1.0:1	N/A	N/A	N/A	N/A

N/A: no aplicable.

4.2.2 Entorno Geotécnico

Un resumen de los datos geológicos disponibles y descripciones del entorno geotécnico del trazado del proyecto Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1, son proporcionados en la Sección 4.1 (Geología) de este informe. Datos geológicos adicionales se proporcionan en los siguientes informes finales del Diseño Fase 2:

- Estudio de Factibilidad para el Proyecto Ruta del Sol, Volumen IV: Geología y Geotecnia. Informe final preparado por Euroestudios (Enero,

2009) para INCO (Instituto Nacional de Concesiones [actualmente ANI]) [107].

- Estudios Geológicos para la Ingeniería y Geotecnia (Mayo, 2011).

La siguiente sección proporciona un resumen del entorno geológico a ser usado en el contexto geotécnico.

Amenazas de Inestabilidad de Taludes

Las principales amenazas naturales que afectan el área de Villeta incluyen deslizamientos de taludes e inundaciones, las cuales totalizan aproximadamente la mitad y un cuarto de los casos registrados (en año 2004). Dichas proporciones aproximadamente se invierten en el área de Guaduas.

De acuerdo a mapas publicados en el Atlas Regional de Cundinamarca (CAR) para planeamiento preliminar y evaluaciones de amenazas geológicas, durante el periodo 2003 al 2006 se registraron entre 7 y 27 casos de remoción de masas en el área de Villeta y entre 4 y 6 en las áreas de Quebrada Negra y Guaduas [211].

La Figura 4-2 muestra un mapa geológico reciente del área del proyecto, incluyendo el trazado propuesto. Dicho mapa fue proporcionado por Helios y ANI durante la visita al terreno los días 8 y 9 de julio, 2013. Este mapa ilustra las principales condiciones y amenazas geológicas del proyecto, las cuales son resumidas en los párrafos siguientes.

Áreas de Taludes Naturales Potencialmente Inestables

De acuerdo al antedicho mapa geológico (Helios/ANI, 2013), los primeros 12 km aproximadamente del trazado cruzan áreas de taludes naturales potencialmente inestables, en su mayoría consistentes en depósitos de materiales coluviales (Qco), muchos de ellos subyacidos por rocas arcillosas clasificadas como débiles a muy débiles en términos de resistencia a la compresión no confinada (casi dentro de rangos de compresión no confinada de suelos), en gran parte constituidas por lodolitas y lutitas de la Formación Trincheras (Kitr) y Útica (Kiut). Aproximadamente 53 áreas de flujos de tierra y deslizamientos a lo largo del trazado fueron ubicadas durante los estudios geológicas (Diseño Fase 2), con volúmenes generalmente dentro del rango de 200 a 16,000 metros cúbicos (m³), como se muestra en la Figura 4-3 (parte inferior).

Una cantidad importante de laderas naturales potencialmente inestables han sido evaluadas registradas dentro y a ambos lados de la zona de carretera dentro del corredor contractual. Dentro de primeros 12 km de la carretera (aproximadamente la mitad suroriente), la distancia típica a lo largo del trazado entre dichas áreas de materiales inestables es del orden de varios cientos de metros. Áreas de laderas potencialmente inestables también se anticipan entre las abscisas K17+500 y K19+500 de la carretera propuesta a lo largo de la rivera del Río San Francisco,

además del cruce de la Falla La Magdalena, se encuentran ubicadas dentro de la Reserva Nacional Natural San Francisco. La Figura 4-3 muestra varios factores geológicos que potencialmente pueden impactar la estabilidad de taludes naturales; esto incluye la fracción de lutitas/lodolitas encontradas en perforaciones (en porcentaje con respecto a la longitud total de la perforación).

Los mayores deslizamientos reconocidos en el área del proyecto e inmediata vecindad, incluyen también el Deslizamiento El Cune ubicado inmediatamente antes del comienzo (K0+000) del Tramo 1, Sector 1. El deslizamiento de San Francisco consiste de depósitos coluviales, subyacidos por varios niveles de arenisca y arcillolita intercalados, con buzamientos descendiendo hacia el valle, con obvias señales de inestabilidad de los estratos rocosos. El espectro de una futura reactivación del deslizamiento de San Francisco es considerado muy factible.

Durante la visita al trazado de la carretera el día 9 de Julio, 2013, se tuvo la oportunidad de hablar con residentes que operan una pequeña finca ubicada en el área del deslizamiento. Se obtuvieron datos directos del importante último deslizamiento de San Francisco ocurrido durante el periodo lluvioso de La Niña 2010-2011. De acuerdo a dichos relatos, su propiedad (una pequeña casa y dos estanques para el desarrollo de acuacultura se trasladaron una distancia de alrededor de 250 a 300 m (talud abajo, hacia Guaduas), en forma esencialmente interrumpida (y sin derrumbarse) durante toda la noche hasta el día siguiente, por un periodo total de no más de 24 horas, para finalmente detenerse y luego colapsar. Esta información sugiere una velocidad de deslizamiento del orden de 10 a 20 metros por hora. Las ubicaciones originales y finales de la casa destruida fueron observadas durante la visita al sitio (referirse al Apéndice 1).

Amenazas Sísmicas: Mapas de aceleración sísmica del Departamento de Cundinamarca, indican valores de coeficientes de aceleración sísmica horizontal dentro del rango de 0.16 a 0.20 en el área Villeta-Guaduas [215].

Estructuras Geológicas, Fallas y Lineamientos

Zonas de cruce de fallas geológicas, donde las formaciones rocosas están generalmente mucho más fragmentadas y meteorizadas, incluyen las siguientes:

- Zona del Sistema de Falla Quebrada Negra, la cual es cruzada en forma oblicua a lo largo de los primeros 3 km del corredor contractual (aproximadamente K0+000 a K3+000), para luego dirigirse hacia el norte en forma casi paralela a esta zona de falla por los siguientes 4 km (aproximadamente K3+000 a K7+000).
- Anticlinal de Villeta, el cual es una estructura geológica de importancia en la misma área que el Sistema de Fallas Quebrada Negra.
- Falla de Bituima, ubicada aproximadamente entre K10+700 y K11+500, la cual es también considerada una falla activa.
- Falla Alto del Trigo, ubicada aproximadamente entre K14+700 y K15+000, es considerada potencialmente activa.
- Falla La Magdalena (a lo largo de Río San Francisco), aproximadamente entre K18+200 y K18+600.

Varios lineamientos (o fallas potenciales, no confirmadas) se observan en las siguientes ubicaciones:

- K0+000 (La Masala)
- K3+500 a K4+100 (Honda)
- K8+850
- K9+100
- K10+400 (San Isidro)
- K11+000 a K11+200
- K12+000 a K16+000 (casi paralela a la Falla Tibayes y oblicua a Don Juaco)
- K12+000 a K12+200
- K13+200 a K13+600
- K17+650, K17+900
- K18+200 (La Magdalena)
- K20+900.

4.2.3 Caracterización Geológica y Secciones Transversales Interpretadas

Secciones transversales con una interpretación de datos geológicos fueron compiladas durante Diseño Fase 2 usando datos de mapas geológicos (geología de superficie) y unas 120 perforaciones y apiques para exploración del terreno.

Las perforaciones de exploración generalmente se extendieron hasta profundidades del orden de 8 a 44 m bajo la superficie actual del terreno. Además, 4 perforaciones fueron realizadas en las zonas de túnel, con profundidades de aproximadamente 62 a 155 m bajo la superficie del terreno. Además se incluyen los resultados de prospección geofísica (líneas de refracción sísmica).

Veintiséis secciones transversales aproximadamente perpendiculares al eje del trazado, fueron preparadas como parte del Diseño Fase 2 at varias ubicaciones a lo largo de la Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1. Además se prepararon 4 perfiles longitudinales con interpretación geológica a lo largo de 4 zonas críticas ubicadas aproximadamente en las cercanías de: 1) Quebrada El Cune (K1+180); 2) Vereda la Esmeralda (K7+850); 3 y 4) Quebrada Los Barretos (Escuela Rural Palermo (K8+600), resultando en un total de 30 secciones con interpretación estratigráfica simplificada. Estas secciones geológicas fueron listadas en Tabla A3-1 (incluida en Apéndice 3), lo cual se resume la Tabla 4-5.

Las rocas sedimentarias comúnmente encontradas a lo largo del trazado de Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1, particularmente rocas laminadas arcillosas como las lutitas, pero también las arcillolitas, limolitas y areniscas, son muy conocidas por su notables características de anisotropía en materia de propiedades geomecánicas, particularmente el alto contraste entre parámetros de la resistencia al corte: a) a lo largo y b) a través (cruzado) de los planos de estratificación de la roca.

Adicionalmente, dependiendo de sus condiciones geológicas e historia previa de carga (preconsolidación), estos materiales normalmente desarrollan un valor máximo a deformaciones relativamente pequeñas. A mayores deformaciones, la resistencia al corte de este tipo de material se reduce para valores “post-máximo”, llegando a un valor mínimo a deformaciones relativamente altas.

En casos de diferencias importantes entre el máximo y los valores “post-máximo” para varios niveles de deformación, puede ser requerido el uso de un segundo conjunto de parámetros de resistencia al corte, llegando a un valor “residual” (a deformaciones relativamente altas), correspondiendo a la mínima resistencia al corte de ese material.

Debe destacarse que una vez que la resistencia al corte máximo ha sido excedida, ciclos de carga y descarga subsiguientes no alcanzarán nuevamente ese valor máximo. Si un talud natural existente hubiera sido sujeto durante su historia geológica a los niveles de deformación tales que su resistencia original máxima al corte (o cizalladura) y distorsiones asociadas hayan sido excedidas, la resistencia máxima no estará disponible nuevamente. Un valor de resistencia al corte cercano al residual (o entre el máximo y el residual) puede ser aplicable en este caso.

Consecuentemente, en casos de un área adyacente o cercana con que haya experimentado un deslizamiento en la misma formación geológica y unidad litológica, es en general prudentemente considerada con alta probabilidad de haber sufrido una historia similar de deformaciones y por lo tanto ser muy susceptible a sufrir deslizamientos, requiriendo parámetros residuales de resistencia al corte para el análisis y diseño de estructuras temporales y permanentes construidas en o sobre esa unidad geológica.

Adicionalmente, para construcciones temporarias, tales como taludes en corte temporarios, durante la preparación para otros trabajos de movimientos de tierras, puede ser aceptable el uso de parámetros de resistencia al corte consolidados-no drenados. En caso de condiciones de carga permanente, aplicables a la vida económica total de la estructura (por ejemplo, 30 a 50 años), el uso de parámetros de resistencia al corte consolidados-drenados puede ser más adecuado.

4.2.4 Consideraciones Geotécnicas Sobre la Estabilidad de Taludes en Corte y en Relleno Estructural, Muros de Contención y Taludes Naturales Adyacentes.

Planos para el diseño geométrico de la carretera propuesta a lo largo del trazado, preparados durante la etapa de Diseño Fase 2, son designados 2361-00-DG-DW-PP-T1-001D al -031D (calzada derecha) y -001I al -031I (calzada izquierda) [118].

Estos datos geométricos preparados durante el Diseño Fase 2 son suplementados desde un punto de vista geotécnico, con datos geológicos de los taludes en corte y en terraplén, propuestos a lo largo de los costados izquierdos y derechos del trazado contractual. Dichos datos son presentado en un informe de estudios realizados (2361-00-ET-RP-001, Rev. 0, fechado Mayo, 2011) incluyendo estabilidad y estabilización de taludes, muros de sostenimiento y terraplenes [128]. Sección 5 de este informe discute los taludes en corte propuestos (presentados en Tablas 1 a 3), taludes de rellenos estructurales usados en terraplenes (Tablas 4 a 6) y muros de sostenimiento propuestos (Tabla 7), respectivamente, los cuales se discuten en las siguientes secciones de este informe:

4.2.4.1 Resumen de Taludes en Corte (Propuestos en Diseño Fase 2)

Los principales taludes en corte considerados como parte del Diseño Fase 2, se resumen en Tabla 4-2.

Tabla 4-2. Resumen de Taludes en Corte

Abscisa Inicial	Abscisa Final	Máxima Altura de Taludes en Corte (m)	Pendiente Promedio de Taludes en Corte (V:H) y Ubicación	Litología y Sección Geológica	Lado de la Carretera
K0+000	K0+250	53	2.3:1* @ K0+260	Calizas	Derecha
K9+250 (K9+290*)	K9+830	63	2.0:1* @ K9+340	Lutitas	Derecha
K10+130 (K10+270*)	K10+780	80 (83*)	2.0:1* @ K10+270	Lutitas (Sección K10+270*)	Derecha
K11+170	K12+150	53	1.9:1* @ K11+300	Lutitas	Derecha
K16+370 (K16+530*)	K17+740	78	0.75:1* @ K17+250	Areniscas (Sección K17+270*)	Derecha
K18+340	K19+440	70 (73*)	2.4:1* @ K18+650	Areniscas (Sección K18+650*)	Derecha

Nota: () Valores estimados en base planos de diseño geométrico Fase 2 (2361-00-DG-DW-PP-T1-001D al - 031D, fechados Mayo, 2011) [118].*

Máxima Altura de Taludes en Corte

En total se planean unas 60 taludes en corte, de más de 10 m de altura, ubicados sobre el costado derecho y 7 sobre el costado izquierdo a lo largo del trazado contractual de la carretera, lo cual es esquemáticamente mostrado en la Figura 4 4 de este informe. Los datos resumidos en dicha figura, indican también que se planean unas 30 áreas con máxima altura de taludes en corte entre 40 y 85 metros, todos los cuales están ubicados al costado derecho de la carretera. La altura de estos taludes en corte es particularmente importante cuando se considera la naturaleza relativamente débil de las materiales geológicos (rocas arcillosas tales como lutitas, lodolitas), la orientación de los planos de estratificación de la roca (rumbo y buzamiento) que puede ser adversa (tener una componente del buzamiento “hacia afuera” del talud) en algunas áreas y la pendiente empinada de algunos de estos taludes en corte.

Pendiente Promedio de Taludes en Corte

Pendiente promedio (relación vertical a horizontal, V:H) propuesta para los taludes en corte de altura mayor que 40 m, son generalmente más empinados que 1.0V:1H (45 grados) en 17 de esas 30 áreas y más empinados que 2.0V:1H (63 grados) en 11 de esas 30 áreas. Los taludes en corte más empinados que se proponen a lo largo del trazado

tienen una pendiente promedio de 2.4V:1H (67 grados), aproximadamente entre las abscisas K18+600 y K19+000.

La pendiente de estos taludes en corte es particularmente importante cuando se considera la altura de los taludes, la naturaleza relativamente débil de rocas arcillosas (lutitas, lodolitas) y la orientación de los planos de estratificación de la roca.

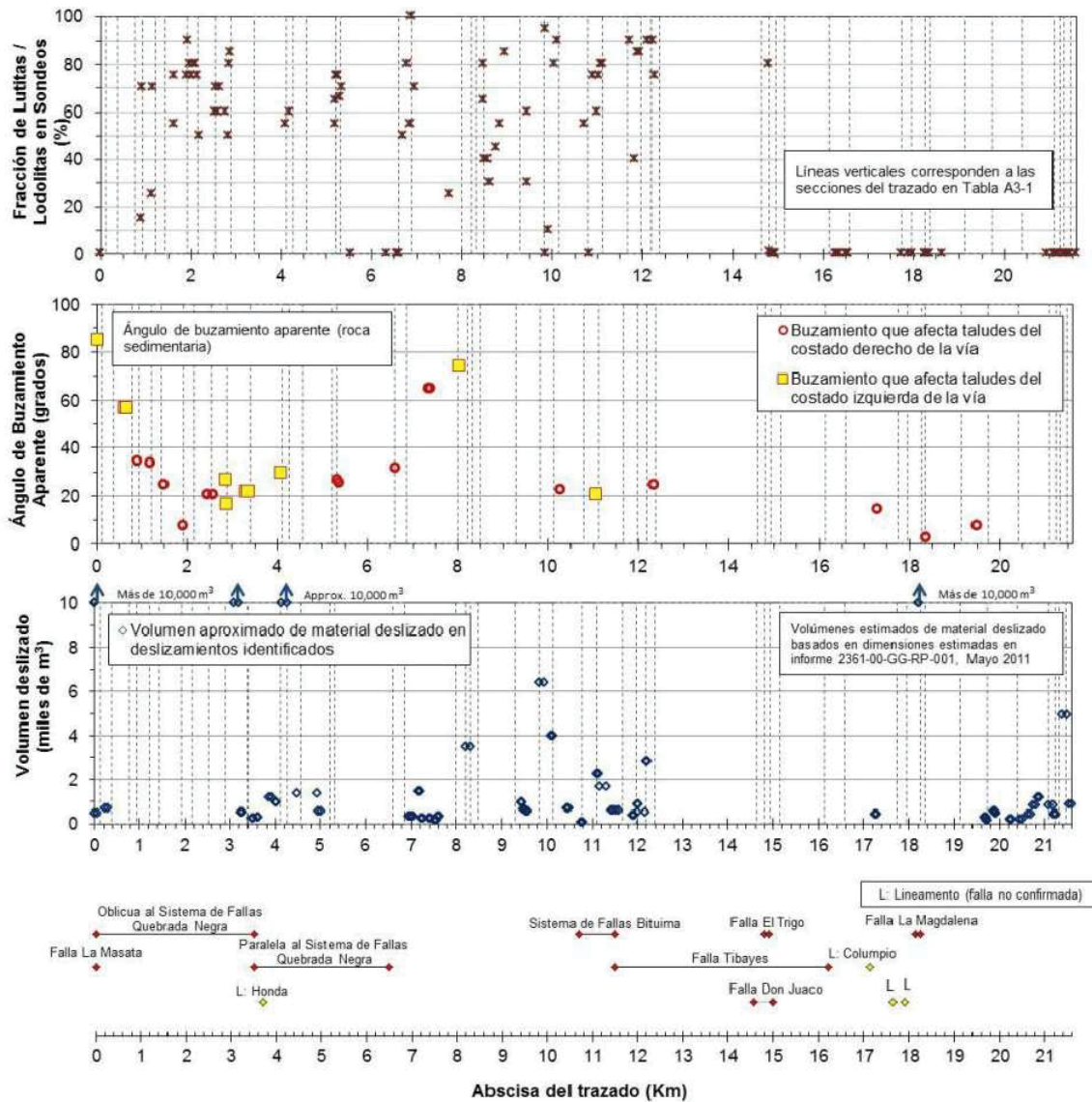


Figura 4-3. Factores Geológicos que Afectan la Estabilidad de Taludes a lo largo del Trazado del Diseño Fase 2

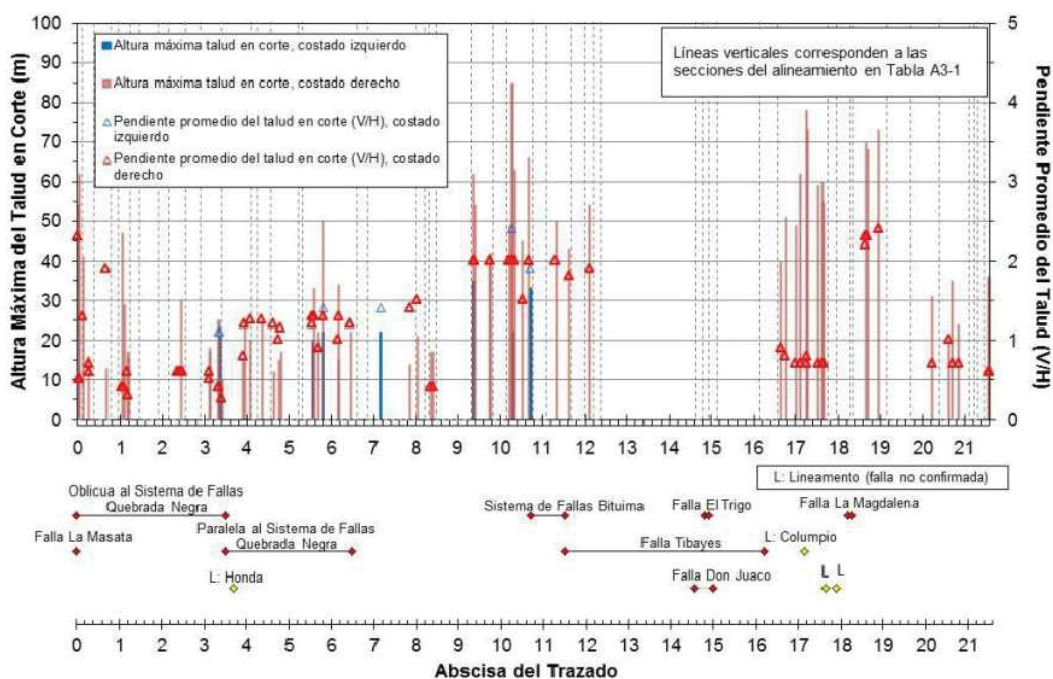


Figura 4-4. Taludes en Corte – Máxima Altura y Pendiente Promedio (V/H) a lo largo del Trazado

Formaciones Rocosas Subyaciendo Áreas de Taludes en Corte

Los taludes en corte propuestos esta ubicados aproximadamente en las siguientes abscisas:

- K0+000 a K12+100 (Parte 1 del Trazado) en zonas generalmente subyacidas por formaciones rocosas de origen marino, con cantidades variables de rocas lodosas y lutitas negras;
- K12+100 a K16+100 (Parte 2 del Trazado) que incluye dos túneles pero no taludes en corte; y
- K16+100 a K21+600 (Parte 3 del Trazado) con taludes en corte en áreas generalmente subyacidas por formaciones rocosas de origen continental.

