5.1.7.3 Usuarios aprobados por CORANTIOQUIA

A continuación se listan las autorizaciones otorgadas por CORANTIOQUIA en las veredas que forman parte del área de influencia del proyecto vial, de acuerdo con los reportes entregados por la autoridad.

5.1.7.3.1 Concesiones zona de interés del río Aburrá

En la Tabla 5-81 se presenta la información de concesiones otorgadas en la cuenca del río Aburrá para las veredas La Cuchilla y Naranjal pertenecientes al corregimiento San Cristóbal del municipio de Medellín, las cuales serán las únicas cruzadas por el proyecto en esta cuenca. La información presentada corresponde al reporte generado por CORANTIOQUIA en agosto de 2015; se aclara que el reporte entregado por la entidad no incluye el nombre de la corriente ni las coordenadas de localización, sin embargo, se presentan todas las concesiones reportadas para las veredas de interés, teniendo en cuenta que la totalidad del territorio pertenece a la cuenca del río Aburrá.

Tabla 5-81. Concesiones otorgadas en la cuenca del río Aburrá

Solicitante	Total Caudal	Vereda	Uso
Lilia Eugenia Cano Urrego	0,005	La Cuchilla	Doméstico
Jorge Albeiro Vásquez Cano	0,005	La Cuchilla	Agrícola
Jorge Albeiro Vásquez Cano	0,005	La Cuchilla	Doméstico
Jorge Albeiro Vásquez Cano	0,005	La Cuchilla	Agrícola
Lilia Eugenia Cano Urrego	0,005	La Cuchilla	Agrícola
Lilia Eugenia Cano Urrego	0,005	La Cuchilla	Doméstico
Jorge Mario Correa Vásquez	0,08	La Cuchilla	Pecuario
Julio Eduardo Gómez Isaza	0,01	La Cuchilla	Agrícola
Jorge Mario Correa Vásquez	1,74	La Cuchilla	Agrícola
José Arturo Velásquez Velásquez	0,01	La Cuchilla	Agrícola
Isidro De Jesús Restrepo Ortiz	0,03	La Cuchilla	Agrícola
Isidro De Jesús Restrepo Ortiz	0,001	La Cuchilla	Pecuario
Rogelio De Jesús Cano Restrepo	0,0127	La Cuchilla	Doméstico
Rogelio De Jesús Cano Restrepo	0,02	La Cuchilla	Agrícola
Luis Enrique Muñoz Ortiz	0,0061	La Cuchilla	Doméstico
Luis Enrique Muñoz Ortiz	0,2046	La Cuchilla	Agrícola
Luis Enrique Muñoz Ortiz	0,0037	La Cuchilla	Doméstico
Gabriela De Las Mercedes Cardona	0,0024	Naranjal	Pecuario
Gabriela De Las Mercedes Cardona	0,0314	Naranjal	Agrícola
Gabriela De Las Mercedes Cardona	0,0002	Naranjal	Pecuario
Blanca Nubia Cano De Vásquez	0,04	La Cuchilla	Agrícola

Solicitante	Total Caudal	Vereda	Uso
Víctor De Jesús Cano Correa	0,165	Naranjal	Agrícola
José Abigail Ortiz Correa	0,04	Naranjal	Agrícola
José Elías Ortiz Velásquez	0,012	Naranjal	Agrícola
Rubén Darío Ortiz Velásquez	0,03	Naranjal	Agrícola
Francisco Javier Ortiz Velásquez	0,008	Naranjal	Agrícola
Rogelio De Jesús Ortiz Velásquez	0,03	Naranjal	Agrícola
Bertha Ligia Velásquez Ortiz	0,0061	Naranjal	Doméstico
Bertha Ligia Velásquez Ortiz	0,0044	Naranjal	Agrícola
Bertha Ligia Velásquez Ortiz	0,0139	Naranjal	Doméstico
Leandro De Jesús Ortiz Velásquez	0,0044	Naranjal	Agrícola
Rodrigo De Jesús Velásquez Celis	0,0041	Naranjal	Doméstico
Rodrigo De Jesús Velásquez Celis	0,0028	Naranjal	Doméstico
Rodrigo De Jesús Velásquez Celis	0,0044	Naranjal	Agrícola
Leandro De Jesús Ortiz Velásquez	0,0056	Naranjal	Doméstico
Leandro De Jesús Ortiz Velásquez	0,0028	Naranjal	Doméstico
Beatriz Elena Cano Cardona	0,033	Naranjal	Agrícola
Jorge Nilton Cano Cardona	0,033	Naranjal	Agrícola
José Abel Cardona Velásquez	0,132	Naranjal	Agrícola
María Cristina Uribe De Cano	0,008449	Naranjal	Pecuario
María Cristina Uribe De Cano	0,008101	Naranjal	Doméstico
María Cristina Uribe De Cano	0,05	Naranjal	Agrícola
Manuel Salvador Cano Correa	0,05	Naranjal	Agrícola
Manuel Salvador Cano Correa	0,0122	Naranjal	Doméstico
Pablo Emilio Restrepo	0,0039	La Cuchilla	Doméstico
José Romilio Correa	0,0039	La Cuchilla	Doméstico
Pablo Emilio Celis	0,0039	La Cuchilla	Doméstico
Javier Muñoz	0,0039	La Cuchilla	Doméstico
Yolima Del Carmen Pérez	0,0039	La Cuchilla	Doméstico
Aura Delia Muñoz	0,0039	La Cuchilla	Doméstico

Fuente: CORANTIOQUIA, reporte a agosto de 2015. Consultoría Colombia S.A.

Del anterior reporte se destaca que existen 26 concesiones otorgadas en la vereda Naranjal de las cuales ocho son para uso doméstico, quince son para uso agrícola y tres son para uso pecuario, en el caso de la vereda La Cuchilla se tiene un total de 24 concesiones de las cuales doce son para uso doméstico, diez para uso agrícola y dos para uso pecuario.

5.1.7.3.2 Vertimientos zona de interés del río Aburrá

En cuanto al uso de la cuenca para el manejo y disposición de vertimientos, de acuerdo al reporte de la corporación a agosto de 2015 se tenían 24 permisos otorgados (18 para la vereda La Cuchilla y 6 para Naranjal) todos para vertimientos de tipo doméstico.

Tabla 5-82. Permisos de vertimientos otorgados en la cuenca del río Aburrá

Solicitante	Caudal	Vereda	Actividad
Luis Enrique Muñoz Ortiz	0,00758	La Cuchilla	Doméstico
Gabriela de las Mercedes Cardona	0,0137	Naranjal	Doméstico
Gabriela de las Mercedes Cardona	0,0137	Naranjal	Doméstico
Gabriela de las Mercedes Cardona	0,0137	Naranjal	Doméstico
Pablo Emilio Cano	0,0044	La Cuchilla	Doméstico
Pablo Emilio Cano	0,0044	La Cuchilla	Doméstico
Pablo Emilio Cano	0,0044	La Cuchilla	Doméstico
María Edilma Muñoz	0,0044	La Cuchilla	Doméstico
María Edilma Muñoz	0,0044	La Cuchilla	Doméstico
María Edilma Muñoz	0,0044	La Cuchilla	Doméstico
Olga Vásquez	0,0044	La Cuchilla	Doméstico
Olga Vásquez	0,0044	La Cuchilla	Doméstico
Olga Vásquez	0,0044	La Cuchilla	Doméstico
Adriana María Correa	0,0044	La Cuchilla	Doméstico
Adriana María Correa	0,0044	La Cuchilla	Doméstico
Adriana María Correa	0,0044	La Cuchilla	Doméstico
Dora del Socorro Ortiz	0,0103	La Cuchilla	Doméstico
Dora del Socorro Ortiz	0,0103	La Cuchilla	Doméstico
Dora del Socorro Ortiz	0,0103	La Cuchilla	Doméstico
Mary Isabel Álvarez Correa	0,0043	Naranjal	Doméstico
Mary Isabel Álvarez Correa	0,0043	Naranjal	Doméstico
Blanca Margarita Ortiz Cano	0,0044	La Cuchilla	Doméstico
Blanca Margarita Ortiz Cano	0,0044	La Cuchilla	Doméstico
Germán Alberto Vásquez Marín	0,0029	Naranjal	Doméstico

Fuente: CORANTIOQUIA, reporte a agosto de 2015. Consultoría Colombia S.A.

5.1.7.3.3 Concesiones zona de interés cuenca Quebrada La Seca y La Sucia

De acuerdo con información suministrada por CORANTIOQUIA en Julio de 2016, se identifican 76 concesiones otorgadas por la territorial hevéxicos para las corrientes que conforman la cuenca de las quebradas La Clara, La Sucia y la Seca las cuales se listan a continuación, es de mencionar que como parte de los reportes entregados por la corporación no se incluye el uso autorizado.

Tabla 5-83. Concesiones otorgadas en la cuenca de las quebradas La Seca – La Sucia

Solicitante	Total caudal	Municipio	Vereda	Fuente	Coordenadas	
					x	y
Rosa Nelly Garcia Silva	0,048	San Jerónimo	Matasano	El Pino	11434301	11955591
Regional De Occidente S.A E.S.P	29,47	San Jerónimo		La Muñoz (San Jerónimo)	11434301	11955591
Junta De Acción Comunal Vereda El Mestizo	0,663	San Jerónimo	Mestizo	Los Naranjos	11434301	11955591
Octavio Arcesio Orrego Piedrahita	0,042	San Jerónimo	Loma Hermosa	El Zapote	11434301	11955591
Hernando De Jesús Díaz Bastidas	0,3	San Jerónimo	Piedra Negra	La Rochela	11434301	11955591
Jose Rodrigo De Jesus Echavarría Ochoa	0,028	San Jerónimo	Tafetanes	Aguacatillo	11434301	11955591
Junta De Accion Comunal Vereda Alto Colorado	3,8	San Jerónimo	Alto Colorado	La Clara	11434301	11955591
J.A.C Vereda Alto Colorado - Sector El Cedral	3,78	San Jerónimo	Alto Colorado	La Clara	11434301	11955591
Gloria Ester Peña Jimenez	0,54	San Jerónimo	El Mestizo	Piedra Lisa	11434301	11955591
Junta De Acción Comunal El Calvario	7,86	San Jerónimo	El Calvario	La Muñoz (San Jerónimo)	11434301	11955591
Omar De Jesús Tabares García	0,187	San Jerónimo	El Chocho	Cañon Bravo	11434301	11955591
Martha Cecilia Colorado Zapata	0,059	San Jerónimo	Loma Hermosa	Sin Nombre	11434301	11955591
Oscar Mario Montoya Palacio	0,037	San Jerónimo	Llanos De San Juan	La Cascada	11434301	11955591
Jorge Arango Arredondo	0,045	San Jerónimo	El Berrial	Aguas Negras	11434301	11955591
María Ines Ríos De Muñoz	0,278	San Jerónimo	La Ciénaga	Los Arenales	11434301	11955591
Carlos Eduardo Escobar Uribe	0,056	San Jerónimo	Quimbayo	Los Arados	11434301	11955591
Jose Asael Henao Ortiz	0,5	San Jerónimo	El Berrial	Sin Nombre	11434301	11955591
Luz Estella Gallego Múnera	0,033	San Jerónimo	Los Cedros	Potrerito	11434301	11955591
Junta De Accion Comunal Vereda Tafetanes	11,433	San Jerónimo	Tafetanes	Aurrá	11434301	11955591
El Tesoro Hotel Y Centro De Convenciones S.A.	8,5	San Jerónimo		La Muñoz (San Jerónimo)	11434301	11955591

Solicitante	Total caudal	Municipio	Vereda	Fuente	Coordenadas	
					x	y
Diabonos S.A.	10,729	San Jerónimo		La Muñoz (San Jerónimo)	11434301	11955591
Nazareth Acevedo De Cañas	0,0411	San Jerónimo	La Ciénaga	La Aguada	11434301	11955591
Miguel Alfonso Escobar Escobar	0,474	San Jerónimo	Loma Hermosa	La Espada	11434301	11955591
Elsy De Jesus Londoño Parra	5,023	San Jerónimo	Llano Arriba	La Muñoz (San Jerónimo)	11434301	11955591
Lisandro Antonio Giraldo Suarez	3,18	San Jerónimo	Alto Colorado	La Clara	11434301	11955591
Jaime Stiven Jiménez Espinal	0,3	San Jerónimo	Loma Hermosa	La Espada	11434301	11955591
Corporacion Veredal Llanos De San Juan	7,35	San Jerónimo	El Pomar	El Guaico	11434301	11955591
Marta Cecilia Ramiez Patiño	0,394	San Jerónimo	Loma Hermosa	La Espada	11434301	11955591
Asociación De Suscriptores O Usuarios Del Acueducto De La Vereda Estancias	3,324	San Jerónimo	Las Estancias	El Guaico	11434301	11955591
Gustavo Alvarez Lopera	1,659	San Jerónimo	Llanos De San Juan	Aguamala (Acequia)	11434301	11955591
Sara María Escobar Rojas	4,3908	San Jerónimo	Llano Arriba	La Muñoz (San Jerónimo)	11434301	11955591
Julián Escudero Bastidas	0,5	San Jerónimo	Quimbayo	La Guineala	11434301	11955591
María Eugenia Gómez Pineda	2	San Jerónimo	El Rincón	Aurrá	11434301	11955591
Luz Dary Alvarez	0,677	San Jerónimo	El Pomar	La Cañada	11434301	11955591
Junta De Accion Comunal Vereda Buenos Aires Parte Baja	2	San Jerónimo	Buenos Aires	La Ramiréz	11434301	11955591
Hector Alonso Perez Alvarez	0,3	San Jerónimo	Pie De Cuasta	La Alarcona	11434301	11955591
María Luisa Aguirre Virgen	8	Ebéjico	El Socorro	Juan Ramos	11461807	11914227
Jose Miguel Toro Villegas	2,546	San Jerónimo	Llano Arriba	La Muñoz (San Jerónimo)	11434301	11955591
Fabio De Jesús Echavarría Muñoz	1,1801	Ebéjico		Cañada La Guinea	11434288	11846840
Edilberto De Jesús Gómez Arango	0,323054	Ebéjico	Filo De San José	Nacimiento Matilde Caro	11451964	11935687

Solicitante	Total caudal	Municipio	Vereda	Fuente	Coordenadas	
					x	y
José Elías Restrepo Salazar	0,302858	Ebéjico	Quirimará Placitas	Sin Nombre	11423135	11919003
Gleny De Jesús Acosta Ramírez	0,216447	Ebéjico	Campo Alegre	Cabañita 2	11452354	11923651
Asociacion De Usuarios Del Acueducto De La Vereda El Socorro	4,624373	Ebéjico	El Socorro	Miraflores	11465469	11901550
Junta De Acción Comunal Fátima Socorro	4,624373	Ebéjico	Fátima	Miraflores	11465469	11901550
Matilde De Jesús Caro De Hernández	0,06656	Ebéjico	Filo De San José	El Mestizo	11451954	11937357
Asoc. De Usuarios Del Acueducto Multiveredal Las Nieves E.S.	8,974895	Ebéjico		La Clara	11487152	11853511
Patricia Patiño Zapata	8,432222	San Jerónimo	Montefrio	Yarumalito	11435313	11998290
Francisco Jimenez Talavera	0,75	Ebéjico	Santander	El Volcán	11473066	11917442
Junta De Accion Comunal Vereda Santander	2,275183	Ebéjico	Santander	Canoita	11488497	11918790
Luis Fernando Castrillon Velasquez	1,5	Ebéjico	Holanda	Juan Ramos	11453234	11918267
Esneda Londoño Ruiz	2,996109	Ebéjico		Mata De Guadua	11443958	11971375
Junta De Acción Comunal Vereda Llano De Santa Barbara	0,270947	Ebéjico	Llanos De Santa Barbara	Versalles	11432543	11891342
Oscar Cataño Higuita	0,038499	Ebéjico	Holanda	Nacimiento Sin Nombre (Predio La Cruz)	11450910	11922613
Cooperativa Multiactiva De Expendedores De Carne Del Municipio De Ebejico	0,291955	Ebéjico	Holanda	Miraflores	11465469	11901550
Agropecuaria Los Molinos S.A.S	3,576149	Ebéjico	La Aguada	Alticos	11503090	11856952
Pedro Luis Alvarez Muñoz	0,078703	San Jerónimo	Loma Hermosa	La Zoila	11472331	12009595
Diego Obed Giraldo Yepez	1,631869	San Jerónimo	Llanos De San Juan	Quebrada La Sanjuana	11434301	11955591
José Reinaldo Bastidas Bastidas	0,431047	San Jerónimo	Pesquinal	Sin Nombre (La Italia)	11486512	11991920

Solicitante	Total caudal	Municipio	Vereda	Fuente	Coordenadas	
					x	y
Inversiones Edmec Ltda.	1,846887	San Jerónimo	Tafetanes	Los Pomos	11465114	12033079
John Jairo Antonio Puerta Agudelo	0,043	San Jerónimo	Loma Hermosa	La Tinajita	11434301	11955611
Martha Lilia Gallego Lopez	0,5195	San Jerónimo	Loma Hermosa	Los Pomos	11434301	11955591
Mauricio Fernandez Laverde	0,1181	San Jerónimo	Loma Hermosa	La Quebradita	11465902	12023235
Orlando De Jesus Gonzalez Gomez	0,6014	San Jerónimo	El Calvario	La Muñoz (San Jerónimo)	11434301	11955591
Juan Bautista Sanchez Sierra	0,3416	San Jerónimo	Piedra Negra	La Cristalina	11498250	11973151
Medardo Antonio Rodriguez Pulgarin	0,0141	San Jerónimo	Loma Hermosa	Los Pomos	11463696	12031161
Ana De Jesus Maya Restrepo	0,0226	Ebéjico	Comunidad	Quiebrabarrigo	11461861	11882152
Agropecuaria El Pomar O.R.G S.A.S	0,1145	Ebéjico	Comunidad	Las Minitas	11475786	11884472
Asociacion De Productores Agropecuarios De La Vereda Matasano	18,425	San Jerónimo	Matasano	Yarumalito	11435513	11958758
Ciudadela Del Sol	0,99	San Jerónimo		La Muñoz (San Jerónimo)	11434301	11955591
Ciudadela Del Sol Premium P.H.	0,99	San Jerónimo		La Muñoz (San Jerónimo)	11434301	11955591
Fabiola De Jesus Munera Marin	0,1178	San Jerónimo	Loma Hermosa	El Mestizo	11486521	11992090
Jose Santiago Valencia Prieto	0,0081	San Jerónimo	Loma Hermosa	La Tinajita	11465300	12023652
Asociacion De Usuarios Del Acueducto Aguas De Poleal	0,3183	San Jerónimo	Poleal	La Arias	11434301	11955591
Inversiones Edmec Ltda.	0,7548	San Jerónimo	Tafetanes	Los Pomos	11465114	12033079
Jac Vereda La Palma Cgto San Juan	1,924	San Jerónimo	La Palma	Santuario	11434301	11955591
Catalina Giraldo Marroquin	1,803	San Jerónimo	Llanos De San Juan	La Aguamala	11434301	11955591

Fuente: CORANTIOQUIA 2016. Consultoría Colombia S.A.

Para el caso de las concesiones otorgadas en el municipio de Medellín se consultó el reporte de CORANTIOQUIA de agosto de 2015, se destaca que a diferencia del reporte del 2016, este contiene el uso autorizado. Se incluye el total de reportes de las veredas La

Aldea, La Sucia, La Suiza, La Volcana-Guayabal, Miserengo y Urquita.

Tabla 5-84. Concesiones otorgadas en la cuenca de las quebradas La Clara y La Sucia municipio de Medellín

Solicitante	Corregimiento	Vereda	Uso	Caudal por uso
Junta De Acción Comunal Vereda La Sucia	Palmitas	La Sucia	Doméstico	0,43
Asociación De Acueducto Vda La Aldea	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Pecuario	0,025347
Asociación De Acueducto Vda La Aldea	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,275462
Asociación De Acueducto Vda La Aldea	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Agrícola	0,3
Flor Marina Pulgarin Ospina	Palmitas	La Volcana	Agrícola	0,0032
Flor Marina Pulgarin Ospina	Palmitas	La Volcana	Doméstico	0,0104
Flor Marina Pulgarin Ospina	Palmitas	La Volcana	Pecuario	0,0018
Flor Marina Pulgarin Ospina	Palmitas	La Volcana	Agrícola	0,0032
Flor Marina Pulgarin Ospina	Palmitas	La Volcana	Pecuario	0,0018
Ramiro De Jesús Álvarez	Palmitas	La Volcana	Doméstico	0,0104
Manuel José Bastidas Ospina	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Agrícola	0,02
Saulo De Jesús Ortiz Montoya	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Agrícola	0,02
Saulo De Jesús Ortiz Montoya	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,008101
Rubén Arturo Restrepo Montoya	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Agrícola	0,02
Wilmar De Jesús Bastidas Álvarez	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,008101
Héctor Manuel Bastidas Álvarez	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,008101
Rubén Arturo Restrepo Montoya	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,008101
Manuel José Bastidas Ospina	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,012152
María Blanca Nury Galeano Galeano	Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,012152
María Blanca Nury Galeano Galeano	Palmitas	La Aldea	Agrícola	0,011
Marco Tulio Álvarez Álvarez	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,008101
Marco Tulio Álvarez Álvarez	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,001851
Marco Tulio Álvarez Álvarez	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Agrícola	0,023148
Marco Tulio Álvarez Álvarez	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Pecuario	0,003472

Solicitante	Corregimiento	Vereda	Uso	Caudal por uso
Jesús Oscar Acevedo Maya	Palmitas	Urquita	Agrícola	0,0305
Jesús Oscar Acevedo Maya	Palmitas	Urquita	Doméstico	0,0081
Jesús Oscar Acevedo Maya	Palmitas	Urquita	Pecuario	0,0023
José De Jesús Pulgarín Ortiz	Palmitas	Urquita	Doméstico	0,006
Amanda Marín Correa	Palmitas	Urquita	Doméstico	0,010127
José De Jesús Pulgarín Ortiz	Palmitas	Urquita	Agrícola	0,0305
Resfa Nelly Correa De Arroyave	San Sebastián De Palmitas	La Volcana-Guayabal	Agrícola	0,05
Resfa Nelly Correa De Arroyave	San Sebastián De Palmitas	La Volcana-Guayabal	Pecuario	0,003472
Resfa Nelly Correa De Arroyave	San Sebastián De Palmitas	La Volcana-Guayabal	Doméstico	0,020254
Aurelio Galindo Álzate	San Cristóbal	La Volcana	Agrícola	0,33
Aurelio Galindo Álzate	San Cristóbal	La Volcana	Pecuario	0,006
Aurelio Galindo Álzate	San Cristóbal	La Volcana	Industrial	6,6
Aurelio Galindo Álzate	San Cristóbal	La Volcana	Doméstico	0,0506
Hilda Inés Palomeque Padilla	Palmitas	La Aldea	Agrícola	0,033
Hilda Inés Palomeque Padilla	Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,001215
Junta De Acción Comunal Vereda La Suiza	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,048032
Junta De Acción Comunal Vereda La Suiza	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,20052
Junta De Acción Comunal Vereda La Suiza	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Pecuario	0,068437
Junta De Acción Comunal Vereda La Suiza	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Pecuario	0,000061
Junta De Acción Comunal Vereda La Suiza	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Pecuario	0,005324
Luz María Ortiz Álvarez	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,006076
Luz María Ortiz Álvarez	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Agrícola	0,03
Luz María Ortiz Álvarez	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Pecuario	0,001296
María Fanny Ortiz Álvarez	Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,006076
Bernardo Antonio García Moná	Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,00405
Luz Mary Pérez Bastidas	Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,00405
Luis Arturo Ortiz Morales	Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,002025
Luz Adriana García Bastidas	Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,008101
Fredy Alonso Álvarez Muñoz	Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,010127

Solicitante	Corregimiento	Vereda	Uso	Caudal por uso
Jesús María Ospina Franco	Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,010127
Arturo De Jesús Galeano Perez	Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,011574
Flor María Muñoz Cardona	Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,010127
Jorge William Ortiz Álvarez	Palmitas	Urquitá	Pecuario	0,003379
Dora Del Socorro Ortiz Álvarez	Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,008101
Rogelio De Jesús Ortiz Álvarez	Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,010127
Rogelio De Jesús Ortiz Álvarez	Palmitas	Urquitá	Pecuario	0,003009
Blanca Cecilia Ortiz Álvarez	Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,008101
Jorge William Ortiz Álvarez	Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,008101
Blanca Cecilia Ortiz Álvarez	Palmitas	Urquitá	Pecuario	0,002534
Cecilia Corrales Flórez	Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,00405
Marta Lucia Pulgarin Ospina	Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,008101
Aurelio Londoño	Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,010127
Marco Tulio Pulgarin	Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,010127
Luis Oracio Ortiz Morales	Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,011574
Fanny Velásquez De Acevedo	Palmitas	Urquitá	Agrícola	0,0033
Fanny Velásquez De Acevedo	Palmitas	Urquitá	Pecuario	0,007222
Fanny Velásquez De Acevedo	Palmitas	Urquitá	Pecuario	0,007222
Fanny Velásquez De Acevedo	Palmitas	Urquitá	Agrícola	0,0011
Gloria Aguilar	Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0046
María Fanny Ortiz Álvarez	Palmitas	Urquitá	Agrícola	0,05
Gloria Aguilar	Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0122
María Fanny Ortiz Álvarez	Palmitas	Urquitá	Pecuario	0,0014
Paola Marcela Muñoz	Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0061
José Rubiel Pulgarin	Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0081
Adriana Gil Montoya	Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0093
Martha Ofelia Rodríguez	Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0122
José Rubiel Pulgarin	Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0122
José De Jesús Díaz	Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0041
Luz Mary Pérez Bastidas	Palmitas	Urquitá	Agrícola	0,046296
Luis Arturo Ortiz Morales	Palmitas	Urquitá	Pecuario	0,004224
Luz Mary Pérez Bastidas	Palmitas	Urquitá	Pecuario	0,004224
Luz Adriana García Bastidas	Palmitas	Urquitá	Pecuario	0,004224

Solicitante	Corregimiento	Vereda	Uso	Caudal por uso
Bernardo Antonio García Moná	Palmitas	Urquitá	Agrícola	0,046296
Bernardo Antonio García Moná	Palmitas	Urquitá	Pecuario	0,004224
Luis Arturo Ortiz Morales	Palmitas	Urquitá	Agrícola	0,046296
Luz Adriana García Bastidas	Palmitas	Urquitá	Agrícola	0,046296
Nelly María Bastidas	Palmitas	Urquitá	Pecuario	0,004224
Nelly María Bastidas	Palmitas	Urquitá	Agrícola	0,046296
María Nelida Correa De Jaramillo	Palmitas	La Aldea	Agrícola	0,1
María Nelida Correa De Jaramillo	Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,008101
María Nelida Correa De Jaramillo	Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,004629
Jesús Alfonso Gamarra Acosta	Palmitas	La Frisola	Doméstico	0,002025
Jesús Alfonso Gamarra Acosta	Palmitas	La Frisola	Pecuario	0,008449
Jesús Alfonso Gamarra Acosta	Palmitas	La Frisola	Agrícola	0,1
Luz Elena Galeano Cano	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,0344
María Nelida Correa De Jaramillo	Palmitas	La Aldea	Agrícola	0,05
Municipio De Medellín	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	4,107638
Municipio De Medellín	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,394965
Miguel Ángel Restrepo Sierra	Palmitas	Urquita	Pecuario	0,000462
Miguel Ángel Restrepo Sierra	Palmitas	Urquita	Doméstico	0,006076
Isabel Mejía De López	Palmitas	La Volcana	Doméstico	0,010127
Isabel Mejía De López	Palmitas	La Volcana	Agrícola	0,1
Isabel Mejía De López	Palmitas	La Volcana	Pecuario	0,324074
Lorena Del Socorro Galeano Arboleda	Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,010127
Lorena Del Socorro Galeano Arboleda	Palmitas	La Aldea	Agrícola	0,013888
Jhon Jairo Ríos Guerra	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Agrícola	0,1
Jhon Jairo Ríos Guerra	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0081
Jhon Jairo Ríos Guerra	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0017
Agropecuaria Aras S.A.S.	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,0405

Solicitante	Corregimiento	Vereda	Uso	Caudal por uso
Agropecuaria Aras S.A.S.	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,2025
Agropecuaria Aras S.A.S.	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Agrícola	0,0385
Edilberto De Jesús Gómez Arango	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Pecuario	0,0036
Edilberto De Jesús Gómez Arango	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Agrícola	0,122
Asociación Usuarios Acueducto Vdal Urquita	Palmitas	Miserengo	Doméstico	0,7211
Asociación Usuarios Acueducto Vdal Urquita	Palmitas	Miserengo	Doméstico	0,1648
Viviana Maritza Suarez Uribe	Palmitas	Urquita	Industrial	0,0018
Viviana Maritza Suarez Uribe	Palmitas	Urquita	Doméstico	0,0101
Viviana Maritza Suarez Uribe	Palmitas	Urquita	Doméstico	0,0037
Viviana Maritza Suarez Uribe	Palmitas	Urquita	Industrial	0,3753
Municipio De Medellín	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Sin Informaci ón	0,0723
Dionisio Velásquez Flórez	Palmitas	Urquita Parte Baja	Agrícola	0,028
María Dolores Mejía Valencia	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Agrícola	0,1643
María De La Luz Ortiz	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,017
María De La Luz Ortiz	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,017
María Margarita Flórez	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,017
María Margarita Flórez	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,017
María Nubia Ortiz Ospina	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,017
María Nubia Ortiz Ospina	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,017
María Nubia Ortiz Ospina	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,017
Reinaldo Antonio Ortiz Ospina	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,017
Reinaldo Antonio Ortiz Ospina	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,017
Reinaldo Antonio Ortiz Ospina	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,017
Miguel Ángel Muñoz Arteaga	Palmitas	La Aldea	Agrícola	0,005

Solicitante	Corregimiento	Vereda	Uso	Caudal por uso
Miguel Ángel Muñoz Arteaga	Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,023
María De La Luz Ortiz	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,017
María Margarita Flórez	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,017
Aida María Vélez Jaramillo	Palmitas	La Volcana	Acuicultura	0,447
Aida María Vélez Jaramillo	Palmitas	La Volcana	Pecuario	0,019
Aida María Vélez Jaramillo	Palmitas	La Volcana	Pecuario	0,019
Aida María Vélez Jaramillo	Palmitas	La Volcana	Acuicultura	0,288
Aida María Vélez Jaramillo	Palmitas	La Volcana	Doméstico	0,003
Aida María Vélez Jaramillo	Palmitas	La Volcana	Pecuario	0,019
Aida María Vélez Jaramillo	Palmitas	La Volcana	Agrícola	0,021
Aida María Vélez Jaramillo	Palmitas	La Volcana	Doméstico	0,009
Aida María Vélez Jaramillo	Palmitas	La Volcana	Pecuario	0,019

Fuente: CORANTIOQUIA 2015. Consultoría Colombia S.A.

5.1.7.3.4 Vertimientos zona de interés cuenca Quebrada La Seca y La Sucia

Los vertimientos son otro tipo de uso de las corrientes que conforman una cuenca, para el caso de las quebradas La Clara y La Sucia, se consultaron los reportes entregados por CORANTIOQUIA en Julio de 2016 para identificar aquellos asociados a la cuenca, sin embargo, se debe tener en cuenta que alguno de estos carecen de información de la fuente receptora.

Tabla 5-85. Permisos de vertimientos otorgados en la cuenca de las quebradas La Clara y La Sucia en los municipios de Ebéjico, San Jerónimo y Sopetrán

Solicitante	Municipio	Vereda	Subactividad	Receptor	Caudal
FABIO DE JESÚS ECHAVARRÍA MUÑOZ	Ebéjico	Palo Blanco	No Puntual	suelo	
CLAUDIO MUÑOZ PULGARIN	Ebéjico	El Brasil	No Puntual	SUELO	
JUNTA DE ACCION COMUNAL VEREDA EL SOCORRO	Ebéjico				
FABIO DE JESÚS ECHAVARRÍA MUÑOZ	Ebéjico		No Puntual		
COOPERATIVA MULTIACTIVA DE EXPENDEDORES DE CARNE DEL MUNICIPIO DE EBEJICO	Ebéjico		Puntual		
HOSPITAL SAN RAFAEL	Ebéjico	Fatima	Puntual		0,089

Solicitante	Municipio	Vereda	Subactividad	Receptor	Caudal
DE EBEJICO E.S.P.					
AGROPECUARIA LOS MOLINOS S.A.S	Ebéjico	La Aguada	No Puntual		
ASTRID DORIS MUÑOZ	Ebéjico		No Puntual		
CARACOL TELEVISIÓN S.A.	Ebéjico		Puntual		
MUNICIPIO DE EBÉJICO	Ebéjico	Nariño	Puntual		
RAMÓN HERNANDO ROJAS VÁSQUEZ	Ebéjico		Puntual		
LUIS FERNANDO CASTRILLON VELASQUEZ	Ebéjico		Puntual		
POLITECNICO COLOMBIANO JAIME ISAZA CADAVID	San Jerónimo	Loma Hermosa	No Puntual		23
LIBARDO ALBERTO GIRALDO GIRALDO	San Jerónimo	Piedra Negra	No Puntual	SUELO	0,012
JOSÉ OVIDIO JARAMILLO HENAO	San Jerónimo	Mestizal	No Puntual		0,31
BLANCA OFELIA SIERRA DE FERNÁNDEZ	San Jerónimo	Loma Hermosa			
NATALÍ CARDONA ARIAS	San Jerónimo	Loma Hermosa	No Puntual		
JOSÉ REINALDO BASTIDAS BASTIDAS	San Jerónimo	Pesquinal	No Puntual		
MIGUEL ALFONSO ESCOBAR ESCOBAR	San Jerónimo	Loma Hermosa	Puntual		
LUIS SANTIAGO DE FATIMA ARANGO LOPEZ	San Jerónimo	Loma Hermosa	Puntual		
DIEGO CASTAÑO DÍAZ	San Jerónimo	Loma Hermosa	No Aplica		
INVERSIONES ROSO DE OCCIDENTE S.A.S	San Jerónimo	Piedra Negra	Puntual		
ANA MARIA YEPES QUINTERO	San Jerónimo	Loma Hermosa	Puntual		

Fuente: CORANTIOQUIA 2016. Consultoría Colombia S.A.

Para el caso del municipio de Medellín de acuerdo al reporte generado por CORANTIOQUIA en agosto de 2015, se tienen 197 permisos de vertimientos otorgados en las veredas La Aldea, La Sucia, La Suiza, La Volcana-Guayabal, Miserengo y Urquita.

Tabla 5-86. Permisos de vertimientos otorgados en la cuenca de las quebradas La Clara y La Sucia en el municipio de Medellín

Solicitante	Corregimiento	Vereda	Actividad	Caudal
Marco Tulio Álvarez Álvarez	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0084
Marco Tulio Álvarez Álvarez	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Agrícola	0,023
Marco Tulio Álvarez Álvarez	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Pecuario	0,0018
Rosalba Amaya	Palmitas	Urquita	Doméstico	0,04
Blanca Teresa Ospina	Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,01
Blanca Teresa Ospina	Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,03

Solicitante	Corregimiento	Vereda	Actividad	Caudal
Jesús Aicardo Arroyave Acevedo	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,03
Argemiro De Jesús Zapata Muñoz	Palmitas	Urquita	Doméstico	0,0071
Libardo De Jesús Hernández Palacio	Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,2213
Libardo De Jesús Hernández Palacio	Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,2213
Rogelio Galeano Galeano	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,0171
Hilda Inés Palomeque Padilla	Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,0102
Hilda Inés Palomeque Padilla	Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,0102
Huber De Jesús Delgado Caro	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
Huber De Jesús Delgado Caro	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
Huber De Jesús Delgado Caro	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
Marcel Arroyave Álvarez	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0059
Marcel Arroyave Álvarez	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0059
Marcel Arroyave Álvarez	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0059
Marina Ortiz Mejía	Palmitas	Urquita	Doméstico	0,014
Roberto Velásquez Suárez	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0015
Roberto Velásquez Suárez	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0015
Roberto Velásquez Suárez	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0015
Marco Tulio Pulgarin	Palmitas	Urquita	Doméstico	0,0074
Marco Tulio Pulgarin	Palmitas	Urquita	Doméstico	0,0074
Marco Tulio Pulgarin	Palmitas	Urquita	Doméstico	0,0074
Flor María Muñoz Cardona	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0059
Flor María Muñoz Cardona	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0059
Flor María Muñoz Cardona	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0059
Jorge Iván Bedoya Guerra	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
Jorge Iván Bedoya Guerra	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
Jorge Iván Bedoya Guerra	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
Oscar Jairo Marín Bedoya	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0088
Oscar Jairo Marín Bedoya	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0088
Oscar Jairo Marín Bedoya	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0088
Aparicio Velásquez Flórez	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0059
Aparicio Velásquez Flórez	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0059
Aparicio Velásquez Flórez	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0059
Rodolfo Acevedo Maya	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
Rodolfo Acevedo Maya	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
Rodolfo Acevedo Maya	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
Fabio León Giraldo Martínez	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0044
Fabio León Giraldo Martínez	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0044
Javier Darío Giraldo Martínez	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0113

Solicitante	Corregimiento	Vereda	Actividad	Caudal
Javier Darío Giraldo Martínez	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0113
Alberto Elías Puerta Puerta	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,003
Alberto Elías Puerta Puerta	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,003
Alberto Elías Puerta Puerta	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,003
Jaime Antonio Morales Zapata	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
Jaime Antonio Morales Zapata	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
Francisco Luis Vargas Gallego	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
Francisco Luis Vargas Gallego	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
Francisco Luis Vargas Gallego	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
Modesto Bedoya Betancourt	Palmitas	Urquita	Doméstico	0,0015
Adriana María Horta Ospina	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0059
Adriana María Horta Ospina	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0059
Adriana María Horta Ospina	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0059
Jesús Oscar Acevedo Maya	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
Jesús Oscar Acevedo Maya	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
Jesús Oscar Acevedo Maya	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
Jesús Oscar Acevedo Maya	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
Hermilda Ríos Parra	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0059
Hermilda Ríos Parra	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0059
Hermilda Ríos Parra	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0059
Hermilda Ríos Parra	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0059
Catalina Marín Sierra	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0031
Catalina Marín Sierra	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0031
Catalina Marín Sierra	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0031
Jhon Jairo Cano Cano	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,006
Jhon Jairo Cano Cano	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,006
Miguel Ángel Restrepo Sierra	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0034
Miguel Ángel Restrepo Sierra	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0034
Carlos Hernán Suarez Correa	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0015
Jairo Alfonso Álvarez Tamayo	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0044
Jairo Alfonso Álvarez Tamayo	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0044
Miguel De Jesús Bedoya Ospina	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0044
Miguel De Jesús Bedoya Ospina	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0044
Urbano De Jesús Cano Muñoz	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,013
Urbano De Jesús Cano Muñoz	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,013
Edison Pulgarin Cano	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,006
Edison Pulgarin Cano	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,006
Mauro Pulgarin Pulgarin	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0044

Solicitante	Corregimiento	Vereda	Actividad	Caudal
Mauro Pulgarin Pulgarin	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0044
Luz Marina Pulgarín Marín	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0118
Luz Marina Pulgarín Marín	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0118
Naid Del Socorro Marín Marín	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,006
Naid Del Socorro Marín Marín	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,006
José Joaquín Estrada	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0074
José Joaquín Estrada	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0074
Gloria Inés Jaramillo Álvarez	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0103
Gloria Inés Jaramillo Álvarez	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0103
Sor Magola Galeano Arboleda	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,004
Sor Magola Galeano Arboleda	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,004
Pedro Pablo Murillo Cano	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0015
Pedro Pablo Murillo Cano	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0015
Blanca Inés Marín Marín	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,003
Blanca Inés Marín Marín	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,003
Jorge William Galeano Arboleda	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,003
Luis Guillermo Vergara Castrillón	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0015
Rosalba Espinosa Vélez	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0015
Rosalba Espinosa Vélez	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0015
Mario De Jesús Ospina Muñoz	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,006
Mario De Jesús Ospina Muñoz	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,006
Martha Cecilia Pulgarin Cano	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0044
Martha Cecilia Pulgarin Cano	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0044
Guillermo León Galeano Arboleda	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0015
Guillermo León Galeano Arboleda	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0015
Blanca Nubia Muñoz Bedoya	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0074
Blanca Nubia Muñoz Bedoya	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0074
Eucaris Pulgarin Correa	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0044
Eucaris Pulgarin Correa	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0044
Roberto De Jesús Bedoya Pulgarin	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0044
Roberto De Jesús Bedoya Pulgarin	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0044
María De Los Dolores Marín Celis	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,003
María De Los Dolores Marín Celis	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,003
María Rosmira Celis Ospina	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0044
María Rosmira Celis Ospina	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0044
María Duarte Goez	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0044
María Nubia Ortiz Ospina	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0074
María Nubia Ortiz Ospina	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0074

Solicitante	Corregimiento	Vereda	Actividad	Caudal
María Rocio Muñoz	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0157
Belarmino Muñoz Cano	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0015
Belarmino Muñoz Cano	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0015
León Bernardo Ospina Suarez	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0044
León Bernardo Ospina Suarez	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0044
Jesús María Ortiz Correa	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,006
Jesús María Ortiz Correa	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,006
Benjamín Velásquez	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0015
Benjamín Velásquez	San Sebastián De Palmitas	La Suiza	Doméstico	0,0015
María Rubiela Álvarez Montoya	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,01
María Rubiela Álvarez Montoya	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,01
María Rubiela Álvarez Montoya	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,01
Daniel De Jesús Díaz Ospina	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0052
Daniel De Jesús Díaz Ospina	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0052
Daniel De Jesús Díaz Ospina	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0052
María Elena Díaz Ospina	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0115
María Elena Díaz Ospina	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0115
María Elena Díaz Ospina	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0115
Eucaris Muñoz Muñoz	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,012
Eucaris Muñoz Muñoz	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,012
Eucaris Muñoz Muñoz	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,012
Iván De Jesús Bedoya Jaramillo	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0088
Iván De Jesús Bedoya Jaramillo	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0088
Iván De Jesús Bedoya Jaramillo	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0088
José Omar Rincón Marulanda	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,003
José Omar Rincón Marulanda	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,003
José Omar Rincón Marulanda	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,003
María Edilma Marín Correa	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
María Edilma Marín Correa	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
María Edilma Marín Correa	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
Carmen Rosa Bedoya	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0074
Carmen Rosa Bedoya	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0074
Carmen Rosa Bedoya	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0074
Myriam Ocampo De Ruiz	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
Myriam Ocampo De Ruiz	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
Myriam Ocampo De Ruiz	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
José De Jesús Bedoya Jaramillo	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0015
José William Álvarez Torres	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0074

Solicitante	Corregimiento	Vereda	Actividad	Caudal
Carmen Rosa Caro	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,012
Carlos Enrique Mejía Salazar	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0062
Luz Mila Bedoya Jaramillo	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0074
Carmen Norela Bedoya Muñoz	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0052
Luz Orfidia Sepúlveda Jaramillo	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0059
Gilberto Pulgarin Muñoz	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
Berenice Gutiérrez Fandiño	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0088
Nora Elena Vásquez Marín	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0031
Luis Ernesto Bedoya Jaramillo	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0015
Arismendy Caro Bedoya	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0074
Salomón Velásquez Flórez	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0088
Luis Fernando Arboleda Muñoz	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0059
Reinel De Jesús Marín Correa	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0059
Luis Horacio Ortiz Morales	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0059
María Oliva Álvarez Carballo	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0074
Hildebrando Velásquez López	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0088
Gustavo De Jesús Gallego Pulgarin	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,003
Carlos Mario Álvarez Muñoz	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
Iván Cano Pulgarin	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0074
Romualdo Londoño Loaiza	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
Rosmira Benjumea Taborda	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0059
Beatriz Bedoya Muñoz	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0044
Luz Mariela Bedoya González	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,0059
Analida Marín Ortiz	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,003
Mario Alberto Ospina Ramírez	Palmitas	Potrera - Miserengo	Doméstico	0,01
María Rubiela Bedoya Jaramillo	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,01
Irma Carvajal	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,01
Ana Julia Muñoz	San Sebastián De Palmitas	La Volcana	Doméstico	0,01
Mariela De Jesús Arteaga Ospina	San Sebastián De Palmitas	La Sucia	Doméstico	0,01
Luz Elena Marín Cano	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,1033
Diego Alejandro Hernández	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,1033
Consuelo Del Socorro Cano Muñoz	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,1033
Robertina Jaramillo Acevedo	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,1033
Benjamín Velásquez	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,01
Juan Carlos Gallego Velásquez	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,01
Carlos Enrique Muñoz Ospina	San Sebastián De Palmitas	La Volcana	Doméstico	0,1033
Francisco Antonio Ruiz Ochoa	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,01
Rubén Darío Velásquez	San Sebastián De Palmitas	Urquitá	Doméstico	0,01

Solicitante	Corregimiento	Vereda	Actividad	Caudal
Yeny Correa Hernández	San Sebastián De Palmitas	La Aldea	Doméstico	0,1033

Fuente: CORANTIOQUIA 2015. Consultoría Colombia S.A.

5.1.7.3.5 Concesiones zona de interés cuenca del río Aurra

De acuerdo con información suministrada por CORANTIOQUIA en febrero – Julio de 2016, se identifican 62 concesiones otorgadas principalmente por la territorial hevéxicos para las corrientes que conforman la cuenca del río Aurra las cuales se listan a continuación, es de mencionar que como parte de los reportes entregados por la corporación no se incluye el uso autorizado.

Tabla 5-87. Concesiones otorgadas en la cuenca del río Aurra

Solicitante	Total caudal	Municipio	Vereda	Fuente	Coordenadas	
					X	Y
Acueducto Agropecuario Las Dantas	13	Ebéjico		Cañada La Llorona	11516774	12020124
Maria Marleny Jaramillo Vergara	0,28474	San Jerónimo	El Berrial	Sin Nombre	11491371	12007516
Alba Nery Muñoz Patiño	0,094511	San Jerónimo	Matasano	El Salto	11542057	11996934
Pedro Alberto Salazar Patiño	0,157518	San Jerónimo	La Murrapala	Afluente La San Juana	11504890	11979998
Octavio Arcesio Orrego Piedrahita	0,29	San Jerónimo	Loma Hermosa	La Bomba	11474289	12020185
Argiro Hugo Rodriguez Restrepo	0,0082	San Jerónimo	Loma Hermosa	La Espada	11475355	12025880
Sandra Milena Zapata Muñoz	0,3107	San Jerónimo	Matasano	El Desague	11538872	12001405
Pedro Pablo Delgado Torres	0,2962	San Jerónimo	Loma Hermosa	La Espadita	11478921	12016242
Junta De Acción Comunal Vereda Cabuyal	6,147175	San Jerónimo	Cabuyal	La Ramírez	11552212	12013152
Blanca Ofelia Sierra De Fernández	2,228147	San Jerónimo	Loma Hermosa	La Cumbre	11488968	12014831
Reinaldo Alarcon López	1,1395	San Jerónimo	El Rincón	La Clara	11520170	12051350
Sandra Milena Velasquez Diaz	0,02037	San Jerónimo	Piedra Negra	El Cañon	11506649	11980059
Gilma Ester Cano Ríos	1,798438	San Jerónimo	El Berrial	Caño Del Garabato	11485883	12013993
Mario Patiño	1,052826	San Jerónimo	Montefrio	La Toma	11554815	11983419
Luis Eduardo Rodriguez Berrio	0,628518	San Jerónimo	Buenos Aires	La Ramirez	11563442	12009488
Asoc. De Usuar. Del Acued.	0,35074	San	Pie De	La	11508085	12037161

Solicitante	Total caudal	Municipio	Vereda	Fuente	Coordenadas	
					X	Y
De La Vda Pie De Cuesta De Lopera		Jerónimo	Cuesta Lopera	Alarcona		
Miguel Angel Carmona Muñoz	0,223989	San Jerónimo	Montefrio	Yarumal	11548680	11989543
Hugo Armando Graciano Gomez	0,31	San Jerónimo	El Potrerito	Nacimiento Sin Nombre	11491369	11995868
Bernardo Bastidas Bastidas	1,972476	San Jerónimo	Llano Arriba	La Ramirez	11514400	12015790
Nubia Del Socorro Suarez Ríos	1,177869	San Jerónimo	Buenos Aires	La Alarcona	11547175	12022971
Fondo De Empleados Almacenes Exito	6,1	San Jerónimo		La Muñoz	11499801	12027733
Pedro Luis Monsalve	0,389259	San Jerónimo	Buenos Aires Parte Baja	Nacimiento La Ceja	11555897	12013963
Bernardino Gil Rios	0,150786	San Jerónimo	Buenos Aires Parte Baja	Nacimiento Sin Nombre	11556539	12016917
Marta Gabriela Echandia Echandia	0,089444	San Jerónimo	El Berrial	El Zapote	11487343	12007223
Junta De Accion Comunal Vereda Tafetanes	4,96412	San Jerónimo	Tafetanes	La Muñoz	11497993	12025843
Adrian Alberto Munera Lopera	0,201331	San Jerónimo	Buenos Aires Parte Alta	La Clarita	11559148	12027311
Manuel De Jesús Munera Builes	1,531611	San Jerónimo	Buenos Aires Parte Baja	La Alarcona	11540488	12025832
Natalia Andrea Vergara Alzate	2,66	San Jerónimo	Pie De Cuasta	La Alarcona	11509944	12037342
Abelardo De Jesús Patiño Avendaño	0,090861	San Jerónimo	Matasano - Monte Frio	La Peña	11563639	11992900
Luis Andres Gomez Arcila	2,102962	San Jerónimo	El Berrial	La Jungla	11490030	12002479
Andres Velasquez Uribe	0,236184	San Jerónimo	Loma Hermosa	Caño La Mina	11481782	12029617
Juan Guillermo Giraldo Posada	0,257888	San Jerónimo	El Berrial	Caño Del Garabato	11490577	12014951
Natalí Cardona Arias	0,076222	San Jerónimo	Loma Hermosa	La Espada	11475355	12025880
Catalina Giraldo Marroquin	1,4924	San Jerónimo	El Calvario	Nacimiento La Malena (Predio Argemiro Sierra)	11491165	12015364
Erika Isabel Correa Quijano	0,0523	San Jerónimo	Loma Hermosa	Fuente Sin Nombre-	11491400	11997268

Solicitante	Total caudal	Municipio	Vereda	Fuente	Coordenadas	
					X	Y
				Finca Venecia-		
John Jairo Echavarria Aguilar	0,123	San Jerónimo	Loma Hermosa	Nacimiento Manantial (Predio John Jairo Echavarria)	11475725	12029352
Isidoro De Jesús Rodriguez Moreno	0,0528	San Jerónimo	Loma Hermosa	Llano Grande (Afluente Q. La Espada)	11472427	12030752
Dalgui Ayanet Castañeda Ceballos	0,0741	San Jerónimo	Loma Hermosa	La Bomba	11474289	12020185
Diego De Jesus Ruiz Zuluaga	0,0544	San Jerónimo	Loma Hermosa	Llano Grande (Afluente Q. La Espada)	11472427	12030752
Unidad Campestre Las Palmeras	2,47	San Jerónimo	El Calvario	La Muñoz (San Jerónimo)	11506680	12019335
Luis Santiago De Fatima Arango Lopez	0,259	San Jerónimo	Loma Hermosa	Baulito	11473000	12025106
Corporacion Veredal Llanos De San Juan	10,48	San Jerónimo	Llanos De San Juan	La Aguamala	11524891	11981185
Gloria Lucia Arboleda Guzman	0,0639	San Jerónimo	Loma Hermosa	La Espada	11475355	12025880
Maria Lucelly Ramirez Parra	0,136	San Jerónimo	El Berrial	Sin Nombre (Aflora En Predio Lucely Ramirez De Yepes)	11490232	12005640
Nestor Hincapie Giraldo	0,1079	San Jerónimo	Llanos De San Juan	Casa Blanca	11485691	12002374
Maria Azucena Zuluaga Montoya	0,6323	San Jerónimo	Piedra Negra	Agualinda	11507173	11972562
Gabriel Jairo Angel Bernal	6,8469	San Jerónimo	El Rincón	Aurrá	11540311	12047619
Gabriel Gonzalo Gomez Jimenez	0,0317	San Jerónimo	Loma Hermosa	La Espada	11474851	12030037
Jorge Mario Ortiz Velez	0,622	San Jerónimo	El Calvario	La Muñoz	11501279	12028032
Margarita Maria Echeverri Cardona	0,0258	San Jerónimo	Loma Hermosa	La Espada	11475355	12025880
Maria Del Carmen Zapata De Castrillon	0,0486	San Jerónimo	Cabuyal	Sin Nombre	11539817	12015909

Solicitante	Total caudal	Municipio	Vereda	Fuente	Coordenadas	
					X	Y
Myriam Dionny Astaiza Gallo	0,0854	San Jerónimo	El Berrial	Caño Del Garabato	11485883	12013993
Junta De Acción Comunal Vereda Buenos Aires Parte Alta	0,5	San Jerónimo	La Clarita	La Clarita	11569622	12011264
Luz Selene Restrepo Aristizabal	0,1008	San Jerónimo	El Calvario	Caño Del Garabato	11490151	12014258
Javier Antonio Suárez Muñoz	0,051	San Jerónimo	La Ciénaga	La Ramírez	11542328	12019083
Edgar Alexander Castrillon Zapata	0,0644	San Jerónimo	Buenos Aires Parte Baja	La Ramirez	11551697	12014049
John Jairo Vásquez González	0,0046	San Jerónimo	El Berrial	Sin Nombre	11491371	12007516
Asociación De Usuarios Del Acueducto De La Vda Buenos Aires	3,1296	San Jerónimo	Buenos Aires	Yarumalito	11560356	11986651
Sara María Escobar Rojas	0,0457	San Jerónimo	Llano Arriba	La Muñoz	11505599	12021138
Rio Escondido S.A.S	2,2035	San Jerónimo	Pie De Cuesta	La Clara	11520170	12051350
Elsy De Jesus Londoño Parra	5,0237	San Jerónimo	Pie De Cuesta	La Muñoz (San Jerónimo)	11500316	12032036
Gildardo De Jesús Gómez Múnera	0,0127	San Jerónimo	El Poleal	Los Papayos	11574050	12052377

Fuente: CORANTIOQUIA 2016. Consultoría Colombia S.A.

5.1.7.3.6 Vertimientos zona de interés cuenca del río Aurra

Para el caso de la cuenca del río Aurra, de acuerdo con el reporte entregado por CORANTIOQUIA en Julio de 2016, se identifican autorizaciones en las veredas identificadas como parte del área de la cuenca, se empleó este filtro dado que no se cuenta con información de la corriente sobre el correspondiente receptor. (Tabla 5-88).

Tabla 5-88. Permisos de vertimientos otorgados en la cuenca del río Aurra

Solicitante	Municipio	Vereda	Subactividad	Caudal
HECTOR ALONSO PEREZ ALVAREZ	San Jerónimo	Pie De Cuasta	Puntual	
ARGIRO HUGO ARBOLEDA BUILES	San Jerónimo	Llanos De San Juan	Puntual	
ASOC. DE USUAR. DEL ACUED. DE LA VDA PIE DE CUESTA DE LOPERA	San Jerónimo	Pie De Cuesta	No Puntual	0,29
LUZ GABRIELA BASTIDAS CORREA	San Jerónimo	Llanos De San Juan	No Puntual	45
POLITECNICO COLOMBIANO	San	Loma Hermosa	No Puntual	23

Solicitante	Municipio	Vereda	Subactividad	Caudal
JAIME ISAZA CADAVID	Jerónimo			
JORGE HUMBERTO ARBELAEZ JARAMILLO	San Jerónimo	Llanos De Aguirre	Puntual	0,264
LIBARDO ALBERTO GIRALDO GIRALDO	San Jerónimo	Piedra Negra	No Puntual	0,012
SOCIEDAD HOTELERA REAL DE COLOMBIA LTDA	San Jerónimo	Llanos De Aguirre	Puntual	
LISANDRO ANTONIO GIRALDO SUAREZ	San Jerónimo	Alto Colorado	No Aplica	
JOSÉ OVIDIO JARAMILLO HENAO	San Jerónimo	Mestizal	No Puntual	0,31
ASOCIACIÓN DE INSTITUTORES DE ANTIOQUIA	San Jerónimo	Llanos De Aguirre		0,4
TINTORERÍA SOBIESKY LTDA.	San Jerónimo	El Rincón	No Puntual	
BLANCA OFELIA SIERRA DE FERNÁNDEZ	San Jerónimo	Loma Hermosa		
UNIDAD CAMPESTRE CAMPIÑAS DE LA PRADERA	San Jerónimo	El Rincón	Puntual	
MUNICIPIO DE SAN JERONIMO	San Jerónimo	Tafetanes	Puntual	
REGIONAL DE OCCIDENTE S.A E.S.P	San Jerónimo	Quimbayo	Puntual	
ESTACION CAMPESTRE VEGAS DEL AURRA P.H.	San Jerónimo	El Rincón	Puntual	10414
NATALÍ CARDONA ARIAS	San Jerónimo	Loma Hermosa	No Puntual	
INVERSIONES QUIMBAYA LTDA	San Jerónimo	El Rincon	Puntual	
FEDERACION NACIONAL DE CACAOTEROS	San Jerónimo	El Rincon	No Puntual	
JOSÉ REINALDO BASTIDAS BASTIDAS	San Jerónimo	Pesquinal	No Puntual	
UNIDAD CAMPESTRE LAS PALMERAS	San Jerónimo	El Calvario	Puntual	
MUNICIPIO DE SAN JERONIMO	San Jerónimo	Los Cedros	No Puntual	
MIGUEL ALFONSO ESCOBAR ESCOBAR	San Jerónimo	Loma Hermosa	Puntual	
LUIS SANTIAGO DE FATIMA ARANGO LOPEZ	San Jerónimo	Loma Hermosa	Puntual	
RAMIRO SALDAÑA AMÉZQUITA	San Jerónimo	El Rincón	No Aplica	
DIEGO CASTAÑO DÍAZ	San Jerónimo	Loma Hermosa	No Aplica	
INVERSIONES ROSO DE OCCIDENTE S.A.S	San Jerónimo	Piedra Negra	Puntual	
CONDOMINIO HACIENDA SAN JERONIMO	San Jerónimo	Llano De Aguirre	Puntual	

Solicitante	Municipio	Vereda	Subactividad	Caudal
JOHN JAIRO AGUDELO ORREGO	San Jerónimo	Pie De Cuesta	Puntual	
ANA MARIA YEPES QUINTERO	San Jerónimo	Loma Hermosa	Puntual	
FANNY NOGUERA SERNA	San Jerónimo	Las Estancias	Puntual	
LEONARDO HERRÓN GÓMEZ	San Jerónimo	Tafetanes	Puntual	

Fuente: CORANTIOQUIA 2016. Consultoría Colombia S.A.

5.1.7.4 Conflictos Disponibilidad y Uso del agua

En cuanto a la disponibilidad del recurso como ya se ha mencionado anteriormente para la unidad funcional 3 y 1 Túnel de Occidente – San Jerónimo, la fuente principal proviene de corrientes superficiales y pozos, por ende la mayoría de las zonas cuenta con acueductos y alcantarillado veredales, sin embargo, no todos tienen el proceso de calidad de agua; es decir no todos los acueductos cuentan con tratamiento previo a las aguas antes de su distribución y disposición para la comunidad. Por otro lado los habitantes de la zona de la vereda El Naranjal – en el municipio de Medellín, hacen referencia que debido a la construcción del primer túnel (Tunel de Occidente) han vendido presentando escases de agua producto de la disminución de los caudales en las fuente. Para el caso de la construcción del nuevo túnel, a continuación en el componente Hidrogeológico se aborda el análisis de lo manifestado por la comunidad.

A su vez es bueno tener presente que durante la época de sequias puede sentirse afectada la disminución del volumen de recurso agua (pozos, aljibes, canales, ríos, quebradas y caños) sobre todo los dueños de fincas ganaderas que consumen un volumen considerable del recurso, así mismo en ocasiones los acueductos presentan fallas por lo tanto las personas deben recurrir a la fuentes superficiales directamente o a la compra de agua en bolsa para consumo humano.

Finalmente el uso inadecuado del suelo con prácticas como las quemas, rocería y tala indiscriminada de bosques para el cambio de áreas forestales a áreas ganaderas y agrícolas y mal manejo de la aguas, ocasiona una mayor desprotección del suelo reduciendo la cobertura cerca a las márgenes de quebradas y ríos disminuyendo el nivel de retención de agua.

5.1.8 Hidrogeología

Teniendo en cuenta lo establecido en el Numeral 5.1.8 (Hidrogeología), del Capítulo 5 de los Términos de Referencia establecidos por la reolución 0111 de 28 de Enero de 2015, para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental para el trámite de la licencia ambiental de los proyectos de construcción de carreteras y/o túneles con sus accesos, y la Metodología General para la Presentación de Estudios Ambientales (MAVDT, 2010), se presenta el componente hidrogeológico, en el marco de la caracterización del medio abiótico del proyecto EIA para la construcción de la segunda calzada entre el túnel de occidente San Jerónimo Unidad funcional 3 y 1.

La caracterización hidrogeológica tiene como objetivos principales:

- Identificar los acuíferos de carácter regional, zonas de recarga y descarga, direcciones generales de flujo, tipo de acuífero.
- Evaluar el potencial hidrogeológico para almacenar y transmitir agua de las rocas y sedimentos presentes en el área de influencia
- Establecer la productividad de los acuíferos
- Identificar la posible afectación de los acuíferos a ser contaminados
- Describir el funcionamiento del sistema hidrogeológico de la zona de evaluación

Para la elaboración del componente hidrogeológico se realizaron actividades de recopilación, análisis y validación de información existente. Se utilizó información adquirida en los aspectos de geología, geomorfología, e hidrología, y se realizaron tareas específicas que incluyen información en campo para el reconocimiento de la zona de evaluación, así como, el inventario de puntos de agua subterránea, el cual se realizó a partir de una visita a los sitios de torre para identificar posibles puntos de agua, en el caso de identificar algún sitio (Manantial, Pozo, Aljibe) se levantó la información utilizando el formato FUNIAS, adicionalmente se realizaron recorridos a lo largo de la línea para verificar la presencia de puntos de agua subterránea.

Se partió de la evaluación y cartografía geológica realizada para el presente estudio (Ver numeral 5.1.1), de igual manera, se utilizó información de geomorfología, hidrología, presentada detalladamente en los respectivos apartes del estudio.

Para la elaboración de la cartografía hidrogeológica y caracterización de las unidades, se siguieron los lineamientos propuestos en los estándares internacionales, en este sentido se adopta la nomenclatura de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (IAH) “Leyenda Internacional de los Mapas Hidrogeológicos” (UNESCO, International Legend for Hydrogeological Maps, 1983). La leyenda ha sido diseñada con base en la asignación de categorías hidrogeológicas teniendo en cuenta el potencial de las rocas y los sedimentos

para almacenar y transmitir agua subterránea, en función de la composición, permeabilidad y capacidad específica de cada unidad litológica evaluada.

5.1.8.1 Información Secundaria.

Para el área de influencia se realizó el análisis de información existente hidrogeológica, hidrológica, geofísica, geoquímica y caracterización de las aguas subterráneas y cartografía existente. La información fue obtenida en archivos digitales provenientes de las siguientes entidades:

- DEVIMAR
- Grupo TYPSA / Consultores Regionales Asociados CRA.SAS
- ANI – DESARROLLO VIAL AL MAR S.A.S.
- CORANTIOQUIA.
- TAT TÚNELES Y ASISTENCIA TÉCNICA
- GRUPO AUSCOLNOVA-INGENIERIA GEOLOGICA Y GEOMATICA
- INTEINSA INGENIERIA INTELIGENTE
- SANEAR LTDA. INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL

A continuación se presenta una síntesis de los trabajos consultados correspondientes artículos, informes y presentaciones técnicas.

- La presentación técnica "**Proyecto de Infraestructura Vial Autopista al Mar-1. CONSIDERACIONES Y ACLARACIONES ÁREAS DE MANEJO ESPECIAL EN JURISDICCIÓN DE CORANTIOQUIA" (2016)** realizado por DEVIMAR, contiene la descripción del proyecto Autopista al Mar 1, dividido en Unidades funcionales, destacando los aspectos de longitud, punto de inicio, punto final, profundidad máxima, calzadas, número de carriles en la calzada, ancho de calzada, obras de drenaje, puentes, galerías e impermeabilización (%).

  En la caracterización del área de estudio, se establecen las áreas protegidas del *SINAP,* identificando la reserva de la Zona Ribereña del Río Cauca, la cual no corresponde a ninguna categoría de área protegida concreta, sino que responde a una estrategia administrativa que busca restringir el aprovechamiento del recurso. Igualmente se identificó el Distrito de Manejo Integrado Divisória Valle De Aburra Rio Cauca**.**

  LaInfluencia del proyecto en el Distrito de Manejo Integrado y en la reserva del Río Cauca, en donde el área a intervenir corresponde a la recuperación de puntos críticos localizados dentro de la franja de un (1) kilómetro definida por Corantioquia como reserva del río Cauca.

- El Documento técnico "**ATLAS HIDROGEOLÓGICO DE EL BAJO CAUCA**

ANTIOQUEÑO" (2014) representa un trabajo conjunto entre CORANTIOQUIA, La UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Es una edición gratuita y de libre reproducción con fines pedagógicos.

Se considera un material de consulta por excelencia ya que sintetiza de manera muy práctica los aspectos hidrogeológicos relevantes de la región, y presta un muy buen punto de partida para situarse en el contexto regional que enmarcan los estudios hidrogeológicos e hidrológicos para obras de construcción, como lo es la vía al mar. Está apoyado en estudios previos que también son referentes de consulta en este y otros proyectos en la región y que se citan a continuación:

- Evaluación hidrogeológica entre los municipios de Caucasia y Cáceres.
- Evaluación hidrogeológica y vulnerabilidad de acuíferos al norte del municipio de Caucasia.
- Evaluación hidrogeológica y vulnerabilidad de acuíferos en la cuenca del Río Cacerí.
- Validación del modelo hidrogeológico de la territorial Panzenú usando técnicas isotópicas.
- Geología de la plancha 93 Cáceres, 1:100000, Atlas veredal departamento de Antioquia.
- Memorias del mapa geomorfológico, de amenazas y áreas degradadas de la jurisdicción de CORANTIOQUIA a escala 1:100.000. CORANTIOQUIA.
- Estudio general de suelos y coberturas terrestres, 1:100.000, 1:25.000.
- Estudio de suelos del departamento de Antioquia. Tomos I, II, III, IV.
- Ciénagas de la región Panzenú.
- Territorio CORANTIOQUIA; atlas geográfico
- El Recurso hídrico en la jurisdicción de CORANTIOQUIA
- Bajo Cauca, desarrollo regional: una tarea común universidad-región.

- El documento técnico "**Duplicación del Túnel de Occidente diseño Fase II. Capitulo III Diseño del túnel, obra civil" (2013),** realizado por el TYPSA/CRA S.A.S. contiene el "Estudio Hidrogeológico" del área que consta de: La caracterización hidrogeológica de la zona de estudio, el mapa hidrogeológico General de Colombia en escala 1:2.500.000 (SGC, 1989), mostrando el trazado de la obras.

Las unidades geológicas aflorantes en el área que se sintetizan como cuerpos ígneos y metamórficos de edad Cretácica y Paleozoica de baja a nula permeabilidad y rocas sedimentarias y volcánicas de permeabilidad más alta y edad Cretácica. Las áreas permeables corresponden a depósitos Cuaternarios de nula afectación por el proyecto.

Además, el estudio contempla la climatología de la área de estudio, y menciona que está definida por publicaciones del IDEAM pertenecientes al Atlas Climatológico de Colombia, 2005, con los que se estimó un valor aproximado de la infiltración promedio en grandes superficies de 500 mm, obtenido como diferencia entre la precipitación total

menos la evapotranspiración y la escorrentía.

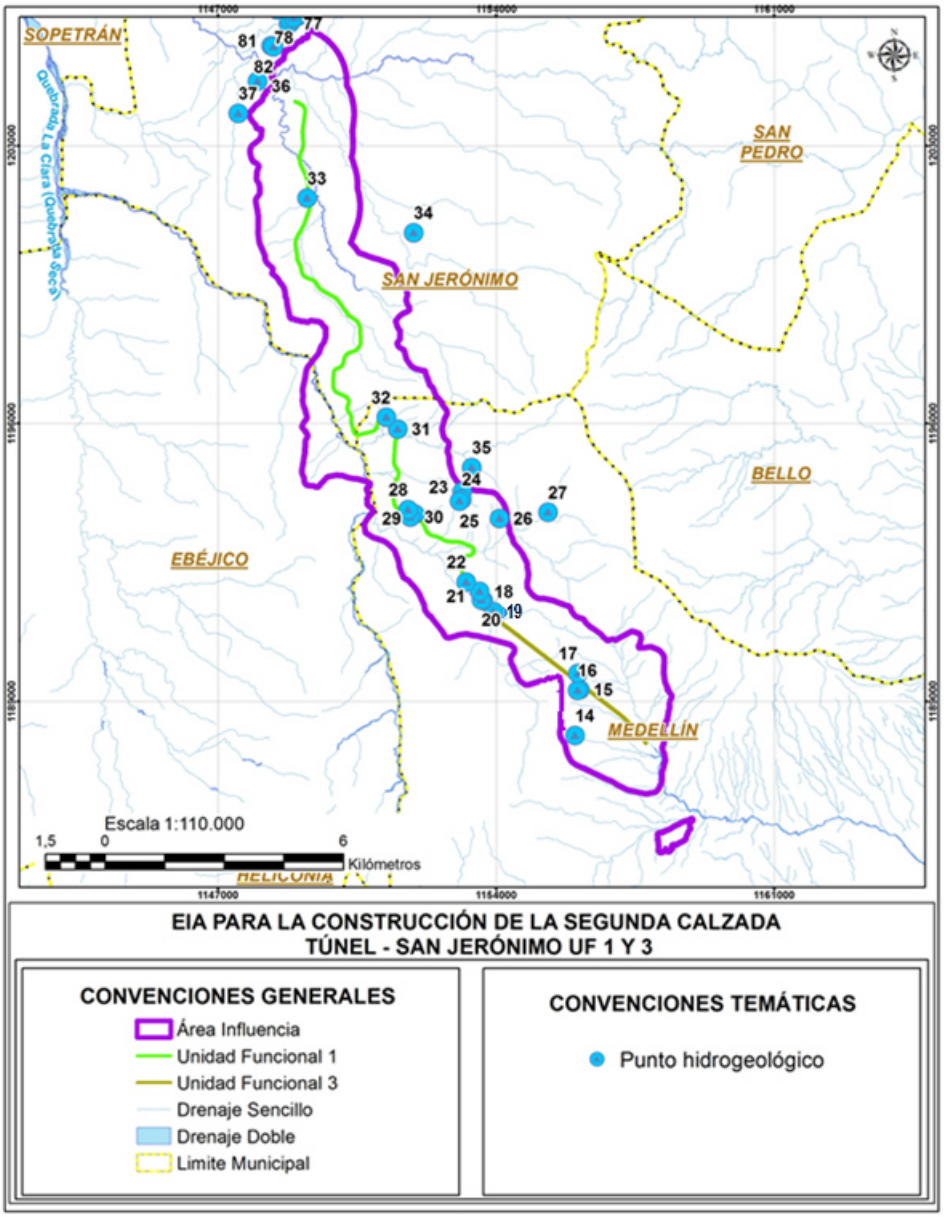
- El documento técnico **"Inventario de aguas Subterráneas en el Valle de Aburra" (2000),** realizado por HIDROGEMA Ltda. para el Ministerio de Ambiente, Banco Mundial, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Corantioquia – Sobretasa ambiental. En el documento se presenta la hidrología (evaporación, escorrentía, balances hídrico) geología, un SIG para el inventario de aguas subterráneas, inventario de Pozos (tipo de captación, y características) inventarios de acuíferos (flujo del agua, composición química y vulnerabilidad) calidad de aguas subterráneas.

- Los documentos técnicos **"Determinación y Protección de las potenciales Zonas de recarga en el Norte del Valle de Aburra (2011)" y "Determinación y Protección de las potenciales Zonas de recarga en el Centro y Sur del Valle de Aburra (2012),** los informes fueron realizados por la Universidad de Antioquia para Área Metropolitana del Valle de Aburra. Se destaca lo información concerniente a las zonas de recargas, determinadas por el método analítico Saaty, 2000; en donde se involucran principalmente cuatro (4) variables, topografía adecuada, patrones estructurales (diaclasamiento por unidad litológica) patrones texturales del suelo y condiciones de infiltración.

5.1.8.2 Inventario de puntos de agua subterráneas.

El inventario es un método de recopilación y análisis de los datos relacionados con la hidrogeología y que proceden de la información de usuarios de los denominados puntos de agua subterránea; se utiliza para conocer rápidamente las características hidrogeológicas de una zona dada. En sentido estricto se puede definir un punto de agua subterránea como un lugar, obra civil o circunstancia que permita un acceso directo o indirecto a un acuífero, estos pueden incluir perforaciones existentes (pozos o aljibes), también se cuentan las fuentes o surgencias naturales (manantiales). El inventario se llevó a cabo durante los días 1 al 15 de febrero de 2016, se utilizó el formato FUNIAS para el levantamiento de la información Anexo D. (Ver Figura 5-139)

Figura 5-139 Distribución espacial del inventario de puntos de agua



Fuente: Consultoría Colombiana S. A, 2016

Regionalmente el área de influencia tiene 19 puntos de ocurrencia de agua subterránea correspondientes a 18 manantiales y un Aljibe, en su totalidad estos puntos de captación son productivos para uso pecuario y doméstico. (Ver Tabla 5-89)

Durante el inventario de puntos de agua (pozos, aljibes y manantiales), se realizaron mediciones físico químicas in situ de conductividad eléctrica, pH, solidos disueltos totales y temperatura, mediante un medidor multiparámetro portátil marca Hanna Instruments.

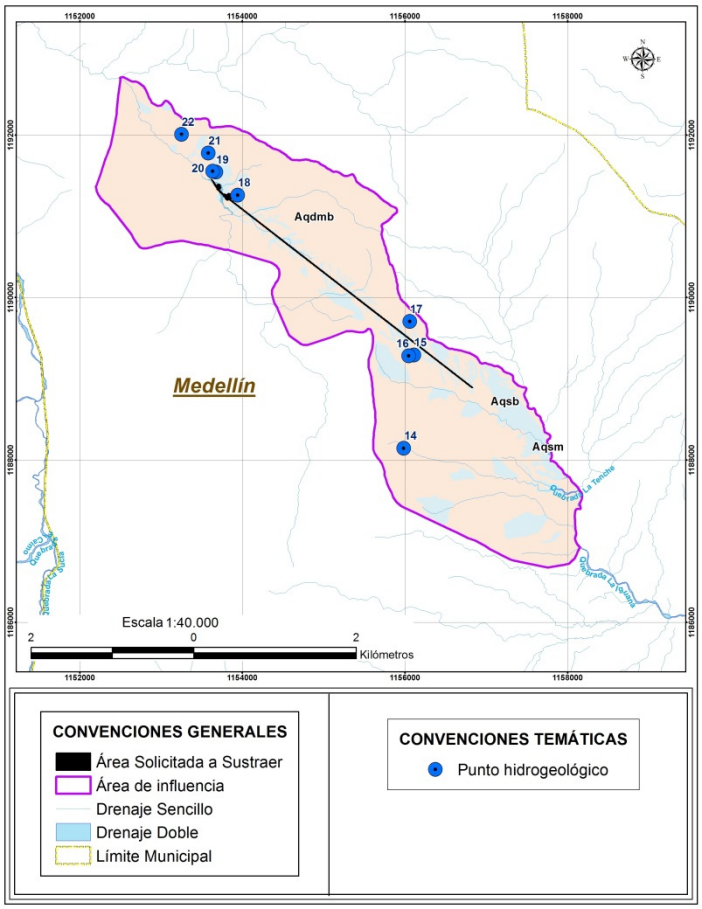
Tabla 5-89 Puntos de agua subterránea inventariados para las Unidades Funcionales 1 y 3.

id	Tipo captación	Condición del punto	Coordenadas x	Coordenadas Y	Caudal de explotación (l/día)	Temperatura (°C)	Conductividad (µS/cm)	Ph
14	Manantial	Productivo	1155988	1188146	17280	17.7	125	7
15	Manantial	Productivo	1156112	1189295	6650	16.7	113	7.7
16	Manantial	Productivo	1156048	1189284	14400	17.4	149	8
17	Aljibe	Productivo	1156061	1189706	21400	18.2	64	7.4
18	Manantial	Productivo	1153942	1191263	12960	22	250	8.2
19	Manantial	Productivo	1153676	1191545	720	20.5	124	6.7
20	Manantial	Productivo	1153634	1191557	720	21	185	6.9
21	Manantial	Productivo	1153581	1191778	720	21	64	7.5
22	Manantial	Productivo	1153252	1192009	1000	24	100	7.7
23	Manantial	Productivo	1153146	1194284	691	18	81	6.8
24	Manantial	Productivo	1153134	1194094	5760	18	105	7.4
25	Manantial	Productivo	1153083	1194046	5760	19.1	68	6.4
26	Manantial	Productivo	1154086	1193607	5000	17	27	6.6
28	Manantial	Productivo	1151787	1193834	2616	20	120	6.5
29	Manantial	Productivo	1151957	1193726	360	22	254	7.4
30	Manantial	Productivo	1151846	1193650	3456	20	213	6.5
31	Manantial	Productivo	1151529	1195863	1320	22	188	8.3
32	Manantial	Productivo	1151234	1196159	800	22	330	7.05
33	Manantial	Productivo	1149240	1201680	5760	23	286	7.8

Fuente: Consultoría Colombiana S.A, 2016

Para el área del túnel (unidad funcional 3) se tienen 9 puntos de ocurrencia de agua subterránea, 8 manantiales y un aljibe. (Ver Tabla 5-90 y Figura 5-140)

Figura 5-140 Distribución espacial del inventario de puntos de agua en el área del túnel



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

Tabla 5-90 Puntos de agua subterránea inventariados para el área del túnel.

id	Tipo de captacion	Condicion	Cordenadas Magna Sirgas Origen W		Temperatura (ºC)	Caudal de explotación (l/día)	Conductividad (µS/cm)	pH
			Cordenadas X	Cordenadas Y				
F2 (14)	Manantial	Productivo	1155988	1188146	17.7	17280	125	7
F5 (17)	Aljibe	Productivo	1156061	1189706	18.2	21400	64	7.4
M6 Bocatunel Occidente (18)	Manantial	Productivo	1153942	1191263	22	1296000	250	8.2
15	Manantial	Productivo	1156112	1189295	16.7	6650	113	7.7
16	Manantial	Productivo	1156048	1189284	17.4	14400	149	8
19	Manantial	Productivo	1153676	1191545	20.5	720	124	6.7

id	Tipo de captacion	Condicion	Cordenadas Magna Sirgas Origen W		Temperatura (ºC)	Caudal de explotación	Conductividad (µS/cm)	pH
20	Manantial	Productivo	1153634	1191557	21	720	185	6.9
21	Manantial	Productivo	1153581	1191778	21	720	64	7.5
22	Manantial	Productivo	1153252	1192009	24	1000	100	7.7

Fuente: Consultoría Colombiana S.A, 2016

5.1.8.2.1 Manantiales

En el área de influencia se identificaron dieciocho (18) manantiales, ocho (8) de estos se encuentran en el área del túnel, todos son manantiales aparentemente perennes y los caudales de producción son muy variables. (Ver Fotografía 5-132)

Fotografía 5-132 Manantial

Fuente: Consultoría Colombiana S.A, 2016

Las principales características físico-químicas del agua son: para todos los puntos el olor del agua es predominantemente inolora, para 19 puntos inventariados el agua se presentó incolora, mientras que uno tuvo tonalidad café. Se presentaron unidades de pH entre 6,4 y 8,3, la temperatura promedio del agua es de 22,66 °C, la conductividad eléctrica se presenta entre 27 y 667 µS/cm.

5.1.8.2.2 Caracterización fisicoquímica y microbiológica de las fuentes de agua subterránea

A continuación se analizan tres puntos monitoreados correspondientes a aguas subterráneas identificados como: F2 (Manantial) este punto corresponde al id 14 de la Tabla 5-89, F5 (Aljibe) este punto corresponde al id 17 de la Tabla 5-89 y M6 (Boca túnel de Occidente) este punto corresponde al id 18 de la Tabla 5-89, estos puntos fueron escogidos por su cercanía a la unidad funcional 3 (área del túnel) donde se requiere un mayor detalle de

caracterización dadas las actividades constructivas asociadas al túnel, los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos se relacionan en la Tabla 5-91.

Tabla 5-91 Resultados de la caracterización fisicoquímica y bacteriológica de las aguas subterráneas.

PARAMETRO	UNIDADES	F2 NACIMIENTO	F5 ALJIBE	M6 BOCATUNEL
FECHA	**dd/mm/aa**	**21/04/2016**	**20/04/2016**	**20/04/2016**
HORA	h:min	12:18	12:30	10:10
TEMPERATURA AMBIENTE	ºC	19	18	23
TEMPERATURA DE LA MUESTRA	ºC	16,97	15,73	21,61
pH	Unidades	7,13	7,06	8,24
CONDUCTIVIDAD	µS/cm	43	43	192
SOLIDOS DISUELTOS TOTALES	mg/L	38	34	133
SOLIDOS SEDIMENTABLES	mL/L	<0,1	<0,1	0,1
OXIGENO DISUELTO	mg/L	6,49	3,59	6,05
ACIDEZ TOTAL	mg/L $CaCO_3$	<5	5,79	<5
ALCALINIDAD TOTAL	mg/L CaCO3	34	31	108
BARIO	mg/L	1,1	1	1
CADMIO	mg/L	<0,005	<0,005	<0,005
CALCIO TOTAL	mg/L	3,7	1,4	-
COBRE	mg/L	<0,03	<0,03	<0,03
COLIFORMES FECALES	NMP/100 mL	53,9	197	2
COLIFORMES TOTALES	NMP/100 mL	62,9	395	2
CROMO TOTAL	mg/L	<0,05	<0,05	<0,07
DBO5	mg/L	3	4	4
DQO	mg/L O_2	<5	<5	<5
DUREZA CALCICA	mg/L CaCO3	13	17,5	62
DUREZA TOTAL	mg/L CaCO3	18,5	20	85
FOSFORO TOTAL	mg/L P	-	-	1
GRASAS Y ACEITES	mg/L	0,5	<0,52	0,6
MAGNESIO TOTAL	mg/L	1,8	1,4	-
NITROGENO TOTAL	mg/L	<2	<2	<2
NIQUEL	mg/L	<0,1	<0,1	<0,1
OLOR		Aceptable		
PLATA	mg/L	0,09	0,08	0,1
PLOMO	mg/L	<0,1	<0,1	<0,1
SABOR	zl	No aceptable	No aceptable	-
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	mg/L	10	59	<5
SOLIDOS TOTALES	mg/L	43	87	119
TURBIEDAD	NTU	5	12	1,5
ZINC	mg/L	<0,04	<0,01	<0,0076
MERCURIO	mg/L	<0,0019	<0,0019	<0,0019
SELENIO	mg/L	<0,009	<0,009	<0,009

Fuente: Consultoria Colombiana S.A., 2016.

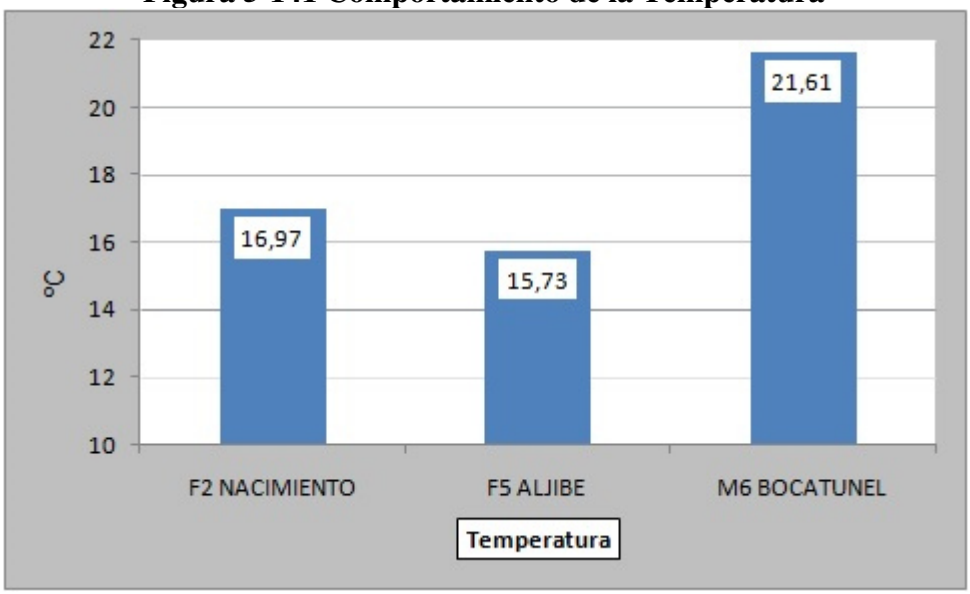
- Parámetros in situ

– Temperatura

La temperatura del agua influye en los procesos vitales para los organismos vivos y a su vez en la descomposición de la materia orgánica. Las muestras de agua subterránea analizadas, presentan una temperatura promedio de 18,1ºC con una temperatura máxima de

21,61ºC evidenciada en las muestras tomadas en la boca del túnel de occidente y una mínima de 15,73ºC en la muestra F5 (Aljibe), siendo consistentes con la temperatura ambiente del momento que se tomo la muestra y por consiguiente sugiriendo una buena calidad de la misma Figura 5-141.

Figura 5-141 Comportamiento de la Temperatura



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

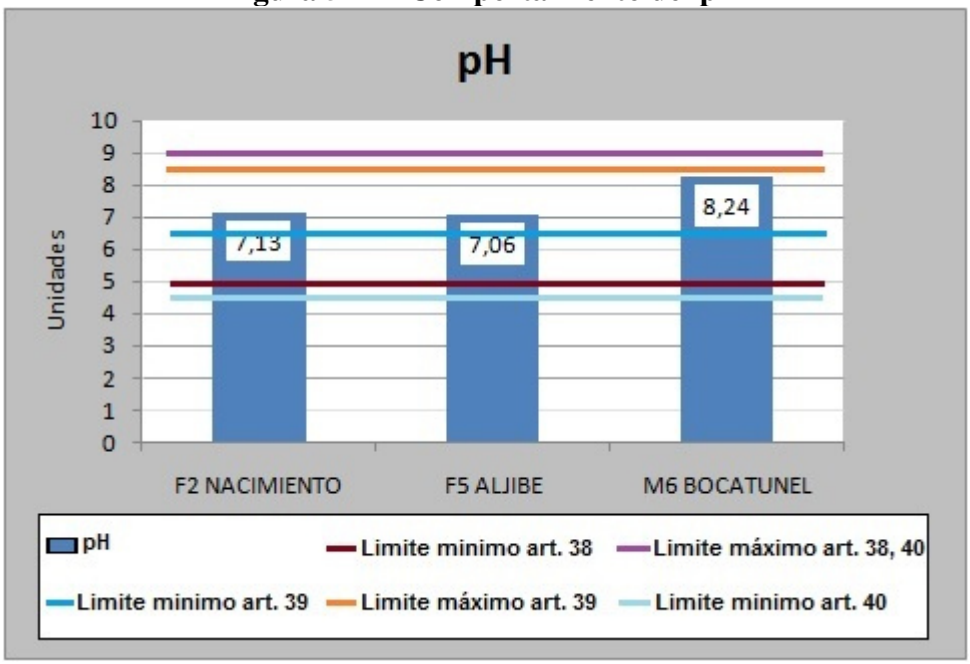
- Potencial de hidrógeno

El pH es un factor muy importante en las propiedades químicas y biológicas de las aguas naturales, ya que nos establece el grado de acidez o basicidad de las mismas.