Por lo tanto, aproximadamente 18 de los 30 taludes en corte con alturas máximas mayores que 40 m están ubicadas entre abscisas K0+000 al K12+000, es decir subyacidas por formaciones rocosas de origen marino. Estos son taludes en corte con alturas máximas importantes y también altas pendientes promedio, particularmente considerando la naturaleza de los materiales subyacentes.

Por el contrario, 12 de las 30 áreas con taludes en corte con alturas máximas mayores a 40 m, están ubicadas entre abscisas K12+000 y K19+000, las cuales son subyacidas por formaciones rocosas de origen continental, las cuales son generalmente de mayor resistencia que las formaciones rocosas de origen marino.

A su vez esta formaciones rocosas son subyacen depósitos de suelos superficiales, de espesor generalmente no mayor que 5m a 10m. El tipo de estos depósitos de suelos superficiales es variable, e incluye coluvión, aluvión, suelos residuales, suelos orgánicos superficiales y remanentes de flujos de tierras o deslizamientos, como se describe en la siguiente sección.

Depósitos de Suelos Superficiales en Áreas de Taludes en Corte.

Suelos superficiales de varios orígenes han sido documentados en mapas geológicos (escala 1:2,000) durante el Diseño Fase 2 [118] (Planos 2361-00-GG-DW-006, hojas 1 a 7, fechados Mayo, 2011). Además, varias secciones transversales con interpretación geológica (escalas 1:500 a 1:1,000) describen en forma general las formaciones rocosas y suelos superficiales, a lo largo del trazado contractual de la carretera propuesta (planos 2361-00-GG-DW-007, hojas 1 a 7; con simbología y convenciones, estratigrafía geológica regional y ubicación de varios mapas geológicos, en planos 2361-00-GG-DW-001 al -005, todos ellos fechados Mayo, 2011) [118].

Además, el informe del estudio de estabilidad del Diseño Fase 2 (2361-00-ER-RP-001, Rev. 0) proporciona detalles sobre la ubicación de estos depósitos superficiales. Tablas 2 y 3 de dicho informe proporcionan detalles de una sectorización de unidades geológicas afectadas a lo largo de los costados derecho e izquierdo del trazado propuesto, respectivamente. Estos datos se resumen en los próximos párrafos, incluyendo la longitud acumulada para cada tipo de depósitos geológicos atravesado a lo largo del trazado contractual.

Estos suelos superficiales son generalmente más débiles y compresibles que las formaciones rocosas. Por lo tanto, un aspecto crítico del diseño es considerar el impacto de estos suelos superficiales en evaluaciones de estabilidad de los cortes propuestos, preparación de la subrasante de la carretera o cimentación de estructuras (incluyendo excavación, acondicionamiento de humedad y compactación de suelos locales, o sustitución (importación) de suelos durante la construcción.

La estimación aproximada de longitudes para varios materiales geológicos se resume en Tabla 4-3, a continuación.

Tabla 4-3. Materiales Subyaciendo Taludes en Corte

Materiales Geológicos Superficiales	Taludes en Corte - Costado Izquierdo del Trazado		Taludes en Corte - Costado Derecho del Trazado	
	Número Total de Ubicaciones (Parte 1, Parte 3)	Longitud Acumulada (m)	Número Total de Ubicaciones (Parte 1, Parte 3)	Longitud Acumulada (m)
Flujos de Tierra, Qmf1,2,3)	12 (10, 2)	390	19 (16, 3)	840
Deslizamientos (Qmd1,2,3)	5 (5, 0)	190	11 (9, 2)	500
Depósitos Coluviales (Qco)	16 (8, 8)	1,520	16 (10, 6)	2,280
Depósitos Aluviales (Qal)	0 (0, 0)	0	1 (1, 0)	20
Suelos Residuales - Derivados de Arenisca (Sr – Are)	4 (0, 4)	300	3 (0, 3)	690
Lutitas Calcáreas Lc [Ktr])	20 (20, 0)	1,540	17 (17, 0)	1,610
Lutitas Calcáreas con Calizas Intercaladas (LcC [Kitr, Kic, Kih])	11 (11, 0)	1,360	15 (15, 0)	1,830
Calizas con Lutitas Calcáreas Intercaladas (CLc [Kiut, Kitr, Kic, Kih])	7 (7, 0)	890	7 (7, 0)	1,480
Areniscas Conglomeráticas, o Arcillolitas y Lodolitas Intercaladas (Pgs)	13 (0,13)	1,270	11 (0,11)	1,940
Otros materiales: Arenitas Calcáreas (Ac), Kis (lodolitas y arenitas calcáreas), Kgg (lutitas, calizas y limolitas calcáreas)	2 (2, 0)	110	3 (3, 0)	290
Total Acumulado	90 (63, 27)	7,570	103 (78, 25)	11,480

Este resumen incluye taludes en corte ubicados en la Parte 1 del Trazado [Ascenso desde Villeta], Parte 3 [Descenso a Guaduas], pero excluye túneles [Parte 2] y todos los puentes, viaductos y muros de contención.

- Taludes en Corte, Costado Derecho: Aproximadamente 103 zonas o sub-sectores en varios materiales geológicos fueron registrados con parte del Diseño, Fase 2 en áreas de taludes en corte al costado derecho de la carretera. La longitud acumulada de estos sub-sectores es aproximadamente 11,480m, o alrededor del 53% de la longitud total del Sector 1, Tramo 1. De esa longitud, aproximadamente 7,580m (o alrededor de 2/3 de la longitud total del costado derecho) está ubicada dentro de la Parte 1 del trazado; y aproximadamente 3,890m (o alrededor de 1/3 de la longitud total de cortes en el costado derecho), corresponde a la Parte 3 del trazado.
- Taludes en Corte, Costado Izquierdo: Aproximadamente 90 sub-sectores en varios materiales geológicos fueron registrados. La longitud acumulada de estos sub-sectores en áreas de taludes en corte al costado izquierdo de la carretera es aproximadamente 7,570m, o alrededor del 35% de la longitud total del Sector 1, Tramo 1. De esa longitud, aproximadamente 6,570m (o alrededor del 35% de la longitud total del costado izquierdo) está ubicada dentro de la Parte 1 del trazado; y aproximadamente 1,000m (o alrededor de 13% de la longitud total de cortes en el costado derecho), corresponde a la Parte 3 del trazado.

4.2.4.2 Resumen de Taludes en Terraplén

Los principales taludes en terraplén (relleno estructural) del Diseño Fase 2 (Informe 2361-00-ET-RP-001, Tabla 4) son resumidos a continuación en la Tabla 4-4.

Tabla 4-4, Resumen de Taludes en Terraplén (propuestos en Diseño Fase 2)

Abscisa Inicial	Abscisa Final	Máxima Altura de Taludes en Terraplén (m)	Pendiente Promedio de Taludes en Terraplén (V:H) y Ubicación	Lado de la Carretera
K0+000*	K0+250*	20	0.9:1* @ K0+250 (L)	Izquierda
K1+700	K1+910	14	0.5:1* @ K1+800 (R)	Derecha
K3+760	K3+910	15 (28*)	1.0:1* @ K3+840 (L)	Izquierda
K11+110	K11+460	21 (29*)	0.7:1* @ K11+140 (L)	Izquierda
K16+200	K16+590	16 (28*)	1.0:1* @ K16+350 (L)	Izquierda
K18+070 (K17+950*)	K18+260	14 (10*)	0.6:1* @ K18+020	Izquierda
K19+410	K19+960	19 (20*)	0.6:1* @ K19+530 (L) y @ K19+640 (L)	Izquierda

Note: () Valores estimados en base planos de diseño geométrico Fase 2 (2361-00-DG-DW-PP-T1-001D al - 031D, fechados Mayo, 2011).*

Altura Máxima de Taludes en Terraplén

En total se planean unas 35 taludes en terraplén de más de 10 m de altura ubicados al costado izquierdo de la carretera propuesta y 4 taludes al costado derecho, lo cual es esquemáticamente mostrado en la Figura 4-5 de este informe. Los datos resumidos en dicha figura, también indican también que se planean unas 17 áreas con máxima altura de taludes en terraplén entre 20 y 31m de altura, todos los cuales están ubicados al costado izquierdo de la carretera.

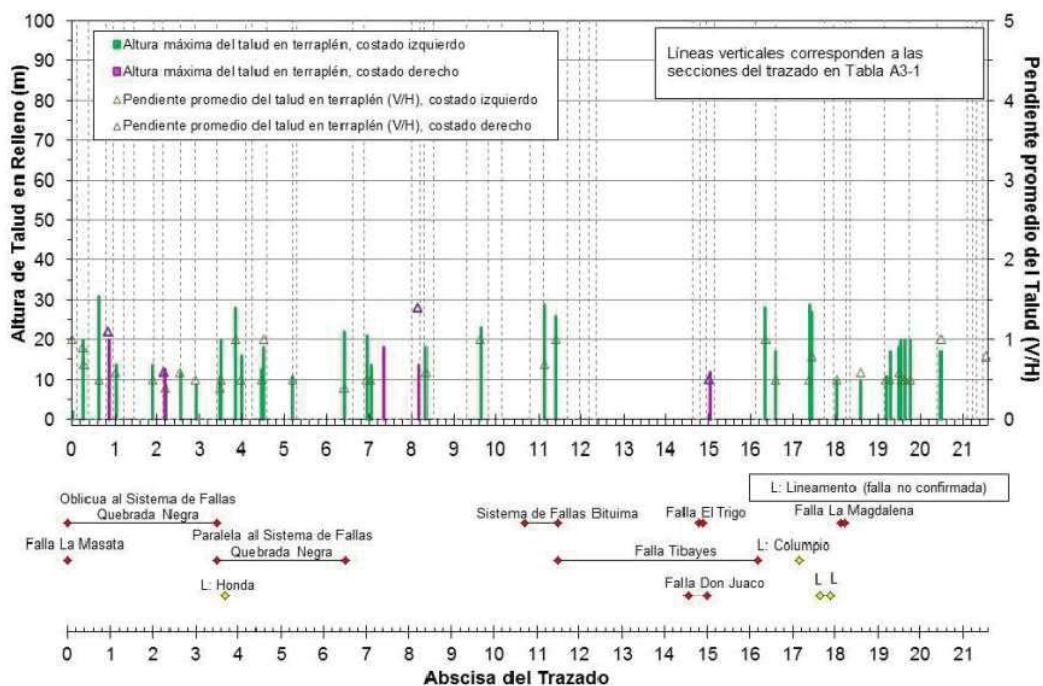


Figura 4-5. Taludes en Terraplén – Altura Máxima y Pendiente Promedio (V:H) a lo largo del Trazado del Diseño Fase 2

Pendiente Promedio de Taludes en Terraplén

Pendiente promedio (relación vertical a horizontal, V:H) propuesta para los taludes en terraplén de altura mayor que 20m, son generalmente más empinados que 0.5V:1H (26 grados) en 14 de esas 17 áreas y más empinados que 1.0V:1H (45 grados) en 5 de esas 17 áreas. Los taludes en terraplén más empinados que se proponen a lo largo del trazado tienen una pendiente promedio de 1.4V:1H (54 grados), en la vecindad de abscisa K8+100 y están ubicados al costado derecho de la carretera. Estas pendientes de taludes en terraplén son todas muy empinadas, lo cual requerirá un diseño especial para lograr alcanzar mínimos factores de seguridad de acuerdo a códigos y normas aceptables de ingeniería.

Formaciones Rocosas Subyaciendo Áreas de Taludes en Terraplén

Aproximadamente 11 de las 17 áreas con taludes en terraplén con alturas máximas mayores que 20 m están ubicadas entre abscisas K0+000 al K12+000, es decir subyacidas por formaciones rocosas de origen marino.

Por el contrario, las 6 restantes áreas (de las 17 con taludes cuyas máximas alturas son mayores que 20 m), están ubicadas entre abscisas K12+000 y K19+000, las cuales son subyacidas por formaciones rocosas de origen

continental, las cuales son relativamente de mayor resistencia (y de meteorización más lenta) que las formaciones rocosas de origen marino.

A su vez estas formaciones rocosas subyacen depósitos de suelos superficiales, de espesor generalmente no mayor que 5m a 10m. El tipo de estos depósitos de suelos superficiales es variable, e incluyen coluvión, aluvión, suelos residuales, suelos orgánicos superficiales, así como materiales remanentes de flujos de tierras o deslizamientos, como se describe en la siguiente sección.

Estos materiales superficiales son relativamente muy compresibles (arcillosos, de alta humedad, y baja compacidad), lo cual generalmente requiere su sobre-excavación hasta llegar a materiales competentes, preparación de la subrasante y sustitución de los materiales sobre-excavado con relleno estructural dentro de estas zonas u otras medidas, lo cual es crítico para obtener un terraplén estable con un adecuado comportamiento para funcionamiento normal de la carretera.

La altura máxima y la pendiente promedio de estos taludes en terraplén son importantes, particularmente cuando se considera la naturaleza relativamente débil de algunos de los materiales geológicos superficiales que subyacen dichas áreas. Dicho tratamiento de fundaciones para la construcción de terraplenes tienen el objeto de: a) eliminar superficies potenciales de deslizamiento; y b) reducir asentamientos totales y diferenciales del terraplén de la carretera. También las rocas arcillosas subyacentes (tales como lutitas, lodolitas), dependiendo de su ubicación y orientación, pueden tener estratos relativamente débiles (cizallados, húmedos, de menor resistencia al corte) que subyacen el terraplén y comprometen su estabilidad estática y sísmica.

Depósitos de Suelos Superficiales (Sobre Roca) en Áreas de Taludes en Terraplén

Suelos superficiales de varios orígenes han sido documentados en mapas geológicos (escala 1:2,000) durante el Diseño Fase 2 (Planos 2361-00-GG-DW-006, hojas 1 a 7, fechados Mayo, 2011) [118]. Además, varias secciones transversales con interpretación geológica (escalas 1:500 a 1:1,000) describen en forma general suelos superficiales a lo largo del trazado contractual de la carretera propuesta (planos 2361-00-GG-DW-007, hojas 1 a 7. Simbología y convenciones, estratigrafía geológica regional y ubicación de varios mapas geológicos, son proporcionados en planos 2361-00-GG-DW-001 al -005, todos ellos fechados Mayo, 2011) [118].

El informe del estudio de estabilidad del Diseño Fase 2 (2361-00-ER-RP-001, Rev. 0) proporciona detalles adicionales sobre la ubicación de estos depósitos superficiales (Tabla 4). Además, Tablas 5 y 6 de dicho informe proporcionan detalles de una sectorización de unidades geológicas afectadas a lo largo de los costados derecho e izquierdo del trazado propuesto, respectivamente.

Estos datos se resumen en la Tabla 4-5, incluyendo la longitud acumulada para cada tipo de depósitos geológicos atravesado a lo largo del trazado contractual.

Estos suelos superficiales son relativamente más débiles y compresibles que las formaciones rocosas. Por lo tanto, un aspecto crítico del diseño es considerar el impacto de estos suelos superficiales en evaluaciones de estabilidad de los cortes propuestos, preparación de la subrasante de la carretera o cimentación de estructuras (incluyendo sobre-excavación de materiales indeseables (para fundación de un terraplén), acondicionamiento de humedad y compactación de suelos locales, o sustitución (importación) de suelos durante la construcción.

Este resumen incluye taludes en terraplén ubicados en la Parte 1 del Trazado [Ascenso desde Villeta], Parte 3 [Descenso a Guaduas], pero excluye túneles [Parte 2] y todos los puentes, viaductos y muros de contención.

- Taludes en Terraplén, Costado Izquierdo: Aproximadamente 89 sub-sectores en varios materiales geológicos fueron registrados. La longitud acumulada de estos sub-sectores en áreas de taludes en corte al costado izquierdo de la carretera es aproximadamente 5,680m, o alrededor del 26% de la longitud total del Sector 1, Tramo 1. De esa longitud, aproximadamente 5,120m (o alrededor del 90% de la longitud total del costado izquierdo) está ubicada dentro de la Parte 1 del trazado; y aproximadamente 560m (o alrededor de 10% de la longitud total de cortes en el costado izquierdo), corresponde a la Parte 3 del trazado.
- Taludes en Terraplén, Costado Derecho: Aproximadamente 47 zonas o sub-sectores en varios materiales geológicos fueron registrados con parte del Diseño, Fase 2 en áreas de taludes en terraplén al costado derecho de la carretera. La longitud acumulada de estos sub-sectores es aproximadamente 2,580m, o alrededor del 12% de la longitud total del Sector 1, Tramo 1. De esa longitud, aproximadamente 1,620m (o alrededor de 63% de la longitud total del costado derecho) está ubicada dentro de la Parte 1 del trazado; y aproximadamente 960m (o alrededor de 37% de la longitud total de terraplenes en el costado derecho), corresponde a la Parte 3 del trazado.

Tabla 4-5. Materiales Subyaciendo Taludes en Terraplén

Materiales Geológicos Superficiales	Taludes en Terraplén - Costado Izquierdo del Trazado		Taludes en Terraplén - Costado Derecho del Trazado	
	Número Total de Ubicaciones (Parte 1, Parte 3)	Longitud Acumulada (m)	Número Total de Ubicaciones (Parte 1, Parte 3)	Longitud Acumulada (m)
Flujos de Tierra (Qmf1,2,3)	17 (15, 2)	710	7 (5, 2)	180
Deslizamientos (Qmd1,2,3)	5 (4, 1)	150	7 (6, 1)	380
Depósitos Coluviales (Qco)	13 (6, 7)	890	9 (7, 2)	310
Depósitos Aluviales (Qal)	1 (1, 0)	50	2 (2, 0)	260
Suelos Residuales - Derivados de Lutita (Sr – lut)	5 (0, 5)	460	2 (0, 2)	90
Lutitas Calcáreas Lc [Ktr]	20 (20, 0)	1,050	10 (10, 0)	650
Lutitas Calcáreas con Calizas Intercaladas (LcC [Kitr, Kic, Kih])	7 (7, 0)	350	4 (4, 0)	200
Calizas con Lutitas Calcáreas Intercaladas (CLc [Kiut, Kitr, Kic, Kih])	6 (6, 0)	450	0 (0, 0)	0
Areniscas Conglomeráticas, o Arcillolitas y Lodolitas Intercaladas (Pgs)	12 (0, 12)	1,450	6 (0,6)	510
Otros materiales: Arenitas Calcáreas (Ac), Kis (lodolitas y arenitas calcáreas), Kgg (lutitas, calizas y limolitas calcáreas)	3 (3, 0)	120	0 (0, 0)	0
Total	89 (62, 27)	5,680	47 (34, 13)	2,580

Este resumen incluye todos los rellenos localizados en la Parte 1 (ascendente) y en la Parte 3 (descendente), excluyendo los túneles (Parte 2), puentes, viaductos y muros de contención.

4.2.4.3 Resumen de Muros de Contención

Muros de contención propuestos incluyen dos tipos, muros de suelos estabilizados mecánicamente (SEM) con materiales geosintéticos y de concreto se proponen en varias ubicaciones a lo largo del trazado propuesto donde la topografía no permite extender taludes de los terraplenes, o donde es indeseable (tal como cerca de arroyos, ríos o adyacente a vías del ferrocarril). Las principales ubicaciones de muros propuestas como parte del Diseño Fase 2, se proporcionan en Tabla 7 del informe 2361-00-ET-RP-001. Un resumen de estos muros es presentado en la Tabla 4-6 de este informe.

Los muros propuestos usando suelos estabilizados con geosintéticos serán casi verticales, incluyendo elementos geosintéticos, distribuidos horizontalmente, de alta resistencia a la extensión. No se proporciona información sobre la naturaleza del relleno estructural, pero se asume que consistirá de materiales granulares (friccionales). Este tipo de muros es relativamente flexible, por lo que se espera que absorba deformaciones con relativamente pequeños asentamientos.

Tabla 4-6. Resumen de Muros de Contención (Diseño Fase 2)

Abscisa Inicial	Abscisa Final	Longitud del Muro (m)	Tipo y Altura del Muro (m)	Material Probable de Cimentación	Lado de la Carretera
K0+000	K0+050	50	Concreto, 4.6	Calizas	Izquierda
K7+830	K9+970	140	Concreto, 5.4	Lutitas	Izquierda
K18+050	K18+150	100	Concreto, 3.0	Areniscas	Izquierda
K18+840	K18+900	60	Concreto, 6.2	Areniscas	Izquierda
K7+250	K7+760	510	SEM, 11.0	Lutitas	Derecha
K7+230	K7+320	90	SEM, 9.8	Lutitas	Izquierda
K7+500	K7+760	260	SEM, 9.1	Lutitas	Izquierda
K7+690	K7+740?	50	SEM, 4.2	Lutitas	Izquierda

Muros de concreto serán construidos en cuatro ubicaciones, todas sobre el costado izquierdo de la carretera propuesta, con un rango de altura máxima entre 3.0 y 6.2m y una longitud combinada total de 350m. Los muros de concreto serán ubicados sobre el lado izquierdo (generalmente el lado más bajo) a lo largo de la

carretera. Dos de ellos serán construidos en la Parte 1 (ascenso desde Villeta) del trazado con cimentaciones probablemente en lutitas y calizas y dos de ellas en la Parte 3 (descenso a Guaduas), con cimentaciones probablemente en arenisca.

Los muros de suelos estabilizados mecánicamente serán construidos en otras cuatro ubicaciones y tendrán una altura máxima entre 4.2 y 11.0m, con una longitud combinada total del orden de 910m y con cimentaciones probablemente en lutitas. Tres de ellos estarán ubicados al lado izquierdo de la carretera.

4.2.4.4 Resumen de Laderas Naturales Adyacente al Trazado de la Carretera Propuesta

Taludes naturales adyacentes al trazado de la carretera pueden también afectar (bloquear, dañar y destruir) secciones de la carretera propuesta. Algunos de estas laderas pueden estar en condiciones de estabilidad marginal.

Tabla 4-7. Resumen de Taludes Naturales de Alta Pendiente y Altura Adyacentes a la Carretera

No.	Abcisa (Km)	Ubicación Relativa a Estructuras y Puntos Geográficos	Unidad Geológica	Litología (Tipo de Roca)	Tipo y Espesor de Suelos Superficiales (m) WR: roca meteorizada SR: suelo residual I,D: Izquierda, Derecha	Posibles Mecanismos de Falla	Angulo de Buzamiento Aparente (grados) I: hacia adentro; //: Paralelo al talud O: hacia afuera; L: trabado	Altura de Ladera Natural, V (m)	Pendiente Promedio de Ladera Natural (grados)
1	0+000	Arranque del Tramo 1, en Villeta	Kiut-CLc	caliza, Lutita	Qco (3)	Bloque paralelo al talud	~85 (IS) [87 (IS) @ K0+550]	~100	35-60
2	0+610	Falla Quebrada Negra	Kiut-CLc	caliza, Lutita	Qco (5)	Suelos Superficiales	~23-24 (OS)	> 40 (80)	30
3	0+650	Falla Quebrada Negra	Kiut-CLc, Kiut-Ac	Caliza, Lutita	Qco (5)	Suelos Superficiales	~56 (IS)	> 40 (80)	30
4	0+910	Falla Quebrada Negra	Kiut-CLc	Caliza, Lutita	Qmf-3 (5)	Suelos Superficiales	~35 (LP)	~110	25-60
Perfil 1	1+180	Quebrada del Cune y Villa La Banquita <i>Sección Normal a carretera (y cerca de Falla Quebrada Negra)</i>	Kitr-LcC	Lutita, con intercalaciones de Caliza	Sr-lut (10-15)	Suelos Superficiales	~75 (LP)	~50	10-25
5a	1+180	Quebrada El Cune y Villa Blanquita	Kitr-Lc	Lutita	Qmd-3 (5-7)	1)Suelos superf. 2) Cuña	~34 (IS)	~30	15-20
5b	1+490	Quebradas El Cune, Sur de I-1	Kitr-Lc	Lutita	WR (5), Qmd-4 (5)	Suelos Superficiales	~24 (IS) [36 (IS) @ K1+400]	~50	22-45
6	1+900	Entre I-1 y P1	Kitr-Lc	Lutita	Qal (10)-D	Suelos Superficiales	~7 (IS) [10 (IS) @ K1+600]	~30	23
7	2+440	entre P-1 y P-2	Kitr-Lc	Lutita	WR (8)	Bloque paralelo al talud	~20 (//)	~50	20
8	2+560	Antes de P-2	Kitr-Lc	Lutita	WR (5-7)	Bloque paralelo al talud	~20 (//)	~60	18
9	2+570	Antes de P-2	Kitr-Lc	Lutita	WR (5)	Bloque paralelo al talud	~20 (//)	~65	18

Impacto en las Condiciones Geomorfológicas por el fenómeno de La Niña 2010-2011

10	2+880	Al final de P-2	Kitr-Lc	Lutita	Qco (9)-I,D	Suelos Superficiales	~17 (IS)	~50-80	15-35
11	3+320	Entre P-2 y P-3	Kitr-Lc	Lutita	Qco (10-15)-I,D Qmf-2, SR/WR (15-20)	Suelos Superficiales	~22 (IS) [27R (IS) @ K3+100]	~65-80	15-25
12	3+350	Entre P-2 y P-3	Kitr-Lc	Lutita	Qco (10)-I,D, Qmf-2, SR/WR (15-20)	Suelos Superficiales	~22 (IS)	~30-70	20-40
13	3+850	Entre P-2 y P-3	Kitr-Lc	Lutita	Qmd-1 (5-8), SR/WR (15-20)	Suelos Superficiales	~27 (IS)	~90	20-27
14	4+180	En el P-3 (El Pencil)	Kitr-Lc	Lutita	Qmf (3-4), SR/WR (15-20)	Suelos Superficiales	~24 (IS)	~60	10-20
15	5+530	Entre P-3 y P-5	Kitr-CLc	Caliza, Lutita	Qco (4m), Qmd (5m)-R	Cuña, bloque	~25 (LP)	~35-60	20-25
16	5+800	Entre P-3 y P-5	Kiut, Kitr	Lutita	WR (5)	Cuña,.	~25 (OS) [24 (OS) @ K5+500] [33 (OS) @ K5+900] [38 (OS) @ K6+150]	~50	~15-23
17	6+610	Al inicio de P-5	Kiut, Kitr-CLc	Caliza, Lutita	WR (5)	Cuña, paralela al talud	[39 (OS) @ K6+400] [27 (OS) @ K6+600]	~50-110	~20-30
18	7+370	Entre P-5 y V-1	Kitr-Lc	Lutita	WR(6), Qmf-3(3-4)	Suelos superficiales	~65 (IS)	~40	30
Perfil 2	7+850 [N38W]	En el V-3, Vereda la Esmeralda. <i>Sección geológica cercana al trazado.</i>	Kitr-Lc	Lutita, con intercal. de Caliza	Sr-Kitr (5-7)	Suelos superficiales	~38 (IS) [60 (L) @ K7+400] [35 (IS) @ K7+900]	~80	~10-30
19	8+030	Después de V-1 (K-8)	Kitr-Lc	Lutita	Qmf-3 (3), talud abajo	Suelos superficiales	~73 (IS)	> 120	8-22
Perfil 3	8+600 [N30W]	En la V-3, Quebrada Los Barretos, Escuela Rural Palermo, <i>Sección oblicua al trazado</i>	Kitr	Lutita, con intercal. de Caliza	Qcol (3-5), Sr-lut (5-10)	Suelos superficiales	~77 (IS)	>90	~15-25
Perfil 4	8+570	En el V-3, Quebrada Los Barretos, Escuela Rural Palermo <i>(Sección // al trazado, 100m SO)</i>	Kitr	Lutita, con intercal. de Caliza	Qcol (5-10)	Suelos Superficiales	~42 (IS) 12R (IS) @ K9+380 [0 @ K9+450] [3 @ K9+750]	>100	~10-20
20	10+270	Después de V-4	Kis, Kic-LcC	Lodolita, Limolita, Lutita, con intercal. de Caliza	Sr-lut (3-4)	Cuña, Hacia afuera del talud	~10 (OS) [23 (OS) @ K10+400] [13 (OS) @ K10+650]	~80-110	45
21	11+050	En el V-5	Kih-LcC	Lutita, con intercal. de Caliza	Sr, Qmf-1 (3)	Cuña	~20 (IS) [25R @ K11+150] [0-10R @ K11+350] [10R @ K11+720]	>250	35-45
22	12+330	Después V-7	Kig	Lodolitas calcárea, Limolitas, calizas	Sr-Kig (3)	Cuña, subhorizontal	~26 (OS) [37 @ K12+380] [36 @ K12+420]	>200	25
23	17+270	Entre T-2 y V-8	Pgh	Conglomerados, areniscas	Sr-lut (3)	1) Suelos superficiales 2) Cuña, subhorizontal	~14 (OS) [19 (OS) @ K16+330] [18 (OS) @ K17+200] [23 (OS) @	>200	15-20

							K17+420]		
24	18+350	Después de P-7	Pgh	Arenisca	Sr-are	1) Suelos superficiales 2) Cuña, subhorizontal	~3 (OS)	>50	45
25	18+650	Después de P-7	Pgh	Arenisca	Sr-are (5)	Suelos Superficiales	~62 (IS) [0] @ K19+000]	>160	28
26	19+480	Reserva Nacional Natural San Francisco	Pgsj	Caliza	Qcol (5), D	Cuña, subhorizontal	~8 (OS) [9] @ K19+820] [13 (OS) @ K20+750] [7R @ K21+500]	>50	25

4.2.5 Evaluación Geotécnica - Resistencia y Meteorización de la Masa Rocosa y Causas de Inestabilidad de Taludes

Estudios de estabilidad de taludes para el Diseño Fase 2, se presentan en informe: “Estudio de Estabilidad y Estabilización de Taludes, Muros de Contención y Terraplenes. Tramo 1 K0+000 – K21+600, informe N° 2361-00-ET-RP-001”, fechado Mayo, 2011 [128].

A continuación se ofrecen algunos comentarios sobre condiciones de estabilidad de taludes en el sitio. Varios factores geológicos/geogénicos pueden contribuir a la estabilidad (o inestabilidad) de taludes naturales además de consideraciones geométricas básicas tales como altura máxima y pendiente de dichos taludes.

Otros factores incluyen características de heterogeneidad y anisotrópica de materiales geológicos, orientación (rumbo ángulo de buzamiento) de estratificación en rocas sedimentarias con respecto a la superficie del talud, tipo de materiales geológicos, fracción (porcentaje) de rocas sedimentarias de alto contenidos de arcilla (tales como lutitas y lodolitas) con respecto al espesor total de materiales (profundidad total de perforaciones o altura total de los taludes). Además, las condiciones de agua subterránea (sub-superficial) desempeñan un papel crucial en la resistencia al corte de los materiales y evaluaciones de estabilidad de taludes. Datos específicos de medición de agua subterráneo son relativamente escasos en varias áreas a lo largo del trazado de la carretera.

Algunos de estos factores geológicos se muestran en la Figura 4-3, datos geométricos de taludes naturales se resumen en la Tabla 4-7, y datos geométricos de estructuras del proyecto se resumen Tabla A3.1 (Apéndice 3).

Una evaluación de estos datos sugiere que una porción importante de trazado contractual, posiblemente la mitad tres cuartos de la roca sedimentaria consiste en rocas muy arcillosas de las formaciones geológicas Trincheras y/o Útica. Estas

rocas sedimentarias incluyen fracciones importantes de lutitas, arcillolitas, limolitas, areniscas, las cuales son materiales altamente anisotrópicos.

En particular, las rocas más arcillosas (lodosas) de estas formaciones geológicas, son reconocidas por su susceptibilidad y vulnerabilidad a una muy rápida y dañosa meteorización, es decir su exposición al medio ambiente, aire, humedad y cambios de temperatura, su degradación durante ciclos repetidos tanto de humedecimiento y secado como de carga y descarga. Estos ciclos resultan en una degradación de las propiedades mecánica, fracturación a raíz de la desecación del suelo, aumento correspondiente de permeabilidad y por lo tanto meteorización más acelerada. Todo lo cual resulta en reducciones correspondientes en la rigidez y resistencia de este tipo de rocas arcillosas (lodosas). Este fenómeno es conocido en taludes en lutitas y arcillas alrededor del mundo [308] y son también específicamente aplicables a las lutitas y lodolitas encontradas en el Departamento de Cundinamarca [309].

Por lo tanto, es una preocupación importante en este proyecto el contar con, o poder desarrollar, suficiente capacidad para estabilizar estos taludes incluyendo niveles de lutitas y lodolitas débiles por un periodo de por lo menos 20 años, consistente con las condiciones de sostenibilidad y la vida útil del proyecto de Ruta del Sol, considerando las condiciones climáticas con sus normales y extremas.

Esta preocupación incluye:

- taludes naturales existentes adyacente a carretera propuesta;
- taludes en corte necesarios para la ejecución de la carretera propuesta; y
- terraplenes, puentes, viaductos, u otras estructuras a construir, sean subyacidos por niveles de lutitas (o lodolitas) débiles bajo su base y con posibilidad de movimiento lateral (translación o rotación).

Esta preocupación es aún mayor en áreas del proyecto donde la orientación de capas o niveles de lutitas / lodolitas débiles tengan una componente de buzamiento apuntando hacia “afuera del talud” (o ángulo de buzamiento aparente “adverso”), particularmente en presencia de agua subterránea, lo cual puede resultar en deslizamientos hacia la carretera, como se discute en la Sección 4.2.6.

Fallas de estos taludes y/o estructuras ya sea por deslizamiento, flujo de tierras o reptación (deformación lenta, gradual o “creep”), podrían ocasionar un cierre temporario o destrucción parcial de la carretera a construir.

4.2.6 Posibles Mecanismos de Falla – Consideraciones de Inestabilidad de Taludes

Entre los posibles mecanismos de falla, dos se consideran más probables, como se describe a continuación:

Mecanismo Generalizado No. 1 – Inestabilidad de Suelos Superficiales: Este mecanismo se refiere al deslizamiento de una masa de suelos superficiales completamente saturados, desplazándose sobre un plano inclinado de materiales más competentes, tales como suelos de alta consistencia o roca. Estos suelos superficiales son generalmente considerados de baja densidad, alto contenido de humedad y pueden incluir una combinación de depósitos coluviales, aluviales, suelos residuales, así como materiales remanentes de antiguos deslizamientos o flujos de tierras. El espesor de este tipo de materiales puede ser del orden de varios metros. Por ejemplo, el reciente deslizamiento de San Francisco, muy cerca de Guaduas, involucro principalmente depósitos coluviales (Qco).

Mecanismo Generalizado No. 2 – Inestabilidad de Cuñas o Bloques de la Masa Rocosa: Este mecanismo involucra típicamente una superficie arcillosa muy húmeda o “espejo” de deslizamiento de muy baja fricción, particularmente donde la orientación de ese plano o superficie tenga un ángulo de buzamiento que apunta hacia afuera del talud (o buzamiento aparente “adverso”), es decir, con capacidad para causar un deslizamiento. Por ejemplo, una de capa lutita, lodolita, arcillolita o arcilla saturada, en estado de resistencia “residual” y muy resbalosa.

También podrían generarse cuñas o bloques entre familias principales de diaclasas, o sistemas de falla. Esta situación puede ser exacerbada por varios otros factores, tales como cargas hidrostáticas (resultantes de agua infiltrada a través de sistemas de fracturas o diaclasas en la masa rocosa), erosión o excavación del pie del talud, cargas externas actuando sobre el talud y fuerzas sísmicas. En este caso el espesor de la masa rocosa deslizante puede ser de mayor magnitud que en el caso anterior (inestabilidad superficial) y alcanzar varias decenas de m de espesor.

Varios cortes propuestos como parte del Diseño Fase 2, para los cuales existen secciones con interpretación geológica, parecen sugerir la presencia de condiciones “adversas” de estratificación en rocas arcillosas (lodosas) vulnerables.

Ambos mecanismos, particularmente el segundo, podrían tener consecuencias importantes. Como se indicara anteriormente, otras variaciones estos mecanismos generales de falla son posibles, dependiendo en condiciones

específicas geológicas o características de taludes en corte o estructuras propuestas.

4.2.7 Comentarios sobre Parámetros Geotécnicos - Diseño Fase 2.

El informe 2361-00-ET-RP-001, fechado Mayo, 2011 [128], presenta resultados de estudios de estabilidad y medidas de estabilización de taludes, muros de contención y terraplenes. Este informe incluye también un resumen sobre la ubicación, características geométricas de los cortes propuestos, rellenos estructurales y muros de contención, así como la metodología y suposiciones usadas para el de análisis y diseño de dichas estructuras.

Algunos comentarios se ofrecen a continuación respecto a comportamiento de suelos/roca para una futura fase de diseño.

Parámetros de Resistencia al Corte: Estos estudios (Sección 9.3 “Análisis Retrospectivo”) incluyen cálculos revertidos de parámetros de resistencia al corte para secciones seleccionadas a lo largo del trazado de la carretera. Estos análisis fueron usados para estimar los parámetros que serían necesarios para obtener factor de seguridad para condiciones de estabilidad estática (FS) de 1.6 para áreas estables, 1.3 para áreas con evidencia de una proceso de movimiento de masas y 1.1 para condiciones “extremas” (incluyendo cargas sísmicas) y especificando parámetros de presión de poros (r_u).

Los análisis presentados en el informe arriba citado, incluyendo caso de depósitos superficiales de suelos coluviales, sugieren ángulos de fricción interna de aproximadamente 35 grados para el coluvión y cohesión del orden de 6 a 10 kPa, dependiendo del caso. Similarmente, cálculos revertidos para la estimación de parámetros de resistencia al corte en suelos residuales (derivados de lutitas) sugieren ángulos de fricción interna de aproximadamente 26 grados y cohesión de 20 kPa. Finalmente, los cálculos presentados para la estimación de dichos parámetros en caso de suelos residuales derivados de areniscas y calizas es de aproximadamente 35 grados y 10 kPa. Adicionalmente se realizaron estimaciones de resistencia al corte en base a correlaciones empíricas con ensayos de penetración estándar (SPT).

Algunos comentarios se ofrecen sobre los parámetros seleccionados para depósitos coluviales y suelos residuales, para una posible futura fase de diseño.

Depósitos Coluviales (Q_{co}): Dichos materiales parecen tener una estructura completamente soportada por su matriz de suelos finos (a diferencia de estructuras soportadas por clastos). Por lo tanto los clastos de tamaños que varían entre grava a bloques, estarían completamente embebidos en materiales matriciales. Esta observación sugiere el uso de parámetros de resistencia al corte

consistente con la naturaleza de su matriz arcillo-limosa. Además, el contenido de humedad natural de la matriz arcillosa es generalmente medio a alto, su densidad y consistencia relativamente baja y su plasticidad media a alta. Dichos factores normalmente resultan en una reducción de parámetros de resistencia al corte (con respecto a aquella de suelos granulares no plásticos, o de baja plasticidad).