De acuerdo a la información recolectada en el momento de recolección de las muestras el potencial de hidrogeniones reportado en el conjunto de muestras de agua subterránea objeto de estudio, registran una tendencia de valores entre neutro y alcalino, en donde el punto más alcalino con un pH de 8,24 se encuentra en el punto identificado como M6 el cual recoge las aguas infiltradas del túnel de occidente, en los demás puntos se encuentra acides neutra que se encuentra entre 7,13 y 7,06, posiblemente el resultado registrado con un carácter alcalino se relacione con la presencia de minerales en el agua.

En cuanto al cumplimiento normativo, todos los puntos cumplen con el nivel permisible de pH de acuerdo al artículo 39 Decreto 1594 de 1984 del Ministerio de Salud el cual indica que uno de los “criterios de calidad admisibles parta la destinación del recurso para consumo humano y domestico” es el pH y el cual no puede sobrepasar los límites dados entre el intervalo de 6,5 y 8,5 de acidez Figura 5-142.

Figura 5-142 Comportamiento del pH

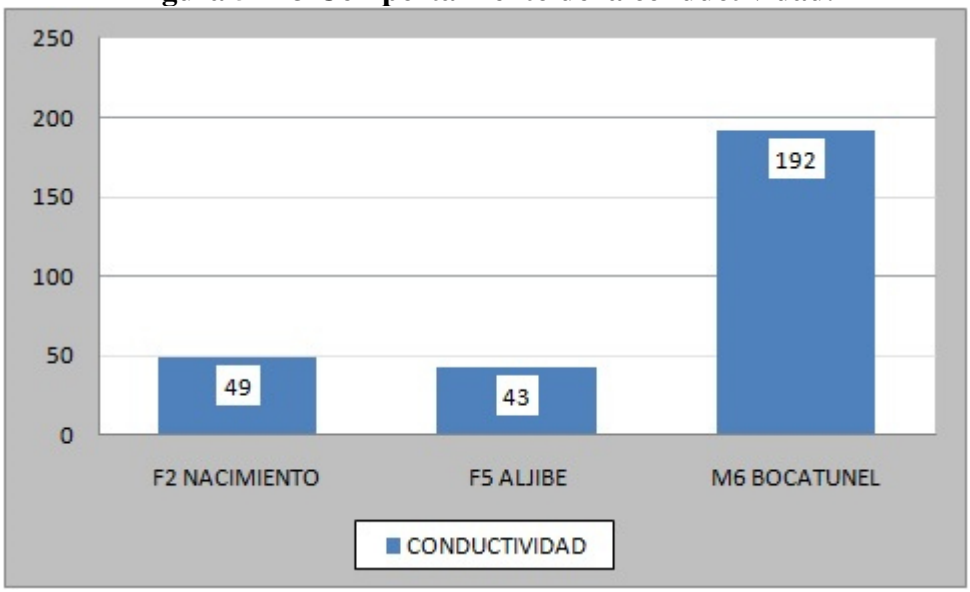


Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

- Conductividad

La conductividad es una medida indirecta de la cantidad de iones en solución (fundamentalmente Cloruro, Nitrato, Sulfato, Fosfatos, Sodio, Magnesio y Calcio), la cual nos permite inferir el grado de mineralización de las aguas. La Figura 5-143 evidencia que se registraron mayor concentración en el punto denominado como M6 Bocatúnel debido a la concentración de sales recogidos por las aguas en su tranposrte por la unidad geologica lo cual permite una acumulación por la mineralización de las rocas que la componen, las otras dos muestras muiestran menor concentración en un intervalo parecido auqnue la de menor conductividad es la muestra tomada en el punto F5 Aljibe

Figura 5-143 Comportamiento de la conductividad.



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

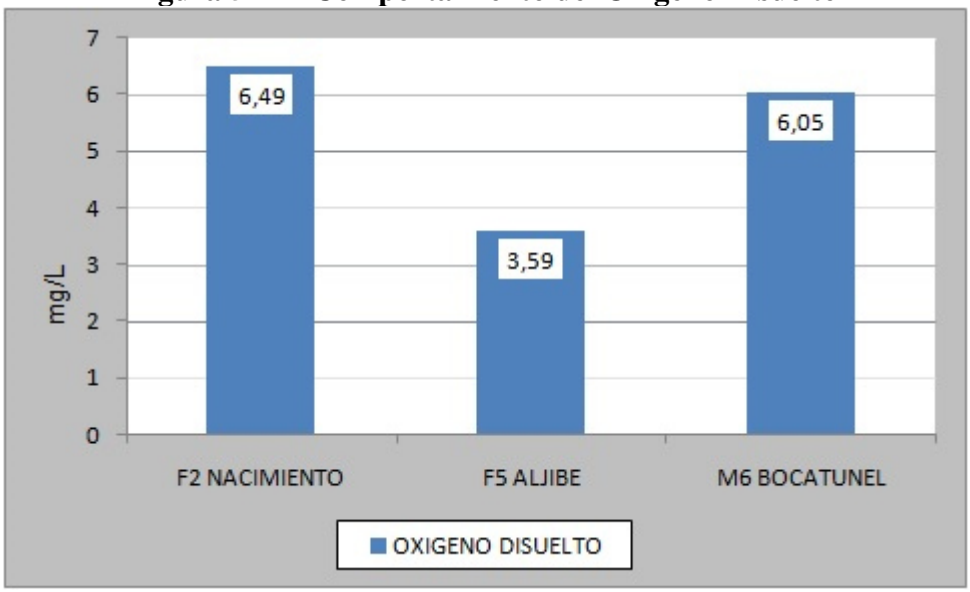
- Conductividad

La determinación del oxígeno disuelto es práctica cada vez más frecuente en los análisis químicos de agua. Su importancia deriva del hecho de su capacidad de oxidación de diferentes tipos de constituyentes que se encuentran en forma reducida y de modificar, en consecuencia, la solubilidad de los mismos. El contenido en oxígeno disuelto sirve como indicador de las condiciones bioquímicas del agua en un lugar y momento determinado.

La concentración de O2 normal en aguas subterráneas puede llegar incluso a valores de saturación, variables en función de la presión y la temperatura (13.3 mg/l. a 10°C. 7.6 mg/l. a 30°C). Sin embargo las aguas anóxicas son frecuentes. (IGME y EPTISA, 1985).

Con referencia a los resultados obtenidos es posible decir que en general hay bajos niveles de Oxigeno lo cual es frecuente en aguas subterráneas. Con referencia a la normativa los artículos 38, 39, 40 y 41 del Decreto 1594 de 1984 no establecen límites máximos permisibles.

Figura 5-144 Comportamiento del Oxigeno Disuelto



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

– Parámetros analizados en Laboratorio vs Normatividad

De acuerdo a la normatividad vigente en el Decreto 1594/84 a continuación en la Tabla 5-92 se presentan los parámetros de las tres muestras tomadas, 1 tomada en el nacimiento nombrado como "F2 Nacimiento" y 1 en el aljibe nombrado como "F5 Aljibe".

Tabla 5-92 Parámetros analizados en el laboratorio.

PARAMETRO	UNIDADES	F2 NACIMIENTO	F5 ALJIBE	M6 BOCATUNEL	Limites Normativos Decreto 1594/84				Cumplimiento
					Art.38	Art.39	Art.40	Art.41	
ACIDEZ TOTAL	mg/L $CaCO_3$	<5	5,79	<5	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
ALCALINIDAD TOTAL	mg/L CaCO3	34	31	108	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
BARIO	mg/L	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	0,1	N.E.	No Cumple
CADMIO	mg/L	<0,005	<0,005	<0,005	0,01	0,01	0,01	0,05	Cumplen
CALCIO TOTAL	mg/L	3,7	1,4	-	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
COBRE	mg/L	<0,03	<0,03	<0,03	1,0	1,0	0,2	0,5	Cumplen
COLIFORMES FECALES	NMP/100 mL	53,9	197	2	2000	N.E.	1000	N.E.	Cumplen
COLIFORMES TOTALES	NMP/100 mL	62,9	395	2	20000	1000	5000	N. E.	Cumplen
CROMO TOTAL	mg/L	<0,05	<0,05	<0,07	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
DBO5	mg/L	3	4	4	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
DQO	mg/L O_2	<5	<5	<5	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
DUREZA CALCICA	mg/L CaCO3	13	17,5	62	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
DUREZA TOTAL	mg/L	18,5	20	85	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.

PARAMETRO	UNIDADES	F2 NACIMIEN	F5 ALJIBE	M6 BOCATU	Limites Normativos Decreto 1594/84				Cumplimiento
	CaCO3								
FOSFORO TOTAL	mg/L P	-	-	1	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
GRASAS Y ACEITES	mg/L	0,5	<0,52	0,6	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
MAGNESIO TOTAL	mg/L	1,8	1,4	-	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
NITROGENO TOTAL	mg/L	<2	<2	<2	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
NIQUEL	mg/L	<0,1	<0,1	<0,1	N.E.	N.E.	0,2	N.E.	Cumplen
OLOR		Aceptable	No aceptable	-	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
PLATA	mg/L	0,09	0,08	0,1	0,05	0,05	N.E.	N.E.	No Cumple
PLOMO	mg/L	<0,1	<0,1	<0,1	0,05	0,05	5,0	0,1	No Determinado
SABOR	zl	No aceptable	No aceptable	-	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	mg/L	10	59	<5	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
SOLIDOS TOTALES	mg/L	43	87	119	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.	N.E.
TURBIEDAD	NTU	5	12	1,5	N.E.	190	N.E.	N.E.	Cumplen
ZINC	mg/L	<0,04	<0,01	<0,0076	15	15	2,0	25	Cumplen
MERCURIO	mg/L	<0,0019	<0,0019	<0,0019	0,002	0,002	N.E.	0,01	Cumplen
SELENIO	mg/L	<0,009	<0,009	<0,009	0,01	0,01	0,02	N.E.	Cumplen

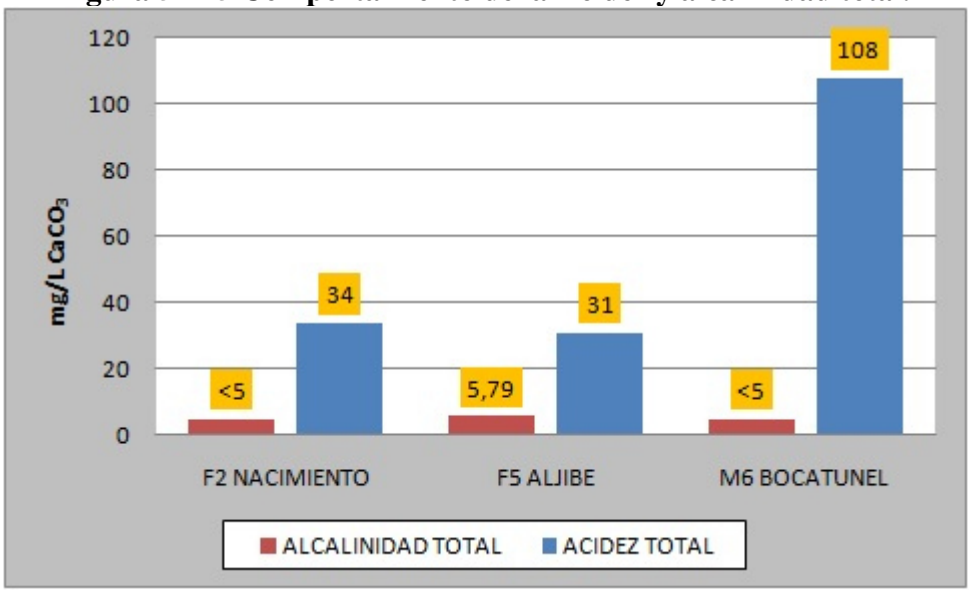
N.E. = No Establecido

En los puntos de agua subterránea monitoreados no se halló presencia de compuestos de interés sanitario como arsénico, molibdeno, cobalto, zinc, plomo, mercurio, estroncio, cromo y cobre, ya que se presentan en concentraciones por debajo de lo establecido en las normas de calidad evaluadas, cumpliendo con los límites permisibles de la reglamentación vigente establecida en la Resolución 2115/07 y el Decreto 1594/84. Se presenta afectación puntual al agua por la presencia de bario y plata con excedentes muy ligeros lo cual y puede deberse a fenómenos muy locales.

- Acidez, Alcalinidad, Bicarbonatos:

Los valores obtenidos en los parámetros de alcalinidad y acidez indican que las aguas de todos los puntos F2 Nacimiento, F5 Aljibe y las aguas de boca del túnel ya construido presentan una alcalinidad diferente los puntos denominados “F2 Nacimiento” y “M6 Bocatunel” tienen la misma alcalinidad con un <5 mg/L $CaCO_3$ con un ligero aumento en el punto denominado “F5 Aljibe”, la acides total se encuentra en un promedio bajo en los puntos de nacimiento y aljibe pero en el punto de bocatunel si se encuentra muy alto, posiblemente por la acumulación de minerales de las unidades que captan dichas aguas (ver Figura 5-145).

Figura 5-145 Comportamiento de la Acidez y alcalinidad total.



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

- Dureza Cálcica y Dureza Total

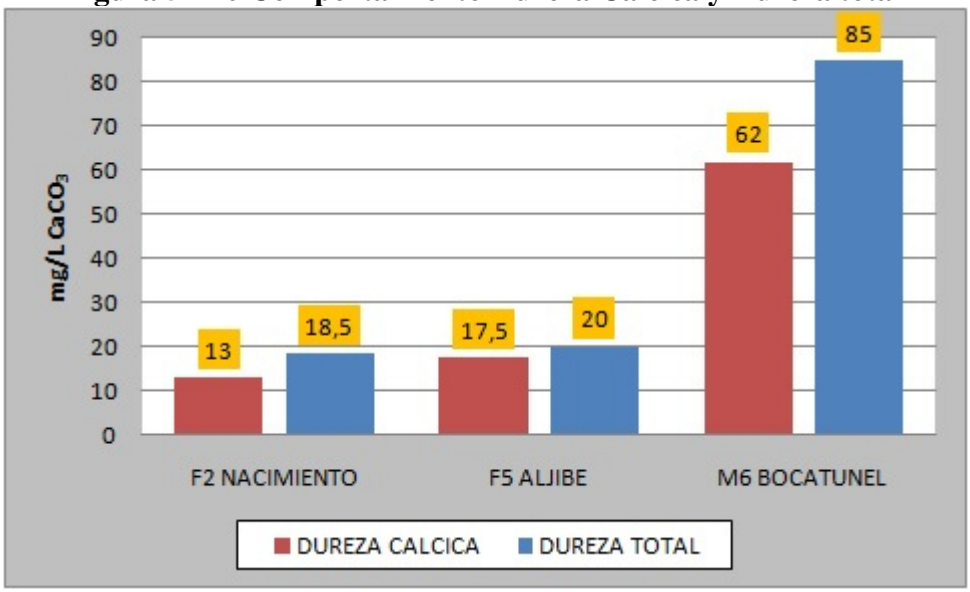
La dureza total se define comoe la cantidad de sales de elementos alcalini-terreaos (Berilo, Magnesio, Calcio, Estroncio, Bario y Radio) se encuentran presentes en el agua y que normalmente se asocia a la formación de incrustaciones calcáreas. Si bien el concepto de dureza incluye diversos elementos, en la práctica, la dureza de un agua se corresponde únicamente con la cantidad de calcio y magnesio existentes.

En lo que respecta a los resultados obtenidos es posible decir que el punto denominado "M6 Bocatunel" registró las mayores concentraciones de Dureza Total y Cálcica, posteriormente se encuentran las concentraciones registradas en los otros dos puntos. Lo anterior permite inferir que las aguas del tunel son consideradas como duras y muy duras lo cual es asociado directamente con los contenidos de Calcio y Magnesio.

Es importante decir que la dureza de las aguas subterráneas naturales varía generalmente entre 10 y 300 mg/L de CaCO3, pudiendo llegar a 2000 o más. (IGME y EPTISA, 1985)

Con referencia a la normativa el Decreto 1594 de 1984 no establece límites máximos permisibles para estos parámetros

Figura 5-146 Comportamiento Dureza Calcica y Dureza total



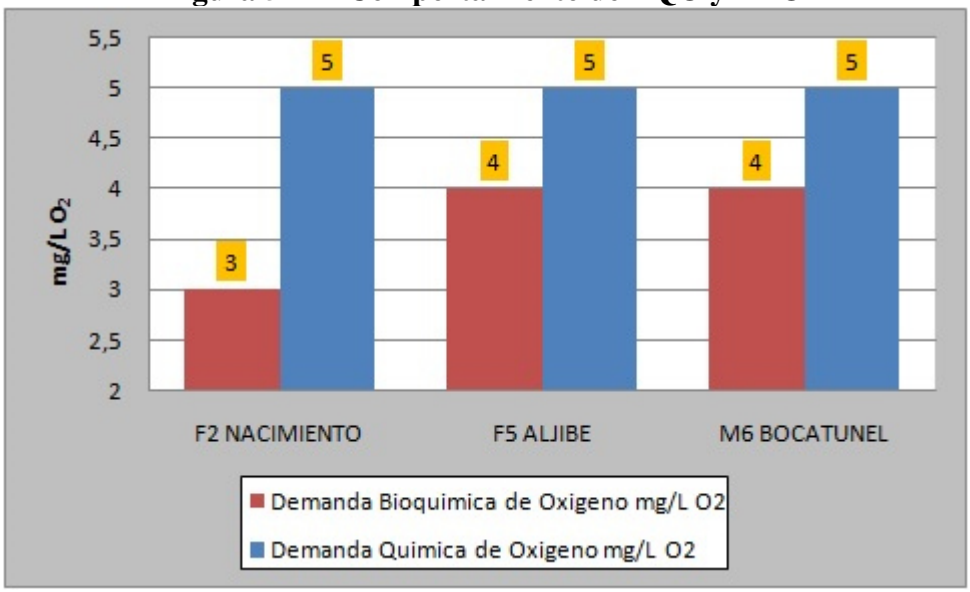
Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

- DBO y DQO

Los parámetros DBO y DQO han sido ampliamente utilizados para caracterizar la carga contaminante. Las aguas naturales sin contaminar presentan concentraciones de materia orgánica muy bajas. La contaminación por materia orgánica tiene en general tres orígenes: doméstico/urbano, agrícola e industrial. Se puede hacer una subdivisión de la materia orgánica de un agua en biodegradable y no biodegradable. (Gobierno de Navarra, 2012).

Con referencia a los resultados obtenidos es posible afirmar que el parámetro DQO tuvo un comportamiento similar entre los 3 puntos evaluados. Por otra parte el parámetro DBO registro un comportamiento similar en donde solo se vio el decesnso de 1 mg/L de O_2 en el punto de muestreo denominado "F2 Nacimiento" y los otros dos puntos tiene un comportamiento igual como se puede observar en la Figura 5-147.

Figura 5-147 Comportamiento de DQO y DBO



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

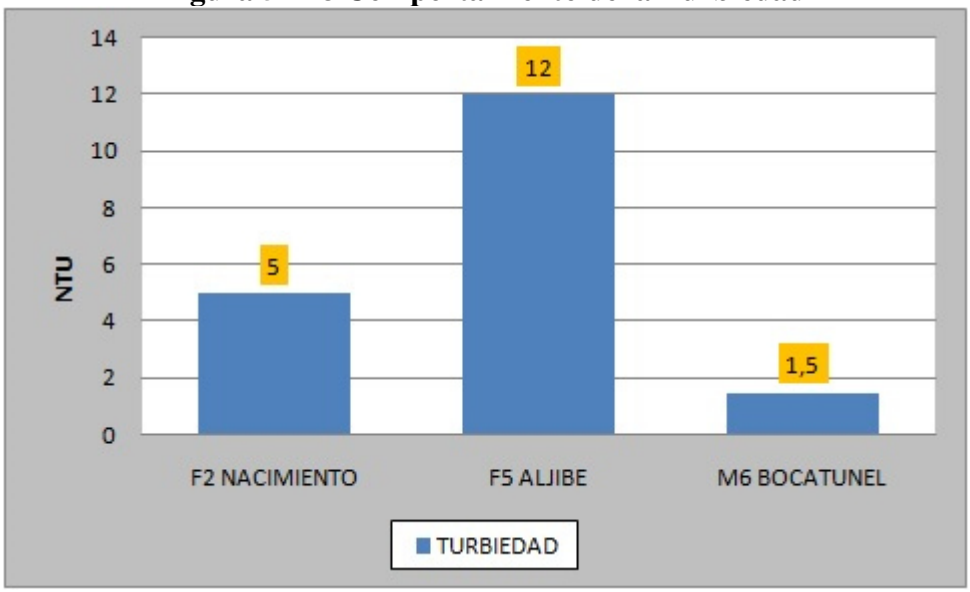
- Turbiedad y Color Verdadero

La turbidez de una muestra de agua, es una medida de la pérdida de su transparencia ocasionado por el material particulado o en suspensión contenida en el agua.

Con referencia a los resultados obtenidos en la Figura 5-148 se puede evidenciar que el punto denominado "F5 Aljibe" se registró el nivel más alto, lo cual es asociado con el contenido de solidos suspendidos.

En lo que respecta al Decreto 1594 de 1984 el artículo 39 establece un límite máximo permisible para este parámetro de 10 UJT lo cual es equivalente a 190 NTU. En este sentido las unidades de Turbiedad reportadas en los tres puntos de monitoreo cumplen satisfactoriamente con lo dispuesto en dicha normativa.

Figura 5-148 Comportamiento de la Turbiedad



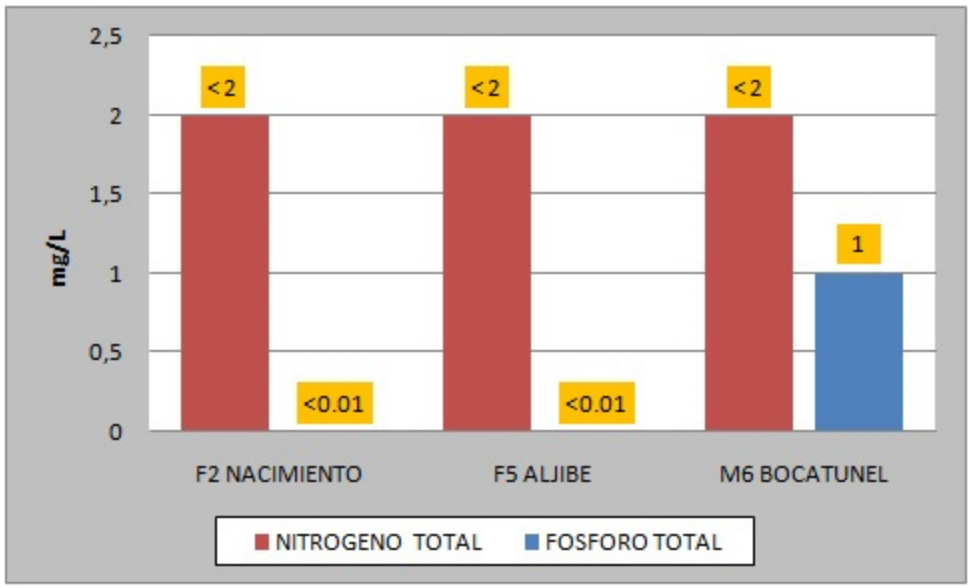
Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

- Nitrógeno Total

El Nitrógeno es un indicador relevante en los estudios medioambientales, debido a la importancia que este tiene en los procesos de tratamiento, en el control de la calidad de las aguas y de las descargas de las aguas residuales al medio. Los nutrientes como los compuestos nitrogenados (Nitrógeno Amoniacal, Nitratos y Nitritos) que provienen de la degradación de la materia muerta, junto con el fósforo son esenciales en el metabolismo de las especies tanto vegetales como animales. En aguas subterráneas las fuentes son diversas como lixiviación, escorrentía, infiltración y uso de fertilizantes.

En la Figura 5-149 se identifican las concentraciones de los parámetros de Nitrógeno Total y Fosforo Total, en el parámetro de Nitrógeno total se ven valores inferiores a 2 mg/L, y en al parámetro de Fosforo Total se encuentran valores inferiores al límite de detección en los puntos identificados como “F1 Nacimiento y F5 Aljibe” en el punto llamado “F5 Bocatúnel” o cuantificación de la técnica de análisis empleada por el laboratorio. En lo que respecta a la normativa el Decreto 1594 de 1984 no establece límites máximos permisibles para este parámetro.

Figura 5-149 Nitrógeno Total



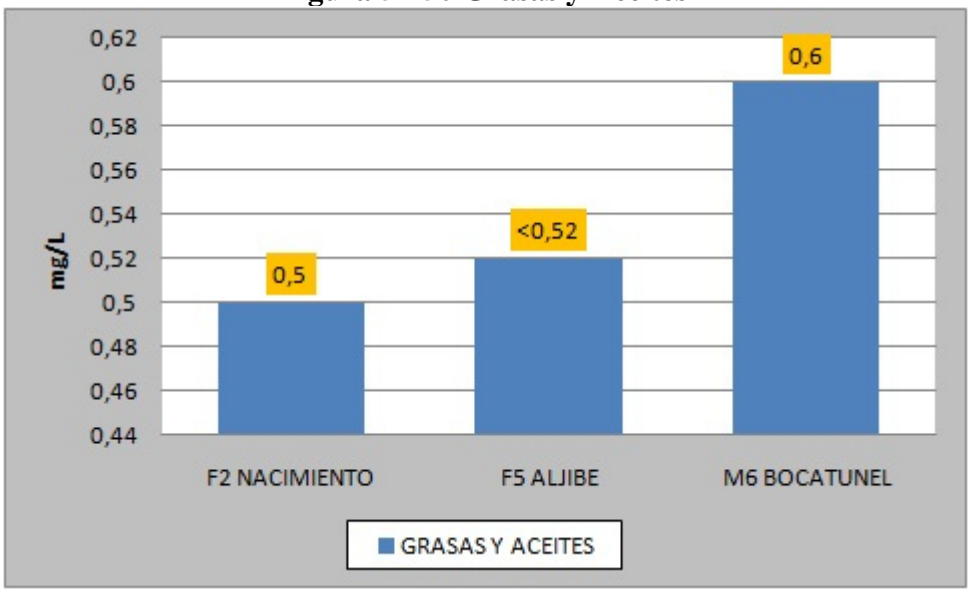
Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

– Grasas y Aceites

Las Grasas y aceites son considerados como compuestos orgánicos que pueden ser aportados a los cuerpos de agua por desechos y descomposición de seres vivos. De igual manera pueden llegar a las fuentes naturales de agua por vertimientos industriales.

En la Figura 5-150 se puede ver que el parámetro de Grasas y Aceites registraron concentraciones muy bajas, que se encuentran en valores inferiores a 0.6 mg/L. En lo que respecta a la normativa el Decreto 1594 de 1984 no establece un límite máximo permisible para el parámetro Grasas y Aceites.

Figura 5-150 Grasas y Aceites



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

- Solidos

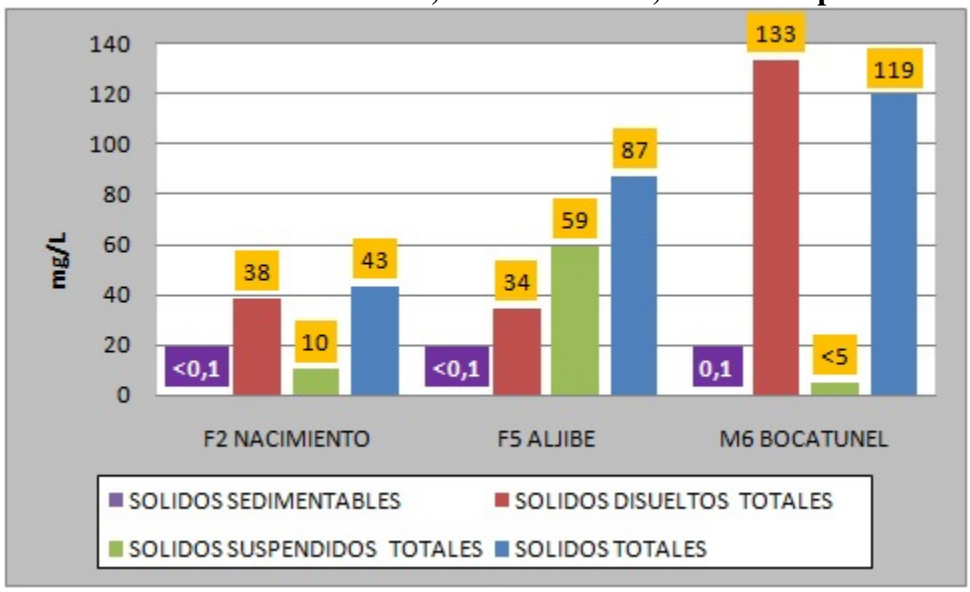
Con relación a los sólidos presentes en los tres puntos de monitoreo se establece que la totalidad de los mismos estuvo determinada principalmente por los sólidos disueltos asociados a la cantidad de sales inorgánicas (principalmente de Calcio, Magnesio, Bicarbonatos, Cloruros y Sulfatos) y pequeñas cantidades de materia orgánica que puedan estar presentes en los puntos de muestreo. Se considera generalmente que, con concentraciones del total de sólidos disueltos en el rango 50 a 600 mg/litro, el agua tiene un sabor agradable, que se deteriora progresivamente cuando la concentración sobrepasa los 1000 mg/litro con un límite superior de 1500 mg/litro. (Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, 2008). El Decreto 1594 de 1984 en el artículo 41 establece un límite máximo permisible para el contenido de sales de 3000 (Peso Total), teniendo en cuenta este criterio es posible decir que los tres puntos de monitoreo cumplen a cabalidad con lo establecido.

En lo que respecta a los parámetros Sólidos Sedimentables y Sólidos Suspendidos se registraron concentraciones muy bajas menores al límite de detección para 2 puntos los identificados como “F2 Nacimiento” y “M6 Bocatunel” en la cuantificación de la técnica de análisis empleada por el laboratorio. Con referencia a la normativa el Decreto 1594 de 1984 no establece límites máximos permisibles para estos parámetros.

A continuación se ilustra el comportamiento de cada sólido en los sitios de muestreo evaluado, donde es notorio que el punto denominado “M6 Bocatunel” registró las mayores concentraciones, posterior a este punto se encontraron las concentraciones del punto “F5 Aljibe” y finalmente el punto “F2 Nacimiento” registró las concentraciones más bajas (ver

Figura 5-151)

Figura 5-151 Sólidos Disueltos totales, Sólidos Totales, Sólidos suspendidos Totales



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

- Parámetros Microbiológicos

El análisis bacteriológico es vital en la prevención de epidemias como resultado de la contaminación de agua, el ensayo se basa en que todas las aguas contaminadas por aguas residuales son potencialmente peligrosas, por tanto en control sanitario se realiza para determinar la presencia de contaminación fecal. La determinación de la presencia del grupo Coliformes se constituye en un indicio de polución así como la eficiencia y la purificación y potabilidad del agua. (Roldán, 2003)

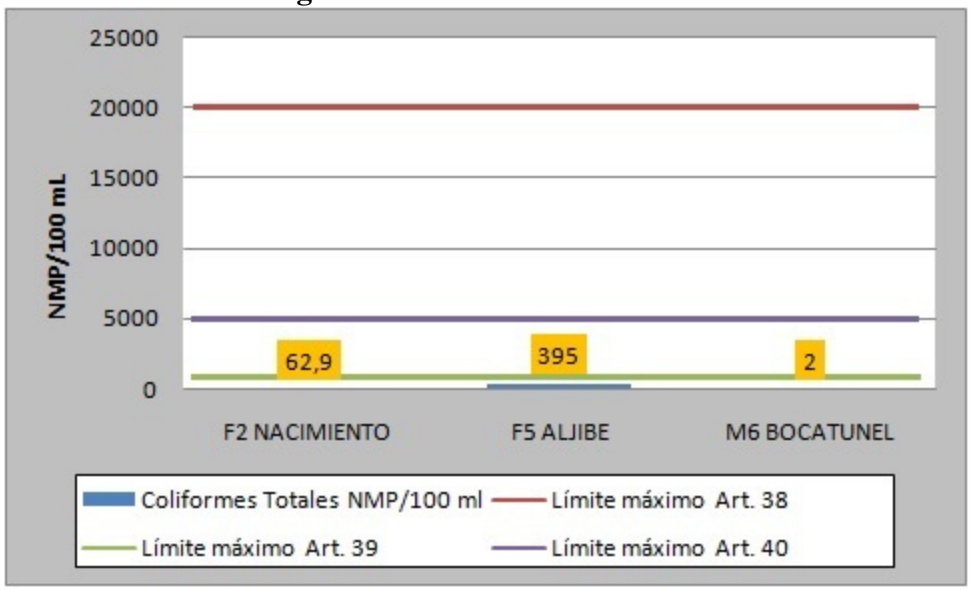
– Coliformes Totales

Los coliformes totales, son bacilos Gram negativos, que crecen entre los 35 y 37°C presencia de sales biliares y en 24 horas fermentan lactosa produciendo ácido y gas. En este grupo se incluyen Escherichia coli y miembros de los géneros Citrobacter, Enterobacter y Klebsiella. Sin embargo, bajo estas condiciones pueden aislarse especies de estos géneros no relacionados con materia fecal, por lo que se requiere otros indicadores más específicos. (Hernández, 2002).

En aguas tratadas, los coliformes totales funcionan como un alerta de que ocurrió contaminación, sin identificar el origen. Indican que hubo fallas en el tratamiento, en la distribución o en las propias fuentes domiciliarias. Su presencia acciona los mecanismos de control de calidad y de procesamiento dentro de la planta de tratamiento de agua, e intensifica la vigilancia en la red de distribución.

Con referencia a los resultados obtenidos (ver Figura 5-152) se evidencia un comportamiento heterogéneo de este parámetro donde las concentraciones mas altas se encuentran en el punto identificado como "F5 Aljibe" (395 NMP/100ml), el punto que le sigue en escala decendente es el identificado como "F2 Nacimiento" (62,9 NMP/100ml) y por ultimo el punto "M6 Bocatunel" (2 NMP/100ml). Es importante decir que teniendo en cuenta los datos de Coliformes Fecales se infiere que la totalidad de las Coliformes proviene del suelo y no por origen fecal. En lo que respecta a la normativa se registra cumplimiento a cabalidad de los artículos 38,39 y 40 del Decreto 1594 de 1984.

Figura 5-152 Coliformes totales



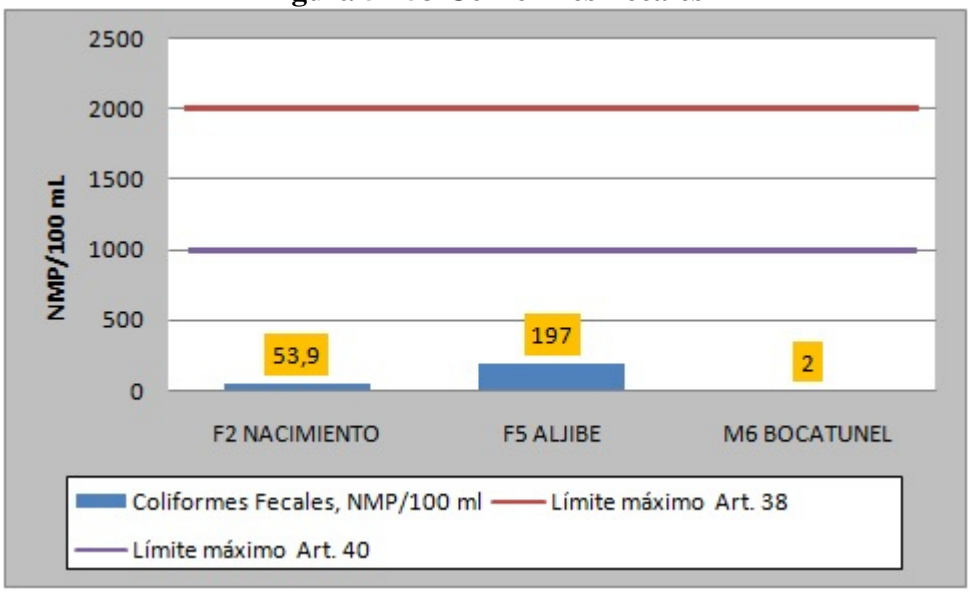
Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

– Coliformes Fecales

Las Coliformes fecales o Coliformes termotolerantes presentan las mismas características anteriores, sin embargo son capaces de reproducirse a temperaturas entre 44°C y 44.5°C. En este grupo la principal bacteria que representa la meta de identificación es Escherichia coli, sin embargo bajo estas condiciones también se pueden cultivar algunas especies de los géneros indicados previamente (Citrobacter, Enterobacter y Klebsiella) (Hernández, 2002).

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5-153, en donde se identifica que los puntos con mas altas concentraciones de coliformes fecales son los del punto identificado como "F5 Aljibe" seguido por el punto "F2 Nacimiento" y "M6 Bocatunel, con el nivel mas bajo de coliformes fecales detectados. Es importante decir que auqnque el punto "F5 Aljibe" tiene el nivel mas alto de coliformaes fecales los resultados infieren que la totalidad de los Coliformes proviene del suelo y no por origen fecal. En lo que respecta a la normativa se registra cumplimiento a cabalidad de los artículos 38 y 40 del Decreto 1594 de 1984.

Figura 5-153 Coliformes Fecales



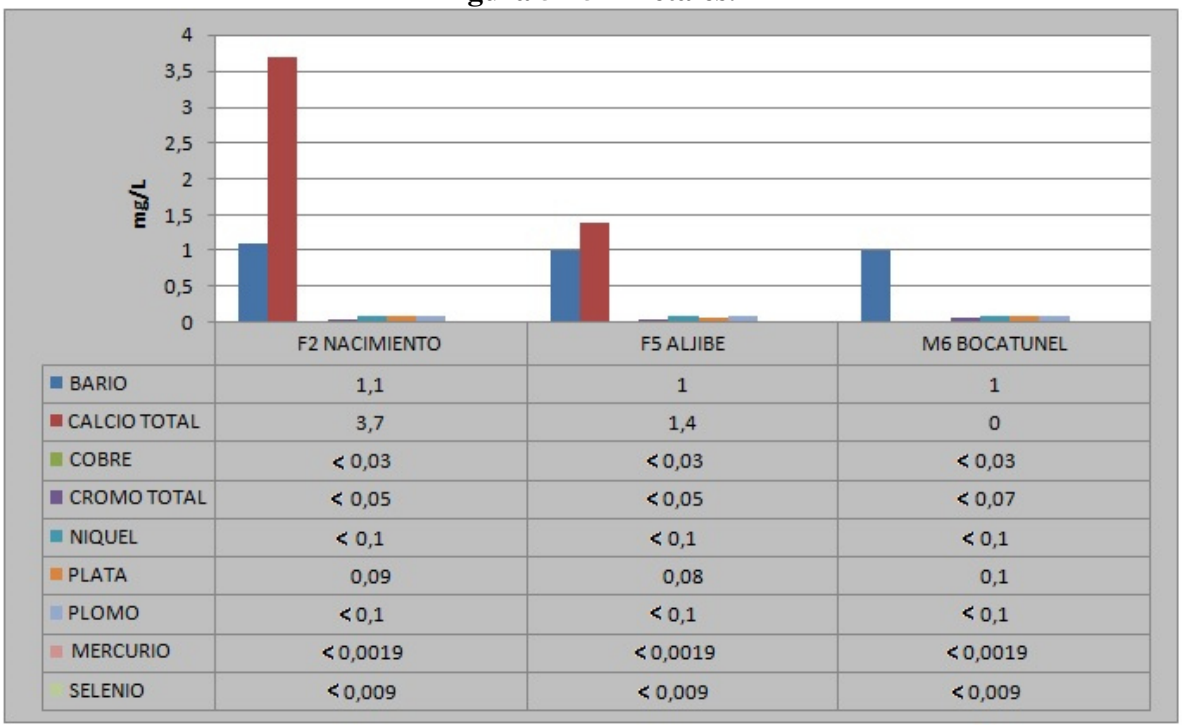
Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

- Metales

Las concentraciones de cobre, cromo niquel, plomo mercurio y selenio reportaron el limite de detección o cuantificación de la técnica analítica empleada por el laboratorio en los tres puntos de muestreo, se identifican concentraciones altas de Calcio en el punto identifdicado como “F2 Nacimiento” y valores promedio en Bario.

En cuanto al cumplimiento normativo los valores son sobrepasados en el parámetro de concentración de Plata en los tres puntos monitoreadosy los limites también son sobrepasados en el parámetro de concentración de Bario en los tres puntos monitoreados específicamente en los limites dados en el articulo 40 el cual trata de “los criterios admisibles para la destinación del recurso agrícola”, en cuanto a los demás valores se cumplen los limites estipulados en los artículos 38, 39, 40 y 41 establecidos en el Decreto 1594 de 1984.

Figura 5-154 Metales.



	F2 NACIMIENTO	F5 ALJIBE	M6 BOCATUNEL
BARIO	1,1	1	1
CALCIO TOTAL	3,7	1,4	0
COBRE	< 0,03	< 0,03	< 0,03
CROMO TOTAL	< 0,05	< 0,05	< 0,07
NIQUEL	< 0,1	< 0,1	< 0,1
PLATA	0,09	0,08	0,1
PLOMO	< 0,1	< 0,1	< 0,1
MERCURIO	< 0,0019	< 0,0019	< 0,0019
SELENIO	< 0,009	< 0,009	< 0,009

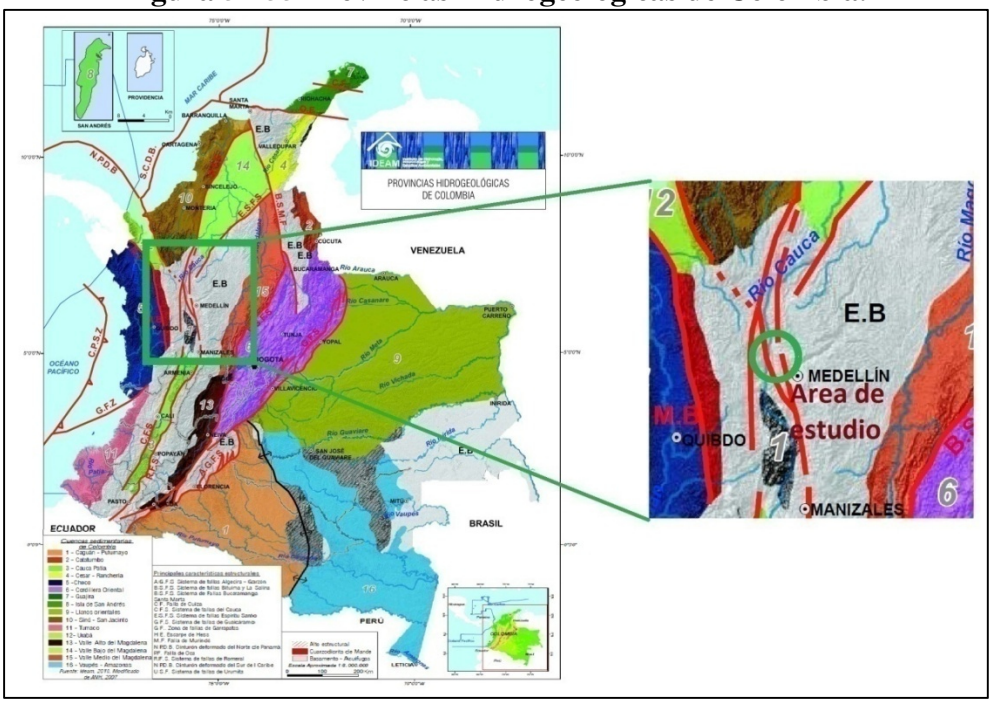
Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

Se intentaron generar diagramas de Piper y Stiff, pero no se obtuvieron parámetros de Na, K, HCO3, CO2, confiables de donde se pudieran generar interpretaciones confiables, sin embargo se plantea como medida de seguimiento y monitoreo realizar análisis fisicoquímicos que involucren porcentajes de Na, K, HCO3, CO2, F, Cl, BR, SO4, PO4, NO3, NO2, SiO2, Fe, Mn, Sr, Li, Al y NH4.

5.1.8.3 Unidades Hidrogeológicas

El país se encuentra subdividido por provincias hidrogeológicas las cuales corresponden a unidades mayores referidas a escalas menores las cuales fueron definidas con base en las unidades tectonoestratigraficas separadas entre sí por rasgos estructurales regionales como fallas y altos estructurales, en su división también se tiene en cuenta la homogeneidad geomorfológica, en este sentido el área de estudio se encuentra localizada en una área descrita por el "estudio Nacional del Agua" realizado por el IDEAM como barreras impermeables ya que se trata de macizos de rocas cristalinas a altos estructurales que afectan la continuidad de las unidades regionales ubicadas en las cuencas sedimentarias del país las cuales tienen unidades con porosidad primaria y conductividad intergranular principalmente donde se encuentran rocas sedimentarias, característica que no se encuentra en las rocas ígneas y metamórficas. (Ver Figura 5-155)

Figura 5-155 Provincias Hidrogeológicas de Colombia.



Fuente: Modificado de IDEAM (2010). Estudio Nacional de Agua.

Para la elaboración de la cartografía hidrogeológica, caracterización de las unidades, y valoración del potencial hidrogeológico de las unidades geológicas se siguieron los lineamientos propuestos en los estándares internacionales, en este sentido se adopta la nomenclatura de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (IAH) "Leyenda Internacional de los Mapas Hidrogeológicos" (UNESCO, International Legend for Hydrogeological Maps, 1983). La leyenda se basa en la asignación de categorías hidrogeológicas con base en el potencial de rocas y sedimentos para almacenar y transmitir agua subterránea, en función de la composición, permeabilidad y capacidad específica de cada unidad litológica evaluada.

En el área de influencia de las unidades funcionales 1 y 3 se encuentran depósitos edad Cuaternario y Complejos Ígneo-metamórficos con edades que van desde el Paleozoico hasta el Cretácico, y la Formación Amagá (miembro superior) unidad sedimentaria de edad Neógeno, de las unidades litológicas presentes se encuentran aflorando en mayor extensión las rocas asociadas a los complejos Ígneo-metamórficos. Estas rocas y sedimentos con diferentes propiedades litológicas, pueden conformar acuíferos por porosidad primaria (Depósitos de edad Cuaternario) y acuitardos con limitados recursos de agua subterránea (Complejos Ígneo-metamórficos).

Teniendo en cuenta las unidades litológicas identificadas en este estudio se realizó la correlación teniendo en cuenta su permeabilidad y capacidad específica promedio, e este sentido se presentan las unidades hidrogeológicas para el área de influencia de las unidades

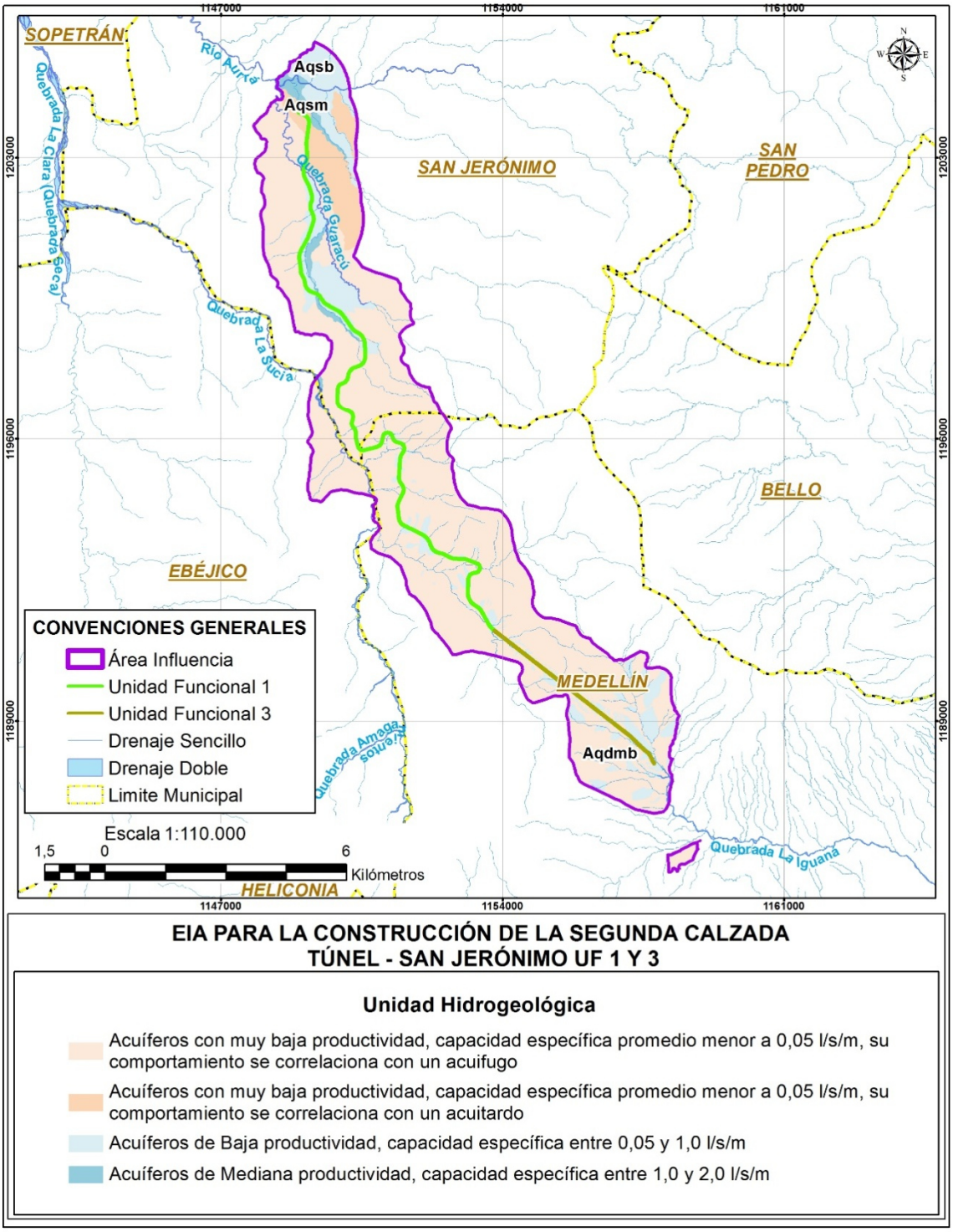
funcionales 1 y 3 (Tabla 5-93).

Tabla 5-93 Unidades Hidrogeológicas presentes en el área de influencia

Sistemas acuíferos presentes en el área de influencia			
	Sistema de Acuífero	**Características de los Acuíferos**	**Unidades Hidrogeológicas**
Sedimentos y rocas con flujo intergranular			
	Acuíferos de Mediana productividad, capacidad específica entre 1,0 y 2,0 l/s/m	Sistemas acuíferos continuos de extensión regional, conformados por sedimentos Cuaternarios no consolidados de ambiente fluvial y aluvial, acuíferos de tipo libre y confinado con aguas recomendables para cualquier uso.	Depósitos aluviales (Qal)
	Acuíferos de Baja productividad, capacidad específica entre 0,05 y 1,0 l/s/m	Sistemas de acuíferos discontinuos de extensión semiregional a local, conformados por sedimentos Cuaternarios no consolidados de ambiente fluvial, continental y litoral, son acuíferos de tipo libre a semiconfinado. Almacena aguas dulces que requieren tratamientos para algunos usos.	Lleno antrópico (Qll)
			Depósitos Coluvioaluviales (Qcal)
			Depósitos de derrubio (Qd)
Sedimentos y rocas con limitados recursos de agua subterránea (basamento hidrogeológico)			
	Acuíferos con muy baja productividad, capacidad específica promedio menor a 0,05 l/s/m, su comportamiento se correlaciona con un acuitardo	Rocas conformadas por Areniscas bien cementadas, color crema arcillas pizarrosas gris verdosas y ocres. Localmente bancos delgados de conglomerados y carbón. Oligoceno tardía – Mioceno Temprano; se comportan como acuitardos.	Miembro Superior, Formación Amaga (Ngas)
	Acuíferos con muy baja productividad, capacidad específica promedio menor a 0,05 l/s/m, su comportamiento se correlaciona con un acuifugo	Complejo de rocas ígneas, metamórficas y volcánicas de edad Cretácica, Jurásica, Paleozoica y Proterozoica son rocas con limitados recursos hídricos, muy compactas y en ocasiones fracturadas; se comportan principalmente como acuifugos.	Diorita de Heliconia-diorita hornbléndica (Kdha-Kdhb)
			Diorita de Altavista (Kida)
			Formación Qebradagrande Miembro volcánico (KvQG)
			Gabros de Romeral (Jgr)
			Grupo Ayurá Montebello (Pes- Pev)
			Granito néisico de Palmitas (Pgnp)

A continuación se describen las principales características de los sistemas acuíferos identificados en el área de influencia, siguiendo la valoración de las unidades desde su capacidad para almacenar agua subterránea, según la metodología desarrollada por AIH (Asociación Internacional de Hidrogeólogos). Las rocas de origen metamórfico e ígneo, tanto plutónico como volcánico, se agruparon en macizos hidrogeológicos, cuya permeabilidad secundaria está determinada por procesos de fracturación. (Ver Figura 5-156)

Figura 5-156 Distribución espacial de las unidades hidrogeológicas en el área de influencia



Fuente: Consultoría Colombiana S.A, 2016

De acuerdo con la clasificación de las unidades roca frente al comportamiento hidrogeológico, se consideran los siguientes tipos:

5.1.8.3.1 Acuíferos

Unidad hidrogeológica que permite el almacenamiento y circulación del agua dadas sus condiciones de permeabilidad suficientes para generar acumulaciones significativas del recurso hídrico, los acuíferos más comunes son las arenas y gravas (materiales no consolidados), pero rocas sedimentarias permeables tales como las Areniscas, Calizas, rocas cristalinas áltamente fracturadas y volcánicas intensamente meteorizadas o fracturadas también pueden ser clasificadas como acuíferos, en el área de estudio se presentan unidades acuíferas en los depósitos Cuaternarios, representan el 16,4% del área de estudio. Se encuentra en las unidades; Depósitos aluviales (Qal), Lleno antrópico (Qll), Depósitos Coluvioaluviales (Qcal) y Depósitos de derrubio (Qd).

5.1.8.3.2 Acuicludos

Unidad geológica que conteniendo agua en su interior incluso hasta la saturación, no la transmite y por lo tanto no es posible su explotación. Se pueden citar como ejemplos los depósitos arcillosos de cualquier origen. En el área de influencia no se encontró unidades con estas características pero algunas intercalaciones arcillosas de las unidades cartografiadas deben constituir acuicludos locales.

5.1.8.3.3 Acuitardos

Unidad geológica que conteniendo apreciables cantidades de agua la transmiten muy lentamente, por lo que no son aptos para el emplazamiento de captaciones de aguas subterráneas, sin embargo, bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical de otros acuíferos, que puede llegar a ser muy importante. En el área de influencia estos están constituidos por el Miembro Superior de la Formación Amaga (Ngas), representan el 6% con 158,33 ha.

5.1.8.3.4 Acuifugos

Son aquellas unidades geológicas que no contienen o contienen cantidades irreleventes del recurso hídrico en sus fracturas, no la pueden transmitir o la transmiten muy lentamente, como por ejemplo un macizo granítico o rocas metamórficas sin meteorización ni y con fracturación muy leve, estas se consideran unidades impermeables. Con un 77,8% ocupa la mayor proporción de área en el área de influencia, constituido por las unidades Diorita de Heliconia-diorita hornbléndica (Kdha-Kdhb), Diorita de Altavista (Kida), Formación Quebradagrande -Miembro volcánico (KvQG), Gabros de Romeral (Jgr), Grupo Ayurá Montebello (Pes- Pev) y Granito néisico de Palmitas (Pgnp).

A continuación se relacionan las áreas y los porcentajes de ocupación en el Área de

Influencia. (Ver Tabla 5-94)

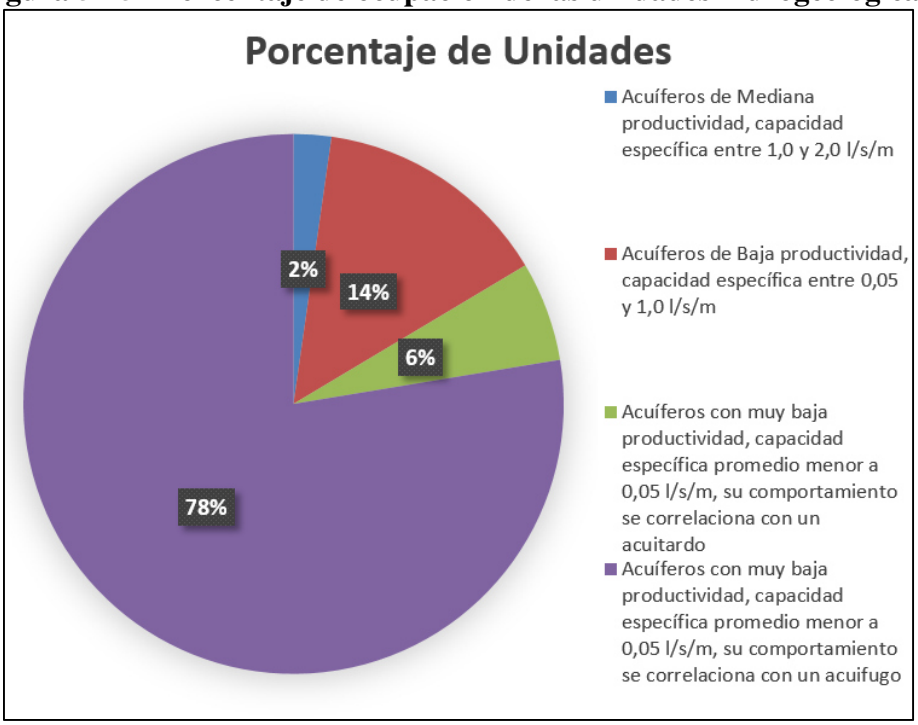
Tabla 5-94 Relación de áreas de las unidades hidrogeológicas para el área de influencia.

Sistema de Acuífero	Unidades Hidrogeológicas	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Sedimentos y rocas con flujo intergranular					
Acuíferos de Mediana productividad, capacidad específica entre 1,0 y 2,0 l/s/m	Depósitos aluviales (Qal)	119,77	2,3%	119,77	2,3%
Acuíferos de Baja productividad, capacidad específica entre 0,05 y 1,0 l/s/m	Lleno antrópico (Qll)	39,07	0,73%	752,58	14,1%
	Depósitos Coluvioaluviales (Qcal)	453,37	8,5%		
	Depósitos de derrubio (Qd)	260,13	4,9%		
Sedimentos y rocas con limitados recursos de agua subterránea (basamento hidrogeológico)					
Acuíferos con muy baja productividad, capacidad específica promedio menor a 0,05 l/s/m, su comportamiento se correlaciona con un acuitardo	Miembro Superior, Formación Amaga (Ngas)	316,66	6,0%	316,66	6,0%
Acuíferos con muy baja productividad, capacidad específica promedio menor a 0,05 l/s/m, su comportamiento se correlaciona con un acuifugo	Diorita de Heliconia-diorita hornbléndica (Kdha-Kdhb)	64,24	1,2%	4161,49	77,8%
	Diorita de Altavista (Kida)	734.61	14,0%		
	Formación Qebradagrande Miembro volcánico (KvQG)	1280,81	24,0%		
	Gabros de Romeral (Jgr)	392,48	7,3%		
	Grupo Ayurá Montebello (Pes- Pev)	1137,21	21,1%		
	Granito néisico de Palmitas (Pgnp)	552,14	10,0%		
Totales		**5350,49**	**100%**	**5350,49**	**100%**

Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

En resumen el basamento hidrogeológico son las unidades que ocupan la mayor proporción de área (83.8); el 6% se correlaciona con los acuitardos y 77,8% con los acuifugos. Las unidades de sedimentos y flujos intergranular son el 16,4% del área, 2,3 % de los acuíferos de mediana productividad y 14,1% de los acuíferos de baja productividad. (Ver Figura 5-157)

Figura 5-157 Porcentaje de ocupación de las unidades hidrogeológicas.



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

Para el área del túnel (Unidad funcional 3), se realizó una caracterización hidrogeológica de mayor detalle teniendo en cuenta las actividades asociadas a la construcción del túnel, en este sentido se presenta la relación de áreas en superficie para el área de influencia del túnel. En la Tabla 5-95 se relacionan las áreas y los porcentajes de ocupación de las unidades hidrogeológicas en el Área de Influencia de la unidad funcional 3.

Tabla 5-95 Relación de áreas de las unidades hidrogeológicas para el área de influencia

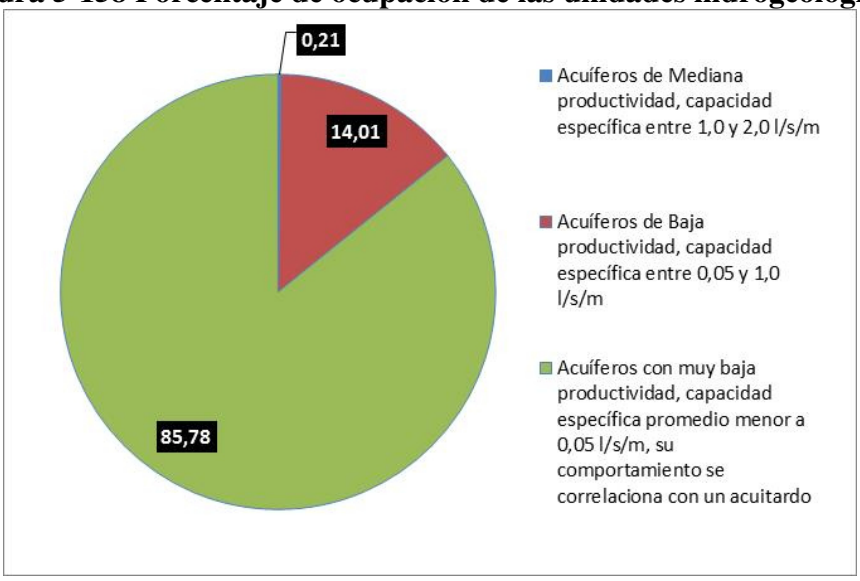
Sistema de Acuífero	Unidades Hidrogeológicas	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Sedimentos y rocas con flujo intergranular					
Acuíferos de Mediana productividad, capacidad específica promedio entre 1,0 y 2,0 l/s/m	Depósitos aluviales (Qal)	2,35	0,21	2,35	0,21
Acuíferos de Baja productividad, capacidad específica promedio entre 0,05 y 1,0 l/s/m	Lleno antropico (Qll)	16,38	1,46	157,46	14,01
	Depósitos Coluvioaluviales (Qcal)	31,29	2,78		
	Depósitos de derrubio (Qd)	109,79	9,77		
Sedimentos y rocas con limitados recursos de agua subterránea					

Sistema de Acuífero	Unidades Hidrogeológicas	Área (ha)	%	Área (ha)	%
Acuíferos con muy baja productividad, capacidad específica promedio menor a 0,05 l/s/m, su comportamiento se correlaciona con un acuitardo	Diorita de Altavista (Kida)	402,69	35,83	964,01	85,78
	Grupo Ayurá Montebello (Pes-Pev)	490,02	43,60		
	Granito néisico de Palmitas (Pgnp)	71,30	6,34		
Totales				1123,82	100

Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

En resumen los acuíferos con muy baja productividad que se encuentran con una capacidad especifica promedio menor a 0,05 l/s/m en donde se encuentra la Diorita de Altavista (Kida), el Grupo Ayura Montebello (Pes-Pev) y el Granito néisico de Palmitas (Pgnp) que representan rocas con limitados recursos de agua subterránea por no poseer porosidad primaria pero poseen una porosidad secundaria, este sistema ocupa un 85,78% del total del área de sustracción, siendo el de mayor representatividad y que se puede correlacionar con acuitardos, le sigue el sistema de de acuíferos de baja productividad en donde se encuentran las unidades llamadas Lleno antrópico (Qll), Depositos Coluvioaluviales (Qcal) y los depósitos de derrubio (Qd) con un 14,01% del total del área y finalmente y con muy baja proporción las áreas de mediana productividad de depósitos aluviales (Qal) con un 0,21% del total del área (Ver Figura 5-158).

Figura 5-158 Porcentaje de ocupación de las unidades hidrogeológicas



Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

Se puede generar una clasificación de los sistemas acuíferos anteriormente descritos teniendo en cuenta su productividad, y capacidad específica promedio, esta clasificación se asocia a las características de permeabilidad para cada unidad litológica así:

- **Sedimentos y rocas con flujo intergranular**

Se definen como sedimentos y rocas con flujo intergranular a los sistemas con una porosidad que permite el flujo del recurso, por lo general se debe a su bajo grado de consolidación y el tamaño de grano.

Sistemas de acuíferos de Mediana productividad, capacidad específica entre 1,0 y 2,0 l/s/m

Estos acuíferos se encuentran representados por depósitos sedimentarios no consolidados de arenas, gravas, limos, de poco espesor, de edad Cuaternario, Pertenecientes a los Depósitos aluviales (Qal). Estos representan el 2,3% del área con 119, 77 hectáreas del área influencia de la unidad Funcional 1 y 3.

El acuífero de los Depósitos aluviales (Qal) se encuentran en los valles de todos los ríos y de algunas quebradas que por su morfología permiten la acumulación de estos sedimentos, donde las pendientes de las corrientes disminuyen y contribuyen a la formación y preservación de amplias llanuras aluviales. Compuesto por gravas gruesas con intercalaciones ocasionales de grava guijosa en matriz arenosa, son acuíferos libres a semiconfinados, de extensión semiregional a regional, con capacidad específica de 1,0 a 2,0 l/s/m.

Sistemas de acuíferos de Baja productividad, capacidad específica entre 0.05 y 1,0 l/s/m

Corresponde a sistemas acuíferos discontinuos de extensión local a semiregional, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados, de ambiente fluvial, aluvial, litoral, que generalmente conforman acuíferos de tipo libre. Almacenan aguas que requiere tratamiento para algunos usos. Dentro de esta unidad acuífera se encuentran el Lleno antrópico (Qll), los Depósitos Coluvioaluviales (Qcal) y los Depósitos de derrubio (Qd). Conforman el 14.1% del área con 752,58 hectáreas del área influencia de la unidad Funcional 1 y 3.

El lleno antrópico son depósitos resultantes principalmente de sobrantes de excavaciones de la construcción de la vía actual Medellín – Santa Fe de Antioquia. Son materiales de composición heterométrica y dimensiones variables, estos depósitos se localizan en un paisaje de montañas, con pendientes medias a fuertemente.

Los Depósitos Coluvio aluviales son producto de los abanicos aluviales y abanicos de terraza, los cuales conforman el piedemonte de la Cordillera Occidental, compuestos por arena gruesa, gris clara, con 10% de bloques angulares de composición de esquistos, granitos y cuarzo.

Los Depósitos de Derrubio son depósitos de ladera de dimensiones variables asociados a movimientos en masa antiguos y recientes, principalmente sobre rocas ígneas y

metamórficas y sobre la zona de alta influencia estructural del sistema de fallas San Jerónimo – La Sucia.

- **Sedimentos y rocas con limitados recursos de agua subterránea**

Son acuíferos con muy baja productividad, comportamiento se correlaciona al de acuitardos y acuifugos, por lo general son unidades sedimentarias de grano muy fino o complejos ígneo-metamórficos que no permiten la conductividad y carecen de propiedades permeables por su alta compactación.

Sistemas de Acuíferos con muy baja productividad, capacidad específica promedio menor de 0,05 l/s/m, que se comportan como acuitardos

Corresponde a un complejo de rocas y sedimentos de baja permeabilidad, compuesto principalmente por arcillolitas pizarrosas, lodolitas carbonosas, arenitas muy bien cementadas, algunas capas de conglomerado del Neógeno, de ambientes fluviolacustres; se comportan como acuitardos. Está representado por los acuíferos del miembro Superior de la Formación Amaga ocupando 316,66 hectáreas, equivalente al 6% del área influencia de la unidad Funcional 1 y 3.

Sistemas de acuíferos con muy baja productividad, capacidad específica promedio menor a 0,05 l/s/m, su comportamiento se correlaciona con un acuifugo

Complejo de rocas ígneas, metamórficas y volcánicas de edad Cretácica, Jurásica, Paleozoica y Proterozoica son rocas con limitados recursos hídricos, muy compactas y en ocasiones fracturadas, compuesto por Diorita de Heliconia-diorita hornbléndica (Kdha-Kdhb). Diorita de Altavista (Kida), Formación Qebradagrande Miembro volcánico (KvQG), Gabros de Romeral (Jgr), Grupo Ayurá Montebello (Pes- Pev) y Granito néisico de Palmitas (Pgnp).

Este sistema acuífero presenta una capacidad especifica menor de 0,05 l/s/m, abarcan la mayor parte de la zona de estudio, correspondiente al 77,6% del área con un total de 4123,26 hectáreas del área influencia de la unidad Funcional 1 y 3; sus posibilidades acuíferas son muy limitadas dependen del grado de meteorización y/o fracturamiento que sufra la roca, generalmente forman parte del basamento hidrogeológico.

Para el área del túnel se generó una cartografía geológica de mayor detalle (escala 1:2000), en este sentido se realizó la asociación de unidades litológicas a unidades hidrogeológicas las cuales se relacionan a continuación, en la Tabla 5-96

Tabla 5-96 Unidades Hidrogeológicas en el área del túnel

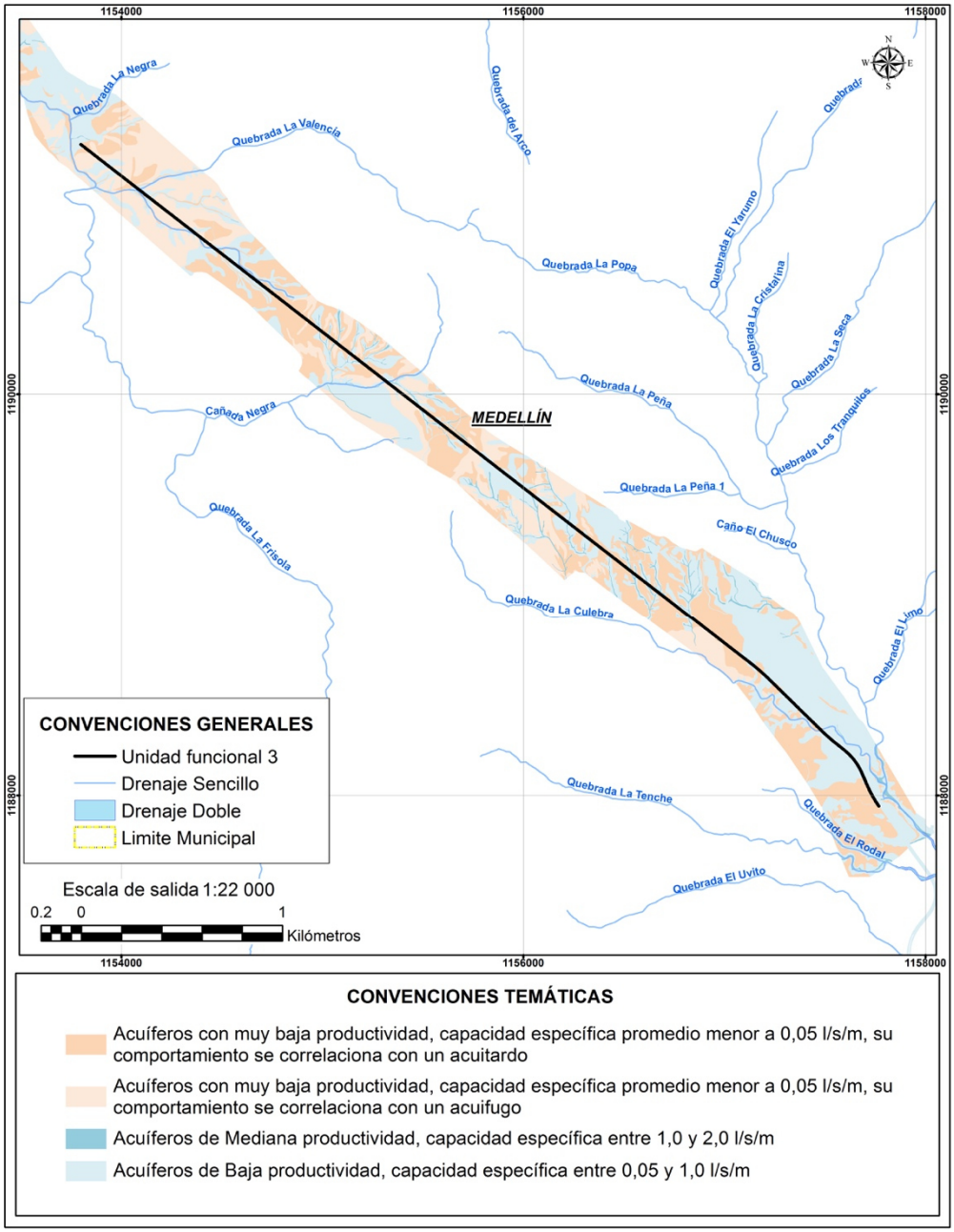
Sistemas acuíferos presentes en el área del túnel			
Sistema de Acuífero		**Caracteristicas de los Acuíferos**	**Unidades Hidrogeológicas**
A. Sedimentos y rocas con flujo intergranular			
A1	Acuíferos de Mediana productividad, capacidad específica entre 1,0 y 2,0 l/s/m	Sistemas acuíferos continuos de extensión regional, conformados por sedimentos Cuaternarios no consolidados de ambiente fluvial y aluvial, acuíferos de tipo libre y confinado con aguas recomendables para cualquier uso.	Depósitos aluviales (Qal)
A2	Acuíferos de Baja productividad, capacidad específica entre 0,05 y 1,0 l/s/m	Sistemas de acuíferos discontinuos de extensión semiregional a local, conformados por sedimentos Cuaternarios no consolidados de ambiente fluvial, continental y litoral, son acuíferos de tipo libre a semiconfinado. Almacena aguas dulces que requieren tratamientos para algunos usos.	Lleno antropico (Qll)
			Depósitos Coluvioaluviales (Qcal)
			Terrazas aluviales (Qt0, Qt1)
			Depósitos de derrubio (Qd)
B. Rocas con flujo escencialmente a través de fracturas (Rocas fracturadas y/o Carstificadas)			
B1	Acuíferos de Baja productividad, capacidad específica entre 0,05 y 1,0 l/s/m	Sistemas de acuíferos discontinuos, de extensión regional y local, de baja productividad, conformados por rocas asociadas a complejos ígeno metamórficos fracturados, confinados	Stock de Altavista (Kida MA)
			Complejo Cajamarca (Pzes MA)
C. Sedimentos y rocas con limitados recursos de agua subterránea (basamento hidrogeológico)			
C1	Acuíferos con muy baja productividad, capacidad específica promedio menor a 0,05 l/s/m, su comportamiento se correlaciona con un acuitardo	Complejo de rocasde arenitas conglomeraticasdel Neógeno, de ambientes fluviolacustres; se comportan como acuitardos.	Miembro Superior, Formación Amaga (Ngas)
			Miembro Medio, Formación Amaga (Pgam)
			Miembro Inferior, Formación Amaga (Pgai)
C2	Acuíferos con muy baja productividad, capacidad específica promedio menor a 0,05 l/s/m, su comportamiento se correlaciona con un acuifugo	Complejo de rocas ígneas, metamórficas y volcánicas de edad Cretácica, Jurásica, Paleozoica y Proterozoica son rocas con limitados recursos hídricos, muy compactas y en ocasiones fracturadas; se comportan principalmente como acuifugos.	Diorita de Heliconia-diorita hornbléndica (Kdhb)
			Batolito de Altavista (Kida)
			Formación Qebradagrande Miembro volcánico (KvQG)
			Gabros de Romeral

Sistemas acuíferos presentes en el área del túnel		
Sistema de Acuífero	**Caracteristicas de los Acuíferos**	**Unidades Hidrogeológicas**
		(Jgr)
		Grupo Ayurá Montebello (Pzes-Pev)
		Granito néisico de Palmitas (Pgnp)

Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

En esta caracterización de detalle se evidencia que para la zona del túnel el Stock de Altavista y el Complejo Cajamarca, estos se encuentran fracturados, lo que genera un flujo de agua a traves de las fracturas generando otra unidad hidrogeológica constituida por rocas y sedimentos con flujo escencialmente a traves de fracturas, teniendo en cuenta la productividad y capacidad específica promedio, esta unidad corresponde a una unidad de baja productividad con una capacidad específica promedio entre 0,05 y 1,0 l/m/s, esta cartografía de detalle sólo se realizó para el área del túnel así como la caracterización estructural del área del túnel, este detalle se incluyó como insumo en la generación de los modelos hidrogeológicos conceptual y numérico.

Figura 5-159 Distribución espacial de las Unidades Hidrogeológicas identificadas en el área del túnel



Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

5.1.8.4 Zonas de recarga y descarga.

La recarga del agua subterránea se realiza principalmente desde el agua lluvia, la condensación generada de las nubes cargadas de humedad recargan los depósitos del

subsuelo. La principal descarga del agua subterránea es natural, y esta fluye a través del subsuelo hacia niveles bases, como el mar (nivel más bajo en la tierra) o hacia el nivel de ríos, arroyos, etc.; también se presenta descarga en los afloramientos del agua, llamados manantiales o nacederos, y en los pozos o aljibes de explotación del agua subterránea.

Regionalmente las zonas de recarga se sitúan en las partes altas (altos topográficos), se infiltran en el subsuelo y generan direcciones de flujo regionales, cuya dinámica se restringe a la disposición espacial de las estructuras geológicas presentes (fallas, diaclasas, pliegues, foliación), se ha podido evidenciar que existe una zona de recarga al Oriente del área de influencia, al otro lado de la Serranía de Valdivias se identifica un altiplano a 2500 m.s.n.m denominado el Pantano, del cual se generan flujos regionales y se pueden evidenciar direcciones de flujo regionales que en el modelo propuesto convergen al túnel existente, esta afirmación se evidencia teniendo en cuenta las características estructurales del macizo rocoso relacionado en el numeral 5.1.1 de geología del presente estudio, y también la modelación de las direcciones de flujo del macizo rocoso incluidas en la elaboración del modelo hidrogeológico incluido mas adelante. Esta zona de recarga situada en el sitio denominado El Pantano por ser de carácter regional y estar ubicada a aproximadamente 7 km al Oriente del área de influencia no se incluye dentro de la caracterización, sin embargo en el Plan de Manejo Ambiental se propone el seguimiento y monitoreo para alimentar y mejorar el modelo presentado en este estudio.

El agua subterránea se encuentra en el subsuelo en las unidades litológicas, donde algunas permiten el almacenamiento y transmisión del recurso hídrico, mientras que otras almacenan el agua, pero la transmiten con dificultad, o no la transmiten, estos se conocen como sistemas acuíferos (acuíferos, acuitardos, acuicludos, acuifugos), los sitios de afloramiento del agua subterránea se conocen como manantiales comúnmente también llamados nacimientos o nacederos y estos se dividen principalmente en permanentes y temporales.

Para determinar las zonas de recarga en el área de influencia se realizó el método Matus, 2007[67], que se aplica con base en ponderaciones de 1 a 5 para los siguientes parámetros: Pendiente (Pend), Tipo de suelo (Ts), tipo de roca (Tr), cobertura vegetal permanente (Cve) y se evaluó el uso del suelo (Us); con base en estas ponderaciones se obtuvo el mapa de zonas de recarga potenciales para el área de influencia (verTabla 5-97).

Las áreas de recarga se pueden categorizar considerando básicamente los siguientes aspectos:

- Pendiente:

La pendiente es un factor importante pues determina el momento de la escorrentía y sus

[67]Matus, O.. (2007). Elaboración participativa de una metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas. Costa Rica: CATIE.

efectos en el suelo, de tal forma que con relieves mas planos no se favorece la escorrentía del agua lo cual permite un mayor contacto del agua con el suelo favoreciendo la infiltración, pero en suelos de altas pendientes aumenta la velocidad de la escorrentía en donde se considera como crítica por el grado de degradación que puede causar al alterar las condiciones de recarga por movimiento rápido de las aguas de escorrentía, este aspecto se le dio una ponderación teniendo en cuenta el porcentaje (%) de pendiente Tabla 5-97.

- Tipo de Suelo:

Este criterio es incluido ya que la textura del suelo refleja la permeabilidad del suelo en donde los suelos arcillosos impiden la recarga; al contrario los suelos recientes no compactados y arenosos facilitan la percolación del agua, para el área de influencia la textura presenta un predominio arcilloso debido a la alteración de las plagioclasas presentes en el complejo ígneo, alterando estas en minerales de arcilla, en este sentido la ponderación se representa en la Tabla 5-97.

- Tipo de Roca:

El material geológico es clasificado de tal forma que se le asigna una ponderación teniendo en cuenta su permeabilidad, si tenemos rocas ígneas o metamórficas no fracturadas poseen una permeabilidad baja lo cual dificulta la recarga la cual aumenta dependiendo de su diaclasamiento, en el otro extremo tenemos las Arenitas gruesas y gravas que poseen alto porcentaje de porosidad y permeabilidad alta, en donde sus espacios intersticiales permiten la trasmisidad del agua y la circulación con gran facilidad, esto permite que sean unidades adecuadas para la recarga de acuíferos, la ponderación asignada se presenta en la Tabla 5-97.

- Cobertura vegetal permanente:

Este índice se introdujo con el fin de ser coherentes con la capacidad del suelo de infiltrar el agua de escorrentía, teniendo en cuenta las implicaciones que tiene la presencia de una cobertura vegetal permanente en el balance hídrico y disminuyendo la velocidad del agua escorrentía lo cual permite una mayor percolación en los suelos presentes, ademas se ha evidenciado que es una de las características que pueden ser mas influenciadas por acciones antrópicas ya que en los demás criterios (sin contar el uso del suelo) la influencia esta dada por la naturaleza en áreas que no han sido intervenidas por el ser humano Tabla 5-97.

- Uso de Suelo:

El uso del suelo es el elemento mas variable e influenciado por la actividad antrópica, el uso inadecuado del suelo contribuye a la disminución de la recarga del acuífero hasta en un 50% aumentando la pérdida del suelo por erosión hídrica o eólica y los riesgos naturales[68]. Stadmuller (1994)[69] señala que el problema de las consecuencias de la deforestación para el

[68] FORGAES (Fortalecimiento de la Gestión Ambiental en El Salvador). sf. Método RAS para determinar la recarga de aguas subterráneas. San Salvador, SV. 40 p

[69] Stadtmuller. (1994). Impacto hidrólogico del manejo forestal de bosques naturales tropicales: medidas para mitigarlo. Coleccion Silvicultura y manejo, 10, pp. 1-61.

régimen hídrico no es la remoción de los árboles cosa que el uso inadecuado (sobreuso) que sigue después si representa incidencia en el problema, este uso inadecuado no corresponde al uso potencial del suelo y no incluye las medidas necesarias e indicadas para la conservación de suelos y aguas, el uso del suelo es un elemento que establece el grado de cómo una determinada actividad o cambio de uso, influye tanto en el deterioro de sus características como en la erosión y la compactación, así como en la reducción de la infiltración y/o recarga hídrica Tabla 5-97.