Se aprecia también que la caracterización de estos suelos en base a valores SPT es en ciertas ocasiones difícil y hasta imprecisa. Tal parece ser el caso de suelos coluviales, que incluyen un contenido importante de piezas de grava y bloques, ya que estos materiales tienden a incrementar el conteo de golpes (valores SPT-N) y por lo tanto la aplicabilidad de dichas correlaciones empíricas se reduce con el tamaño y proporción de grava y otros clastos de mayor tamaño.

Por lo tanto, la resistencia al corte de los componentes más débiles de los depósitos coluviales, es decir la matriz de suelos arcillosos, probablemente tenderá a controlar la resistencia al corte del total del material coluvial (así como su compresibilidad y su permeabilidad).

Suelos Residuales Derivados de Lutitas (Sr-lut): Similar a lo observado para depósitos coluviales, puede normalmente esperarse que la resistencia al corte de los materiales residuales de naturaleza arcillosa sean fuertemente influenciada y en algunos casos sea controlada, por las propiedades de la fracción arcillosa. Esto está basado en la suposición que la fracción granular de estos suelos es relativamente pequeña o moderada, es decir que no tiene una estructura soportada por los clastos.

Lutitas (Lc): Las lutitas, así como otras rocas sedimentarias, son materiales de reconocidas características anisotrópicas. Las lutitas en particular tienen una estructura en capas finamente laminadas.

La resistencia al corte de este material, en general presenta una reducción post-máximo (“post-pico”) de resistencia al corte posiblemente a valores de materiales “completamente ablandados” si no ha experimentado deformaciones de corte importantes in su historia geológica, o a valores “residuales” si este material hubiera experimentado importantes deformaciones. Este último caso es frecuentemente anticipado, cuando se observan deslizamientos en la misma área donde se encuentra este tipo de materiales geológicos.

Por lo tanto valores residuales son conservadoramente asumidos en áreas con deslizamientos históricos, para el análisis de estabilidad de taludes y diseño de medidas de estabilización de estructuras o taludes. Por lo tanto, distintos parámetros de resistencia al corte son aplicables a estos materiales: a) “paralelos” y “oblicuos” a la estratificación, incluyendo valores “pico” (máximo) así como valores “post-pico” (a grandes deformaciones, para (ambas) condiciones de carga: drenados y no drenados.

Análisis de Estabilidad de Taludes:

Un análisis detallado de estabilidad de taludes esta fuera del alcance de esta revisión. Estos análisis y la selección de parámetros de diseño deberían considerar las cargas anticipadas, el comportamiento del material, la sostenibilidad y vida útil (o vida económica) del proyecto de por lo menos 20 años.

4.2.8 Normativa Aplicable

En el momento de realizar obras civiles en áreas críticas de amenaza geológica crítica, se requiere de ingeniería especial, que recurra a códigos nacionales e internacionales. Los siguientes párrafos discuten códigos aplicables, tanto nacionales como internacionales.

El proyecto será revisado por ANI (Ministerio de Transporte) y ANLA (Ministerio de Medio Ambiente), entre otras agencias del gobierno, para poder recibir permisos ecológicos y ambientales y licencias antes de la construcción. Como un suplemento a los códigos y normas de Colombia, pueden consultarse directrices y normas internacionales adicionales. Estas se describen a continuación.

Requerimientos Ecológicos:

En la actualidad, porciones significativas de las partes 2 y 3 del trazado contractual requieren un proceso de permisos ecológicos ante ANLA. Basado en nuestras conversaciones con los funcionarios de ANLA (véase Apéndice 2), el proceso de permisos de Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1 ha estado estancado. Las razones principales que fueron indicadas incluyen:

- La falta de datos hidrogeológicos dentro de las áreas protegidas,
- Las preocupaciones sobre los efectos potenciales de las excavaciones incluyendo rellenos, túneles, drenajes y eliminación de materiales de excavación propuestos en el proyecto Ruta del Sol; en acuíferos relativamente superficiales y profundos (tanto en el nivel como en la calidad del agua subterránea) que, si no son adecuadamente evaluados, podrían afectar negativamente el suministro de agua de las poblaciones de Guaduas, Villeta y agricultores locales.
- Riesgo para la flora y árboles protegidos

Además, se debe proveer la eliminación adecuada de los materiales excavados.

Requisitos del Código de Construcción:

El principal código de edificación aplicable es la "Norma NSR-10" (Reglamento Colombiano de Construcción Sismo-Resistente) y El Código Colombiano de

Puentes (código de puentes). En el siguiente párrafo se presenta una breve discusión sobre normativa de riesgos geológicos, los requisitos mínimos, las prácticas recomendadas y directrices para el diseño de un proyecto vial como Ruta del Sol. Esto se aplicaría para los requisitos de diseño de Ruta del Sol, incluyendo la exploración preliminar de campo, ensayos de laboratorio y campo a los materiales, estudios requeridos, control de calidad, así como abordar peligros geológicos críticos tales como cruce de:

- Fallas activas y potencialmente activas, y para
- Construcción de carreteras dentro y adyacentes a lugares propensos a deslizamientos (con ocurrencias históricas de deslizamientos y/o áreas con de pendientes potencialmente inestables).

Los reglamentos aplicables fueron discutidos con el personal técnico de INVIAS (Departamento de transporte) durante la reunión del 12 de Julio de 2013. Entendemos que la NSR-10, capítulo H es el código principal de diseño en Colombia y que el diseño del proyecto Ruta del Sol debe adherirse a este código. Entendemos además que las secciones que se enumeran en la Tabla 4-8 serían particularmente aplicables al diseño y construcción.

Tabla 4-8. Resumen de los Principales Requisitos del Código de Edificación

SECCIÓN	DEFINICIONES
H.2.2	Tipo de Estudios (Geológicos/Geotécnicos)
H.2.2.3	Evaluación Geotécnica durante el diseño y la construcción
H.2.2.4	Estabilidad de laderas naturales y taludes intervenidos
H.2.3 (También H.3.2.4 y H.5.1.2.2).	Agua Subterránea
H.3	Características Geotécnicas del Subsuelo
H.4	CIMENTACIONES
H.5	EXCAVACIONES Y ESTABILIDAD DE TALUDES
H.5.2.1	Reconocimiento geológico: evaluaciones geológicos y geotécnicas sobre la posibilidad de desarrollar resistencia al corte residual sobre grandes deformaciones, el tipo de materiales arcillosos y reducción de su resistencia al corte con el tiempo y análisis de fallas profundas
H.5.2.2	Consideraciones generales: incluyendo distribución de material, las condiciones hidrogeológicas, carga adyacente y movimientos sísmicos
H.5.2.3	Secciones de análisis: basado en un modelo geológico-geotécnico, con una definición de los mecanismos potenciales de falla debe ser considerado en los análisis de estabilidad
H.6	ESTRUCTURAS DE RETENCIÓN
H.7	EFFECTOS SÍSMICOS - EVALUACIONES GEOTÉCNICAS
H.8	SISTEMAS DE CONSTRUCCIÓN - CIMENTACIONES, EXCAVACIONES, MUROS DE CONTENCIÓN.

H.9	CONSIDERACIONES ESPECIALES
H.10	REHABILITACIÓN SÍSMICA DE ESTRUCTURAS / EDIFICIOS.
H.10.2.2	Riesgo sísmico en el sitio del proyecto: estos son para incluir el potencial de ruptura superficial del terreno ocasionado por fallas (H.10.2.2.1 potenciales), licuefacción potencial (H.10.2.2.2), así como desplazamiento y posibles avalanchas (H.10.2.2.4 y H.10.2.2.5). Estas evaluaciones deben incluir una estimación del riesgo en términos de deformación del suelo o desplazamiento. Si se encuentran que estas deformaciones o desplazamientos no son aceptable, entonces medidas correctivas deben proponerse como se describe en la sección H.10.3.
H.10.3	Medidas de mitigación contra amenazas geológicas y el fortalecimiento de Cimentaciones
H.10.3.1	Mitigación de ruptura superficial de una falla activa
H.10.3.2	Mitigación de licuefacción del suelo
H.10.3.3	Mitigación para los asentamientos diferenciales
H.10.3.4	Mitigación de deslizamientos de tierra
H.10.5.1	Medidas de mejora de terreno

Además de la topografía superficial suficientemente detallada, específica del sitio y la estratigrafía del subsuelo, es esencial recopilar y evaluar datos adicionales necesarios, consistentes con los requisitos de la NSR-10 (sección H.5.2.2: consideraciones generales), la correcta evaluación del potencial de inestabilidad de taludes naturales e intervenidos (artificiales) son:

- a. Los niveles de agua subterránea y posibles patrones de flujo subsuperficial (consistentes con los requisitos de la NSR-10 sección H2.3: aguas subterráneas y H.5.2.2: consideraciones generales).
- b. Caracterización geológica del sitio, incluyendo un entendimiento razonable de las estructuras geológica/estratigráficas subsuperficial y mecanismos potenciales de fallo del terreno (inestabilidad de taludes), consistente con los requisitos de la NSR-10 (sección H.5.2.1: reconocimiento geológico).
- c. Datos adecuados de intensidad de corte de los materiales que la superficie de falla puede pasar (consistentes con los requisitos de la NSR-10 (sección H.5.2.1: reconocimiento geológico), teniendo en cuenta la heterogeneidad del material y anisotropía, así como variaciones en la resistencia al corte en función de ambos, la velocidad de aplicación de deformación de corte y las condiciones de drenaje durante el corte, las presiones efectivas in-situ, la historia de tensiones del suelo y los cambios en el contenido de agua y la densidad con el tiempo.
- d. Comprensión de la historia de deslizamientos y sismicidad dentro del área del proyecto, así como requisitos de regulación y diseño para la mitigación de deslizamientos y requerimientos de sísmicos de diseño consistentes con

los requisitos de la NSR-10 (sección H.2.2.4: estabilidad de laderas naturales y taludes intervenidos; y H.5.2.2: consideraciones generales).

Regulación sobre Riesgos Geológicos:

En general, el cruce de zonas de fallas activas y potencialmente activas y áreas con problemas de estabilidad históricamente conocidos son un peligro geológico importante, que requiere ya sea ser evitado o medidas de mitigación especiales, debido a la magnitud de las posibles consecuencias y/o costos elevados. Estos requisitos son adicionales a las consideraciones estructurales y de ingeniería geotécnica estándares de cargas sísmicas en estabilidad de taludes y análisis de deformación sísmicamente inducida para construcciones nuevas, así como diseño estructural sismo-resistente

Directrices especiales de geología e ingeniería y mejores prácticas han sido internacionalmente desarrolladas y aprobadas por las agencias gubernamentales para la práctica de ingeniería más seguro en esas zonas geológicamente impactadas y sísmicamente activas y para la protección al público. Uno de los resultados es el requisito de estudios suplementarios antes de la construcción de infraestructura crítica dentro de un área geológicamente impactada (amenazas geológicas).

4.3 Hidrología

Este capítulo proporciona una visión general de la Hidrología del área del proyecto incluyendo la descripción de ríos y cuencas, diseño de inundación y aguas subterráneas.

4.3.1 Cuencas

El corredor de la Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1 es controlado por la topografía y tiene que cruzar dos cordilleras norte - sur, haciendo necesarios dos túneles. Como resultado, la ruta atraviesa una serie de ríos y tributarios. Las cuencas y cruces son identificados y programados en el plano de diseño de la fase 2 2361-00-HY-DW-PLT-1001 [124], que se incluye como Figura 4-13 al final de esta sección. En este plano, los ríos están marcados como líneas discontinuas azules y las cuencas se marcaron en rojo. A continuación se hace una descripción general de la ruta, los cruces de ríos y cuencas:

De la abscisa K0+000 a K1+500: la ruta sigue el lado occidental de una pequeña colina en dirección norte hasta la intersección de Villeta. Se identifican 10 subcuencas tributarias menores en el plano 2361-00-HY-DW-PLT-1001 [124], son todas ellas muy pequeñas de sólo unas pocas hectáreas.

En la abscisa K2+054 la ruta cruza la Quebrada Cune que se encuentra en cercanías del deslizamiento del Cune.

De la Abscisa K2+200 a K7+000: la ruta asciende en dirección noroeste desde Santa Lucía y luego en dirección norte a lo largo del flanco oriental del Valle de la Quebrada Cune. La Figura 4-6 muestra el flanco oriental visto desde el lado opuesto del valle. La ruta va a subir de derecha a izquierda relativamente cerca de la cima de la colina.



Figura 4-6. Área del proyecto aproximadamente entre el K3+000 y el K4+000

En este trayecto se cruza un gran número de pequeños tributarios del río Cune. El plano 2361-00-HY-DW-PLT-1001 [124] identifica aproximadamente 49 subcuencas. Sin embargo, puesto que la ruta diseñada está generalmente entre 500 y 1000 m de distancia del río y típicamente solamente a 500 metros de la cresta hacia el este, la mayoría son cuencas muy pequeñas de sólo unas pocas hectáreas. Por lo tanto es razonable agrupar éstas por rango de tamaño en lugar de llevar a cabo análisis hidrográficos individuales. Solo una subcuenca tiene un área de captación significativa, designada como 11a en la abscisa K5+300, con un área de captación de 175 ha.

Una variante de esta ruta se muestra en el plano de Isoyetas, plano N° 2361-00-HD-DW-00101.C donde el trazado parece similar, pero se muestra cruzando la Quebrada Cune antes de retornar al alineamiento descrito arriba. Hemos asumido que este alineamiento ha sido substituido y no se considera de aquí en adelante en el informe.

Abscisa K7+000 a K7+800: la ruta gira hacia el oeste y corre a lo largo de una colina que forma el parte aguas entre la Quebrada Cune/ Quebrada San Fernando

y la Quebrada Verbena hacia el norte. No hay ninguna cuenca importante en esta zona.

Abscisa K7+800 K12+100: la ruta entonces gira hacia el sudoeste y cruza la Quebrada Cune, luego sigue subiendo hasta llegar cerca de la cresta en el flanco occidental del Valle de la Quebrada Cune.

El principal cruce de río se encuentra en la abscisa K9+121 y toma la forma de un viaducto entre las abscisas K8+502 y K9+300. La Figura 4-7 muestra el valle, que se puede apreciar a la derecha del centro de la fotografía. La ruta sube de derecha a izquierda relativamente cerca de la cima de la colina por lo que el viaducto, que cruzará el valle es significativo. Sin embargo la capacidad de inundación del río, por tanto, es en gran medida irrelevante excepto en lo que se refiere a la cimentación de las columnas, lo cual que tendrá que tener en cuenta el nivel de inundación.



Figura 4-7. Cruce del Río en la abscisa K8+500

La Figura 4-8 muestra la misma zona vista desde el sur. La ruta estará nuevamente en el flanco izquierdo del valle de modo que el terreno es

probablemente empinado pero las cuencas de los arroyos que cruzan serán pequeñas. El plano 2361-00-HY-DW-PLT-1001 [124] identifica unas 28 subcuencas. Sin embargo, puesto que la ruta diseñada está generalmente entre 1,000 y 2,000 m de distancia del río y típicamente solamente cerca de 500 a 1,000 m de la cresta hacia el este la mayoría de las subcuencas son muy pequeñas, típicamente con áreas de captación de sólo unas pocas hectáreas.



Figura 4-8. Área del proyecto aproximadamente entre el K9+000 y el K10+000

En la abscisa K12+200 el trazado gira a la derecha después de cruzar un tributario de la Quebrada Honda en la abscisa K11+800 con un puente de una luz importante, como se muestra esquemáticamente en la Figura 4-9. Esta zona está dentro de la Reserva Nacional Natural San Francisco, aunque la zona parece estar ampliamente deforestada. Después de un corte de unos 40 m de altura, la ruta entrará en el portal del primer Túnel, El Trigo.



Figura 4-9. Cruce en K11+800

De la abscisa K12+380 a K16+120 la ruta del Túnel es recta en dirección oeste-noroeste; cruza las dos crestas principales norte-sur en dos túneles. Entre las crestas está el sinclinal Valle del Río San Francisco, que es cruzado por un viaducto alrededor de la abscisa K15+100, entre los portales del Túnel en las abscisas K14+750 y K15+200.

Durante la visita de campo, aproximadamente en la abscisa K15+100 a lo largo de la ruta se observó el puente de hormigón cruzando el Río San Francisco. Durante el evento de La Niña 2010-2011, la crecida destruyó el puente original en este lugar y un nuevo puente fue construido en 2011. La luz del nuevo puente tiene un aproximadamente 2 m de altura y 24 m de largo. Nuevamente el viaducto propuesto significa que la inundación del río no es un problema aparte en lo que se refiere a la construcción de cualquier cimentación cerca del río.

De la abscisa K16+000 a la K18+300, desde el portal del segundo Túnel, La Cumbre, la ruta gira hacia el norte corriendo cerca y paralelo a la cordillera. Esta es también el área del gran deslizamiento de San Francisco. El plano 2361-00-HY-DW-PLT-1001 [124] identifica unas 18 subcuencas. La ruta del diseño está típicamente de 500 a 1,000 m de la cresta hacia el este de modo que la mayoría de las cuencas son muy pequeñas con una superficie de sólo unas pocas hectáreas.

En la abscisa K18+308 la ruta cruza el río San Francisco, que ha girado hacia el oeste y fluye a través de una brecha en la cresta norte-sur. La ruta cruza esta gran Cuenca con un puente elevado pero el valle es más bien estrecho en este punto y

una evaluación completa de inundación debe realizarse. Esto también está dentro del área del gran deslizamiento de San Francisco.

Entre las abscisas K18+300 y K19+200 la ruta gira hacia el oeste, corriendo oblicuamente por la ladera hacia terreno menos escarpado. El plano 2361-00-HY-DW-PLT-1001 [124] identifica 8 subcuencas, siete de las cuales son menores y una, la 34d, es de tamaño moderado (34 ha), pero es poco probable que presente un problema de capacidad para un colector de tamaño adecuado. Sin embargo, esta es también el área designada para un talud de corte de 68 m.

Entre las abscisas K19+200 y K21+300 la ruta gira hacia el norte bajando una cuesta mucho más suave hacia el Río Honda. El plano 2361-00-HY-DW-PLT-1001 [124] identifica unas 18 subcuencas, siete cuencas pequeñas en la parte sur y varias cuencas más grandes hacia el norte, incluyendo la Quebrada Palmichera.

Posteriormente, la ruta atraviesa el Río Honda en la abscisa K21+161.

4.3.2 Alcantarillas

El gran número de pequeñas subcuencas identificadas en la sección anterior, aportará cada una potencialmente, importantes flujos de agua después de lluvias fuertes. Estos flujos tienen que cruzar la carretera de forma controlada y no causar erosión de los suelos aguas arriba y aguas abajo del cruce.

La solución convencional a este problema es utilizar una alcantarilla de cajón (*box culvert*) debajo de la banca. Estas son cajas rectangulares de hormigón, prefabricadas o fabricadas in situ, asentadas sobre una pendiente poco pronunciada debajo de la carretera. Una sección típica a través de la carretera y la alcantarilla de cajón de 1.5 m por 1.5 m se muestra a continuación en la Figura 4-10.