Tabla 5-97 Variables y evaluación de zonas de recarga

Pendiente (Pend)			
Descripción	%	Ponderación	Posibilidad de recarga
Planos a casi planos	0-6	5	Muy Alta
Moderadamente ondulados	6-15.	4	Alta
Ondulados/cóncavos	15-45	3	Moderada
Escarpados	45-65	2	Baja
Fuertemente escarpados	>65	1	Muy Baja
Tipo de Suelo (Ts)			
Textura		Ponderación	Posibilidad de recarga
Suelos franco arenosos a arenosos.		5	Muy Alta
Suelos francos		4	Alta
Suelos franco limosos		3	Moderada
Suelos Franco arcillosos		2	Baja
Suelos arcillosos		1	Muy Baja
Tipo de roca (Tr)			
Textura		Ponderación	Posibilidad de recarga
Rocas muy permeables, muy suaves constituidas por agregados gruesos, con macro poros interconectados		5	Muy Alta
Rocas permeables constituidas por agregados medianos con poros conectados entre si, ej arenas finas.		4	Alta
Rocas moderadamente permeables, con regular conexión de poros entre si		3	Moderada
Rocas poco permeables un poco duras, moderadamente compactas, constituidas por partículas finas, una combinación de gravas con arcillas, con presencia de fracturas conectadas entre si		2	Baja
Rocas impermeables		1	Muy Baja
Cobertura vegetal permanente (Cve)			
Porcentaje		Ponderación	Posibilidad de recarga
>80%		5	Muy Alta
70-80%		4	Alta
50-70%		3	Moderada
30-50%		2	Baja
<30%		1	Muy Baja

Uso de suelo (Us)		
Uso de suelo	Ponderación	Posibilidad de recarga
Bosque que presentan los tres estratos con árboles, arbustos y hierbas	5	Muy Alta
Sistemas agroforestales o silvopastoriles	4	Alta
Terrenos cultivados y con obras de conservación de suelo	3	Moderada
Terrenos cultivados sin ninguna obra de conservación de suelo y agua	2	Baja
Terrenos agropecuarios, con manejo intensivo	1	Muy Baja

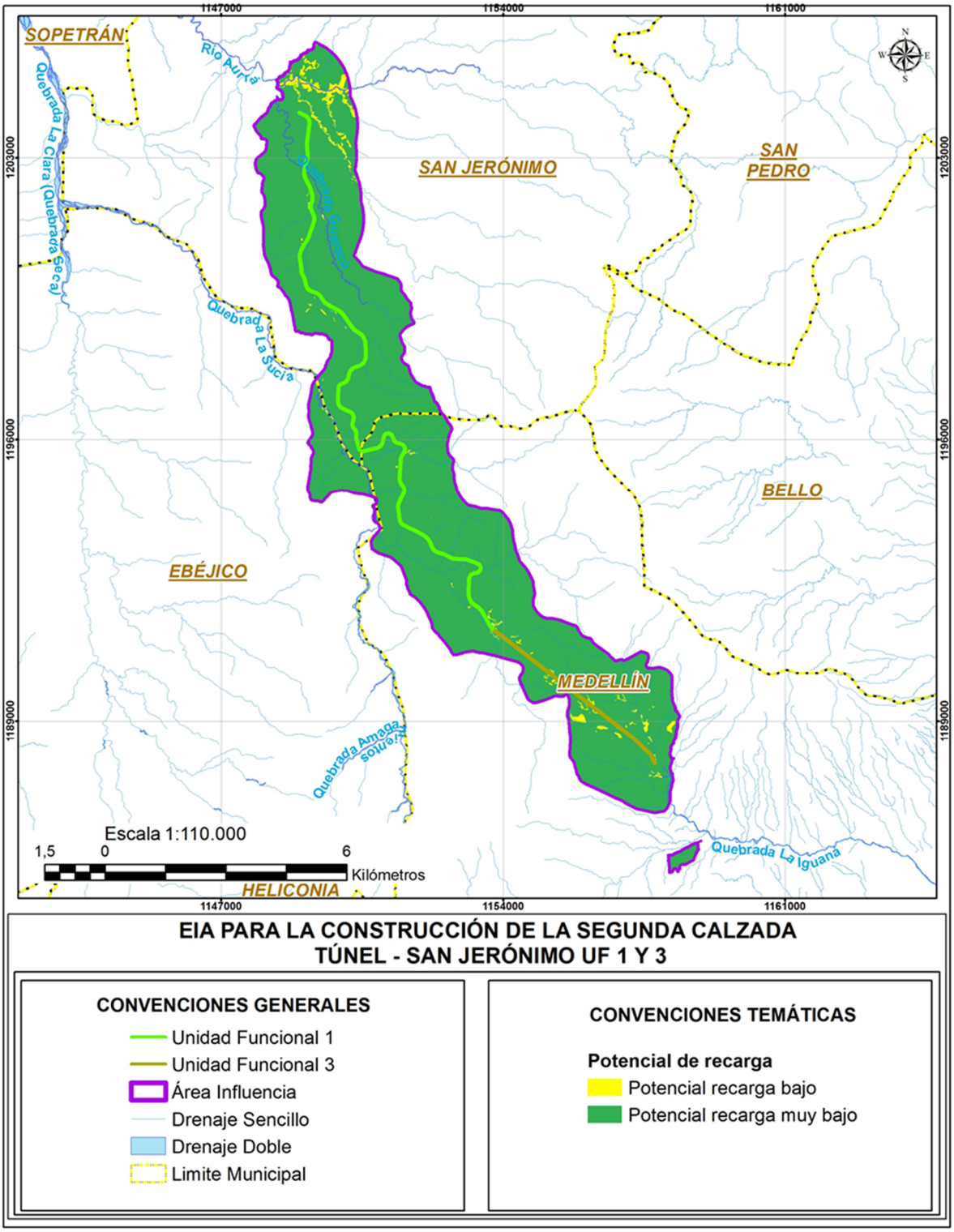
Modificado de: (Matus, 2007)

Luego de realizar la calificación y la ponderación a cada una de estas variables se aplica la siguiente relación para obtener la zona potencial de recarga:

$$ZR = (0.27*Pend)\ (0.23*TS)(0.12*Tr)(0.25*Cve)(0.13*Us)$$

Como resultado final obtenemos una escala entre 0 y 1 con valores de posibilidad de recarga desde muy baja hasta muy alta, la Figura 5-160 muestra las zonas de recarga potencial para el área de influencia de las unidades funcionales 1 y 3 donde se observa que la totalidad del área corresponde a zonas de recarga baja y muy baja, dadas las características de suelos, uso del suelo, cobertura vegetal, tipo de suelo, pendiente y tipo de roca.

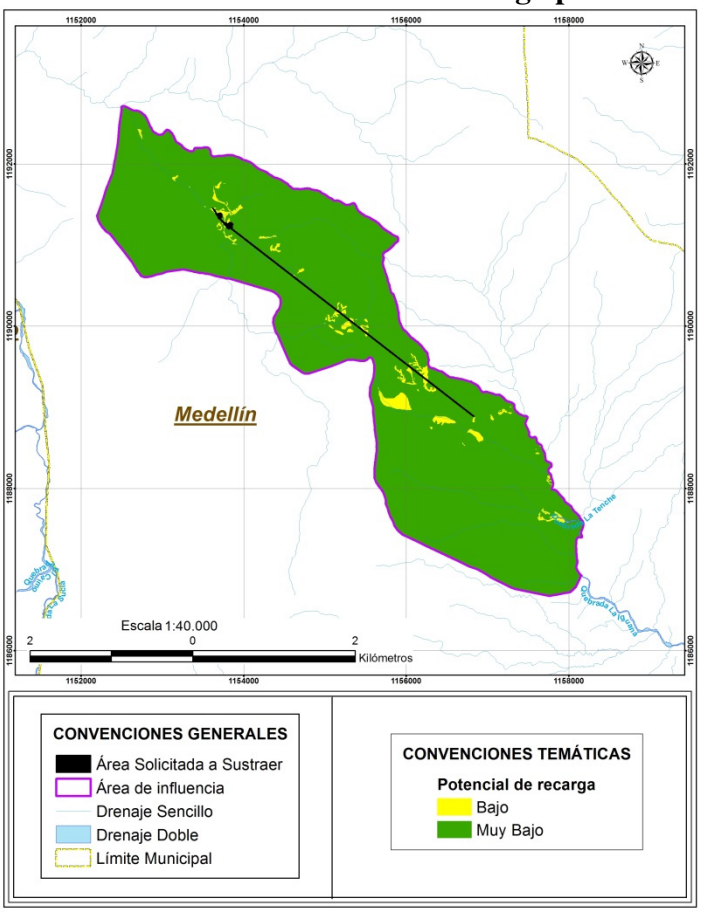
Figura 5-160 Potencialidad de las zonas de recarga para el área de influencia de las unidades funcionales 1 y 3



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

Para el área del túnel se han identificado en la zona de influencia como principales mecanismos de recarga la infiltración del agua de escorrentía subsuperficial, y la precipitación, en el Atlas de aguas subterráneas de Colombia se delimitan las áreas de recarga a partir de los afloramientos de los mismos correlacionando estos datos con la topografía, donde las zonas más altas tienen mayor potencial de recarga (generando flujos regionales), asociando esto con la porosidad y permeabilidad de las unidades litológicas, en el área de influencia se han definido las zonas de recarga teniendo en cuenta la metodología utilizada para la elaboración del Atlas de aguas subterráneas de Colombia y apoyando este concepto en la metodología de Matus, 2007, se evidencia una tendencia en las zonas de recarga de tipo bajo a muy bajo que obedece a las características físicas de la superficie, algunas de las características físicas se reflejan en la productividad de los sistemas acuíferos identificados, los depósitos de edad Cuaternario por ser depósitos no consolidados se clasifican como unidades de mediana y baja productividad, en donde se encuentran los depósitos aluviales (Qal), lleno antrópico (Qll), depósitos coluvioaluviales (Qcal) y los depósitos de derrubio (Qd), dadas las características de permeabilidad que poseen los depósitos de edad Cuaternario hay que tener en cuenta que estos relictos son de muy poco espesor y son depósitos que se encuentran sobre las unidades de porosidad secundaria como la Diorita de Altavista (Kida), el Grupo Ayura Montebello (Pes-Pev) y el Granito Neisico de Palmitas (Pgnp), estas últimas unidades correspondientes a un complejo ígneo-metamórfico a pesar de tener una porosidad secundaria derivada del fracturamiento en superficie se encuentra meteorizada, esta meteorización se evidencia en el estudio geofísico que se realizó (Tomografías eléctricas, incluidas mas adelante), el cuál sugiere una meteorización que involucra horizontes arcillosos correlacionable con la alteración de las plagioclasas presentes en el cuerpo ígneo a minerales de arcillas, dado el análisis y luego de ponderar cada una de las temáticas involucradas obtenemos la potencialidad de recarga del área de influencia del túnel (unidad funcional 3) (ver Figura 5-161).

Figura 5-161 Potencialidad de las zonas de recarga para el área del túnel



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

5.1.8.5 Direcciones de Flujo

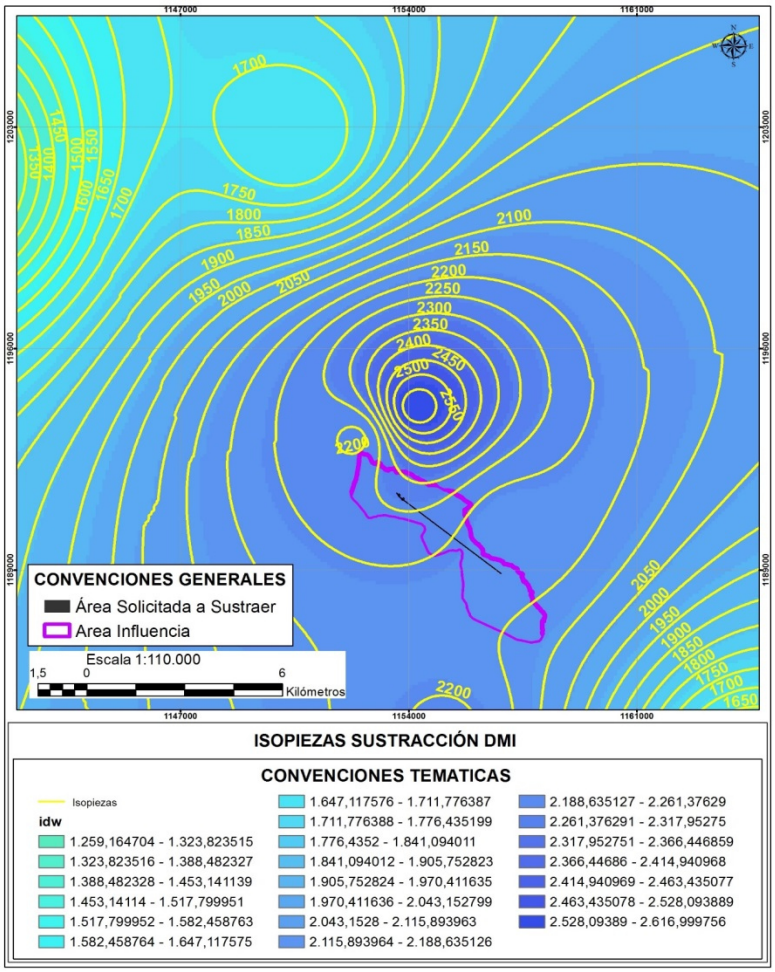
La definición de las direcciones de flujo de los sistemas acuíferos más someros, consiste en representar la dirección y el sentido del flujo de aguas subterráneas y su interconexión hidráulica con sistemas acuíferos adyacentes. En este sentido la construcción de las direcciones de flujo se realiza teniendo en cuenta los datos de nivel freático estático del inventario de puntos de agua subterránea, junto con las condiciones litológicas, estructurales y topográficas del área de influencia.

Para definir el nievel freático se realizó un mapa piezométrico que define las superficies de este y permite obtener información básica sobre el movimiento y comportamiento del agua subterránea para los acuíferos mas someros, las superficies piezométricas son representaciones de la geometría de la superficie que señala la altura del agua en un acuífero (o sector de acuífero) referida a una determinada profundidad en el mismo. Se representan mediante líneas equipotenciales de profundidad que indican el nivel de agua subterránea.

En los acuíferos libres, la superficie piezométrica coincide con la superficie freática, es decir, con el límite de saturación. En los acuíferos confinados la superficie piezométrica es más elevada que el techo de los mismos. En los acuíferos permeables por fisuración y, en general, en acuíferos muy heterogéneos, puede ser una superficie discontinua.

En el área de influencia se utilizó la información del inventario de puntos de agua para generar las isopiezas, estos valores de isopiezas varían entre 1350 - 2550 m, presentando los valores de mayor profundidad hacia la parte norte del área, dicha profundidad representa el plano del nivel freático a nivel del subsuelo (ver Figura 5-162), la densidad de puntos de agua subterránea no evidenció la existencia de puntos de captación a acuíferos profundos, todas las captaciones se realizan sobre unidades acuíferas someras, estas isopiezas se incluyen en el modelo hidrogeológico conceptual.

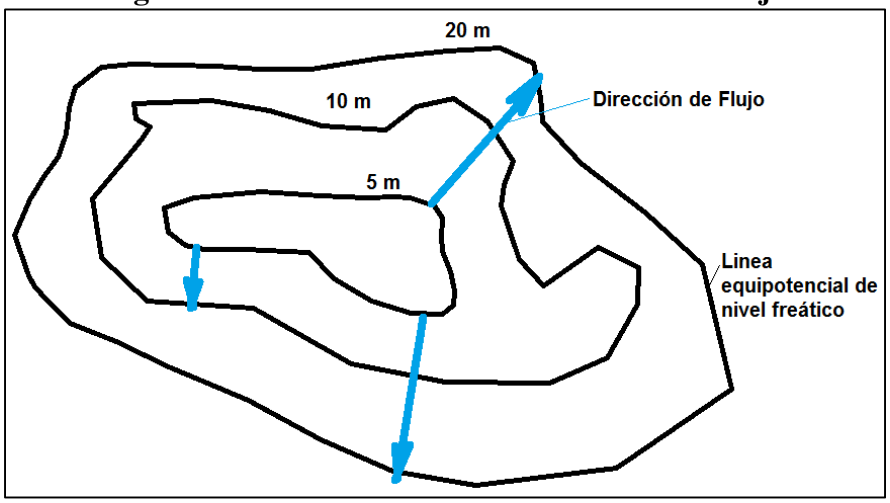
Figura 5-162 Isopiezas del área de sustracion del DMI.



Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

A estos datos (profundidad de nivel freático) se les realiza un ajuste, una corrección de línea base (topografía), para luego realizar la interpolación de líneas equipotenciales de nivel freático, estas líneas equipotenciales indican implícitamente la dirección de flujo, ya que en el sentido en el que su valor aumenta (aumento de profundidad), este sugiere la dirección de flujo, esto quiere decir que la dirección de flujo es perpendicular a las líneas equipotenciales del nivel freático. (Ver Figura 5-163).

Figura 5-163 Definición de las direcciones de flujo

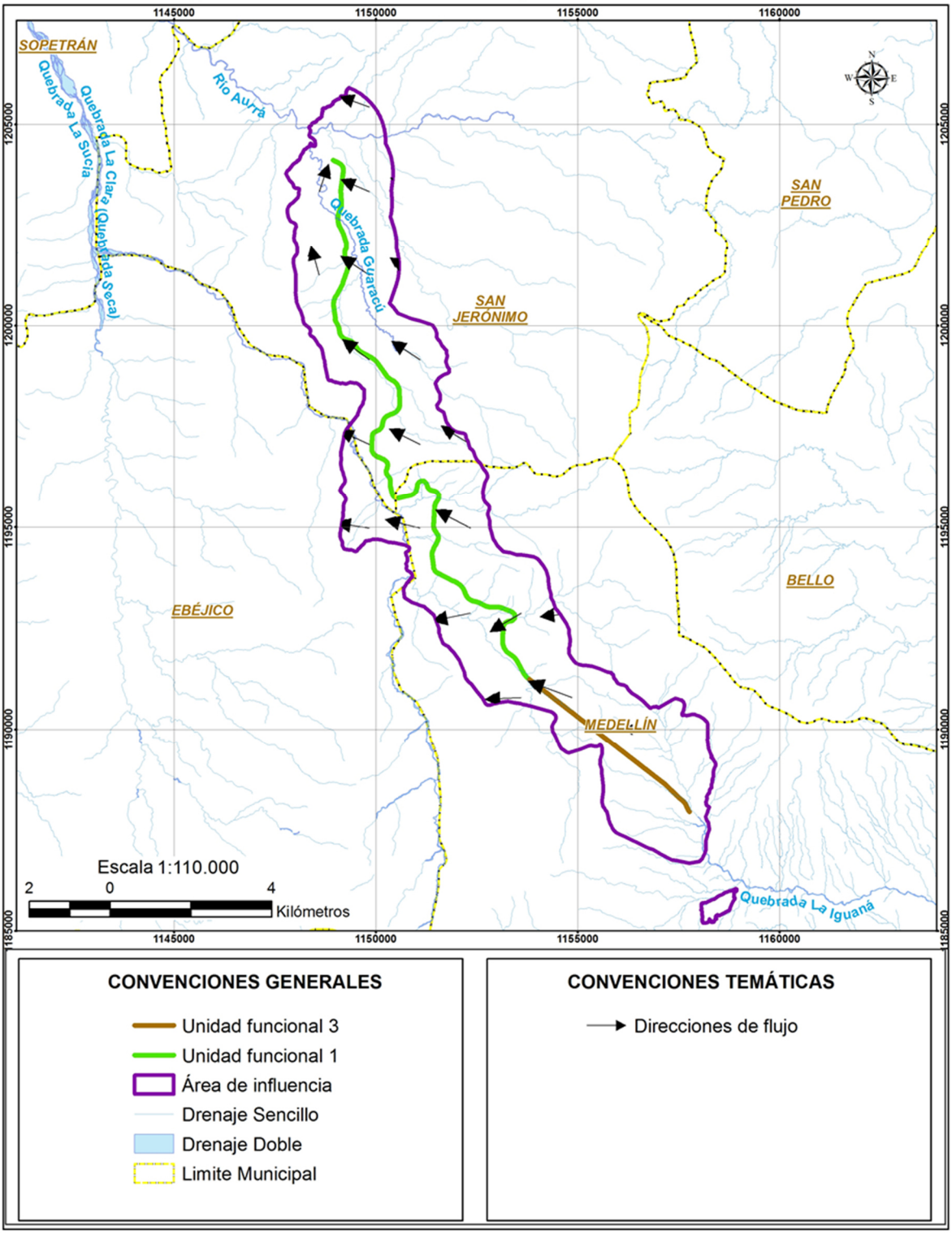


Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

Las direcciones de flujo son diferentes para cada tipo de acuífero, en el área de estudio una gran parte está constituida por rocas ígneas y metamórficas con limitados recursos de aguas subterráneas debido a su poca permeabilidad.

En el área de estudio las direcciones de flujo, presentan una dirección preferencial hacia el Este, principalmente hacia el NE; esto debido principalmente a que los afluentes principales de los drenajes mayores van en este sentido. (Ver Figura 3-6)

Figura 5-164 Direcciones de Flujo en el Área de estudio

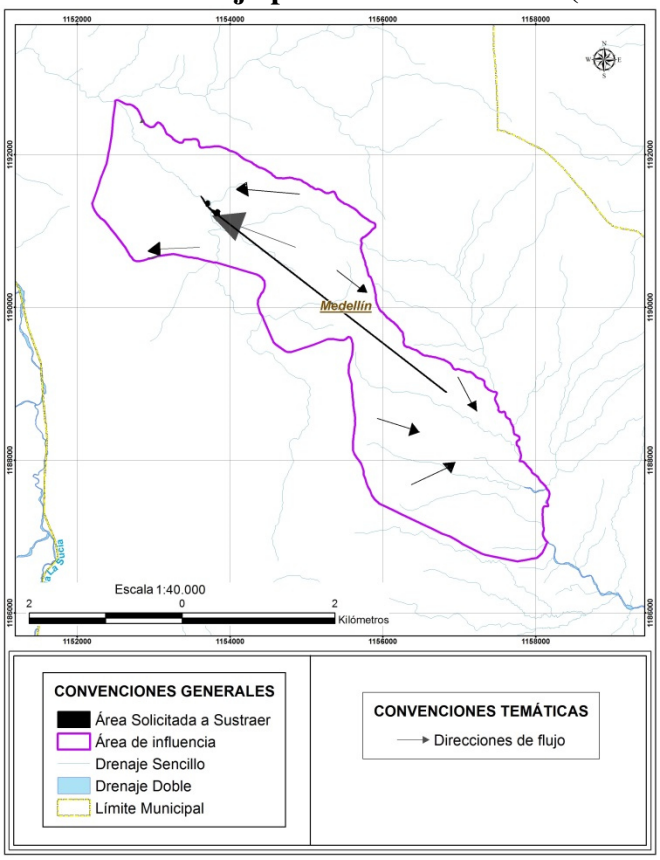


Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

En el área del túnel las direcciones de flujo convergen en dirección Suroriente-Noroccidente al Norte, y Noroccidente – Suroriente al Sur, siempre convergiendo en el túnel existente, dadas las condiciones litológicas, y topográficas del área de influencia, la escorrentía que se infiltra en la superficie del terreno sobre la zona no saturada comienza a desplazarse como un flujo subsuperficial, este flujo subsuperficial proviene de las zonas de recarga ubicadas en la zona de contacto entre las rocas metamórficas e ígneas (altos topográficos locales), el flujo de las corrientes subterráneas en la Figura 5-165 representan las direcciones de flujo predominantes para el área de influencia que sugiere el análisis en donde se tuvieron en cuenta los datos del inventario de puntos de agua subterránea (manantiales), estas direcciones de flujo se incluyen en el modelo hidrogeológico conceptual.

Adicional a estas direcciones de flujo en el modelo hidrogeológico numérico se realiza una modelación de las direcciones de flujo en el macizo rocoso (mayor profundidad), direcciones de flujo regional, esta modelación se realizó teniendo en cuenta los rasgos estructurales descritos en las secciones estructurales obtenidas de la galería piloto descritas anteriormente, estas direcciones de flujo en el macizo rocoso se presentan en la sección del modelo hidrogeológico numérico y corresponden a direcciones de flujo regionales que provienen de zonas de recarga regionales al Oriente del área de influencia, las tomografías eléctricas sugieren una capa de suelo residual asociado a la meteorización del complejo igneo–metamórfico, este suelo resudual se compone en su mayoría de minerales de arcilla asociados a la meteorización de las plagioclasas que componen estas unidades, esto genera una capa impermeable discontinua que se interpone entre los flujos de los acuíferos superficiales y los flujos de agua del macizo rocoso.

Figura 5-165 Direcciones de flujo para el área del túnel (Unidad funcional 3)



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

5.1.8.6 Modelo Hidrogeológico Conceptual

Un modelo hidrogeológico conceptual es una representación gráfica del sistema de flujo del agua subterránea que se realiza incorporando toda la información geológica e hidrogeológica disponible en un simple esquema del modelo a realizar (Anderson y Woesner, 1972). La primera fase consiste en elaborar un modelo conceptual definiendo la litología dominante, espesores, continuidades y estructuras de los acuíferos y de las unidades confinantes de manera que se puedan identificar los límites, las características y el comportamiento del acuífero a estudiar.

El conocimiento de las características fisiográficas, hidrográficas, climatológicas y geológicas de una región representa una condición indispensable para la construcción de un modelo hidrogeológico que involucre como elementos básicos la definición de la geometría de las unidades hidrogeológicas y de sus propiedades hidráulicas, la determinación de las redes de flujo, la estimación de la recarga y la evaluación de las condiciones de calidad de las aguas subterráneas. Los datos de que se disponga y la información que de ellos pueda extraerse representan los insumos para llevar a cabo un procedimiento de análisis que permita como resultado obtener el modelo deseado.

Datos e información Institutos como el Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, el de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, y el de Geología Minería y Química, INGEOMINAS, registran dentro de sus centros de documentación información fundamental para la exploración hidrogeológica.

Con esta pre-visualización se logra identificar el sistema de flujo característico, el cual es esencial para entender el movimiento del agua a través del sistema hidrogeológico. Para realizar el modelo hidrogeológico conceptual es necesario obtener los siguientes insumos:

1. Cartografía geológica de superficie digitalizada y georeferenciada.
2. Modelo digital de Terreno para el polígono a modelar.
3. Datos estructurales de las unidades litológicas presentes en el área
4. Datos geofísicos que se puedan correlacionar con la litología (SEV's, Tomografías geoeléctricas).
5. Datos de apiques perforaciones, y/o perfiles geotécnicos.
6. Información de estaciones Climáticas, pluviométricas y limnigráficas
7. Inventario de puntos de agua subterránea que incluya datos de profundidad del nivel freático y un muestreo y análisis fisicoquímico.
8. Direcciones de flujo del agua subterránea.
9. Definición de Zonas de recarga.

En el área se encuentran cuerpos litológicos de origen ígneo y metamórfico, las principales estructuras presentes en el area son diaclasamientos por esfuerzos tectónicos, la actividad tectónica en el área de la que hace parte la zona del túnel se manifiesta por el complejo diaclasamiento de las formaciones rocosas, la presencia de algunas fallas y la disposición variable de los planos de foliación como estructuras dominantes en los esquistos.

Se obtuvieron los levantamientos geológicos estructurales del túnel que ya está construido estos diaclasamientos se pueden extrapolar ya que tectónicamente el área está expuesta a los mismos esfuerzos confinantes, esto es una ventaja para la caracterización estructural del túnel proyectado, en este sentido el túnel existente sirve como galería piloto para la caracterización estructural del macizo rocoso, estos levantamientos geológicos fueron ejecutados a medida que se avanzaba con la excavación del túnel (galería piloto) y permitieron llevar a cabo una clasificación detallada del macizo rocoso, que fue la base para la definición del soporte requerido.

A continuación se hace una descripción general de las principales estructuras cruzadas por la excavación. Cuatro fueron las fallas más importantes cruzadas por la excavación del túnel, tres en las dioritas de la Diorita de Altavista y la otra correspondiente a la zona de contacto del cuerpo ígneo con el metamórfico.

En orden de abscisado estas se presentaron en el km 1+120, km 1+535, km 2+000 y km 3+010. La primera correspondió a una zona de esfuerzos caracterizados por trazas de falla delgadas N70°E/45°-60°SE que junto con los otros sistemas de fracturas, principalmente el

subparalelo al túnel y el subhorizontal, creó un intenso fracturamiento con rellenos de roca descompuesta y goteos rápidos abundantes.

El diaclasamiento se presentó muy denso afectando más intensamente a las rocas ígneas de la Diorita de Altavista que a las rocas metamórficas.

El análisis de orientación de discontinuidades realizado con la información obtenida en los levantamientos geológicos, permitió identificar los sistemas principales y secundarios de fracturamiento de la roca, tanto en la diorita asociada a la Diorita, como en los esquistos.

En la formación ígnea se identificaron un sistema principal de discontinuidades y 3 secundarios, a saber:

- Principal: Diaclasas y fallas menores asociadas N40°-65°W/>40° al norte principalmente.
- Secundarios: Diaclasas y fallas menores asociadas N70°W a N70°E/>65° al norte y al sur. Diaclasas y fallas menores asociadas N30°-60°E/>65° al norte principalmente. Fallas delgadas y diaclasas de bajo buzamiento con cualquier dirección. La mayoría de las diaclasas son cerradas, planas a onduladas y ligeramente rugosas a lisas. El espaciamiento dominante es de 20 a 60 cm y de persistencia media a alta entre 3 y 20 m.

En la formación metamórfica el principal sistema de discontinuidades lo constituye la foliación con sus diaclasas y fallas asociadas. El rumbo de ésta varió entre N10°W y N30°E y buzamientos de 0° a 90° debido a su replegamiento.

Los sistemas secundarios lo constituyeron las familias de discontinuidades mencionadas para la unidad ígnea, como son N40°-65°W, N70°W a N70°E; N30°-60°E y el sistema de bajo buzamiento. Este último se presenta de manera eventual.

En general, tanto la foliación como los demás sistemas de diaclasas se presentaron cerradas, onduladas, rugosas y de baja persistencia.

Teniendo en cuenta que se utilizó el túnel existente como una galería piloto para caracterizar el macizo rocoso y correlacionar estos datos estructurales con la dinámica del agua subterránea, en las siguientes figuras se reproducen los levantamientos geológicos estructurales realizados en el túnel construido (galería piloto), en cada una de las 9 secciones, estas secciones a pesar de que se levantaron en el túnel existente (galería piloto) se extrapolaron al túnel proyectado por esto se presentan en las figuras la abscisa en la que se levantó en el túnel ya construido (galería piloto), sin embargo en la Tabla 5-98 se asocia la abscisa correspondiente al túnel proyectado.

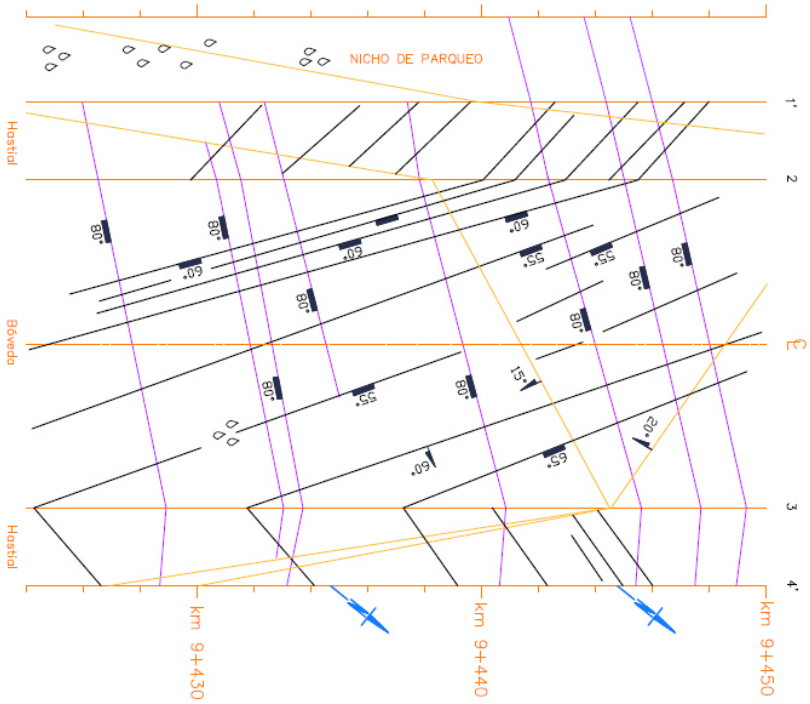
Para el levantamiento geológico estructural en la galería piloto (túnel existente), se adopta una nomenclatura para diferenciar el tipo de falla y diaclasa, esta nomenclatura se presenta

en la Figura 5-166. De la
Figura 5-167 a la Figura 5-175, se presentan las secciones levantadas descritas anteriormente.

Figura 5-166 Nomenclatura adoptada en el levantamiento geológico estructural en la galería piloto (túnel existente)

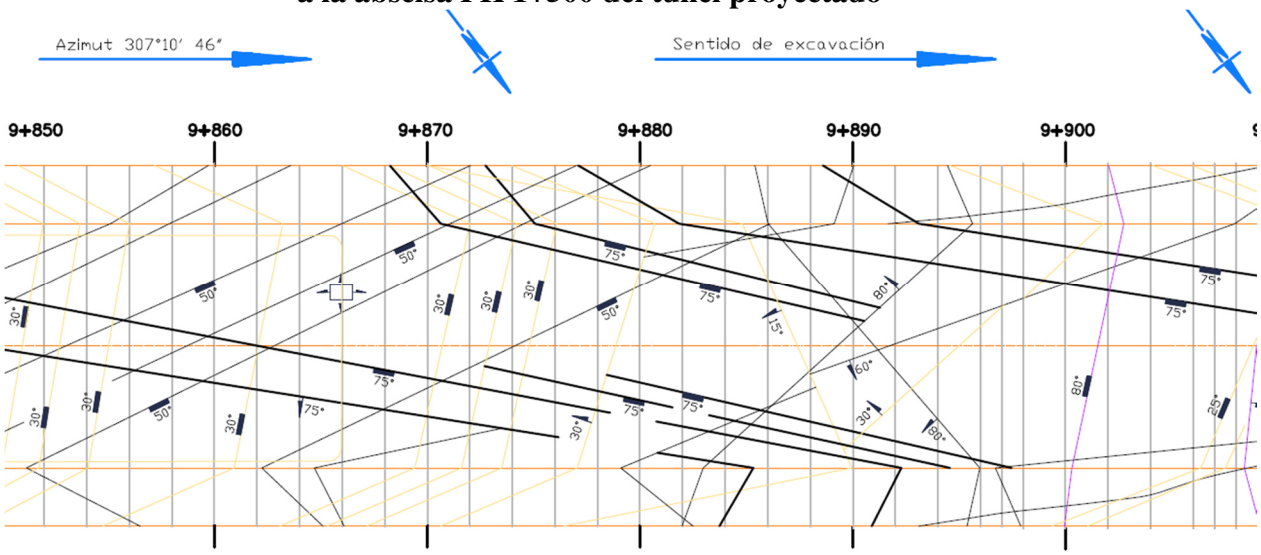
Modificado de: Integral Ingenieros Consultores, 1999

Figura 5-167 Sección No 1 levantada en la galería piloto (túnel existente), corresponde a la abscisa PK 1+050 del túnel proyectado



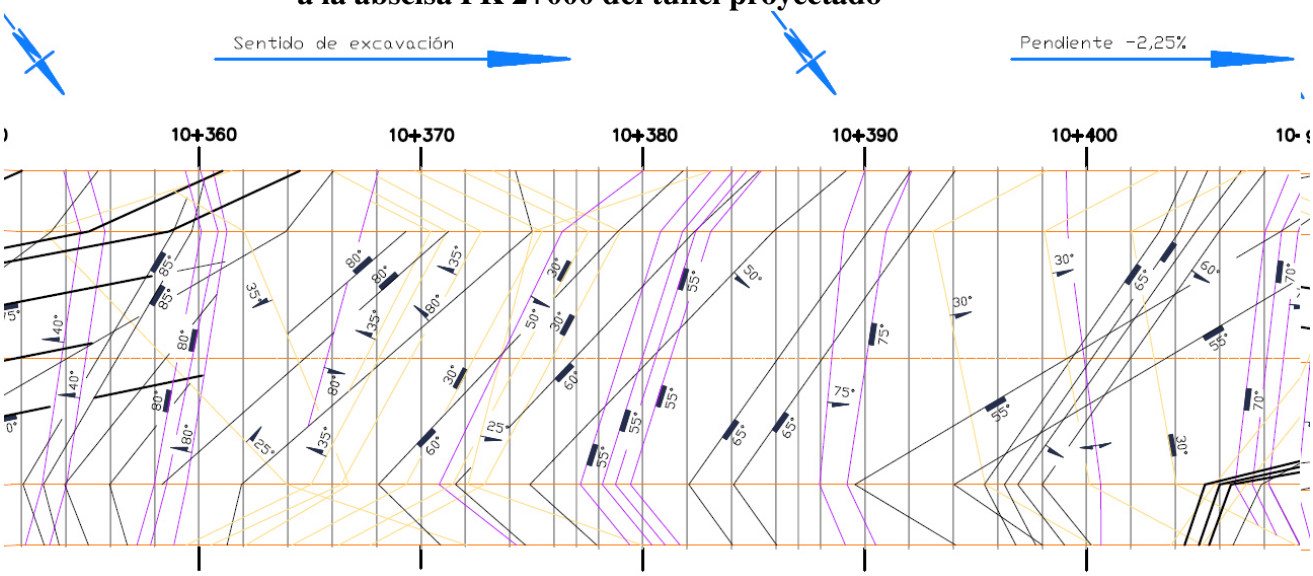
Modificado de: Integral Ingenieros Consultores, 1999

Figura 5-168 Sección No 2 levantada en la galería piloto (túnel existente), corresponde a la abscisa PK 1+500 del túnel proyectado



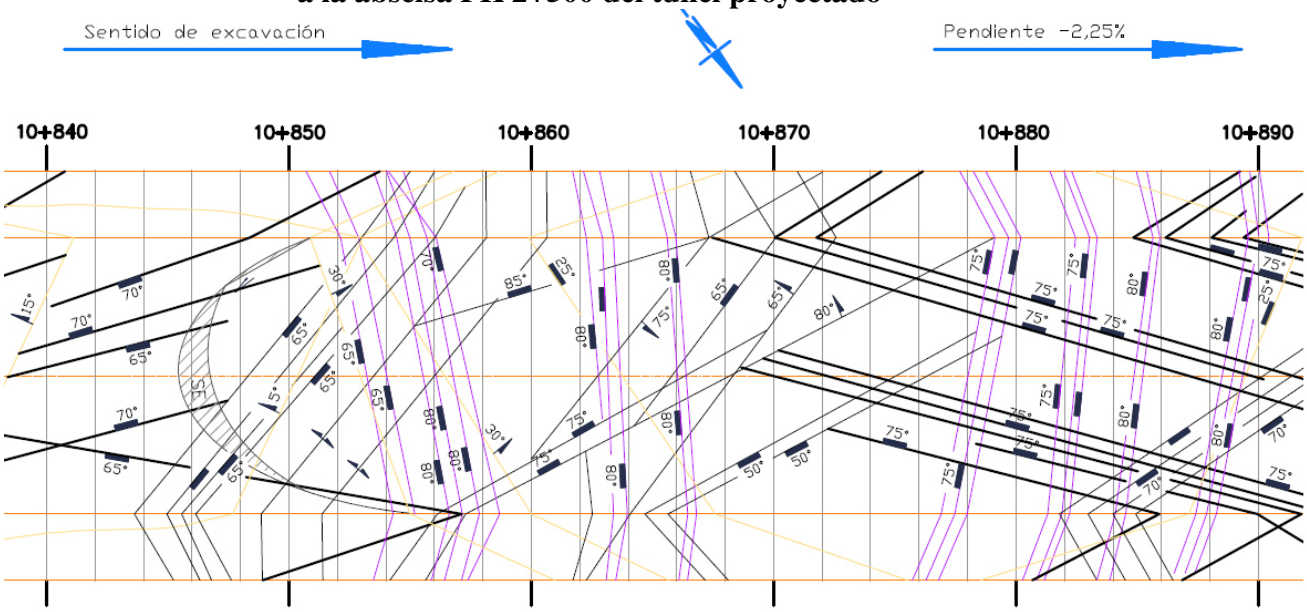
Modificado de: Integral Ingenieros Consultores, 1999

Figura 5-169 Sección No 3 levantada en la galería piloto (túnel existente), corresponde a la abscisa PK 2+000 del túnel proyectado



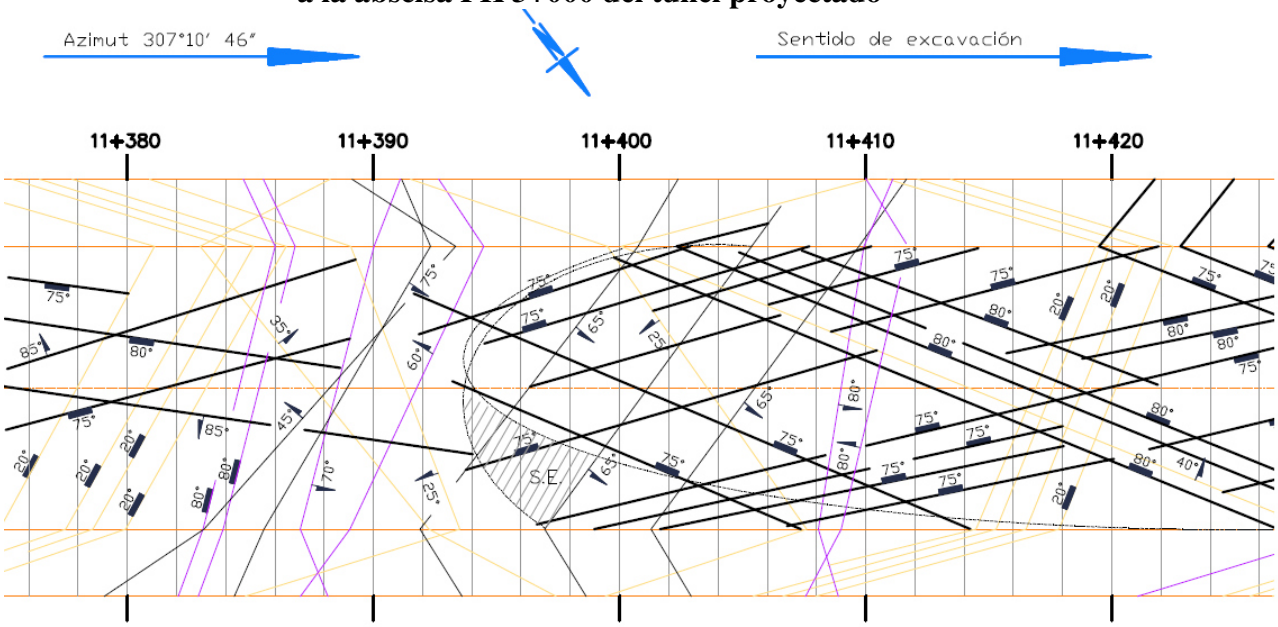
Modificado de: Integral Ingenieros Consultores, 1999

Figura 5-170 Sección No 4 levantada en la galería piloto (túnel existente), corresponde a la abscisa PK 2+500 del túnel proyectado



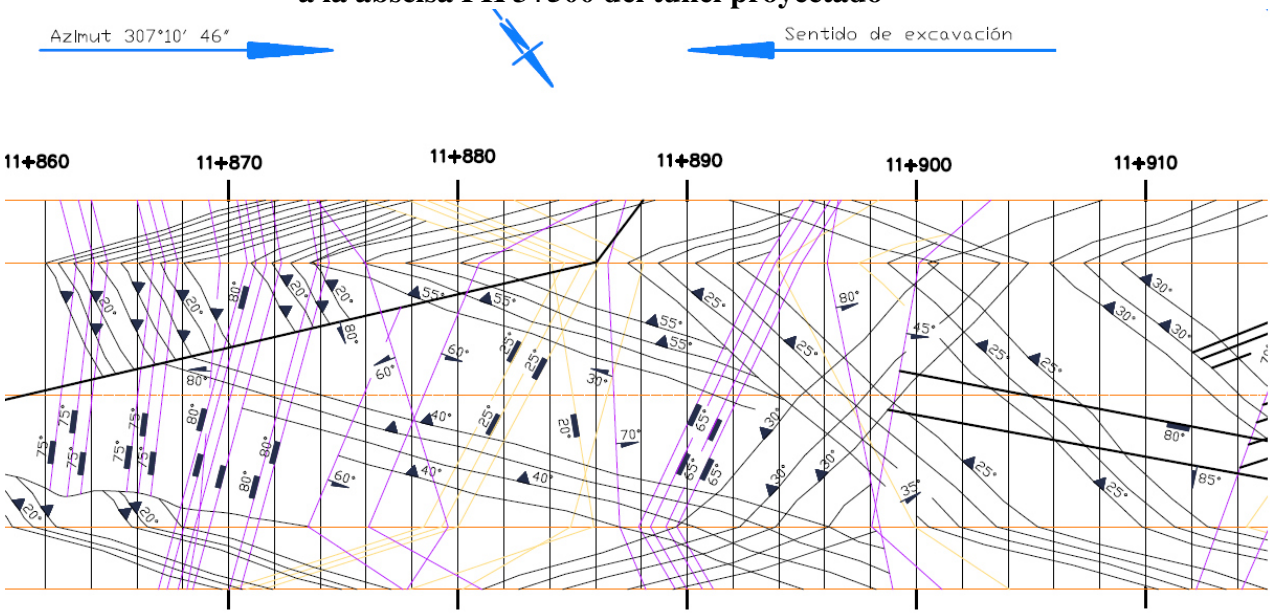
Modificado de: Integral Ingenieros Consultores, 1999

Figura 5-171 Sección No 5 levantada en la galería piloto (túnel existente), corresponde a la abscisa PK 3+000 del túnel proyectado



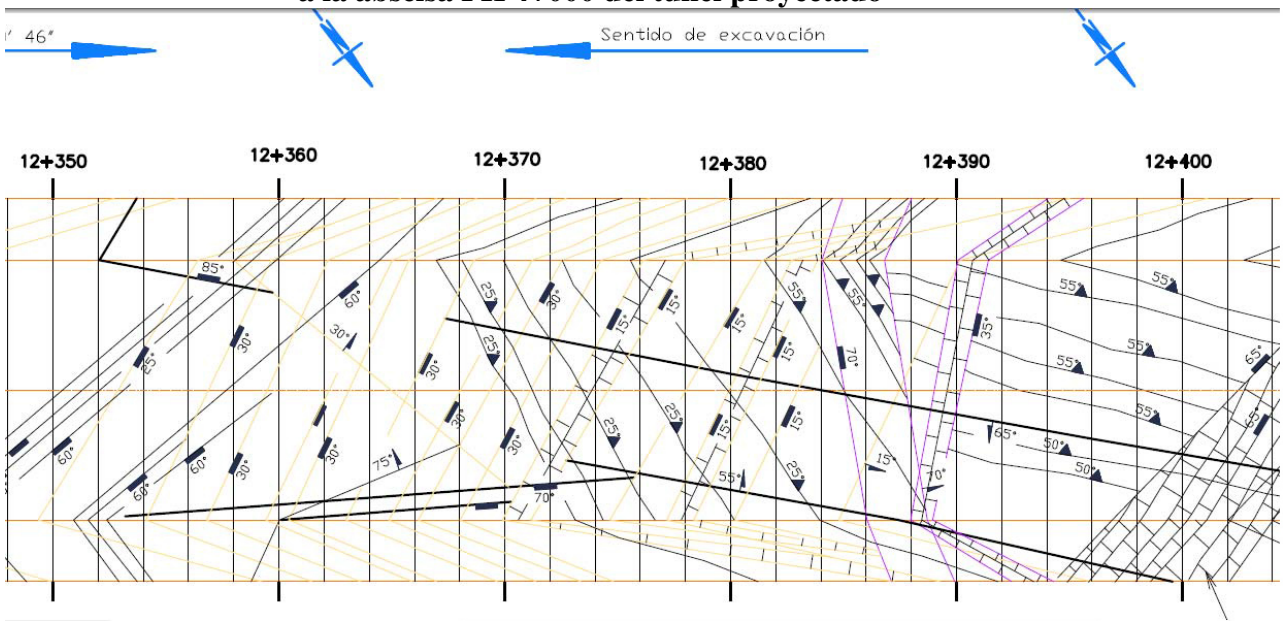
Modificado de: Integral Ingenieros Consultores, 1999

Figura 5-172 Sección No 6 levantada en la galería piloto (túnel existente), corresponde a la abscisa PK 3+500 del túnel proyectado



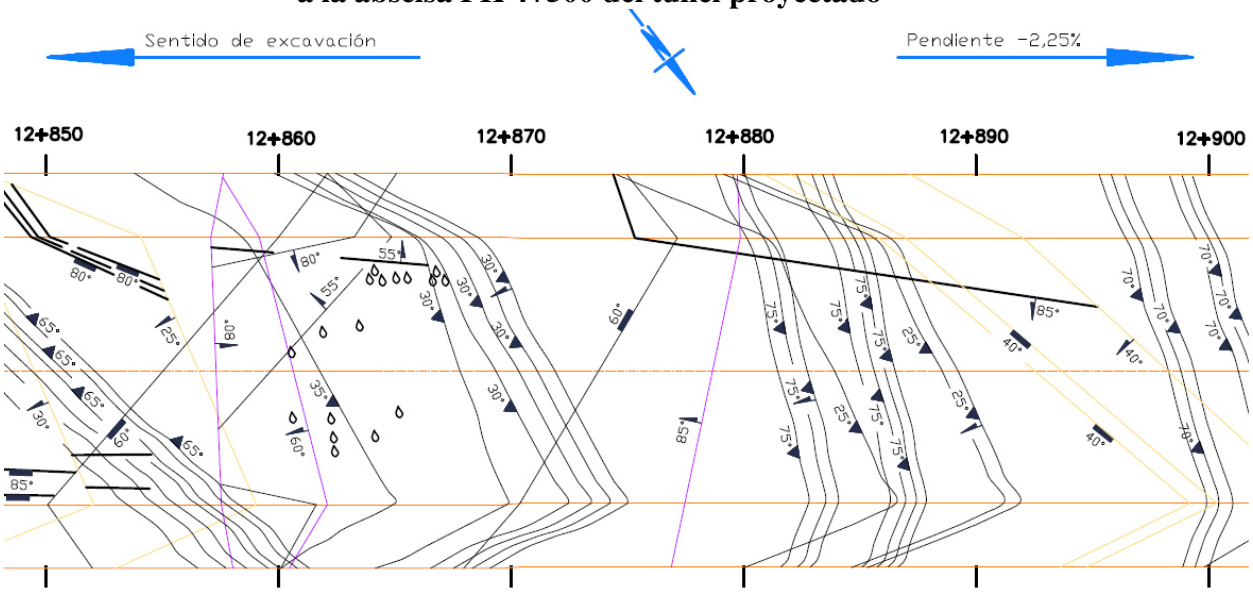
Modificado de: Integral Ingenieros Consultores, 1999

Figura 5-173 Sección No 7 levantada en la galería piloto (túnel existente), corresponde a la abscisa PK 4+000 del túnel proyectado



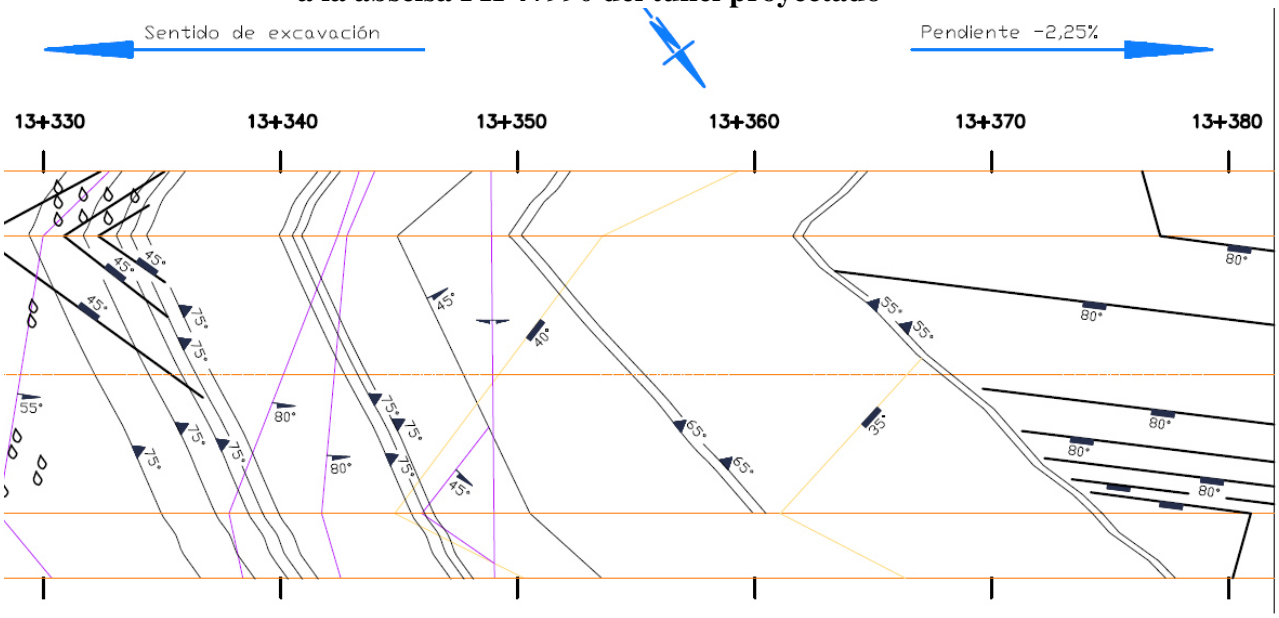
Modificado de: Integral Ingenieros Consultores, 1999

Figura 5-174 Sección No 8 levantada en la galería piloto (túnel existente), corresponde a la abscisa PK 4+500 del túnel proyectado



Modificado de: Integral Ingenieros Consultores, 1999

Figura 5-175 Sección No 9 levantada en la galería piloto (túnel existente), corresponde a la abscisa PK 4+990 del túnel proyectado



Modificado de: Integral Ingenieros Consultores, 1999

Este régimen estructural se tuvo en cuenta para realizar el modelo hidrogeológico conceptual expuesto mas adelante en donde sólo se representan las direcciones

preferenciales y diaclasas representativas para no saturar el modelo, sin embargo en el modelo numérico adelantado presentado en este capítulo se incluyen la totalidad de los rasgos estructurales levantados en la galería piloto.

En la Tabla 5-98, se relaciona la equivalencia de abscisas de la galería piloto (túnel piloto), y las abscisas del túnel proyectado, adicional a esto se presentan los datos estructurales de cada una de las familias de fallas y diaclasas.

Tabla 5-98 Datos estructurales de las principales fallas y diaclasas identificadas en la galería piloto utilizada para la caracterización estructural del área de influencia

Sección Nº	Situación en el túnel proyectado	Situación en la galería piloto (túnel ya construído)	Orientaciones
1	PK 1+050	PK 9+430	• J1: 035º/60º • J2: 129º/80º • J3: 113º/15º
2	PK 1+500	PK 9+880	• J1: 050º/75º • J2: 145º/30º • J3: 011º/50º
3	PK 2+000	PK 10+380	• J1: 325º/55º • J2: 351º/60º • J3: 155º/30º
4	PK 2+500	PK 10+880	• J1: 231º/75º • J2: 138º/75º • J3: 009º/50º
5	PK 3+000	PK 11+380	• J1: 157º/20º • J2: 161º/80º • J3: 046º/80º
6	PK 3+500	PK 11+880	• S: 234º/40º • J1: 330º/60º • J2: 155º/25º
7	PK 4+000	PK 12+380	• S: 270º/25º • J1: 338º/15º • J2: 048º/65º
8	PK 4+500	PK 12+880	• S: 095º/75º • J1: 105º/25º • J2: 046º/85º
9	PK 4+990	PK 13+370	• S: 260º/55º • J1: 350º/35º • J2: 044º/80º

Modificado de: Integral Ingenieros Consultores, 1999

5.1.8.6.1 Prospección Geoeléctrica

Se realizó un estudio Geofísico – Geoeléctrico en el área de influencia, se realizaron cinco tomografías geoeléctricas, dos en cada portal y una paralela a la línea del túnel en la parte alta; algunas de estas zonas presentaron características topográficas complejas para llevar a cabo la realización de los estudios geoeléctricos de superficie, sin embargo se realizó la adquisición de las cinco tomografías satisfactoriamente.

El principal objetivo de realizar las tomografías fue determinar la profundidad del contacto suelo – roca y la profundidad del nivel freático, las capas litológicas presentes están asociadas a la meteorización de complejos ígneo-metamórficos y a los afloramientos de estos complejos en superficie (roca fresca).

- **Localización**

Las cinco (5) Tomografías eléctricas para caracterizar el componente hidrogeológico en la en el túnel, dos en cada portal a una profundidad de 80 m, y una en la parte superior del túnel a 160 m de profundidad. (Ver Figura 5-176)

Figura 5-176 Localización de las tomografías geoeléctricas.

Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

En la Tabla 5-99 se muestran las coordenadas, junto al rumbo y la altura elipsoidal de cada tomografía.

Tabla 5-99 Coordenadas de los puntos centrales de las Tomografías.

ID	Coordenadas				Rumbo	Altura Elipsoidal (m)
	Magna -Gauss West		Geográficas			
	Este	Norte	Latitud	Longitud		
Tomo 1	1155685	1189777	06º 18' 37" N	-75º 40' 14" W	S52E-N52W	2614,2
Tomo2	1153800	1191240	06º 19' 25" N	-75º 41' 15" W	N38E-S38W	1939,7

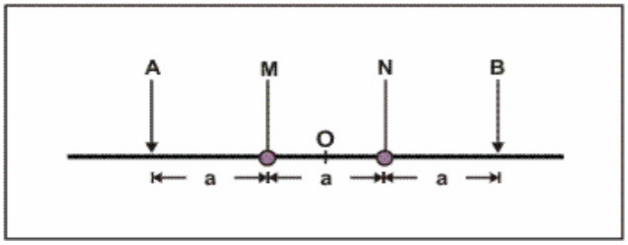
ID	Coordenadas				Rumbo	Altura Elipsoidal
Tomo3	1153799	1191245	06º 19' 25" N	-75º 41' 15" W	S52E-N52W	1938,1
Tomo4	1157373	1188404	06º 17' 52" N	-75º 39' 19" W	S44W-N44E	2072,0
Tomo5	1157381	1188409	06º 17' 52" N	-75º 39' 19" W	S36E-N36W	2071,7

Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

- **Metodología**

El método para la ejecución de las Tomografías Geoeléctricas se basó en la configuración Wenner, el cual consiste en hacer circular en el terreno una corriente (que en este caso es continua) para medir los valores de voltaje (V) y corriente (I) respectivos; los contrastes que se presentan están de acuerdo con las características geoeléctricas de los materiales encontrados en el subsuelo. Se utilizan para ello sesenta (60) electrodos alineados, equidistanciados uno del otro para este caso de cinco (5) metros, en los cuales se forman arreglos wenner simples con dos electrodos de corriente A - B y dos de voltaje M - N.

Figura 5-177 Dispositivo Wenner



Fuente: Krishnamurthy, N. S., Chandra, S. & Kumar, D., 2008.

A través de los electrodos A-B se inyecta corriente al terreno, produciéndose un campo eléctrico, cuya diferencia de potencial se mide por medio de dos electrodos impolarizables M - N, localizados sobre la línea.

Con los datos obtenidos de cada perfil en profundidad (En este caso 60 puntos de evaluación o 60 sondeos – equiespaciados cada 5 metros) se grafican las curvas donde se presentan los valores de resistividades aparentes contra la profundidad; posterior a esto los valores de dichas curvas son interpoladas para obtener una imagen de resistividades aparentes del subsuelo a lo largo de la longitud del perfil; posterior a ello se realiza un procesamiento de inversión matemática donde se pretende lograr obtener la distribución de resistividades reales en profundidad y espesores de cada capas geoeléctrica.

Lo ideal que se pretende obtener son capas del subsuelo saturadas o no saturadas a través de cambios litológicos obtenidos a partir de la correlación de la propiedad eléctrica del subsuelo denominada 'Resistividad' y la geología local.

- **Adquisición.**

Las Tomografías Eléctricas, se efectuaron con equipo DUK-2ª Multi-electrode Electrical Resistivity Tomography – 60 Channel, utilizando el arreglo de electrodos simétrico tipo Wenner con profundidad de investigación de 80 m y 160m aproximadamente. La interpretación se realizó mediante el programa Geogiga (Canada) que permite realizar inversíones del modelo en 2D. En la Tabla 5-100 se presenta los principales parámetros de adquisición por tomografía.

Tabla 5-100 Parámetros de adquisición por tomografía.

Tomografía	Longitud de Exploración (m)	Espaciamiento entre Electrodos o Receptores (m)	Tipo de arreglo:	Profundidad de Exploración alcanzada (m)
Tomo 1	600	10	Simétrica Wenner	160
Tomo 2	300	5	Simétrica Wenner	160
Tomo 3	300	5	Simétrica Wenner	85-90
Tomo 4	300	5	Simétrica Wenner	85-90
Tomo 5	300	5	Simétrica Wenner	85-90

Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

Las cinco (5) tomografías geoeléctricas fueron interpretadas mediante el software CANVAS X 16 GIS y ARCGIS 10.2, el procesamiento de inversión matemática se realizó mediante el software Cadaniense GEOGIGARIMAGER que permite realizar inversiones del modelo en 2D.

El principio matemático de la tomografía geoeléctrica es igual a la realización de los conocidos Sondeos Eléctricos Verticales (S.E.V.) el cual es averiguar la distribución vertical de resistividades bajo el punto sondeado; con ese resultado se pueden interpretar cada una de las capas geoeléctricas de subsuelo y la presencia de niveles acuíferos; se pueden estimar además, según los valores de resistividad la calidad del agua, es decir la proporción de iones disueltos en ella y la permeabilidad de la roca. (Si la tomografía geoeléctrica fue realizada con 60 canales se entiende que fueron tomados 60 SEV'S sobre una línea o perfil).

Los métodos geofísicos se basan en la medición de algunas propiedades físicas de los materiales de la corteza terrestre: la densidad, el campo magnético, la conductividad eléctrica, velocidad de transmisión de ondas elásticas, etc. La interpretación de dichas mediciones con base en los contrastes entre ellas y las anomalías observadas, permite preparar modelos de las características del subsuelo y de su distribución espacial. La interpretación de los datos geofísicos tiene dos niveles: uno, el modelamiento matemático en el que se definen las combinaciones de valores de la propiedad que se mide y de la geometría de las masas de suelo o de roca, coherentes con las mediciones hechas en el terreno, y dos, la interpretación de los modelos en términos geológicos, hidrogeológicos.

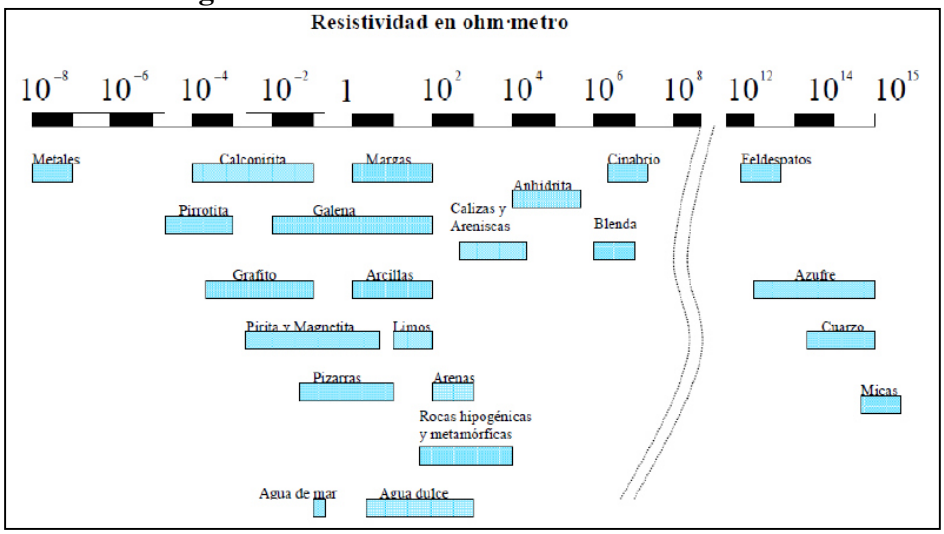
- **Interpretación Geológica – Geofísica.**

El suelo es una mezcla de partículas sólidas, gases, agua y otros materiales orgánicos e inorgánicos.

Esta mezcla hace que la resistividad del suelo aparte de depender de su composición intrínseca, dependa de otros factores externos como la temperatura, la humedad, presión, etc. que pueden provocar que un mismo suelo presente resistividades diferentes con el tiempo. De entre todos los factores, la humedad es el más importante; además, es el que se puede alterar más fácilmente mediante la lluvia o el riego del suelo.

Diferentes contenidos de humedad en un mismo terreno darían lugar a resistividades diferentes que podrían llevarnos a interpretaciones erróneas de los materiales constituyentes del suelo. (Ver Figura 5-178)

Figura 5-178 Resistividad de Geomateriales.



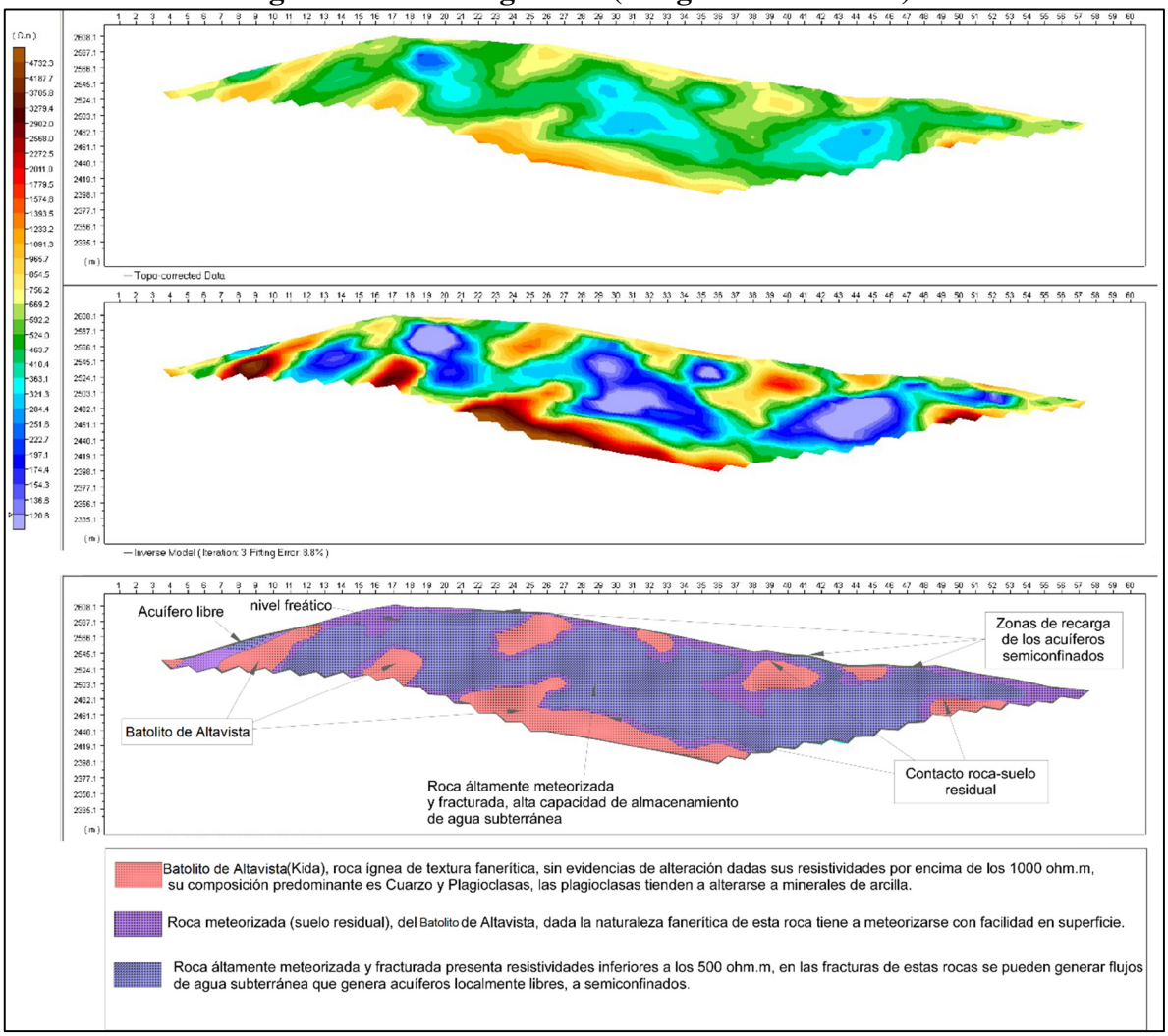
Fuente: Krishnamurthy, N. S., Chandra, S. &Kumar, D., 2008.

- **Resultados obtenidos y discusión de resultados.**

Los datos obtenidos en la tomografía 1, Figura 5-179, sugieren la presencia de acuíferos libres y semiconfinados, localmente se evidencia la presencia de la Diorita de Altavista sin ningún tipo de alteración, pero la tendencia es una franja altamente meteorizada y fracturada la cual tiene altas posibilidades de contener cantidades relevantes del recurso hídrico, también se evidencia una franja de alteración de la Diorita, que posíblemente también contenga agua, el nivel freático sugerido por las tomografías se encuentra a 0 m (entre los electrodos 7-10, 22-25, 40-42), y experimenta variaciones desde los 5 m (electrodos 18-21), hasta los 45m (entre los electrodos 37 y 38), el contacto suelo – roca meteorizada muestra contrastes a lo largo de la Tomografía con variaciónes que oscilan

desde los 5 m hasta los 20 m.

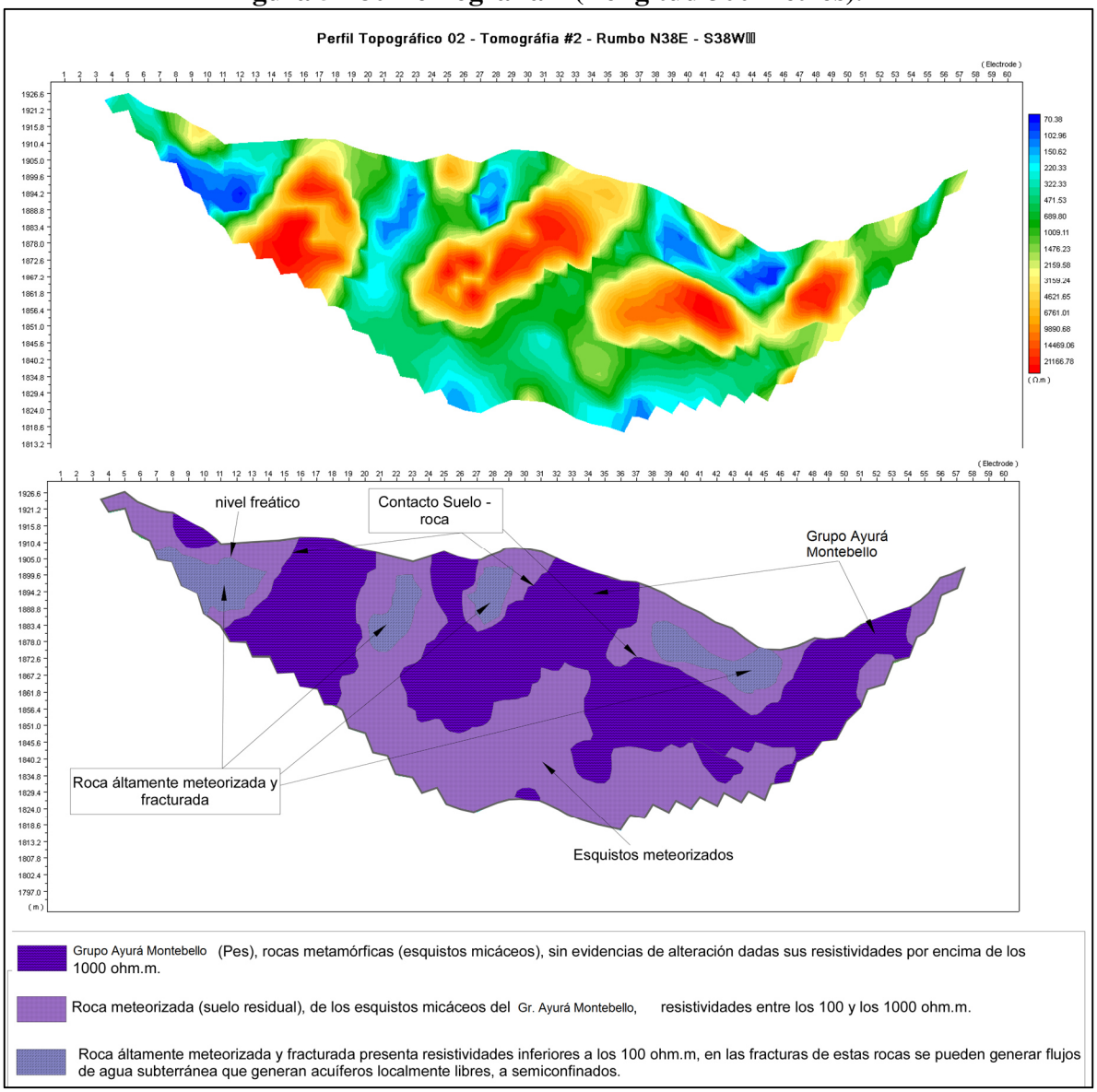
Figura 5-179 Tomografía 1 (Longitud 600 metros).



Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

En la tomografía 2, Figura 5-180, se evidencian tres contrastes en las resistividades unas resistividades asociadas al Grupo Ayurá - Montebello sin evidencias de meteorización o alteración resistividades superiores a los 1000 ohm.m, en algunos tramos la roca fresca aflora en superficie (electrodos 8-11, 16-21, 25-27, 32-37, 49-54), se evidencia la formación de acuíferos libres y semiconfinados localmente, no muy extensos donde el nivel freático presenta variaciones que oscilan entre los 0 m (electrodos 45-46), 5 m (electrodo 12, 22-23, 28-29), y 7 a 10 m (electrodos 39-43), el contacto suelo residual roca presenta una geometría compleja atribuible a la foliación y bandeamiento de los esquistos, formando espesores de roca meteorizada des hasta 40m.

Figura 5-180 Tomografía 2 (Longitud 300 metros).

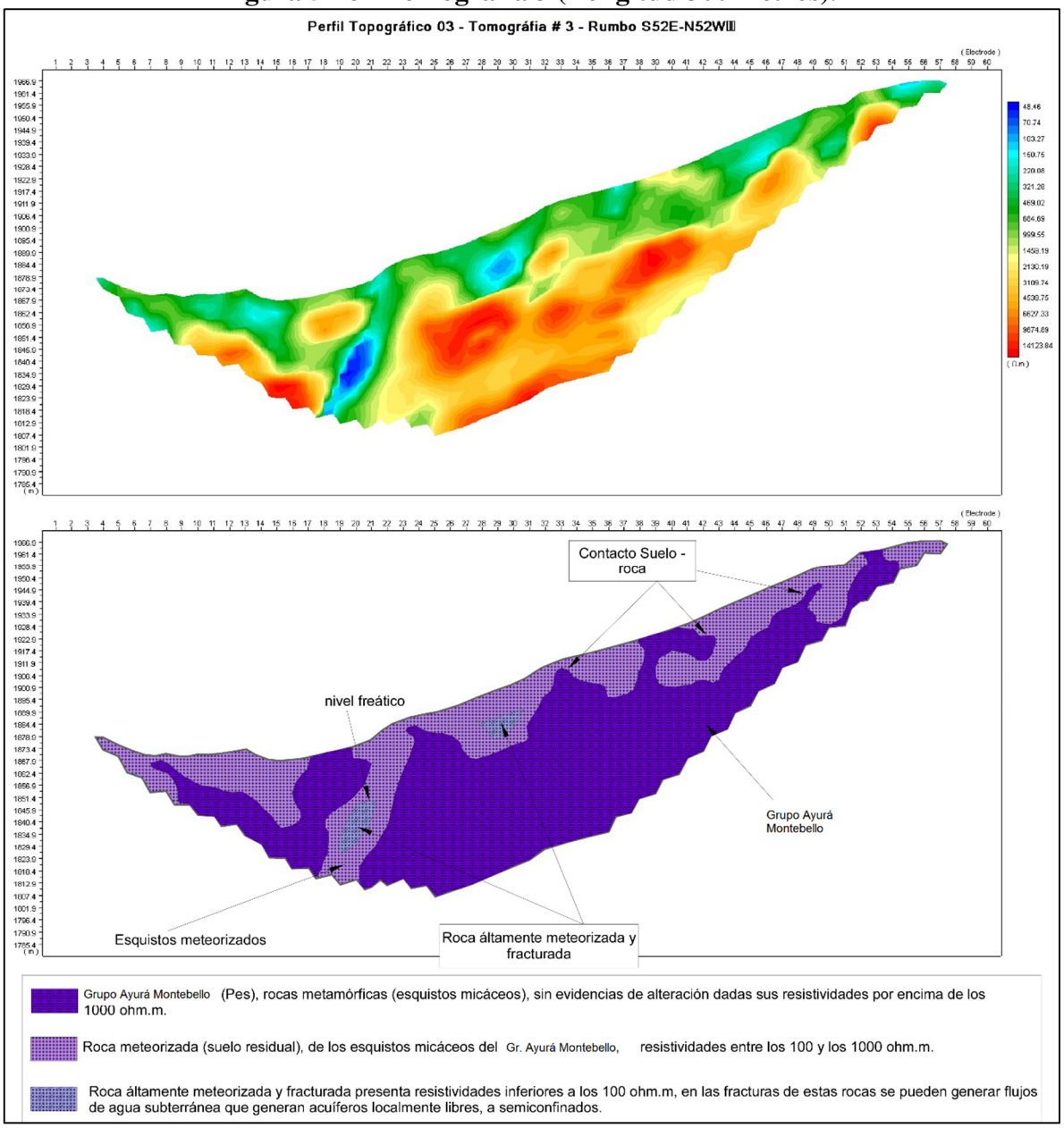


Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

Para la tomografía 3, Figura 5-181, se puede evidenciar una posible zona de falla en los electrodos 22 y 23, con un rumbo NE buzando al NW, se presentan bajas resistividades como evidencia de un alto grado de meteorización y fracturamiento, es posible que asociado a este fracturamiento se encuentren acumulaciones y flujos de agua subterránea a 27 m de profundidad (electrodo 21-22), en el electrodo 30 también se evidencia la acumulación de agua subterránea a aproximadamente 20 m (electrodos 29-30). En este perfil de resistividad se observa la generación de suelo residual asociado a la meteorización del Grupo Ayurá - Montebello, el contacto suelo – roca es irregular, asociado al grado de exposición de la roca dependiente de su ubicación, pendiente, diaclasamiento, este contacto

presenta variaciones en profundidad que van desde los 5m (electrodos 7-8, 23-24, 32-33), y alcanzar profundidades de hasta 29 m (electrodos 15-16).

Figura 5-181 Tomografía 3 (Longitud 300 metros).

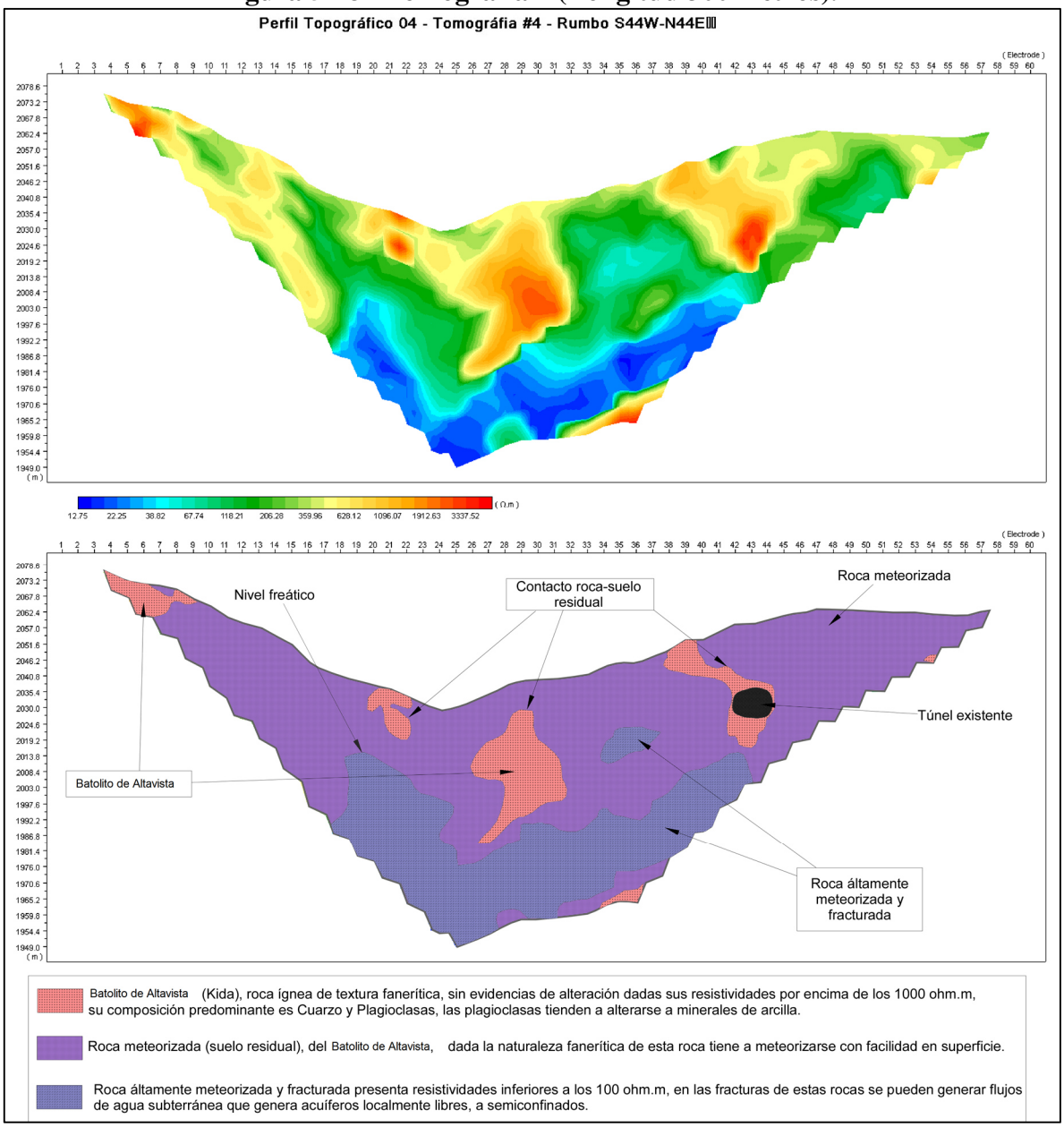


Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

La tomografía 4**,** Figura 5-182, se realizó perpendicular al eje del trazado lo que posibilitó la observación del túnel existente (electrodos 42-44), en esta tomografía se observan 3 contrastes de resistividades un contraste correspondiente a roca sin alteración ni fractura asociada a la Diorita de Altavista con resistividades que superan los 1000 ohm.m; rocas

meteorizadas que presentan variaciones de resistividad de 100 a 1000 ohm.m, y rocas altamente meteorizadas y fracturadas con resistividades inferiores a 100 ohm.m, a estas últimas también se les puede asociar acumulaciones de agua subterránea a lo que el contraste entre resistividades nos permite asociar una profundidad del nivel freático, en este sentido se han encontrado profundidades del nivel freático que oscilan entre los 27 m (electrodos 18-19), 25 m (electrodos 35-36), 55m (electrodo 26), la roca sin alteración aflora en varios tramos del corte (electrodos 4-9, 21-22, 38-40), la Diorita de Altavista en este tramo presenta una fuerte y constante meteorización, asociado a esto puede estar su alto contenido de plagioclasas lo que genera la alteración de estas a minerales de arcilla, el contacto roca - suelo se puede evidenciar en el electrodo 7 a 4m de profundidad, al igual que en los electrodos 29 y 30 a 12 m de profundidad.

Figura 5-182 Tomografía 4 (Longitud 300 metros).

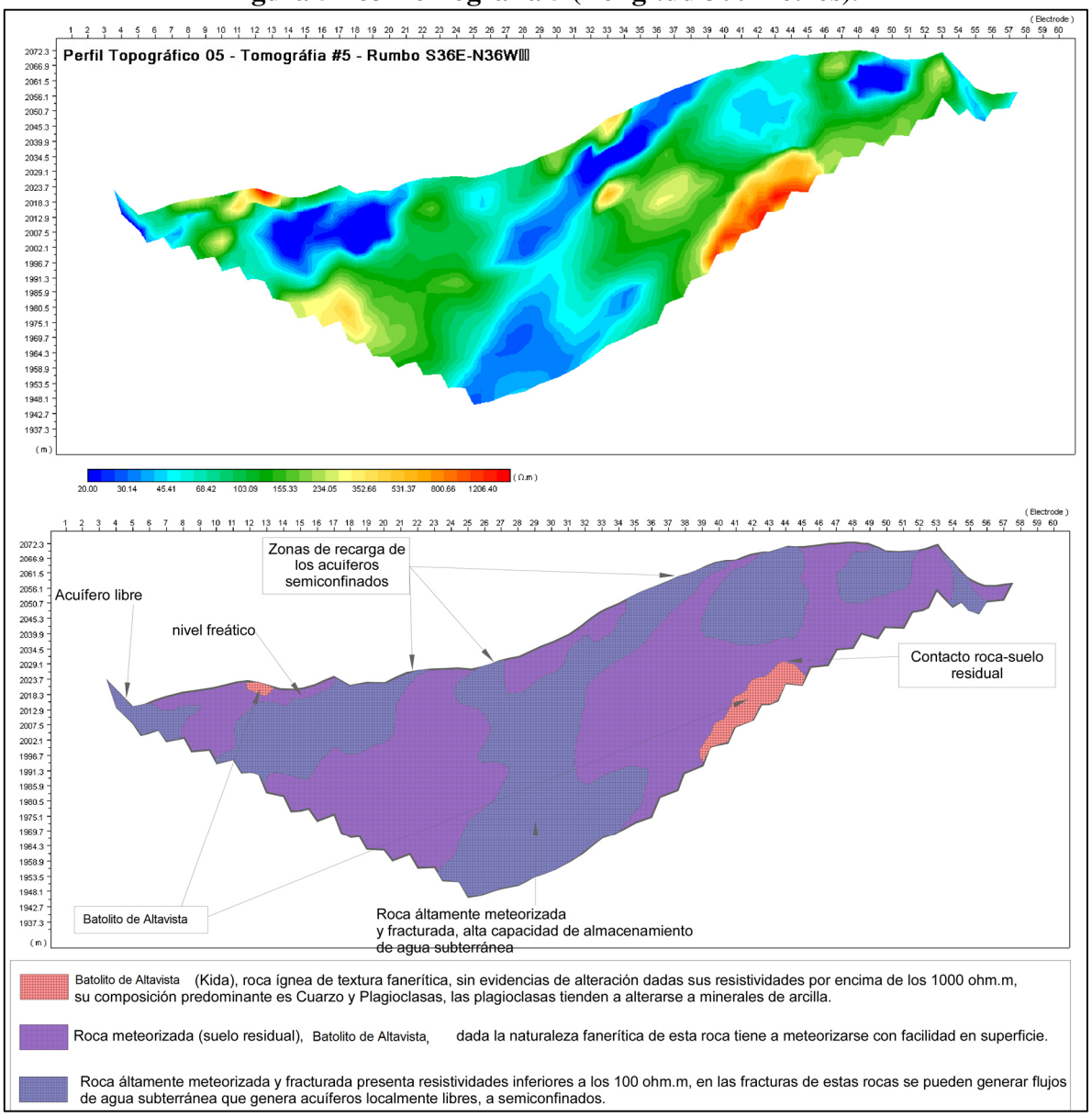


Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

Para la tomografía 5, Figura 5-183, se han observado tres contrastes de resistividades, en menor proporción se encuentra roca fresca asociada a la Diorita de Altavista, en superficie lo que mas abunda es la generación de suelo residual asociado a la meteorización y alteración de la Diorita, se evidencia también la generación de acuíferos libres y semiconfinados localmente distribuidos en rocas altamente meteorizadas y fracturadas de la Diorita de Altavista, también se evidencian posibles zonas de recarga (electrodos 4-6, 18-22, 34-40, 43-45, 49-52), en esta tomografía se evidencia la magnitud de meteorización y

alteración que tiene la Diorita de Altavista en el área de estudio, donde en la zona mas profunda (80 m) no se evidencia roca fresca a esa profundidad, la roca inalterada se observa en superficie en los electrodos 12 y 13, entre los sitios de ubicación de los electrodos 39 a 45 a 35 m de profundidad, se observan resistividades superiores a los 1000 ohm.m que se asocian a la Diorita.

Figura 5-183 Tomografía 5 (Longitud 300 metros).



Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

La información tomada de los archivos de las Tomografías geoeléctricas, permite extraer a partir de la litología la base de datos, que se emplea en el programa computacional Surfer

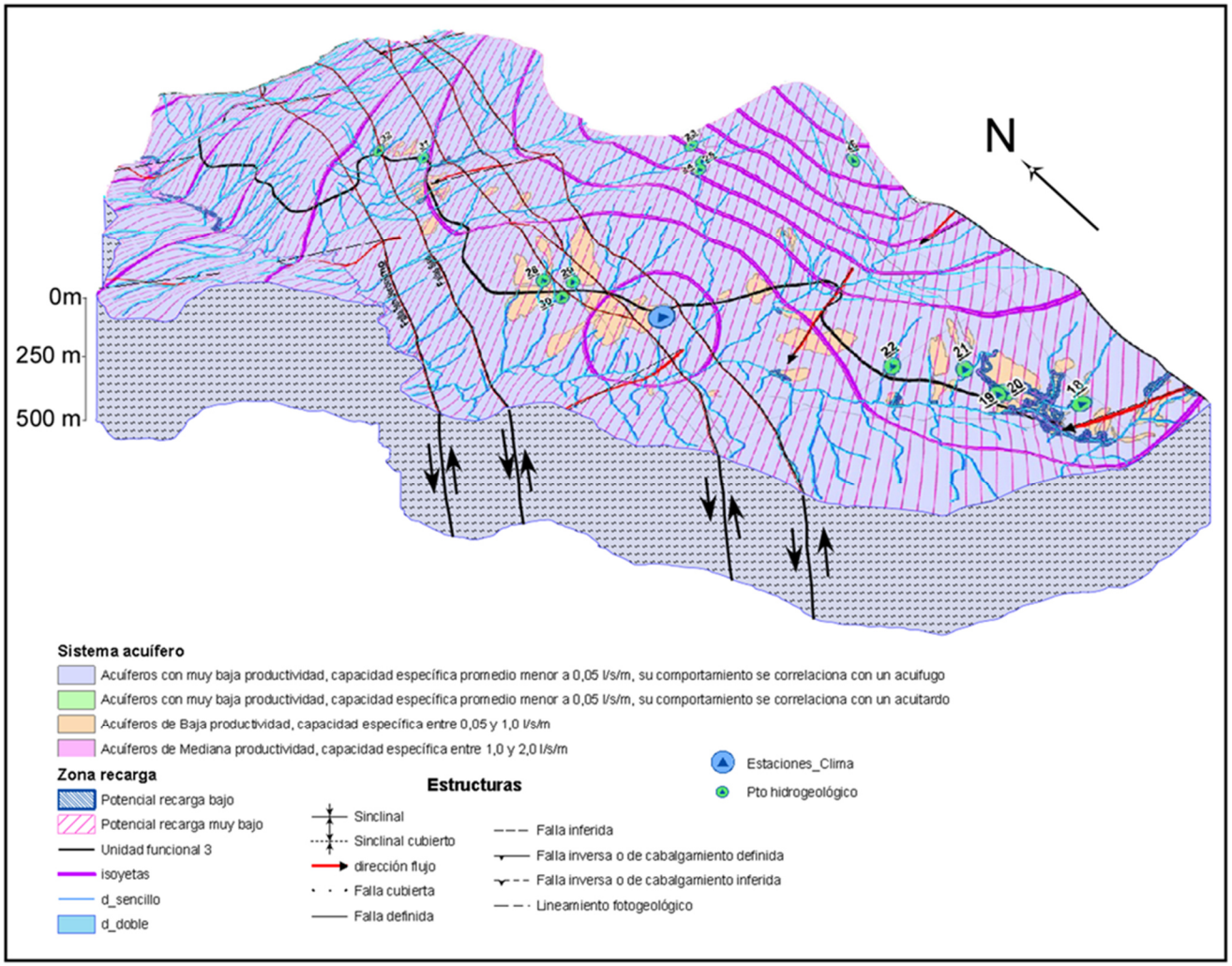
(Marca registrada de Golden Software), para la creación de las diferentes capas e isolíneas, como también del gráfico tridimensional en sus respectivos cortes.

Teniendo en cuenta esta información se procede a generar las capas superiores e inferiores de los acuíferos identificados, asociando esto con las principales estructuras geológicas identificadas y geo-referenciadas generadas de las 9 secciones levantadas en la galería piloto, las zonas de flujo preferente del agua subterránea incluidas en el modelo hidrogeológico conceptual obedecen a las direcciones de flujo de los acuíferos someros teniendo en cuenta que se utilizaron los datos obtenidos a partir del inventario de puntos de agua subterránea los cuales en su mayoría son manantiales, los perfiles de meteorización de las tomografías eléctricas así como los datos de nivel freático no se incluyen dentro de la figura del modelo hidrogeológico conceptual ya que por la escala estos no son visibles, el contacto suelo – roca que sugiere la prospección geofísica oscila entre los 0 y los 80m, y la variación del nivel freático que sugiere la prospección geofísica sugiere variaciones que oscilan entre los 0 y los 45 m, los análisis fisicoquímicos se asocian a la litología de cada unidad y permite definir límites litológicos e hidrogeológicos.

Se generaron secciones que representan los modelos hidrogeológicos conceptuales para cada unidad funcional, en este sentido para la unidad funcional 1 se generaron dos (2) modelos hidrogeológicos (Ver Figura 5-184 y Figura 5-185), y para la unidad funcional (3) un modelo hidrogeológico el cual corresponde al área del túnel. (VerFigura 5-186).

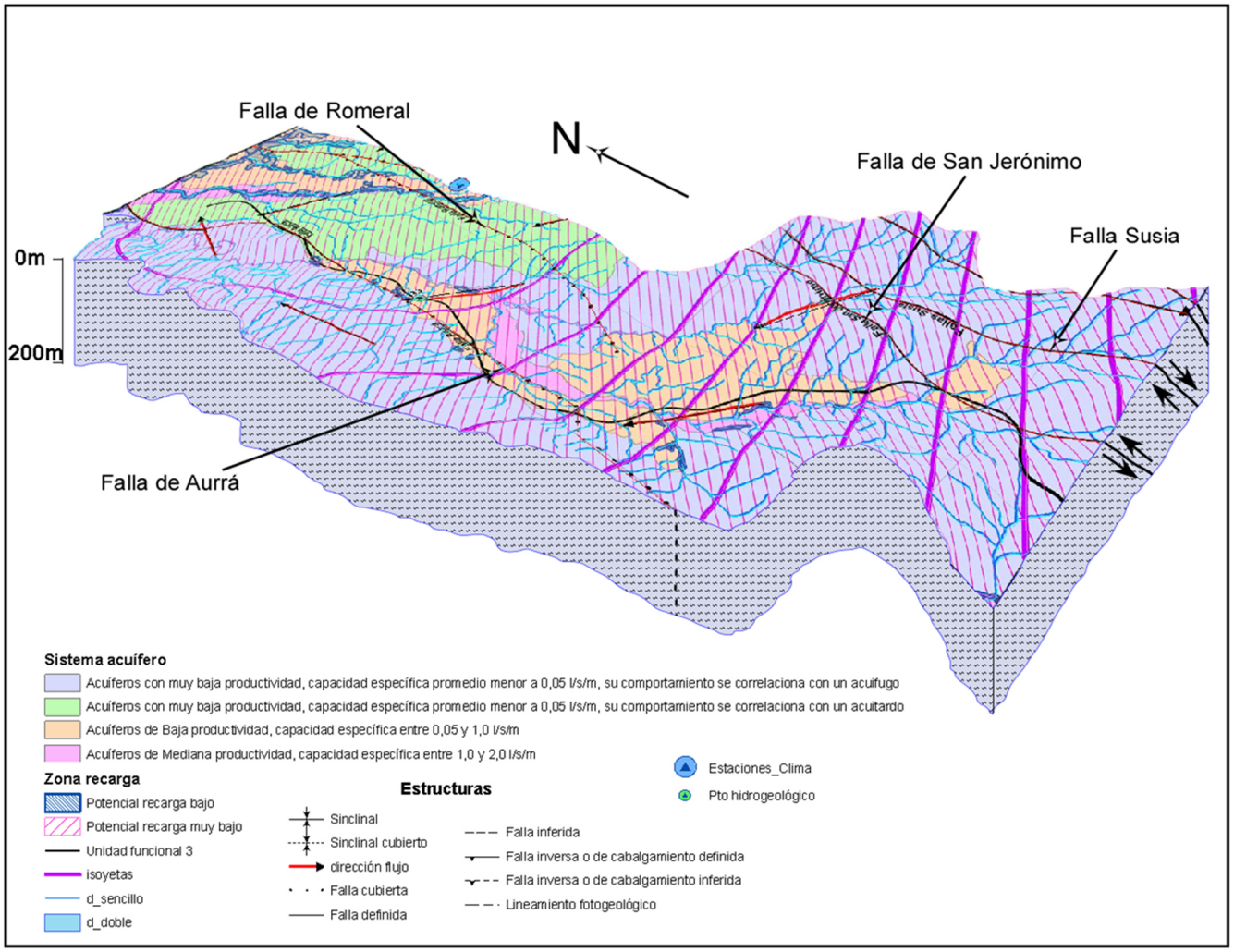
Para el modelo hidrogeológico conceptual para el área del túnel (ver Figura 5-186), se evidencia por la litología en superficie el área de potencial de recarga baja, que se encuentra asociado a los depósitos de edad Cuaternario, los cuales tienen poco espesor, también se obtiene un área de potencial de recarga muy bajo asociado a los suelos producto de la meteorización de los complejos ígneo metamórficos, y el macizo rocoso.

Figura 5-184 Modelo Hidrogeológico conceptuel Unidad funcional 1 (parte 1)



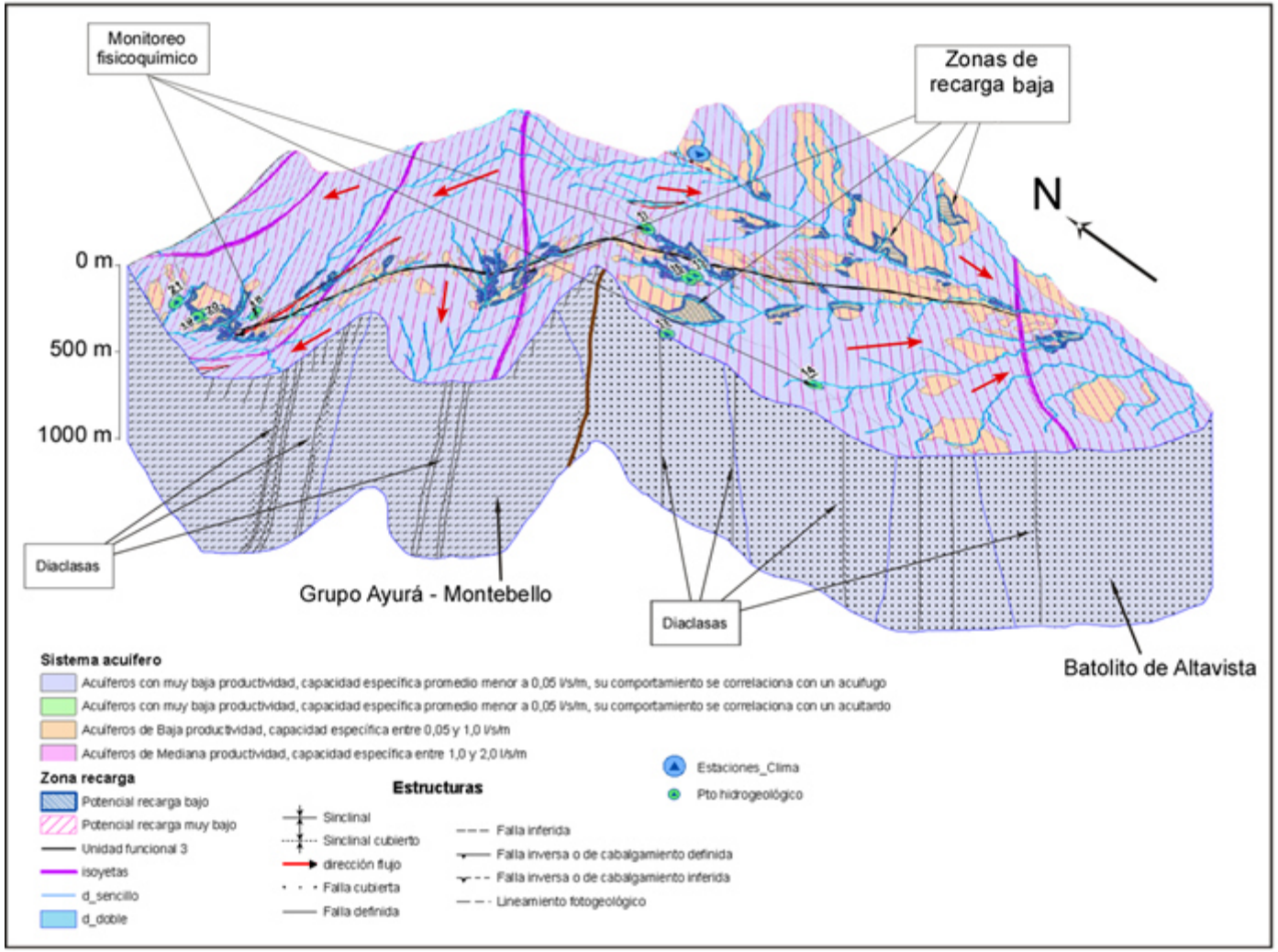
Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

Figura 5-185 Modelo Hidrogeológico conceptual Unidad funcional 1 (parte 2)



Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

Figura 5-186 Modelo Hidrogeológico conceptual para la Unidad funcional 3 (túnel)



Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

5.1.8.7 Modelo matemático del flujo de agua subterránea para el tramo del túnel

El modelo matemático de flujo de aguas subterráneas fue generado a partir de los datos estructurales obtenidos de la galería piloto (túnel existente) los cuales fueron el insumo para generar las direcciones de flujo preferente del macizo rocoso, también se dispuso de los datos del inventario de puntos de agua subterránea, prospección geofísica y geotécnica y unas perforaciones auxiliares realizadas. Este es un modelo que funciona para el área del túnel propuesto, puesto que se encuentran en la misma dirección, con las mismas unidades geológicas y la separación entre túnel y túnel no es mayor a 30 m. medida no significativa para la escala geológica e hidrogeológica, en este sentido se considera el túnel existente como una galería piloto que ha servido de herramienta para la caracterización geológica e hidrogeológica del maciso rocoso del área de influencia.

- **Metodología.**

El objetivo de la modelización es estimar, a partir de los datos con los que se cuenta en la actualidad, la afección que la construcción del túnel puede suponer al régimen de los acuíferos que atraviesa, y en consecuencia laincidencia que ello puede suponer sobre las captaciones y aprovechamientos existentes. Se han estimadotambién las filtraciones que se van a producir en los túneles en fase de construcción y de explotación.

La información de entrada en muchos casos se ha tomado teniendo en cuenta el escenario mas crítico, es decir se plantea una profundidad de nivel freático muy somera, un basamento hidrogeológico muy fracturado que pueda actuar como medio de porosidad secundaria, entre otras condiciones.

- **Validez de la modelización matemática MODFLOW.**

El modelo a gran escala del túnel, con el que se analiza el comportamiento y funcionamiento en condiciones naturales de los acuíferos afectados, se ha realizado por medio del código MODFLOW, empleando el programa Visual MODFLOW.

El MODFLOW es un código abierto desarrollado por el USGS (UnitedStates Geological Survey), del que se han ido realizando varias versiones. La versión MODFLOW-2000 es la utilizada para los cálculos realizados en este documento.

El MODFLOW se utiliza para la modelización del movimiento del agua a través de un medio poroso que cumple unas ciertas condiciones de homogeneidad y ortotropía. En este caso, la elaboración del modelo numérico del sistema macizo-túnel mediante el programa MODFLOW cumple las condiciones necesarias para que el flujo del agua pueda ser asimilado como un flujo en un medio poroso.

Esta equivalencia, si bien no es exacta, se puede considerar suficientemente aproximada en estos tipos de macizos rocosos fracturados. Ello se debe a que las dimensiones de la sección

del túnel son pequeñas en comparación con las dimensiones del macizo, y por otra parte, la distancia media entre diaclasas, tal como se ha señalado en apartados anteriores, es pequeña en comparación con las dimensiones de la sección del túnel. Por otro lado, el flujo en el sistema puede ser considerado como estacionario, donde hay un equilibrio entre el caudal drenado por el túnel y la recarga proveniente del exterior.

El túnel se considera como una galería de drenaje donde la presión es la atmosférica, lo que produce cambios en los gradientes hidráulicos del macizo, reorientando el flujo hacia el túnel. En estas condiciones, existe la posibilidad de que descienda el nivel freático si el caudal drenado por el túnel es mayor que el aporte de la recarga. En este tipo de acuíferos que se consideran libres, los efectos en el sistema hidrogeológico se reflejan en la magnitud de dichos cambios en el nivel freático.

- **Validez de los datos climatológicos.**

Los datos climatológicos utilizados en los análisis han sido datos generales a gran escala publicados por IDEAM para el conjunto de Colombia. Si bien existen datos de precipitaciones más pormenorizados de múltiples estaciones meteorológicas repartidas por todo el país, de cara al estudio de las aguas subterráneas se trabaja preferiblemente con valores de lluvias medios en zonas geográficamente amplias. De este modo se evitan las variaciones locales y temporales de las variables climáticas (precipitación, fundamentalmente), que no se transmiten en la realidad al sistema acuífero.

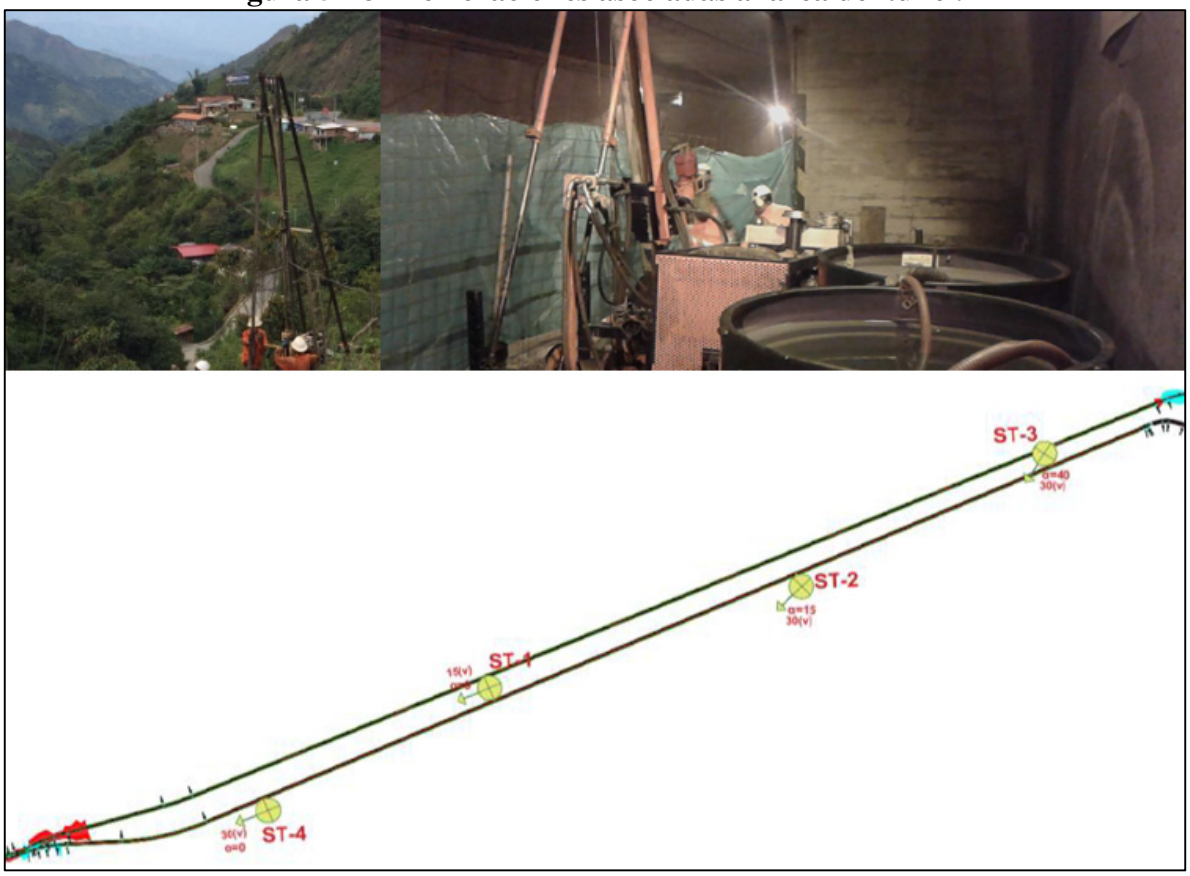
Adicionalmente, cabe decir que los parámetros de entrada a los modelos son principalmente los niveles freáticos deducidos de la configuración topográfica, teniendo la infiltración una influencia muy menor en los resultados.

- **Validez de los datos hidrogeológicos.**

El modelo se realiza en régimen permanente, por la longitud del túnel, se ha utilizado para analizar las variaciones estacionales de los niveles freáticos y de los caudales de infiltración. No obstante, dado que no se dispone de suficientes datos de niveles freáticos medidos a lo largo de un año completo, estos análisis se han tenido que basar en una estimación desde un escenario muy crítico de la variabilidad de los niveles freáticos naturales en función de la variación estacional de precipitaciones.

A partir de siete (7) perforaciones realizadas en el área de influencia, se pudo determinar que no hay nivel freático y que efectivamente los niveles estimados para el modelo fueron muy pesimistas y representan el escenario más crítico posible. (Ver Figura 5-187)

Figura 5-187 Perforaciones asociadas al área del túnel.



Fuente: Modificado de TYPSA, 2013.

- **Datos Climatológicos.**

Según los datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), los principales indicadores climáticos de la zona del Túnel de Occidente se resumen a continuación:

Precipitación: Se sitúa en torno a los 2000 mm/año, con un máximo de 2500 mm/año en las zonas más altas.

Número de días con lluvia: Alrededor de los 200 días al año.

Temperatura media: La temperatura media de la zona está en los 16º a 18º, menor en las zonas altas y mayor en las laderas.

Evapotranspiración: Los estudios de IDEAM muestran una evapotranspiración potencial en el orden de los 1250 mm/año en la zona. No obstante, la evapotranspiración real ETR se ha calculado por medio de la expresión de Turc, que es la siguiente:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0{,}9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Siendo $L = 300 + 25t + 0.05t^2$

En esta expresión P es la precipitación total anual y t es la temperatura media anual. Sobre estaexpresión (válida en principio para todos los climas) se prefiere aplicar un coeficiente corrector de1.15, para tener en cuenta que la zona de estudio está en la zona tropical, en la que la vegetaciónes más densa que el promedio global, y por lo tanto también la evapotranspiración.

Con esta corrección se ha calculado la ETR en las áreas de distintas características que se indican más adelante, resultando valores alrededor de los 1000 mm/año, siendo algo inferior a los datos de IDEAM.

Escorrentía: La escorrentía promedio anual del área de estudio, evaluada de forma global (caudal que conducen los ríos), está situada alrededor de los 1000 mm/año (datos de IDEAM, 2010). La escorrentía sobre el terreno será menor, ya que la cifra anterior incluye también la parte que se infiltra y posteriormente termina saliendo a la superficie en manantiales. La escorrentía depende del relieve, de la permeabilidad del suelo y de la presencia de vegetación. Las áreas más pendientes, que coinciden con las zonas más altas topográficamente y con mayor precipitación, son consecuentemente las que tienen una mayor escorrentía. El coeficiente de escorrentía (fracción de la precipitación que escurre) se ha podido evaluar mediante la tabla de Razuri, 1984.

En el área de estudio el terreno está ocupado por bosques en las zonas más altas y lluviosas, mientras que en el resto se alternan prados y matorrales con bosques dispersos. Aparece en todo caso un relieve bastante escarpado, aflorando las rocas con capas de suelos residuales arcillosos de cierta importancia, que tienden a ser impermeables. Se han considerado tres zonas dentro del área de estudio a efectos de calcular la escorrentía, tal y como se explica en el siguiente apartado.

Recarga natural: La recarga puede calcularse como la diferencia entre la precipitación y la suma de evapotranspiración y escorrentía. Se ha considerado una única zona dentro del área de estudio:

- ✓ Zonas bajas de valle, de relieves algo más suaves y abundancia de pastos y matorrales.
- ✓ Zonas de ladera de fuerte relieve y vegetación alterna de bosques y prados.
- ✓ Zonas altas y relativamente llanas, con coberteras de bosques.

En la Tabla 5-101 se calcula la infiltración o recarga de cada zona. Se observa que la infiltración es muy pequeña en la mayor parte del área, prácticamente nula. Sin embargo, en las zonas de altiplano la recarga sí es significativa y alcanza un valor del orden de los 500 mm/año, que será el valor utilizado en los modelos. La causa es la fuerte precipitación

y baja evapotranspiración por la baja temperatura, unido a una escorrentía reducida por las pendientes suaves.

Tabla 5-101 Cálculo de la recarga (infiltración) anual en el área del túnel

Zona Topográfica	Zonas de Valle	Zonas de ladera	Altiplanos
P (mm/año)	2000	2200	2500
T media (°C)	18	17	16
Coeficiente L (Turc)	1041,6	970,7	904,8
ETR (mm/año) – Turc	933,8	895,4	855,8
ETR (mm/año)	1073,9	1029,7	984,1
Coef. E	50,0%	55,0%	40,0%
Escorr. (mm/año)	1000	1210	1000
Infiltr (mm/año)	0,0	0,0	515,9

Fuente: Modificado de TYPSA, 2013.

- **Tipos de terreno y permeabilidades.**

Para modelizar el comportamiento del acuífero del túnel de Occidente, se han diferenciado cuatro tipos deterreno con permeabilidades distintas, que se indican a continuación:

- ✓ Suelos residuales y Saprolito, que se ha tomado como un mismo material. Se ha consideradoun espesor mínimo de 25 m.

- ✓ Roca superficial, hasta 100 m de profundidad, con las juntas relativamente abiertas. Se considera que, a efectos de permeabilidad, en el modelo se puede considerar el mismo material para las dos formaciones de roca identificadas.

- ✓ Formación KidA, Diorita de Altavista, macizo rocoso sano formado por dioritas y granodioritas.Se considera a partir de 100 m de profundidad, coherente con la cartografía geológica.

-

- ✓ Formación Pzes, Grupo Ayurá Montebello, macizo rocoso sano formado por esquistos y filitas. Se considera a partir de100 m de profundidad, coherente con la cartografía geológica.

En todos los casos se ha partido de los valores generales mostrados por la bibliografía y los estudios previos, que se han modificado a la vista de los resultados de la campaña efectuada y de la mayor o menor presencia de fallas importantes.

Los coeficientes de permeabilidad (conductividades) generales están referidos al plano XY, es decir, son conductividades horizontales. En la dirección Z se ha considerado que el terreno es más impermeable en todos los tipos de terreno, ya que el agua tiene más dificultad para desplazarse en la dirección vertical. Estasuposición es habitual en numerosos modelos hidrogeológicos.

En general, se ha considerado que la permeabilidad en dirección vertical es un orden de magnitud inferiorque en dirección horizontal.

En este caso, gracias al conocimiento adquirido durante la excavación del primer tubo, se tiene unconocimiento general de la permeabilidad del macizo. Entre otras cosas, se ha podido determinar que elcontacto entre las dos formaciones de roca no supone una vía preferente de agua.

La empresa concesionaria del túnel de Occidente ha facilitado al equipo del Consorcio T&C acceso a aforos realizados en el túnel. Estos datos han permitido analizar y realizar cálculos iterativos, que han permitidoajustar la conductividad de cada uno de los macizos rocosos. En este caso, también se ha tenido en cuentael factor de escala del área de trabajo de un análisis de estas características, a escala regional, frenteanálisis más localizados. En general, se acepta que a mayor área analizada, mayor es la conductividad deun macizo rocoso. (Ver Tabla 5-102)

Tabla 5-102 Tipos de terreno considerados en el modelo.

Tipo de terreno	Descripción	Conductividad XY	Conductividad Z
Formaciones superficiales	Suelos residuales arcillosos y saprolito de granitos/gneises	K= $1*10^{-4}$ m/s	K= $1*10^{-5}$ m/s
Roca superficial (< 100 m)	Granodioritas (Kida) hasta el K 3+000, Grupo Ayurá Montebello (Pzes) en adelante	K= $1*10^{-5}$ m/s	K= $1*10^{-6}$ m/s
Roca sana (> 100 m)	Diorita de Altavista. Granodioritas y dioritas (Kida) hasta la K 3+000	K= $5*10^{-7}$ m/s	K= $5*10^{-8}$ m/s
Grupo Ayurá Montebello (Pzes) (> 100 m)	Esquistos y Filitas (Pzes) desde la K3+000 hasta final del tramo	K= $2,5*10^{-7}$ m/s	K= $2,5*10^{-8}$ m/s

Fuente: Modificado de TYPSA, 2013.

- **Observaciones sobre el terreno.**

La calibración del modelo se ha realizado ajustando los resultados a las observaciones realizadas sobre el terreno. En los siguientes puntos se resumen estas observaciones:

✓ Aforo de los caudales reales infiltrados en el tubo existente. El valor medio del caudal registrado es de unos 15-16 l/s. (Ver Tabla 5-103)

Tabla 5-103 Lectura de caudales infiltrados en el Túnel de Occidente.

Fecha	Punto de Lectura	Caudal (l/s)
Septiembre - 2011	Puente La Negra	13
Diciembre - 2011	Puente La Negra	21
Enero - 2011	Puente La Negra	14,84
Abril - 2012	Puente La Negra	17,5
Mayo - 2012	Puente La Negra	18
Septiembre – 2012	Puente La Negra	11,32
Octubre - 2012	Puente La Negra	14,65
Enero - 2013	Puente La Negra	15
Febrero - 2013	Puente La Negra	16,5

Fuente: Modificado de TYPSA, 2013.

- ✓ Caudales constantes a lo largo del año en ríos y quebradas importantes, que fijan la posición del nivel freático en la superficie.
- ✓ Situación de los principales manantiales y quebradas del área.
  -
- ✓ Niveles en los bordes del modelo, deducidos a partir de las condiciones hidrogeológicas generales de la zona estudiada.

- **Modelo de cálculo.**

En función de los datos anteriores, se ha generado un modelo de cálculo con las siguientes características. Este modelo se ha calculado por medio del programa Visual MODFLOW, de SchlumbergerWaterServices.

Dimensiones: Modelo de 10 km de anchura por 8 km de altura, que tiene su origen en las coordenadas UTM siguientes: X= 426 531.7 Y= 691 311.0. En altitud, el punto más alto del modelo está en torno a la cota 3070 m, mientras que el más bajo topográficamente está en la cota 1740 m. La base del modelo se ha colocado en la cota 1500 m.

Capas: Se han considerado 3 capas, que se definen del siguiente modo: suelos superficiales y saprolitos (25 m de espesor medio), roca más superficial (entre 25 y 100 m de profundidad), y roca sana profunda (a partir de 100 m de profundidad). A su vez, el sustrato rocoso consta de dos formaciones rocosas: granodioritas hasta la abscisa K 3+000, y esquistos hasta el final del tramo. Estas capas se han subdivido posteriormente para mejorar la convergencia del modelo.

Discretización: Se han considerado elementos en planta de 100 m de lado (80 filas y 100columnas).

Régimen: Se considera régimen permanente, sin incorporar el tiempo al modelo.

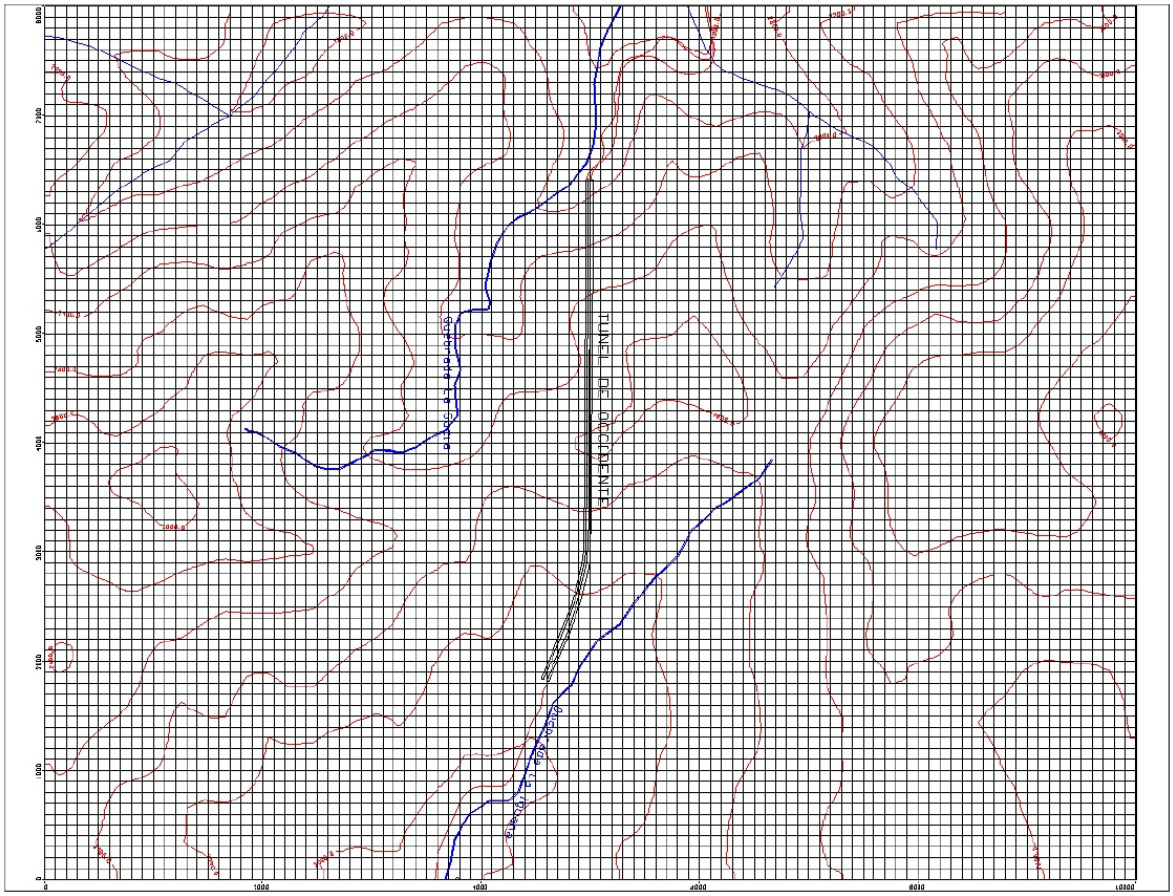
Propiedades del terreno: Se han utilizado las conductividades indicadas en la tabla anterior, que se han ido modificando y tanteando hasta lograr reproducir las condiciones de

contorno.

Condiciones de contorno: Las condiciones de contorno introducidas al modelo son las indicadas enlos apartados anteriores. En esta caso la recarga es nula.

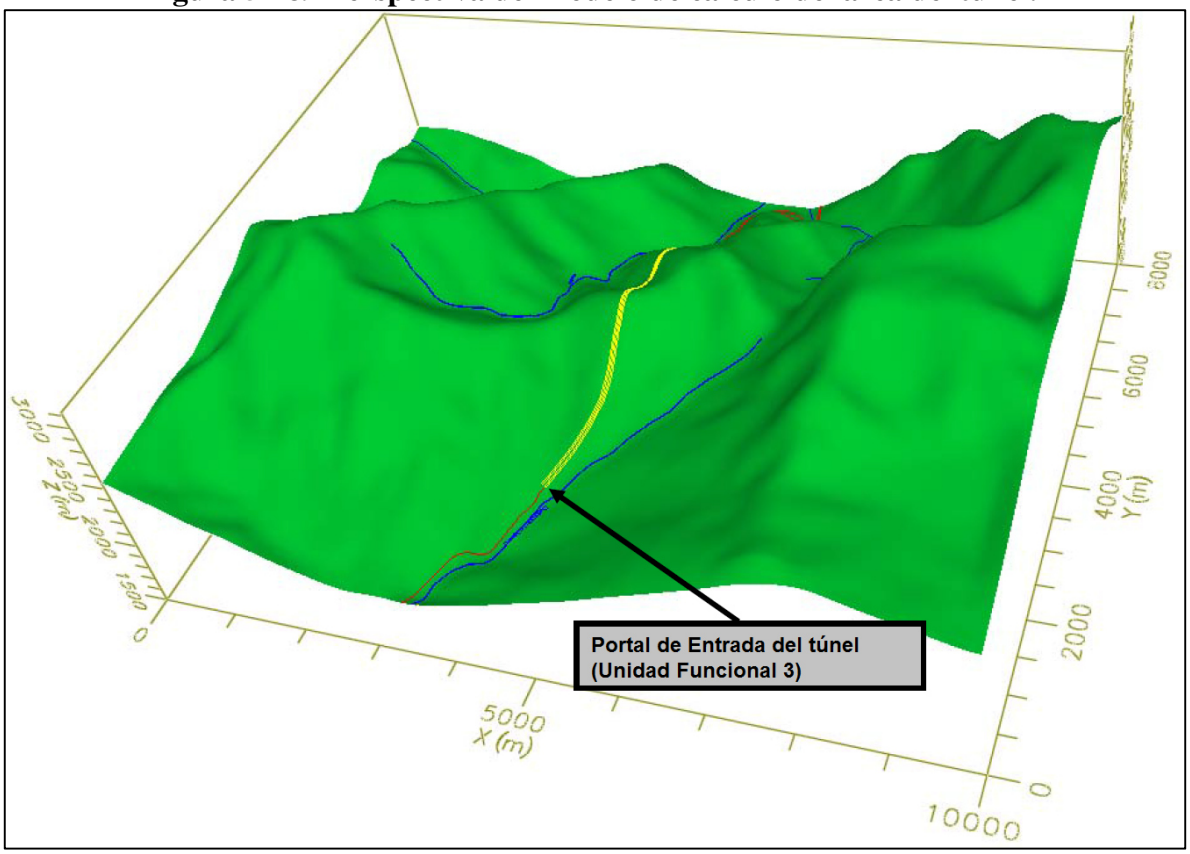
Geometría y modelo geológico: La Figura 5-188y Figura 5-189 muestran una planta del modelo, una perspectiva tridimensional del modelo de cálculo y un mapa de contornos.

Figura 5-188 Planta del modelo de cálculo del área de influencia mostrando la discretización



Fuente: Modificado de TYPSA, 2013.

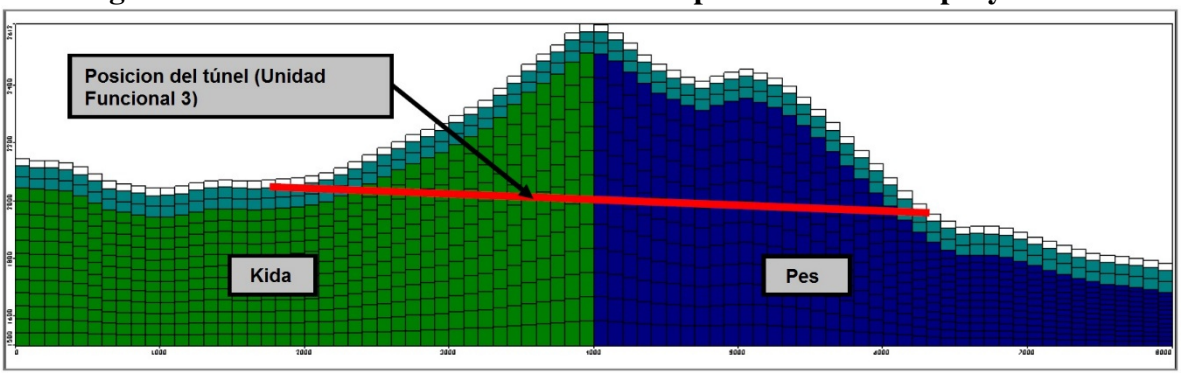
Figura 5-189 Perspectiva del modelo de cálculo del área del túnel.



Fuente: Modificado de TYPSA, 2013.

En la Figura 5-190, hay que tener en cuenta que el trazado del túnel no es una alineación recta, sino que el primer tramo del túnel, situado a la izquierda de la imagen, es en curva. Otro comentario a tener en cuenta es que las coordenadas reflejadas en dicho gráfico son relativas al propio modelo, y no corresponden ni a las abscisas del eje de trazado, ni a las coordenadas UTM.

Figura 5-190 Perfil del modelo mostrando la posición del túnel proyectado.

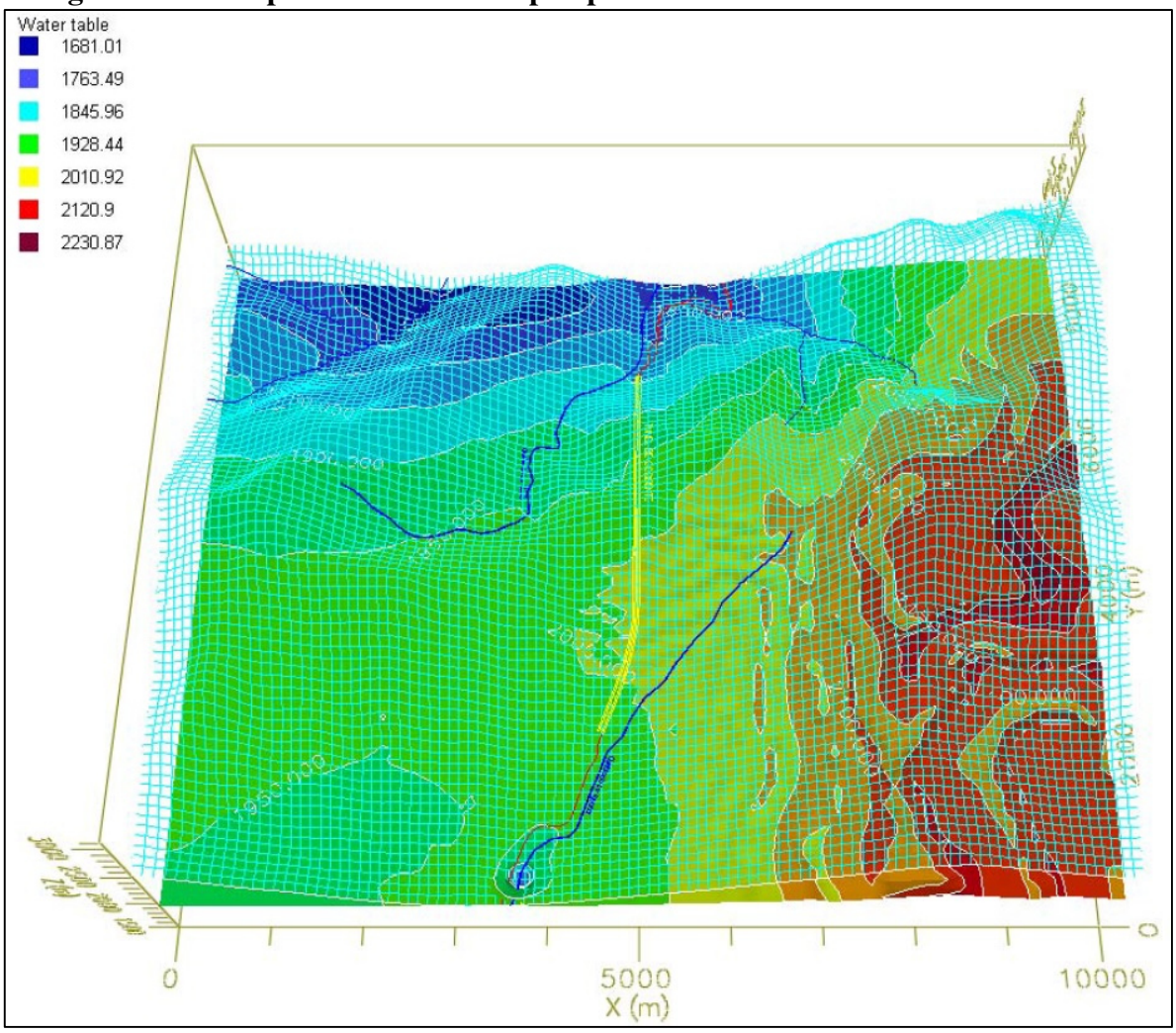


Fuente: Modificado de TYPSA, 2013.

- **Resultados del Cálculo.**

Los resultados del cálculo realizado pueden verse en las figuras que se incluyen a continuación. El cálculo ha podido establecer con bastante precisión el funcionamiento del acuífero, y como conclusiones más importantes de cara a la construcción del túnel se pueden señalar los siguientes puntos. (Ver Figura 5-191)

Figura 5-191 Mapa de contornos en perspectiva de la elevación del nivel freático.



Fuente: Modificado de TYPSA, 2013.

El túnel se aloja en un macizo de menor cota máxima que los colindantes. Este macizo presenta una cota máxima de 2550 m, frente a la cota máxima de 3000 m de las montañas adyacentes. La cota media del túnel es de 2000 m. Tanto a la entrada como a la salida del túnel, aparecen sendas quebradas, que conducen el agua de escorrentía de los macizos adyacentes hacia los valles del río Medellín y del Aburrá por el lado Oriental, y al valle del Cauca por el lado Occidental. En general, la recarga de estos macizos es muy baja, dadas

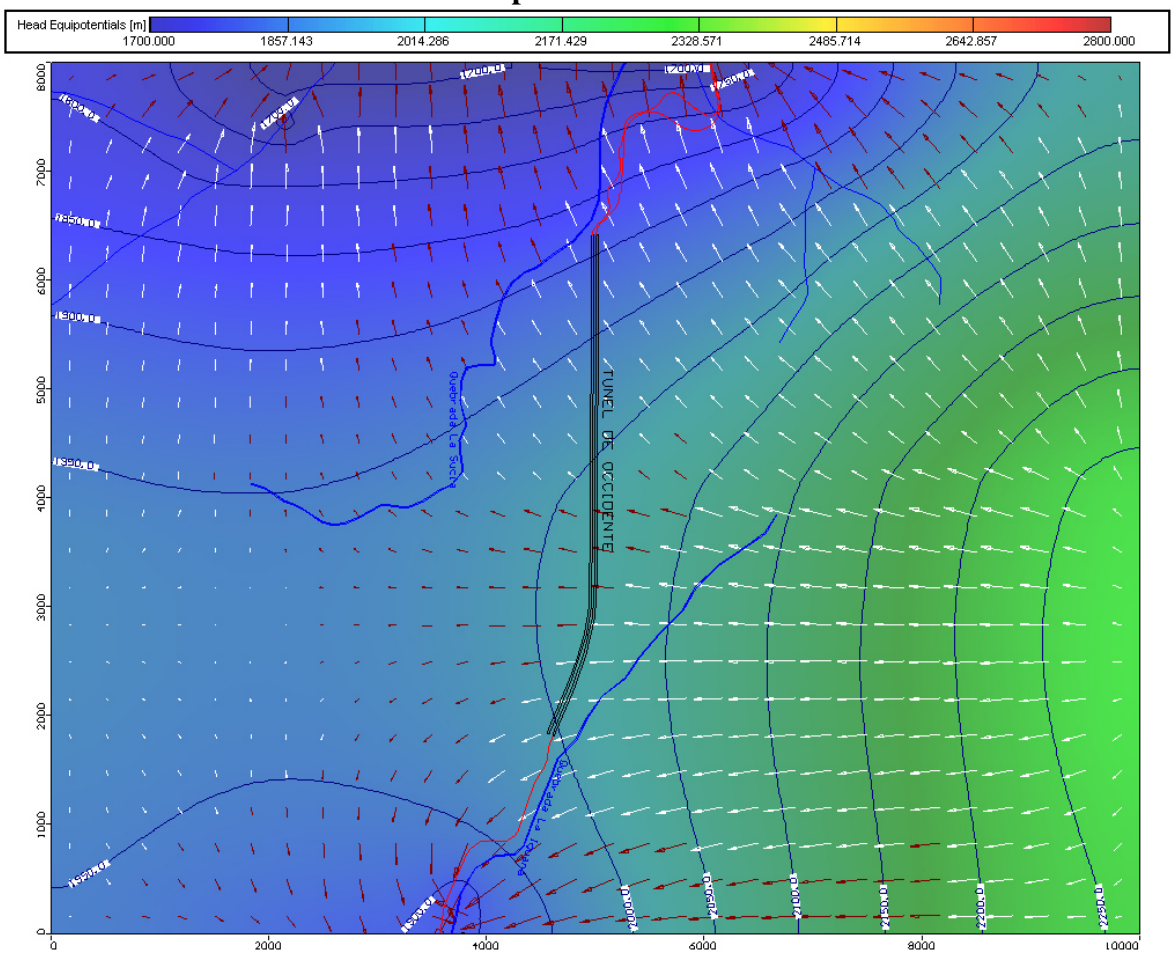
las fuertes pendientes.

El macizo rocoso en ambas formaciones diferenciadas es bastante impermeable, tal y como se ha calibrado con el aforo en el tubo existente. Esta características geológicas, junto con la recarga procedente del altiplano de Pantano, origina un nivel freático que queda por encima del túnel. Se considera que este nivel freático tiene una geometría muy estable. El túnel parece quedar por debajo del nivel freático hasta algo más de 40 m.

Es poco probable que la ejecución del túnel pueda influir de manera significativa en la profundidad del nivel de agua, pues la recarga es muy superior al caudal drenado. En este caso, el primer tubo del túnel continua drenando el macizo rocoso años después de su construcción, sin que se haya producido un rebajamiento significativo del nivel freático.

La excavación de un segundo tubo en el túnel de Occidente no se prevé que altere prácticamente la distribución hidrogeológica del sistema hidrológico existente, máxime cuando se ha previsto revestir el túnel con un anillo de concreto y colocar lámina de impermeabilización por motivos de explotación.

Figura 5-192 Mapa de direcciones de flujo en profundidad (macizo rocoso), producto del cálculo para el área del túnel.



Fuente: Modificado de TYPSA, 2013.

- **Estimación de Caudales de infiltración en el túnel.**

Una vez presentados los resultados de los modelos hidrogeológicos regionales disponibles, partiendo tanto de los parámetros y condicionantes expuestos en el apartado previo, como de los nuevos datos obtenidos a partir de la campaña de investigación geotécnica complementaria desarrollada, se han desarrollado una serie de modelos numéricos que representan las redes de filtración al interior de los túneles objeto de estudio con el fin de evaluar y cuantificar las infiltraciones que previsiblemente se producirán en el Nuevo Túnel de Occidente tanto durante la fase de construcción como durante la fase de explotación del mismo.

A partir de los resultados obtenidos a partir de la modelización numérica se ha podido establecer el caudal que a evacuar en el interior del túnel, que servirá de base para el dimensionamiento del sistema de drenaje a implementar como parte del diseño.

- **Conceptos previos.**

Para facilitar la comprensión de las hipótesis consideradas a la hora de analizar la interacción hidráulica entre los túneles, y explicar los motivos que determinan la necesidad de los cálculos que se han desarrollado, a continuación se introduce una serie de conceptos básicos relacionados con los caudales y redes de filtración en un medio permeable, que resultan de aplicación directa para el caso que nos ocupa.

Carga Hidráulica: En el terreno, el agua sólo se mueve cuando existen diferencias de carga hidráulica entre unas zonas y otras, dirigiéndose el flujo hacia las zonas de menor carga. La magnitud que determina el flujo de agua a través del terreno es pues la carga hidráulica (h), que representa la energía mecánica total del fluido.

La ley que rige con carácter general el movimiento del agua es la conocida como ecuación de Bernoulli, según la cual la carga hidráulica (h) se expresa como:

$$h = z + \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

Siendo:

h: Carga hidráulica o energía del agua por unidad de masa (tanto potencial como cinética) en un determinado punto

z: Carga geométrica

ρ: Densidad del terreno

$\Psi = u/\gamma_w$: Carga de presión

$v^2/2 \cdot g$: Carga de velocidad (en el terreno el flujo de agua suele producirse a velocidades pequeñas)

Despreciando el término de carga de velocidad en el movimiento del agua en el terreno, la ley de Bernoulli queda reducida a la siguiente expresión:

$$h = z + \frac{u}{\gamma_w} = z + \Psi$$

Permeabilidad: Tal y como se ha descrito anteriormente, el flujo de agua se produce entre puntos con diferente carga hidráulica, dirigiéndose hacia las zonas de menor carga.

Esta pérdida de carga que se da entre ambos puntos, expresada por unidad de longitud, se

denomina gradiente hidráulico (i), y se define por la ecuación:

$$i = grad(h) = \frac{dh}{dl} \approx \frac{\Delta h}{L}$$

Considerando un régimen de flujo laminar, a partir de la Ley de Darcy se puede relacionar la velocidad de flujo (v) con este gradiente hidráulico (i) mediante el coeficiente de permeabilidad (k):

$$v = -k \cdot i \approx -k \frac{\Delta h}{L}$$

Por otro lado, teniendo en cuenta la ecuación de la continuidad y sin considerar fuentes ni sumideros:

$$M_{salida} - M_{entrada} = \rho \left[\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right] \cdot dx \cdot dy \cdot dz = 0$$
$$\Longrightarrow \quad \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

Si se sustituyen ahora las expresiones correspondientes de la velocidad según la ley de Darcy resultará:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Y asumiendo un medio isótropo (k_x=k_y=k_z), nos queda la ecuación de Laplace:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \nabla^2 h = 0$$

Cualquiera de los programas de filtración que se empleen se basa en estas ecuaciones.

Variables de que depende el caudal de agua infiltrada: En definitiva, para cualquier tipo de terreno y problema a resolver, el caudal que se obtiene del cálculo de una red de filtración responde siempre a la siguiente ecuación general:

$$Q = k \cdot \Delta h \cdot C$$

Siendo:

Q: Caudal

k: Permeabilidad

Δh: Incremento de carga hidráulica

C: Constante geométrica

En base a ello, se puede establecer que el caudal de agua que se infiltrará al túnel será:

Proporcional a la permeabilidad del medio, por lo que a mayor permeabilidad mayor será la infiltración en el túnel.

Proporcional a la diferencia de carga hidráulica, de modo que a mayor altura de agua sobre la clave del túnel, mayor será la infiltración en el mismo.

Dependiente de la geometría del caso analizado, según sea un único túnel o dos paralelos y su situación en la zona de estudio.

Por ello, en el caso de estudio del Túnel de Occidente se hace fundamental considerar la existencia del túnel paralelo para los cálculos, así como tener en cuenta el nivel freático existente en el terreno del entorno y emplear unos valores adecuados de coeficientes de permeabilidad para las unidades hidrológicas atravesadas con la ejecución del túnel.

Régimen transitorio y estacionario: De forma general, en la mayoría de problemas geotécnicos la diferenciación entre régimen transitorio y estacionario no suele ser muy relevante, y el análisis suele centrarse en el estudio de la situación estacionaria a largo plazo cuando ya se ha alcanzado el equilibrio en la red de filtración.

Sin embargo, en el caso de estudio de filtraciones en túneles, esta diferenciación es relevante, puesto que una parte muy importante de los caudales de infiltración que se producen en el túnel tienen una magnitud inicial (transitoria) notablemente mayor que la que se mantiene posteriormente en el tiempo (estacionaria).

- **Calculo Empírico – Analíticos.**

En la bibliografía existen diferentes soluciones analíticas para valorar la presencia deagua de infiltración en túneles, que permiten obtener el valor de las filtraciones iniciales en los mismos (régimen transitorio), y tras una serie de correcciones calcular asimismo las filtraciones durante la fase de construcción (régimen estacionario).

El mayor inconveniente que presentan estas formulaciones de cara al estudio de filtraciones del Nuevo Túnel de Occidente es que son de aplicación para el análisis de túneles aislados en medios homogéneos. Por ello, el cálculo de caudales en base a estos método no tiene en consideración la presencia del túnel paralelo y su afección al régimen hidráulico del entorno, lo que deriva en valores de filtración conservadores (toda el agua del macizo será

drenada únicamente por el nuevo túnel a excavar).

No obstante lo anteriormente indicado, para el caso de estudio del Túnel de Occidente, se ha realizado una estimación de caudales infiltrados en los túneles a partir de la expresión de Goodman (1965):

$$Q_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot H_0}{2{,}3 \cdot \ln \frac{2 \cdot H_0}{r}}$$

Siendo:

Q_0: Caudal en $m^3/s/m$

k: Permeabilidad

H_0: Carga hidráulica

r: radio equivalente de excavación

A la hora de aplicar esta formulación, se asume un medio homogéneo e isótropo con una permeabilidad constante en el mismo.

A este respecto cabe indicar que los caudales que se presenten en el túnel vendrán condicionados por la red de diaclasas del macizo, su fracturación y la conexión de las fracturas, aspectos éstos que pueden llegar a ser muy variables. De este modo, el nivel freáticodel terreno puede no coincidir con la carga hidráulica real si el macizo está sano, sus juntas cerradas y no interconectadas. Esa representación puede ser más próxima a la real en las zonas fracturadas, donde se pueda poner en contacto el nivel superficial con el del túnel a favor de la roca fracturada.

Para el caso del Nuevo Túnel de Occidente el radio equivalente de excavación (r) es de aproximadamente 5,4 m, se ha asignado una carga hidráulica (H_0) de 50 m sobre la clave del túnel (lo que corresponde a 60 m medidos desde el centro de la sección) y la permeabilidad del medio quedó definida en la Tabla 5-104 (valor de k_h).

Cabe apuntar, al respecto de lo anteriormente inidcado, que el valor de la carga hidráulica considerado resulta conservador a la vista de los resultados de los sondeos realizados en el interior del túnel paralelo, para los que no se ha observado afluencia de agua significativa, ni mucho menos la existencia de presiones de agua emergentes (presión artesiana), lo que conjuntamente con las observaciones realizadas en la zona de clave de dicho túnel dificultan la posibilidad de entender la existencia de niveles freáticos situados por encima de la cota del mismo.

No obstante, a nivel del estudio realizado, y en lo sucesivo, se opta por considerar esta hipótesis, por entender que resultará conservadora de cara al dimensionamiento de las redes de drenaje y evacuación de agua a prever para la excavación del túnel.

Así pues, según la formulación de Goodman las filtraciones iniciales en régimen transitorio previstas para el Nuevo Túnel de Occidente alcanzarán un valor de $6{,}07 \cdot 10^{-2}$l/s por metro lineal de túnel para las secciones excavadas en la unidad litológica Diorita de Altavista, y de $3{,}04 \cdot 10^{-2}$l/s por metro lineal de túnel en el Grupo Ayura - Montebello, por lo que considerando la longitud total del túnel se obtiene un caudal de infiltración total igual a 207,88 l/s.

Cabe señalar que este método sobreestima en cierto modo el caudal, ya que normalmente los túneles se excavan en macizos finitos en los que el nivel piezométricohabitualmente se rebaja con el tiempo debido precisamente al drenaje inducido por la excavación y, una vez drenado el medio, la pérdida de presión de agua permite el cierre parcial de las juntas y la disminución por ello de la permeabilidad.

Por este motivo, Goodman desarrolló una ley parabólica que permite minorar el caudal anteriormente obtenido, para adaptarlo a la realidad que previsiblemente se presentará a lo largo del tiempo, debido a las variaciones por drenaje del acuífero.

Esta ley decreciente estima una reducción de los caudales de acuerdo a las siguientes pautas:

- En el momento inicial de excavación, el flujo resulta igual al caudal obtenido anteriormente.
- Una vez transcurridos 6 meses el flujo se habrá reducido hasta convertirse en un 20% del inicial.
- A los 12 meses de la excavación, el flujo se habrá reducido hasta convertirse en un 15% del inicial.
- A los 24 meses de la excavación, el flujo se habrá reducido hasta convertirse en un 10% del inicial.

En base a estas indicaciones, se ha calculado el caudal de filtración durante la construcción considerando los siguientes parámetros:

- Se supone la excavación del túnel con dos frentes de trabajo, situados en cada uno de los emboquilles, por lo que se excavará desde cada uno de ellos una longitud aproximada de 2280 m.
- La longitud de túnel emplazada en granodioritas y esquistos es prácticamente la misma, por lo que se asume que cada frente de ataque se excava íntegramente en cada una de estas unidades litológicas.

- El rendimiento diario medio considerado es de 4,5 m (valor aproximado), lo que equivale a una longitud de excavación de 99 m por mes si se consideran 22 días hábiles de trabajo por mes (hipótesis conservadora).
- El máximo caudal de filtración durante la construcción se dará al término de la excavación por cada uno de los frentes de ataque, por contar el túnel con una mayor longitud excavada.
- Para facilitar los cálculos, se ha linealizado la ley parabólica de disminución de caudales de Goodman.

De este modo, el caudal de filtración máximo estimado durante la construcción del Nuevo Túnel de Occidente para cada frente de ataque sería de 38,08 l/s en el tramo ejecutado en granodioritas y de 19,04 l/s en el tramo excavado en esquistos, teniendo en cuenta los tiempos de construcción anteriormente indicados.

Por otra parte, a largo plazo (tiempo superior a 24 meses) y en base a las hipótesis antes indicadas, el régimen de filtraciones estimado supondría un caudal total a lo largo de la longitud del túnel igual a 20,79 l/s (un 10% del caudal inicialmente calculado para cada sección, según la formulación de Goodman).

Tal y como se ha determinado anteriormente, este análisis únicamente contempla la excavación de un túnel en el macizo (sin considerar la existencia previa de otro túnel paralelo), por lo que los resultados corresponderían a la situación del túnel existente, que se excavó en el macizo sin la afección de otra excavación próxima.

En el caso del Nuevo Túnel de Occidente los resultados reales que se obtendrán en obra serán previsiblemente menores a los determinados en este apartado, por los motivos anteriormente indicados.

Adicionalmente cabe indicar que este último valor es similar al obtenido del aforo de caudales del túnel existente, de lo que se puede deducir asimismo que los parámetros hidráulicos adoptados podrían resultar representativos de los terrenos modelizados.

- **Cálculos Numéricos.**

Adicionalmente a los cálculos analíticos descritos en el apartado anterior, dada la existencia del túnel paralelo se hace necesaria la comprobación mediante métodos numéricos del caudal de filtración al interior del túnel, que posibilita la reproducción de las condiciones de cAdicionalmente a los cálculos analíticos descritos en el apartado anterior, dada la existencia del túnel paralelo se hace necesaria la comprobación mediante métodos numéricos del caudal de filtración al interior del túnel, que posibilita la reproducción de las condiciones de contorno que nos ocupan, y por tanto arrojará valores más próximos a la realidad que se presente en el Nuevo Túnel de Occidente.

Los cálculos se han realizado mediante el programa SLIDE, de la empresa Rocscience, que permite resolver redes de filtración en 2 dimensiones (gobernadas por las ecuaciones de Darcy y de Laplace), aplicando un método numérico basado en elementos finitos.

En particular, en el caso que nos ocupa se han modelizado dos secciones diferenciadas, cada una de ellas correspondiente al tramo de túnel situado en cada una de las unidades litológicas que se atravesarán durante la excavación (Kda y Pzes)

Este programa discretiza el modelo (compuesto por los diferentes tipos de terreno y sostenimiento del túnel), en una malla irregular de elementos triangulares, asignándole a cada uno de los terrenos atravesados una permeabilidad, que en este caso se ha considerado constante y homogénea para el terreno.

Pese a tratarse de un terreno en el que la permeabilidad del mismo viene gobernada por la existencia de juntas y fisuras que permiten la circulación por permeabilidad secundaria del agua, dada la escala del modelo a analizar frente a la de las juntas en el terreno se puede considerar la hipótesis de un comportamiento homogéneo en el macizo.

Así, y partiendo de los datos ya expuestos con anterioridad, las propiedades hidráulicas asignadas a los diferentes materiales que conforman los modelos de cálculo son las que se indican en la ontorno que nos ocupan, y por tanto arrojará valores más próximos a la realidad que se presente en el Nuevo Túnel de Occidente.

Los cálculos se han realizado mediante el programa SLIDE, de la empresa Rocscience, que permite resolver redes de filtración en 2 dimensiones (gobernadas por las ecuaciones de Darcy y de Laplace), aplicando un método numérico basado en elementos finitos.

En particular, en el caso que nos ocupa se han modelizado dos secciones diferenciadas, cada una de ellas correspondiente al tramo de túnel situado en cada una de las unidades litológicas que se atravesarán durante la excavación (Kda y Pzes)

Este programa discretiza el modelo (compuesto por los diferentes tipos de terreno y sostenimiento del túnel), en una malla irregular de elementos triangulares, asignándole a cada uno de los terrenos atravesados una permeabilidad, que en este caso se ha considerado constante y homogénea para el terreno.

Pese a tratarse de un terreno en el que la permeabilidad del mismo viene gobernada por la existencia de juntas y fisuras que permiten la circulación por permeabilidad secundaria del agua, dada la escala del modelo a analizar frente a la de las juntas en el terreno se puede considerar la hipótesis de un comportamiento homogéneo en el macizo.

Así, y partiendo de los datos ya expuestos con anterioridad, las propiedades hidráulicas asignadas a los diferentes materiales que conforman los modelos de cálculo son las que se indican en la Tabla 5-104.

Tabla 5-104 Permeabilidad de los distintos materiales.

MATERIAL	k_v (m/s)	k_h (m/s)
Kda	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-8}$
Pzes	$2{,}5 \cdot 10^{-7}$	$2{,}5 \cdot 10^{-8}$
Revestimiento	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$

Fuente: Modificado de TYPSA, 2013.

Adicionalmente se han de fijar unas condiciones de contorno que definan el equilibrio hidráulico de partida. En este caso para representar el nivel freático se han fijado unas cargas hidráulicas fijas en los contornos laterales del modelo, los cuales se han situado lo suficientemente alejados del túnel objeto de estudio (a una distancia superior a 400 m) para que no tengan incidencia sobre el propio proceso de cálculo.

En base al modelo hidrogeológico tridimensional a gran escala descrito en los apartados previos del presente documento, estas cargas hidráulicas producen que sobre la clave del túnel el nivel freático se sitúe a 50 m de altura, siendo la pendiente del mismo igual a un 5% creciente hacia el noreste (el lado derecho en nuestro modelo)

En relación a esta hipótesis, y como ya se mencionó anteriormente, cabe apuntar que el valor de la carga hidráulica considerado resulta conservador a la vista de los resultados de los sondeos realizados en el interior del túnel paralelo, para los que no se ha observado afluencia de agua significativa, ni mucho menos la existencia de presiones de agua emergentes (presión artesiana), lo que conjuntamente con las observaciones realizadas en la zona de clave de dicho túnel dificultan la posibilidad de entender la existencia de niveles freáticos situados por encima de la cota del mismo.

No obstante, a nivel del estudio realizado, y en lo sucesivo, se opta por considerar esta hipótesis, por entender que resultará conservadora de cara al dimensionamiento de las redes de drenaje y evacuación de agua a prever para la excavación del túnel.

Para poder representar la excavación de los túneles, se establecen puntos con presión nula (u=0) en el perímetro de los mismos.

La distancia considerada entre ejes de ambos túneles es de 100 m, por considerarse ésta como la situación pésima, dado que a mayor distancia del túnel paralelo aumentará la infiltración en el Túnel de Occidente, puesto que el nivel freático de su entorno estará menos afectado por el primero (y en definitiva menos deprimido).

Una vez descrito el modelo y las condiciones de contorno consideradas para su desarrollo, en los apartados posteriores se describen las distintas fases cálculo consideradas para cada una de las litologías que se atravesarán con la excavación del Nuevo Túnel de Occidente.

Fase 1: Análisis de la situación actual: En primer lugar, con el fin de validar las propiedades asignadas a los materiales con respecto a la información disponible en la

actualidad, se ha llevado a cabo un análisis retrospectivo a partir del cual se ha comprobado que las filtraciones obtenidas para el túnel existente se correspondan con los caudales aforados durante la explotación del mismo, cuyos valores se indicaron en la**Tabla 5-105.**

Tabla 5-105 Caudales aforados en el túnel existente.

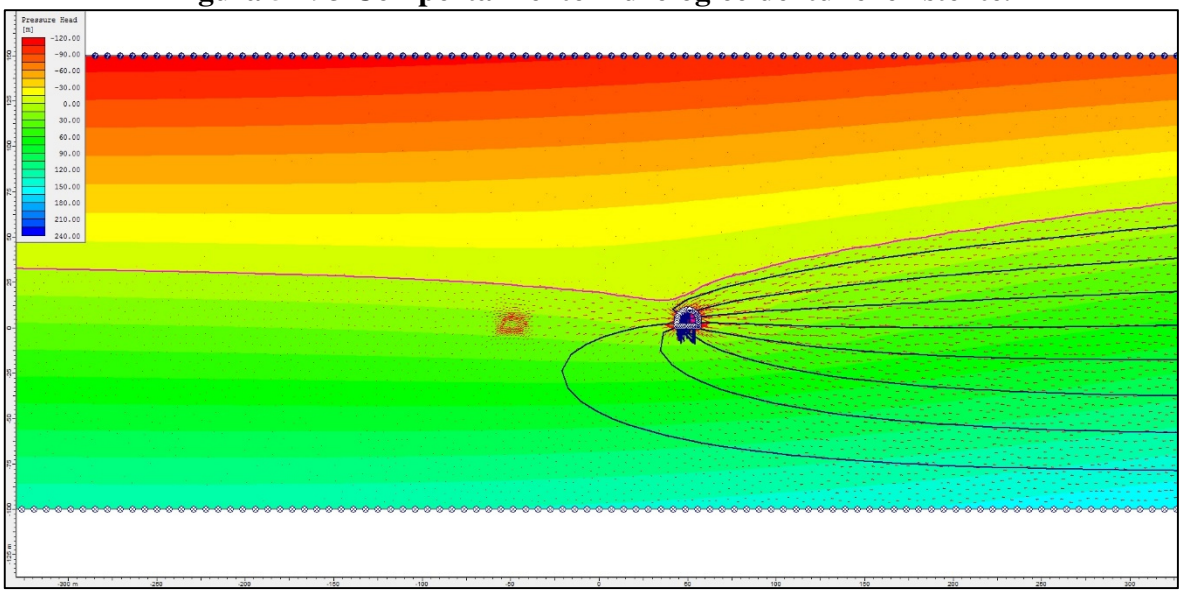
MES	Q_{2010}(L/S)	Q_{2011}(L/S)	Q_{2012}(L/S)	Q_{2013}(L/S)	Q_{2014}(L/S)	Q_{2015}(L/S)
Enero		15.4	14.84	15	17	16.48
Febrero		14.8	11.5	16.5	17.3	17
Marzo		19.8	18.7	19	18.3	18.3
Abril		17.4	17.5	17.25	17.43	17.3
Mayo		18.7	18	17.37	18.6	16.5
Junio		18.4	18.7	18.9	18.26	17
Julio	17.6	17.3	16.7	17.4	17.33	17.6
Agosto	16.2	16.8	16.9	17.1	17.6	17.1
Septiembre	23.4	13	12.5	17.85	17.3	16.7
Octubre	23.9	21.5	11.32	17.4	17.88	
Noviembre	17.3	20.3	14.65	17.3	17.4	
Diciembre	20.0	21	19.6	18.12	17.75	
PROMEDIO	**19.7**	**17.9**	**16.3**	**17.4**	**17.7**	**17.1**

Fuente: Modificado de TYPSA, 2013.

Para ello se ha modelizado únicamente la excavación del túnel existente, asignándole una presión nula (u=0) a los puntos de su contorno de excavación (túnel sin revestir en la mayor parte del mismo) y se ha reflejado la situación correspondiente al largo plazo y que simula el régimen actual.

El comportamiento de las presiones y flujos de agua en el entorno del túnel se presenta en la**Figura 5-193**.

Figura 5-193 Comportamiento hidrológico del túnel existente.



Fuente: TYPSA, 2013.

Los caudales de filtración en el paramento de excavación (por metro lineal) que se obtienen para cada una de las litologías a atravesar, así como la filtración producida a lo largo de toda la longitud de túnel en cada una de ellas y la suma de ambas (que correspondería al caudal aforado en el túnel) se presentan en laTabla 5-106 Caudales en el túnel existente.**Tabla 5-106.**

Tabla 5-106 Caudales en el túnel existente.

MODELO	q (l/s/m)	LONGITUD (m)	Q (l/s)
Kda	$5{,}31 \cdot 10^{-3}$	2.400	12,78
Pzes	$2{,}65 \cdot 10^{-3}$	2.200	5,84
		TOTAL	**18,58**

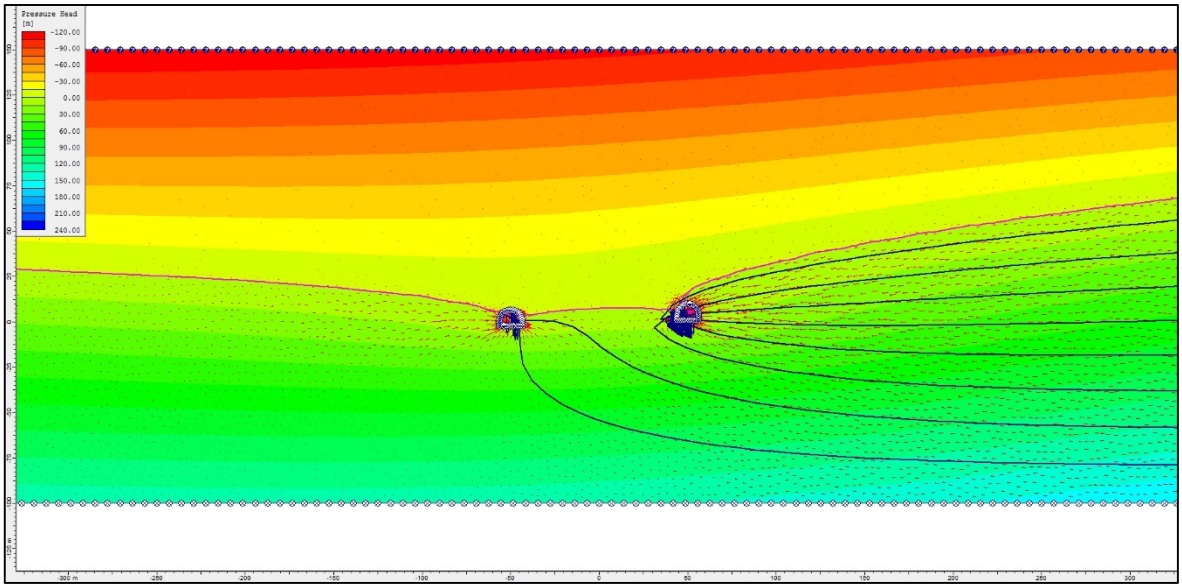
Fuente: Modificado de TYPSA, 2013.

Como se observa, estos valores se encuentran en el entorno de los caudales aforados en el túnel a lo largo de los últimos años, de lo que se confirma la adecuación y representatividad de los parámetros hidrogeológicos asignados a las unidades litológicas que se atravesarán a lo largo de la traza del túnel.

Una vez validados dichos parámetros, se procede al análisis de filtraciones estimadas durante la ejecución y vida útil del Nuevo Túnel de Occidente.

Fase 2. Análisis del túnel de Occidente en fase de construcción: Para simular las filtraciones que se producirán en el túnel durante su construcción, se ha supuesto la excavación del mismo asignándole una presión nula (u=0) a lo largo de su contorno, quedando el flujo hidráulico como se muestra en la **Figura 5-194**.

Figura 5-194 Comportamiento hidrológico del Túnel de Occidente en fase de construcción.



Fuente: Modificado de TYPSA, 2013.

En este caso los caudales de filtración obtenidos a partir del cálculo en el paramento de excavación para el Túnel de Occidente se presentan en la Tabla 5-107

Tabla 5-107 Caudales de infiltración en el Túnel de Occidente durante la fase de Construcción

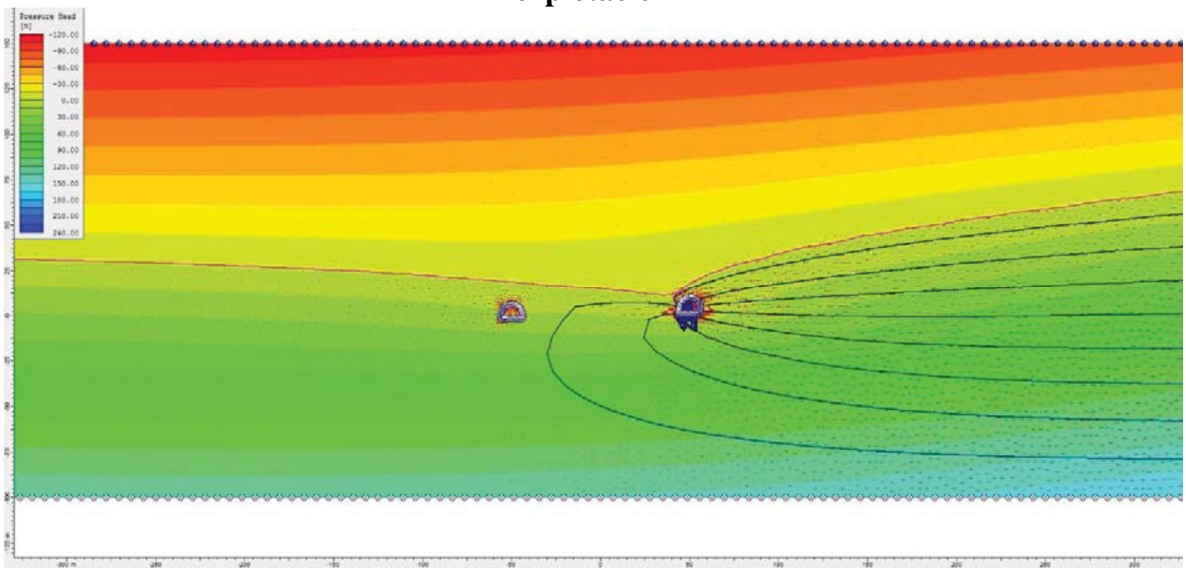
MODELO	q (l/s/m)	LONGITUD (m)	Q (l/s)
Kda	$2{,}97 \cdot 10^{-3}$	2.280	6,77
Pzes	$1{,}48 \cdot 10^{-3}$	2.280	3,39
		TOTAL	**10,16**

Fuente: Modificado de TYPSA, 2013.

A partir de estos datos, y considerando nuevamente la ejecución del túnel por ambas bocas, en las que se ejecutará aproximadamente la mitad de la longitud del túnel (excavación completa de cada una de las unidades litológicas desde cada frente de ataque), el máximo caudal procedente de filtración a través del terreno que se deberá evacuar durante la etapa construcción adoptaría un valor igual a 6,77 l/s.

Fase 3. Análisis del túnel de Occidente en fase de explotación: En esta última fase se ha modelizado la puesta en obra de un revestimiento de hormigón de 30 cm de espesor alrededor del paramento de excavación del Túnel de Occidente, con el fin de simular la etapa final tras la ejecución del revestimiento de hormigón en el mismo. La condición de presión nula (u=0) se ha establecido en la cara interior del revestimiento de hormigón. Así, la distribución de presiones y flujo hidráulico en el medio será como el mostrado en la Figura 5-195

Figura 5-195 Comportamiento hidrológico del Túnel de Occidente en fase de explotación



Fuente: Modificado de TYPSA, 2013.

Los caudales determinados para esta fase son los que se presentan en la Tabla 108.

Tabla 108 Caudales de infiltración en el Túnel de Occidente durante la fase de explotación

MODELO	q (l/s/m)	LONGITUD (m)	Q (l/s)
Kda	$1{,}78 \cdot 10^{-3}$	2.280	4,05
Pzes	$1{,}33 \cdot 10^{-3}$	2.280	3,04
		TOTAL	**7,09**

Fuente: Modificado de TYPSA, 2013.

A partir de los resultados anteriormente indicados se concluye la recuperación parcial del nivel freático sobre el Nuevo Túnel de Occidente a largo plazo, y se deduce un valor igual a 7,09 l/s para los caudales de infiltración previstos para la fase de explotación del Nuevo Túnel de Occidente, una vez completada la excavación del mismo.

La existencia del primer tubo ya excavado desde hace años, permite estimar razonablemente las condiciones hidrogeológicas del macizo excavado. En este sentido, destacar que el túnel existente no tiene un revestimiento sistemático ni medidas de impermeabilización. Las mediciones obtenidas mediante aforos realizados por la empresa concesionaria, y que han sido facilitados al equipo redactor del Consorcio T&C, indican caudales de infiltración comprendidos entre 1,40 2,70 l/min cada 10 m de túnel.

Durante la excavación del nuevo tubo, es de esperar que no haya presencia importante de agua, ni en el contacto entre las formaciones KdA y Pzes. En general, se trata de un macizo impermeable, con pocas zonas de fracturación alta. Asimismo, el nivel freático del túnel

estará a unos 40 m sobre clave, por lo que se espera cierta fluencia de agua en las zonas de mayor fracturación. En cualquier caso, esta fluencia no parece que pueda influir en la estabilidad de la excavación del macizo y la disponibilidad del recurso en superficie.

Se recomienda aplicar las medidas convencionales de impermeabilización y drenaje, no siendo necesario adoptar medidas especiales, tales como impermeabilización completa o tratamientos del terreno.

Las tomografías eléctricas realizadas, algunos parámetros fisicoquímicos así como la diferencia en la dirección y sentido de las direcciones de flujo de los acuíferos mas superficieles y las direcciones de flujo en el macizo rocoso (direcciones de flujo a mayor profundidad), sugieren una discontinuidad hidráulica entre los acuíferos superficiales y el macizo rocoso.

La existencia del primer tubo ha drenado el macizo durante años, hasta alcanzar la situación hidrológica estable actual. La fuerte recarga del acuífero procedente del altiplano situado al Nororiente del túnel de Occidente, junto con la impermeabilidad del macizo excavado y las medidas de impermeabilización recomendadas para el segundo tubo, reducen el riesgo de un abatimiento del nivel freático. Las escasas fuentes o circulaciones ocasionales de agua por las quebradas no se verán afectadas por el túnel.

5.1.8.8 Evaluación y clasificación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación

La vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación, se define como la facilidad con la cual ingresan sustancias que puedan afectar la calidad de agua subterránea siendo penetradas por una carga contaminante mediante infiltración a través del suelo y/o la zona no saturada.

Para realizar la evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos, se valoró cuantitativamente cada uno de los siguientes parámetros: naturaleza litológica de la zona no saturada, condición de confinamiento y profundidad de la tabla de agua, calificando cada uno de estos parámetros utilizando el sistema de indexación GOD, propuesto por Foster (1987). (Ver Tabla 5-109)

Parámetro "G": Se refiere a la condición de confinamiento del acuífero más superficial, y establece las siguientes categorías: no confinado, no confinado-cubierto, semiconfinado, confinado, surgente sin presencia de acuífero.

Parámetro "O": Este parámetro incluye una caracterización global de la zona saturada para acuíferos libres, o del estado confinante, para acuíferos confinados. Se valora la naturaleza litológica, el grado de consolidación y el fracturamiento de la roca.

Parámetro "D": Profundidad del nivel freático para los acuíferos libres, o el techo para los acuíferos de tipo semiconfinado o confinado.

Tabla 5-109 Valoraciones parámetros método GOD

Ocurrencia del agua subterránea "G"					
Ninguno			0		
Surgente			0.1		
Confinado			0.2		
Semiconfinado			0.3		
No Confinado (cubierto)			0.5		
Libre			1		
Litología predominante sobre el acuífero "O"					
No Consolidados	**Consolidados (Rocas porosas)**	**Consolidados (Rocas masivas)**		**Ponderación**	
Arcillas				0.4	
Limos	Arcillolitas			0.5	
	Lutitas				
Gravas con matriz arcillosa	Limolitas	Complejos ígneos, metamórficos, volcánicos antiguas		0.6	
Arcilla/Grava y/o Arena (intercalaciones)	Areniscas			0.7	
	Tobas volcánicas				
Arenas	Litoarenitas	Lavas volcánicas recientes		0.8	
Gravas	Calcarenitas			0.9	
	Calizas Blandas				
		Caliche		1.0	
		Otras calizas duras			
Profundidad del agua "D"					
>100m			0.4		
50 – 100m			0.5		
20 – 50m			0.6		
10 – 20m			0.7		
5 – 10m			0.8		
2 – 5m			0.9		
0 – 2m			1.0		
Grado de vulnerabilidad a la contaminación "GOD"	**Despreciable**	**Baja**	**Moderada**	**Alta**	**Extrema**
	0 – 0.1	0.1 – 0.3	0.3 – 0.5	0.5 – 0.7	0.7 – 1

Fuente: Adaptado de Ingeominas, 2003 en Foster (1987)

El método "GOD" establece escalas de valores para cada parámetro de acuerdo con su contribución en la defensa de los acuíferos a la contaminación. Estas tienen valores entre cero (0) y uno (1), siendo los valores más bajos los que más retienen o atenúan el transporte de contaminantes. La evaluación de la vulnerabilidad se determina multiplicando los valores dados a cada parámetro obteniendo valores entre cero (0) y uno (1), donde cero (0) significa vulnerabilidad nula y uno (1) vulnerabilidad extrema a la contaminación.

Cabe aclarar que la metodología "GOD" se encamina a estudiar los acuíferos más someros o la parte más superficial de los acuíferos de interés, ya que se considera que las características de la zona no saturada, son las que finalmente determinan el grado de protección, porque son las más susceptibles a ser afectadas adversamente por una carga

contaminante y una vez contaminadas, este fenómeno se puede inducir fácilmente a los horizontes profundos (INGEOMINAS, 2003).

- **Determinación de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación**

Las ponderaciones para cada parámetro con las que se determinó la vulnerabilidad de los acuíferos a ser contaminados esto se resumen a continuación:

- **Ocurrencia del agua subterránea "G"**

El parámetro "G" analiza el acuífero más somero a partir de la información de litología de pozos, aljibes someros, y manantiales realizados en el estudio y soportado con el Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia, que delimita las zonas de recarga, asumiendo estas áreas como acuíferos libres; estableciendo de esta manera la categorización del acuífero de acuerdo con su condición de confinamiento. Esta metodología establece que cuando no existe certeza sobre la continuidad lateral de los acuíferos o no están conectados hidráulicamente estos deben asumirse como acuíferos libres.

En la Tabla 5-110 se presenta la ponderación del parámetro y la distribución del área en hectáreas y porcentajes.

Tabla 5-110 Distribución del Parámetro "G" en el área de estudio

Confinamiento del acuífero	Valor "G"	Área de Estudio (HA)	Área de estudio (%)
Depósitos aluviales (Qal)	1	119,77	2,3%
Lleno antrópico (Qll), Depósitos Coluvioaluviales (Qcal), Depósitos de derrubio (Qd)	0,5	752,58	14,1%
Miembro Superior, Formación Amaga (Ngas),	0,3	316,66	6,0%
Diorita de Heliconia-diorita hornbléndica (Kdha-Kdhb), Diorita de Altavista (Kida), Formación Qebradagrande Miembro volcánico (KvQG), Gabros de Romeral (Jgr), Grupo Ayurá Montebello (Pzes-Pev), Granito néisico de Palmitas (Pgnp)	0,1	4123,26	77,6%

Fuente: Consultoría Colombiana S.A, 2016

- **Litología predominante sobre el acuífero "O"**

El parámetro "O" se obtiene a partir de las descripciones de las unidades litoestratigráficas y de la cartografía geológica realizada para el presente estudio; en donde predominan en superficie rocas pertenecientes a complejos Ígneo metamórficos.

A continuación Tabla 5-111 se presenta la ponderación del parámetro, con sus áreas y porcentajes, unidades geológicas y su respectiva descripción.

Tabla 5-111 Valor de parámetro "O" asignado

Unidad Geológica	Litología del acuífero	Valor Parámetro "O"	Área de Estudio (ha)	Área de estudio (%)
Depósitos aluviales (Qal)	Gravas gruesas con intercalaciones ocasionales de grava guijosa en matriz arenosa.	0,6	119,77	2,3%
Lleno antrópico (Qll)	Bloques y cantos en matriz arenosa	0,6	39,07	0,7%
Depósitos Coluvioaluviales (Qcal)	Arena gruesa, gris clara, 10% de bloques angulares de composición de esquistos, granitos y cuarzo	0,6	453,37	8,5%
Depósitos de derrubio (Qd)	Matriz en un 80%, areno gravosa, suelta, color gris medio, clastos (20%) de diámetro promedio 1-7cm, angulares, de composición esquistos, moderada a altamente meteorizados	0,6	260,13	4,9%
Miembro Superior, Formación Amaga (Ngas)	Arcillas pizarrosas gris verdosas y ocres. Localmente bancos delgados de conglomerados y carbón	0,7	316,66	6,0%
Diorita de Heliconia-diorita hornbléndica (Kdha-Kdhb)	Diorita cuarzosa de grano medio, textura granular, hipidiomórfica granular, ocasionalmente ofítica con cataclasis y dioritas hornbléndicas.	0,7	64,24	1,2%
Diorita de Altavista (Kida)	Rocas porfiríticas de matriz afaníticas y composición intermedia a dioritas, cuarzodioritas y granitos. La roca predominante es félsica, de color gris, cremas hasta verdes en las rocas porfiríticas.	0,7	696,39	13,1%
Formación Qebradagrande Miembro volcánico (KvQG)	Capas delgadas estratificadas formando bancos mayores de 2 metros de liditas, lodolitas, grauvacas, intercaladas ocasionalmente por bancos de tobas silicificadas y conglomerados finos, localmente es bastante rica en materia orgánica.	0,7	1280,81	24,1%
Gabros de Romeral (Jgr)	Gabros de grano fino a pegmatíticos	0,7	392,48	7,4%
Grupo Ayurá Montebello (Pzes-Pev)	Pzes. Filitas, esquistos cuarzo sericíticos y esquistos alumínicos. Metamorfismo regional de grado bajo a medio. Pev. Esquistos verdes compuestos por calcita, epidota, clorita y actinolita. Metamorfismo regional de grado bajo a medio.	0,7	1137,21	21,4%
Granito néisico de Palmitas (Pgnp)	Esquistos cuarzo-sericíticos cataclásticos, xenolitos del granito néisico en este. Tiene la apariencia de una roca de alto grado de metamorfismo, facies granulita, debido a la alteración superficial de gran parte de los componentes.	0,7	552,14	10,4%

Fuente: Consultoría Colombiana S.A, 2015

- **Profundidad de la tabla de agua "D"**

Para la determinación del parámetro se utilizó la información de los niveles de agua subterránea de captaciones más someras correspondientes al inventario de puntos, entre ellos aljibes donde sus niveles varían entre 0 y 10 m.

En la **Tabla 5-112**se presentan la distribución por área de la profundidad de la tabla de agua encontradas en la zona.

Tabla 5-112 Valor del Parámetro "D" asignados

Unidad Hidrogeológica	Profundidad (m)	Ponderación	Área de estudio (ha)	Área de estudio (%)
Depósitos aluviales (Qal)	5-10 m	0,8	119,77	2,3%
Lleno antrópico (Qll)	0-2 m	1	39,07	0,7%
Depósitos Coluvioaluviales (Qcal)	0-2 m	1	453,37	8,5%
Depósitos de derrubio (Qd)	0-2 m	1	260,13	4,9%
Miembro Superior, Formación Amaga (Ngas)	2-5 m	0,9	316,66	6,0%
Diorita de Heliconia-diorita hornbléndica (Kdha-Kdhb)	0-2 m	1	64,24	1,2%
Diorita de Altavista (Kida)	0-2 m	1	696,39	13,1%
Formación Qebradagrande Miembro volcánico (KvQG)	0-2 m	1	1280,81	24,1%
Gabros de Romeral (Jgr)	0-2 m	1	392,48	7,4%
Grupo Ayurá Montebello (Pzes-Pev)	0-2 m	1	1137,21	21,4%
Granito néisico de Palmitas (Pgnp)	0-2 m	1	552,14	10,4%

Fuente: Consultoría Colombiana S.A, 2015

Finalmente se obtiene el resultado final del análisis de vulnerabilidad a la contaminación de los sistemas acuíferos por las actividades del proyecto donde se prevé haya lugar a actividades que generen la probabilidad de afectación teniendo en cuenta los términos de referencia del Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible por medio de la resolución N° 0751 del 26 de marzo de 2015.

En la **Tabla 5-113** se presentan los resultados del análisis de vulnerabilidad utilizando el método GOD, los acuíferos con mayor susceptibilidad son los compuestos por los Depósitos aluviales de edad Cuaternario, en el cual el análisis sugiere un nivel moderado de vulnerabilidad a la contaminación; el miembro superior de la Formación Amaga y las unidades Cuaternarias, Lleno Antrópico, Depósitos Coluvioaluviales, y Depósitos de Derrubio sugieren una vulnerabilidad baja dentro del área de influencia.

Por ultimo ígneas y metamórficas sugieren un nivel despreciable en la vulnerabilidad a la contaminación debido a características litológicas y la ocurrencia de esta en el contexto hidrogeológico.

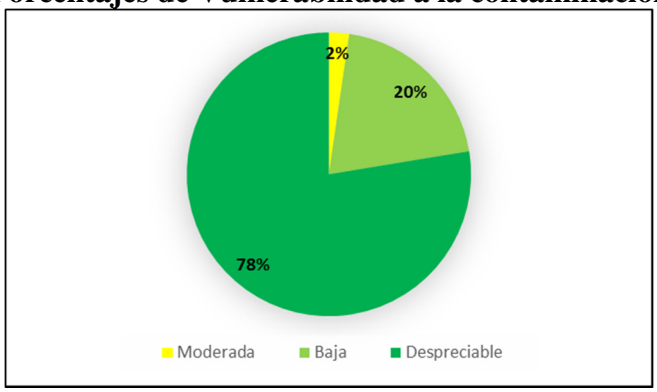
Tabla 5-113 Vulnerabilidad a la Contaminación de sistemas acuíferos "GOD"

Acuífero	G	O	D	GOD	Área (ha)	Área %	Vulnerabilidad
Depósitos aluviales (Qal)	1	0,6	0,8	0,48	119,77	2,3%	Moderada
Lleno antrópico (Qll)	0,5	0,6	1	0,3	39,07	0,7%	Baja
Depósitos Coluvioaluviales (Qcal)	0,5	0,6	1	0,3	453,37	8,5%	Baja
Depósitos de derrubio (Qd)	0,5	0,6	1	0,3	260,13	4,9%	Baja
Miembro Superior, Formación Amaga (Ngas)	0,3	0,7	0,9	0,189	316,66	6,0%	Baja
Diorita de Heliconia-diorita hornbléndica (Kdha-Kdhb)	0,1	0,7	1	0,07	64,24	1,2%	Despreciable
Diorita de Altavista (Kida)	0,1	0,7	1	0,07	696,39	13,1%	Despreciable
Formación Qebradagrande Miembro volcánico (KvQG)	0,1	0,7	1	0,07	1280,81	24,1%	Despreciable
Gabros de Romeral (Jgr)	0,1	0,7	1	0,07	392,48	7,4%	Despreciable
Grupo Ayurá Montebello (Pzes-Pev)	0,1	0,7	1	0,07	1137,21	21,4%	Despreciable
Granito néisico de Palmitas (Pgnp)	0,1	0,7	1	0,07	552,14	10,4%	Despreciable

Fuente: Consultoría Colombiana S.A, 2016

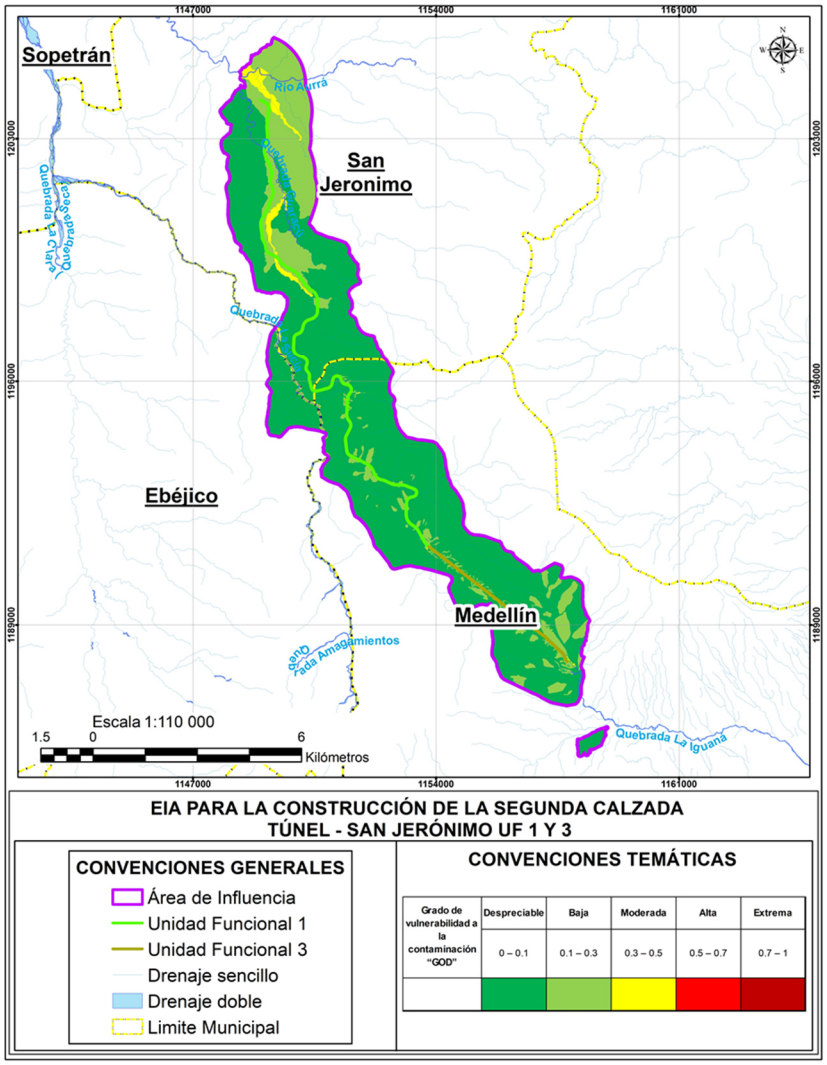
Teniendo en cuenta el análisis de vulnerabilidad se tiene que el 77,6% del área de influencia tiene una vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos despreciable, un 20.1% sugiere una vulnerabilidad baja a la contaminación y un 2,3% una vulnerabilidad Moderada. (Ver Figura 5-196 y Figura 5-197).

Figura 5-196 Porcentajes de Vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos.



Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

Figura 5-197 Mapa de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de acuíferos



Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

5.1.8.9 Análisis de Riesgo a la contaminación del Acuífero por obras planteadas.

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

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

- **Metodología aplicada**

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

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

Fuente ⇒ Transporte ⇒ Objetivo

Para lo cual se definen:

1) las fuentes de peligro de contaminación, o fuentes de amenaza
2) La vulnerabilidad del acuífero desde la superficie
3) La localización de los acuíferos

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

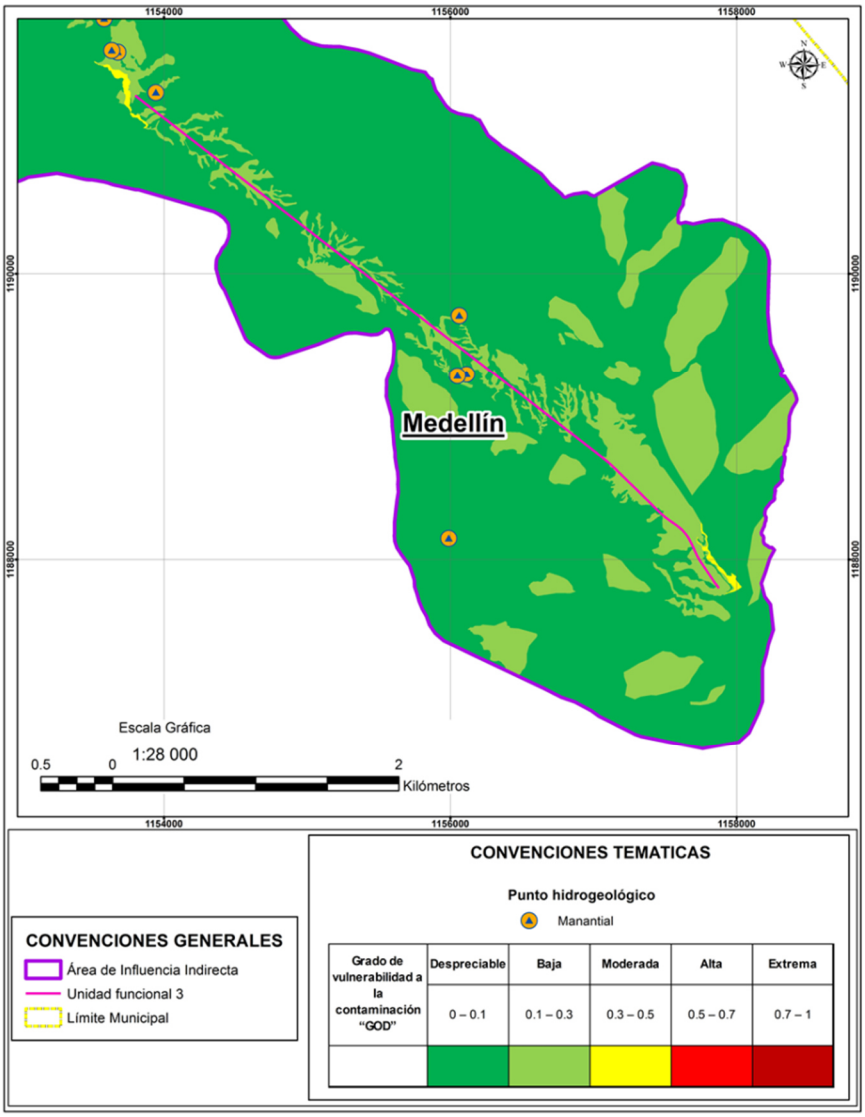
$$R = V \times D$$

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

$$D = Fp \times Fc$$

La Evaluación y clasificación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación, (Figura 5-198), se encuentra en el numeral 5.1.8.8, donde se presenta toda la metodología, desarrollo y resultados de este ítem a partir del método GOD, sin embrago en la Figura 5-198 se observa el análisis solamente para el área del túnel (unidad funcional 3).
El valor del índice (V) varía entre 0 (vulnerabilidad despreciable) y 1 (vulnerabilidad extrema). El método prevé 5 (cinco) clases de vulnerabilidad, a las cuales se ha aplicado un puntaje de 1 a 5, necesario para calcular el riesgo de contaminación de los acuíferos.

Figura 5-198 Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de acuíferos para el para el área el túnel (unidad funcional 3)



Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

- **Factores de peligrosidad de las fuentes de amenaza.**

El daño resultante de un hipotético evento incidental, es el producto de un factor de peligrosidad (Fp), dependiente de la entidad del daño teóricamente posible, y un factor de contacto (Fc), dependiente de la duración de la exposición:

- **Factor de peligrosidad (Fp).**

Para la identificación, descripción y análisis de amenazas se debe identificar y ordenar el tipo de fuente de amenaza de infiltración de substancias peligrosas que podrían contaminar

los acuíferos y el medio ambiente, esto con el propósito de facilitar una priorización de riesgos, el cual puede consistir en una simple categorización. Para este fin se utilizó la **Tabla 5-114.**

En la primera columna se describen todas las posibles fuentes de amenazas. En las columnas siguientes se describen las características que contribuyen a definir la peligrosidad. En las últimas dos columnas se coloca el puntaje, de 1 a 5, y la calificación que corresponde. Como se ve, el puntaje de Fp varia de 1 a 9 y sugiere prioridades donde 1 representa el de menor importancia y 9 el de mayor riesgo de contaminación.

Tabla 5-114 Clasificación adoptada por la evaluación del Factor de peligrosidad (Fp)

Fuente de amenaza	Geometría			Fenómeno			Puntaje Fp	Peligrosidad
	Puntual	Lineal	Areal	Material orgánico	Aceites y grasas	Metales pesados, pH ácido		
Nueva carretera cielo abierto	0	2	0	0	2	0	4	MEDIA
Nueva carretera en túnel	0	2	0	0	2	0	4	MEDIA
Vía acceso provisoria	0	2	0	0	2	0	4	MEDIA
Fuentes de Material	0	0	3	0	2	0	5	MEDIA
Zodmes	0	0	3	0	2	0	5	MEDIA
Chaflan	1	0	0	0	2	3	6	MEDIA
Portales	0	0	3	0	2	0	5	MEDIA
Campamento	0	0	3	1	0	0	4	MEDIA
Planta	0	0	3	0	2	3	8	ALTA
Áreas de Servicio	0	0	3	1	2	0	6	MEDIA
Áreas de Captación	0	0	3	1	2	3	9	ALTO

Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

- **Factor de contacto (Fc)**

El factor de contacto (Fc), o duración de la exposición, se calcula asignando los puntajes de 0, 1 o 2 a los tiempos de duración de la fuente de contaminación, dependiendo si la fuente es temporal (puntaje 1) o permanente (puntaje 2). En el cuadro siguiente se describen las clasificaciones adoptadas. (Ver Tabla 5-115)

Tabla 5-115 Clasificación adoptada por la evaluación del Factor de contacto (Fc).

Fuente de amenaza	Duración		Puntaje Fp	Peligrosidad
	Temporal	Permanente		

Fuente de amenaza	Duración		Puntaj	Peligrosida
Nueva carretera cielo abierto	0	2	2	ALTA
Nueva carretera en túnel	0	2	2	ALTA
Vía acceso provisoria	1	0	1	BAJA
Fuentes de Material	1	0	1	BAJA
Zodmes	0	2	2	ALTA
Chaflan	0	2	2	ALTA
Portales	0	2	2	ALTA
Campamento	1	0	1	BAJA
Planta	0	2	2	ALTA
Áreas de Servicio	1		1	BAJA
Áreas de Captación		2	2	ALTA

Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

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

- **Evaluación del Riesgo.**

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

Una vez identificadas, descritas y analizadas las amenazas y desarrollado el análisis de vulnerabilidad, se procede a determinar el nivel de riesgo combinando la calificación de la amenaza y la vulnerabilidad. (Ver Tabla 5-116)

Tabla 5-116 Cálculo del riesgo (R) mínimo y máximo posibles y del riesgo normalizado (Rn), entre 0 y 1

Vulnerabilidad (V)	Factor de peligrosidad (Fp)	Factor de contacto (Fc)	Riesgo (R)	Riesgo Normalizado (Rn)
1	1	1	1 (mínimo)	0,00
5	9	2	90 (máximo)	1,00

Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

- **Resultados.**

A partir de la ponderación acorde al peso de la vulnerabilidad, al factor de peligrosidad y al factor de contacto, se determina el valor del riesgo, luego se hace una normalización y finalmente categorizar los diferentes niveles de riesgo como se muestra en la Tabla 5-117.

Tabla 5-117 Clasificación del riesgo para la zona de estudio.

Análisis de Riesgo		
	Riesgo Muy bajo	0-0,2
	Riesgo Bajo	0,21-0,4
	Riesgo Medio	0,41-0,6
	Riesgo Alto	0,61-0,8
	Riesgo Muy Alto	0,81-1

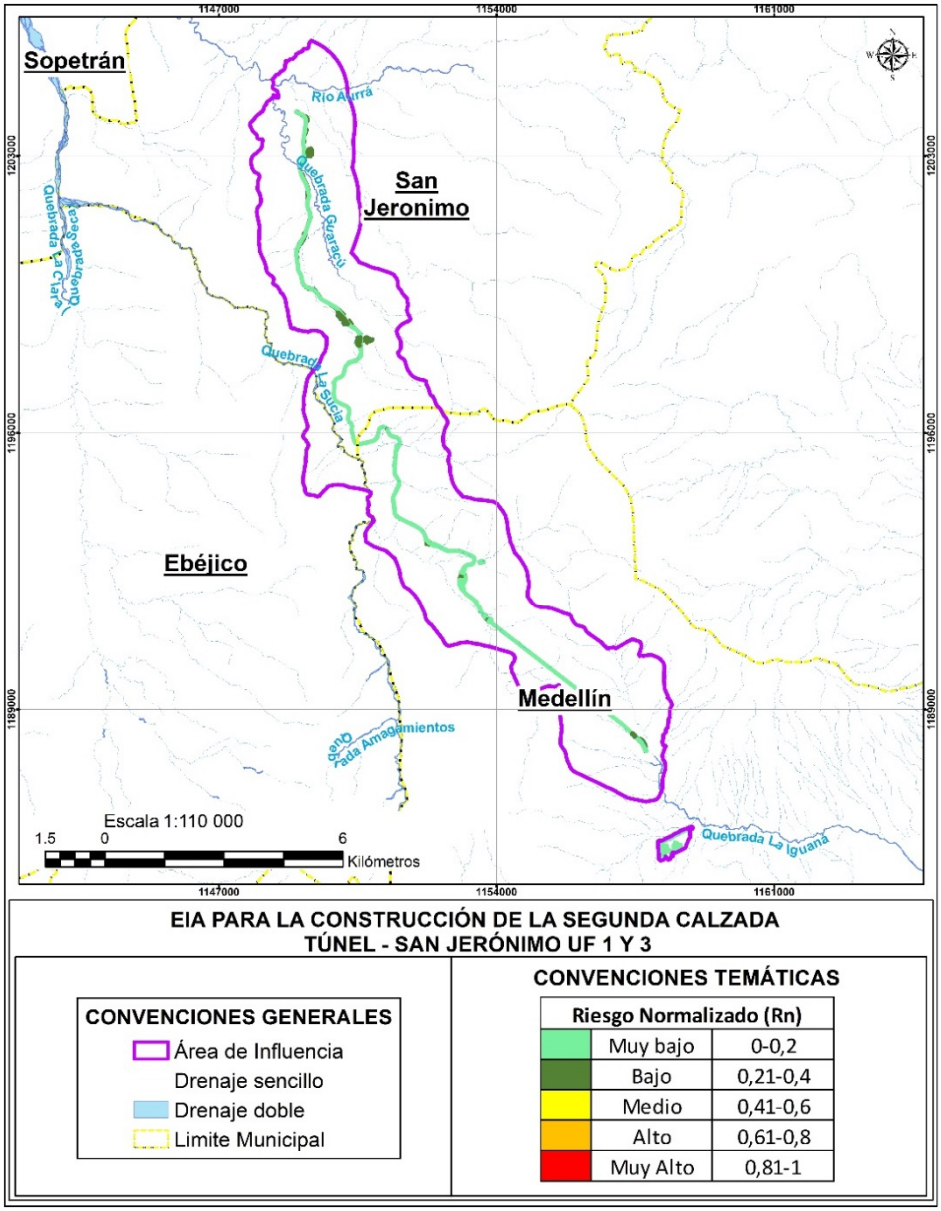
Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

En general se tiene que en toda la zona de estudio se encontró que el riesgo por contaminación se ubica entre muy bajo y bajo, lo que es concordante con el análisis de vulnerabilidad del GOD y modelo hidrogeológico conceptual. En este caso el nivel de valores con un riesgo muy bajo es del 99,7% de toda la zona de estudio, mientras que el 0.32% restante corresponde a un nivel de riesgo bajo.

La mayor proporción de este 0,32% se ubica a lo largo del trazado vial (vía a cielo abierto, puentes y túneles), sin embargo, la composición geológica de las unidades aflorantes, así como las características intrínsecas de los acuíferos y/o unidades hidrogeológicas presentes en la zona de estudio, limita el nivel de riesgo. Al efectuar el respectivo análisis de riesgo, se consideraron también aquellas zonas que podrían actuar como aportantes de residuos contaminantes en la zona (en particular los campamentos y plantas de tratamiento), encontrándose que su exposición en el tiempo es poca pese a representar una mayor peligrosidad respecto a las demás obras que integran el proyecto vial.

Los resultados del análisis de riesgo se muestran en el mapa de riesgos de contaminación del acuífero por las actividades y obras planeadas (Ver Figura 5-199)

Figura 5-199 Mapa de Riesgo a la contaminación del Acuífero por obras planteadas.



Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

5.1.9 Geotecnia

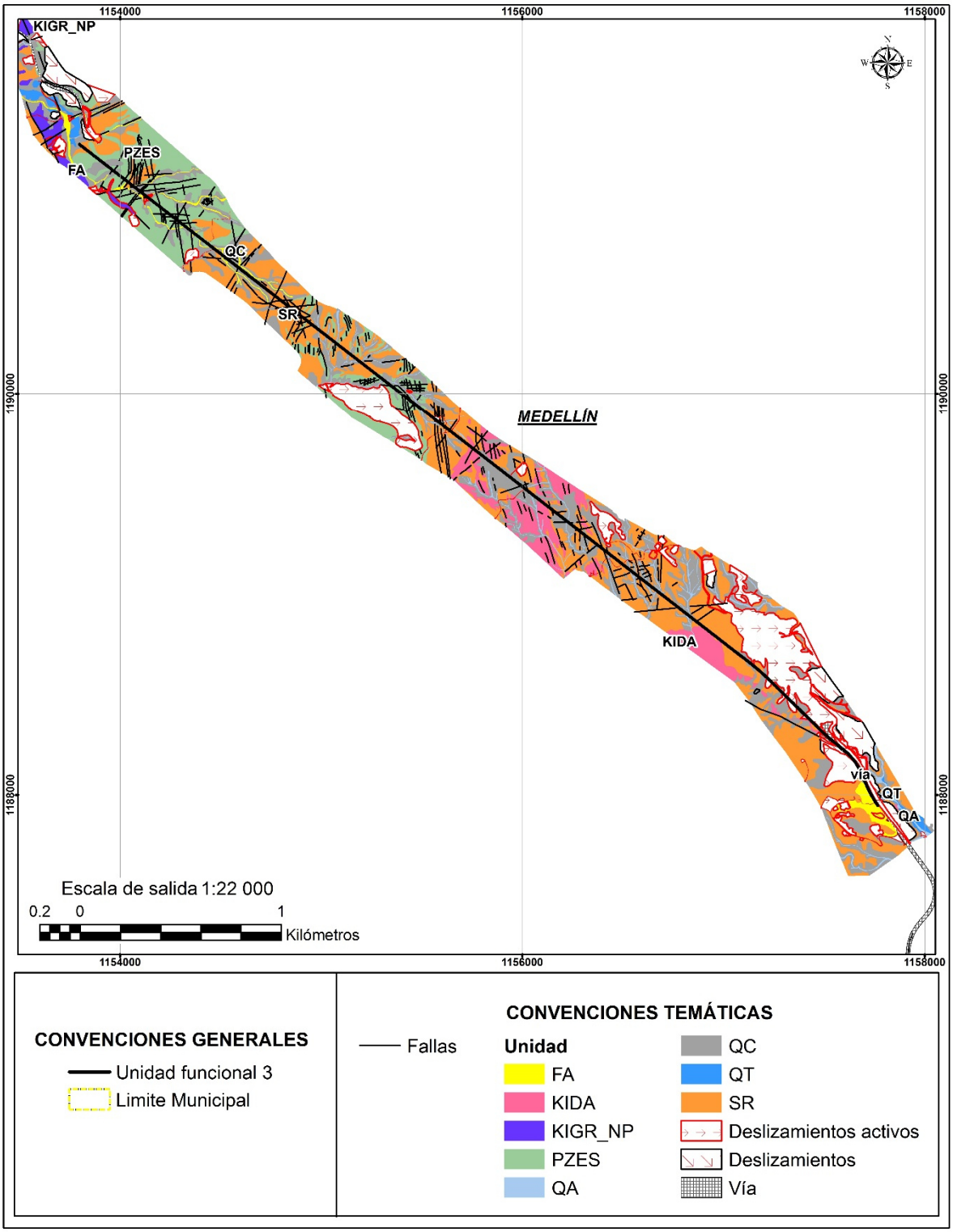
Atendiendo los requerimientos de los términos de referencia, este capítulo se divide en la zonificación geotécnica del tramo del túnel (Unidad Funcional 3) y zonificación geotécnica para la Unidad Funcional 1.

5.1.9.1 Geotecnia para tramo túnel (Unidad Funcional 3)

Como se ha mencionado antes, en la Unidad Funcional 3 (UF3), se tiene contemplada la construcción de un túnel paralelo al existente. La información geológica y geotécnica asociada al tramo del túnel es bastante detallada, porque se ha tomado como referencia la información obtenida durante la construcción del actual túnel de occidente.

Este túnel inicia en la abscisa K00+797 y finaliza en el K05+366. En la zona del túnel se cruzan dos unidades litológicas, la Diorita de Altavista (Kida) y Esquistos Cuarzo sericíticos del Grupo Ayurá Montebello (Pes), Figura 5-200.

Figura 5-200 Unidades litológicas en Unidad Funcional 3, tramo túnel



Para la elaboración de la zonificación geotécnica para el nuevo túnel, se partió de la información existente de la zona, en especial, de la relacionada con la construcción del túnel para la primera calzada, plasmado en el Informe de Interventoría:

"*Interventoría y apoyo Gerencial de la Construcción y Pavimentación de la Carretera Medellín – Santafé de Antioquia*" de Febrero de 2002.

Anexo Geológico – Geotécnico Túnel de Occidente. Clasificación Macizo Rocoso Túneles

De este informe se obtuvo la zonificación geológica y geotécnica altamente detallada del túnel construido, que se tomó como base y referencia para la elaboración del estudio del segundo túnel.

Luego se realizaron los estudios y diseños para la construcción del nuevo túnel:

Concesión Mar 1 – DEVIMAR. Estudios y Diseños Definitivos Fase III de la Unidad Funcional 3, Contrato 014 de 2015 Suscrito entre la ANI y la Concesionaria Desarrollo Vial al Mar S.A.S. 2016

Geología Final – Volumen III – Geología para Ingeniería. Numeral 7.8 Caracterización Geotécnica.

Dentro de estos estudios, se realizó la geología de detalle de la zona del túnel de la nueva calzada, precisando las formaciones, los contactos entre ellas, la presencia de fallas, llegando al detalle de fracturas, confrontando y precisando la información con la relación y las condiciones del túnel existente.

Para el estudio geotécnico detallado del nuevo túnel de la segunda calzada, se realizaron siete (7) sondeos, cuatro (4) a lo largo del nuevo túnel, en especial en las zonas de los extremos en donde el espesor de roca es menor, y tres (3) dentro de la zona del túnel existente, (ver Tabla 5-118), perforaciones que permitieron precisar las condiciones del nuevo túnel y su relación con las condiciones del túnel existente, ya que ambos se ubican dentro de las mismas formaciones geológicas.

Tabla 5-118 Perforaciones realizadas durante el estudio de la segunda calzada del túnel de Ocidente

TUNEL	SONDEO	ABSCISA	PROFUNDIDAD (m)	COORDENADAS		ROCA
				ESTE	NORTE	
Nuevo	S1	K00+740	35	1.157.441	1.188.378	Granodiorita
Nuevo	S2	K00+860	60,4	1.157.327	1.188.438	Granodiorita
Nuevo	S3	K05+320	45	1.153.844	1.191.222	Esquisto
Nuevo	S4	K00+010	45	1.153.825	1.191.234	Esquisto
Existente	ST1		65,5	1.115.613	1.118.955	

TUNEL	SONDEO	ABSCISA	PROFUNDIDAD (m)	COORDENADAS		ROCA
Existente	ST2		5,5	1.115.510	1.119.035	
Existente	ST5	K05+300	80	1.153.950	1.191.125	

Nota: El sondeo S4 se ubicó a 25 m del sondeo S3 - cerca del Portal Norte del nuevo Túnel - UF3

Con base en un estudio geológico y geotécnico de detalle, se encontraron varias zonas de pequeñas fallas y fracturas que cruzan áreas del trazado del nuevo túnel de las que sobresalen la falla El Matorral K1+600, La Frigua (K3+960), Cajetilla (K4) y La Negra (K4+260, que llegan muy cerca de la superficie (ver Figura 5-154)..

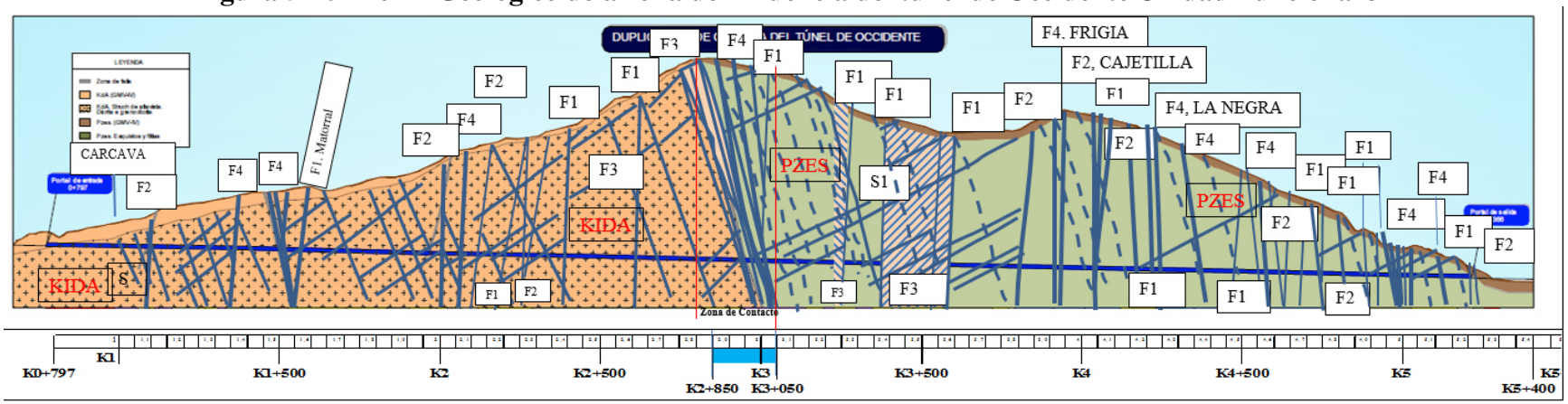
De igual manera se encontraron dos zonas, al inicio (K0+797 a K1+020) y al final del túnel (K5+273 a K5+366), cuyo espesor de roca es muy pequeño y presentan una cobertura de suelo producto de la meteorización de las rocas y acumulación de materiales de derrubio, generados por erosión de las zonas altas de montaña. El resto de la zona se ubica en roca en diferentes estados de la Diorita de Altavista y los Esquistos Cuarzo sericíticos. Como resultado del estudio geológico – geotécnico de detalle, se elaboró el perfil que se presenta en la.Figura 5-201

Con el objeto de conocer las condiciones de la zona por donde pasará el túnel, adicional al estudio geológico de la zona, se realizó la exploración geotécnica de detalle para el área del túnel. Como resultado de esta exploración geotécnica, se determinaron los siguientes parámetros geológicos - geotécnicos:

- RQD: Índice de calidad de las rocas ("Rock quality designation" Deree et al. (1967).
- Q de Barton: Índice de calidad de la masa rocosa, (Rock Mass Quality)
- RMR: Clasificación de Bieniawski
- Características Geológico – Geotécnicas de la roca e infiltraciones en la masa rocosa.

Con base en las clasificaciones geotécnicas de Deere, Barton y Bieniawski, para la zona de proyecto, se definieron seis categorías, como se presentan en la Tabla 5-104.

Figura 5-201 Perfil Geológico dela zona de influencia del túnel de Occidente Unidad Funcional 3



CONVENCIONES			
FALLAS Y FRACTURAS	RUMBO	UBICACIÓN	BUZAMIENTO
F1	Norte - Sur	Segadas al eje del Túnel	Subvertical
F2	Este -Oeste	Segadas al eje del Túnel	Subvertical
F3	Nor Este - Sud Oeste	Al hilo del eje del Túnel	Subvertical
F4	Nor Oeste - Sud Este	Perpendiculares al eje del Túnel.	Buzamiento Subvertical
FA	Bajo Buzamiento	F2 a F4	30-45º Contra Buzamiento >PP.KK
S1	Foliación Vertical	F2/F3	40-65º Con Buzamiento >PP.KK

UBICACIÓN DE ESTRUCTURAS (FALLAS Y FRACTURAS)										
PP.KK	ACCIDENTE	NOTAS	PP.KK	ACCIDENTE	NOTAS	PP.KK	ACCIDENTE	NOTAS	PP.KK	ACCIDENTE
0+960	CÁRCAVA		2+640	S1		3+410	F1		4+600	F2
1+100	F2		2+770	FA	E-O	3+600	F1		4+610	F4
1+380	F4		2+790	S1	**Contacto KIDA-PZES**	3+910	F2		4+660 - 4+720	F1
1+480	F4		2+880	F4		3+960	F4	Falla Frigia	4+750	F2
1+500	F4		2+930	F4		4+000	F2	Falla Cajetilla	4+800	F1
1+600	F4		2+960	F4		4+080	F1		4+850	F2
1+600	F1	Falla Matorral	3+000	F4		4+100	F2		4+920	F2
2+020	F2		3+040	F1		4+130	F2		4+970	F1
2+100	F4		3+040	FA	NE-SO	4+180	F1		4+990	F4
2+200	F2		3+100	F1		4+240	F1		5+020	F4
2+300	F2		3+160	FA	E-O	4+260	F4	Falla La Negra	5+040	F1
2+300	F1		3+200	S1	E-O	4+340	F4		5+060	F4
2+380	F1		3+260 - 3+300	F3		4+490	F1		5+160	F4
2+420	F1		3+400 – 3+600	F3		4+540	F4		5+280	F1
2+500	FA	E-O				4+540	F1			
NOTA: PP KK REFERIDOS A LA SUPERFICIE DEL TERRENO										

Fuente: CONCESIONARIO MAR 1- DEVIMAR, Estudios y diseños definitivos Fase III de la Unidad Funcional 3, Contrato 014 de 2015 Suscrito entre la ANI y la Concesionaria Desarrollo Vial al Mar S.A.S. 2016 - - Geología Final – Volumen III – Geología para Ingeniería. Numeral 7.8 Caracterización Geotécnica. Adaptado por Consultoría Colombiana S.A., 2016

Tabla 5-119 Clasificación Geotécnica para la Zona del Túnel de Occidente

RQD (%)	Q (Barton)	RMR	Zona Geotécnica (ZG)	Calidad de la roca
	0,01 - 0,1		6	Extremadamente Mala
<25	0,1 - 1	0 - 20	5	Muy mala
25 - 50	1, - 4	21 - 40	4	Mala
50 - 75	4, - 10	41 - 60	3	regular
75 - 90	10, - 40	61 - 80	2	Buena
90 - 100	40, - 100	81 -100	1	Muy buena o excelente

RQD Rock Quality Designation (Índice de calidad de las rocas) - Deree et al 1967
Q Rock Mass Quality (Índice de calidad de la masa rocosa) - Barton
RMR Rock Mass Rating (Valoración de la masa rocosa) - Bieniawski

Fuente: CONCESIÓN MAR 1 – DEVIMAR. Estudios y Diseños Definitivos Fase III de la Unidad Funcional 3, Contrato 014 de 2015 Suscrito entre la ANI y la Concesionaria Desarrollo Vial al Mar S.A.S. 2016 - - Geología Final – Volumen III – Geología para Ingeniería. Numeral 7.8 Caracterización Geotécnica.
Adaptado por Consultoría Colombiana S.A., 2016

En la Tabla 5-120 y Figura 5-202 se presenta el resultado de la zonificación geotécnica para el Túnel de Occidente, que permite la siguiente sectorización del túnel:

- Sector 1: K0+797 (Portal de Entrada) – K2+500, Figura 5-203
- Sector 2: K2+500 – K3+700 (Zona de contacto entre formaciones), Figura 5-204
- Sector 3: K3+700 – K5+366 (Portal de Salida), Figura 5-205.

abla 5-120 Resumen de la zonificación geotécnica del túnel, Unidad Funcional 3 (UF3)

Calificación			Características Geológico - Geotécnicas	Infiltraciones	Condición Geotéc. Roca	Clasificación geotécnica		
RQD	Q	RMR				Zona Geotéc.	Abscisa	L (m)
			Muy poco espesor de Diorita muy meteorizada IC -IIA, rellenos arcillosos hasta de 10 cm en las fracturas. Depósito de derrubios.	Humedades y goteos moderados que decrecieron con el tiempo (≈ 0,15 lts/seg)	Extremad. Mala	6	K0+797	223
Mala	Extremad. Mala	Muy mala	Poco espesor de Diorita fracturada y meteorizada en partes hasta IC. Encima depósitos de derrubios.	Goteos moderados y abundantes localizados que decrecieron con el tiempo. (≈ 0,35 lts/seg)	Extremad. Mala		K1+020	
Regular	Mala	Mala	Diorita muy fracturada y en partes meteorizada en las fracturas (IIB). Sobre-excavaciones en bóveda por sistema de fracturas de bajo buzamiento (zona de falla).	Goteos leves y moderados estacionarios. (≈ 0,5 l ts/seg)	Muy mala Zona de falla	5	K1+020	170
Regular	Mala	Regular	Diorita muy fracturada y levemente oxidada. Sobre-excavaciones en bóveda por sistema subparalelo y de bajo buzamiento (zona de falla).	Excavación seca (Humedades)	Muy mala Zona de Falla			
Buena	Mala	Regular	Diorita medianamente esquistosa y oxidada, en fracturas (IIB), Zona de falla.	Excavación seca.	Muy mala Zona de falla			
Mala	Mala	Buena	Diorita muy esquistosa y oxidada en las discontinuidades. Sobre-excavación en bóveda por caída de bloques, zona de falla.	Excavación seca	Muy mala Zona de falla			
Mala	Muy mala	Mala	Diorita muy fracturada y alterada. Zona de esfuerzos con trazas de falla N70°E. (Zona de falla)	Excavación seca	Muy mala Zona de falla		K1+190	
Regular	Mala	Regular	Diorita muy fracturada y levemente oxidada. Sobre-excavaciones en bóveda por sistema de bajo buzamiento.	Goteo leve puntual (≈ 0,5 l ts/seg)	Regular	3	K1+190	147
Buena	Regular	Regular	Diorita medianamente fracturada con esquistos y levemente oxidada en las fracturas. Bloques potencialmente inestables en bóveda por sistema de bajo buzamiento.	Goteo abundante y chor ros localizados (≈ 6,5 l ts/seg)	Regular		K1+337	
Regular	Mala	Mala	Diorita muy fracturada. Cuñas potencialmente inestables por sistemas, sub-paralelo y sub-horizontal.	Excavación seca (Humedades)	Mala	4	K1+337 K1+363	26
Buena	Buena	Buena	Diorita medianamente esquistosa. Diaclasamiento cerrado que favorece un corte ajustado a la barrenación.	Goteo leve a moderado (≈ 2ϕ5 lts/seg)	Buena	2	K1+363	97

PK		L	% R.Q.D. Q. R.M.R.	Calificación			Características Geológico - Geotécnicas	Infiltraciones	Condición Geotéc. Roca	Clasificación geotécnica		
Inicial	Final	(m)		RQD	Q	RMR				Zona Geotéc.	Abscisa	L (m)
1435	1447	12	75 - 95 25 - 32 74	Buena	Buena	Buena	Diorita poco fracturada, diaclasamiento cerrado que favorece un corte ajustado a la barrenación.	Goteo leve a moderado (≈ 1,5 lts/seg)	Buena			
1447	1460	13	65 - 80 7 - 13 66	Buena	Buena	Buena	Diorita medianamente fracturada. Diaclasamiento cerrado que favorece un corte ajustado a la barrenación.	Goteo leve a moderado (≈ 2ϕ0 lts/seg)	Buena		K1+460	
1460	1580	120	20 - 40 0,075-0,175 28	Mala	Muy mala	Mala	Diorita cataclástica. Zona de falla de 5 m de espesor con zona de influencia en roca muy fracturada.	Excavación seca (Humedades)	Muy mala Zona de Falla	5	K1+460 K1+580	120
1580	1680	100	60 - 80 6 - 9 60	Regular	Regular	Regular	Diorita muy fracturada. El diaclasamiento, aunque muy poco espaciado, se presenta cerrado.	Excavación seca	Regular	3	K1+580	285
1680	1865	185	65 - 85 7 - 9 60	Regular	Regular	Regular	Diorita medianamente esquistosa. Corte ajustado a la barrenación por diaclasamiento cerrado.	Goteo moderado (≈ 4,0 l ts/seg)	Regular		K1+865	
1865	1932	67	70 - 90 17 - 23 74	Buena	Buena	Buena	Diorita poco fracturada. Corte ajustado a la barrenación por diaclasamiento cerrado.	Excavación seca	Buena	2	K1+865 K1+932	67
1932	2000	68	60 - 80 4 - 13 56	Regular	Regular	Regular	Diorita medianamente esquistosa. Las discontinuidades de bajo buzamiento y el sistema subparalelo crearon cuñas inestables. Zona de falla.	Goteo moderado (≈ 1,5 l ts/seg)	Regular Zona de falla	5	K1+932	138
2000	2019	19	25 - 50 0,4 - 1 22	Mala	Muy mala	Mala	Diorita intensamente fracturada y fallada. Falla de bajo buzamiento de 3 m de espesor. Zona de falla.	Excavación seca	Muy mala Zona de falla			
2019	2070	51	55 - 75 2 - 6 53	Regular	Mala	Regular	Diorita muy fracturada. Cuñas potencialmente inestables por combinación de sistema subnormal y subparalelo (N W). Zona de falla	Excavación seca	Regular Zona de falla		K2+070	
2070	2095	25	65 - 85 10 - 14 67	Regular	Buena	Buena	Diorita medianamente esquistosa. Cuñas en bóveda por sistema de bajo buzamiento.	Excavación seca	Buena	2	K2+070 K2+095	25
2095	2148	53	60 - 75 2 - 4 49	Regular	Mala	Regular	Diorita muy fracturada. Cuñas en bóveda por sistema de bajo buzamiento.	Excavación seca	Regular	3	K2+095	225
2148	2320	172	65 - 85 4 - 9 54	Regular	Regular	Regular	Diorita medianamente esquistosa. Las principales estructuras (fallas) se cruzaron normales sin afectar la estabilidad general.	Excavación seca	Regular		K2+320	

PK		L	% R.Q.D. Q. R.M.R.	Calificación			Características Geológico - Geotécnicas	Infiltraciones	Condición Geotéc. Roca	Clasificación geotécnica		
Inicial	Final	(m)		RQD	Q	RMR				Zona Geotéc.	Abscisa	L (m)
2320	2405	85	70 - 90 14 - 30 76	Buena	Buena	Buena	Diorita poco fracturada. Excavación ajustada a la barrenación.	Goteo moderado (≈ 2,0 l ts/seg)	Buena	2	K2+320 K2+834	514
2405	2834	429	65 - 85 7 - 14 67	Buena	Buena	Buena	Diorita medianamente esquistosa. Excavación ajustada a la barrenación.	Goteo abundante y chorros que disminuyen con el tiempo (≈ 15,0 lts/seg)	Buena			
2834	2868	34	60 - 75 5 - 9 59	Regular	Regular	Regular	Diorita muy fracturada. Cuñas potencialmente inestables en la bóveda por sistemas de bajo buzamiento encontrados.	Goteo abundante (≈ 1,5 l ts/seg)	Regular	3	K2+834 K2+976	142
2868	2976	108	65 - 85 5 - 9 59	Regular	Regular	Regular	Diorita medianamente fracturada. Cuñas potencialmente inestables en la bóveda por sistemas de bajo buzamiento encontrados.	Goteo moderado (≈ 1,5 l ts/seg)	Regular			
2976	3180	204	50 - 70 0,8 - 2 37	Regular	Muy mala	Mala	Diorita, dunita, cornubiana y esquistos muy fracturados. Cuñas potencialmente inestables en la bóveda por sistemas de bajo buzamiento encontrados.	Goteos moderados y abundantes (≈ 3,0 l ts/seg)	Mala	4	K2+976 K3+180	204
3180	3237	57	65 - 85 3 - 7 56	Regular	Regular	Regular	Esquistos, cuarcitas y cornubianas medianamente fracturados. La foliación se dispone de bajo buzamiento y crea lajas potencialmente inestables.	Goteo moderado (≈ 0,5 l ts/seg)	Regular	3	K3+180 K3+237	57
3237	3268	31	50 - 70 2 - 3 39	Regular	Mala	Mala	Esquistos, cuarcitas y diques ígneos muy fracturados. Discontinuidades de buzamiento bajo crean cuñas inestables.	Goteos leves (≈ 0,5 lts/s eg)	Mala	4	K3+237 K3+268	31
3268	3337	69	65 85 9 - 19 51	Regular	Buena	Regular	Esquistos y cuarcitas medianamente fracturados.	Goteos leves (≈ 0,5 lts/s eg)	Regular	3	K3+268 K3+337	69
3337	3389	52	45 - 65 2 - 6 39	Regular	Mala	Mala	Esquistos, cuarcitas, diques ígneos y cornubianas, muy fracturados. Las discontinuidades con buzamiento medio y bajo encontrados crean bloques potencialmente inestables.	Excavación seca (Humedades)	Mala	4	K3+337 K3+389	52
3389	3454	65	65 - 85 9 - 12 51	Regular	Buena	Regular	Esquistos, cuarcitas y cornubianas medianamente Esquistosas. Foliación con buzamiento bajo que crea lajas y bloques inestables en la bóveda.	Goteo moderado y abundante (≈ 3,0 lts/seg)	Regular	3	K3+389	224

PK		L	% R.Q.D. Q. R.M.R.	Calificación			Características Geológico - Geotécnicas	Infiltraciones	Condición Geotéc. Roca	Clasificación geotécnica		
Inicial	Final	(m)		RQD	Q	RMR				Zona Geotéc.	Abscisa	L (m)
3454	3478	24	45 - 65 3 - 7 45	Regular	Regular	Regular	Esquistos, cuarcitas y cornubianas muy fracturados. Foliación con bajo buzamiento que crea lajas y bloques inestables en la bóveda.	Goteo abundante (≈ 2,0 lts/seg)	Regular			
3478	3613	135	65 - 85 9 - 14 59	Regular	Buena	Regular	Esquistos, cuarcitas y cornubianas medianamente Esquistosas. Foliación con buzamiento bajo que crea lajas y bloques inestables en la bóveda.	Goteos moderados (≈ 0,5 lts/seg)	Regular		K3+613	
3613	3768	155	85 - 95 28 - 64 77	Buena	Buena	Buena	Esquistos y cuarcitas poco fracturados. Diaclasamiento y foliación cerrados, excavación ajustada a la barrenación.	Goteos abundantes y chorros moderados localizados (≈ 2,0 lts/seg)	Buena	2	K3+613 K3+768	155
3768	3818	50	65 - 85 7 - 9 60	Buena	Regular	Regular	Esquistos y cuarcitas medianamente fracturados. Algunas discontinuidades de bajo buzamiento crean cuñas potencialmente inestables.	Goteo ab undante y chorros localizados (≈ 4,0 lts/seg)	Regular	3	K3+768	70
3818	3838	20	65 - 75 2 - 4 45	Regular	Mala	Regular	Esquisto filítico muy fracturado, foliación formando arco en la bóveda creando lajas inestables.	Goteo abundante (≈ 0,5 lts/seg)	Regular		K3+838	
3838	4057	219	65 - 85 10 - 14 84	Regular	Buena	Muy buena	Esquistos y cuarcitas medianamente fracturados. Foliación y otras discontinuidades cerradas.	Goteo ab undante y chorros moderados localizados (≈ 5,0 lts/seg)	Buena	2	K3+838 K4+057	219
4057	4169	112	70 - 90 46 - 60 84	Buena	Muy buena	Muy buena	Esquistos y cuarcitas calcáreas poco fracturados. Excavación ajustada a la barrenación.	Goteo abundante (≈ 1,5 lts/seg)	Muy buena	1	K4+057 K4+169	112
4169	4283	114	60 - 75 7 - 9 57	Regular	Regular	Regular	Esquisto filíticos, grafitosos y cuarcita calcárea medianamente fracturados. Excavación ajustada a la barrenación.	Goteo abundante (≈ 1,5 lts/seg)	Regular	3	K4+169 K4+283	114
4283	4893	610	81 - 90 10 - 40 60 - 80	Buena	Buena	Buena	Esquistos filíticos, grafitosos y cuarcitas calcáreas poco a medianamente fracturadas. Roca foliada que se deja excavar de manera ajustada a la barrenación.	Goteos moderados a leves y chorros localizados (≈ 8,0 lts/seg)	Buena	2	K4+283 K4+893	610
4893	5083	190	60 - 81 10 - 40 60 - 80	Regular	Buena	Regular	Esquistos filíticos, grafitosos y cuarcitas calcáreas poco a medianamente fracturadas. Roca foliada que se deja excavar de manera ajustada a la barrenación.	Goteos moderados a leves y chorros localizados (≈ 8,0 lts/seg)	Regular	3	K4+893	380

PK		L	% R.Q.D. Q. R.M.R.	Calificación			Características Geológico - Geotécnicas	Infiltraciones	Condición Geotéc. Roca	Clasificación geotécnica		
Inicial	Final	(m)		RQD	Q	RMR				Zona Geotéc.	Abscisa	L (m)
5083	5220	137	60 - 75 7 - 9 57	Regular	Regular	Regular	Esquistos filíticos, grafitosos con cuarcita calcárea medianamente fracturados. Excavación ajustada a la barrenación.	Goteo abundante (≈ 1,5 lts/seg)	Regular			
5220	5273	53	50 - 70 2 - 4 47	Regular	Mala	Regular	Esquistos filíticos y grafitos s fracturados y foliados. La roca se deja excavar fácilmente. Corte ajustado a la barrenación.	Chorro controlado por estructura N30°W (≈ 0,2 lts/seg)	Regular		K5+273	
5273	5305	32	40 - 60 1 - 3 39	Mala	Mala	Mala	Esquistos cuarzo-sericíticos y grafitosos muy fracturados y oxidados.	Goteo abundante (≈ 0,2 lts/seg)	Mala	4	K5+273 K5+305	32
5305	5352	47	< 30% 0,25 20	Muy mala	Muy mala	Muy mala	Esquistos grafitosos blandos y húmedos. Meteorizados hasta IIA. Muy poco espesor de roca. En general son depósitos de derrubio	Goteo moderado (≈ 0,1 lts/seg)	Muy mala	6	K5+305 K5+352	47
TOTAL		4555										4.555

ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA DE LA ZONA DE TUNEL

Bases de la zonificación geotécnica del área del túnel. Se tomaron como base los siguientes criterios:

Índice de calidad de las rocas RQD ("Rock quiality designation" Deree et al. (1967)
Índice de calidad de la masa rocosa Q de Barton (Rock Mass Quality)
Clasificación de Bieniawski (R.M.R.)
Ubicación del túnel respecto a zonas de falla.
Geología de la zona del túnel.

Geología de la zona del túnel. Al inicio del túnel, (Qd) - Depósitos de Derrubio, con influencia desde el K0+797 hasta el K1+020 y desde el K5+320 a K5+352. (Depósitos coluviales con presencia de bloques y cantos gruesos de roca meteorizada en matriz arcillo arenosa, con presencia de agua).
K1+020 a K3+180. Batolito de Altavista (Kida). Cuerpo granítico intrusivo de composición diorítica según Travis (1965), o Monzodiorita según Streckeisen (1974. Se encuentran rocas desde porfiríticas de matriz afanítica y composición intermedia a dioritas, cuarzodioritas y granitos. La roca predominante es félsica, de color gris, cremas hasta verdes en las rocas porfiríticas.
K3+180 a K5 + 320 (Pes) del grupo Ayurá - Montebello. Rocas Metamórficas compuestas por Filitas, esquistos cuarzo sericíticos y esquistos alumínicos, con Metamorfismo regional de grado bajo a medio.

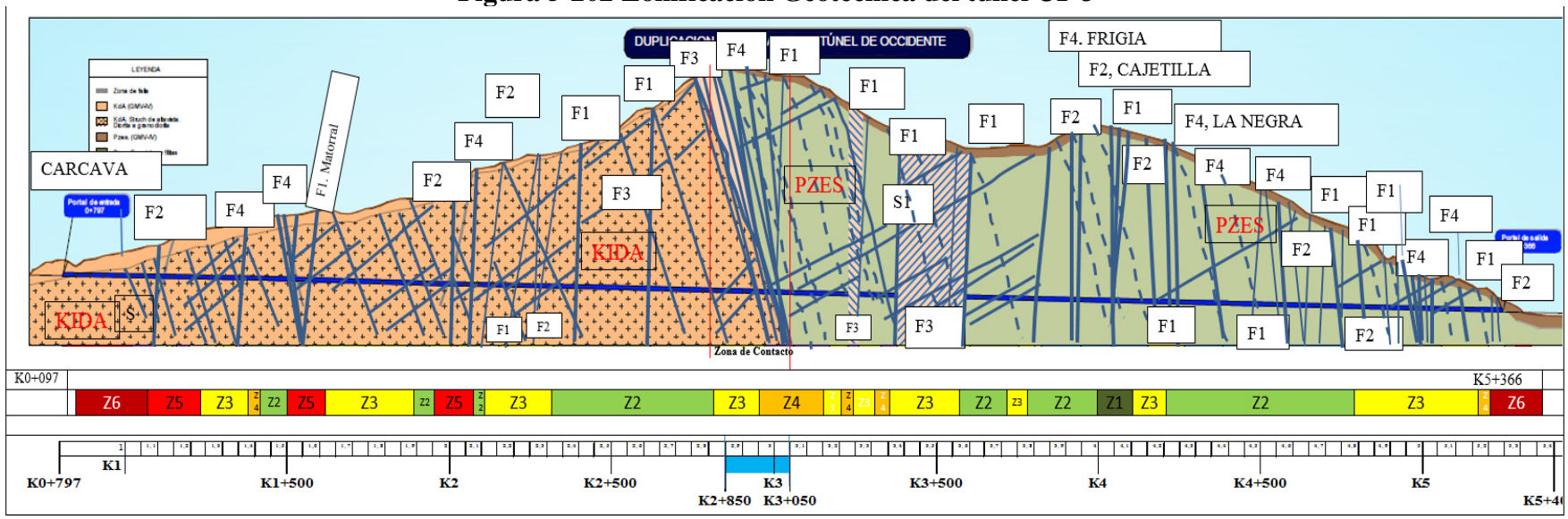
PK		L	% R.Q.D. Q. R.M.R.	Calificación			Características Geológico - Geotécnicas	Infiltraciones	Condición Geotéc. Roca	Clasificación geotécnica		
Inicial	Final	(m)		RQD	Q	RMR				Zona Geotéc.	Abscisa	L (m)

RQD (%)	Q (Barton)	RMR	Zona Geotécnica (ZG)	Calidad de la roca
	0,01 - 0,1		6	Extremadamente Mala
<25	0,1 - 1	0 - 20	5	Muy mala
25 - 50	1, - 4	21 - 40	4	Mala
50 - 75	4, - 10	41 - 60	3	regular
75 - 90	10, - 40	61 - 80	2	Buena
90 - 100	40, - 100	81 -100	1	Muy buena o excelente

RQD	Rock Quality Designation (Indice de calidad de las rocas) - Deree et al 1967
Q	Rock Mass Quality (Indice de calidad de la masa rocosa) - Barton
RMR	Rock Mass Rating (Valoración de la masa rocosa) - Bieniawski

Fuente: CONCESIÓN MAR 1 – DEVIMAR. Estudios y Diseños Definitivos Fase III de la Unidad Funcional 3, Contrato 014 de 2015 Suscrito entre la ANI y la Concesionaria Desarrollo Vial al Mar S.A.S. 2016 - - Geología Final – Volumen III – Geología para Ingeniería. Numeral 7.8 Caracterización Geotécnica.
Adaptado por Consultoría Colombiana S.A., 2016

Figura 5-202 Zonificación Geotécnica del túnel UF 3



CONVENCIONES			
FALLAS Y FRACTURAS	**RUMBO**	**UBICACIÓN**	**BUZAMIENTO**
F1	Norte - Sur	Segadas al eje del Túnel	Subvertical
F2	Este -Oeste	Segadas al eje del Túnel	Subvertical
GF3	Nor Este - Sud Oeste	Al hilo del eje del Túnel	Subvertical
F4	Nor Oeste - Sud Este	Perpendiculares al eje del Túnel.	Buzamiento Subvertical
FA	Bajo Buzamiento	F2 a F4	30-45º Contra Buzamiento >PP.KK
S1	Foliación Vertical	F2/F3	40-65º Con Buzamiento >PP.KK

Zona Geotécnica	Calidad Geotécnica del Terreno
Z6	Extremadamente mala
Z5	Muy mala
Z4	Mala
Z3	Regular
Z2	Buena
Z1	Muy buena o excelente

Fuente: Datos Geológicos, Construcción Túnel Paralelo - Interventoría y Apoyo Gerencial de la Construcción de la Carretera Medellín – Santafé de Antioquia – anexo Geológico Geotécnico del Túnel de Occidente. Integral S.A. febrero de 2002. Duplicación del Túnel de Occidente – Diseño Fase II – Diseño del Túnel. TYPSA y CRA, Noviembre de 2013 CONCESIÓN MAR 1 – DEVIMAR. Estudios y Diseños Definitivos Fase III de la Unidad Funcional 3, Contrato 014 de 2015 Suscrito entre la ANI y la Concesionaria Desarrollo Vial al Mar S.A.S. 2016. Adaptado por Consultoría Colombiana S.A., 2016

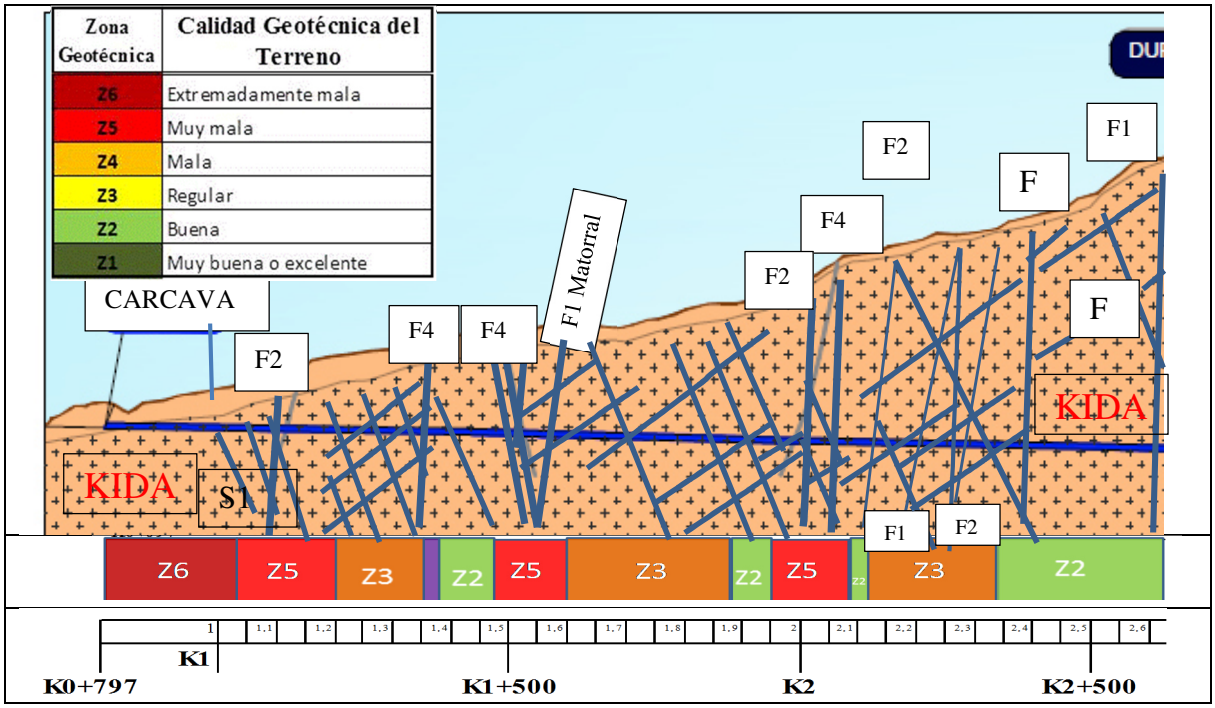
5.1.9.1.1 Sector 1: K0+797 (Portal de Entrada) – K2+500

El túnel inicia en la Diorita de Altavista. Son rocas desde porfiríticas de matriz afanítica y composición intermedia a dioritas, cuarzodioritas y granitos. La roca predominante es félsica, color gris, crema hasta verde en las rocas porfiríticas. Al inicio (K0+797 K1+030) se encuentra una zona Geotécnica Z6 (Extremadamente mala), por el poco espesor de roca y la presencia de materiales de derrubios (Qd).

En este sector se presentan varias zonas de fallas que cruzan el nuevo túnel, en las que sobresale la falla El Matorral (K1+600) que llegan muy cerca de la superficie; estas fallas son cruzadas por el túnel y hacen que la condición geotécnica en sus cruces corresponde a la zona Z5 (condición geotécnica muy mala).

Al inicio del túnel (K0+797 a K1+020), el espesor de roca es muy pequeño y encima se encuentran zonas de depósito de suelo producto de la meteorización de las rocas y de la acumulación de material de derrubios (Qd), que en este sector corresponden a depósitos coluviales con presencia de bloques y cantos gruesos de roca meteorizada en matriz arcillo arenosa, con presencia de agua, generados por erosión de las zonas altas de la montaña (Figura 5-203). Nota: Ver convenciones en la Figura 5-201

Figura 5-203 Zonificación Geotécnica Túnel de Occidente, Sector 1: K00+797 – K02+500.



Fuente: CONCESIÓN MAR 1 – DEVIMAR. Estudios y Diseños Definitivos Fase III de la Unidad Funcional 3, Contrato 014 de 2015 Suscrito entre la ANI y la Concesionaria Desarrollo Vial al Mar S.A.S. 2016 - Adaptado por Consultoría

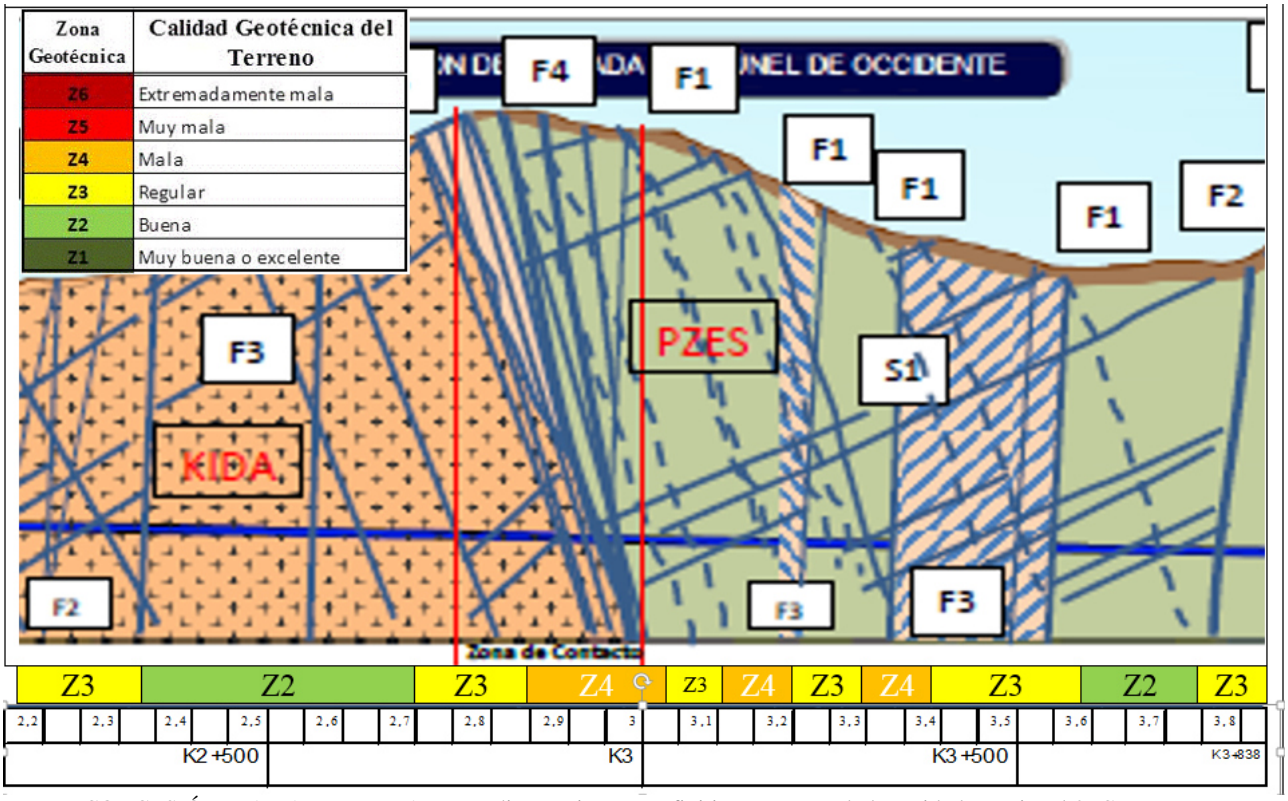
Colombiana S.A., 2016

5.1.9.1.2 Sector 2: K2+500 – K3+700

Zona de contacto, ubicada en la zona más alta de la montaña entre la Diorita de Altavista y los Esquistos Cuarzo sericíticos. La zona de contacto es de alta pendiente, casi vertical, con inclinación descendente suroriente/Noroccidente, Figura 5-204. Nota: Ver convenciones en la Figura 5-201.

En este sector, se ubican zonas Z2 a Z4, la roca posee un buen tramo con una zona geotécnica Z2 cuya calidad del terreno se clasifica como buena (K2+500 – K2+700 y K3+580- K3+750). En la categoría Z3, de regular calidad geotécnica existen varios sectores, (K2+700 – K2+840, K3+030 – K3+110, K3+200 – K3+290 y K3+380 – K3+590) (Regular calidad geotécnica) mostrando además, una condición especial de zona Z4 en los tramos (K2+890 – K3+030, K3+120 - K3+200 y K3+290 – K3+380) (Mala calidad geotécnica del corredor, incluyendo la zona de contacto entre las dos formaciones KIDA y PZES.

Figura 5-204 Zonificación Geotécnica Túnel de Occidente, Sector 2: K2+500 – K3+700. Zona de Contacto entre Formaciones



Fuente: CONCESIÓN MAR 1 – DEVIMAR. Estudios y Diseños Definitivos Fase III de la Unidad Funcional 3, Contrato 014 de 2015 Suscrito entre la ANI y la Concesionaria Desarrollo Vial al Mar S.A.S. 2016 - Adaptado por Consultoría Colombiana S.A., 2016

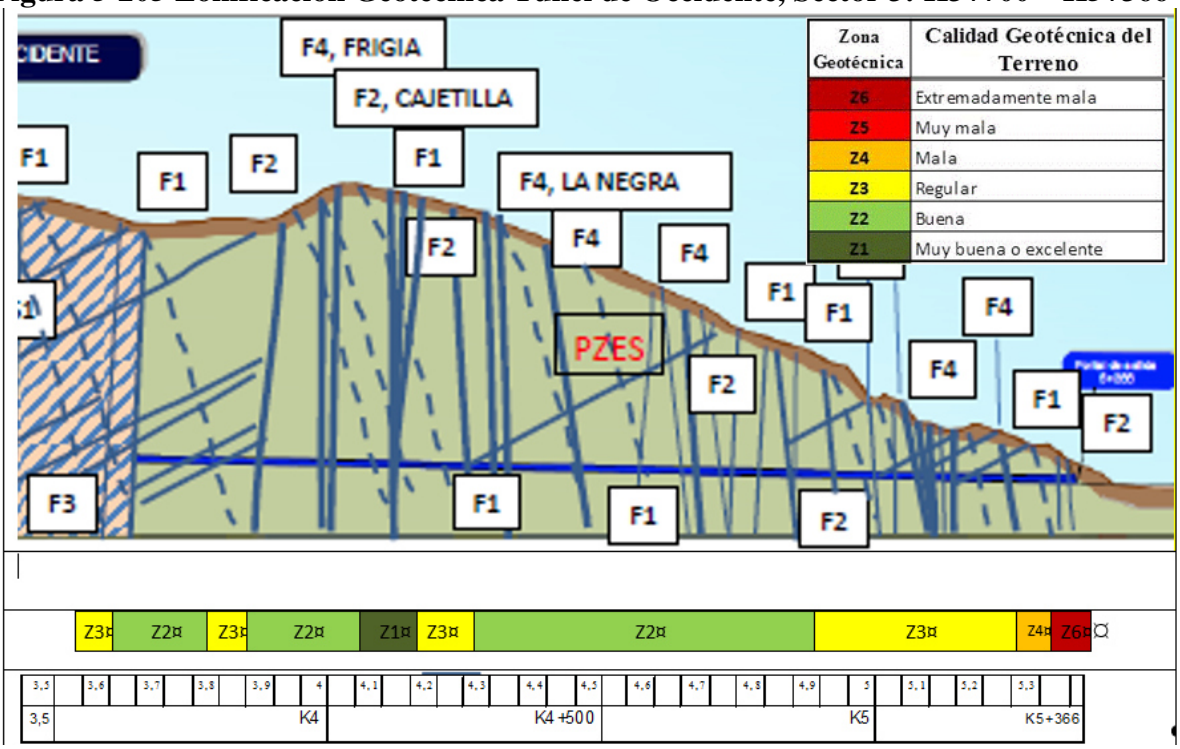
5.1.9.1.3 Sector 3: Zona final del túnel, terminando en el Portal de Salida

Todo el sector se ubica en la unidad de Esquistos cuarzo sericíticos. Geotécnicamente, este sector presenta las mejores características geotécnicas, con largos tramos en zona tipo Z2, de buena calidad geotécnica del terreno (Figura 5-205).

En un pequeño tramo (K04+075 a K04+500), la calidad geotécnica de la roca es Z1 (muy buena o excelente), aunque se evidencia la presencia de varias fracturas y fallas (Frigia K3+960, Cajetilla K4+000 y La Negra K4+260). Se presentan tres pequeños sectores de zona Z3 (terreno de regular calidad Geotécnica), uno de ellos de longitud considerable, entre el K4+900 al K5+300).

Al final, entre el K05+300 al K05+366 (portal de salida) la zona se encuentra entre Z4 (Mala calidad geotécnica) y Z6 (Extremadamente mala); esta última está relacionada con un pequeño espesor de roca y la presencia de material de derrubio muy cerca al túnel.

Figura 5-205 Zonificación Geotécnica Túnel de Occidente, Sector 3: K3+700 – K5+366



Fuente: CONCESIÓN MAR 1 – DEVIMAR. Estudios y Diseños Definitivos Fase III de la Unidad Funcional 3, Contrato 014 de 2015 Suscrito entre la ANI y la Concesionaria Desarrollo Vial al Mar S.A.S. 2016 - Adaptado por Consultoría Colombiana S.A., 2016

5.1.9.1.4 Conclusiones

Como resultado del estudio detallado de las condiciones topográficas, geológicas, geomorfológicas y geotécnicas de la zona en donde se construirá el nuevo túnel, se puede concluir que las condiciones del terreno son aptas para la construcción, operación y mantenimiento del túnel y de los tramos cortos de calzada al aire libre, con controles técnicos de ingeniería normales para este tipo de proyectos.

La construcción del túnel disminuye de manera significativa el problema existente en las laderas de alta montaña, y se evita el paso por la ladera de muy baja estabilidad presente en la parte más alta del trazado.

Es significativo el conocimiento que se tiene de las condiciones geológicas y geotécnicas de la zona donde se construirá el nuevo túnel, ya que en todo su recorrido pasará por zonas de los mismos materiales y de las mismas condiciones geológicas y geotécnicas del túnel existente, el cual ha sido buena herramienta para la realización de los estudios y diseños y será un buen punto de partida para la construcción y operación del nuevo túnel.

Como resumen de la zonificación geotécnica, el tramo inicial K00+797 al K02+300 y el final K05+250 al K05+366 son los de mayor cuidado. El principio y el final, por ser los portales, el espesor de roca es muy pequeño y la presencia de materiales de derrubios, hace que estos sitios sean de especial interés geotécnico y requieren las mayores obras de protección y control.

Los tramos en donde se encuentran las fallas identificadas (K1+600, y K3+960 a K4+260), presentan una condición de dificultad geotécnica que deberá atenderse con especial cuidado, para su control geotécnico, al igual que las zonas Z4 en los tramos (K2+890 – K3+030, K3+120 - K3+200 y K3+290 – K3+380), en donde se presenta mala calidad geotécnica del corredor, incluyendo la zona de contacto, casi vertical entre las dos formaciones KIDA (Diorita) y PZES (Altavista), zonas de esquistos Cuarzo sericíticos.

5.1.9.2 Geotecnia para Unidad Funcional 1

Para la Unidad Funcional la metodología de Zonificación Geotécnica utilizada consiste en la división del terreno en zonas geotécnicamente homogéneas, calificadas de acuerdo con las condiciones de estabilidad que pueden afectar la construcción y operación de la vía, para lo cual en un ambiente SIG, se definieron áreas con características similares en cuanto a litología (geología), geomorfología, cobertura de la tierra, densidad de drenajes, densidad de fallas, pendientes y morfodinámica.

Esta metodología incorpora dos factores detonantes, precipitación y amenaza sísmica, y se obtiene la amenaza relativa (zonificación geotécnica) a la ocurrencia de procesos erosivos y de remoción en masa, calificada desde muy baja a muy alta, de acuerdo con el esquema metodológico modificado de VARGAS (1.999)[70], Figura 5-206.

Para el desarrollo del estudio, se adelantaron las siguientes etapas:

- Recopilación y análisis de información existente. En esta etapa de trabajo se realizó el análisis de la información existente que se incorporó al modelo de análisis (información topográfica e información temática).

- Elaboración del mapa base digital, escala 1:25.000 del IGAC; incluye curvas de nivel, drenajes, vías y zonas urbanas entre otras.

- Estudio de las variables geoambientales o factores del terreno. Análisis y cartografía de variables como geología, geomorfología, fallas, cobertura de la tierra, pendientes, morfodinámica, drenajes, precipitación y sismicidad.

- Implementación del SIG. Sobre el mapa base digital del área de influencia se digitalizó la información temática georreferenciada.

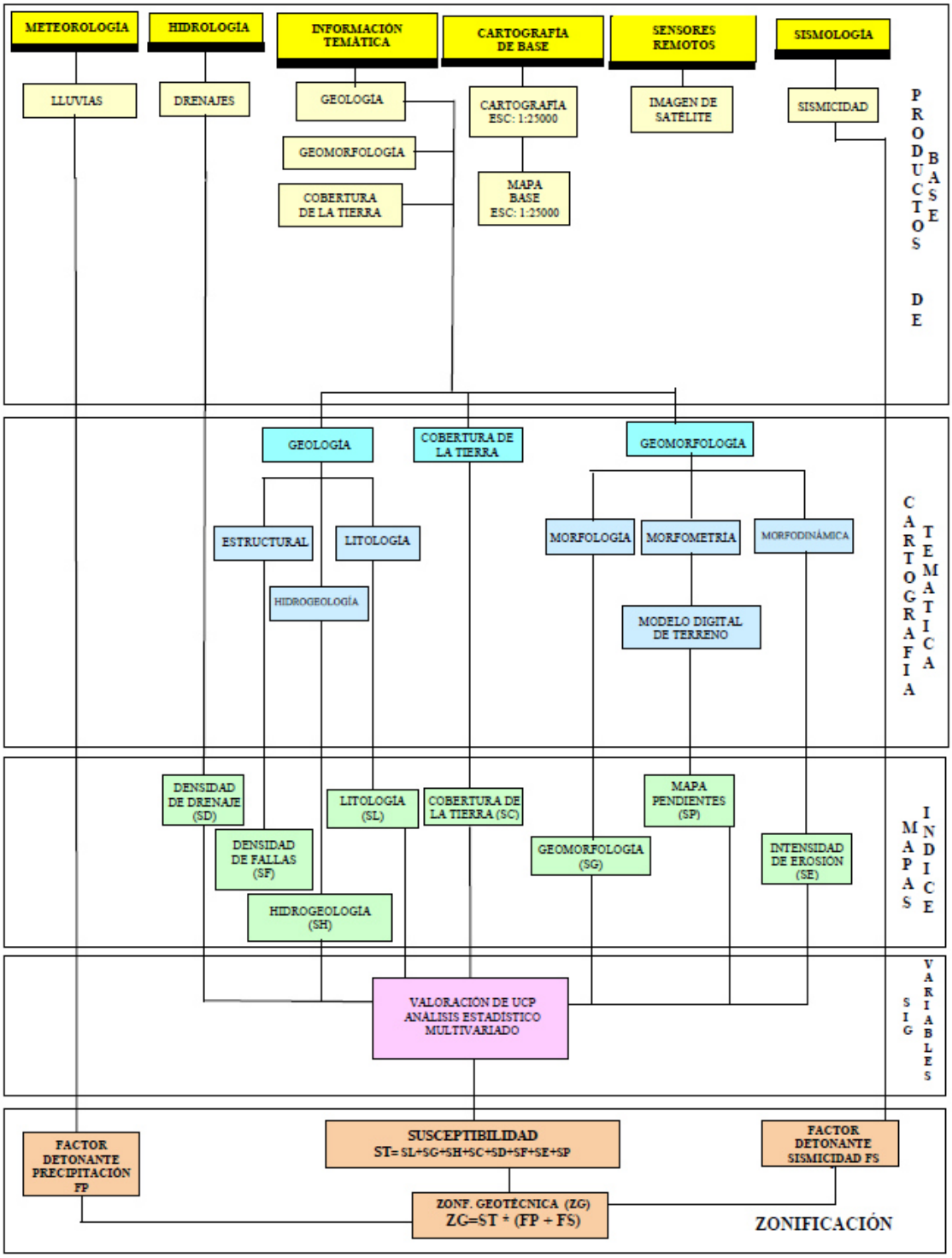
- Evaluación de variables. Se evaluó la información obtenida y se determinaron los pesos de las variables para la determinación de la estabilidad geotécnica.

- Modelación de susceptibilidad. Con base en la calificación semi cuantitativa de las Unidades Cartográficas de Parámetro (UCP), se realizó la modelación multivariada de variables en función de la susceptibilidad, para la obtención de la zonificación geotécnica. La susceptibilidad es el grado de propensión de un terreno a generar uno o varios procesos amenazantes.

[70]Estudio Geoambiental y Zonificación de Amenazas por Erosión y Remoción en Masa en la Cuenca del Río Teusacá. Sabana de Bogotá. Colombia. X Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería. Sociedad Colombiana de Ingenieros, Santa Fe de Bogotá, D.C., Noviembre de 1999.

- Identificación de factores detonantes. Se consideraron como factores externos que pueden detonar procesos de remoción en masa, las variables de Precipitación y Amenaza Sísmica.

Figura 5-206 Diagrama metodológico para la obtención de la zonificación geotécnica



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2015

La zonificación geotécnica se establece en cinco categorías, las cuales reflejan la conjugación de las variables incorporadas al análisis, incluyendo los factores intrínsecos de precipitación y sismicidad.

Para el análisis de las variables geoambientales, se estableció un criterio semi cuantitativo, donde se asignó a cada unidad de parámetro un valor de susceptibilidad de 1 a 5, como se presenta en la Tabla 5-121.

Tabla 5-121 Categoría y valores de susceptibilidad para el análisis de las variables

Categoría de susceptibilidad	Peso
Muy baja	1
Baja	2
Moderada	3
Alta	4
Muy Alta	5

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2015

A continuación se presentan los resultados de valoración de Susceptibilidad para cada variable de análisis.

5.1.9.2.1 Modelación de Variables

Una vez establecidos semi cuantitativamente los diferentes valores de susceptibilidad para cada UCP en cada una de las ocho variables que se incorporaron al análisis, se obtuvieron los mapas de susceptibilidad temática. Este proceso se realizó en un formato raster en el cual cada UCP está conformada por un conjunto de pixeles de igual valor.

Este valor asociado a un atributo cartográfico (nombre de la unidad cartográfica de parámetro), se recodificó o se reemplazó en un SIG (ArcGis10), por el valor asignado en las tablas de susceptibilidad, de tal forma que las imágenes mapas de susceptibilidad temática resultantes representan un rango de valores entre 1 y 5. A continuación se presentan los valores de susceptibilidad para cada una de las variables.

5.1.9.2.2 Litología (SL)

Es uno de los principales factores a considerar en la determinación de la estabilidad, debido a que la génesis, composición y estructura de las rocas, incide en la susceptibilidad del terreno a la meteorización y desarrollo de procesos erosivos y/o procesos de remoción en masa.

Para el caso de la zona de estudio, el AI cruza por depósitos cuaternarios, de bajo grado de compactación, susceptibles al desarrollo de erosión en surcos y cárcavas; estos depósitos son considerados de alta susceptibilidad.

Tabla 5-122 Valores de susceptibilidad por litología

Símbolo	Unidad Cartográfica de Parámetro (UCP)	Descripción	Peso	Justificación
Qll	Lleno antrópico	Depósitos de sobrantes de excavación resultantes principalmente de la anterior construcción del túnel de occidente y actual vía Medellín – Santa Fe de Antioquia. Materiales dispuestos sobre el terreno, composición heterogénea (arcillas, gravas, bloques de roca, etc.), algunos debidamente dispuestos y compactados y otros vertidos en forma directa sin manejo técnico.	4	Depósitos no consolidados, algunos de ellos conformados y compactados, sin embargo en campo pudieron observarse algunos que han sufrido problemas de estabilidad, como el depósito el Galpón ubicado en la ladera de la quebrada Negra, en el costado NE del K00+200 – K0+470 (Abscisado de la vía actual existente)[71].
Qal	Depósitos Aluviales	Depósitos aluviales, sueltos, de composición de gravas a arenas.	4	Depósitos no consolidados, sueltos, susceptibles de procesos erosivos como surcos y cárcavas.
Qcal	Depósitos coluvio aluviales	Conformados por bloques angulares de roca, diámetro medio 2-5 cm, roca completamente meteorizada. Matriz arenosa suelta, bloques de roca (70%), color café claro.	4	Depósitos no consolidados de muy baja compactación, de matriz arenosa suelta, susceptibles erosión en surcos y cárcavas.
Qd	Depósitos de derrubio/depósitos de deslizamientos	Materiales de composición heterogénea, dependiendo de las condiciones de humedad y composición de la fuente de aporte de sedimentos.	4	Depósitos no consolidados de baja compactación, susceptibles erosión en surcos y cárcavas.
Ngas Pam Pgai	Formación Amagá	Ngas. Miembro superior. Areniscas bien cementadas, arcillas pizarrosas, localmente bancos delgados de conglomerados y carbón. Tom. Miembro Medio. Arcillas pizarrosas, areniscas localmente conglomeráticas, mantos de carbón hasta 2m de espesor. Toi. Miembro Inferior. Conglomerados, areniscas conglomeráticas, areniscas, arcillolitas arenosas, arcillolitas pizarrosas.	3	Depósitos sedimentarios generalmente bien cementados y compactos que le imprimen estabilidad, sin embargo, son susceptibles de erosión hídrica superficial (surcos, cárcavas).

[71] Consultoría para la realización de los Estudios Geotécnicos y Diseños de Ingeniería necesarios para las Obras de Mitigación y Estabilización de Puntos Críticos en la Conexión Vial Guillermo Gaviria Correa y la Antigua Vía al Mar Gonzalo Mejía. Sitio Crítico 02 Puente Quebrada La Negra y Depósito El Galpón. Marzo de 2013.