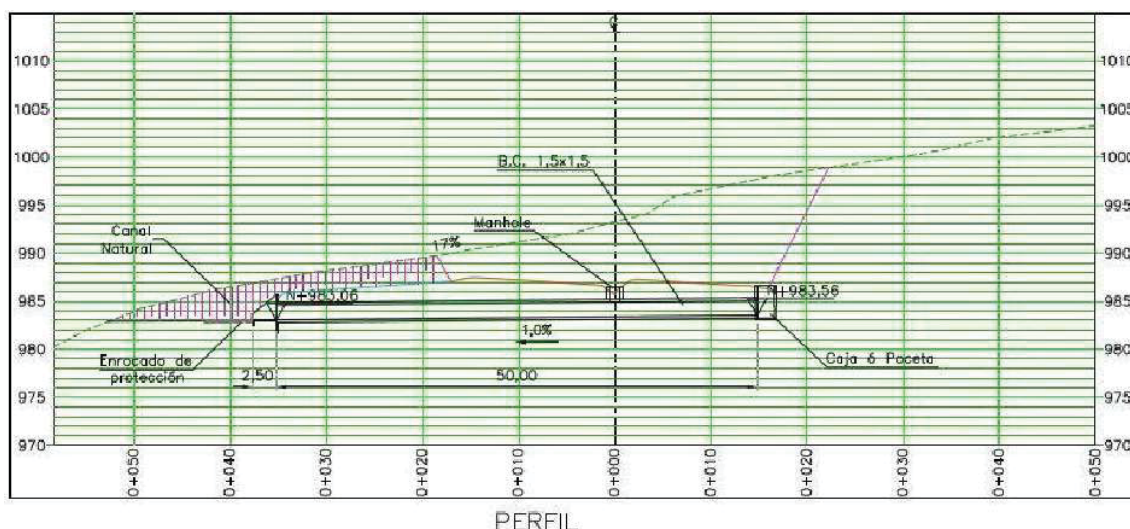


Figura 4-10. Cruce Típico de Alcantarilla

La Figura 4-9 fue tomada del informe de la fase 2 del diseño 2361-00-HY-RP-002, fechado en Mayo de 2011 [124] y es consistente con los principios estándares descritos anteriormente, incluyendo protección con roca en la salida para prevenir la erosión.

Sin embargo, muchos de los cruces se encuentran en terreno inclinado y escarpado y el ancho de la carretera significa que el canal de captación y el canal de emisión necesitarán protección más sistemática. La fase 2 del diseño propone utilizar canales escalonados de concreto para superar este problema. Una sección típica tomada del informe 2361-00-HY-RP-002, se muestra en la Figura 4-11.

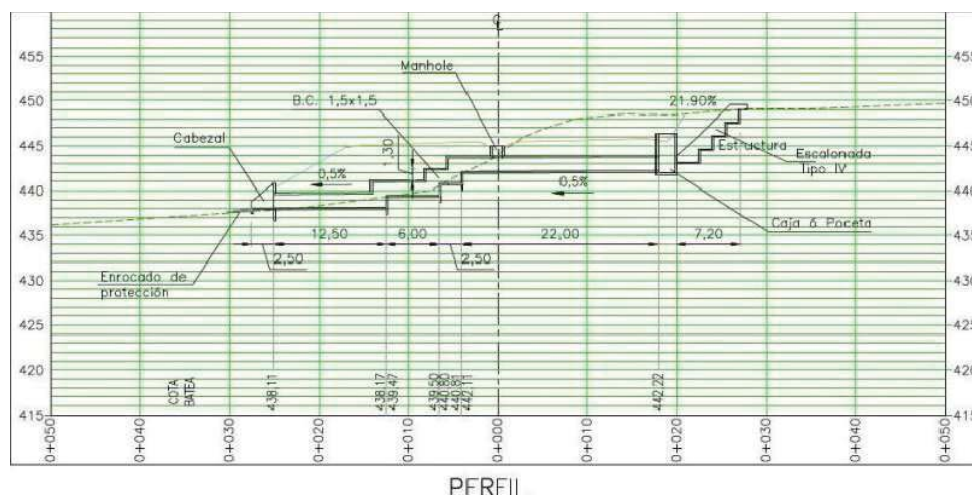


Figura 4-11. Cruce de Alcantarilla con Escalonada

Los escalones son esenciales para disipar la energía del agua que fluye a gran velocidad por las pendientes más pronunciadas.

La Tabla 7.3 del informe de diseño de la fase 2, proporciona una lista de los cruces más pequeños, incluyendo tamaño y requisitos de escalonamiento. Se han programado un total de 81 cruces, siendo 44 alcantarillas de cajón típicamente con una sección transversal de 1.5 por 1.5 m, pero con algunos más grandes de hasta 5 m de ancho por 4 m de alto. Para las cuencas muy pequeñas la fase 2 del diseño propone utilizar un tubo de diámetro 1.10 m "Alcantarilla" en lugar de la sección de cajón.

La Inspección de la tabla en comparación con el programa de captación plasmado en el plano 2361-00-HY-DW-PLT-1001 muestra que los dos conjuntos de datos son coherentes. Por ejemplo la alcantarilla de cajón más grande en la abscisa K20+477 corresponde con la captación 37b, Quebrada Palmichera, que tiene una cuenca de 83 ha, casi un kilómetro cuadrado.

Algunos de estos cruces de alcantarilla pueden no ser requeridos donde la vía atraviesa el lecho del río con un puente o viaducto elevado.

Las cuencas muy pequeñas donde se utilizará la tubería parecen tener una típica zona de captación de menos de 3 ha o 0.03 km².

4.3.3 Ríos y Cuencas Mayores

Los cruces de ríos y de grandes cuencas serán con puentes de modo que la capacidad de inundación puede ser menos crítica aunque el riesgo de erosión de la cimentación con pilotes debe ser considerado más crítico.

Datos intermitentes para varios ríos se encuentran en la tabla 6.13 del informe de la fase 2 del diseño. Para las cuencas más grandes, cuencas entre dos y cien kilómetros cuadrados, el diseño de inundación se basa en métodos estándar de hietograma del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos. Los valores de inundación se basan en el análisis de una serie de estaciones hidrométricas (resumidas en la tabla 3.1 del reporte del estudio ambiental de la fase 2 del diseño, 2361-00-EV-RP-002 con fecha de abril de 2011 [128]). De relevancia particular son los registros de la estación San Isidro en la Quebrada Cune y Puente Granada en San Francisco. Se identifican cuatro cruces en la Tabla 6.18, que se ajustan con los cruces del río señalados en la sección anterior. Las características se resumen en la Tabla 4-9.

Tabla 4-9. Fase 2 Inundaciones de Diseño

Abscisa	Río	Área de la cuenca km ²	Inundación de diseño m ³ /s
2+054	Cune Bajo	23.6	128
9+121	Cune Alto	5.6	55
18+308	San Francisco	16.5	115
21+161	Honda	2.5	2.1

Estos datos son coherentes y razonables. La fase 2 del diseño ha incorporado una inundación que tiene un periodo de retorno de uno en cien años. Este es un estándar más alto de lo habitual. Estas cuencas serán todas cruzadas por puentes o viaductos de modo que los valores de inundación probablemente sólo son relevantes para la consideración de socavación de los pilares del puente.

Una cuenca parece haberse omitido de este estudio; es un río sin nombre ubicado en la abscisa K5+300. Basado en el plano 2361-00-HY-DW-PLT-1001 [124] tiene un área de captación de 1.75 km² y está señalado como cuenca 11a. Debería estar listado como trabajo 21 en la tabla 7.2 del informe del diseño, pero se le asigna un pequeño cruce con tubería mientras que el tamaño de la cuenca dictaría un cruce con una gran alcantarilla o un puente.

4.3.4 Datos Recientes de Inundación

Considerando las recientes inundaciones 2010-2011 con datos previos de inundaciones, se requieren registros continuos de buena calidad. Los mejores registros parecen ser para el río Villeta en Tobia, donde existe un registro continuo, de buena calidad de treinta años entre 1981 y 2011. Villeta en Tobia está a unos 30 km al norte de Villeta y es una cuenca muy grande por lo que es útil más como una guía para la hidrología regional que como herramienta con relevancia directa para diseñar alcantarillas para las cuencas pequeñas.

El registro incluye el caudal máximo para cada mes y el flujo medio por cada mes. La inspección del registro de picos de flujo y teniendo en cuenta picos de inundación de más de 300 m³/s conduce a las siguientes observaciones con respecto a los flujos de La Niña 2010-2011:

- En 2011 hubo tres picos de inundación de 305, 324 y 324 m³/s.

- En 2010 hubo dos picos de inundación de 312 y 312 m³/s.
- En los 28 años previos de registro hubo 27 eventos excediendo 324 m³/s, que ocurrieron en 18 años distintos.
- Inundaciones significativamente mayores ocurrieron en 2008 (492 m³/s), 2007 (626 y 622 m³/s), 2005 (449 m³/s), 2002 (510 m³/s), 1996 (465 m³/s), 1993 (439 m³/s), 1991 (445 m³/s), 1989 (425 m³/s), 1988 (439 m³/s), 1984 (640, 406, 368, 350 y 364 m³/s), 1981 (596, 389 y 478 m³/s).
- Las inundaciones pico en Tobia no parecen mostrar eventos significativos en 2010-2011.
- Eventos de más larga duración pueden ser indicados por el flujo promedio mensual; en 2011 el flujo mensual promedio alcanzó un máximo de 112.7 m³/s en Abril, aunque hubo varios meses en 2011 con flujos en un rango entre 76 y 86 m³/s al final de 2011.
- En los 28 años previos del registro hay cuatro meses en que los flujos mensuales superaron los 112 m³/s. Otros cinco meses tuvieron flujos mensuales por mayores a 90 m³/s.
- Al considerar los flujos de La Niña 2010-2011 los eventos de duración más larga (medidos en semanas o meses) parecen ser más significativos que las inundaciones de corta duración (debido a lluvia durante unos pocos días).

Otros registros de largo plazo y con datos recientes están disponibles para Río Villeta en Villeta; Sin embargo, los datos de flujo para las inundaciones críticas de 2010 y 2011 no están disponibles. Faltan los datos de octubre a diciembre de 2010 y abril de 2011, que corresponde a los flujos de inundación en Tobia. No es posible utilizar los datos disponibles para determinar periodos de retorno de largo plazo para el evento de La Niña 2010-2011.

4.3.5 Diseño de Inundación de Alcantarillas

El cálculo de la inundación de diseño puede estar basado tanto en un análisis estadístico de datos históricos de inundación como en el "método racional". Aparentemente existen datos limitados solamente para los ríos más grandes y no hay datos para las subcuencas más pequeñas. No es de extrañar que se haya utilizado el método racional para las cuencas más pequeñas; es decir, todas las cuencas a excepción de las cuatro indicadas en la tabla de arriba.

En general los cruces de alcantarilla han sido diseñados para una tormenta de 1 en 100 años. Periodos de retorno menos onerosas han sido utilizados para el drenaje longitudinal, las estructuras temporales y menores.

El método racional es ampliamente reconocido como apropiado para pequeñas cuencas donde no hay datos disponibles de flujo de inundación. El método considera la intensidad de las precipitaciones en la cuenca durante un período crítico, definido como el tiempo de concentración. El flujo máximo de inundación Q (m^3/s) está dado por la fórmula (versión métrica):

$$Q = 0.00277 C I A$$

Donde A es el área de la cuenca en hectáreas, I es la intensidad de la lluvia (mm/h) durante el periodo crítico.

El método prevé un "coeficiente de escorrentía", C , que es la cantidad de agua que es probable que fluya rápidamente fuera de la cuenca en comparación con la proporción que es susceptible de ser retenida o al menos fluir más lentamente debido a la naturaleza y pendiente de la superficie del suelo. Así que por ejemplo el coeficiente de escorrentía es probable que sea tan alto como 0.9 para las zonas pavimentadas sin vegetación (90% de la precipitación escurre durante el período crítico) y tan bajo como 0.3 para pendientes con vegetación y jardines. Por supuesto estos son los valores de diseño de inundación; el coeficiente de escorrentía será mucho menor durante eventos de lluvia normal.

El periodo crítico se conoce como el tiempo de concentración, denotado como T_c , se define como el tiempo que tarda el flujo desde la parte más lejana de la cuenca para llegar al punto de interés. El tiempo de concentración es determinado por las fórmulas empíricas que tienen en cuenta la pendiente de la cuenca y la longitud de la trayectoria de flujo más larga.

Para períodos de tiempo más prolongados el flujo habrá pasado a través de la Cuenca y para tiempos más cortos, parte del flujo no habrá alcanzado el punto de interés. Se asume la intensidad de lluvia constante durante el periodo crítico, que por definición asume que todas las partes de la cuenca contribuyen al flujo pico.

La precipitación es analizada teniendo en cuenta relaciones de intensidad-duración, es decir, eventos de corta duración pueden ser muy intensos pero eventos de más larga duración tendrán una intensidad menor. Este análisis también puede tomar en cuenta el periodo de retorno de diseño, en este caso para un evento de 1 en 100 años. Los resultados de ese análisis se presentan en la Tabla 6.15 del informe de la fase 2 del diseño.

Para el diseño de 1 en 100 años para un tiempo de concentración de diez minutos una intensidad de una lluvia de 201 mm/h se deriva de la fase 2 del diseño. Al valor de T_c de 10 minutos se ha adoptado para las cuencas pequeñas. El evento de lluvia resultante es, por tanto, $201 \times 10 / 60 = 33.5$ mm .

Se encontró una inconsistencia en el resumen ejecutivo del estudio ambiental de la fase 2 de diseño (Informe 2361-00-EV-RP-002 [128]) donde se afirma que las tuberías se diseñaron para flujos de hasta 1.5 m³/s.

De gráficos estándar de diseño un flujo de 10.0 m³/s, un tubo de diámetro de 1.1m tendría una velocidad de entre 9 y 10 m/s y las pérdidas de carga de 6m/100m. Estas velocidades están en el límite de lo que es normalmente aceptable, pero puesto que es un flujo instantáneo en un evento de 1 en 100 años es aceptable. El mismo caudal en una alcantarilla de 1.5m será de más de la mitad de las velocidades. Los tamaños de alcantarilla y tubo por lo tanto, muestran haber sido diseñados racionalmente.

4.3.6 Hidrogeología y Agua Subterránea

La ocurrencia del agua subterránea es dependiente de la permeabilidad del suelo, a menudo material con muy baja permeabilidad como roca o arcilla se describe como "seco" cuando en realidad está saturado, pero el agua contenida dentro de la roca o la arcilla no puede ser liberado debido a la muy baja permeabilidad. Esto conduce a los términos acuífero y acuícludo o acuífugo; un acuífero es un cuerpo de roca o el suelo que puede liberar cantidades económicas de agua. Acuícludo a menudo son considerados como impermeable porque no liberan agua. Un tercer término Acuitardo es un caso intermedio donde el flujo es demasiado pequeño para ser útil y mejor considerarlo como flujo "retardado".

El agua subterránea es significativa en la construcción y operación de autopistas y túneles por tres razones principales:

- Entrada a túneles y estabilidad de la cara, principalmente durante la construcción,
- El agua subterránea es un factor clave en la estabilidad de laderas empinadas y deslizamientos de tierra,
- Cuestiones ambientales particularmente donde los recursos hídricos locales pueden verse afectados.

4.3.7 Permeabilidad

La permeabilidad del suelo es su capacidad para transmitir agua y es el parámetro clave en los estudios de aguas subterráneas; Sin embargo, es notoriamente difícil de medir. Convencionalmente unidades métricas de permeabilidad se expresan en metros por segundo, m/s y éstos se utilizan en este informe.

La capacidad de un acuífero es dependiente de su permeabilidad y el espesor, más correctamente denominado transmisividad, que es la permeabilidad promedio multiplicada por el espesor. Como guía la Tabla 4-7 establece una relación aproximada entre la permeabilidad y el tipo de acuífero:

Tabla 4-10. Permeabilidad Típica en Diferentes Tipos de Acuíferos

	Permeabilidad Típica m/s
Acuífero	10^{-5} a 10^{-2}
Acuítardo	10^{-8} a 10^{-5}
Acuicludo	Menor que 10^{-8}

En el reporte de la fase 2 del diseño, 983-005-003 con fecha de enero de 2011 [127] una tabla similar se presenta, pero los valores son significativamente superiores, por ejemplo un Acuitardo se define en el rango 7×10^{-6} a 5×10^{-5} m/s.

Valores superiores a 10^{-2} m/s son raros y tienden a ser asociados con flujo turbulento rápido que puede perder los beneficios de las aguas subterráneas de ser un depósito subterráneo protegido y en riesgo de contaminación.

La permeabilidad es difícil de medir; los mejores resultados se obtienen de pruebas de bombeo a gran escala. Otras pruebas de campo y de laboratorio pueden ser inexactas, al grado que a menudo es mejor que un experto evalúe la permeabilidad a partir de las descripciones del suelo y las rocas, en lugar de utilizar valores calculados a partir de mediciones en las que se tuvieron que hacer suposiciones imprecisas para calcular un resultado.

De los documentos de la Ruta del Sol no parece que se hayan realizado pruebas de bombeo y los valores de permeabilidad cubren un rango muy grande.

El estudio ambiental de la fase 2 del diseño (Informe 2361-00-EV-RP-002 [128]) afirma que la formación Hoyón es el "único acuífero en el área del proyecto" que está "fuertemente limitada en profundidad". Esto es inconsistente con una declaración en el mismo documento que dice "casi todas las zonas actúan como zonas de recarga debido a la permeabilidad secundaria (fractura)".

Rocas descritas como calizas o areniscas ciertamente se esperaría que tengan una permeabilidad significativa, generalmente dominada por flujo de fractura, referida como permeabilidad secundaria. Las lodolitas - las Lutitas de la formación de Utica - probablemente sean de baja permeabilidad.

Los depósitos aluviales y terrazas, descritos como arena y grava, y que se encuentran en el valle del río también son propensos a ser permeables y formar acuíferos con permeabilidad tal vez en el rango de 10^{-5} a 10^{-3} m/s.

Los coluviones en las laderas van desde el talud, acarreo de roca, que va a ser muy permeable a los depósitos arcillosos arenosos donde las lodolitas han sido meteorizadas (intemperizadas) a un suelo tienden a ser relativamente impermeable, tal vez en el rango de 10^{-6} a 10^{-4} m/s.

En el estudio ambiental de la fase 2 del diseño se afirma que el agua del acuífero Hoyón emerge cerca del final del túnel 2. Presumiblemente esto es el comienzo del túnel 2 donde la formación Hoyón es confinada por los coluviones en el valle del Río San Francisco. Esto es consistente con la Formación Hoyón formando un acuífero único, que predomina en la colina a través de la cual el Túnel La Cumbre será construido.

Se realizaron estudios hidrogeológicos y de campo para los túneles y los resultados se presentan como el informe de la fase 2 del Diseño, 983-005-003 con fecha de enero de 2011 [127]. Éstos incluyen perforaciones, modelación de aguas subterráneas y geofísicas y proporcionan información más detallada para los túneles, pero no para las áreas principales de deslizamientos. La clasificación se basa en el tamaño de grano para los suelos coluviales (Hazen) y toma en consideración la designación de calidad de roca (RQD, por sus siglas en inglés) en las rocas, así como los datos regionales. RQD es una guía para el grado de fractura y por lo tanto de permeabilidad secundaria. Además se llevaron a cabo diez pruebas de infiltración/permeabilidad de los suelos superficiales.

Dieciséis pruebas Luego se llevaron a cabo en los pozos; 11 pruebas se registran con valores Lugeon mayores de 50 años ($> 5 \times 10^{-6}$ m/s) y todas las pruebas dieron valores superiores a 12 Lugeones ($> 1.2 \times 10^{-6}$ m/s). Pruebas reportadas como "mayor que" indican una limitación en el equipo y que los valores probablemente sean mayores y fuera del rango de valores normalmente encontrados en las pruebas Lugeon.

De todos los datos, la Tabla 6.2 en el informe de la fase 2 del diseño, la permeabilidad evaluada para los distintos estratos se produce y se resume en la Tabla 4-11 ([124]).

Tabla 4-11. Permeabilidades Estimadas

Permeabilidad alta	Permeabilidad Media	Permeabilidad Baja	Permeabilidad Secundaria
Depósitos Aluviales	Coluvión, deposito Terraza, Acuífero Hoyón (Arenisca) (arenisca)	Coluviones Arcillosos, formación Hoyón (fina)	Guaguaqui, Olini, Córdoba
1×10^{-3} a 3×10^{-2} m/s	5×10^{-5} a 1×10^{-3} m/s	7×10^{-6} a 5×10^{-5} m/s	1.2×10^{-6} a 1×10^{-5} m/s

Aparte de algunos valores muy altos para el aluvión los valores son consistentes con la experiencia internacional. En general estos valores, aparte de ser los más bajos, permitirían a la precipitación penetrar y recargar los acuíferos.

En el modelo hidrogeológico, los depósitos superficiales poco profundos (coluvión y aluvión) forman un acuífero muy superficial (perched) sobreponiéndose a la roca meteorizada moderadamente permeable. Las rocas más profundas son menos meteorizadas y es probable que tengan menos permeabilidad o incluso que sean rocas sólidas impermeables. En algunas ubicaciones, areniscas fracturadas y moderadamente permeables pueden formar acuíferos profundos.