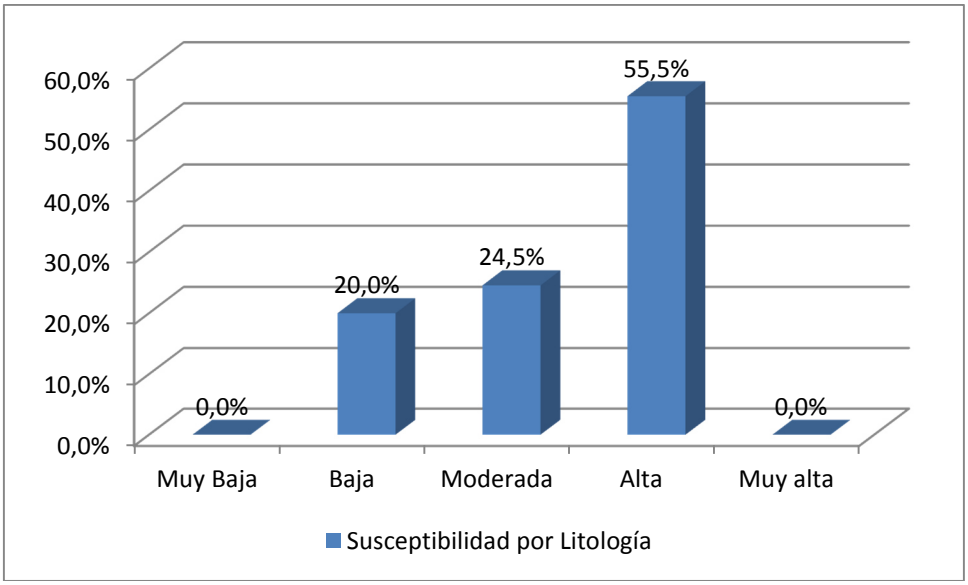
Símbolo	Unidad Cartográfica de Parámetro (UCP)	Descripción	Peso	Justificación
Kdha - Kdhb	Diorita de Heliconia-diorita hornbléndica	Diorita cuarzosa de grano medio, textura granular, hipidiomórfica granular, ocasionalmente ofítica con cataclasis y dioritas hornbléndicas.	3	Rocas intrusivas de composición ácida, susceptibles a meteorización química y desarrollo de suelos residuales de espesor variable, que pueden generar zonas susceptibles de deslizamientos.
Kida	Diorita de Altavista	Rocas desde porfiríticas de matriz afanítica y composición intermedia a dioritas, cuarzodioritas y granitos; la roca predominante es félsica. En el área de estudio, esta unidad litológica desarrolla suelos residuales de espesores	3	Rocas intrusivas de composición ácida, susceptibles a meteorización química y desarrollo de suelos residuales de espesor variable, que pueden generar zonas susceptibles de deslizamientos.
KvQG	Complejo Quebradagrande Miembro volcánico	Capas delgadas estratificadas formando bancos mayores de 2 metros de liditas, lodolitas, grauvacas, intercaladas ocasionalmente por bancos de tobas silicificadas y conglomerados finos, localmente es bastante rica en materia orgánica.	2	Son rocas duras, compactas que en campo fueron observadas generalmente como rocas moderada a débilmente meteorizadas.
Jgr	Gabros de Romeral	Gabros de grano fino a pegmatíticos, asociados al sistema de fallas de Romeral	4	Rocas intrusivas máficas, afectadas en el área de estudio por alta influencia estructural que le imprimen alta susceptibilidad a movimientos en masa.
Pzes Pev	Grupo Ayurá Montebello	Pzes. Filitas, esquistos cuarzo sericíticos y esquistos alumínicos. Metamorfismo regional de grado bajo a medio. Pev. Esquistos verdes compuestos por alicita, epidota, clorita y actinolita. Metamorfismo regional de grado bajo a medio	4	Rocas metamórficas de estructura esquistosa principalmente, que le imprimen al terreno alta susceptibilidad a movimientos en masa, a través de planos de debilidad.
Pgnp	Granito néisico de Palmitas	Rocas de apariencia de alto grado de metamorfismo, facies granulita, debido a la alteración superficial de gran parte de los componentes. La estructura néisica es desarrollada gracias a metamorfismo dinamotérmico a partir de una roca granítica.	4	Rocas de alto grado de metamorfismo, y de alteración, con alto grado de meteorización y desarrollo de suelos residuales, susceptibles de movimientos en masa.

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

En la Figura 5-207 se muestra que el 55,5% del área de inlfuencia se ubica en rocas de alta susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa y procesos erosivos; estas áreas de alta susceptibilidad se identifican en terrenos con coberturas de depósitos coluviales, coluvio aluviales, aluviales, Esquistos cuarzo sericíticos (Pzes), Esquistos Verdes (Pev), Granito Néisico de Palmitas (Pgnp) y Gabros de Romeral (Jgr).

El 24,5% es de susceptibilidad moderada, se presenta en rocas sedimentarias de la Formación Amagá y rocas intrusivas como Diorita de Altavista y Diorita de Heliconia. Las rocas de baja susceptibilidad (20,0%) corresponden a rocas volcánicas del Complejo Quebradagrande.

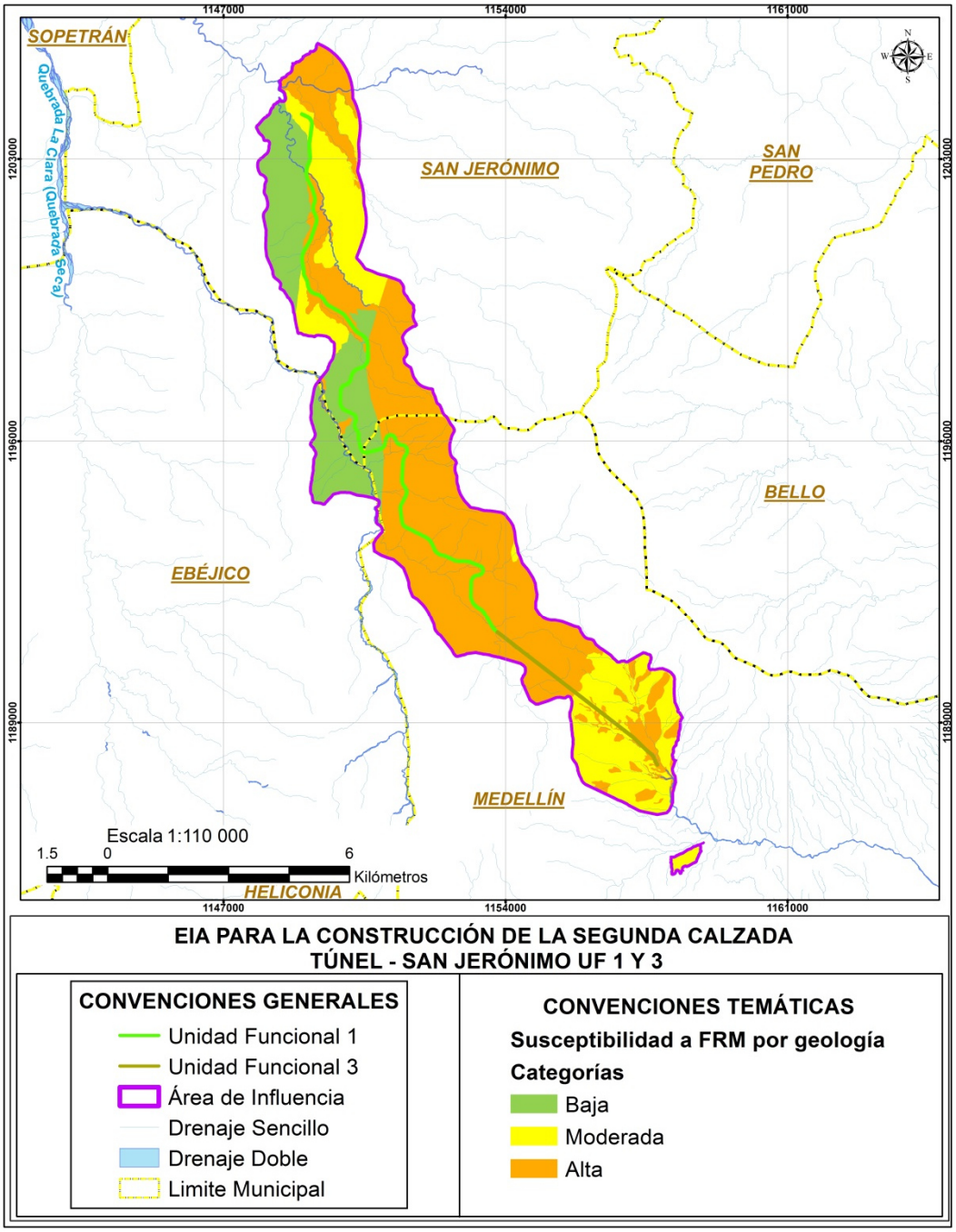
Figura 5-207 Susceptibilidad por litología



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

En la Figura 5-208 se presenta el mapa de susceptibilidad a los procesos erosivos y los procesos de remoción en masa para el área de influencia de acuerdo a la sectorización por litología.

Figura 5-208 Mapa de susceptibilidad por litología



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

5.1.9.2.3 Geomorfología (SG)

La calificación de susceptibilidad para las diferentes unidades geomorfológicas, se infiere

sobre la base de dos factores que favorecen la remoción, los cuales corresponden a la topografía, entendida como la pendiente del terreno y los aspectos edáficos, representados por los procesos erosivos de los suelos, que se presentan de forma generalizada o focalizada.
La remoción en masa incluye de forma integral un conjunto de factores adicionales que favorecen su generación, los cuales están relacionados con la naturaleza de los materiales, clima y vegetación; no son tenidos en cuenta para esta calificación de susceptibilidad desde esta perspectiva, pero implícitamente son evaluados desde otras temáticas que entran en concurso para la zonificación.

Con base en lo anterior y sobre la base de los dos factores caracterizados en las unidades geomorfológicas (pendiente del terreno y erosión), se estableció la susceptibilidad del área de influencia frente a los procesos de remoción en masa.

Las unidades geomorfológicas calificadas de mayor susceptibilidad a movimientos en masa, corresponden a laderas y coluvios de remoción en paisajes de montañas, asociadas a potenciales deslizamientos. Las unidades geomorfológicas de susceptibilidad moderada están asociadas a paisajes lomeríos y laderas de paisajes de piedemonte, y a vegas inundables de los ríos de piedemonte, asociados a socavación de orillas. Las unidades geomorfológicas de baja a muy baja susceptibilidad son valles estrechos aluviales y coluvio aluviales y niveles de terrazas, en las diferentes unidades de paisaje delimitadas.

En la Tabla 5-123 se presenta la calificación de susceptibilidad a procesos erosivos y de remoción en masa, de acuerdo con las unidades geomorfológicas en el área de influencia.

Tabla 5-123 Valores de susceptibilidad por geomorfología

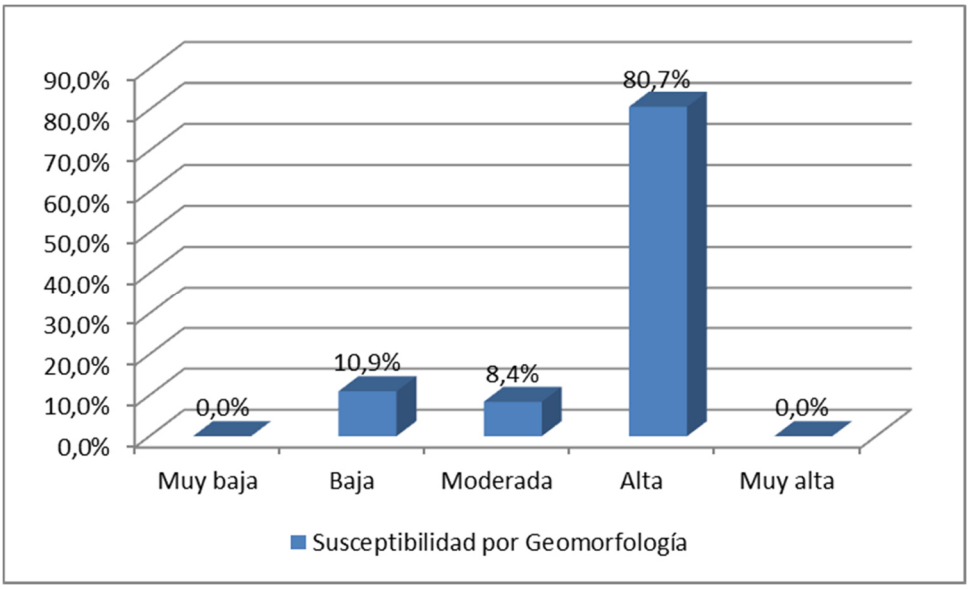
Símbolo	Unidad geomorfológica/ Subunidad geomorfológica	Componente geomorfológico	Peso
Dl	Montañas denudativas/Filas y vigas	Laderas	4
Dve		Valles estrechos aluviales y/o coluvio aluviales	2
Dcr		Coluvios de remoción	4
Dll		Lleno antrópico	4
DSl	Montañas denudativas estructurales/ Filas y vigas	Laderas	4
DSve		Valles estrechos aluviales y/o coluvio aluviales	2
DScr		Coluvios de remoción	4
DSll		Lleno antrópico	4
SDcr	Montañas estructurales denudativas/ Espinazos	Coluvios de remoción	4
SDle		Ladera estructural	4
SDve		Valles estrechos aluviales y/o coluvio aluviales	2
DSlo	Piedemonte/ Lomas y colinas	Lomerío	3
FAaa	Piedemonte/ Abanicos aluviales	Cuerpo y base de abanico aluvial	2
FAat		Abanico terraza	2
Ccc	Piedemonte/ coluvios de remoción	Cono coluvial	3

Símbolo	Unidad geomorfológica/ Subunidad geomorfológica	Componente geomorfológico	Peso
Fve	Piedemonte/ Valle aluvial	Valle estrecho aluvial	2

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

La Figura 5-209 muestra que el 80,7% del área de influencia se localiza en terrenos de alta susceptibilidad movimientos en masa, por la variable de Geomorfología, cuyas unidades geomorfológicas son laderas y coluvios de remoción de montañas denudativas (Dl, Dcr), laderas y coluvios de remoción de Montañas denudativas estructurales (DSl, DScr), laderas estructurales y coluvios de remoción de Montañas estructurales denudativas (SDle, SDcr). El 10,9% es de susceptibilidad baja y corresponde a Valles estrechos aluviales y/o coluvio aluviales (SDve, Dve, DSve), Valles estrechos aluviales (Fve) y Abanicos aluviales (FAaa,FAat). El 8,4% es de susceptibilidad moderada y corresponde a Coluvios de remoción de Piedemonte (Ccc) y lomas y colinas de Piedemonte (DSlo).

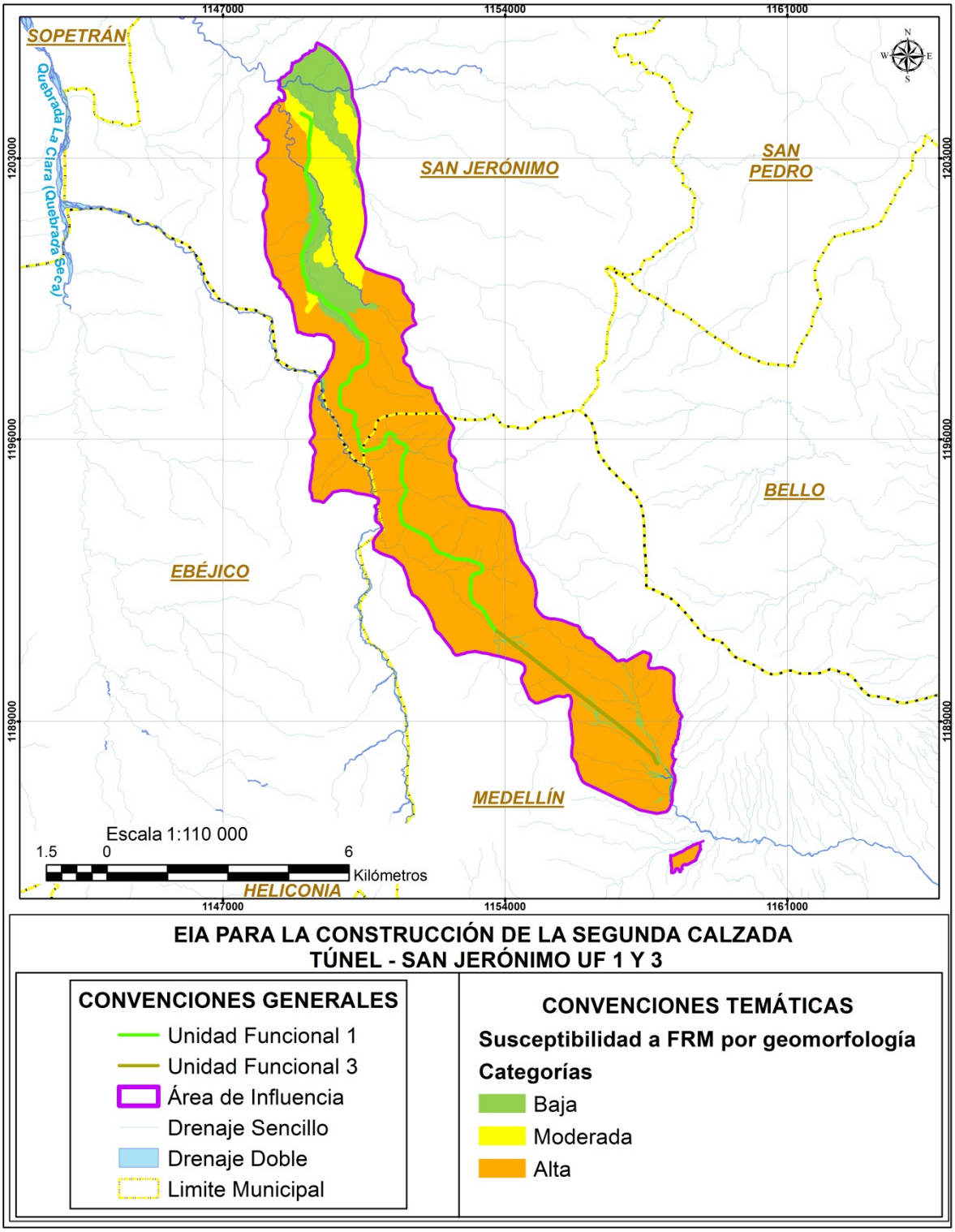
Figura 5-209 Susceptibilidad por geomorfologia



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

En la Figura 5-210 se presenta el mapa de susceptibilidad a los procesos erosivos y los procesos de remoción en masa para el área de influencia de acuerdo a la sectorización por geomorfología. En esta figura se identifica las unidades de Montañas son las valoradas de alta susceptibilidad a movimientos en masa, y las unidades de Piedemonte varían entre susceptibilidad moderada y baja.

Figura 5-210 Mapa de susceptibilidad por geomorfología



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

5.1.9.2.4 Hidrogeología (SH)

Las diferentes unidades litológicas se agrupan conformando unidades hidrogeológicas de acuerdo con su productividad, capacidad para almacenar y transmitir aguas subterráneas y valorar la posible afectación del recurso hídrico subterráneo, frente a las actividades que se deriven de la construcción y operación de la via. De acuerdo con la clasificación de las unidades litológicas frente al comportamiento hidrogeológico, se consideran los siguientes tipos:

- Acuíferos: Estrato o formación geológica que permite el almacenamiento y circulación del agua por sus poros y/o grietas. Dentro de estas formaciones podemos encontrar materiales muy variados como gravas, calizas fracturadas, areniscas porosas, arenas de playa, algunas formaciones volcánicas. Estas unidades son económicamente explotables.

- Acuicludos: Formación geológica que conteniendo agua en su interior incluso hasta la saturación, no la transmite y por lo tanto no es posible su explotación. Se pueden citar como ejemplos los depósitos de arcillas de cualquier origen.

- Acuitardos: Formación geológica que conteniendo apreciables cantidades de agua la transmiten muy lentamente, por lo que no son aptos para el emplazamiento de captaciones de aguas subterráneas, pero sin embargo, bajo condiciones especiales permiten una recarga vertical de otros acuíferos, que puede llegar a ser muy importante en ciertos casos.

- Acuifugos: Aquellas formaciones geológicas que no contienen agua ni la pueden transmitir, como por ejemplo un macizo granítico que no esté fisurado o unas rocas metamórficas sin meteorización ni fracturación, estos se consideran impermeables.

Tabla 5-124 Valores de susceptibilidad por hidrogeología

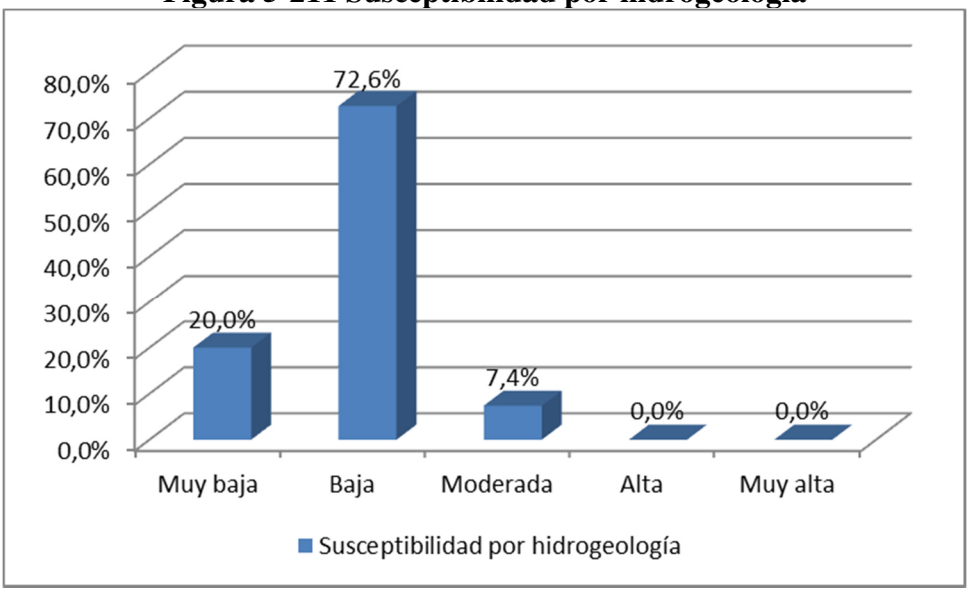
Unidad Cartográfica de Parámetro (UCP)		Peso
Acuíferos con porosidad primaria de Mediana productividad, capacidad específica entre 1,0 y 2,0 l/s/m	Qal (Depósitos Aluviales)	4
Acuíferos con porosidad primaria, Acuíferos de Baja productividad, capacidad específica entre 0,05 y 1,0 l/s/m	Lleno antropico (Qll)	3
	Depósitos Coluvioaluviales (Qcal)	
	Terrazas aluviales (Qt0, Qt1)	
	Depósitos de derrubio (Qd)	
Sedimentos y rocas con limitados recursos de agua subterránea, Acuíferos con muy baja productividad, capacidad específica promedio menor a 0,05 l/s/m, su comportamiento se correlaciona con un **Acuitardo**	Miembro Superior, Formación Amaga (Ngas)	1
	Miembro Medio, Formación Amaga (Pgam)	
	Miembro Inferior, Formación Amaga (Pgai)	
Sedimentos y rocas con limitados recursos de agua subterránea, Acuíferos con muy baja productividad, capacidad específica promedio menor a 0,05 l/s/m, su comportamiento se correlaciona con un **Acuifugo**	Diorita de Heliconia-diorita hornbléndica (Kdhb)	2
	Batolito de Altavista (Kida)	
	Complejo Quebradagrande, Miembro volcánico (KvQG)	
	Gabros de Romeral (Jgr)	
	Grupo Ayurá Montebello (Pzes- Pev)	

Unidad Cartográfica de Parámetro (UCP)		Peso
	Granito néisico de Palmitas (Pgnp)	

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

En la Figura 5-211 se muestra que susceptibilidad por movimientos en masa por la variable hidrogeología, tiene baja influencia en el área de estudio. El 72,6% es de baja susceptibilidad y corresponde a acuíferos por fractura y acuíferos por porosidad primaria con baja productividad; el 20,0% es de muy baja susceptibilidad y corresponde a acuitardos. El 7,4% es de susceptibilidad moderada, corresponde a acuíferos por fractura con zona de recarga.

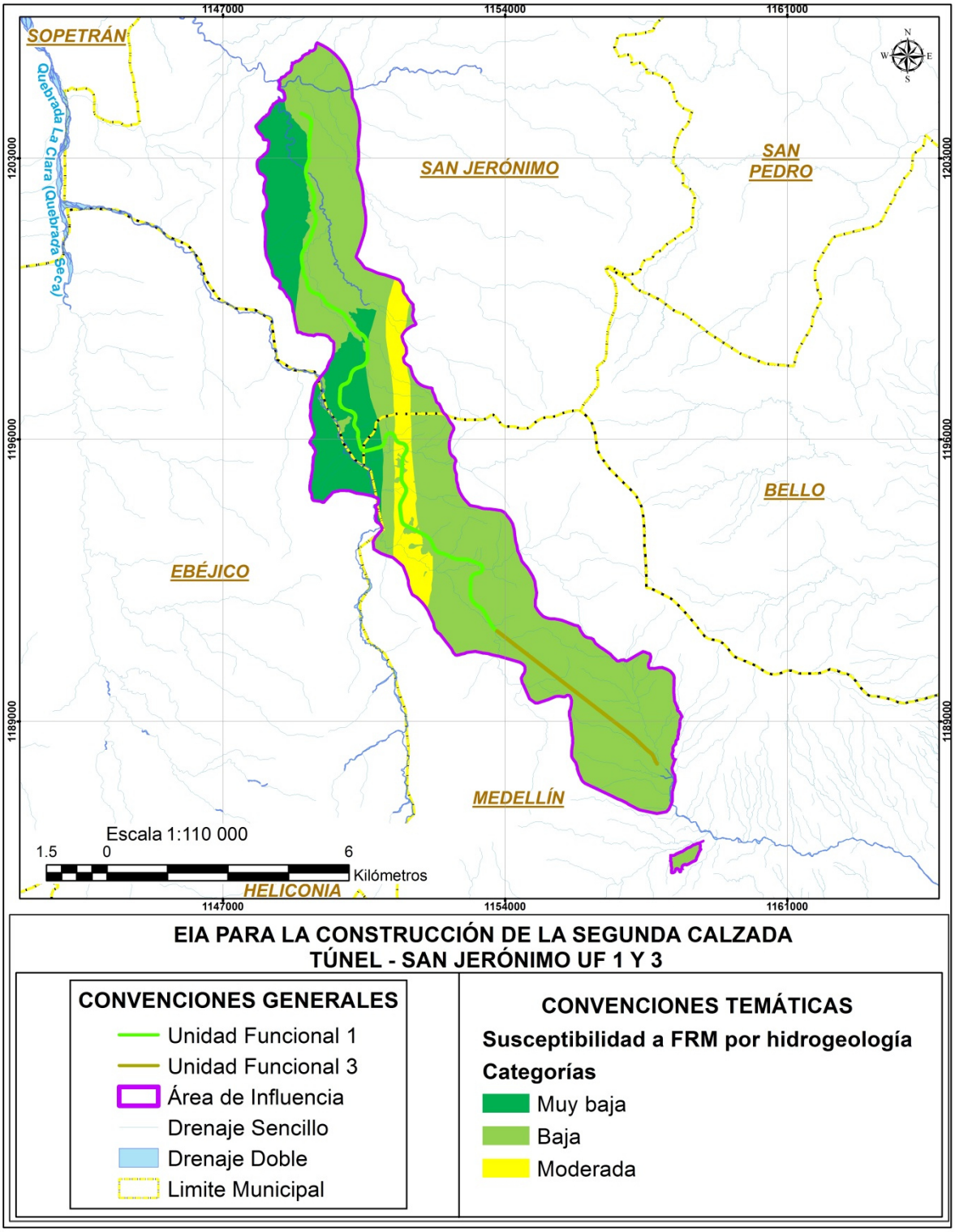
Figura 5-211 Susceptibilidad por hidrogeología



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

En la Figura 5-212 se presenta el mapa de susceptibilidad a los procesos erosivos y los procesos de remoción en masa para el área de influencia de acuerdo con la variable hidrogeología.

Figura 5-212 Mapa de susceptibilidad por hidrogeología



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

5.1.9.2.5 Cobertura de la tierra (SC)

Las coberturas vegetales son elementos naturales de protección del suelo contra la erosión; según Roldan (2.005; citado por Lianes, 2.008), la vegetación juega un papel muy importante en el proceso de erosión hídrica, pues controla la energía de las gotas de lluvia, mejora la capacidad de infiltración del suelo y disminuye la escorrentía. Los componentes aéreos como hojas y tallos, absorben parte de la energía de las gotas de lluvia, del agua en movimiento y del viento, de esta manera, su efecto es menor que si actuaran directamente sobre el suelo.

De igual forma, los componentes subterráneos, como los sistemas radiculares, contribuyen a la resistencia mecánica del suelo (Morgan, 1.997; citado por Lianes, 2.008); de este modo, la cantidad y calidad de la cobertura vegetal (protección vertical) disminuye notablemente los procesos erosivos (Marchamalo, 2.004; citado por Lianes, 2.008).

Por lo anterior, zonas que presentan coberturas de bosque, vegetación secundaria alta y baja, arbustal denso, y plantación forestal muestran más estabilidad del relieve y menor susceptibilidad a procesos erosivos y de remoción en masa, que otras coberturas como pastos, cultivos o mosaicos de cultivos, que dadas las inadecuadas prácticas agropecuarias, dadas por remoción y labranza continua del suelo no cuentan con una vegetación o es muy débil que sirva de capa protectora o amortiguadora entre la atmosfera y el suelo.

Tabla 5-125 Valores de susceptibilidad por cobertura de la tierra

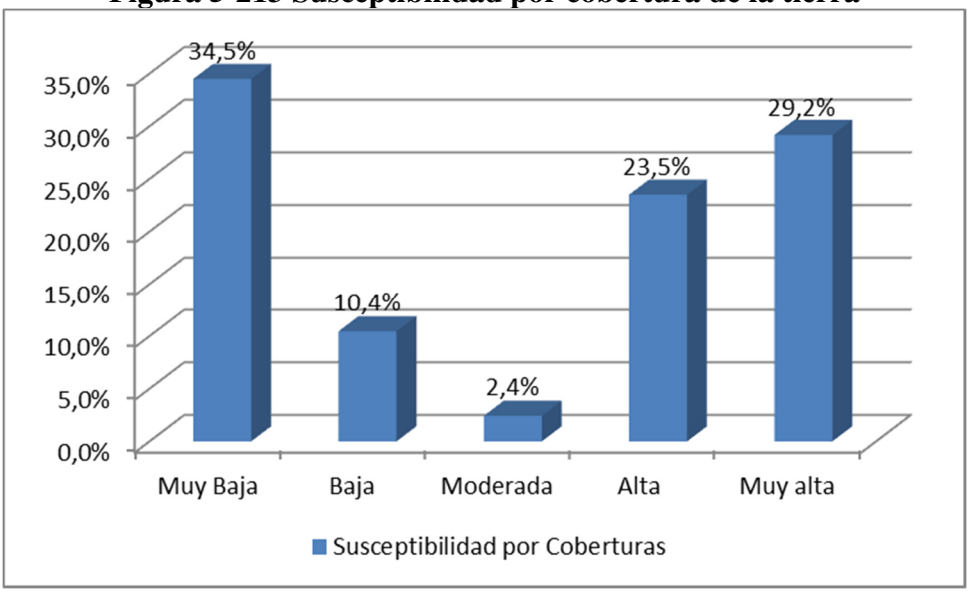
Código	Símbolo	Unidad Cartográfica de Parámetro (UCP)	Peso
3132	Bf	Bosque fragmentado con vegetación secundaria	1
314	Bgra	Bosque de galería	1
3231	Vsa	Vegetación secundaria alta	1
3232	Vsb	Vegetación secundaria baja	1
511	Ríos	Ríos	1
514	Caa	Cuerpos de agua artificiales	1
111	Tuc	Tejido urbano continuo	2
112	Tud	Tejido urbano discontinuo	2
1131	Vrd	Vivienda rural dispersa	2
1132	Vrn	Vivienda rural nucleada	2
315	Pf	Plantación forestal	2
32211	Ada	Arbustal denso alto	2
122111	Vía	Vía pavimentada	3
1311	Oem	Otras explotaciones mineras	3
2441	Mpea	Mosaico de pastos con espacios naturales arbóreos	3

Código	Símbolo	Unidad Cartográfica de Parámetro (UCP)	Peso
2451	Mcea	Mosaico de cultivos con espacios naturales arbóreos	3
2452	Mcear	Mosaico de cultivos con espacios naturales arbustivos	3
321113	Hd	Herbazal denso de tierra firme con arbustos	3
232	Pa	Pastos arbolados	4
233	Pe	Pastos enmalezados	4
243	Mcpe	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	4
2442	Mpear	Mosaico de pastos con espacios naturales arbustivos	4
3332	Rm	Remoción en masa	5
231	Pl	Pastos limpios	5
241	Mc	Mosaico de cultivos	5
242	Mpc	Mosaico de pastos y cultivos	5
214		Hortalizas	4

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

La Figura 5-213 muestra que el el 34,5% es de susceptibilidad muy baja y el 10,4% de baja susceptibilidad. El 29,2% y 23,5% son de muy alta y alta susceptiblidad, respectivamente.

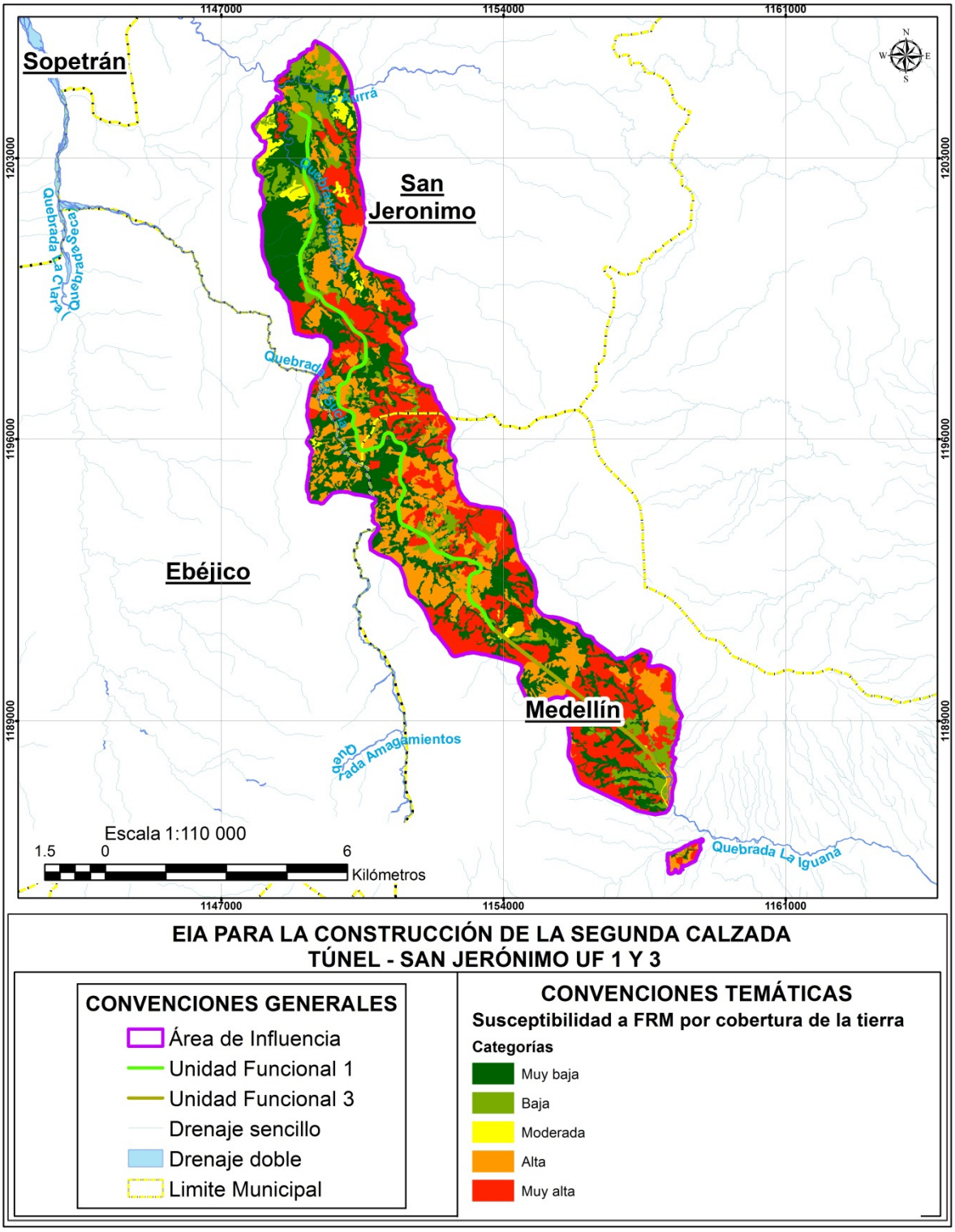
Figura 5-213 Susceptibilidad por cobertura de la tierra



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

En la Figura 5-214 se presenta el mapa de susceptibilidad a los procesos erosivos y procesos de remoción en masa para el área de influencia de acuerdo a la sectorización por cobertura de la tierra.

Figura 5-214 Mapa de susceptibilidad por cobertura de la tierra



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

5.1.9.2.6 Densidad de drenajes (SD)

El cálculo de densidad de drenaje se realizó mediante el procesamiento de la red de drenaje en SIG; se hizo el cálculo de la densidad de drenajes por unidad de área (m/m²), estableciendo un radio de influencia de 1000m. El resultado de esta operación permitió clasificar cada punto del mapa dentro de cinco categorías de la siguiente manera (ver Tabla 5-126).

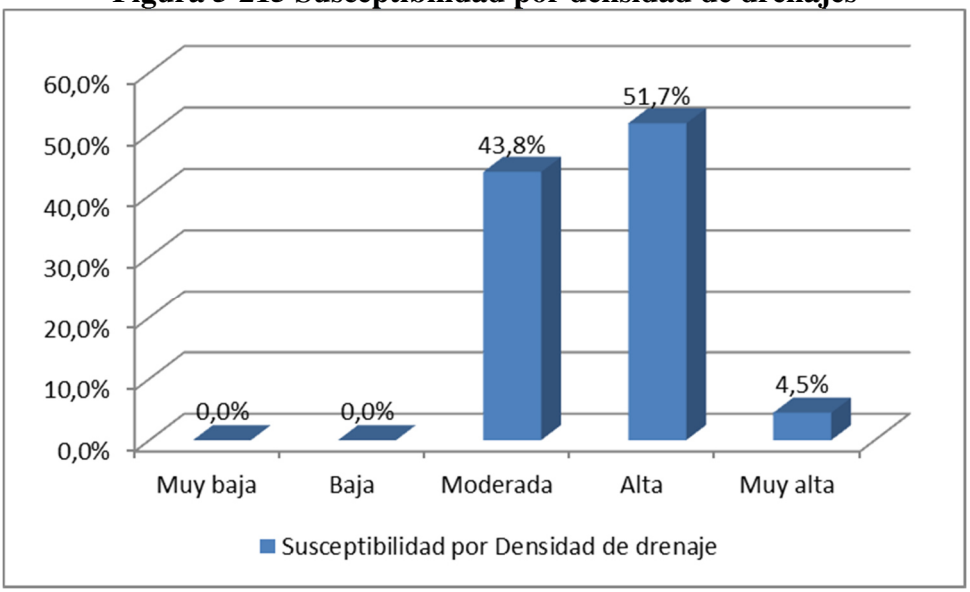
Tabla 5-126 Valores de susceptibilidad por densidad de drenajes

Unidad Cartográfica de Parámetro (UCP) (m/m²)	Peso
0 – 0,002	1
0,002 – 0,003	2
0,003 – 0,005	3
0,005 – 0,007	4
0,007 – 0,008236	5

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

En la Figura 5-215 se muestra que el 51,7% del área de influencia presenta alta susceptibilidad a fenómenos de remoción por densidad de drenajes, el 43,8% es de susceptibilidad moderada y el 4,5% de susceptibilidad muy alta.

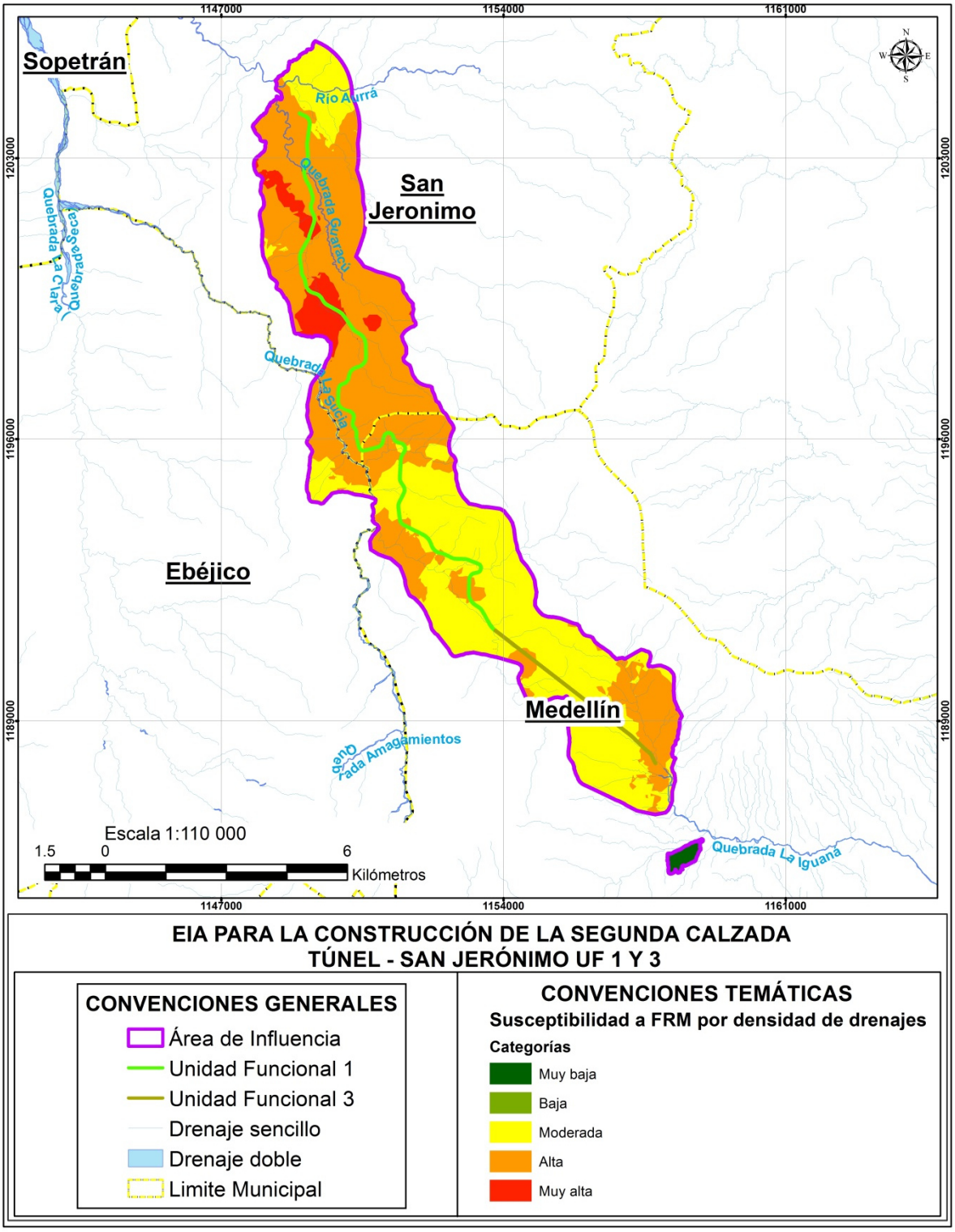
Figura 5-215 Susceptibilidad por densidad de drenajes



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

En la Figura 5-216 se presenta el mapa de susceptibilidad a los procesos erosivos y los procesos de remoción en masas para el área de influencia de acuerdo a la sectorización por densidad de drenajes.

Figura 5-216 Mapa de susceptibilidad por densidad de drenajes



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

5.1.9.2.7 Densidad de Fallas (SF)

El estado de fracturación de las rocas depende de la presencia y magnitud de las fallas geológicas, fracturas y sistemas de diaclasamiento, las cuales permiten en los macizos rocosos el desarrollo de procesos de meteorización de las rocas, y desarrollo de zonas de debilidad de las mismas, que las hacen más susceptibles a fallamiento e inestabilización del terreno. Para la calificación en el análisis de susceptibilidad se consideraron los rasgos estructurales que afectan la zona de estudio reportados en la cartografía de INGEOMINAS y en la cartografía de U.S. Geological Survey (USGS).
La calificación se estableció dando el valor de baja susceptibilidad a rasgos estructurales identificados como inciertos o cubiertos, susceptibilidad moderada para estructuras inferidas y susceptibilidad alta para las estructuras identificadas como definidas. En la Tabla 5-127 se muestra las calificaciones dadas a las respectivas tipos de fallas.

Tabla 5-127 Ponderación de fallas según su tipo

Tipo de fallas	Ponderación
Falla cubierta	2
Falla definida	4
Falla inferida	3
Falla inversa o de cabalgamiento definida	4
Falla inversa o de cabalgamiento inferida	3
Lineamiento fotogeológico	2

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

Posteriormente, mediante el procesamiento de la información en SIG se hizo el cálculo de la densidad de fallas por unidad de área (m/m²), estableciendo un radio de influencia de 1 km. El resultado de esta operación permitió clasificar cada punto del mapa dentro de cinco categorías de la siguiente manera.

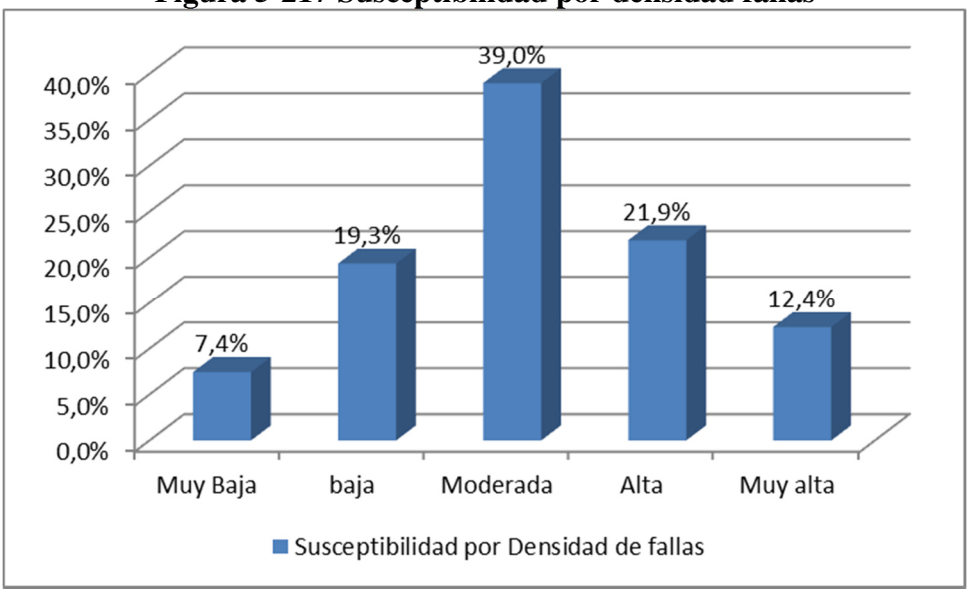
Tabla 5-128 Valores de susceptibilidad por densidad de fallas

Unidad Cartográfica de Parámetro (UCP) (m/m²)	Peso
0 - 0,000699	1
0,000699 - 0,002423	2
0,002423 - 0,004799	3
0,004799 - 0,008015	4
0,008015 - 0,011836	5

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

En la Figura 5-217 Susceptibilidad por densidad fallas se muestra que el 39,0% del área de inlfuencia se encuentra en áreas de susceptibilidad moderada a fenómenos de remoción en masa por esta variable, 21,9% se ubica en áreas de alta susceptbilidad, el 12,4% es de muy alta susceptibilidad y el 7,4% en áreas de muy baja susceptibilidad.

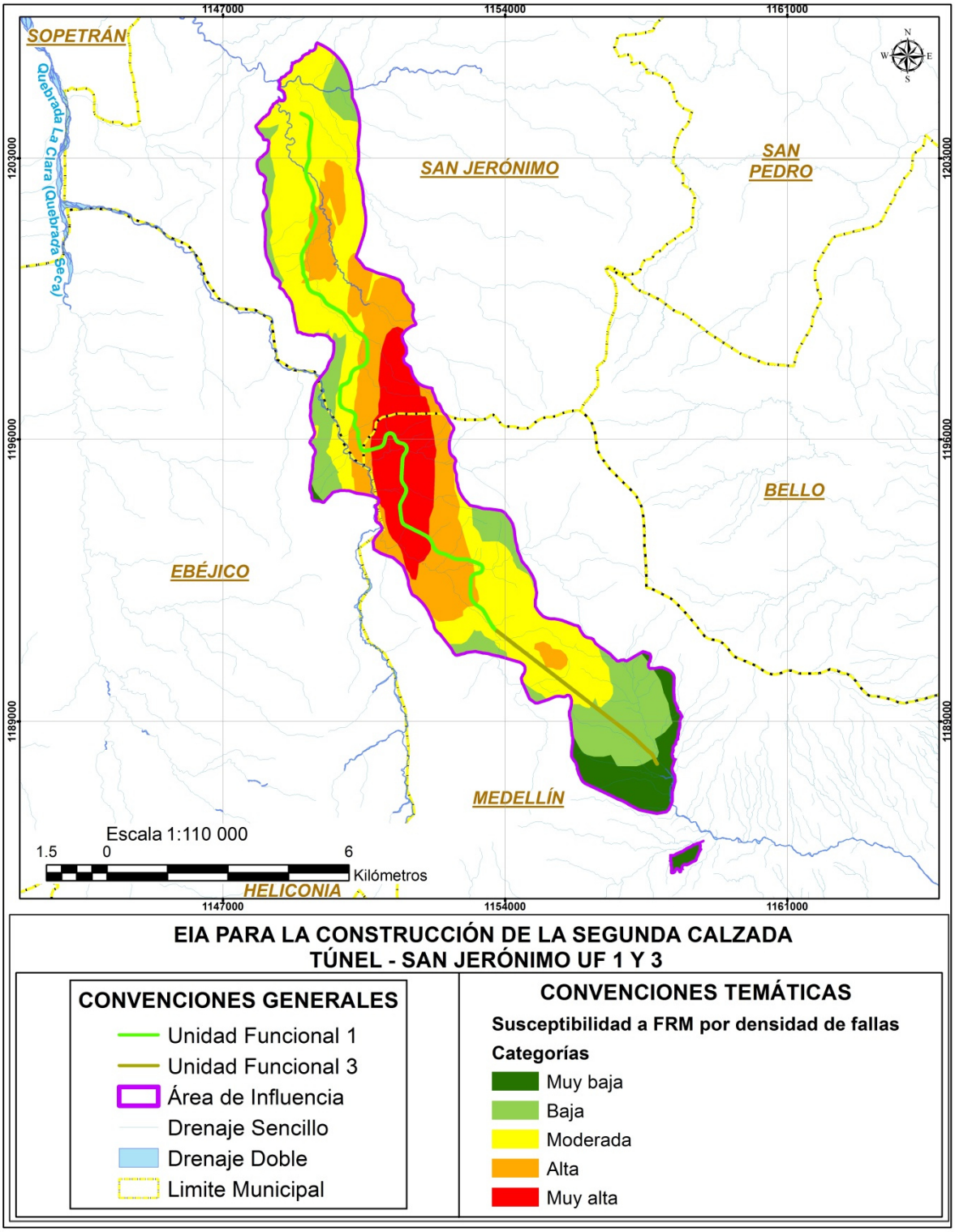
Figura 5-217 Susceptibilidad por densidad fallas



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

En la Figura 5-218 se presenta el mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa por la variable densidad de fallas; el área de mayor susceptibilidad de esta variable, se concentra en la zona de fallas San Jerónimo – La Sucia.

Figura 5-218 Mapa de susceptibilidad por densidad de fallas



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

5.1.9.2.8 Pendientes (SP)

El grado de inclinación de las laderas naturales, favorece o disminuye la resistencia al corte de los diferentes materiales que conforman los taludes sobre el área de influencia. Se establecieron cinco categorías, donde a las pendientes escarpadas y muy escarpadas se les asignó el peso más alto, mientras que a los terrenos ligeramente planos y planos se les asignó el peso más bajo.

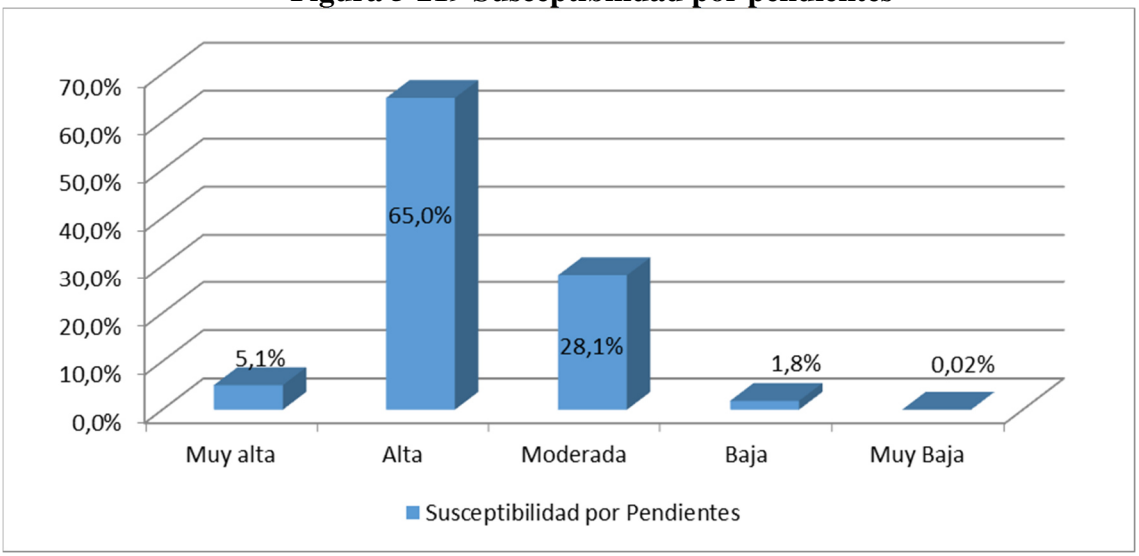
Tabla 5-129 Valores de susceptibilidad por pendientes

Unidad Cartográfica de Parámetro		Peso
0-1%	Plano	1
1-3%	Plano a Ligeramente Plano	1
3-7%	Ligeramente Inclinado	2
7 -12%	Moderadamente Inclinado	3
12 - 25%	Fuertemente Inclinado	3
25 -50%	Ligeramente Escarpado o Ligeramente Empinado	4
50-75%	Moderadamente Escarpado o Moderadamente Empinado	4
75-100%	Fuertemente escarpada o fuertemente empinada	5

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2015

En la Figura 5-219 muestra que el 65,0% del AII es de alta susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa (pendientes entre 25-75%), el 28,1% es de susceptibilidad moderada (pendientes entre 7-25%), el 5,1% es de muy alta susceptibilidad (pendientes >75%) y el 1,82% de baja y muy baja susceptibilidad ((pendientes <7%).

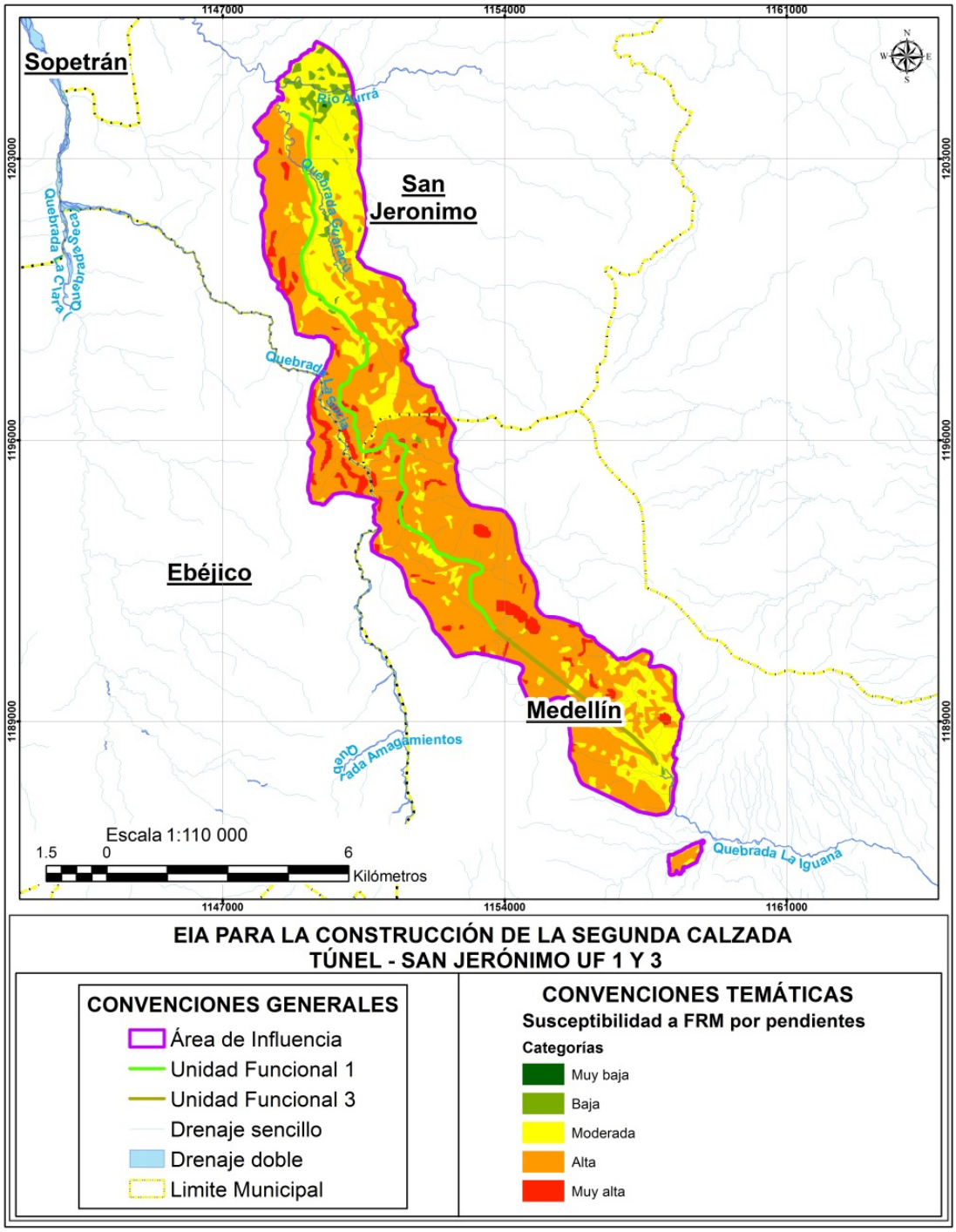
Figura 5-219 Susceptibilidad por pendientes



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

En la Figura 5-220 se presenta el mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa de acuerdo con la sectorización por pendientes.

Figura 5-220 Mapa de susceptibilidad por pendientes



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

5.1.9.2.9 Morfodinámica (SE)

Mediante la interpretación de ortofotomapa (2015) y trabajo de campo, se realizó la cartografía de procesos erosivos y fenómenos de remoción en masa; esto permitió establecer áreas y tipos de procesos erosivos que caracterizan el área de influencia; la Unidad Funcional 3 se trabajó con imágenes Google earth (2012-2015). Para la evaluación de morfodinámica se tuvieron en cuenta los siguientes criterios:

- Interpretación de ortofotomapa (2015)

- Trabajo de campo. Se hicieron recorridos de campo en el área de influencia y se obtuvo un inventario de procesos morfodinámicos, debidamente georreferenciados.

- Para la cartografía de los procesos erosivos asociados a sobrepastoreo (pisadas de ganado), suelos desnudos, deslizamientos activos y cicatrices de deslizamientos, se obtuvieron unidades de área. A los procesos erosivos cartografiados como surcos y cárcavas, se les aplicó un buffer de 20m, que corresponde a la esetimación de áreas potencialmente afectadas por estos procesos morfodinámicos.

Los procesos erosivos de mayor afectación son deslizamientos activos y cicatrices de deslizamientos, en paisajes de montaña y en el piedemonte disminuyen estos fenómenos de remoción en masa y se presentan en mayor proporción la erosión en patas de vaca. Los procesos morfodinámicos cartografiados se evaluaron como se observa en la Tabla 5-130.

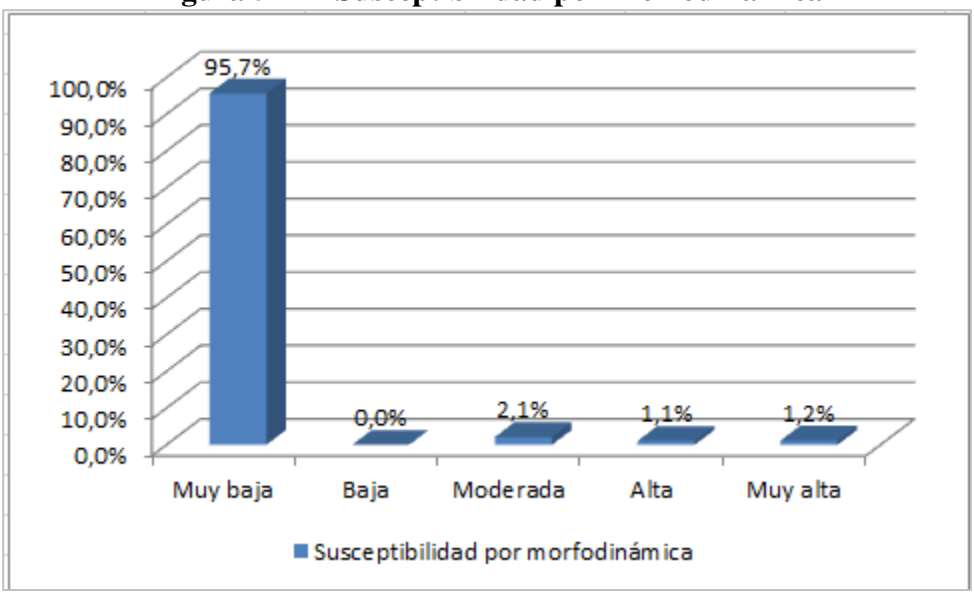
Tabla 5-130 Susceptibilidad de procesos morfodinámicos

Procesos erosivos y/o fenómenos de remoción en masa	Peso
Deslizamiento activo	5
Cicatriz de deslizamiento	4
Erosión en surcos grado moderado	4
Erosión en surcos grado severo	5
Erosión en cárcavas grado moderado	4
Erosión en cárcavas grado severo	5
Sobrepastoreo (patas de vaca) grado moderado	3
Sobrepastoreo (patas de vaca) grado severo	5

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

En la Figura 5-221 se muestra que el 95,7% del área de estudio es de muy baja susceptibilidad por influencia de procesos morfodinámicos; el 1,2% es muy alta , el 1,1% alta y el 2,1% moderada.

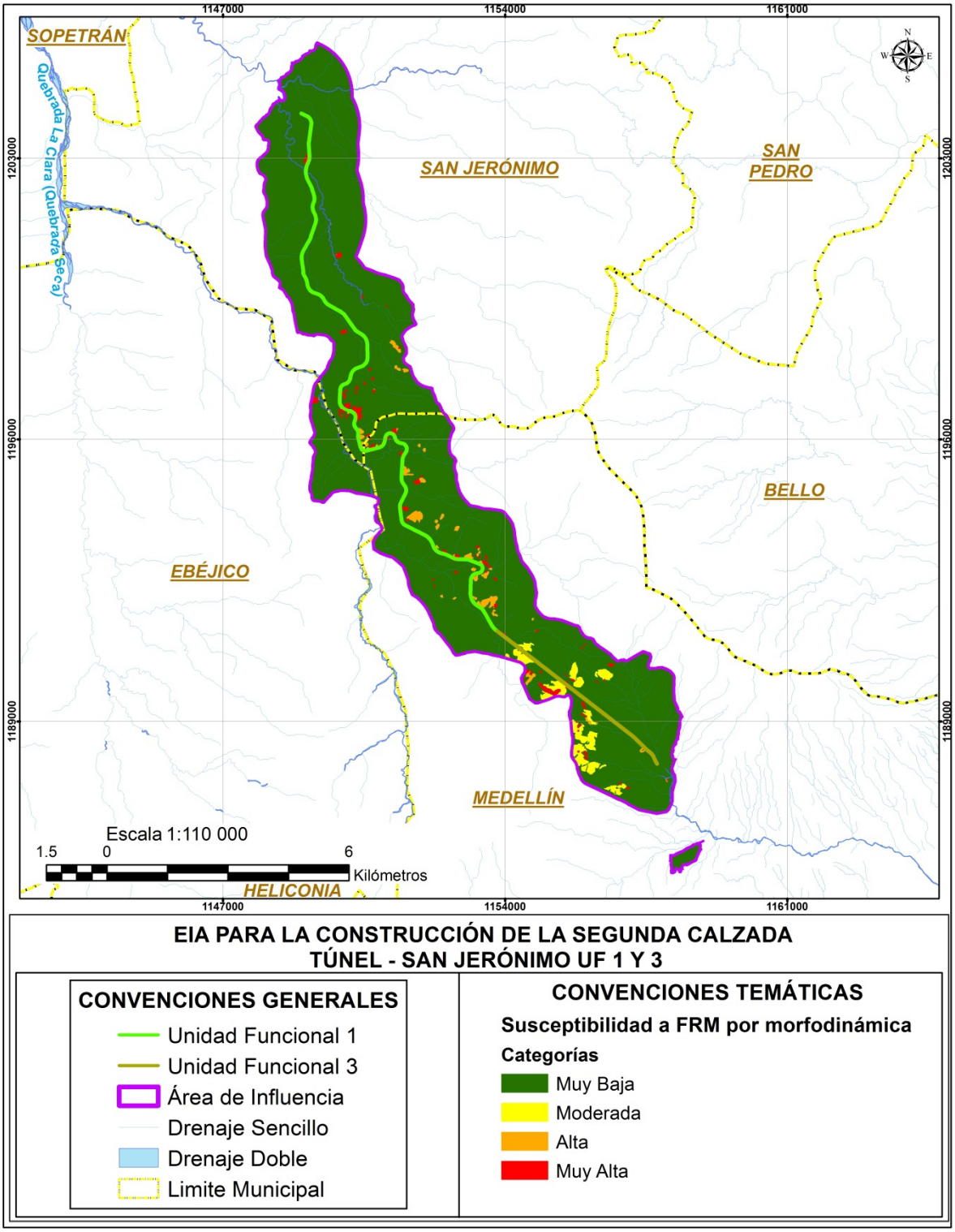
Figura 5-221 Susceptibilidad por Morfodinámica



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

En la Figura 5-222 se presenta el mapa de susceptibilidad a los procesos erosivos y los procesos de remoción en masa para el área de influencia de acuerdo a la sectorización por morfodinámica.

Figura 5-222 Mapa de susceptibilidad por Morfodinámica



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

5.1.9.2.9.1 Susceptibilidad General del Terreno (ST)

Durante el proceso de evaluación de la amenaza por procesos erosivos y de remoción en masa, se elaboró un mapa de susceptibilidad general del terreno mediante un análisis estadístico multivariado (Sistema de Evaluación Numérica), en el cual son sumados digitalmente los ocho mapas de susceptibilidad (Superposición de Mapas e Integración Espacial de Información), que representan los factores intrínsecos que condicionan la generación y reactivación de estos procesos. Este procedimiento se realizó utilizando el SIG ArcGis10, así:

$$ST = SL + SG + SH + SC + SD + SF + SP + SE$$

Dónde:
ST = Susceptibilidad del terreno a los procesos erosivos y de remoción en masa.
SL = Susceptibilidad del parámetro litología.
SG = Susceptibilidad del parámetro geomorfología.
SH = Susceptibilidad del parámetro hidrogeología.
SC = Susceptibilidad del parámetro cobertura de la tierra.
SD = Susceptibilidad del parámetro densidad de drenajes.
SF = Susceptibilidad del parámetro densidad de fallas.
SP = Susceptibilidad del parámetro pendiente.
SE = Susceptibilidad del parámetro morfodinámica.

Teniendo en cuenta que existen ocho variables de análisis, los valores sumatorios varían entre 12 y 28, por lo cual se establecen los siguientes intervalos para la categorización del mapa de susceptibilidad general del terreno a los procesos erosivos y de remoción en masa, como se muestra a continuación en la Tabla 5-131.

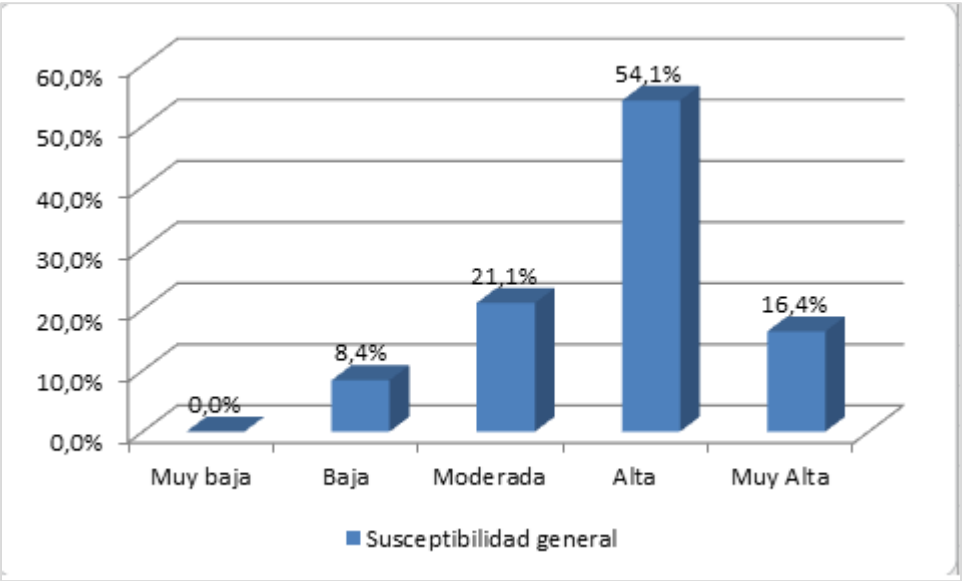
Tabla 5-131 Intervalos para categorizar la susceptibilidad general del terreno

Intervalos	Peso	Categorías de susceptibilidad
11 – 13	1	Muy Baja
14 – 17	2	Baja
18 – 19	3	Moderada
20 – 25	4	Alta
> 25	5	Muy Alta

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

En la Figura 5-223 se observa la distribución de las categorías de susceptibilidad general del terreno dentro del área de influencia. El 16,4% del área de influencia es de muy alta susceptibilidad a movimientos en masa y corresponde principalmente a las áreas de alta influencia estructural por efecto del paso de la Falla San Jerónimo y Falla Sucia. El 54,1% es de alta susceptibilidad.

Figura 5-223 Susceptibilidad general del terreno

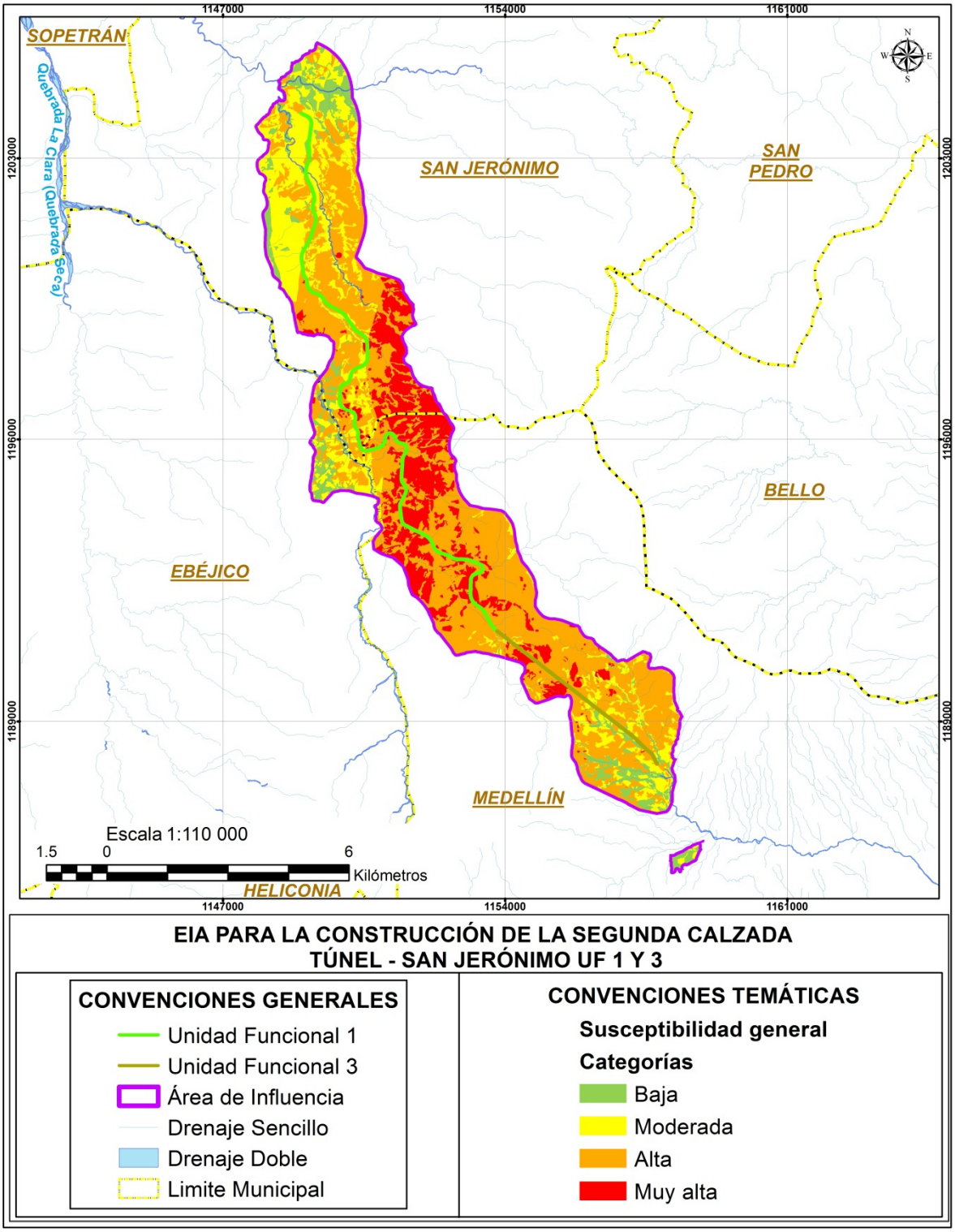


Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

En la Figura 5-224 se presenta el mapa de susceptibilidad general del terreno a procesos erosivos y de remoción en masa. Las áreas de muy alta susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa se concentran entre las abscisas K02+696 – K07+277 que comprende áreas de alta susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa por las variables litología, geomorfología, pendientes y alta a muy alta por la variable densidad de fallas.

De otra parte, dentro de categoría de alta susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa, se encuentra el sector de El Galpón (sector en movimiento activo del terreno), en la margen derecha de la quebrada La Negra, entre las abscisas K00+200 – K00+470 en el costado derecho de la vía existente.

Figura 5-224 Mapa de Susceptibilidad General del Terreno



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

5.1.9.2.9.2 Factores detonantes

Los factores desencadenantes o detonantes que se contemplaron en la ejecución del modelo son precipitación y sismicidad.

5.1.9.2.9.3 Precipitación (FP)

La precipitación, principalmente en periodos invernales, se define por su intensidad, duración y distribución espacial. La relación lluvia-deslizamiento varía de un sitio a otro dependiendo de las condiciones locales de la zona, como la humedad, el tipo y uso del suelo, y topografía, entre otros.

El componente de escorrentía de la precipitación, usualmente es considerado un agente de erosión superficial o de erosión lineal con formación de surcos y cárcavas. La escorrentía tiene un efecto importante en la movilización de los materiales arrancados por los deslizamientos someros y profundos y en la generación de deslizamientos en las márgenes de las corrientes, por erosión lateral y socavación de orillas, que aumenta el valor de sus pendientes hasta hacerlas inestables.

Teniendo en cuenta que para la zona de influencia del proyecto no existen datos de deslizamientos naturales relacionados con lluvias, el factor de precipitación se asignó de acuerdo con los valores del mapa de distribución de la precipitación, ver Tabla 5-132.

Tabla 5-132 Intervalos de categoría de precipitación

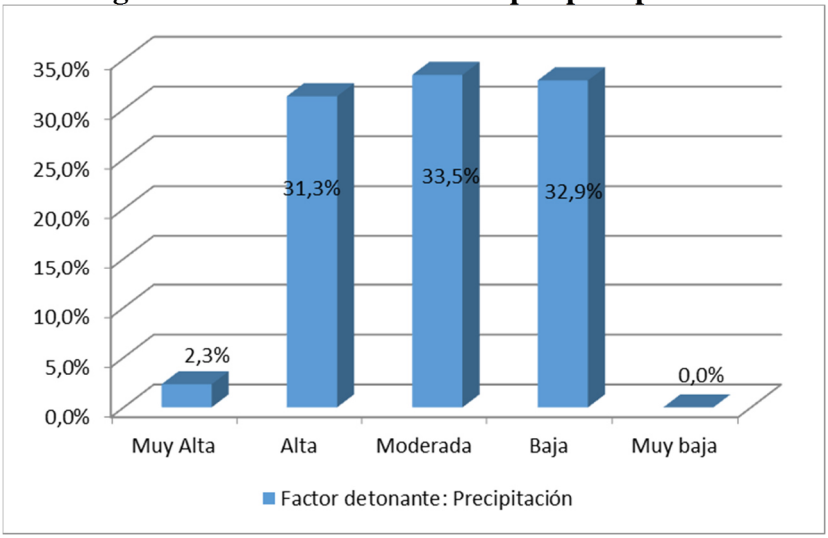
Rango de Precipitación(mm)	Categoría	Calificación
<1600	Muy Baja	1
1600 – 2000	Baja	2
2000 – 2200	Moderada	3
2200 – 2400	Alta	4
> 2400	Muy Alta	5

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

La Figura 5-225 y Figura 5-226 muestran la influencia de la precipitación con el 33,5% de susceptibilidad moderada, el 32,9% de susceptibiidad baja y el 31,3% de alta susceptibilidad a movimientos en masa.

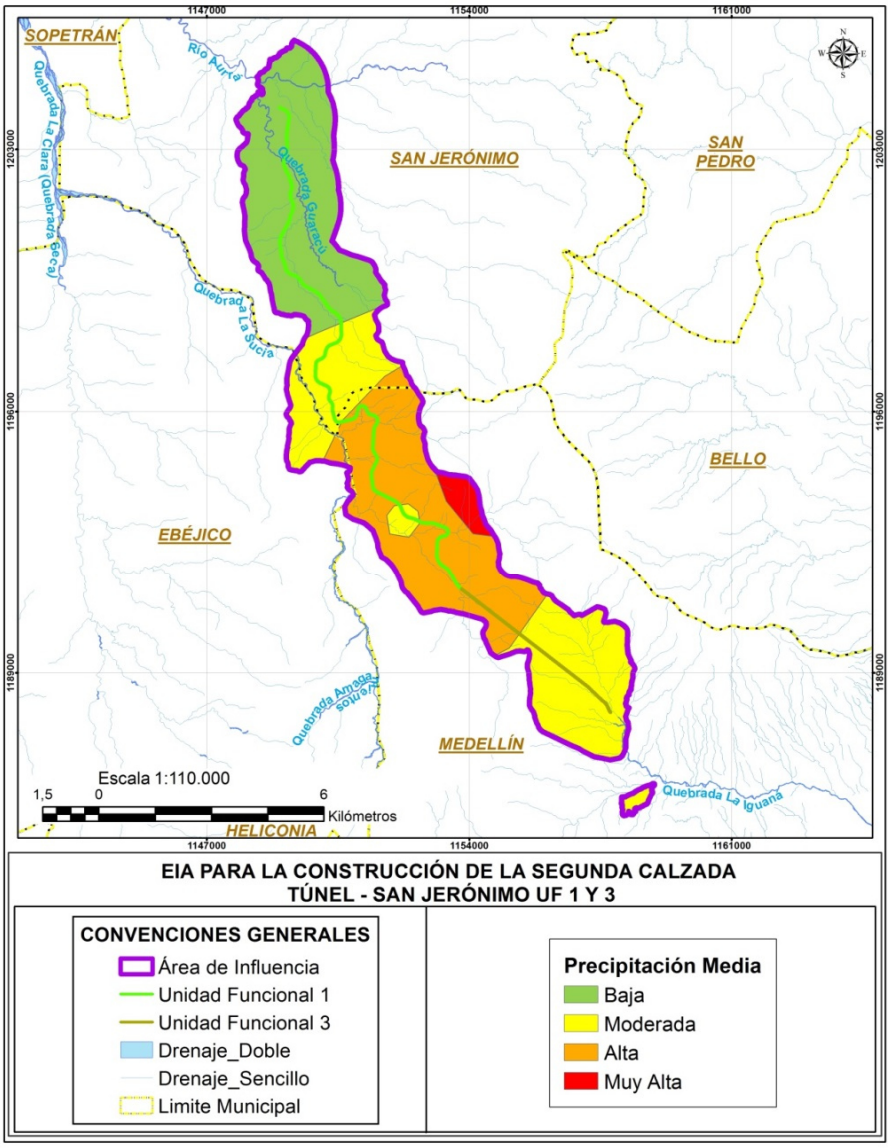
Dentro de categoría de alta susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa por precipitación, se encuentra el sector de El Galpón (sector en movimiento activo del terreno), en la margen derecha de la quebrada La Negra, entre las abscisas K00+200 – K00+470, en el costado derecho de la vía actual.

Figura 5-225 Factor detonante por precipitación



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

Figura 5-226 Factor detonante por precipitación



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

5.1.9.2.9.4 Sismicidad (FS)

El factor detonante por sismicidad se determinó con base en los resultados del Mapa de Amenaza Sísmica (INGEOMINAS & UNAL, 2010), el cual presenta una zonificación de la amenaza sísmica en términos de aceleración horizontal máxima en roca (PGA por sus siglas en ingles), que representa un modelo probabilístico para el movimiento del terreno que podría esperarse por la ocurrencia de sismos en Colombia. El Mapa de Amenaza Sísmica (INGEOMINAS & UNAL, 2010), considera valores de PGA (cm/s²) en un rango desde 50 – 250 PGA.

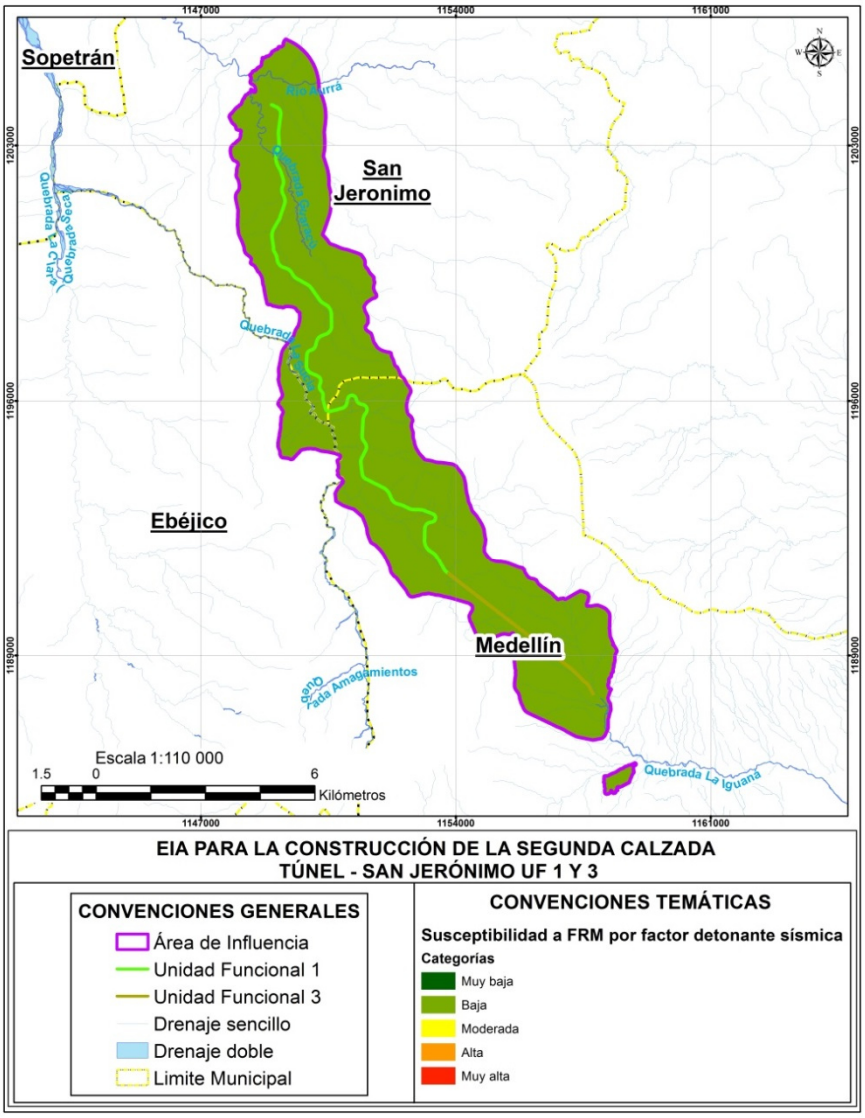
Tabla 5-133 Intervalos de categorías de sismicidad

Unidad Cartográfica de Parámetro (UCP)	Peso	Susceptibilidad
0 – 50 PGA (cm/s²)	1	Muy baja
50 – 100 PGA (cm/s²)	2	Baja
100 – 250 PGA (cm/s²)	3	Moderada
250 – 350 PGA (cm/s²)	4	Alta
>350 PGA (cm/s^2)	5	Muy alta

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2015

En la Figura 5-227 se muestra que la totalidad del área se ubica en el rango de 50-100 PGA, que corresponde a amenaza sísmica debajo grado.

Figura 5-227 Mapa de factor detonante por sismicidad



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

5.1.9.2.10 Amenaza geotécnica del terreno (ZG)

Con base en la interacción de los factores intrínsecos y los factores desencadenantes o detonantes que intervienen en la generación de los procesos de remoción en masa y procesos erosivos, se establece la amenaza relativa del terreno. Para la elaboración del mapa de amenaza relativa se emplearon como factores detonantes la precipitación y la amenaza sísmica, empleando el siguiente algoritmo:

$$ZG=ST * (FP + FS)$$

Donde:
ZG = Zonificación Geotécnica (Amenaza relativa del terreno por procesos erosivos y de remoción en masa).
ST = Susceptibilidad total del terreno a los procesos erosivos y de remoción en masa.
FP = Factor detonante por precipitación.
FS = Factor detonante por sismicidad.

La zonificación geotécnica del área de estudio se dividió en cinco categorías de amenaza (Tabla 5-134), que van desde muy alta a muy baja (IA, IB, II, IIIA y IIIB) y corresponden a la agrupación metodológica de zonas homogéneas de los factores de ponderación evaluados.

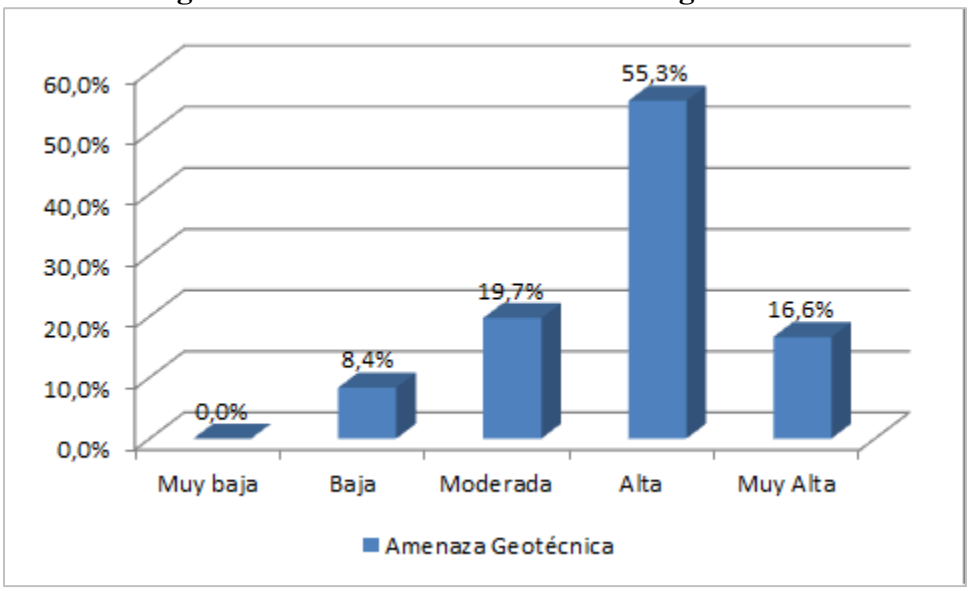
Tabla 5-134 Categorías para la zonificación geotécnica

Rangos de valores	Símbolo	Amenaza Relativa	Estabilidad Geotécnica	Peso
6 – 9	IIIB	Muy Baja	Muy Alta	1
10 – 12	IIIA	Baja	Alta	2
13 – 18	II	Moderada	Moderada	3
19 – 24	IB	Alta	Baja	4
>25	IA	Muy Alta	Muy Baja	5

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2015

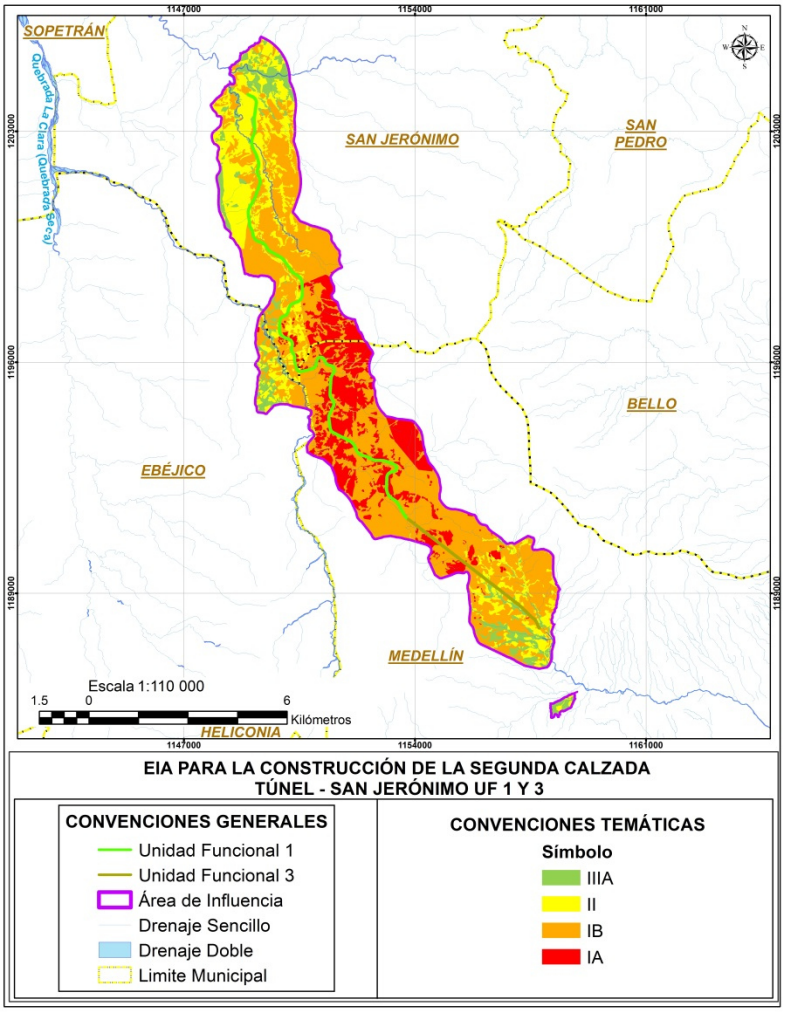
En Figura 5-228 y Figura 5-229 se observa la distribución de las categorías de amenaza geotécnica dentro del área de influencia, donde el 55,3% es de alta susceptiblilidad, el 16,6% de muy alta susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa, el 19,7% es moderada y el 8,4% baja susceptibilidad.

Figura 5-228 Distribución de amenaza geotécnica



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

Figura 5-229 Mapa amenaza geotecnica



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

En la Tabla 5-135 se muestran los resultados de las características de las áreas resultantes en la clasificación de zonificación geotécnica por procesos erosivos y de remoción en masa.

Tabla 5-135 Leyenda del mapa de zonificación geotécnica

Símbolo	Amenaza Relativa	Estabilidad geotécnica	Descripción	Área (ha)
IIIB	Muy Baja	Muy Alta	No hay	0
IIIA	Baja	Alta	En esta categoría predominan rocas volcánicas del Complejo Quebradagrande (KvQG), en menor proporción depósitos coluvio aluviales (Qcal) y Diorita de Altavista (Kida). Las unidades geomorfológicas que predominan son laderas estructurales en montañas estructurales denudativas, y en menor proporción lomas y colinas en piedemonte, laderas en montañas denudativas y abanicos aluviales.	446,9

Símbolo	Amenaza Relativa	Estabilidad geotécnica	Descripción	Área (ha)
			La cobertura dominante es de Bosque de galería con predominio de árboles y en menor proporción Vegetación secundaria alta. El 50,5% del terreno es de alta susceptibilidad por densidad de drenaje y el 46,8% de susceptibilidad moderada. Los rangos de pendientes que predominan son fuertemente inclinada (12-25%), ligeramente escarpadas o ligeramente empinadas, 25-50%, le sigue Moderadamente escarpada o moderadamente empinada (50-75%).	
II	Moderada	Moderada	En esta categoría predominan rocas volcánicas del Complejo Quebradagrande, en menor proporción depósitos coluvio aluviales y Diorita de Altavista. Las unidades geomorfológicas que predominan son laderas estructurales en montañas estructurales denudativas y en menor proporción laderas en Montañas denudativas, laderas en Montañas denudativas estructurales, abanicos aluviales y lomas y colinas en piedemonte.. En cuanto a las coberturas dominantes son Bosque de galería con predominio de árboles y en menor proporción Vegetación secundaria alta. El 60,2% del terreno es de alta y el 33,0% moderada susceptibilidad a FRM por densidad de drenaje; los rangos de pendientes que predominan son Ligeramente escarpada o ligeramente empinada (25-50%), fuertemente inclinada (12-25%) Moderadamente escarpada o moderadamente empinada (50-75%).	1.056,3
IB	Alta	Baja	En esta categoría predominan Esquistos cuarzo sericíticos, rocas volcánicas del Complejo Quebradagrande, Diorita de Altavista y Granito néisico de Palmitas. Las unidades geomorfológicas que predominan son laderas en montañas denudativas estructurales y laderas estructurales en montañas estructurales denudativas. En cuanto a las coberturas dominantes son pastos limpios y Bosque de galería con predominio de árboles. El 47,7% del terreno es de alta susceptibilidad por densidad de drenaje, el 46,6% de susceptibilidad moderada. Los rangos de pendientes que predominan son ligeramente escarpadas o ligeramente empinadas (25-50%), fuertemente inclinada (12-25%) y Moderadamente escarpada o moderadamente empinada (50-75%). En esta categoría, se ubica una zona actualmente	2.956,7

Símbolo	Amenaza Relativa	Estabilidad geotécnica	Descripción	Área (ha)
			inestable en el sector El Galpón, que corresponde a un lleno antrópico ubicado en el costado NE del K00+200 al K00+470 de la vía actual, en la ladera coluvio aluvial de la Quebrada La Negra, que actualmente, genera problemas de inestabilidad a la calzada existente, con acuíferos de mediana productivdad, de susceptibilidad muy alta por cobertura de la tierra en pastos limpios, moderada por densidad de drenajes, baja por presencia de fallas, alta por pendientes, alta por morfodinámica (deslizamiento activo).	
IA	Muy Alta	Muy Baja	Las áreas de muy alta amenaza geotécnica se concentran en alrededores del tramo de vía K02+691 – K07+277. En esta categoría predomina rocas de Gabros de Romeral, Granito néisico de Palmitas, Esquistos Cuarzo sericíticos. Las unidades geomorfológicas que predominan son laderas en Montañas denudativas estructurales, laderas en Montañas denudativas y laderas estructurales. En cuanto a las coberturas dominantes son Pastos limpios, le siguen Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales y Mosaico de pastos y cultivos. El 57,2% del terreno es de alta y el 41,8% moderada susceptibilidad a FRM por densidad de drenaje; los rangos de pendientes que predominan son Ligeramente escarpada o ligeramente empinada (25-50%), le sigue Moderadamente escarpada o moderadamente empinada (50-75%) y Fuertemente inclinada (12-25%).	890,7

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

5.1.10 Atmósfera

La atmósfera se compone de dos grupos de gases: constantes y variables. Los gases constantes se mantienen en una proporción casi permanente. Los más abundantes con su respectiva participación porcentual en la masa total atmosférica son: nitrógeno (78%), oxígeno (20.9&) y argón (0.9%). Los gases variables son los que cambian en mayor porción y los más importantes son el vapor de agua y el dióxido de carbono; ambos presentan grandes variaciones estacionales y de largo plazo.[72]

5.1.10.1 **Meteorología**

Para el análisis climático de la zona de influencia del proyecto, se recopiló la información disponible en las estaciones operadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM. En la Tabla 5-136 se presenta el nombre, tipo, código de las estaciones estudiadas y sus características de localización y elevación.

Además de la información meteorológica existente en IDEAM, se tuvo en cuenta la información disponible en los POTs y EOTs de los municipios del área de influencia del proyecto y los POMCAs de las cuencas interceptadas por el proyecto, entre ellas se incluyen el del río Aurrá, quebrada Seca o Clara.

Las estaciones a tener en cuenta en la zona en análisis se definieron de acuerdo al periodo de registro, la continuidad y la localización geográfica, de tal forma que permitieran conocer el comportamiento de las variables climatológicas en la zona. Los datos completos con respecto a todas las estaciones meteorológicas utilizadas se encuentran en el Anexo E1.

Tabla 5-136 Estaciones climatológicas seleccionadas en la zona de estudio

Código	Nombre	Corriente	Municipio	Cat.	Est.	Altitud (msnm)	Coordenadas	
							Este	Norte
26210090	Anza	Cauca	Anza	PM	A	710	1134811,46	1188918,09
27015070	Apto Olaya Herrera	Medellín	Medellín	SP	A	1490	1164752,08	1179866,11
27011110	Astilleros	Quebrada Doña María	Medellín	PM	A	2450	1155122,42	1183898,96
26200130	Bolombolo	Cauca	Venecia	PM	A	604	1136781,52	1151827,47
27010780	Boqueron	Medellín	Medellín	PM	S	2510	1154267,90	1194150,60
26215020	Cañafisto	Cauca	Santafé de Antioquia	CO	S	500	1139493,82	1201487,07
11115020	Cañasgordas	Cañasgordas	Cañasgordas	CO	A	1200	1115840,25	1239194,00

[72] Red Meteorológica. Atlas Climatológico Nacional. Autores.

Código	Nombre	Corriente	Municipio	Cat.	Est.	Altitud (msnm)	Coordenadas	
							Este	Norte
26215010	Concordia	Quebrada Magallo	Concordia	CO	A	1904	1128182,04	1159766,51
26205020	El Rosario	Quebrada Mina	Venecia	CP	A	1600	1150695,92	1148050,05
26210130	Guasabra	Tonusco	Santa Fe de Antioquia	PM	A	2128	1124073,88	1211037,40
26205080	La Aldea	La Frisola	Medellín	ME	A	1638	1152330,70	1193149,84
26210080	La Herradura	Cauca	Concordia	PM	A	547	1133233,27	1166358,83
27011120	La Iguana	Quebrada La Iguana	Medellín	PG	A	2300	1157134,10	1190427,97
27011270	Laureles-Medellín	Medellín	Medellín	PM	A	1512	1164513,40	1182720,18
26230180	Llanos de San Juan	Quebrada La Muñoz	San Jerónimo	PM	A	1600	1150436,43	1202658,11
26200120	Otramina	Amaga	Titiribi	PM	A	1375	1142030,04	1163472,41
27010810	Santa Helena	Medellín	Medellín	PM	A	2550	1172755,31	1177264,84

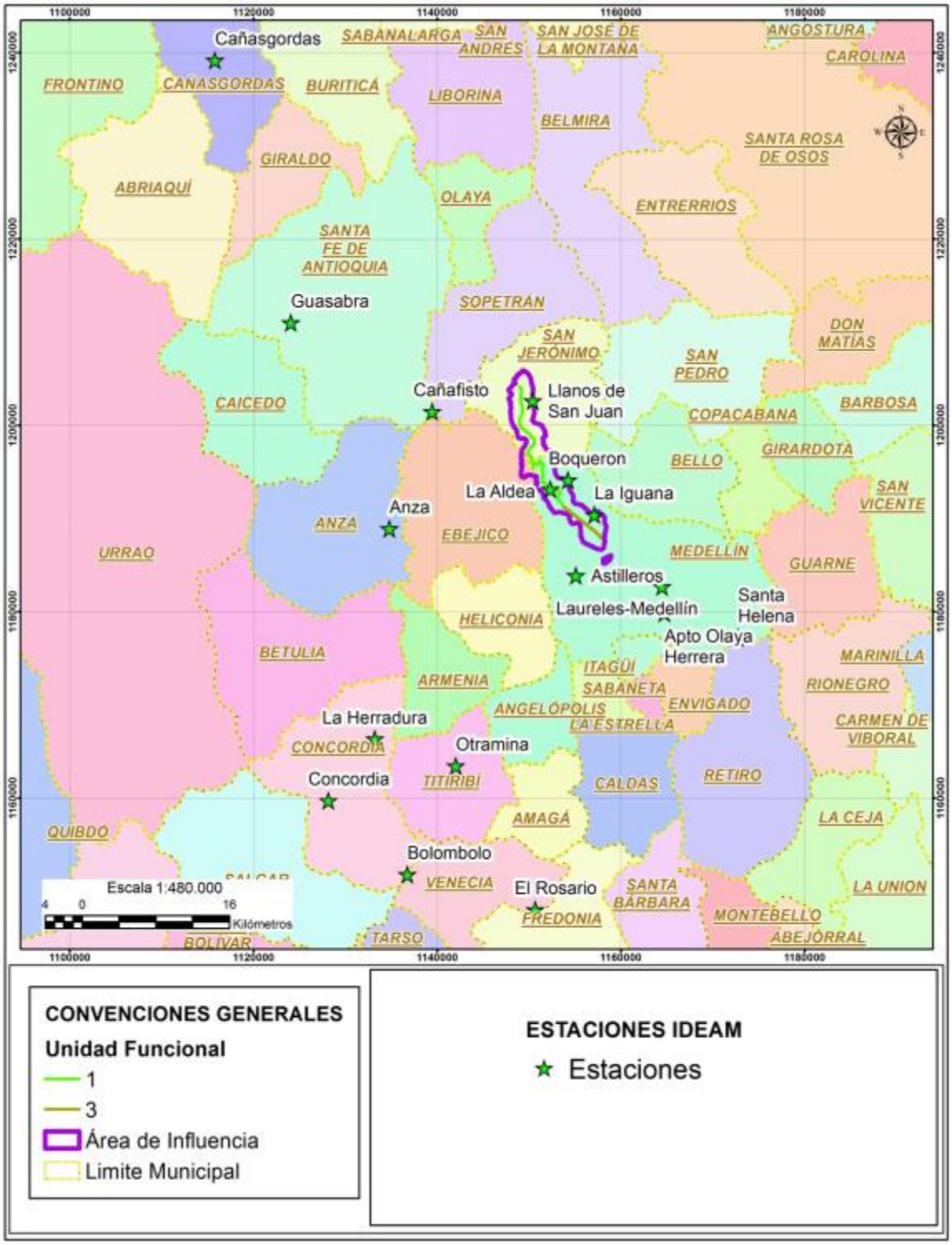
Categoría (Cat):
PM= Pluviométrica
CO= Climatológica Ordinaria
ME= Meteorológica
PG= Pluviográfica
SP= Sinóptica Principal
CP= Climatológica Principal

Estado (Est):
A= Activa
S=Suspendida con registros iguales o superiores a 15 años.

Fuente: IDEAM, Consultoría Colombiana S.A, 2016.

En la Figura 5-230 se muestra la representación espacial de las estaciones del IDEAM en relación con el área de influencia del proyecto, se resalta que en la zona de interés se cuenta con registros de precipitación en todas las estaciones listadas, sin embargo, para las demás variables climatológicas solo algunas cuentan con registros históricos, por lo cual, para cada variable que sea analizada se precisará las estaciones tenidas en cuenta y el periodo de información en cada una de ellas.

Figura 5-230. Localización de las estaciones IDEAM con información histórica de variables climatológicas



Fuente: IDEAM, Consultoría Colombiana S.A, 2016.

A continuación se analizan los elementos climáticos básicos, tales como precipitación, temperatura, humedad relativa, vientos, evaporación y brillo solar teniendo en cuenta su temporalidad y magnitud.

5.1.10.1.1 Temperatura

La temperatura es la medida de calentamiento presente en el aire y en la superficie terrestre y sus variaciones se deben a la ganancia o pérdida de la energía radiante, dicha energía se transforma en calor sensible, la cual es medida por medio de termómetros. La importancia del estudio de la temperatura en medio físico, radica en que sus variaciones pueden definir meso a microclimas, además condiciona la distribución de los seres vivos y proporciona características específicas al medio que rodea la fauna y la flora.

La temperatura está determinada por factores como: exposición solar, nubosidad, intensidad y procedencia de los vientos y aspectos locales como relieve, zonas de transición y micro-climas.

Para el análisis del comportamiento de esta variable, se tuvo en cuenta la lectura de las estaciones Cañasgordas, Concordia, Aeropuerto Olaya Herrera, El Rosario y Cañafisto las cuales cuentan con los siguientes reportes históricos (Tabla 5-137). Se debe tener presente que como lo dice la resolución 751 de 2015 la información debe ser presentada en maxima diaria registrada y minima diaria registrada, para este caso en los reportes de las estaciones solicitadas al IDEAM estas no presentaban estos valores, por lo que el análisis se realizo con la media, maxima y minima mensual multianual.

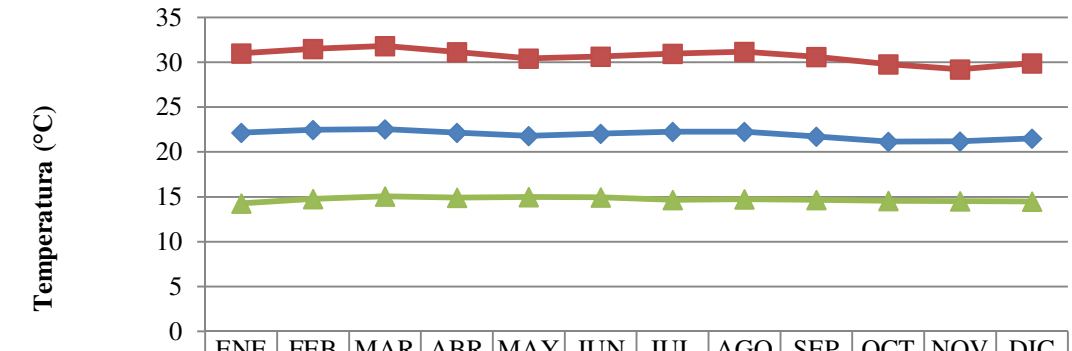
Tabla 5-137. Periodo de reporte de estaciones IDEAM para análisis de temperatura

Código	Nombre	Periodo de reporte
11115020	Cañasgordas	1973-2015
26215010	Concordia	1970-2015
27015070	Apto Olaya Herrera	1941-2015
26205020	El Rosario	1967-1994
26215020	Cañafisto	1987-2002

Fuente: IDEAM, Consultoría Colombiana S.A, 2016.

Acorde con lo anterior, en la Figura 5-231 se presenta el comportamiento de la temperatura en la zona de interés, con base a los reportes de temperatura media, máxima y mínima mensual multianual.

Figura 5-231. Temperatura Media, Máxima y Mínima mensual multianual



	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
MEDIOS	22,16	22,46	22,56	22,14	21,8	22,04	22,26	22,28	21,74	21,16	21,2	21,5
MAXIMOS	31	31,5	31,84	31,14	30,42	30,66	30,96	31,18	30,62	29,8	29,225	29,9
MINIMOS	14,26	14,76	15,04	14,92	15	14,94	14,66	14,72	14,68	14,56	14,52	14,5

Fuente: IDEAM, Consultoría Colombiana S.A, 2016.

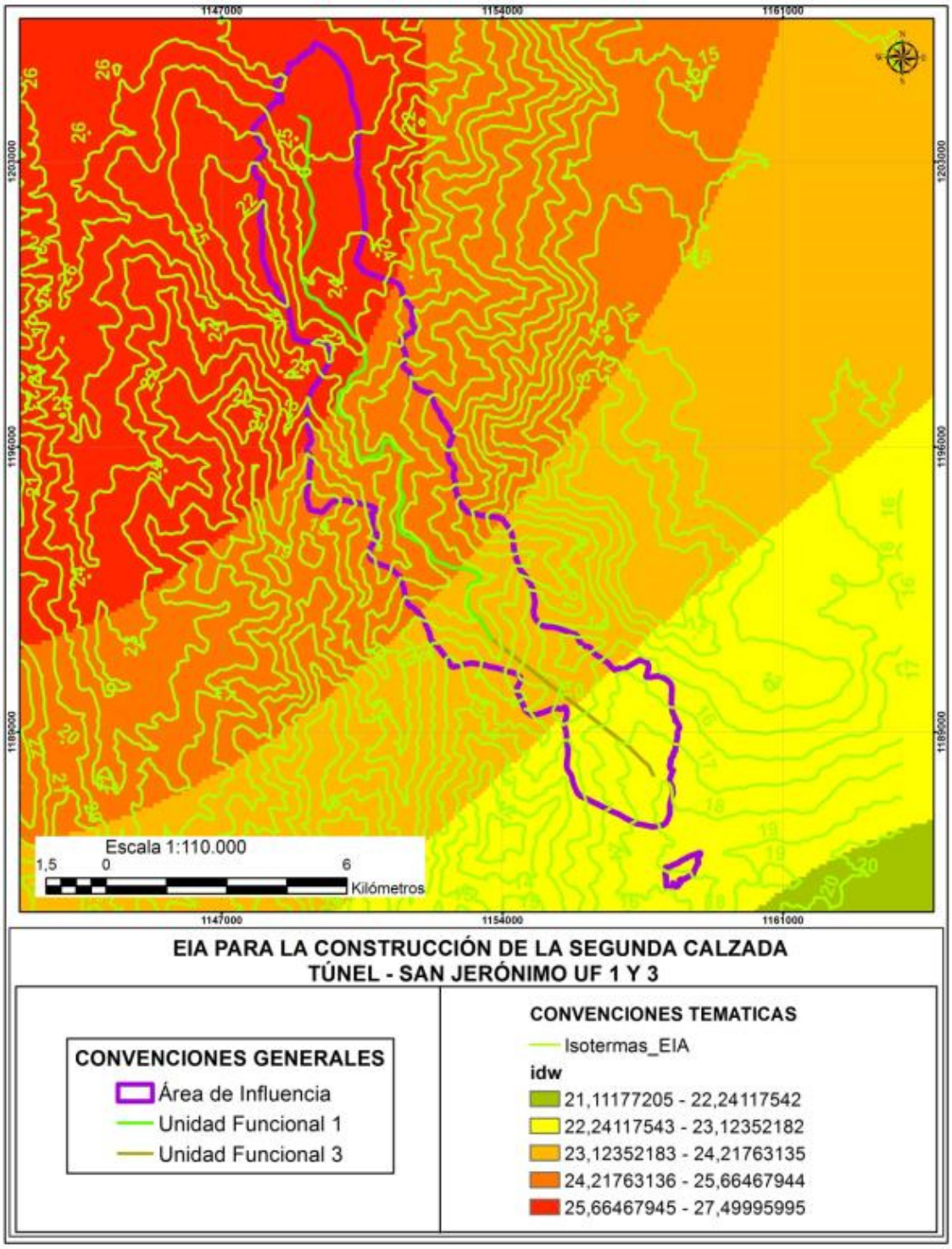
Según la información, se pudo evidenciar que en la zona de estudio se presentan valores de temperatura similares; con un promedio de medias anuales que oscilan entre 21.2°C y 22.56°C, siendo los periodos de febrero - marzo y julio - agosto los más cálidos y entre los meses de octubre y diciembre lo más fríos, manteniéndose así con un promedio anual de 21.92°C.

Del total de datos se resalta que los meses con una mayor temperatura fueron febrero y marzo con valores máximos registrados de 31.5°C y 31.84°C respectivamente, teniendo una temperatura máxima promedio de 30.7°C. Con respecto a los valores mínimos, estos se reportaron en los meses de enero con 14.26°C y diciembre con 14.5°C, con una temperatura promedio de 14.7°C.

Los datos más altos de temperatura media mensual multianual se presentan en la estación Cañafisto con un registro máximo de 28.9°C y una mínima de 17.8°C en la estación Concordia ubicándolas por encima de los promedios anuales. Las variaciones presentadas en las estaciones, se asocian directamente con la diferencia altitudinal, aspecto que igualmente se presenta en el trazado de la vía.

La distribución espacial de la temperatura se presenta en la Figura 5-232 (isotermas), en la cual se evidencia que la temperatura avanza hacia el nor-oeste, dando un aumento asociado al descenso del rio Cauca, teniendo el rango de valores entre 22.24°C y 26°C aproximadamente.

Figura 5-232. Isotermas en el área de estudio



Fuente: IDEAM, Consultoría Colombiana S.A, 2016.

5.1.10.1.2 Presión Atmosférica

La presión atmosférica es la presión que ejerce la atmósfera en un punto específico como consecuencia de la acción de la fuerza de gravedad sobre la columna de aire que se encuentra por encima de este punto, por lo cual la presión atmosférica disminuye con la altitud y al mismo tiempo disminuye la cantidad de aire presente en la atmosfera.

Para calcular la Presión Atmosférica del lugar, se baso según lo expuesto por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), a partir de la siguiente ecuación:

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.006z}{293}\right)^{5.26}$$

Dónde:
P = Presión atmosférica [kPa]
z = Elevación sobre el nivel del mar [m.s.n.m]

Teniendo en cuenta la ecuación expuesta anteriormente, en la Tabla 5-138 se muestra el valor de la presión atmosférica en cada una de las estaciones utilizadas, se debe tener en cuenta que no todas las estaciones nombradas en la Tabla 5-136 se usaron para todos los parámetros analizados.

Para la zona de estudio, la presión más alta se presentó en la estación Cañafisto con un valor de 959.6 mb ubicada en la parte nor-oeste de la UF 1 y 3 y la presión más baja con un valor de 764.0 mb se obtuvo en la estación Santa Helena la cual se encuentra en la parte sur-este del trazado, resultados que permiten evidenciar la relación inversamente proporcional que existe entre este parámetro y la altura, ubicándose la estación Cañafisto a una menor altura con 500 msnm y la estación Santa Helena a 2550 msnm.

Tabla 5-138 Valores de presión atmosférica

NOMBRE	ALTITUD	PRESION (Kpa)	PRESION (mb)
Boqueron	2510	76,7	767,5
La Aldea	1638	84,7	846,6
Santa Helena	2550	76,4	764,0
La Iguana	2300	78,6	786,0
Apto Olaya Herrera	1490	86,1	860,6
Anza	710	93,8	937,9
Guasabra	2128	80,1	801,4
Laureles-Medellín	1512	85,9	858,5
Llanos de San Juan	1600	85,0	850,2

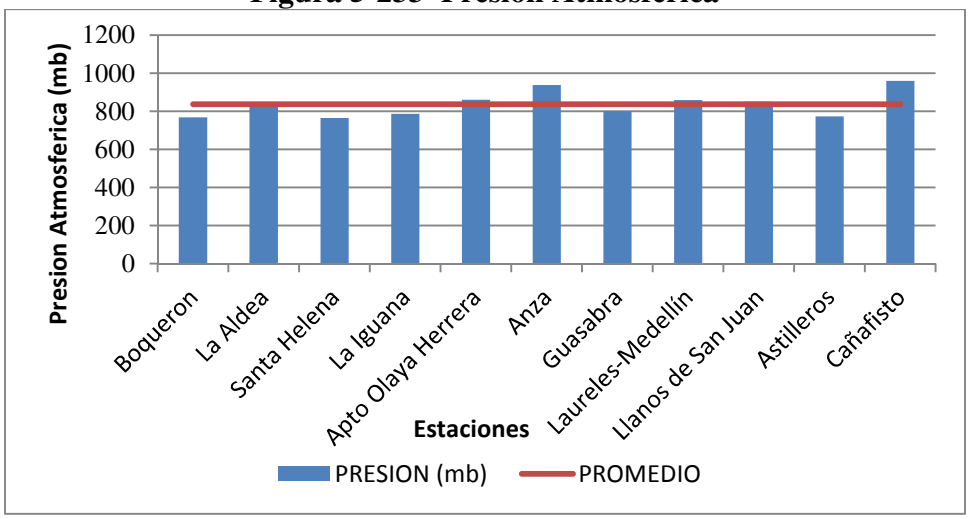
NOMBRE	ALTITUD	PRESION (Kpa)	PRESION (mb)
Astilleros	2450	77,3	772,7
Cañafisto	500	96,0	959,6

Fuente. (IDEAM, Consultoria Colombiana S.A, 2016)

De acuerdo con lo planteado, se tiene que el punto más alto del trazado se localiza en la entrada del túnel sentido Medellín -Santa Fe de Antioquia con una altura aproximada de 2025 msnm además se tiene como referencia a la cabecera del municipio de San Jerónimo, punto final del trazado, donde se estima una altura de 700 msnm.

Por otro lado, se debe desatacar que la presión promedio entre todas las estaciones fue de 836.81 mb (Figura 5-233) siendo este un valor más bajo que el de la mayoría de estaciones analizadas.

Figura 5-233 Presión Atmosférica



Fuente. (IDEAM, Consultoria Colombiana S.A, 2016)

5.1.10.1.3 Precipitación

Las precipitaciones son el mecanismo primario de transporte de agua desde la atmósfera hasta la superficie terrestre.

Para la caracterización de la precipitación en la zona del proyecto, se tuvo en cuenta la información de las estaciones que se listan en la Tabla 5-139, dado el periodo de registro con el que cuentan. Al igual que en el parámetro de temperatura la información debe ser presentada en maxima diaria registrada y minima diaria registrada, para este caso en los reportes de las estaciones solicitadas al IDEAM estas no presentaban estos valores, por lo que el análisis se realizo con la media mensual multianual.

Tabla 5-139. Periodo de reporte de estaciones IDEAM para análisis de precipitación

Código	Nombre	Periodo de Reporte	Código	Nombre	Periodo de Reporte
27010780	Boqueron	1970-1990	*26210090*	Anza	1970-2015
11115020	Cañasgordas	1973-2015	*26210130*	Guasabra	1975-2015
26205080	La Aldea	1990-2015	*27011270*	Laureles-Medellín	2011-2015
26210080	La Herradura	1970-2015	*26200130*	Bolombolo	1980-2015
26215010	Concordia	1970-2015	*26205020*	El Rosario	1967-1998
27010810	Santa Helena	1970-2015	*26230180*	Llanos de San Juan	1990-2015
27011120	La Iguana	1990-2015	*27011110*	Astilleros	1991-2015
27015070	Apto Olaya Herrera	1941-2015	*26215020*	Cañafisto	1987-2002
			26200120	Otramina	1970-2015

Fuente: IDEAM, Consultoría Colombiana S.A, 2016.

Acorde con lo anterior, en la Tabla 5-140 se presentan los valores de precipitación total mensual multianual de las diferentes estaciones y en la Figura 5-234

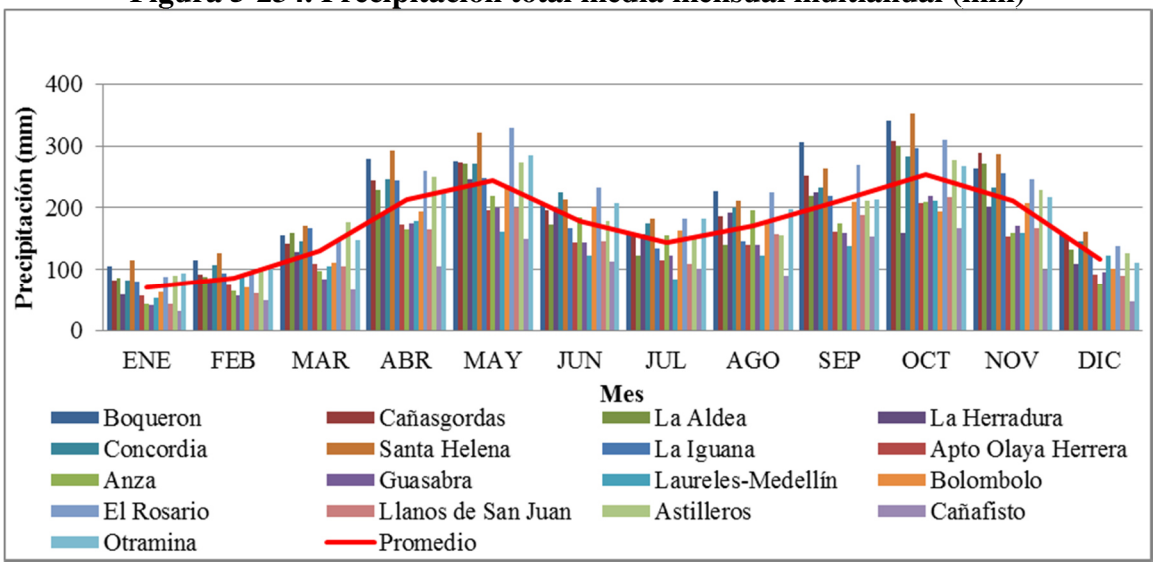
Figura 5-234 se incluye la representación de los valores indicados.

Tabla 5-140. Valores de precipitación total media mensual multianual (mm)

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
Boqueron	105	114	155	278	275	206	155	226	306	340	263	160	2582
Cañasgordas	83	92	142	245	273	196	153	185	251	309	288	151	2368
La Aldea	85	87	159	228	271	173	122	141	219	300	271	132	2190
La Herradura	58	79	128	191	246	193	158	192	226	160	202	109	2042
Concordia	81	107	146	245	272	225	175	199	232	283	234	145	2343
Santa Helena	115	125	171	292	321	213	183	212	264	352	286	161	2696
La Iguana	80	94	167	244	249	167	134	145	218	296	255	125	2175
Apto Olaya Herrera	57	75	110	173	195	144	115	140	161	207	153	92	1623
Anza	43	65	97	164	220	184	154	196	175	209	158	76	1740
Guasabra	42	56	84	174	200	143	122	141	159	220	171	95	1606
Laureles-Medellín	53	91	104	178	161	123	84	123	138	210	159	122	1545
Bolombolo	62	71	110	194	237	202	162	176	210	193	207	101	1925
El Rosario	88	94	148	259	329	232	181	226	270	310	247	138	2522
Llanos de San Juan	44	61	104	165	200	146	108	158	188	217	168	91	1650
Astilleros	89	97	177	251	273	178	151	155	212	277	228	127	2215
Cañafisto	31	48	66	106	149	112	102	89	154	167	99	46	1169
Otramina	93	101	148	227	284	207	182	197	213	267	218	110	2245

Fuente: IDEAM, Consultoría Colombiana S.A. 2016

Figura 5-234. Precipitación total media mensual multianual (mm)



Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

El comportamiento de la precipitación total mensual multianual que se presenta en la Figura 5-234 permite identificar que los meses de enero, febrero y diciembre se caracterizan por presentar los promedios más bajos de lluvias con 71,09mm, 85,72mm y 116,45mm respectivamente. Por otro lado, también se evidencia que los meses de mayo y octubre son los que registran los mayores promedios de precipitación con 244,42mm y 253,96mm respectivamente.

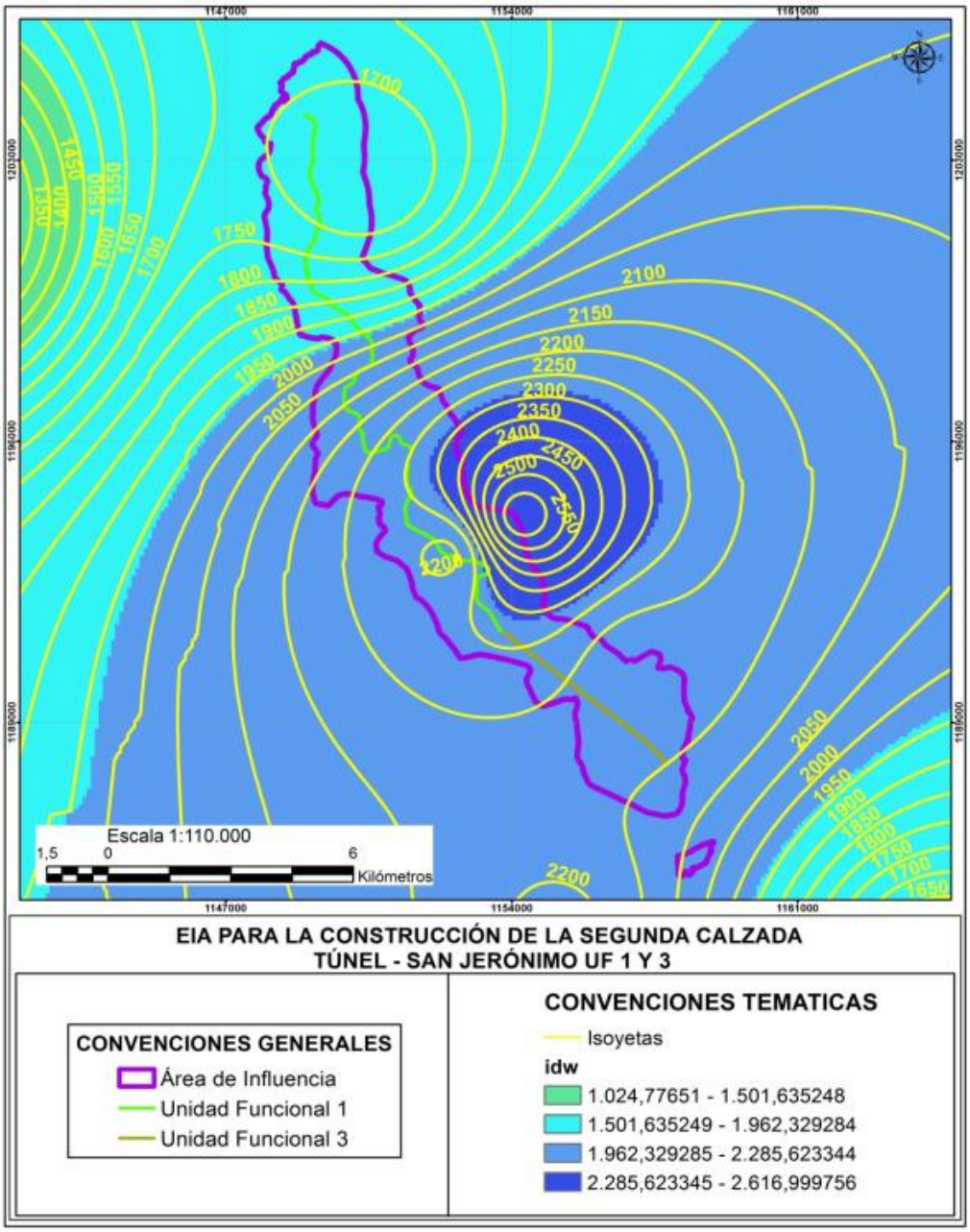
Se destaca de los registros que el mayor valor de precipitación se presentó en el mes de octubre en la estación Santa Helena del municipio de Medellín, con 352mm y que el menor registro se dio en la estación Cañafisto para el mes de enero con 30,70mm, lo cual guarda coherencia con los registros de temperatura analizados previamente. A partir de los registros se identifica que la zona tiende a presentar dos temporadas de lluvia a lo largo del año, la primera de ellas empieza a darse hacia el mes de marzo, aumentando en abril y mayo, posteriormente, se registra un segundo evento de lluvias que abarca los meses de septiembre, octubre y noviembre.

Todas las estaciones coinciden en registrar el menor valor de precipitación en el mes de enero con registros que oscilan entre los 30,70mm (estación Cañafisto) y los 115,30mm (estación Santa Helena), seguido por el mes de febrero con reportes entre los 48,40mm y 125,30mm, lo cual se asocia directamente con los registros de temperatura presentados previamente.

En cuanto a las mayores variaciones entre los registros de cada una de las estaciones, se presentan en El Rosario con una diferencia de 241mm entre el máximo valor registrado y el mínimo, seguida por Santa Helena con una variación de 236,70mm y Boquerón con 235,70mm.

Frente a los registros anuales de precipitación, en la Figura 5-235 se presentan las isoyetas de la zona de interés, las cuales permiten evidenciar una variación en aumento a medida que se avanza hacia el sur del área con un valor máximo de 2550mm/año en el sector del túnel; y en cuanto a los valores más bajos se aprecian hacia el nor-oeste con valores de 1700mm/año.

Figura 5-235 Distribución espacial de la precipitación



Fuente: IDEAM, Consultoría Colombiana S.A, 2015.

5.1.10.1.4 Humedad Relativa

Para el análisis de la humedad relativa media mensual multianual se tomaron los registros de las estaciones Concordia, Aeropuerto Olaya Herrera, El Rosario y Cañafisto, teniendo en cuenta que todas tienen reportes de quince años o más. El resumen de los registros analizados se presenta en la Tabla 5-141.

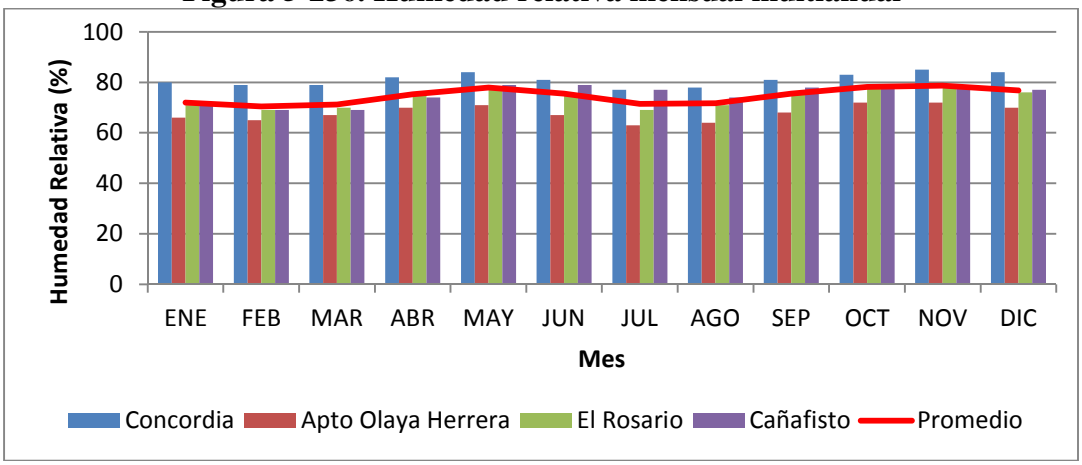
Tabla 5-141. Valores de humedad relativa (%)

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Concordia	80	79	79	82	84	81	77	78	81	83	85	84
Apto Olaya Herrera	66	65	67	70	71	67	63	64	68	72	72	70
El Rosario	71	69	70	75	78	75	69	71	75	79	79	76
Cañafisto	71	69	69	74	79	79	77	74	78	79	79	77

Fuente: IDEAM, Consultoría Colombiana S.A. 2016

De los anteriores valores se destaca que el menor registró se presenta en la estación Aeropuerto Olaya Herrera con 63% (julio) y el mayor valor se presentó en la estación Concordia con 85% (noviembre), en cuanto al promedio general se calcula en 75%. El comportamiento de la humedad relativa para cada una de las estaciones se puede observar en la Figura 5-236.

Figura 5-236. Humedad relativa mensual multianual



Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

De la anterior figura se destaca el mes de noviembre por registrar el mayor promedio (79%) y los meses de febrero y marzo por presentar el promedio más bajo con 71%; también es posible evidenciar que los mayores registros de humedad coinciden con los picos registrados de precipitación, lo cual permite concluir que están directamente relacionados.

Por otro lado los valores máximos y mínimos se realizaron únicamente tomando los datos de las estaciones Concordia, Apto Olaya Herrera y EL Rosario, ya que en las demás

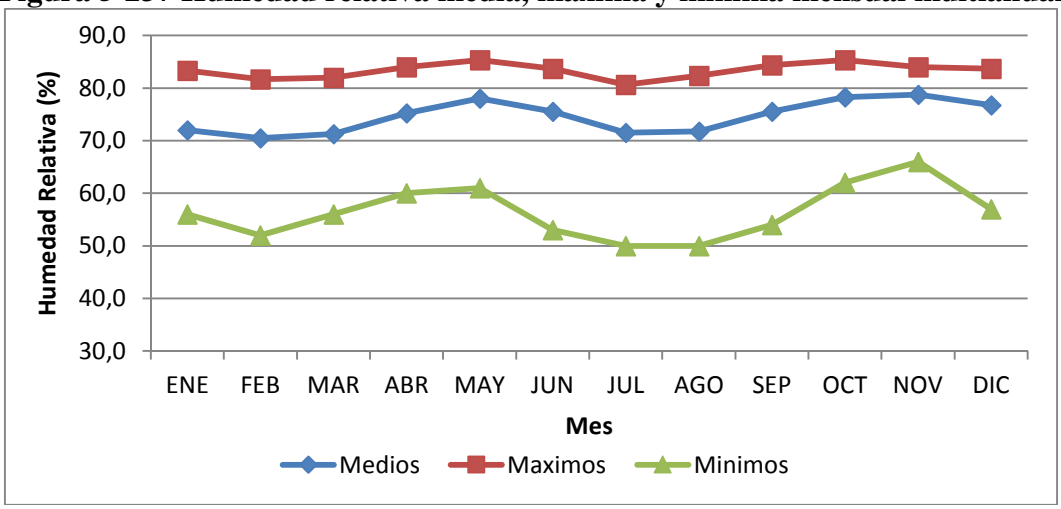
estaciones se presentó ausencia de estos valores. En la Tabla 5-142 que se muestra a continuación y a su vez representados en la Figura 5-237, muestran que los valores máximos multianuales oscilan entre 85.3% y 80.7% teniendo los menores valores en los meses de Febrero y julio y los mayores en mayo y octubre. Así mismo los valores mínimos multianuales oscilan entre 50% y 66% teniendo los mayores valores en mayo y noviembre y los menores en los meses julio y agosto.

Tabla 5-142 Valores de humedad relativa media, máxima y mínima mensual multianual (%)

NOMBRE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Medios	72,0	70,5	71,3	75,3	78,0	75,5	71,5	71,8	75,5	78,3	78,8	76,8
Máximos	83,3	81,7	82,0	84,0	85,3	83,7	80,7	82,3	84,3	85,3	84,0	83,7
Mínimos	56,0	52,0	56,0	60,0	61,0	53,0	50,0	50,0	54,0	62,0	66,0	57,0

Fuente. (IDEAM, Consultoria Colombiana S.A, 2016)

Figura 5-237 Humedad relativa media, máxima y mínima mensual multianual



Fuente. (IDEAM, Consultoria Colombiana S.A, 2016)

5.1.10.1.5 Viento

El viento es el movimiento del aire. La velocidad del viento en superficie se refiere a la velocidad que alcanza esta variable meteorológica a 10 metros de altura, que es la norma internacional establecida por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) como estándar para la medición y seguimiento del viento[73].

En la Tabla 5-143 se presentan los valores registrados de velocidad del viento en las estaciones Cañafisto, El Rosario y Aeropuerto Olaya Herrera, dado que son las únicas estaciones que cuentan con reportes históricos.

[73] Capítulo 1. Velocidad del viento en superficie. Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia. Ministerio de Minas y energías -.UPME – IDEAM. (pág. 19)

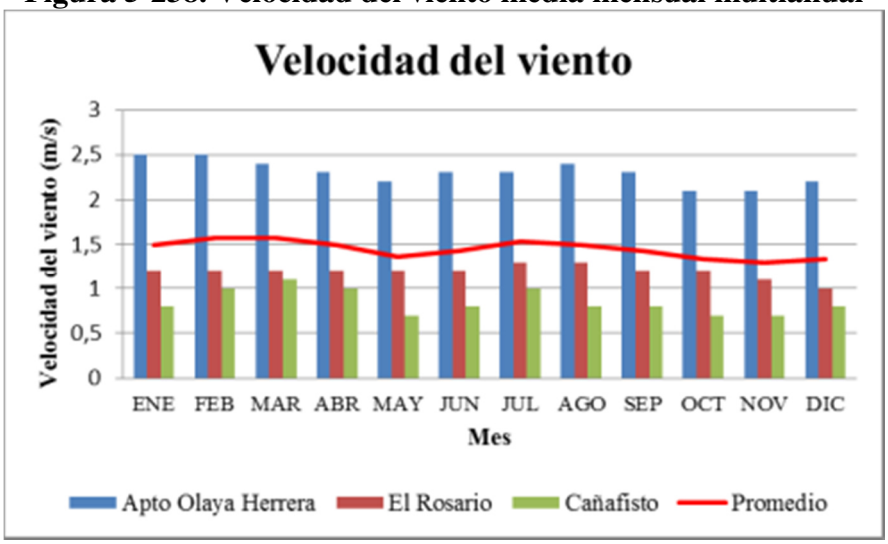
Tabla 5-143. Valores medios mensuales de velocidad del viento (m/s)

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Año
Apto Olaya Herrera	2,5	2,5	2,4	2,3	2,2	2,3	2,3	2,4	2,3	2,1	2,1	2,2	2,3
El Rosario	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	1	1,2
Cañafisto	0,8	1	1,1	1	0,7	0,8	1	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8	0,9

Fuente: IDEAM, Consultoría Colombiana S.A. 2016

Del anterior reporte se destaca que los mayores registros de viento se presentan en enero y febrero con 2,5m/s, seguidos por marzo y agosto con 2,4m/s, igualmente se observa que las velocidades más bajas se presentar en los meses de mayo, octubre y noviembre con 0,7m/s, seguidos por junio, agosto, septiembre y diciembre con 0,8m/s. A continuación se presenta gráficamente el comportamiento de la velocidad del viento en la zona de estudios.

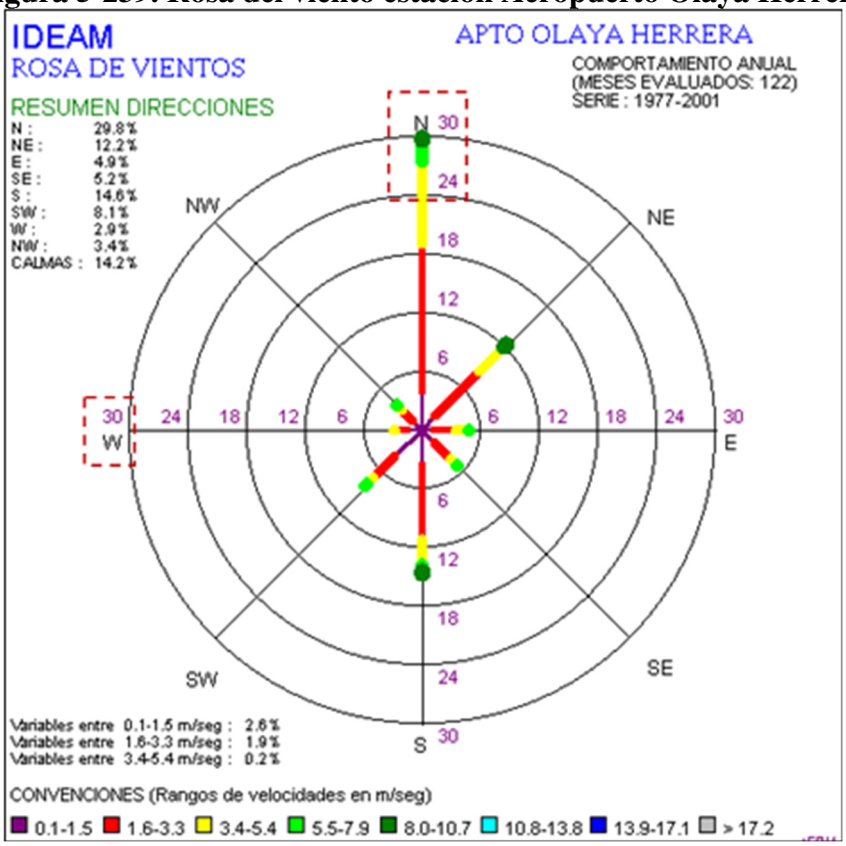
Figura 5-238. Velocidad del viento media mensual multianual



Fuente: IDEAM, Consultoría Colombiana S.A. 2016

En la anterior grafica se puede observar que los meses de octubre, noviembre y diciembre presentan el promedio más bajo de velocidad del viento con 1,3m/s y por el contrario, los meses de febrero y marzo presentan las mayores velocidades con 1,6m/s; del grupo de datos se destaca que el menor registro corresponde a 0,7m/s (estación Cañafisto) y el mayor a 2,5m/s (Aeropuerto Olaya Herrera).

Figura 5-239. Rosa del viento estación Aeropuerto Olaya Herrera



Fuente: IDEAM, Consultoría Colombiana S.A. 2016

En cuanto a la dirección del viento, se cuenta únicamente con información histórica de dirección del viento en la estación Aeropuerto Olaya Herrera, la cual se presenta en la Figura 5-240 para un periodo de análisis de 25 años, en esta se puede apreciar el predominio de los vientos de dirección norte con el 29.8%, seguidos por los del sur con 14,6%, en cuanto a los de menos influencia se encuentran los de oeste con 2,9%, seguidos por los del nor-oeste con el 3,4%.

5.1.10.1.6 Radiación Solar (Brillo Solar)

La radiación solar es la energía emitida por el sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas. Esa energía es el motor que determina la dinámica de los procesos atmosféricos y el clima. Los niveles de radiación en la superficie dependen de varios factores como son: la posición del sol, la altitud, la latitud, el cubrimiento de las nubes, la cantidad de ozono en la atmósfera y la reflexión terrestre (IDEAM, UPME, 2005).

En la Tabla 5-144 se observa el comportamiento de los valores mensuales multianuales de brillo solar para las estaciones Concordia, Aeropuerto Olaya Herrera, El Rosario y

Cañafisto.

Para la estación Concordia se registran valores entre 107,1 horas y 188 horas, los cuales se presenten en los meses de noviembre y julio respectivamente, valores igualmente coincidentes con los registros de precipitación. Para las estaciones restantes, se registra un comportamiento similar en cuanto a que los mayores reportes de brillo solar se dan en los meses de menor precipitación.

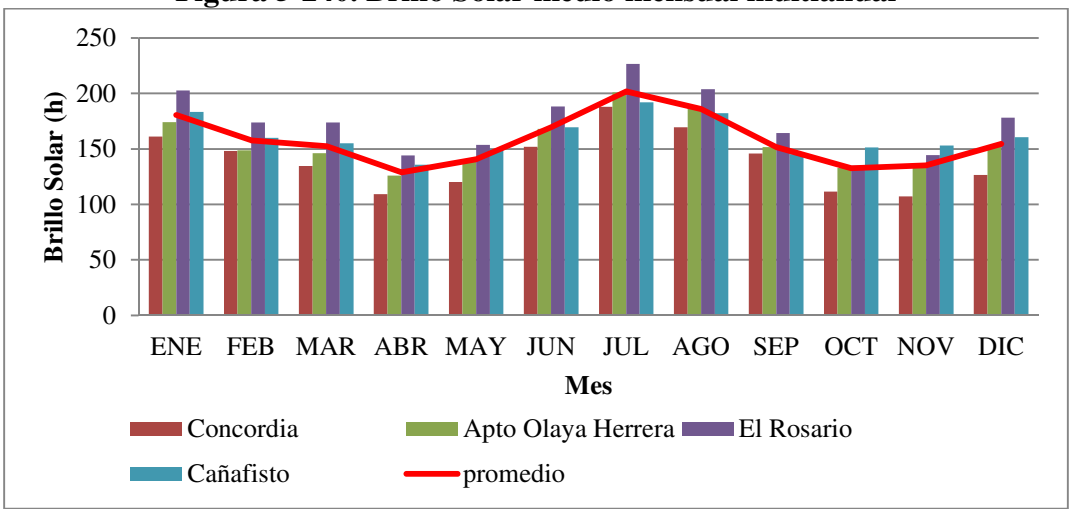
Tabla 5-144. Valores medios mensuales de brillo solar

NOMBRE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Concordia	161,2	148,3	134,5	109,3	120,1	151,8	188	169,5	145,8	111,5	107,1	126,4
Apto Olaya Herrera	174,2	148,7	146	126	138,8	168,1	200,9	188,6	151,5	132,8	135,6	152,3
El Rosario	202,6	173,9	173,9	144,1	153,6	188,2	226,5	203,8	164,3	135	144,5	178,2
Cañafisto	183,3	160	155	135,7	149,9	169,6	192,1	182,1	145,4	151,4	153,1	160,7

Fuente: IDEAM, Consultoría Colombiana S.A. 2016

A continuación se presenta la Figura 5-240 donde se observa la distribución del brillo solar durante todo el periodo, es de resaltar que los valores más grandes se presentan entre los meses de enero, julio y agosto con valores promedio de 180.3 horas, 201.8 horas y 186 horas respectivamente y los meses con los menores valores promedio son abril con 128.7 horas y octubre-noviembre con registros de 132.6 horas y 135.07 horas respectivamente.

Figura 5-240. Brillo Solar medio mensual multianual



Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

5.1.10.1.7 Nubosidad

La octa es la medida utilizada para el cálculo de la nubosidad presente en una zona determinada y equivale a un octavo de la porción de cielo observado, o sea 5/8 del cielo

cubierto en clasificación general del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, correspondería a un cielo parcialmente cubierto. A continuación se muestra la Tabla 5-145 en la que se presentan los registros mensuales multianuales de cada estación analizada.

Tabla 5-145 Valores medios mensuales de nubosidad

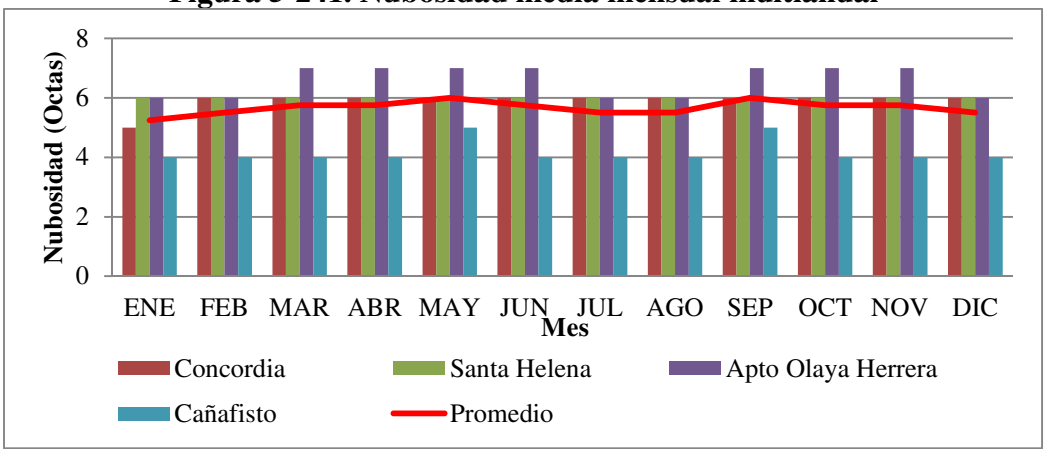
Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Concordia	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Santa Helena	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Apto Olaya Herrera	6	6	7	7	7	7	6	6	7	7	7	6
Cañafisto	4	4	4	4	5	4	4	4	5	4	4	4

Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

En referencia a este parámetro, se observa que la estación Santa Helena mantiene un valor constante de 6 octas a lo largo del año y para el caso de Concordia, solo presentan variación para el mes de enero. En cuanto a las estaciones Aeropuerto Olaya Herrera y Cañafisto, son las que presentan las mayores variaciones las cuales coinciden con los meses de precipitación.

Como lo muestra la Figura 5-241; se presenta un comportamiento similar, con dos periodos con mayores valores, estos comprendidos entre marzo y mayo para el primer semestre y para el segundo los meses de septiembre a noviembre, sin embargo su variación en el promedio medio mensual multianual durante cada mes es mínima (1 octa o menos).

Figura 5-241. Nubosidad media mensual multianual



Fuente: Consultoría Colombiana S.A. 2016

5.1.10.1.8 Evaporación

La evaporación refleja las condiciones de retorno del agua a la atmósfera y relaciona otras variables climatológicas tales como temperatura, precipitación y brillo solar.

Para el análisis se tuvo en cuenta la información de las estaciones La Aldea, Concordia, Aeropuerto Olaya Herrera y Cañafisto, por contar con registros históricos de más de cinco años (en el caso de las estaciones Concordia se cuenta con información de más de cuarenta años). Según los datos recopilados por las estaciones, la zona tienden a presentar un régimen bimodal, con mayor evaporación en los meses de enero a marzo, con una leve baja en febrero; posteriormente de abril a junio desciende y vuelve a presentar un nuevo aumento para julio y agosto, finalmente entre septiembre y diciembre baja considerablemente. En la Tabla 5-146 se muestran los datos medios mensuales multianuales.

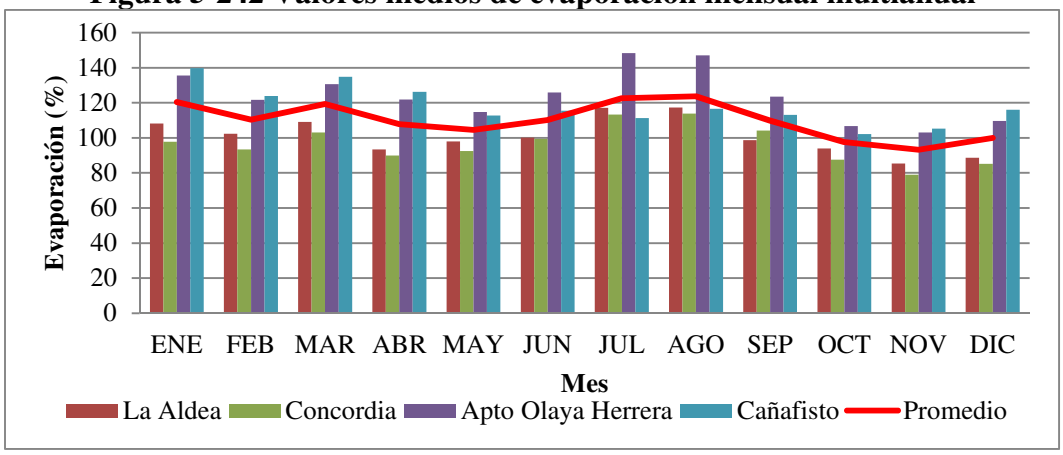
Tabla 5-146. Valores medios mensuales multianuales de evaporación

Nombre	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
La Aldea	108,2	102,4	109	93,4	97,9	100,1	117,2	117,3	98,7	93,9	85,3	88,6
Concordia	97,8	93,4	103	89,9	92,5	99,5	113,3	113,9	104,2	87,5	79	85,2
Apto Olaya Herrera	135,6	121,6	130,6	121,8	114,7	125,9	148,3	147	123,5	106,7	103	109,7
Cañafisto	139,8	123,8	134,8	126,2	112,8	115,5	111,3	116,6	113,1	102,2	105,2	116

Fuente. (IDEAM, Consultoria Colombiana S.A, 2016)

En cuanto a los valores registrados en las diferentes estaciones, se tiene que la estación La Aldea, presenta valores que oscilan entre 85,3mm y 117,3mm, con un promedio de 101mm y valor anual de 1211.9 mm. Para la estación Concordia se tienen valores entre los 79mm y los 113,9mm con una evaporación media total de 1159.1 mm; en el caso de la estación Aeropuerto Olaya Herrera se tiene un promedio de 124,03mm con un mínimo de 103mm y un máximo de 148,3mm, para un valor anual de 1488,5mm siendo este el más alto de todas las estaciones analizadas. Finalmente, la estación Cañafisto registra un mínimo de 102,2mm y un máximo de 139,8mm con un promedio de 118,10mm y valor año de 1417,2mm. A continuación en la Figura 5-242 se muestra la representación de los registros de evaporación en las estaciones estudiadas a lo largo del periodo.

Figura 5-242 Valores medios de evaporación mensual multianual



Fuente: IDEAM, Consultoría Colombiana S.A, 2016.

Se destaca de la serie de datos y la figura anterior que los meses con mayor evaporación son enero, julio y agosto y los meses con menor valor promedio fueron abril y mayo para el primer periodo del año y de octubre a diciembre en el segundo periodo.

5.1.10.1.9 Zonificación Climática

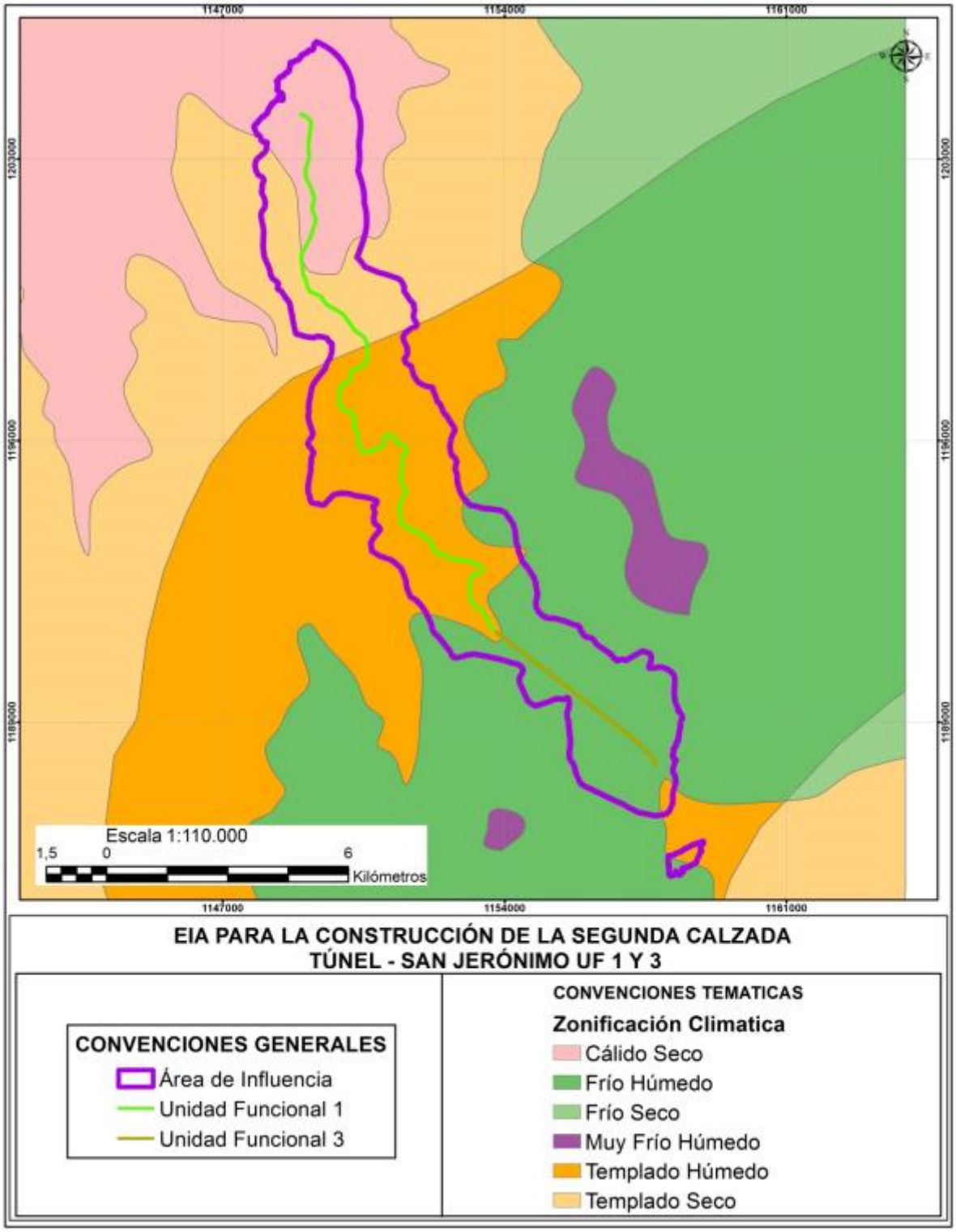
Para el presente estudio, la clasificación climática se basó en el estudio de ecosistemas continentales costeros y marinos de Colombia, en el que para la caracterización climática se utiliza diferentes metodologías tales como los de Köeppen, Thornthwaite, Caldas, Lang, Martone y Holdridge, entre otras. Se optó por asumir un sistema cuya caracterización aplicara los regímenes térmicos y de humedad propios de la geografía Colombiana, considerándolos como los elementos meteorológicos más relevantes y útiles para la caracterización de un ecosistema desde el punto de vista climático (IGAC, IDEAM, IAvH, Invemar, I. Sinchi, IIAP, 2007)[74]

Se debe tener en cuenta que los elementos considerados mas relevantes para el mapa de caracterizacion climatica son la temperatura y la precipitacion, acalarando que estos parametros ya fueron analizados anteriormente, retomando asi su clasificacion para la delimitacion de las unidades climaticas en el area de estudio.

Una vez categorizados los dos elementos meteorologicos principales se realizo una interseccion espacial entre las dos capas, cuyos poligonos relacionan un rango de precipitacion con un rango termal. (Figura 5-243)

[74] *IGAC, IDEAM, IAvH, Invemar, I. Sinchi, IIAP. (2007). Ecosistemas Continentales, Costeros y Marinos de Colombia. Bogotá: IGAC.*

Figura 5-243 Zonificación climática en el área de influencia del proyecto



Fuente. (IDEAM, Consultoria Colombiana S.A, 2016)

De acuerdo a la figura expuesta anteriormente, se tiene que desde la entrada del tunel (Medellin) hasta la salida (via San Jeronimo) se encuentra una zona Frio-humedo, esto se debe principalmente a las caracteristicas fisicas de la zona, posterimente para la aunidad funcional 1 se tiene tres clasificaciones; la primera en templado – humedo, luego templado – seco y finalmente llega a calido - seco, una de las causas principlales de este cambio y aumento se asocia al decenso del rio Cauca.

5.1.10.2 **Identificación de Fuentes de Emisión**

Durante el mes de febrero y junio del presente año se realizó el inventario de fuentes que estuvieran generando contaminación atmosférica en el área de influencia para la construcción de la segunda calzada entre el Túnel de Occidente – San Jerónimo UF 3 y 1, en el cual se identificó puntos de contaminación a la atmosfera, posteriormente se clasificaron las fuentes fijas, móviles y de área.

Según lo establecido en el Artículo 18 del decreto 948 de 1995, las fuentes se sub clasifican así:

- Fuentes Fijas: puntuales, dispersas o área – fuente
- Fuentes Móviles: aérea, terrestres y fluviales

Sin embargo se tiene en cuenta que la cantidad de fuentes de emisión en esta zona no es grande ni notoria, no se determinó una en la que su generación afectara de manera considerable a la población ni al entono en general. Aun así a continuación se presenta lo observado en el trabajo de campo, por lo cual las fotografías y descripción que se presenta abarca el inventario realizado.

5.1.10.2.1 Fuentes Fijas

Hace referencia a las fuentes que se sitúan en un lugar determinado e inamovible, aun cuando la descarga de contaminantes se produzca de forma dispersa (Decreto 948 de 1995). De acuerdo a lo anterior se identificaron en el área de las unidades funcionales 3 y 1, se presentan las siguientes fuentes fijas asociadas a las diferentes actividades productivas de la zona son:

5.1.10.2.1.1Fuentes dispersas o de área

Las fuentes de área identificadas en el área del proyecto UF 3-1 se da a actividades industriales y comerciales asociadas a parqueaderos de vehículos, establecimientos de restaurantes y asaderos; estas actividades son predominantes generando impactos atmosféricos asociados a la calidad del aire.

Fotografía 5-133. Zonas de restaurantes y parqueaderos. (X: 1153430,506; Y: 1191820,671) y (X: 1152373,791; Y: 193243,068)

Fuente. (Consultoría Colombiana S.A, 2016)

5.1.10.2.1.2 Centros Urbanos

Los centros urbanos del área de influencia del proyecto constituyen un escenario de generación de emisiones atmosféricas móviles y fijas, los poblamientos y asentamientos humanos identificados en el área de estudio pueden versen afectados por la contaminación atmosférica; sin embargo muchas veces también son generadores de ella, ya que debido a la concentración urbana se incrementan las emisiones a la atmosfera. Por otro lado también son generadoras de ruido, debido al desarrollo de espacios urbanizados y viviendas y de la existencia de vías principales y secundarias por medio de las cuales se moviliza la flota vehicular pública o privada.

Fotografía 5-134. Viviendas en remodelación – viviendas a la altura cercana de la vía (X: 1153138,461; Y: 1192585,438) y (X: 1153095,318; Y: 1192227,306)

Fuente. (Consultoría Colombiana S.A, 2016)

5.1.10.2.2 Fuente móvil

Las fuentes móviles son aquellas fuentes de emisión que por razón de uso o propósito, es susceptible de desplazarse, como los automotores o vehículos de transporte a motor de cualquier naturaleza (Decreto 948 de 1995).

Debido a que en el corredor vial desde el túnel de Occidente y San Jerónimo se presentan diferentes actividades comerciales, se cuenta con la presencia continua de automotores, camiones, tracto mulas, buses de transporte público, motocicletas y en general toda clase de

vehículos los cuales transitan por la vía existente. En consecuencia a lo anterior, el tráfico vehicular representa una fuente de emisión constante de Monóxido de Carbono (CO), Óxidos de Nitrógeno (NOx) y Óxidos de azufre (SOx) como resultado de la combustión de la gasolina y el diésel. El tránsito vehicular se considera que es frecuente y permanente, esto conlleva a que se incrementen los cambios en la calidad del aire por las emisiones que generan los diferentes vehículos que transitan por la vía existente.

Fotografía 5-135. Fuentes Móviles (Vía Túnel de Occidente-San Jerónimo)

Fuente. (Consultoría Colombiana S.A, 2016)

5.1.10.3 **Potenciales receptores en el área de influencia**

Los receptores principales en para las Unidades Funcionales 1 y 3 en la construcción de la segunda calzada entre Túnel de Occidente y San Jerónimo fueron los poblamientos y asentamientos humanos y como pueden versen afectados por la contaminación atmosférica, sin embargo se establece que estos también son generadores de dicha, debido a que la concentración urbana hace que incrementen las emisiones a la atmosfera.

Para el tramo se estableció que las zonas con más potencial de receptores son las poblaciones que quedan cerca a cada una de las bocas del túnel, ya que es donde se encuentra más población y viviendas, sin embargo como se nombró anteriormente a lo largo de recorrido vial se encuentran zonas de restaurantes, tiendas, parqueaderos los cuales también serán y son los receptores más potenciales.

A continuación en la Tabla 5-147 se observa luego de trabajo en campo la zona con centros urbanos más representativos de toda la zona de estudio en general por cada municipio.

Tabla 5-147. Centros Poblados

Municipio	Unidad territorial	Tipo de asentamiento
Medellín	La Aldea	Nucleado
	La Cuchilla	Nucleado
	La Palma	Nucleado
	Palmitas	Nucleado

Municipio	Unidad territorial	Tipo de asentamiento
San Jerónimo	Berrial	Nucleado
	El Calvario	Nucleado
	Piedra Negra	Nucleado
	Quimbayo	Nucleado

Fuente. (Consultoría Colombiana S.A, 2016)

5.1.10.4 **Calidad del Aire**

La evaluación de la calidad del aire, tiene como propósito fundamental hacer el seguimiento al estado de preservación del recurso, velando porque la posible carga de contaminantes gaseosos, vapores y/o material particulado no sobrepase los límites permisibles establecidos en la normatividad ambiental. Se realizó un inventario de las fuentes de contaminación del aire y se programó una campaña de monitoreo de calidad del aire en las zonas que se consideraron de interés.

El muestreo de calidad de aire se realizó para la unidad funcional 3 y 1 entre los días 27 de febrero y 15 de marzo del 2016 por el laboratorio Corporación Integral del Medio Ambiente C.I.M.A acreditado por el IDEAM mediante la resolución 2085 del 01 de octubre de 2015 bajo la norma NTC ISO 17025/2005. En el presente informe se consignan los resultados obtenidos en el muestreo de calidad del aire; realizado con el propósito de generar una caracterización de este componente en el área de influencia con respecto a las actividades humanas actualmente desarrolladas en la zona y realizar la comparación de estos con los parámetros establecidos en la normatividad ambiental vigente contenida en la Resolución 610 del 24 de marzo de 2010, emitida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT, hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial – MADS.

5.1.10.4.1 Inventario de fuentes generadoras de emisiones atmosféricas

Con el fin de dar cumplimiento a la resolución 751 de 2015 relacionado con el elemento de Aire, se realizó un inventario de las fuentes de contaminación del aire y se programó una campaña de monitoreo de calidad del aire en las zonas que se consideraron de interés.

Como se mencionó anteriormente las actividades identificadas, se asocian a comerciales e industriales, tránsito vehicular, poblamientos y asentamientos humanos y finalmente incendios por parte de los habitantes al darle mal manejo de los residuos generados.

5.1.10.4.2 Análisis y evaluación de la Calidad del Aire

Como se mencionó anteriormente el muestreo y análisis fue realizado por la Corporación C.I.M.A., mediante el análisis preliminar de las posibles fuentes de emisión en la zona de

estudio y factores climatológicos, dado dicho análisis se ubicaron tres (5) estaciones de calidad del aire en el área de estudio para cada unidad funcional para la construcción de la segunda calzada entre el túnel de Occidente – San Jerónimo, sin embargo se debe tener en cuenta que por cada unidad funcional son 3, solamente que una de estas se comparte por lo que en total son 5 puntos; en las cuales se determinaron las concentraciones de los siguientes compuestos: Partículas Suspendidas Totales (PST), Dióxido de Nitrógeno (NO_2), Dióxido de Azufre (SO_2), con muestreos de 24 horas durante dieciocho (18) días y Monóxido de Carbono (CO) con muestreos puntuales de 1 hora, cada uno de los días de muestreo.

A continuación se describen los aspectos principales y relevantes del monitoreo; el informe detallado presentado por el laboratorio encargado CIMA se incluyen en el Anexo F1. Calidad del Aire del presente documento.

- ✓ Determinación De Partículas Suspendidas Totales – PST: La concentración de PST se mide mediante el método correspondiente a US EPA 40 CFR Parte 50 Apéndice B. En este método el muestreador Hi-Vol succiona aire ambiente hacia una caja de muestreo a través del filtro, durante 24 h. El filtro se pesa en las mismas condiciones ambientales antes y después de usarlo, así determinando el peso neto ganado u obtenido; el volumen de aire se determina con base en el flujo estándar promedio y el tiempo de muestreo. Se debe tener en cuenta que el material particulado forma una mezcla compleja de materiales sólidos y líquidos suspendidos en el aire, motivo por el cual estos pueden variar significativamente en tamaño, composición, forma, dependiendo básica y fundamentalmente de su origen.

- ✓ Determinación de óxidos de nitrógeno y azufre: La muestra de aire para análisis de NOx y SOx se toma de manera simultánea con la de partículas mediante el tren de muestreo tipo Andersen, usando la bomba de vacío para hacer pasar el aire por 24 horas a través de burbujeadores con soluciones absorbentes. El NOx junto a las partículas suspendidas son los encargados y responsables de la capa café-rojiza que se puede ver con frecuencia sobre las zonas urbanas.

- ✓ Monóxido de Carbono (CO): Para las mediciones de monóxido de carbono se utiliza un equipo detector de Gas MSA Solaris CO. Por medio del método electroquímico en el cual los equipos muestreadores de monóxido de carbono capturan la muestra de aire y la procesan para brindar un análisis del factor requerido, dicho procedimiento ocurre de manera interna en el equipo y el resultado se refleja en la lectura directa que se puede observar en la pantalla. El resultado corresponde a tres (3) lecturas instantáneas realizadas en un intervalo de 60 minutos, el equipo tiene una alarma sonora que se activa a partir de las 60 pmm de CO.

Los puntos de toma de muestras se establecieron en toda la zona de estudio, a continuación en la Tabla 5-148 se describen los aspectos generales de las áreas en donde se localizaron

las estaciones de monitoreo para la UF 3 y 1; y en las figuras (Figura 5-244 y Figura 5-245) se observa la ubicación espacial de la UF 3 y 1 respectivamente.

Tabla 5-148. Puntos de monitoreo de calidad del aire

Puntos De Monitoreo	UF	Coordenadas Magna Sirgas - Origen Oeste		Aspectos		Registro Fotográfico
Estación 1. San Cristóbal	**3**	**N**:	1186107,942	Climático	Días Soleados se presentaron lluvias los días 5, 8 y 14 de marzo.	
		E:	1159519,557	Fuentes potenciales de emisión	FIJAS: Construcción de obras civiles (puentes peatonales y andenes) en las inmediaciones de la estación. MÓVILES: Tráfico vehicular de las vías aledañas.	
DESCRIPCIÓN GENERAL: se encuentra ubicada en el corregimiento de San Cristóbal, al lado de la estación de policía, en este sector se está realizando una obra para la construcción de un puente, se cuenta con un alto flujo vehicular.						
Estación 2. Entrada Boca túnel	**3**	N:	1187443,379	Climático	Días Soleados se presentaron lluvias los días 08 y 14 de marzo	
		E:	1157941,637	Fuentes potenciales de emisión	FIJAS: Uso de Pesticidas y Fungicidas para fumigar los cultivos que se encuentran cerca de la estación. . MÓVILES: La principal fuente de emisión en esta estación, es el tráfico vehicular de la avenida principal.	
DESCRIPCIÓN GENERAL: La estación 2 se encuentra ubicada a 500 metros de la entrada del túnel, en la vereda El Uvito, a 40 metros de la vía principal.						
Estación 3 o 1 Salida	**3 y 1**	**N**:	1191509,540	Climático	Días Soleados se presentaron lluvias los días 6 y 14 de marzo.	

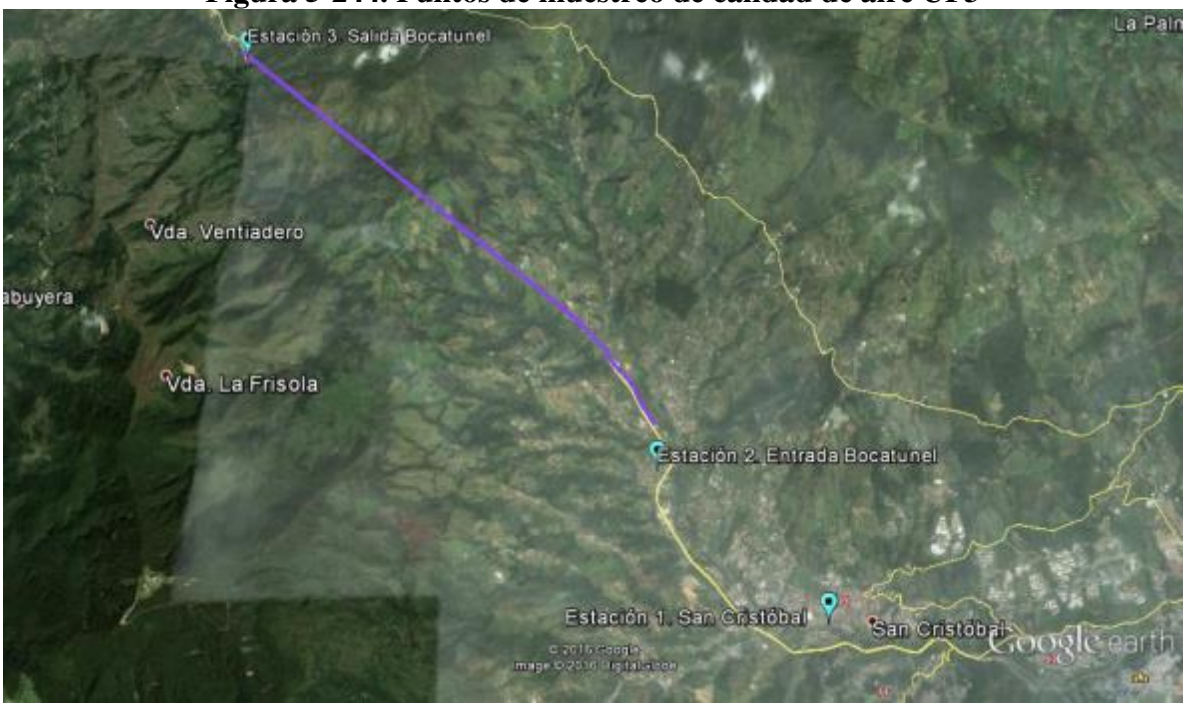
Puntos De Monitoreo	UF	Coordenadas Magna Sirgas - Origen Oeste		Aspectos		Registro Fotográfico
Boca túnel*		**E**:	1153697,005	Fuentes potenciales de emisión	FIJAS: No reporta MÓVILES: La principal fuente de emisión en este punto es el tráfico vehicular de la vía principal que conduce a Medellín, teniendo en cuenta que el peaje se encuentra a 5 metros de la estación.	
DESCRIPCIÓN GENERAL: La estación 3 se encuentra ubicada a 500 metros de la salida del túnel a 10 metros del peaje, donde se cuenta con un alto flujo vehicular ya que está sobre la vía principal.						
Estación 2. Quebrada Miserenga	**1**	N:	1195636,512	Climático	Días Soleados se presentaron lluvias los días 06 y 14 de marzo	
		E:	1151472,54	Fuentes potenciales de emisión	FIJAS: vías que conducen a la vereda Miserenga Baja, y se encuentran en mal estado. MÓVILES: La principal fuente de emisión en esta estación, es el tráfico vehicular de las dos vías que conducen a la Vereda Miserenga Baja.	
DESCRIPCIÓN GENERAL: La estación 2 se encuentra ubicada en una vereda llamada Miserenga cerca una quebrada y a la vía principal.						