Basado en experiencias anteriores, las predicciones de los flujos de entrada a los túneles están en el rango de 150 a 200 l/s para el túnel 1 y de 50 a 100 l/s para el túnel 2. Los valores considerados en el modelo parecen estar en el extremo superior del rango indicado por las evaluaciones descritas anteriormente.

Ingeniería y Geotecnia (IGL) también realizó estudios de modelación hidrogeológica y de aguas subterráneas para el Ministerio de Medio Ambiente (ANLA) y produjo un informe en enero de 2012 [210]. Ellos también utilizan valores bastante altos de permeabilidad en la modelación y producen predicciones de flujos de entrada del mismo orden que las predichas en la fase 2 del diseño. En sus conclusiones reconocen el riesgo de que la construcción del túnel influya en los suministros de agua sub-superficial en el área y sugieren el monitoreo y la provisión de suministros de agua alternativos en caso de ser necesario.

4.3.8 Taludes y Deslizamientos de Tierra

Dada la importancia del papel del agua subterránea en la estabilidad de las áreas de deslizamientos hay muy poca información y no parece haber ningún análisis del papel del agua subterránea en la estabilidad de taludes. Los estudios de túnel identifican agua subterránea aislada y también agua subterránea profunda dentro de los estratos inclinados de roca, que a veces se encuentran confinados por acuitardos sobrepuestos; generalmente compuestos por lodolitas.

Parece no haber ningún registro de los niveles de agua subterránea con respecto al tiempo y las lluvias, que proporcionarían datos básicos acerca de la relación entre eventos de precipitación extrema y los movimientos de deslizamiento.

Durante la visita de campo, el equipo observó las secuelas de un gran deslizamiento que ocurrió en el año 2004, conocido como deslizamiento El Cune alrededor de la abscisa K0+000. Se informó que el deslizamiento fue contenido después de haber bajado el nivel freático. La Figura 4-12 muestra el muro de contención con el drenaje, inmediatamente detrás de la pared, compuesto por grandes rocas



Figura 4-12. Deslizamiento El Cune con drenaje detrás del muro

También se visitó el deslizamiento de San Francisco. Durante la inspección del sitio alrededor de las abscisas K18+000 y K19+000 se observó que el deslizamiento se mueve mucho más rápido después de eventos de fuertes lluvias, o cuando una gran cantidad de lluvia cae en un período corto de tiempo. Residentes informaron al equipo que después del deslizamiento, tres ríos quedaron sepultados por los escombros. El Río San Francisco, así como otro arroyo, desde entonces han reaparecido como manantiales dentro del deslizamiento. Esto sugiere que el agua, que alguna vez fluyó en la superficie, es ahora agua subterránea.

El drenaje es reconocido ampliamente como una solución clave para mejorar la estabilidad de los deslizamientos. La Figura 4-12 muestra un drenaje simple en la parte trasera de un muro de contención; un drenaje mucho más eficiente se logra mediante la ampliación de drenajes en la cuesta. Esto puede hacerse con drenes en pendiente o con drenes horizontales.

Los drenajes horizontales fueron utilizados por primera vez para ayudar a la estabilidad de taludes en California en los Estados Unidos en 1939. Los principales avances se llevaron a cabo en Hong Kong en la década de 1980 tras los deslizamientos catastróficos en las zonas urbanas conocidas como “Mid Levels” [310]. Hong Kong tiene pendientes pronunciadas similares a las que hay en Colombia con coluviones sobrepuestos sobre roca meteorizada. Las técnicas de perforación de drenes sub-horizontales no son simples, pero los beneficios pueden ser importantes.

4.3.9 Impacto de La Niña

Como se discute en los análisis de la pluviometría e hidrometría, el impacto de La Niña en 2010-2011 parece estar asociado más bien, con eventos de precipitación de unas pocas semanas que con tormentas intensas de corta duración. Esto es algo opuesto a experiencias e información previas pero es consistente con una recarga considerable elevando los niveles de agua subterránea y cualquier presión de confinamiento dentro de los taludes más grandes.

El impacto evidente e importante del incremento de recarga de agua subterránea radica en reducir la resistencia al corte de zonas críticas de suelo o roca meteorizada, así como también en incrementar el peso de las secciones superiores de los taludes.

El impacto de la carretera y del corte durante la construcción en las aguas subterráneas puede ser, ya sea, reduciendo los niveles de agua al aumentar el drenaje, o permitiendo una mayor recarga debido a la eliminación de la cubierta vegetal.

El aspecto de drenaje de un corte nuevo, puede resultar en la pérdida de fuentes de agua, particularmente donde se obtienen los suministros locales de pozos poco profundos. Estos casos se han observado regularmente en el pasado y se subsanan mejor mediante la provisión de una fuente alternativa de agua. No es práctico proteger pozos poco profundos, en esta situación, por cualquier otro medio.

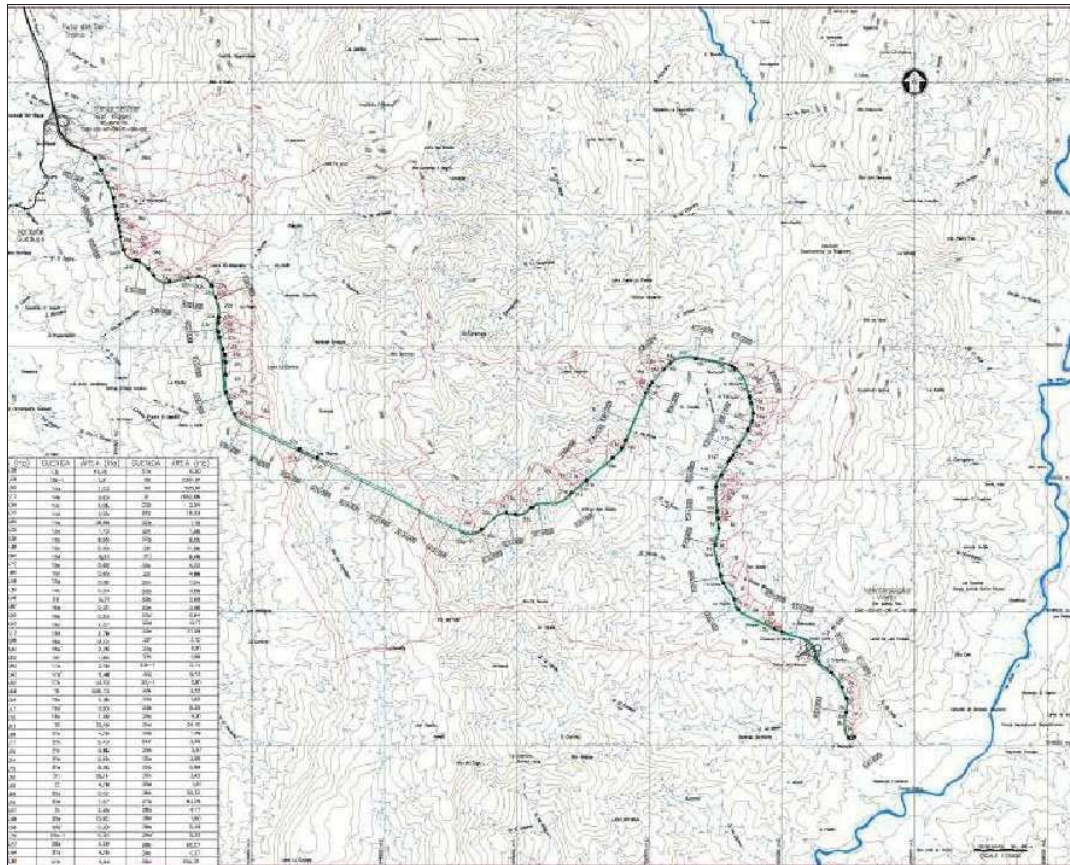


Figura 4-13. Cuencas y Ríos Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1

4.4 Uso del Suelo

4.4.1 Descripción General

El trazado completo de la Ruta del Sol Sector 1, Sector 1, Tramo 1 se encuentra en un área montañosa en el Departamento de Cundinamarca. Inicia en el municipio de Villeta y termina en el conector con el segundo tramo del Sector 1 de la Ruta del Sol, en vecindades del municipio de Guaduas. El área del proyecto se caracteriza por zonas de cultivos, ganadería, lotes baldíos y reservas forestales. Geográficamente, el sector 1 de Ruta del Sol se extiende desde la cordillera oriental en dirección al valle del Río Magdalena, el cual se encuentra entre las cordilleras central y oriental.

El Departamento de Cundinamarca presenta diferentes usos de tierra debido a sus diversas elevaciones y recursos de agua. Los usos del suelo más representativos, según el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) son: cultivos temporales, cultivos semipermanentes, pastos naturales, pastos introducidos, vegetación de páramo y pastos manipulados.

La mayoría de la información aportada por entidades oficiales como el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC o el Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE, se encuentra en escala Departamental (Cundinamarca), sin embargo, el presente capítulo pretende describir las condiciones de uso del suelo únicamente en las áreas alrededor del corredor del proyecto.

La Tabla 4-12 describe el uso del suelo a lo largo del corredor. La información se basa en el Estudio de Impacto Ambiental del Diseño Fase 2 del proyecto.

Tabla 4-12. Uso del Suelo a lo largo del Trazado

TIPO	COBERTURA	HECTÁREAS
Agua	Lagos y pantanos naturales	0.20
	Reservorios	0.10
Áreas abiertas con poca o ninguna vegetación.	Tierras degradadas	24.90
Cultivos heterogéneos	Cultivos variados	256.50
Vegetación variada	vegetación en transición	108.30

Áreas de bosque y semi-naturales	Bosque denso natural	71.60
	Bosque Ripario	447.50
Cultivos	Cultivos temporales	599.30
Pastos	Con árboles	264.00
	Con arbustos	115.70
	Limpios	560.70
Territorios artificiales	Urbana continua	36.80
	Urbana discontinua	66.50
	Vías y rieles	9.30
	Industrial o comercial	6.40

4.4.2 Villeta

El Sector 1 de Ruta del Sol inicia en Villeta, un municipio mediano localizado a 91 Km al Noroccidente de Bogotá. Villeta es un conocido destino turístico de los bogotanos debido a sus condiciones climáticas calurosas. Su población es de aproximadamente 23,800 (2005), dentro de un área de 140 Km². Su elevación es de 779 metros sobre el nivel del mar, con una temperatura promedio de 25°C durante todo el año con una humedad entre 80% y 85%.

La más importante producción de Villeta es la Panela, producto obtenido de la caña de azúcar mediante un proceso de hervido y evaporación de los jugos de caña de azúcar. Un importante número de fincas rodeando el área urbana de Villeta se dedica al cultivo de caña de azúcar, y su consecuente producción de Panela, haciendo de ésta una importante fuente de trabajo para la población de la zona.

4.4.3 Guaduas

Guaduas es un municipio con una población de 33,000 habitantes (2005) en 756 Km² y con una temperatura promedio de 23.5°C durante el año. Se localiza a 35 Km desde Villeta por la Ruta 50 (Villeta – Honda). Guaduas se ubica en un valle formado por una depresión de la ladera occidental de la Cordillera Oriental a 902 m sobre el nivel del mar.

Guaduas cuenta con importantes áreas medioambientales debido a sus recursos hídricos como ríos y lagos, y un número importante de microcuencas, de las cuáles San Francisco es la más importante.

El uso del suelo de Guaduas es principalmente ganadería y agricultura. 80% de las fincas se encuentran en las áreas rurales se dedican a la ganadería, el 70% incluyen también cultivos de café y el 65% suman el cultivo de caña de azúcar a la ganadería.

4.4.4 Reserva Nacional Natural San Francisco

La Reserva Nacional Natural San Francisco hace parte de las reservas creadas con el objetivo de proteger los ecosistemas de la biósfera de la Región Andina Norte. La reserva tiene un área aproximada de 2,872 Hectáreas, elevándose entre 1,100 y 2,100 m sobre el nivel del mar.

De acuerdo a información del Ministerio de Medio Ambiente de Colombia, el objetivo principal de la Reserva Nacional Natural San Francisco es la conservación y protección de la cuenca superior del Río San Francisco, la cual es la fuente hídrica del municipio para agua potable y otros usos.

La ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1 cruza la reserva con las siguientes estructuras (ver Figura 4-14):

- Todos los portales de ambos túneles se encuentran dentro de los márgenes de la reserva.
- Puente San Francisco Bajo (140 m) entre los dos túneles.
- Aproximadamente 1 Km de vía a cielo abierto.

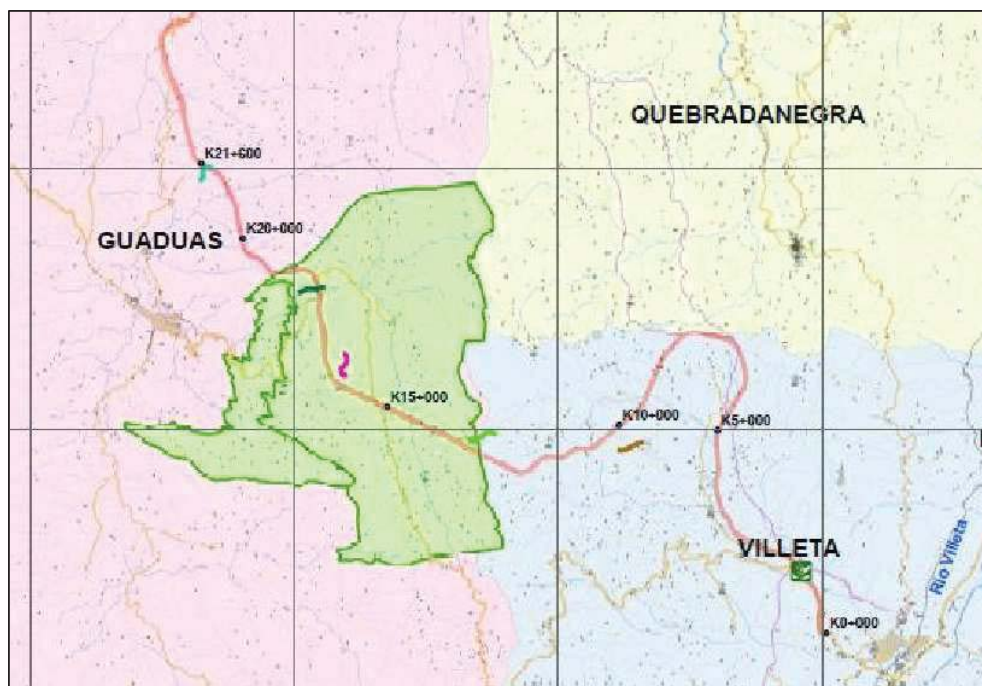


Figura 4-14. Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1, a través de la Reserva Nacional Natural San Francisco

La Reserva Nacional Natural San Francisco fue creada en 1982. Es administrada por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR. De acuerdo con el Ministerio de Medio Ambiente, sólo el 15% de la reserva presenta cobertura forestal, correspondiente a Bosques Primarios y Secundarios Intervenidos en los cuales se encuentran tres especies diferentes tales como: Balso (*Ochroma pyramidale*), Carbonero (*Calliandra carbonaria*), Guamos (*Inga spp*), Madre de agua (*Trichantera gigantea*) y Yarumos (*Cecropia spp*).

El 3 de Diciembre de 2010, cuatro ciudadanos del municipio de Guaduas iniciaron un proceso legal frente al Consorcio Vial Helios en el cual argumentan que su “derecho al disfrute de un ambiente saludable se encuentra amenazado” debido al impacto que la construcción de la nueva vía puede tener en los recursos hídricos de la población, por el hecho de cruzar la reserva.

4.4.5 Reserva Natural La Esmeralda

La Reserva Natural La Esmeralda no es una reserva oficial como tal, pero las comunidades en las áreas cercanas la reconocen como un área especial, en sus esfuerzos de conservación de los recursos naturales. La vía propuesta atraviesa la reserva entre las abscisas aproximadas K12+600 y K13+100.

5 Información Climática General del Área del Proyecto

El trazado de la Ruta del Sol, Sector 1, Tramo 1 se encuentra en la Cordillera Oriental (Parte oriente) de los Andes en el centro de Colombia. El clima de esa región ha sido clasificado por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) principalmente como "templado semi-húmedo"; con una temperatura media anual entre 18 y 25 °C y un valor promedio anual de horas de brillo solar entre 1,301 y 2,100. La precipitación en la región tiene un valor medio anual entre 1,000 y 2,000 mm/año y la humedad relativa presenta valores medios anuales entre 75.1 y 85%.

Se reporta que la precipitación anual en la zona de Villeta generalmente oscila alrededor de 2,000 a 2,500 mm/año y de 1,000 a 1,500 mm/año en el área de Guaduas.

La clasificación climática según mapas del Atlas Regional del Departamento de Cundinamarca (ARDC) es semi-húmeda y templada, con temperatura media anual en el rango entre 18 y 24 °C y en algunos lugares localizados más de 24 °C (tales como los valles del Río Villeta y Río Tobia). El promedio anual de horas de brillo solar en el rango de 1,300 a 1,700 h para Villeta y 1,700 a 2,100 para Guaduas.

Se reportan promedios anuales de evapotranspiración en el rango de 1,200 a 1,400 mm/año en las áreas de Guaduas y Villeta y dentro de 1,000 a 1,200 mm/año para la zona central entre ellos. La humedad relativa media anual en el área de Villeta y Guaduas está dentro del rango entre 80 y 85% y entre 75 y 80%, respectivamente.

5.1 Estaciones de Medición Disponibles en la Región

Existen sólo unas pocas estaciones de medición en el área del proyecto disponibles en el IDEAM, incluyendo 3 estaciones pluviométricas y 2 estaciones hidrométricas, con registros diarios de datos:

1. Estación Pluviométrica "El Tuscolo", ID IDEAM: 23060140,
Localizada en: 05° 04' N, 74° 36' O,
A una elevación de 975 m.s.n.m.,
Datos disponibles: 1982-2012

2. Estación Pluviométrica “Utica”, ID IDEAM: 23060190,
Localizada en: 05° 11' N, 74° 29' O,
A una elevación de 497 m.s.n.m.,
Datos disponibles: 1981-2012

3. Estación Pluviométrica “El Trapiche”, ID IDEAM: 23065200,
Localizada en: 05° 01' N, 74° 30' O,
A una elevación de 1,068 m.s.n.m.,
Datos disponibles: 2009-2012

4. Estación Hidrométrica “Villeta”, ID IDEAM: 23067070,
Localizada en: 05° 00' N, 74° 28' O,
A una elevación de 790 m.s.n.m.,
Datos disponibles: 1982-2011.

5. Estación Hidrométrica “Tobia”, ID IDEAM: 23067060,
Localizada en: 05° 07' N, 74° 26' O,
A una elevación de 620 m.s.n.m.,
Datos disponibles: 1981-2011.

La ubicación de cada estación relacionada con el trazado de Ruta del Sol, Tramo 1, del Sector 1 se muestra en la Figura 5-1. Se muestra la ubicación de las Estaciones Pluviométricas con puntos amarillos y de las Estaciones Hidrométricas con puntos azules. El trazado del Tramo 1 se representa con la línea roja. Como los registros disponibles de las estaciones El Tuscolo y Utica tienen un largo periodo de tiempo, el análisis se centra en los datos de estas estaciones.

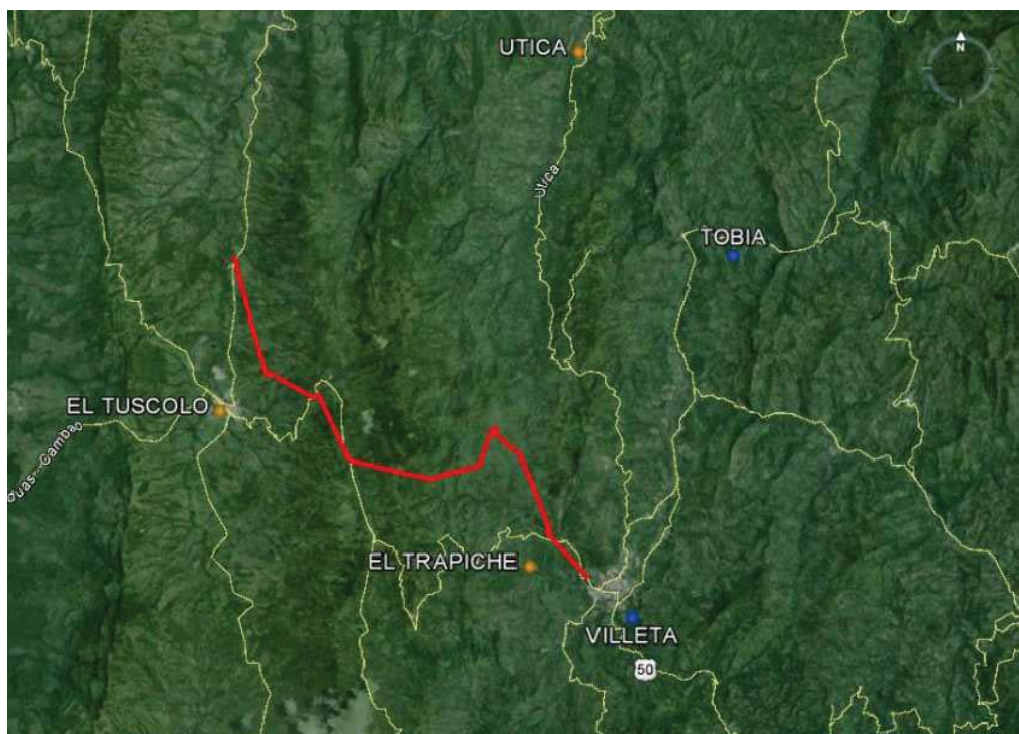


Figura 5-1. Ubicación de las estaciones del IDEAM en el área del proyecto

5.2 Precipitación Mensual

Con la información histórica disponible de las estaciones pluviométricas es posible calcular el promedio mensual de precipitaciones en la región. La Figura 5-2 y la Figura 5-3 muestran la precipitación media mensual para las estaciones "El Tuscolo" y "Utica" respectivamente en los años 1981-2012. Los datos muestran la existencia de precipitaciones durante todo el año con una distribución de lluvia bimodal muy clara durante el año, con el primer pico durante Abril y Mayo y un segundo y más importante pico durante Octubre y Noviembre, precedido por un mínimo durante Junio, Junio y Agosto. El mes con el menor valor de precipitación durante el año es Junio. El valor medio de precipitación anual en la estación "El Tuscolo" es de 1,564.20 mm y 1,384.90 mm en la estación "Utica".

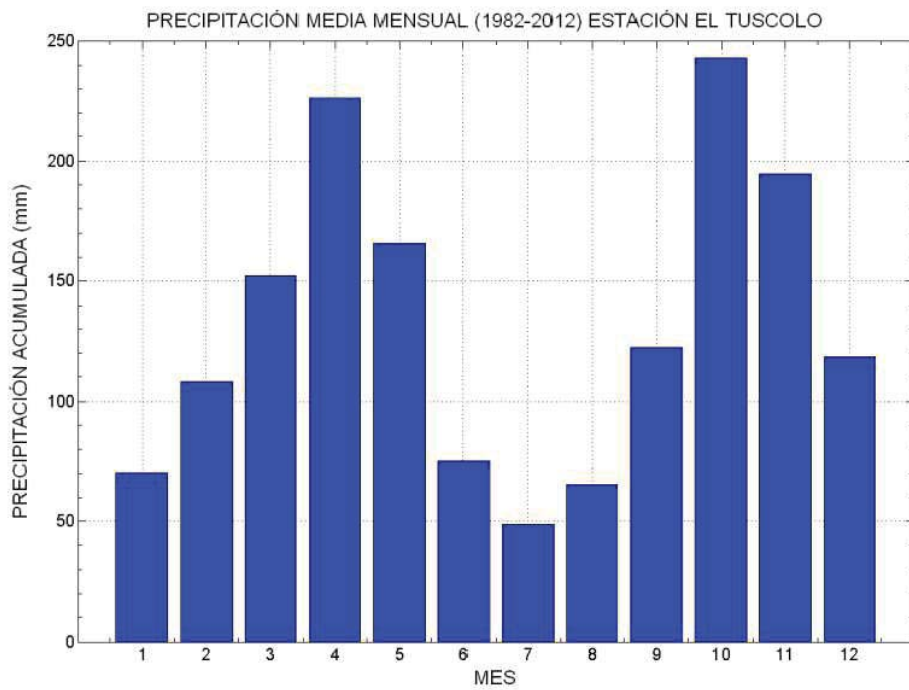


Figura 5-2. Precipitación media mensual (1982 – 2012) para la estación El Tuscolo

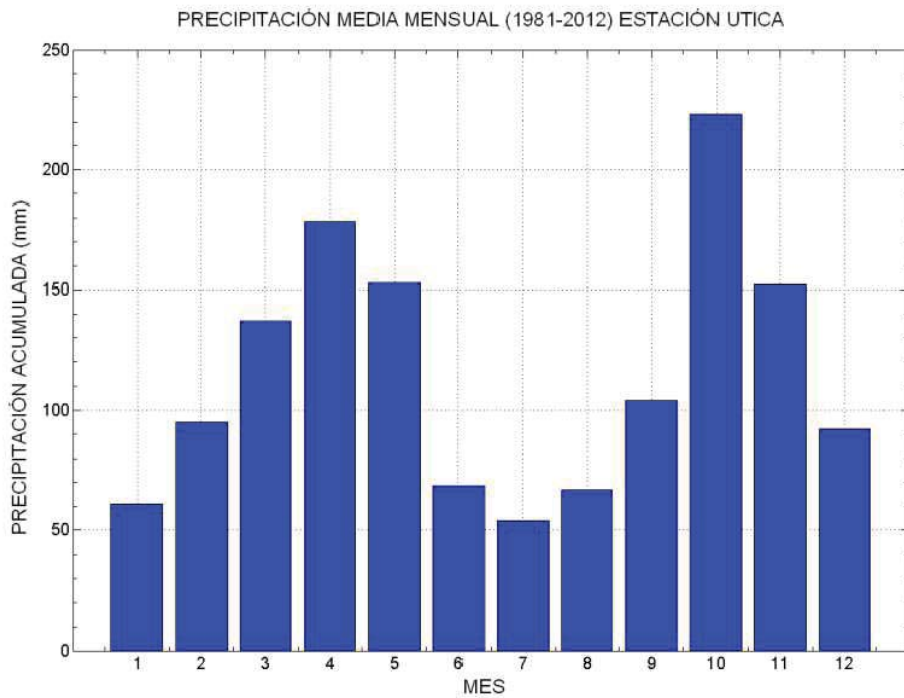


Figura 5-3. Precipitación media mensual (1981 – 2012) para la estación Útica

5.3 Análisis de valores extremos

El análisis de valores extremos se llevó a cabo utilizando el análisis de picos sobre umbral. Esta técnica puede utilizarse con una amplia gama de distribuciones de probabilidad.

5.3.1 Análisis de Picos sobre Umbral

La técnica de Picos Sobre Umbral consiste en desagrupar los datos seleccionando eventos pico de tormenta que excedieron un umbral predeterminado dentro de una ventana móvil. Se asume que las observaciones son independientes y distribuidas de modo idéntico. El número de picos que exceden un nivel dado, dividido por el número de años en el registro, da la tasa de excedencia que puede ser utilizada para encontrar el número esperado de ocurrencias en un periodo de duración específica. La distribución de probabilidad de los valores pico, que depende del umbral sobre el cual los picos son contados, se combina con la tasa de ocurrencia de picos para dar la distribución incondicional de valores pico a partir de la cual se pueden calcular los valores extremos correspondientes a periodos de retorno dados, por ejemplo:

$$P(x.y) = P(x/y) P(y)$$

donde $P(x.y)$ = distribución de probabilidad de valores pico incondicional con el tiempo,

$$\begin{aligned} P(x/y) &= \text{distribución de probabilidad condicional de valores pico y} \\ P(y) &= \text{distribución de probabilidad de tormentas con tiempo} \end{aligned}$$

Los períodos de retorno de valores extremos son calculados de la siguiente forma:

$$RP = 1 / \{ \lambda [1 - P(x/y)] \}$$

Donde λ es el parámetro de Poisson y $P(x/y)$ la distribución de probabilidad condicional de valores pico

El número de tormentas que ocurren por unidad de tiempo es asumido como una variable aleatoria que puede ser representada por la distribución de Poisson. La distribución de Poisson es caracterizada por un valor medio, λ , que es el número medio de tormentas por año. El valor de λ se calcula como el número de tormentas dividido por el periodo de años registrado.

La densidad de probabilidad de la distribución de Poisson, está dada por la fórmula siguiente:

$$p(i) = (\lambda^i \exp^{-\lambda}) / i!$$

donde $i = 0, 1, 2, \dots$

5.3.2 Distribuciones de Probabilidad

Las funciones comúnmente utilizadas para la estimación de valores extremos son:

- Distribución Fisher-Tippett, Tipo 1 (F-T1)
[311], [314], [315] y [325]
- Distribución Fisher-Tippett, Tipo 2 (F-T2)
[314], [315] y [325]
- Distribución Fisher-Tippett, Tipo 3 (F-T3)
[311], [314], [315] y [325]
- Weibull
[311], [314] y [325]
- Exponencial [312]
- Generalizada Pareto [313].

La distribución Generalizada Pareto, F-T1 y exponencial son distribuciones de dos parámetro. F-T2 y F-T3 se describen por tres parámetros. La función de Weibull puede ser descrita por dos o tres parámetros. α es el parámetro de posición y el valor restrictivo de la distribución. β es el parámetro de escala y define la extensión de la distribución. γ es el parámetro de forma y describe la asimetría de la distribución.

5.3.3 Análisis de valores extremos de precipitación en las estaciones El Tuscolo y Utica

Las series de tiempo de precipitación diaria para las dos estaciones con disponibilidad de datos a largo plazo (El Tuscolo y Utica) fueron utilizadas para derivar la lluvia extrema. Lluvias extremas en 24 horas fueron derivadas ajustando las funciones exponencial, Fisher-Tippett 1, Generalizada y las funciones Pareto,

Weibull-de 2 y 3 parámetros a los máximos de la tormenta, utilizando el método de mínimos cuadrados, el método de momentos y el método de máxima verosimilitud. El mejor ajuste a los datos en las dos estaciones fue proporcionado por las funciones exponencial y Weibull de 3 parámetros, se calculó un valor promedio para cada periodo de retorno a partir de los mejores ajustes. La Figura 5-4 muestra un ejemplo de la función exponencial calculada para la estación El Tuscolo.

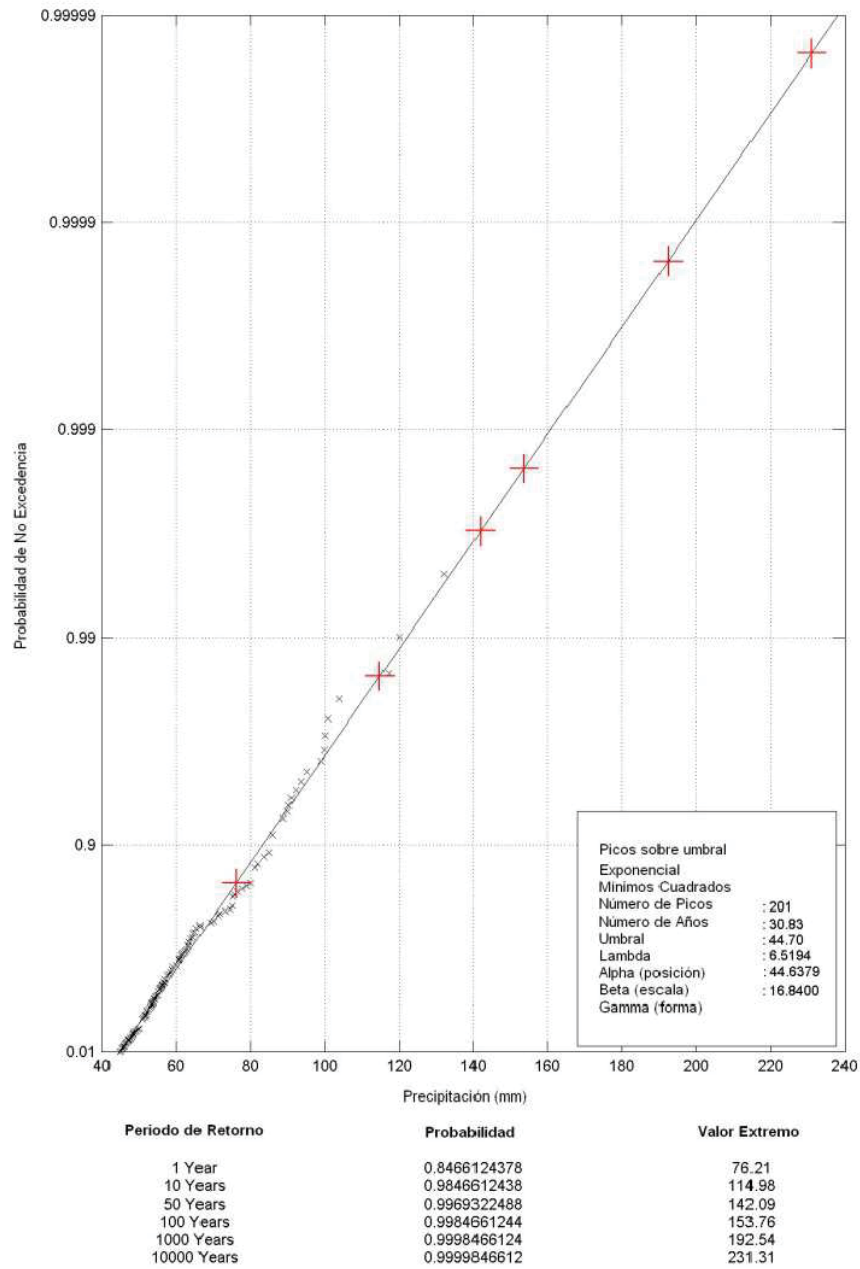


Figura 5-4. Análisis de Picos sobre umbral con Distribución de Probabilidad Exponencial para la estación El Tuscolo

Tabla 5-1. Resumen de los valores extremos de lluvia diaria para cada una de las estaciones analizadas

Estación	Periodo de Retorno[años]
----------	--------------------------

	1	10	50	100	1000	10000
El Tuscolo, ID: 23060140	76.03 mm	116.62 mm	145.59 mm	158.17 mm	200.34 mm	242.97 mm
Utica, ID: 23060190	66.71 mm	97.76 mm	119.20 mm	128.40 mm	158.88 mm	189.27 mm

5.4 La Niña 2010-2011

El Centro de Predicción del Clima (CPC, por sus siglas en inglés) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en Inglés) de los Estados Unidos de América, ha definido un índice denominado Índice Oceánico Niño (ONI, por sus siglas en inglés) para monitorear, evaluar y predecir El Niño / Oscilación del Sur (ENOS) [317]. El ONI se basa en anomalías de la temperatura superficial del mar (TSM) a partir de un promedio centrado en un periodo base de 30 años, que se actualiza cada 5 años, este valor se calcula en una región en el Pacífico Ecuatorial llamada región Niño 3.4 (5 °N-5 °S, 120 °W-170 °W), como se muestra en la Figura 5-5.

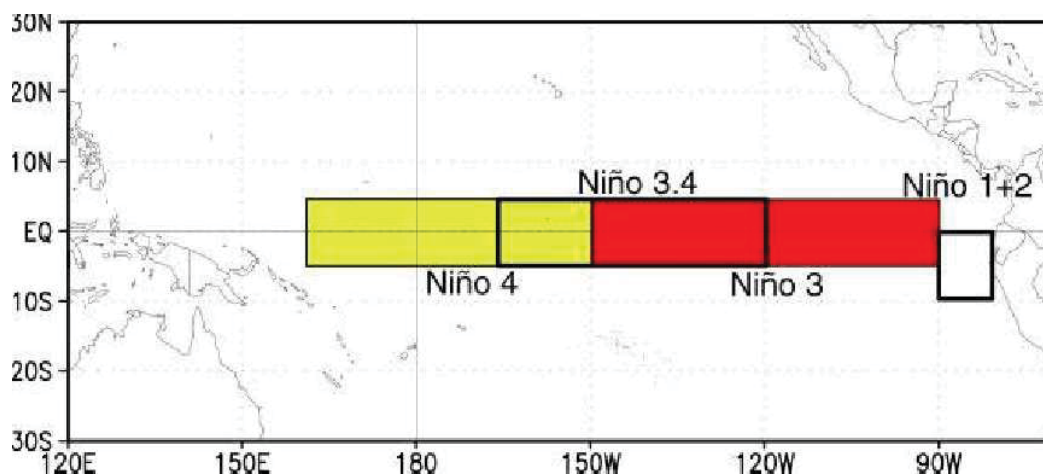


Figura 5-5. Regiones Niño en Pacífico Ecuatorial, según el CPC de la NOAA

Las definiciones operativas que utiliza el CPC de la NOAA están ligadas al ONI:

- El Niño: caracterizado por un ONI positivo mayor o igual a +0.5 °C
- La Niña: caracterizada por un ONI negativo menor o igual a -0.5 °C

Por estándares históricos, para que un episodio sea plenamente clasificado como El Niño o La Niña, se deben sobrepasar estos umbrales durante un período de al menos 5 temporadas consecutivas de promedios corridos de 3 meses.

Está muy bien documentado por el CPC, que el efecto de La Niña es acompañado por patrones de lluvias tropicales desde Indonesia hasta la costa occidente de Sudamérica, una distancia que cubre aproximadamente medio camino alrededor del mundo. Estos cambios en la precipitación tropical afectan los patrones climáticos en todo el mundo.

En Colombia, los boletines del IDEAM [218] para el monitoreo de eventos del Niño y La Niña siguen la convención del CPC para el monitoreo de ENOS, La Figura 5-6 muestra la evolución del ONI y de las anomalías de TSM en la región Niño 3.4 desde 1981 hasta el 2012, de acuerdo con el CPC de la NOAA. Eventos de El Niño son representados por una línea roja en la serie de tiempo; Eventos de La Niña están representados por la línea azul, la condición Neutra se representa con una línea negra.

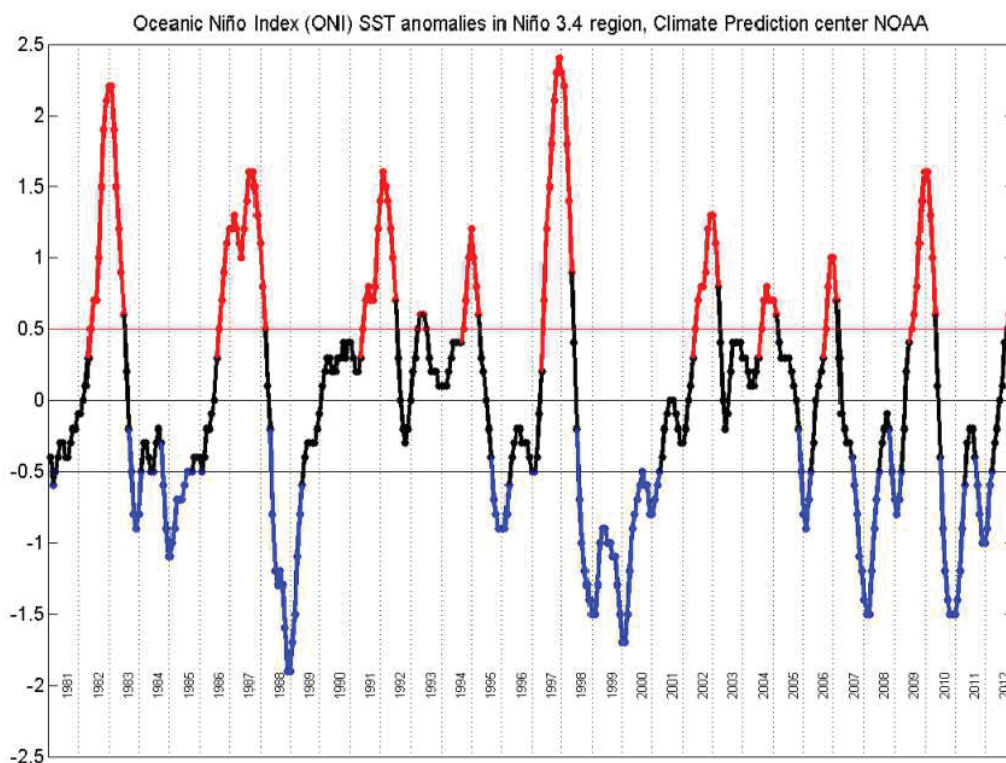


Figura 5-6. Índice Oceánico Niño (ONI) entre 1981 y 2012

Al revisar los valores de ONI en el caso de La Niña 2010-2011, el evento no parece ser el más intenso durante los últimos 30 años, de hecho, aparece más

bien como un evento de tamaño mediano. Sin embargo, la revisión de un índice diferente, como el Índice Multivariado ENOS (MEI, por sus siglas en inglés) refleja un resultado diferente. El MEI según Wolter y Timlin [316], se muestra en la Figura 5-7 para el periodo 1950-2013. Según el MEI La Niña 2010-2011 no sólo aparece como el evento más intenso de los últimos 31 años, sino también como uno de los más pronunciados desde 1950, cercano a los eventos de 1954-1956 y 1973-1975

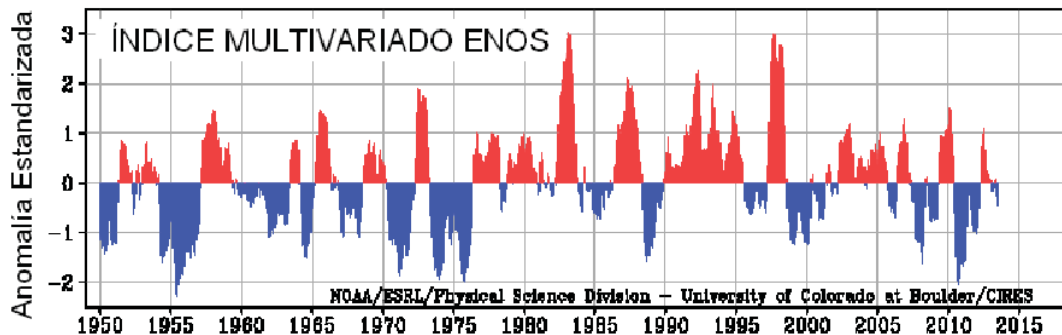


Figura 5-7. Índice Multivariado ENOS (MEI), entre 1950 y 2013

El Índice Multivariado ENOS (MEI) se basa en seis diferentes variables (presión al nivel de mar, componentes zonal (u) y meridional (v) del viento en superficie, temperatura superficial del mar, temperatura superficial del aire y fracción total de cobertura nubosa del cielo). El MEI se calcula por separado para cada uno de los doce temporadas bimensuales (Dic/Ene, Ene/Feb,..., Nov/Dic). Al revisar la evolución del MEI para los siete eventos de La Niña más intensos desde 1949 según Wolter y Timlin (1993, 1998) en la Figura 5-8 el valor bimensual para Ago-Sep de 2010 se ubica como el número 1, los valores bimensuales para Jul-Ago y Sep-Oct de 2010 clasifican como número 2 y sucede lo mismo para Dic-Ene y Ene-Feb de 2011.

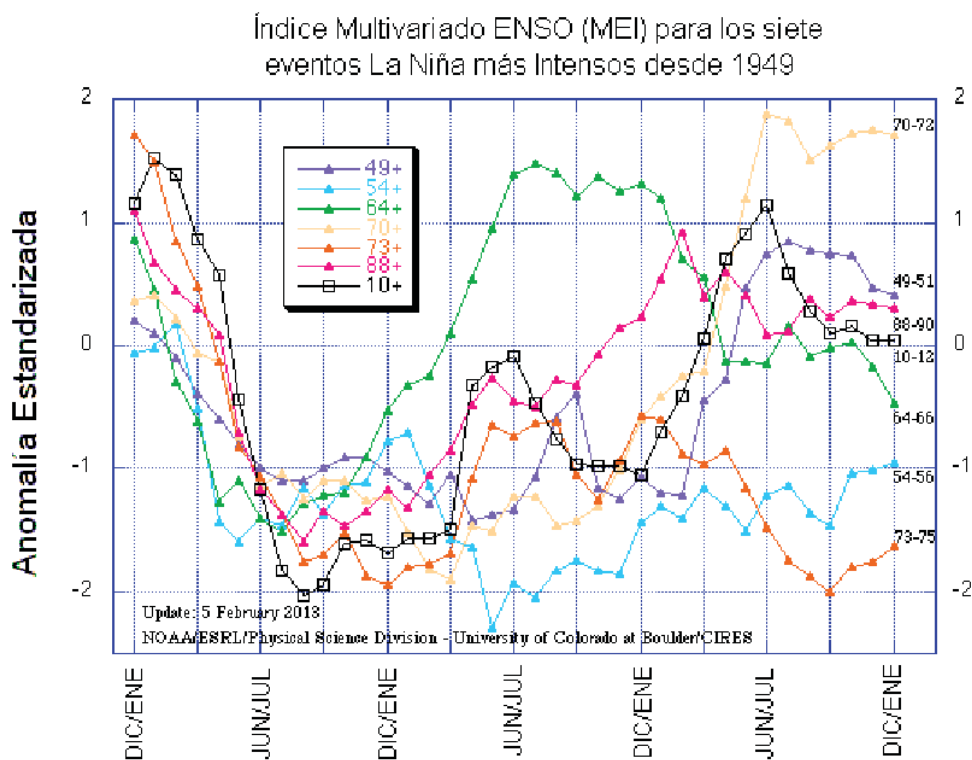


Figura 5-8. Índice Multivariado ENOS (MEI), los siete eventos más intensos desde 1949

El IDEAM también ha documentado los efectos de La Niña sobre el clima de Colombia. Consulte el boletín de información sobre la vigilancia de los fenómenos El Niño y La Niña, IDEAM-2010 [218]. La Figura 5-9 muestra un mapa con las alteraciones más probables en el patrón de precipitación en Colombia, frente a la presencia de un evento “típico” de La Niña. Como se destaca con el círculo rojo en el mapa, el departamento de Cundinamarca muestra probabilidad de lluvia en exceso ligero (entre 120 y 160%) durante eventos La Niña.

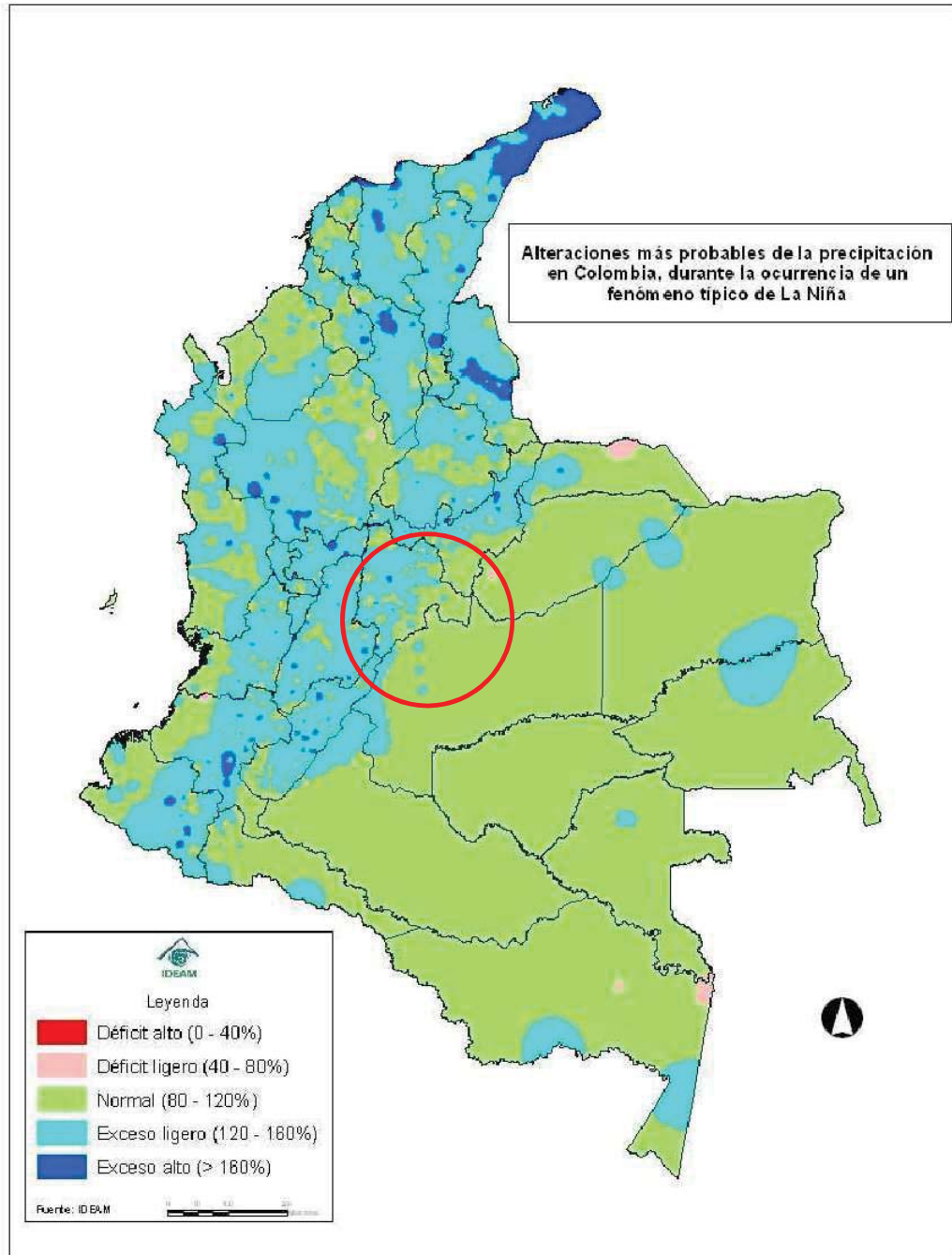


Figura 5-9. Alteraciones más probables de la precipitación en Colombia durante la ocurrencia de un evento típico de La Niña.

En la Figura 5-10 se muestra la lluvia total anual medida en la estación El Tuscolo desde 1982 hasta 2012; el año 2010 se muestra en color magenta, el año 2011 en color rojo, el valor promedio para el período analizado y, valor medio más y menos la desviación estándar se muestran con líneas punteadas color azul.

Al analizar este periodo de 31 años de datos históricos encontramos que 2011 muestra el máximo valor anual acumulado (2,036.90 mm/año). Es importante destacar que durante el período analizado, los años 2010 y 2011 son el único caso de dos años consecutivos con precipitaciones por encima del valor promedio más una desviación estándar.

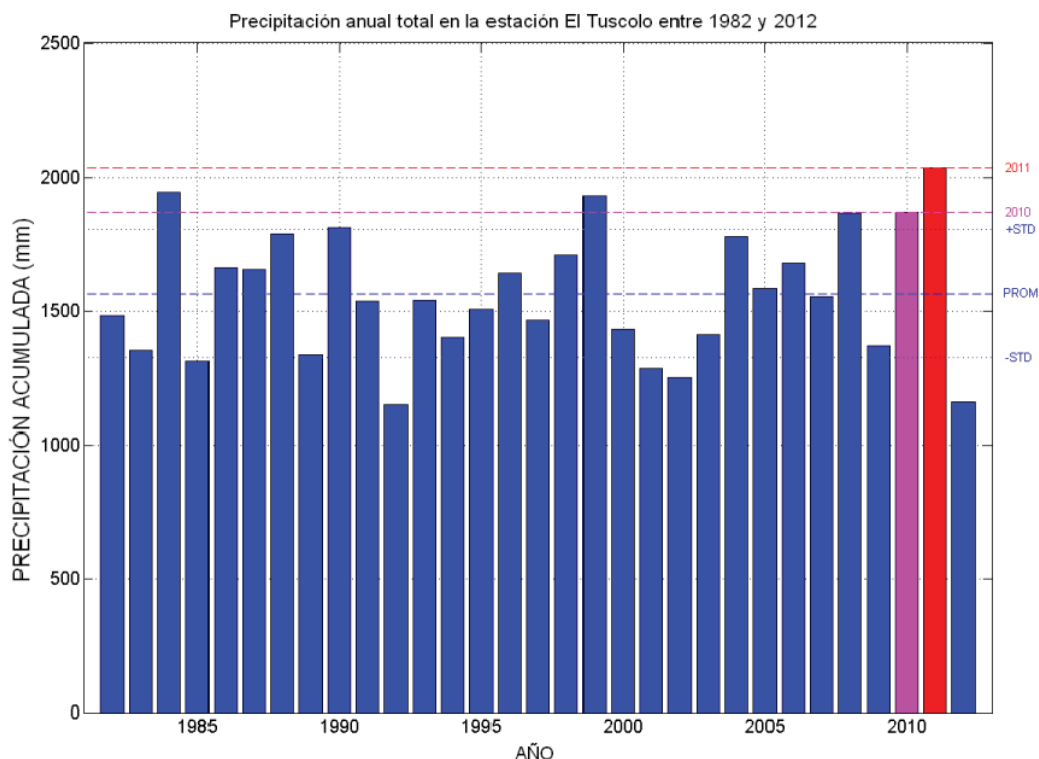


Figura 5-10. Lluvia total anual según mediciones de la estación El Tuscolo entre 1982 y 2012

Al analizar los datos mensuales de 2010 y 2011, la evolución de la lluvia comparada con los valores promedio (Figura 5-11), se puede observar que, incluso cuando los valores del ONI son aún positivos, la tendencia es a decrecer rápidamente. El primer pico de precipitación se registró en Abril de 2010 con un

valor acumulado de 362.20 mm/mes (el segundo valor más alto registrado para el mes de Abril durante el período analizado de 31 años).

Durante Mayo de 2010 el valor del ONI ya era negativo (fase fría de ENOS establecida) y otro pico de precipitación se registró con el máximo valor (276 mm/mes) registrado para Mayo durante el período analizado. Durante Junio de 2010 la precipitación fue por encima del valor medio y el valor más alto de precipitación acumulada en 24-horas registrado durante Junio (51,1 mm) ocurrió el 04 de Junio de 2010. Durante 2010 se registró el mayor valor de lluvia acumulada (180,70 mm) para Junio. Además, el mayor número de días (13) con lluvia durante el mes de Julio fue también registrado durante 2010.

Es importante resaltar que típicamente Julio tiene los valores mínimos de lluvia durante el ciclo anual. Agosto y Septiembre de 2010 presentan una cantidad de lluvia muy cercana a los valores habituales; Octubre de 2010 presentó un valor por debajo del valor promedio, pero después Noviembre y Diciembre presentan nuevamente valores por encima del valor promedio.

Durante 2011, Enero presentó un valor muy cercano al valor promedio, posteriormente, Febrero, Marzo y Abril presentaron valores por encima del valor promedio, con un valor especialmente alto para Abril que representó el valor más alto de precipitación acumulada en un mes (491 mm/mes) y también el mayor número de días con lluvia (24) en todo el periodo analizado. Mayo de 2011 presentó un valor por debajo del valor promedio, Junio un valor por encima del valor promedio, Julio un valor muy cercano al valor promedio. Agosto, Septiembre y Octubre presentaron valores por debajo del valor promedio, esto probablemente relacionado con una fluctuación en los valores del ONI, posteriormente otra vez Noviembre de 2011 presentó el mayor valor de lluvia acumulada (464,30 mm) y también el mayor número de días con lluvia (23) para ese mes.

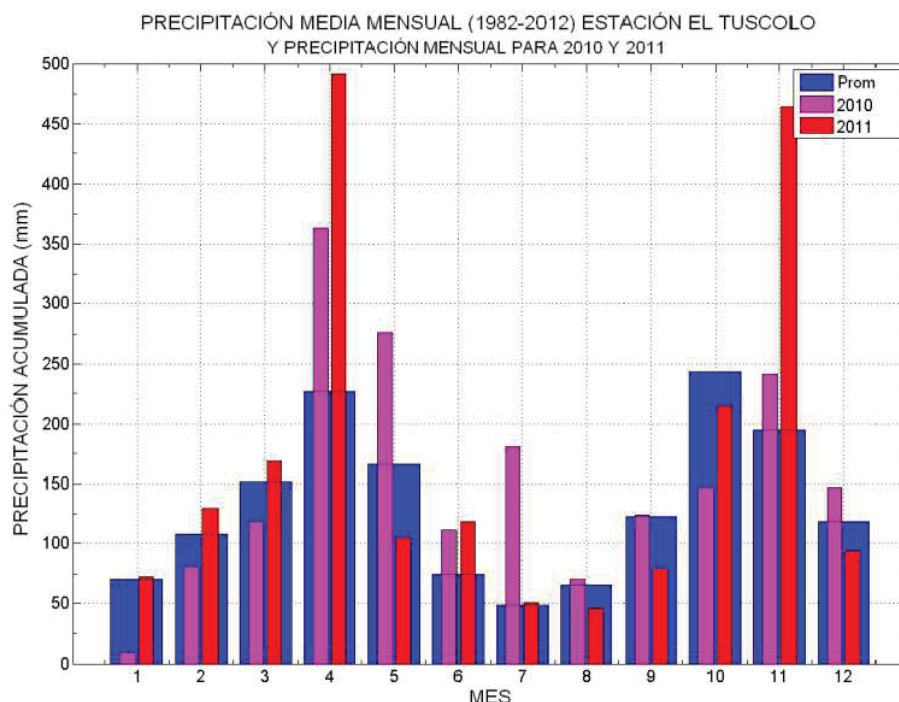


Figura 5-11. Precipitación Mensual promedio (1982-2012) (barras azules), lluvia acumulada mensual para 2010 y 2011 en la estación El Tuscolo (barras magenta y rojas, respectivamente).

5.5 Resumen

Como se comentó en este capítulo, hay sólo dos estaciones pluviométricas con datos a largo plazo alrededor del trazado del Tramo 1. Esas estaciones muestran que la distribución promedio de largo plazo de la lluvia en la región es bimodal, con el primer pico durante abril y mayo, con valores típicos que representan el 25% de la lluvia total del año y el segundo pico durante octubre y noviembre, con valores típicos de 27% de la lluvia total del año, siendo julio el mes menos húmedo durante el año, con valores típicos de alrededor del 3% de la precipitación total anual. La lluvia anual total en la zona es del orden de 1,500 mm/año.

Según el Índice Multivariado ENOS, el evento de La Niña 2010-2011 se extiende desde mayo-junio-2010 hasta febrero-marzo-2012 y es catalogada como una de las más pronunciadas desde 1950, alcanzando su pico máximo durante la temporada bimensual de agosto-septiembre 2010. El IDEAM ha documentado que el impacto más probable de los eventos de La Niña en la lluvia de la zona de estudio es mostrar exceso ligero (entre 120 y 160%).

El análisis de los datos de lluvia muestra que 2011 fue el año más lluvioso en los treinta y un años del registro (en El Tuscolo) mostrando un exceso de 130%; 2010 fue el año en quinto lugar más húmedo del registro mostrando un exceso de 119%. Estos años consecutivos muy húmedos son significativos en cuanto a las inundaciones catastróficas que se han documentado, particularmente en el norte de Colombia.

En el área del proyecto, al inicio de 2010 se presentaron meses con lluvias significativamente altas desde abril a junio, pero proviniendo de un año relativamente seco (2009), con precipitaciones por debajo de la media, por lo que se puede asumir que existía una baja probabilidad de saturación del suelo. De agosto a octubre los valores de lluvia fueron por debajo de la media. Posteriormente, se presentó un periodo de 5 meses húmedos, antes de abril de 2011, mes en el cual se registró el valor mensual más extremo (491 mm/mes) de todo el periodo analizado, además de que el mes de abril de 2011 tiene también el récord de más días con lluvia (24) durante un mes y también el récord en número de días consecutivos con lluvia (20) en todo el período analizado. El exceso a nivel mensual es del 216%, pero ninguno de los valores diarios individuales supera el umbral para el periodo de retorno de 1 año (76 mm) calculado en el análisis de valores extremos. De modo que, abril de 2011 muestra una combinación de un periodo previo de alta humedad (durante 5 meses) y un evento extremo de lluvia mensual acumulada, que fue crítico para el área de estudio y que es parte de los efectos del evento La Niña 2010-2011.