*La estación localizada a la salida del Túnel de Occidente se analizó como estación 3 para la Unidad Funcional 3 y como estación 1 para la Unidad Funcional 1.

Puntos De Monitoreo	UF	Coordenadas Magna Sirgas - Origen Oeste		Aspectos		Registro Fotográfico
Estación 3. San Jerónimo	**1**	**N**:	1204440, 47	Climático	Días Soleados se presentaron lluvias el día 08 de marzo.	
		E:	1149337, 46	Fuentes potenciales de emisión	FIJAS: Obras civiles que se están realizando en las inmediaciones de la estación. MÓVILES: La principal fuente de emisión en este punto el alto flujo vehicular que se genera por el transporte intermunicipal y los moto-taxis.	
DESCRIPCIÓN GENERAL: La estación 3 se encuentra ubicada en el municipio de San Jerónimo cerca al parque principal, donde se cuenta con un alto flujo vehicular.						

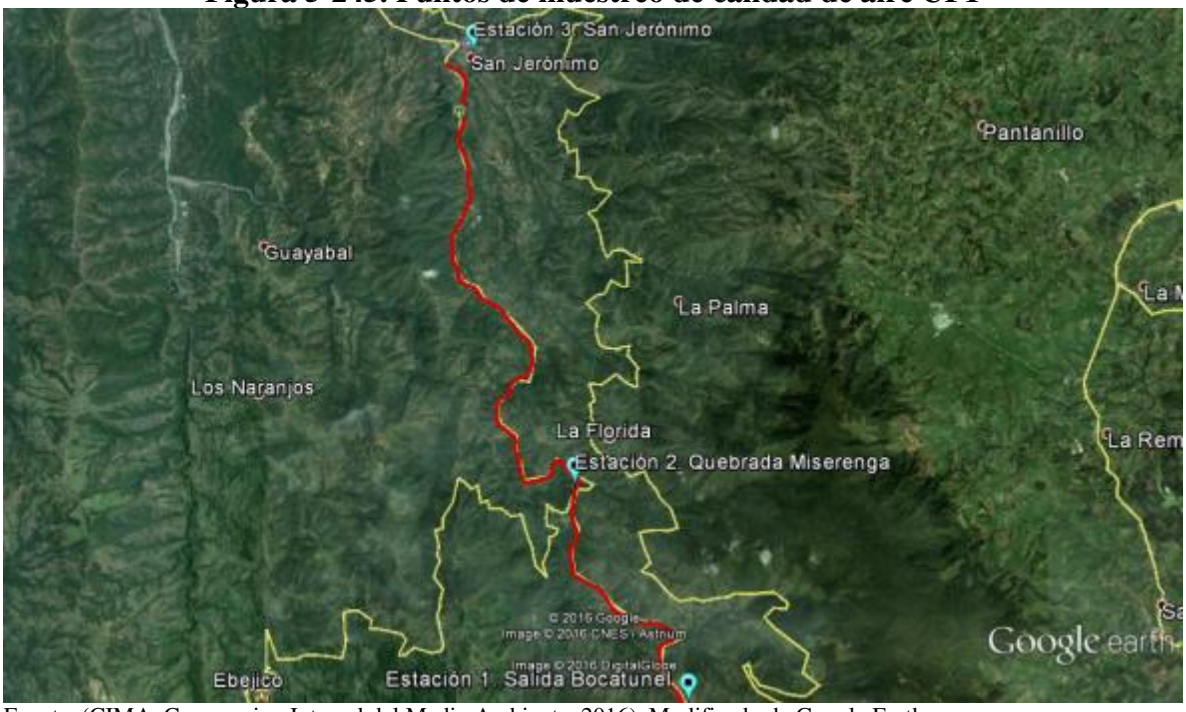
Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Figura 5-244. Puntos de muestreo de calidad de aire UF3



Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016), Modificado de Google Earth

Figura 5-245. Puntos de muestreo de calidad de aire UF1



Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016), Modificado de Google Earth

Se debe tener en cuenta que en cada una de las estaciones se determinó PST, NO_2, SO_2 y CO, y para la realización del muestreo de utilizaron los siguientes equipos.

- Equipos HI-vol
- Trenes de gases para recolección y determinación de NO_2 y SO_2
- Analizador Electroquímico de CO.

Para la localización de las estaciones de calidad del aire se tienen en cuenta los siguientes criterios:

- La distancia entre la estación de calidad del aire y el obstáculo más cercano, debe ser dos veces la altura del obstáculo.
- Los equipos de muestreo pueden estar ubicados mínimo a 1.20 m desde el nivel del suelo.
- No se deben instalar cerca (menos de 10 m) de fuentes fijas puntuales de emisión.
- Tener un radio de 270º libre de restricciones de flujo alrededor del Muestreador.

5.1.10.4.2.1Resultados

Se debe tener en cuenta que las características meteorológicas y climatológicas influyen directamente en la calidad del aire y cualquier medición de esta que se haga, por esto para

el presente estudio se realiza un análisis climático del área evaluada a partir de información recolectada en campo obtenida de la estación meteorológica instalada por CIMA en la estación denominada Cañasgordas.

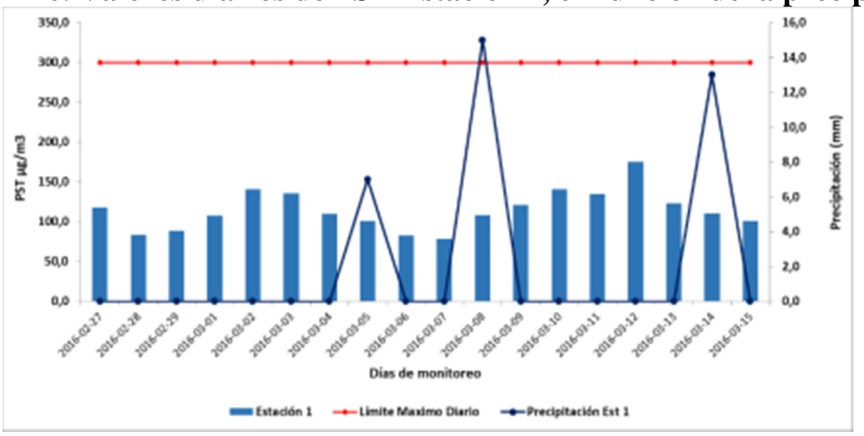
Las variables más relevantes para los estudios de calidad de aire son precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, las cuales se pueden observar en el informe detallado presentado por el laboratorio encargado CIMA en el Anexo F1.

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las tres (5) estaciones durante el periodo comprendido entre el 26 de febrero y 15 de marzo, donde se determinó la concentración de PST, NO_2. SO_2, y CO. Los valores obtenidos se comparan con la norma de calidad del aire establecida en la Resolución 610 de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y desarrollo territorial.

- ✓ Partículas Suspendidas Totales (PST)

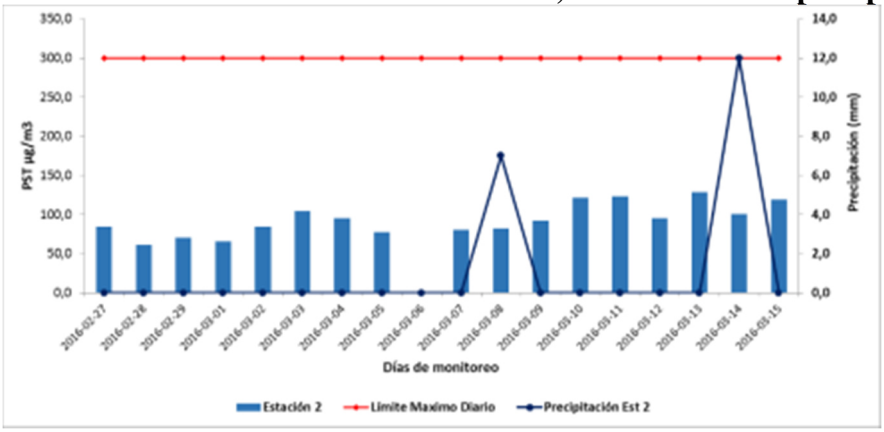
En las figuras que se presentan a continuación se observan las concentraciones diarias obtenidas en cada una de las estaciones de la unidad funcional 3 con respecto a material particulado, se debe tener en cuenta que se invalida la muestra del día 6 de marzo en la estación 2 debido a que se presentaron a fallas en el fluido eléctrico que afectaron el trabajo del motor del equipo PST y también la muestra del día 03 de marzo en la estación 3 por fallas en el motor del equipo PST.

Figura 5-246. Valores diarios de PST Estación 1, en función de la precipitación.



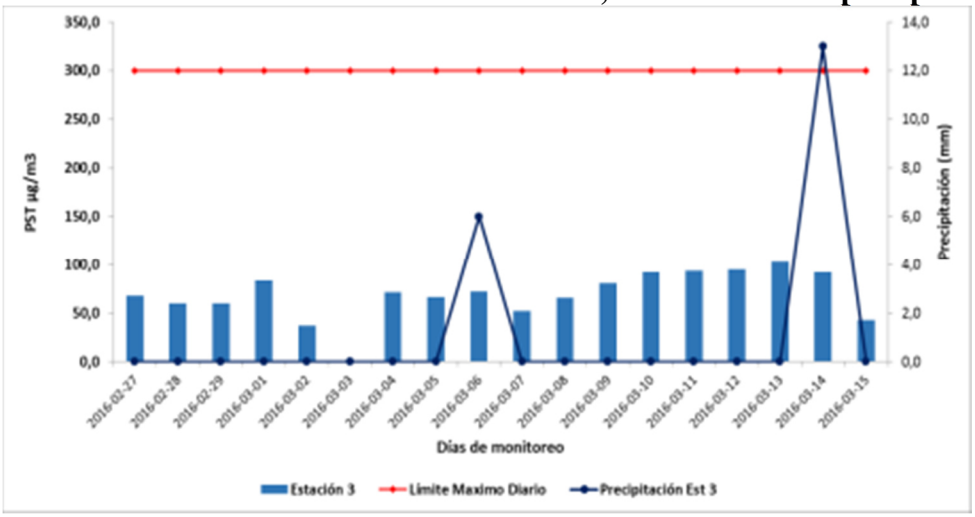
Fuente. (Consultoría Colombiana S.A, 2016)

Figura 5-247. Valores diarios de PST Estación 2, en función de la precipitación.



Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Figura 5-248. Valores diarios de PST Estación 3, en función de la precipitación.



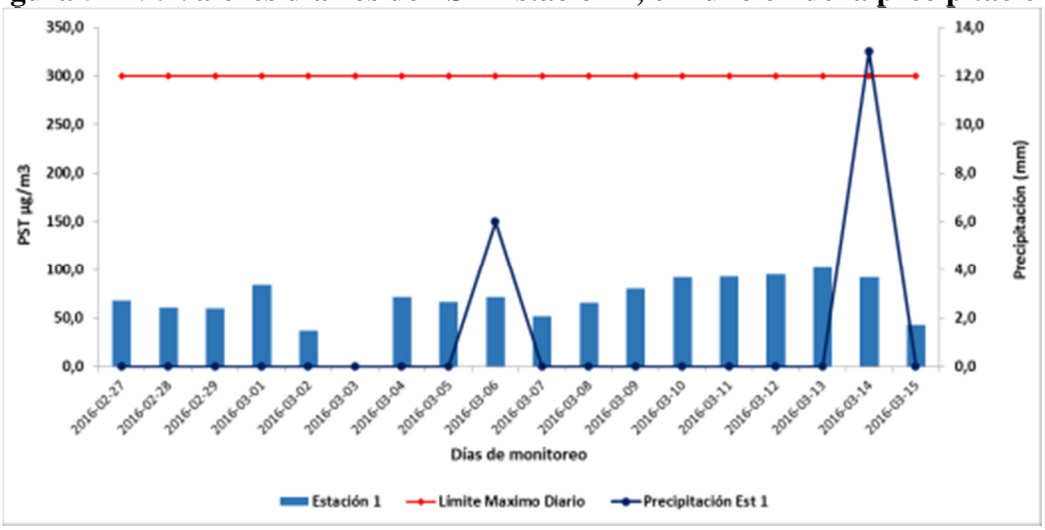
Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

En las gráficas anteriores se observan los resultados diarios que se obtuvieron en cada una de las estaciones de muestreo del parámetro PST, y su comparación con la norma diaria, también se muestra en línea discontinua y con valoración en el eje secundario, las precipitaciones diarias presentadas en el tiempo de muestreo, esto servirá como herramienta de análisis de los resultados obtenidos.

De acuerdo con estas gráficas se puede observar que **ninguna** estación superó la norma para tiempos de exposición diaria de **300 µg/m^3**, el valor más alto reportado fue de **175,5 µg/m^3, 41,5%** por debajo del límite normativo diario, esta concentración se presentó en la estación 1 el día 12 de marzo, se debe resaltar que cerca de esta estación en el momento del muestreo se encontraban realizando obras civiles como la construcción de un puente peatonal y de un andén.

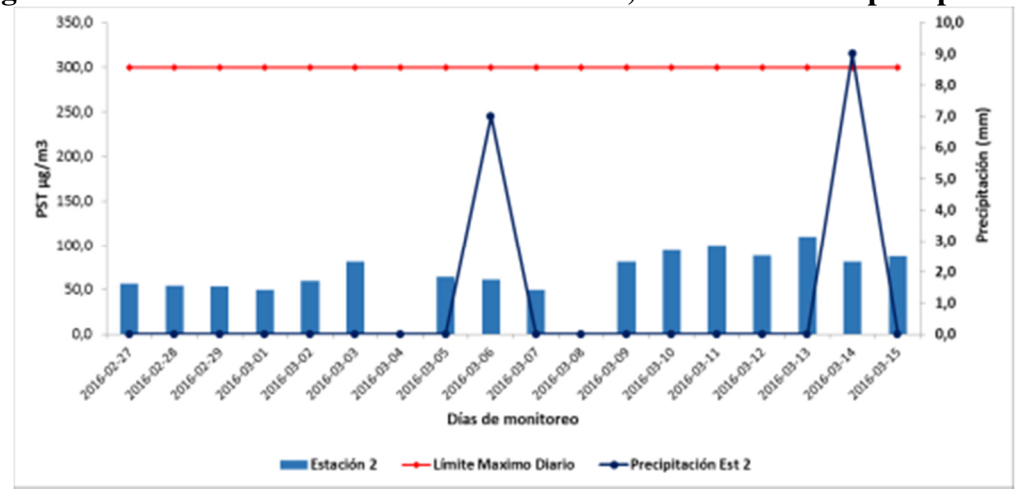
En las figuras que se presentan a continuación se observan las concentraciones diarias obtenidas en cada una de las estaciones de la unidad funcional 1 con respecto a material particulado. Se debe tener en cuenta que se invalida el día 03 de marzo en la estación 1 debido a fallas en el motor del equipo PST, así mismo la muestra de los días 4 y 8 de marzo por fallas en la caja eléctrica y en el motor de los equipos PST.

Figura 5-249. Valores diarios de PST Estación 1, en función de la precipitación.



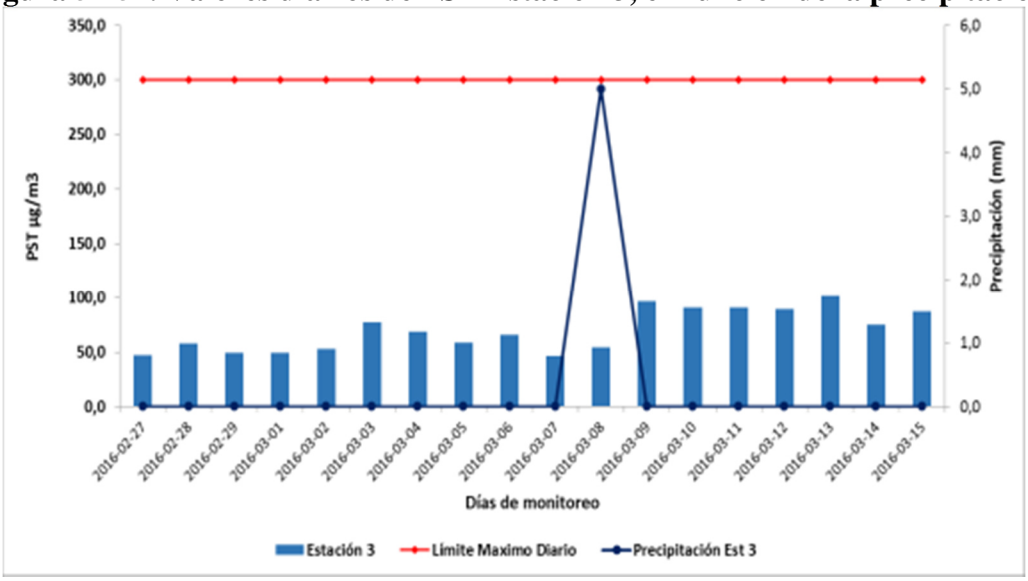
Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Figura 5-250. Valores diarios de PST Estación 2, en función de la precipitación.



Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Figura 5-251. Valores diarios de PST Estación 3, en función de la precipitación.



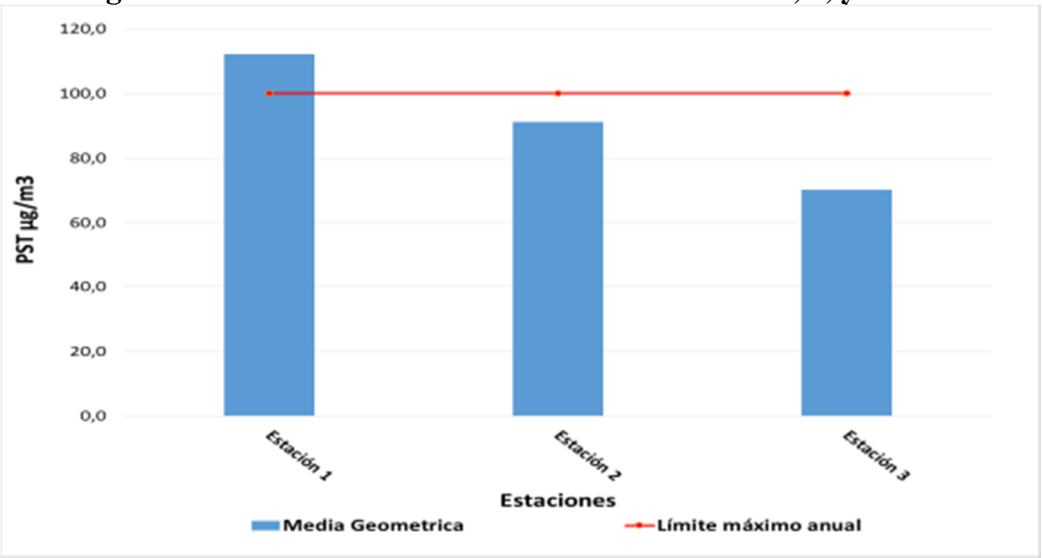
Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

De acuerdo con estas gráficas se puede observar que **ninguna** estación superó la norma para tiempos de exposición diaria de **300 µg/m³**, el valor más alto reportado fue de **110,3 µg/m³, 63,2%** por debajo del límite normativo diario, esta concentración se presentó en la estación 2 el día 13 de marzo, se debe resaltar que esta estación se encuentra ubicada cerca de unas vías en mal estado y con flujo vehicular frecuente.

Durante los 18 días de muestreo se registraron alrededor de 2 eventos de lluvia (mayores a 1 mm) en las estaciones 1 y 2, y 1 evento de lluvia en la estación 3, para cada estación fue instalado un pluviómetro que permitió la medición de la precipitación diaria en cada una de estas. Debido a que se presentaron pocas precipitaciones no es posible observar con claridad la incidencia de estas en las concentraciones.

A continuación se muestra la Figura 5-252 y la Figura 5-253 (para la UF 3 y 1, respectivamente) donde ilustran los valores medios obtenidos para cada una de las estaciones ubicadas en cada uno de los puntos de muestreo y su comparación con la normatividad para tiempos de exposición anuales.

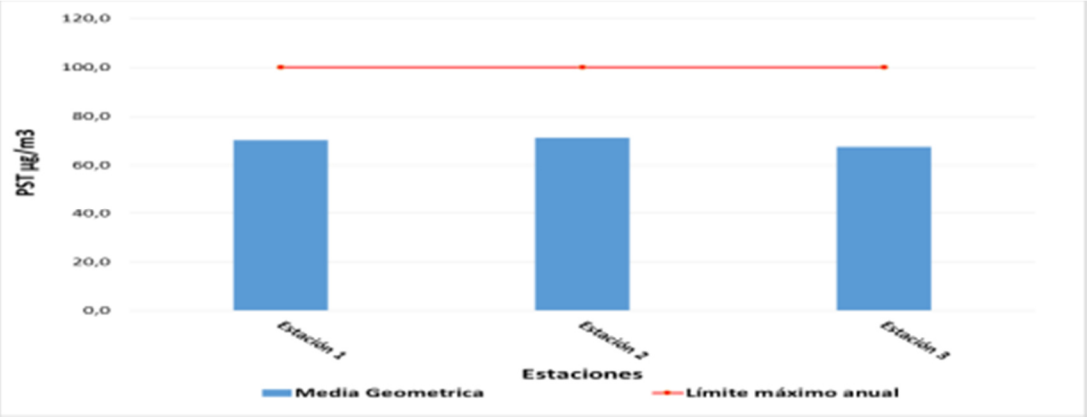
Figura 5-252. Valores medios de PST en estaciones 1, 2, y 3. UF 3



Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

De acuerdo con los resultados anteriores se puede observar que solo la estación 1 se encuentra por encima del límite normativo anual de 100 µg/m^3 en un 12,1%, mientras que las estaciones 2 y 3 se encuentran por debajo del límite máximo anual, esta comparación se hace solo de manera indicativa. Es de resaltar que en las inmediaciones de la estación 1 se encontraban realizando obras civiles durante el periodo de muestreo. La metodología utilizada para este análisis se encuentra en el Anexo F1.

Figura 5-253. Valores medios de PST en estaciones 1, 2, y 3. UF 1



Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

De acuerdo con los resultados anteriores se puede observar que ninguna estación se encuentra por encima del límite normativo anual de 100 µg/m^{3,} siendo el valor medio más alto el reportado por la estación 2, Quebrada Miserenga con un promedio 71,1 µg/m^3. Es de resaltar que la estación 2 se encuentra ubicada cerca de una vía en mal estado que conduce

a las veredas aledañas.

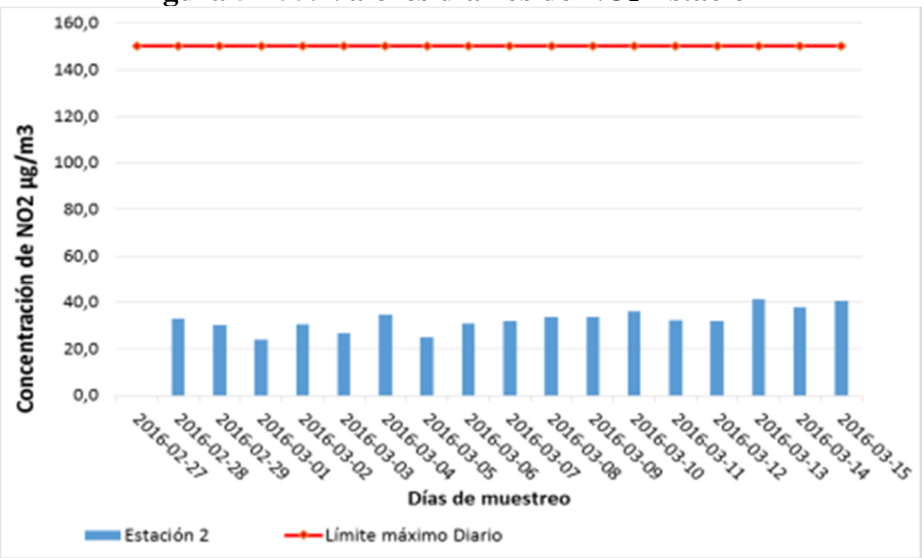
- ✓ Dióxidos de Nitrógeno y Azufre

A continuación se muestra la Figura 5-254, Figura 5-255 y Figura 5-256 para NO_2 y la Figura 5-257, Figura 5-258 y Figura 5-259 para SO_2; las cuales describen el comportamiento de los resultados de los análisis durante los dieciocho (18) días de muestreo para el total de las estaciones en la unidad funcional 3.

Figura 5-254. Valores diarios de NO_2 Estación 1

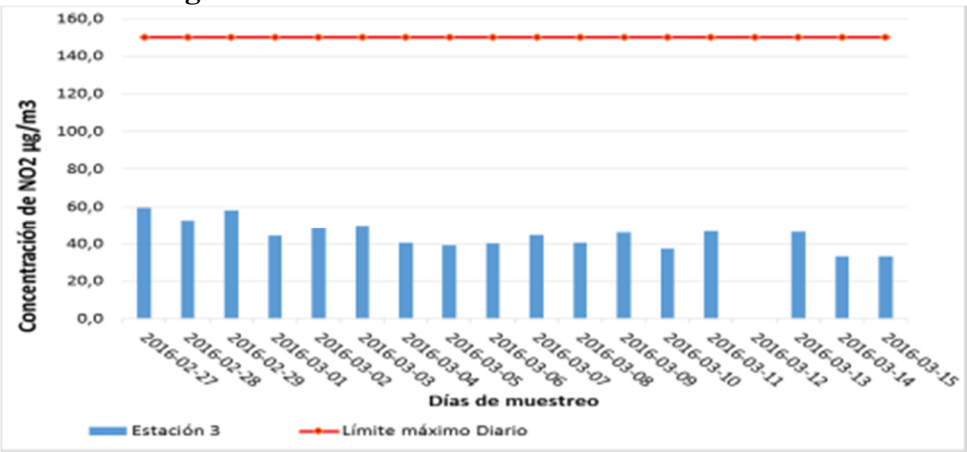
Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Figura 5-255. Valores diarios de NO_2 Estación 2



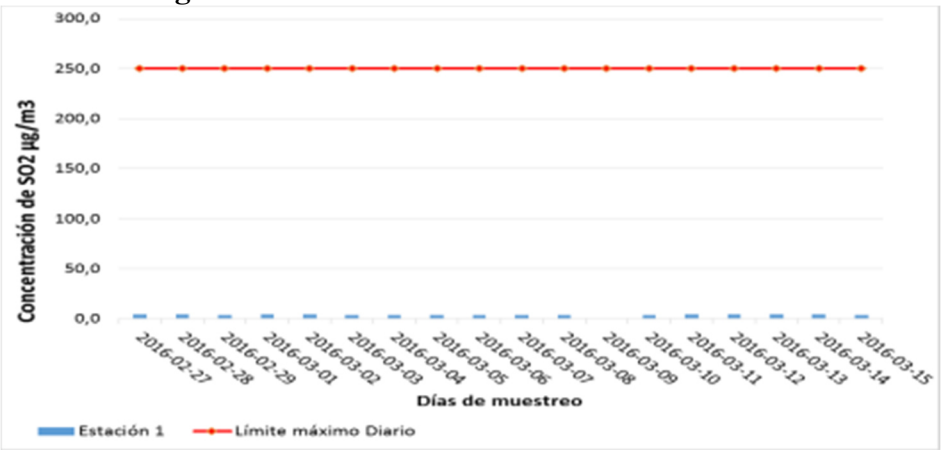
Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Figura 5-256. Valores diarios de NO_2 Estación 3



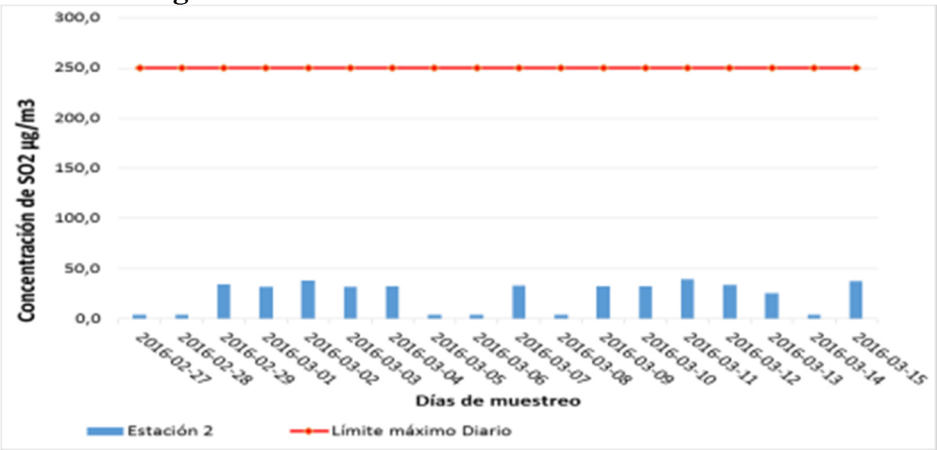
Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Figura 5-257. Valores diarios de SO_2 Estación 1



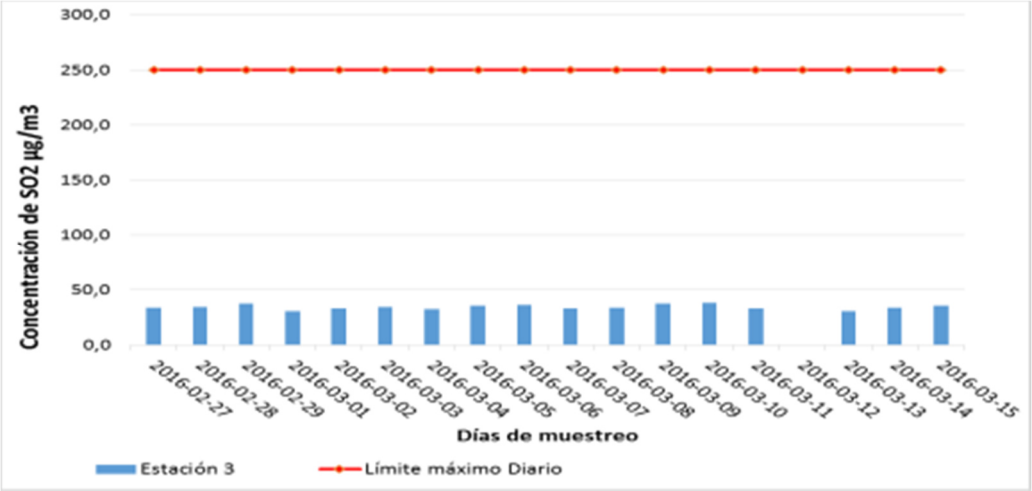
Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Figura 5-258. Valores diarios de SO_2 Estación 2



Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Figura 5-259. Valores diarios de SO_2 Estación 3



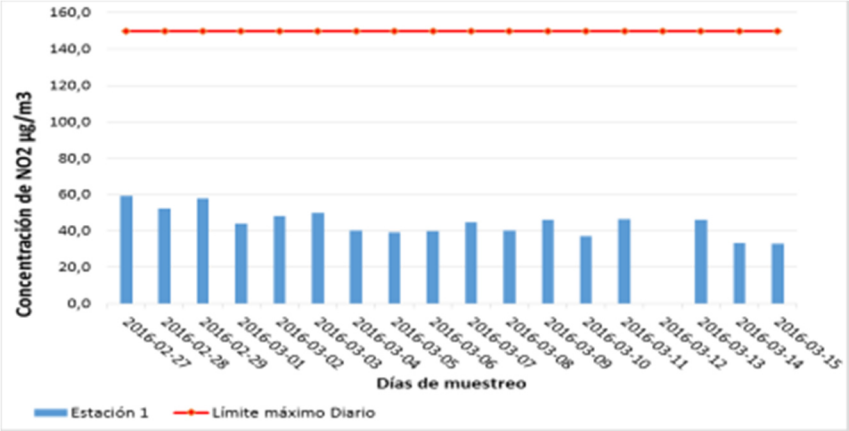
Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Según las figuras anteriores se puedo observar que las concentraciones de dióxidos de nitrógeno y dióxidos de azufre se encuentran por debajo del límite normativo anual establecido por la Resolución 610 del 2010 del MAVDT para tiempos de exposición anuales para estos contaminantes, 100 y 80 $\mu g/m^3$ respectivamente.

En el caso de NO_2 la estación que presenta el promedio más alto es la estación 1 con 62,2 $\mu g/m^3$ 37,8% por debajo de la norma anual (100 $\mu g/m^3$) por otro lado para SO_2 la estación que presenta el promedio más alto es la estación 3 con un valor de 34,4 $\mu g/m^3$, 45,6% por debajo de la norma anual (80 $\mu g/m^3$), comparación que se hace solo de manera indicativa. Se debe tener en cuenta que estos gases se atribuyen a la combustión en motores de los vehículos, motos y transporte pesado que circulan por la zona y que la principal fuente de emisión de las estaciones son el tráfico vehicular de las vías aledañas. La metodologías utilizada por CIMA se encuentran en el Anexo F1.

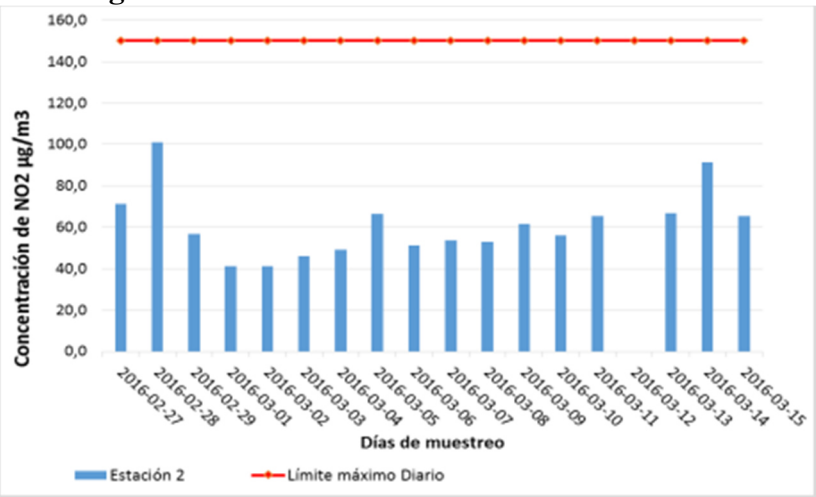
A continuación se muestra la Figura 5-260, Figura 5-261 y Figura 5-262 que muestran el comportamiento para NO_2 de la unidad funcional 1 y, la Figura 5-263, Figura 5-264 y Figura 5-265 para SO_2 para el total de las estaciones en la unidad funcional 1.

Figura 5-260. Valores diarios de NO_2 Estación 1



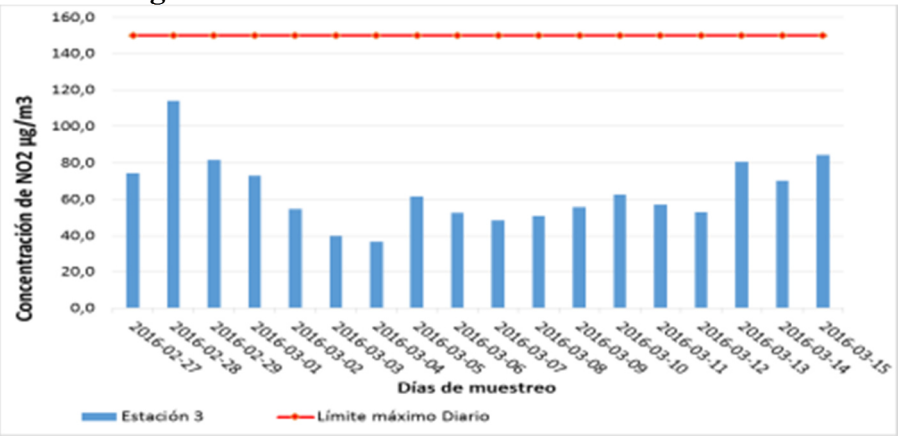
Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Figura 5-261. Valores diarios de NO_2 Estación 2



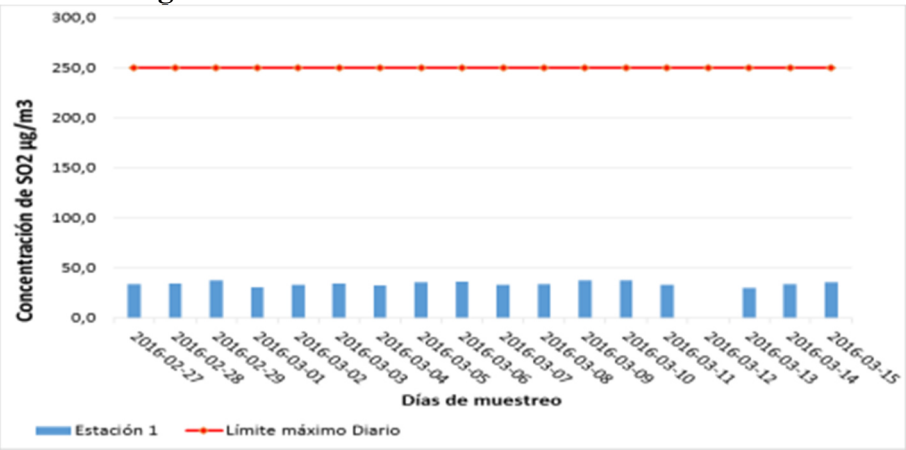
Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Figura 5-262. Valores diarios de NO_2 Estación 3



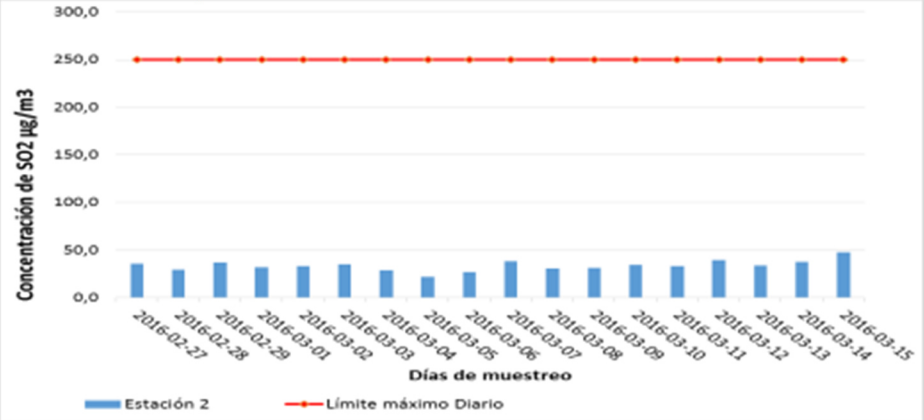
Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Figura 5-263. Valores diarios de SO_2 Estación 1



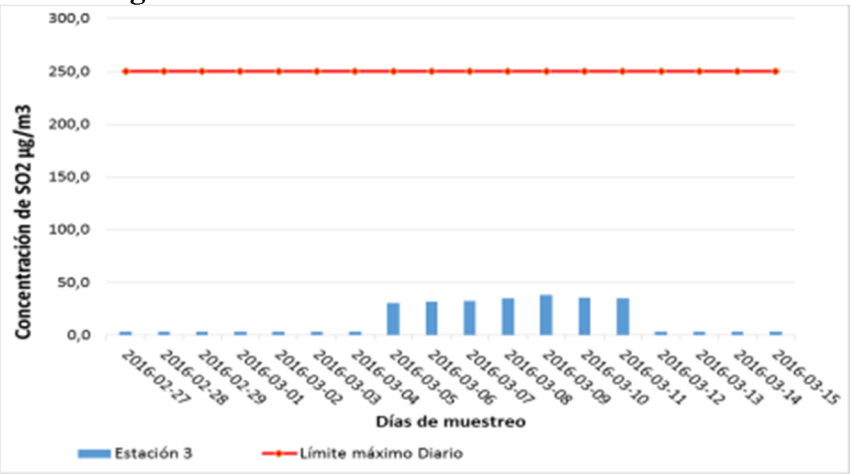
Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Figura 5-264. Valores diarios de SO_2 Estación 2



Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Figura 5-265. Valores diarios de SO_2 Estación 3



Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Según las figuras anteriores se puedo observar que las concentraciones de dióxidos de nitrógeno y dióxidos de azufre se encuentran por debajo del límite normativo anual establecido por la Resolución 610 del 2010 del MAVDT para tiempos de exposición anuales para estos contaminantes, 100 y 80 µg/m^3 respectivamente. En el caso de NO_2 la estación que presenta el promedio más alto es la estación 3 con 63,8 µg/m^3 36,2% por debajo de la norma anual (100 µg/m^3) por otro lado para SO_2 la estación que presenta el promedio más alto es la estación 1 con un valor de 34,4 µg/m^3, 57% por debajo de la norma anual (80 µg/m^3), se debe tener en cuenta que estos gases se atribuyen a la combustión en motores de los vehículos, motos y transporte pesado que circulan por la zona y que la principal fuente de emisión de las estaciones son el tráfico vehicular de las vías aledañas. Como se ha venido indicando, esta comparación con la norma anual se presenta solo de forma indicativa. La metodologías utilizada por CIMA se encuentran en el Anexo F1.

- ✓ Monóxido de Carbono

Las concentraciones de monóxido de carbono evaluado en las estaciones 1, 2, y 3 de la Unidad Funcional 3 y 1, en la totalidad de las estaciones el nivel de concentración de CO fue No Detectable por el equipo (ND), lo que equivale a concentraciones <1 ppm. Todas las concentraciones obtenidas de monóxido se encuentran por debajo del límite de 40.000 µg/m^3, establecido por la Resolución 610 de 2010 del MAVDT para tiempos de exposición de 1 hora en el caso de CO. El reporte de laboratorio puede ser consultado en su totalidad en el informe presentado que se incluye en el Anexo E2

- ✓ Índices de Calidad de Aire (ICA) diario SO_2

A partir de las concentraciones medias de SO_2, calculadas y siguiendo la metodología

sugerida en Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de Calidad de Aire del Protocolo para el Muestreo y Seguimiento de la Calidad del Aire (MAVDT, 2010 Pág. 134), se calcularon los ICAs que se muestran en las tablas Tabla 5-149, Tabla 5-150 y Tabla 5-151 para la Unidad Funcional 3. En Tabla 5-152 se muestra el índice de calidad de aire acumulado o promedio de los 18 días de muestreo, esto se calculó a partir de la concentración promedio del muestreo. Este cálculo solo se determinó para dióxidos de azufre. Para el caso del dióxido de azufre el Cpit (Concentración medida del contaminante) es necesario determinarla en ppm.

Tabla 5-149. Índices de calidad del aire diarios estación 1

ESTACIÓN 1																			
DIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Promedio
Cpit	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001		0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,002
BP hi	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034		0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034
BP lo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
I hi	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50		50	50	50	50	50	50	50
I lo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
ICA pjt	2,2	2,3	2,2	2,3	2,2	2,1	2,2	2,1	2,2	2,2	2,2		2,2	2,2	2,2	2,2	2,3	2,2	2,2

Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Tabla 5-150. Índices de calidad del aire diarios estación 2

ESTACIÓN 2																			
DIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Promedio
Cpit	0,002	0,002	0,013	0,012	0,015	0,012	0,012	0,002	0,001	0,013	0,001	0,012	0,012	0,015	0,013	0,010	0,002	0,014	0,009
BP hi	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034
BP lo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I hi	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
I lo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ICA pjt	2,4	2,4	19,3	18,0	21,5	17,8	18,2	2,3	2,2	18,6	2,1	18,2	18,3	22,0	19,0	14,5	2,3	21,1	13,3

Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Tabla 5-151. Índices de calidad del aire diarios estación 3

ESTACIÓN 3																			
DIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Promedio
Cpit	0,013	0,013	0,014	0,012	0,013	0,013	0,012	0,014	0,014	0,013	0,013	0,014	0,014	0,013		0,012	0,013	0,014	0,013
BP hi	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034		0,034	0,034	0,034	0,034
BP lo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0
I hi	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50		50	50	50	50
I lo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0
ICA pjt	19,0	19,3	21,1	17,3	18,7	19,5	18,3	20,0	20,5	18,7	19,0	21,1	21,3	18,8		17,1	19,0	20,0	19,3

Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Tabla 5-152. Índices de calidad de Aire acumulados en los puntos evaluados.

	Est 1	Est 2	Est 3
Cpit	0,002	0,009	0,013
BP hi	0,034	0,034	0,034
BP lo	0	0	0
I hi	50	50	50
I lo	0	0	0
ICA pjt	2,2	13,3	19,3

Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Este indicador permite establecer el estado de la calidad del aire de acuerdo al rango establecido para cada contaminante criterio, asociando rangos de valores a una tabla de colores. Valores ubicados en el rango **0-50 (Verde)** indican buena calidad del aire, valores entre **51 y 100 (Amarillo)** reflejan que la calidad del aire es moderada, valores entre 101 y 150 (Anaranjado) reflejan una calidad del aire dañina a la salud para grupos sensibles, valores entre 151 y 200 (Rojo) son reflejo de una calidad del aire dañina a la salud, valores entre 201 y 300 (Morado) representan una calidad del aire muy dañina a la salud y finalmente, valores entre 301 y 500 (Marrón) indican una calidad del aire peligrosa.(Tabla 5-153).

Tabla 5-153. Rangos en los que han sido clasificados los valores del ICA de acuerdo con el color asignado para facilitar su interpretación

Rangos *ICA*	Colores
0 <□ *ICA* □□50	Verde
51 □□*ICA* □□100	Amarillo
101 □□ *ICA* □□150	Anaranja
151 □□ *ICA* □□200	Rojo

201 □□ *ICA* □□300	Morado
301 □□ *ICA* □□500	Marrón (usualmente no es necesario mostrarlo)

Fuente: PROTOCOLO PARA EL MUESTREO Y SEGUIMIENTO DE LACALIDAD DEL AIRE – MAVDT

Es así como se determina que en la zona de estudio de la UF 3 la calidad del aire tiene un índice "BUENO" Según el parámetro Dióxido de Azufre ya que en las tres estaciones para todos los días de muestreo se reportaron valores ICA por debajo de 50.

Así mismo y con la misma metodología se calcularon los ICAs que se muestran en las tablas Tabla 5-149, Tabla 5-150 y Tabla 5-151 para la Unidad Funcional 1. En Tabla 5-152 se muestra el índice de calidad de aire acumulado o promedio de los 18 días de muestreo, esto se calculó a partir de la concentración promedio del muestreo.

Tabla 5-154. Índices de calidad del aire diarios estación 1

ESTACIÓN 1																			
DIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Promedio
Cpit	0,0129	0,0132	0,0143	0,0117	0,0127	0,0133	0,0124	0,0136	0,0140	0,0127	0,0129	0,0144	0,0145	0,0128		0,0116	0,0129	0,0136	0,0131
BP hi	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034		0,034	0,034	0,034	0,034
BP lo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0
I hi	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50		50	50	50	50
I lo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0
ICA pjt	18,97	19,35	21,08	17,25	18,71	19,49	18,25	20,01	20,55	18,74	19,03	21,10	21,29	18,78		17,10	18,99	20,02	19,34

Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Tabla 5-155. Índices de calidad del aire diarios estación 2

ESTACIÓN 2																			
DIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Promedio
Cpit	0,0137	0,0112	0,0142	0,0121	0,0126	0,0134	0,0109	0,0084	0,0103	0,0145	0,0117	0,0120	0,0131	0,0127	0,0150	0,0128	0,0143	0,0181	0,0128
BP hi	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034
BP lo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I hi	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
I lo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ICA pjt	20,19	16,45	20,83	17,74	18,55	19,69	16,04	12,37	15,08	21,30	17,18	17,71	19,23	18,64	22,06	18,84	21,06	26,61	18,86

Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Tabla 5-156. Índices de calidad del aire diarios estación 3

ESTACIÓN 3																			
DIA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Promedio
Cpit	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014	0,0014	0,0117	0,0123	0,0124	0,0134	0,0145	0,0136	0,0134	0,0013	0,0014	0,0013	0,0014	0,0059
BP hi	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034
BP lo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
I hi	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
I lo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ICA pjt	2,08	2,13	2,04	2,00	2,05	2,06	1,99	17,15	18,02	18,24	19,75	21,37	20,01	19,71	1,93	1,99	1,95	2,02	8,69

Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Tabla 5-157. Índices de calidad de Aire acumulados en los puntos evaluados.

	Est 1	Est 2	Est 3
Cpit	0,0131	0,0128	0,0059
BP hi	0,034	0,034	0,034
BP lo	0	0	0
I hi	50	50	50
I lo	0	0	0
ICA pjt	19,34	18,86	8,69

Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

De acuerdo las tablas anteriores se determina que en la zona de estudio la calidad del aire tiene un índice "BUENO" Según el parámetro Dióxido de Azufre ya que en las tres estaciones para todos los días de muestreo se reportaron valores ICA por debajo de 50 para la unidad funcional 1.

Finalmente se puede concluir a partir de todo el análisis de monitoreo de calidad de aire que para la Unidad Funcional 3 y 1 durante los 18 días de muestreo en la zona estudiada, se estuvo muy por debajo de los estados excepcionales definidos en la norma de referencia, por tanto no es necesario considerar declarar ningún nivel de prevención, alerta o emergencia.

5.1.10.5 **Ruido**

La contaminación generada por ruido se refiere a cualquier emisión de sonido que afecte adversamente la salud o seguridad de los seres humanos, la propiedad o el disfrute de la misma. Así mismo se tiene en cuenta que el sonido es la sensación auditiva excitada por una perturbación física en un medio, con características medibles que tienen importancia para el análisis de la audición, dentro de las más importantes se destacan la frecuencia y la intensidad, que puede producir efectos adversos sobre la salud e interferir con la comunicación, el desempeño laboral y el descanso; se pueden identificar tres tipos de ruido:

Continuo o estable: Es aquel que no presenta oscilaciones de intensidad rápidas y repentinas mayores de dos (2) decibeles.

Intermitente: Presenta oscilaciones del nivel de presión sonora de más de dos (2) decibeles, continuas y sin periodos de estabilidad.

Impacto: Presenta fluctuaciones bruscas del nivel de presión sonora, con intervalos mayores de un (1) segundo entre una y otra.

Con el fin de dar cumplimiento a lo establecido en la resolución 751 de 2015 relacionado con el elemento ambiental de ruido, se realizó un inventario de las fuentes generadoras de Ruido y se programó una campaña de monitoreo de calidad de presión sonora en las zonas que se consideraron de interés.

5.1.10.5.1 Identificación de Fuentes Generadoras de Ruido

Como se mencionó anteriormente la emisión de ruido hace referencia a la presión sonora que generada en cualquier condición, trasciende al medio ambiente o al espacio público (Resolución 627 de 2006). De acuerdo a esto se realizó la identificación de las fuentes de generación de ruido existentes tanto naturales como artificiales en la zona de estudio, ya que el ruido puede ocasionar efectos adversos sobre la salud, el desempeño laboral y el

descanso de la población afectada.

Durante el mes de febrero del 2016, se realizó la identificación de fuentes que estuvieran generando ruido en el área de influencia de las unidades funcionales 3 y 1 Túnel de Occidente y San Jerónimo. A continuación se presenta la identificación, descripción de cada tipo de fuente de contaminación identificada.

5.1.10.5.1.1 Descripción de fuentes generadoras de ruido

Centros Poblados: son fuente de emisión de ruido, por las diferentes actividades diarias que se concentran en la zona, en el área de influencia del proyecto, se encontraron, restaurantes, lugares recreativos y de turismo y pequeñas construcciones como remodelación de fincas en los cuales permanecen personas, equipos, maquinaria y demás, lo cual provoca variación en los niveles de presión sonora.

Fotografía 5-136. Lugares turísticos y de recreación

Fuente. (Consultoría Colombiana S.A, 2016)

Fotografía 5-137. Restaurantes y estacionamiento de vehículos sobre la vía

Fuente. (Consultoría Colombiana S.A, 2016)

Fotografía 5-138. Construcción de viviendas

Fuente. (Consultoría Colombiana S.A, 2016)

- **Tránsito vehicular:** se considera la movilización permanente de vehículos particulares, transporte público, vehículos de carga pesada y motocicletas sobre la vía existente en el área de estudio, generando cambios en los niveles de presión sonora, aumentando estos los fines de semana debido a la gran población que se traslada de Medellín a San Jerónimo.

Fotografía 5-139. Tránsito de vehículos

Fuente. (Consultoría Colombiana S.A, 2016)

Fotografía 5-140. Tránsito de vehículos particulares y de carga pesada.

Fuente. (Consultoría Colombiana S.A, 2016)

- **Ubicación de los asentamientos Poblacionales, Viviendas y la Infraestructura Social**

Los asentamiento poblacionales que se ubican en toda la zona del estudio para la construcción de la segunda calzada entre el túnel de Occidente - San Jerónimo unidad funcional 1 y 3 del proyecto autopista al mar 1. Tabla 5-158.

Tabla 5-158. Asentamientos identificados

Municipio	Unidad territorial	Tipo de asentamiento
Medellín	La Aldea	Nucleado
	La Cuchilla	Nucleado
	La Frisola	Disperso
	La Palma	Nucleado
	La Sucia	Disperso
	La Volcana - Guayabal	Disperso
	Naranjal	Disperso
	Palmitas	Nucleado
	Potrero - Miserango	Disperso
	Urquita	Disperso
San Jerónimo	Berrial	Nucleado
	El Calvario	Nucleado
	Llano San Juan	Disperso
	Loma Hermosa	Disperso
	Mestizal	Disperso
	Pesquinal	Disperso
	Piedra Negra	Nucleado
	Quimbayo	Nucleado

Fuente. (Consultoría Colombiana S.A, 2016)

5.1.10.5.2 Monitoreo de Generación de Ruido

Con el fin de dar cumplimiento a lo establecido en la Guía Ambiental para proyectos de infraestructura – Subsector vial, entre los días 25 de febrero y el 16 de marzo de 2016, en horario diurno y nocturno se llevó a cabo el monitoreo de ruido ambiental en el área circundante al proyecto de la construcción de la segunda calzada; específicamente en la unidad funcional 1 y 3 – comprendido en desde el túnel de Occidente y San Jerónimo. Para la unidad funcional 3 se tomaron tres puntos de monitoreo y para la unidad funcional 1 se tomaron 5 puntos.

El monitoreo de ruido se realizó siguiendo el procedimiento estipulado en los Capítulos II y III del Anexo 3 de la Resolución 627 de 2006 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, los cuales corresponden a las normas ANSI S1. Esta actividad fue desarrollada por el laboratorio Corporación Integral del Medio Ambiente -CIMA el cual cuenta con acreditación del IDEAM vigente para el desarrollo de esta actividad. A continuación se presentan los aspectos más relevantes del informe presentado por el laboratorio, el cual se incluye en el Anexo F2_Ruido del presente documento.

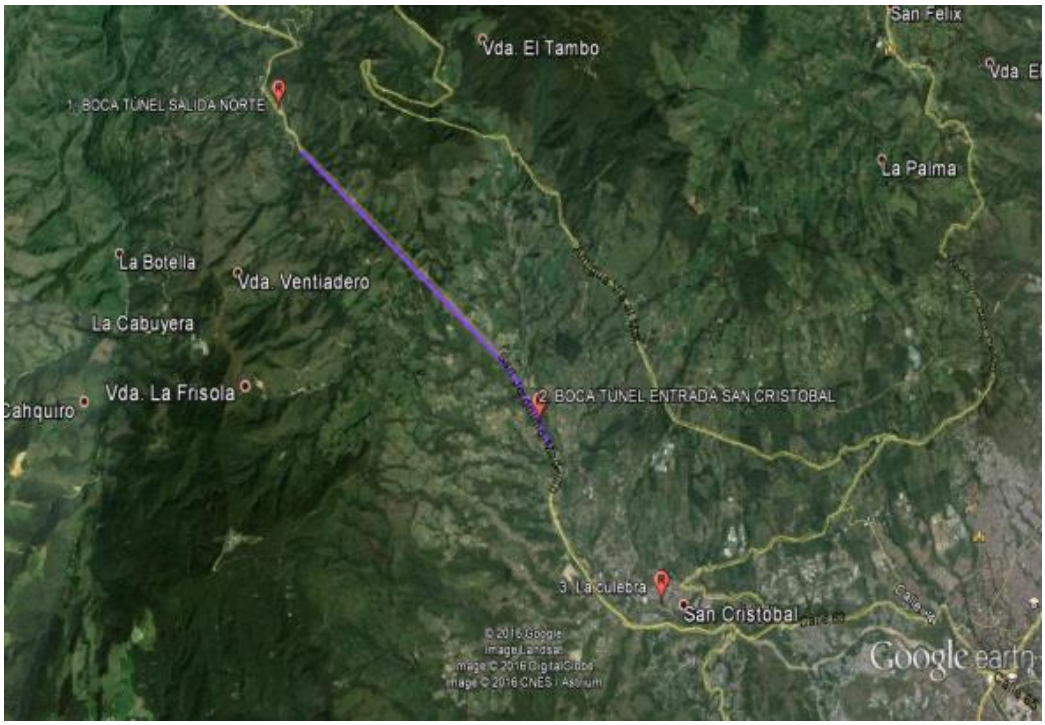
A continuación en la Tabla 5-159 se observa la localización de los puntos de monitoreo para la dos unidades funcionales, así mismo en la Figura 5-266 y Figura 5-267 se muestran la localización espacialmente.

Tabla 5-159 Puntos de medición de ruido ambiental

Punto	Nombre	Coordenadas Geográficas		Unidad Funcional
		Este	Norte	
1	Boca Túnel Salida norte	1153445,9	1191822,0	3
2	Boca túnel entrada San Cristóbal	1157707,5	1188071,1	3
3	La Culebra	1159527,1	1186160,8	3
1	San Jerónimo	1149310,6	1204362,4	1
2	Los Arrayanes	1149121,3	1200959,7	1
3	Cruce vía (Quebrada Miserenga)	1151705,6	1195630,1	1
4	La Aldea	1152236,1	1193332,4	1
5	Boca túnel salida norte	1153445,9	1191822,0	1

Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Figura 5-266. Localización cartográfica de los puntos de medición de ruido ambiental UF 3



Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016). Modificado de Google Earth

Figura 5-267 Localización cartográfica de los puntos de medición de ruido ambiental UF 1

Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016), Modificado de Google Earth

Para el estudio de ruido ambiental, se realiza una calibración acústica del micrófono del sonómetro y luego se ubica el micrófono a una altura de 4,00 m, las mediciones se toman empleando la escala de ponderación A (dBA) y en respuesta lenta (slow). Cada medición, debe constar de cinco mediciones parciales distribuidas en tiempos iguales, cada una de las cuales debe tener una posición orientada del micrófono, norte, sur, este, oeste y vertical.

En total se evaluaron para el estudio en horarios diurno y nocturno y en jornada hábil y no hábil, el total de puntos de ruido ambiental, los aspectos que se tuvieron en cuenta para el desarrollo del monitoreo fueron (Tabla 5-160):

Tabla 5-160. Datos generales de la medición

PARÁMETROS DEL ESTUDIO	
# Loc Quest	El número de archivo en la memoria del sonómetro QUEST
L1 (Leq),dBA	Nivel continuo equivalente de ruido en el periodo de medición (resultado de la medición)
Lmax, dBA	Máximo nivel puntual de ruido encontrado dentro del periodo de medición.
Lmin. dBA	Mínimo nivel puntual de ruido encontrado dentro del periodo de medición.
L10.dBA	Nivel Sonoro que se sobrepasa durante el 10% del tiempo de medición.
L90.dBA	Nivel Sonoro que se sobrepasa durante el 90% del tiempo de medición.
Horarios	Las lecturas diurnas se realizaron entre las 7:01 y las 21:00, y las nocturnas entre las 21:01 y las 7:00, cumpliendo así con los horarios establecidos en la normatividad.

Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Los equipos utilizados para la medición de emisión de ruido ambiental corresponden a sonómetros Marca QUEST Sound PRO (Tabla 5-161), para la calibración de los equipos se emplearon calibradores acústicos marca Quest QC; ambos equipos cuentan con los certificados de calibración vigente al momento de desarrollar las mediciones.

Tabla 5-161. Equipos utilizados para la medición

CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL EQUIPO		
	Sonómetro Quest SOUNDPRO SE-DL / BLI050009 RU_016_EM	
	Clase	Tipo 1.
	Precisión	± 1dBA
	Sensibilidad	Sensibilidad de micrófono independiente de la frecuencia.
	Funciones	Lectura en tiempo real con analizador frecuencias en tercios de octava.
	Características Generales	Filtros de ponderación de frecuencia A, B, C y Z. Modos de respuesta rápida, lenta, impulsos y picos. Determinación del nivel equivalente, máximo y mínimo. Provisto con cable de extensión de micrófono.
	Normatividad	Cumple norma IEC 61672-1:2002
	Certificados	Certificado de calibración vigente adjunto en el ***Anexo 1***

	Calibrador acústico Quest QC-20 QOI040026	
	Nivel de calibración	94 dB y 114 dB.
	Normatividad	Cumple norma IEC 60942:2003.
	Certificados	Certificado de calibración vigente, adjunto en el ***Anexo 1***
	SOFTWARE	
	Referencia	QuestSuite® *Professional II*
	Versión	4.2.2296
	Características	Descarga datos de los estudios realizados por el sonómetro
	Trípode	
	Características Generales	Ajustable a altura de cuatro (4) metros. Capacidad de giro de 360 grados. Desarmable. Orientación variable.

Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

En el Anexo F2, se presenta el informe detallado de los resultados y los soportes correspondientes, entregados por CIMA.

Resultados

Los resultados del monitoreo se compararon con los valores de referencia tomados de la Resolución 627 de 2006 del actual Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (antes MAVDT), los cuales corresponden a los indicados en el Capítulo II, Tabla 2 de dicha resolución. (Tabla 5-162). Para fines del presente estudio y de acuerdo con los usos del suelo actual en las zonas donde se ubicaron los puntos de monitoreo, se tuvieron en cuenta para el diagnóstico del ambiente por ruido los valores indicados son:

-Sector B Tranquilidad y Ruido Moderado, Parques en zonas urbanas diferentes a los parques mecánicos al aire libre (UF 1),

-Sector C. Ruido Intermedio Restringido, Subsector de Zonas con otros usos relacionados, como parques mecánicos al aire libre, áreas destinadas a espectáculos públicos al aire libre, vías troncales, autopistas, vías arterias, vías principales. (UF 1 y 3)

-Sector C: Ruido Intermedio Restringido, Subsectores, Zonas con usos permitidos comerciales, como centros comerciales, almacenes, locales o instalaciones de tipo comercial, talleres de mecánica automotriz e industrial, centros deportivos y recreativos, gimnasios, restaurantes, bares, tabernas, discotecas, bingos, casinos (UF 3). Ver Tabla 5-162.

Tabla 5-162 Estándares máximos permisibles de niveles de ruido ambiental en dBA

SECTOR	SUBSECTOR	ESTÁNDARES MÁXIMOS PERMISIBLES DE NIVELES DE	
		DÍA	NOCHE
Sector A. Tranquilidad y Silencio	Hospitales, bibliotecas, guarderías, sanatórios, hogares geriátricos.	55	45
Sector B. Tranquilidad y Ruido Moderado	Zonas residenciales o exclusivamente destinadas para desarrollo habitacional, hotelería y hospedajes.	65	50
	Universidades, colegios, escuelas, centros de estudio e investigación.		
	Parques en zonas urbanas diferentes a los parques mecánicos al aire libre.		
Sector C. Ruído Intermédio Restringido.	Zonas con usos permitidos industriales, como industrias en general, zonas portuarias, parques industriales, zonas francas.	75	70
	Zonas con usos permitidos comerciales, como centros comerciales, almacenes, locales o instalaciones de tipo comercial, talleres de mecánica automotriz e industrial, centros deportivos y recreativos, gimnasios, restaurantes, bares, tabernas, discotecas, bingos, casinos.	70	55
	Zonas con usos permitidos de oficinas.	65	50
	Zonas con usos institucionales.		
	Zonas con otros usos relacionados, como parques mecánicos al aire libre, áreas destinadas a espectáculos públicos al aire libre, áreas destinadas a espectáculos públicos al aire libre, vías troncales, autopistas, vías arterias, vías principales.	80	70
Sector D. Zona Suburbana o Rural de Tranquilidad y Ruido Moderado	Residencial suburbana.	55	45
	Rural habitada destinada a explotación agropecuaria.		
	Zonas de Recreación y descanso, como parques naturales y reservas naturales.		

Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016), por Resolución 627 del 07 de Abril de 2006, Emitida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Datos meteorológicos

Las características meteorológicas y climatológicas presentadas en la Tabla 5-163 para día hábil y en la Tabla 5-164 para día no hábil influyen en las mediciones de ruido ambiental, entre las variables más significativas se encuentran la velocidad del viento y la

precipitación, por esto para el presente estudio se muestra a continuación la variación de las variables meteorológicas más relevantes a partir de información medida durante el tiempo de monitoreo.

abla 5-163 Principales variables meteorológicas – Tiempo ejecución estudio, día hábil.

Fecha	Hora	Velocida d del Viento	Temperatur a	Humedad Relativa	Fecha	Hora	Velocida d del Viento	Temperatur a	Humedad Relativa
11/03/201 6	5:52:16 p. m.	0,8	28,5	46,9	11/03/201 6	12:59:22 a. m.	1,2	22,5	65,3
16/03/201 6	10:28:0 1 a. m.	1,5	27,8	65,4	11/03/201 6	12:27:50 a. m.	1,5	27,1	71,2
16/03/201 6	1:06:57 p. m.	1,3	27,2	65,1	10/03/201 6	11:58:00 p. m.	1,1	23,6	68,5
25/02/201 6	8:45:37 a. m.	0,1	29,5	65,2	11/03/201 6	2:44:38 a. m.	1,1	25,2	72,5
11/03/201 6	6:27:16 p. m.	1,2	29	52,7	11/03/201 6	2:18:33 a. m.	1,3	24,7	71,7
11/03/201 6	5:03:26 p. m.	1,7	32,8	48,9	11/03/201 6	1:47:18 a. m.	1,2	20,2	80,9
11/03/201 6	5:27:34 p. m.	1,4	30,7	47,4	11/03/201 6	1:22:35 a. m.	1,1	22,2	73,8
11/03/201 6	5:52:16 p. m.	0,8	28,5	46,9	11/03/201 6	12:59:22 a. m.	1,2	22,5	65,3

Integral del Medio Ambiente, 2016)

Tabla 5-164 Principales variables meteorológicas – Tiempo ejecución estudio, día no hábil.

No. punto	Nombre del punto	UF	Fecha	Hora	Velocidad del Viento	Temperatura	Humedad Relativa	Fecha	Hora	Velocidad del Viento	Temperatura	Humedad Relativa
1	Boca Túnel Salida Norte	3	28/02/2016	8:47:04 a. m.	0,8	27,2	56,2	28/02/2016	4:21:50 a. m.	0,1	23,3	64,9
2	Boca Túnel Entrada San Cristóbal	3	28/02/2016	8:16:25 a. m.	1,5	25,2	58,2	28/02/2016	5:21:29 a. m.	0,1	23	64,5
3	La Culebra	3	28/02/2016	7:26:15 a. m.	0,2	24,6	60,3	28/02/2016	6:20:38 a. m.	0,1	26,1	53,5
1	San Jerónimo	1	28/02/2016	10:19:45 a. m.	0,3	33,1	42,9	28/02/2016	2:40:57 a. m.	0,2	31,2	52,8
2	Los Arrayanes	1	28/02/2016	9:55:51 a. m.	0,8	30,3	55,3	28/02/2016	3:07:26 a. m.	0,3	31,4	31,7
3	Cruce Vía (Quebrada Miserenga)	1	28/02/2016	9:28:50 a. m.	2,3	27,1	58,4	28/02/2016	3:36:17 a. m.	0,4	24,7	65,3
4	La Aldea	1	28/02/2016	9:07:39 a. m.	0,3	25,8	61,7	28/02/2016	3:58:07 a. m.	0,2	25,1	62,1
5	Boca Túnel Salida Norte	1	28/02/2016	8:47:04 a. m.	0,8	27,2	56,2	28/02/2016	4:21:50 a. m.	0,1	23,3	64,9

Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

A continuación se presenta una descripción puntual de las condiciones generales de cada uno de los puntos donde se realizó la toma de muestra Tabla 5-165 y posteriormente se analizaran cada una de las variables.

Tabla 5-165 Descripción de puntos de monitoreo

No.	NOMBRE DEL PUNTO	UF	REGISTRO FOTOGRAFICO	DIA HABIL				DIA NO HABIL			
				DIURNO		NOCTURNO		DIURNO		NOCTURNO	
				FUENTES DE EMISIÓN EXTERNAS		FUENTES DE EMISIÓN EXTERNAS		FUENTES DE EMISIÓN EXTERNAS		FUENTES DE EMISIÓN EXTERNAS	
				Fuente Identificada en campo	Tipo de fuente	Fuente Identificada en campo	Tipo de fuente	Fuente Identificada en campo	Tipo de fuente	Fuente Identificada en campo	Tipo de fuente
1	Boca Túnel Salida Norte	3		Paso de vehículos, motos y de volquetas	Antropogénica	Paso de Vehículos	Antropogénica	Paso de vehículos, motos y tracto camiones	Antropogénica	Paso de tracto camión y paso ocasional de vehículos	Antropogénica
2	Boca Túnel Entrada San Cristóbal	3		Tránsito de Vehículos de Carga pesada con mucha frecuencia	Antropogénica	Paso de Vehículos	Antropogénica	Trafico detenido, ruido de motos que pueden circular	Antropogénica	paso de bus, volquetas, tracto camión y motos	Antropogénica
										Sonido proveniente de una quebrada cercana	Natural
3	La Culebra	3		Paso frecuente de Vehículos y de personas	Antropogénica	Paso de Vehículos, paso de personas	Antropogénica	Paso de Vehículos pequeños y de motos, sonido campana Iglesia	Antropogénica	Sonido de campanas de la iglesia y sonido proveniente del comercio de la zona	Antropogénica

No.	NOMBRE DEL PUNTO	UF	REGISTRO FOTOGRAFICO	DIA HABIL				DIA NO HABIL			
				DIURNO		NOCTURNO		DIURNO		NOCTURNO	
				FUENTES DE EMISIÓN EXTERNAS		FUENTES DE EMISIÓN EXTERNAS		FUENTES DE EMISIÓN EXTERNAS		FUENTES DE EMISIÓN EXTERNAS	
				Fuente Identificada en campo	Tipo de fuente	Fuente Identificada en campo	Tipo de fuente	Fuente Identificada en campo	Tipo de fuente	Fuente Identificada en campo	Tipo de fuente
1	San Jerónimo	1		Sonido proveniente del comercio de la zona, Tráfico de vehículos	Antropogénica	Paso de motos, sonido producido por la campana de la iglesia	Antropogénica	Paso regular de motos y automóviles	Antropogénica	Campana de iglesia, paso constante de motos	Antropogénica
2	Los Arrayanes	1		Paso de Vehículos Constante	Antropogénica	Paso de Vehículos pesados, Ruido constante de música proveniente de una finca aledaña	Antropogénica	Paso constante de vehículos livianos y motos	Antropogénica	Paso de motos, buses, música proveniente de una finca aledaña	Antropogénica
3	Cruce Vía (quebrada Miserenga)	1		Constante flujo de vehículos pesados y motos	Antropogénica	Paso de vehículos pesados	Antropogénica	Paso constante de vehículos livianos y motos	Antropogénica	Paso ocasional de vehículos, y tracto camiones	Antropogénica

No.	NOMBRE DEL PUNTO	UF	REGISTRO FOTOGRAFICO	DIA HABIL				DIA NO HABIL			
				DIURNO		NOCTURNO		DIURNO		NOCTURNO	
				FUENTES DE EMISIÓN EXTERNAS		FUENTES DE EMISIÓN EXTERNAS		FUENTES DE EMISIÓN EXTERNAS		FUENTES DE EMISIÓN EXTERNAS	
				Fuente Identificada en campo	Tipo de fuente	Fuente Identificada en campo	Tipo de fuente	Fuente Identificada en campo	Tipo de fuente	Fuente Identificada en campo	Tipo de fuente
										Ruido propio de la Q. Miserenga	Natural
4	La Aldea	1		Paso constante de Vehículos	Antropogénica	Paso de Vehículos pesados	Antropogénica	Paso constante de vehículos livianos y motos	Antropogénica	Paso Tracto camión, y paso ocasional de automóviles	Antropogénica
5	Boca Túnel Salida Norte	1		Paso de vehículos y motos constante, paso de volquetas	Antropogénica	Paso de Vehículos	Antropogénica	Paso constante de vehículos livianos, motos y tracto camiones	Antropogénica	Paso Tracto camión, y paso ocasional de automóviles	Antropogénica

Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

El monitoreo de ruido ambiental en el área circundante al proyecto construcción de la segunda calzada entre el túnel de occidente y San Jerónimo, para la UF 1 se llevó a cabo entre los días 25 de febrero y 11 de marzo de 2016, día hábil y no hábil, en horario diurno y nocturno; así mismo para la UF 3 para los días 28 de febrero y 16 de marzo de 2016. Los resultados obtenidos en el monitoreo se presentan a continuación.

Ruido Ambiental Día Hábil

En las Figura 5-268 y Figura 5-269 se presentan los resultados en referencia al día hábil, horario diurno y nocturno respectivamente, para la unidad funcional 3. El detalle de las mediciones efectuadas se incluye en el Anexo F2, el cual contiene el informe presentado por el laboratorio.

Figura 5-268. Puntos de monitoreo corregidos en horario diurno hábil, Sector C. Ruido Intermedio Restringido, Zona Con Otros Usos Relacionados Como Vías - Sector C. Ruido Intermedio Restringido, Zona Con Uso permitidos comerciales (UF 3)

MONITOREO DIURNO

		Punto	Valor Mínimo	Punto	Valor Máximo
Total de Puntos	2				
Numero de Puntos Fuera de Norma	0	1	74,9	2	78,6
% de Puntos Fuera de Norma	0,0%				

Punto	$L_{Aeq,d}$ dBA	$L_{RAeq,d}$ dBA	%T	Límite Normativo dBA	Descripción del punto
2	72,6	78,6	-1,8%	80,0	Boca Tunel Entrada San Cristobal
1	74,9	74,9	-6,4%	80,0	Boca Tunel Salida Norte

T% Porcentaje de Transgresión de la normatividad, valores positivos indican sobrepaso del valor establecido

MONITOREO DIURNO

		Punto	Valor Mínimo	Punto	Valor Máximo
Total de Puntos	1				
Numero de Puntos Fuera de Norma	1	3	71,6	3	71,6
% de Puntos Fuera de Norma	100,0%				

Punto	$L_{Aeq,d}$ dBA	$L_{RAeq,d}$ dBA	%T	Límite Normativo dBA	Descripción del punto
3	65,6	71,6	2,3%	70,0	La Culebra

T% Porcentaje de Transgresión de la normatividad, valores positivos indican sobrepaso del valor establecido

Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Se observa que los niveles corregidos de ruido ambiental diurno registrados en la zona de estudio, para aquellos puntos ubicados en un Sector de Ruido intermedio restringido en zonas con otros usos relacionados como vías principales, ninguno de los puntos supera el valor límite permisible de nivel de ruido para esta zona (80 dBA), el punto de mayor nivel

es el punto 2 con 78,6 dBA, siendo la principal fuente de ruido el flujo vehicular de la vía sobre la que se hicieron las mediciones (vía principal). Para el punto ubicado en el Sector de Ruido intermedio restringido en zonas con usos permitidos comerciales (3), reportando un nivel de presión sonora de 71,6 dBA, 1,6 dBA por encima del valor límite permisible de nivel de ruido para esta zona (70 dBA), las principales fuentes de ruido en este punto son el flujo vehicular. La metodología utilizada por el laboratorio se encuentra en el Anexo F2.

Figura 5-269 Puntos de monitoreo corregidos en horario nocturno hábil, Sector C. Ruido Intermedio Restringido Zonas otros usos relacionados como vías principales - Sector C. Ruido Intermedio Restringido Zonas con usos permitidos comerciales

MONITOREO NOCTURNO

		Punto	Valor Mínimo	Punto	Valor Máximo
Total de Puntos	2				
Numero de Puntos Fuera de Norma	0	2	64,1	1	64,9
% de Puntos Fuera de Norma	0,0%				

Punto	$L_{Aeq,d}$ dBA	$L_{RAeq,d}$ dBA	%T	Límite Normativo dBA	Descripción del punto
1	61,9	64,9	-7,3%	70,0	Boca Tunel Salida Norte
2	61,1	64,1	-8,4%	70,0	Boca Tunel Entrada San Cristobal

T% Porcentaje de Transgresión de la normatividad, valores positivos indican sobrepaso del valor establecido

MONITOREO NOCTURNO

		Punto	Valor Mínimo	Punto	Valor Máximo
Total de Puntos	1				
Numero de Puntos Fuera de Norma	1	3	58,0	3	58,0
% de Puntos Fuera de Norma	100,0%				

Punto	$L_{Aeq,d}$ dBA	$L_{RAeq,d}$ dBA	%T	Límite Normativo dBA	Descripción del punto
3	55,0	58,0	5,5%	55,0	La Culebra

T% Porcentaje de Transgresión de la normatividad, valores positivos indican sobrepaso del valor establecido

Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

En la figura anterior se ilustran los niveles de ruido ambiental nocturno registrados en la zona de estudio, (puntos 1 y 2), se observa que ninguno de los puntos supera el límite máximo permisible de nivel de ruido para esta zona (70 dBA), siendo el punto más alto, el punto 1 con un nivel de ruido de 64,9 dBA, la principal fuente de ruido es el tráfico vehicular de la ruta nacional. Además se ilustra el nivel de ruido ambiental nocturno registrado en la zona de estudio (punto 3), reportando un nivel de presión sonora de 58,0 dBA, 3,0 dBA por encima del límite máximo permisible de nivel de ruido para esta zona (55 dBA), las principales fuentes de ruido en este punto son el tráfico vehicular y el paso de personas. La metodología utilizada por el laboratorio se encuentra en el Anexo F2.

En la Figura 5-270 y Figura 5-271 se presentan los resultados en referencia al día hábil en horario diurno y nocturno respectivamente para la unidad funcional 1.

Figura 5-270. Puntos de monitoreo corregidos en horario diurno hábil, Sector B. Tranquilidad y ruido moderado - Sector C. Ruido Intermedio Restringido, Zona Con Otros Usos Relacionados Como Vías Principales

MONITOREO DIURNO

		Punto	Valor Mínimo	Punto	Valor Máximo
Total de Puntos	1				
Numero de Puntos Fuera de Norma	1	1	65,3	1	65,3
% de Puntos Fuera de Norma	100,0%				

Punto	$L_{Aeq,d}$ dBA	$L_{RAeq,d}$ dBA	%T	Límite Normativo dBA	Descripción del punto
1	62,3	65,3	0,5%	65,0	San Jeronimo

T% Porcentaje de Transgresión de la normatividad, valores positivos indican sobrepaso del valor establecido

MONITOREO DIURNO

		Punto	Valor Mínimo	Punto	Valor Máximo
Total de Puntos	4				
Numero de Puntos Fuera de Norma	1	4	71,2	3	80,1
% de Puntos Fuera de Norma	25,0%				

Punto	$L_{Aeq,d}$ dBA	$L_{RAeq,d}$ dBA	%T	Límite Normativo dBA	Descripción del punto
3	74,1	80,1	0,1%	80,0	Cruce Vía (Quebrada Miserenga)
5	74,9	74,9	-6,4%	80,0	Boca Tunel Salida Norte
2	73,8	73,8	-7,8%	80,0	Los Arrayanes
4	71,2	71,2	-11,0%	80,0	La Aldea

T% Porcentaje de Transgresión de la normatividad, valores positivos indican sobrepaso del valor establecido

Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

En la Figura 5-270 se observan los niveles corregidos de ruido ambiental diurno registrados en la zona de estudio, para el punto 1, este punto supera el límite máximo permisible para esta zona (65 dBA) con un nivel de ruido de 65,3 dBA, 0,3 dBA por encima del límite, siendo esto ocasionado, por las correcciones impulsivas correspondientes, las principales fuentes de ruido en este punto son los establecimientos comerciales y el tráfico vehicular. El detalle de las mediciones efectuadas se incluye en el Anexo F2, el cual contiene el informe presentado por el laboratorio.

Además también se muestran niveles de ruido ambiental diurno registrados en la zona de estudio, para aquellos puntos ubicados en un Sector de Ruido intermedio restringido en zonas con otros usos relacionados como vías principales, que solo el punto 3 es el único punto que supera el valor límite permisible de nivel de ruido para esta zona (80 dBA) con un nivel de presión sonora de 80,1 dBA, es decir 0,1 dBA por encima del límite, la

principal fuente de ruido en este punto es el flujo vehicular de la vía principal sobre la que se hicieron las mediciones (Ruta Nacional 62).

Figura 5-271 Puntos de monitoreo corregidos en horario nocturno hábil, Sector D. Zona Suburbana o rural de tranquilidad y ruido moderado - Sector C. Ruido Intermedio Restringido Zonas con otros usos relacionados como vías principales

MONITOREO NOCTURNO

		Punto	Valor Mínimo	Punto	Valor Máximo
Total de Puntos	1				
Numero de Puntos Fuera de Norma	1	1	52,8	1	52,8
% de Puntos Fuera de Norma	100,0%				

Punto	$L_{Aeq,d}$ dBA	$L_{RAeq,d}$ dBA	%T	Límite Normativo dBA	Descripción del punto
1	49,8	52,8	5,6%	50,0	San Jeronimo

T% Porcentaje de Transgresión de la normatividad, valores positivos indican sobrepaso del valor establecido

MONITOREO NOCTURNO

		Punto	Valor Mínimo	Punto	Valor Máximo
Total de Puntos	4				
Numero de Puntos Fuera de Norma	0	2	64,3	4	70,0
% de Puntos Fuera de Norma	0,0%				

Punto	$L_{Aeq,d}$ dBA	$L_{RAeq,d}$ dBA	%T	Límite Normativo dBA	Descripción del punto
4	67,0	70,0	0,0%	70,0	La Aldea
3	64,8	67,8	-3,1%	70,0	Cruce Vía (Quebrada Miserenga)
5	61,9	64,9	-7,3%	70,0	Boca Tunel Salida Norte
2	61,3	64,3	-8,1%	70,0	Los Arrayanes

T% Porcentaje de Transgresión de la normatividad, valores positivos indican sobrepaso del valor establecido

Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Anteriormente se observa el nivel de ruido ambiental nocturno registrado en la zona de estudio, para el punto 1, reportando un nivel de presión sonora corregido de 52,8 dBA, 2,8 dBA por encima del límite máximo establecido en la norma (50 dBA). Las principales fuentes de ruido en este punto son el paso de vehículos y el sonido producido por la campana de la iglesia. Además los niveles de ruido ambiental nocturno registrados en la zona de estudio, para aquellos puntos ubicados en un Sector de Ruido intermedio restringido en zonas con otros usos relacionados como vías principales; ninguno de los puntos supera el límite máximo permisible de nivel de ruido para esta zona (70 dBA), siendo el punto más alto, el punto 4 con un nivel de ruido de 70,0 dBA, la principal fuente de ruido en este punto es el paso de vehículos por la vías principales.

Ruido Ambiental Día No Hábil

En la Figura 5-272 y Figura 5-273 se presentan los resultados en referencia al día no hábil en horario diurno y nocturno respectivamente para la unidad funcional 3.

Figura 5-272. Puntos de monitoreo corregidos en horario diurno No hábil, Sector C. Ruido Intermedio Restringido Zonas con otros usos relacionados como vías principales - Sector C. Ruido Intermedio Restringido Zonas con usos permitidos comerciales.

MONITOREO DIURNO

		Punto	Valor Mínimo	Punto	Valor Máximo
Total de Puntos	2				
Numero de Puntos Fuera de Norma	0	2	72,8	1	77,6
% de Puntos Fuera de Norma	0,0%				

Punto	$L_{Aeq,d}$ dBA	$L_{RAeq,d}$ dBA	%T	Límite Normativo dBA	Descripción del punto
1	74,6	77,6	-3,0%	80,0	Boca Tunel Salida Norte
2	72,8	72,8	-9,0%	80,0	Boca Tunel Entrada San Cristobal

T% Porcentaje de Transgresión de la normatividad, valores positivos indican sobrepaso del valor establecido

MONITOREO DIURNO

		Punto	Valor Mínimo	Punto	Valor Máximo
Total de Puntos	1				
Numero de Puntos Fuera de Norma	0	3	68,9	3	68,9
% de Puntos Fuera de Norma	0,0%				

Punto	$L_{Aeq,d}$ dBA	$L_{RAeq,d}$ dBA	%T	Límite Normativo dBA	Descripción del punto
3	62,9	68,9	-1,6%	70,0	La Culebra

T% Porcentaje de Transgresión de la normatividad, valores positivos indican sobrepaso del valor establecido

Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

En la gráfica se ilustran para aquellos puntos ubicados en un Sector de Ruido intermedio restringido en zonas con otros usos relacionados como vías principales, se puede ver que ninguno de los puntos supera el valor límite permisible de nivel de ruido para esta zona (80 dBA), el punto de mayor nivel de ruido es el punto 1 con 77,6 dBA, siendo la principal fuente de ruido el flujo vehicular de las vías principales sobre las que se hicieron las mediciones. Además se muestra el punto 3 el cual el nivel de presión sonora reportado, 68,9 dBA, no supera el valor del límite permisible de nivel de ruido para esta zona (70 dBA),

siendo las principales fuentes de ruido el tránsito vehicular y el sonido producido por las campanas de la iglesia.

Figura 5-273. Puntos de monitoreo corregidos en horario nocturno no hábil, Sector C. Ruido Intermedio Restringido Zonas con otros usos relacionados como vías principales - Sector C. Ruido Intermedio Restringido Zonas con otros usos permitidos comerciales.

MONITOREO NOCTURNO

		Punto	Valor Mínimo	Punto	Valor Máximo
Total de Puntos	2				
Numero de Puntos Fuera de Norma	1	1	63,4	2	71,8
% de Puntos Fuera de Norma	50,0%				

Punto	$L_{Aeq,d}$ dBA	$L_{RAeq,d}$ dBA	%T	Límite Normativo dBA	Descripción del punto
2	68,8	71,8	2,6%	70,0	Boca Tunel Entrada San Cristobal
1	63,4	63,4	-9,4%	70,0	Boca Tunel Salida Norte

T% Porcentaje de Transgresión de la normatividad, valores positivos indican sobrepaso del valor establecido

MONITOREO NOCTURNO

		Punto	Valor Mínimo	Punto	Valor Máximo
Total de Puntos	1				
Numero de Puntos Fuera de Norma	1	3	66,6	3	66,6
% de Puntos Fuera de Norma	100,0%				

Punto	$L_{Aeq,d}$ dBA	$L_{RAeq,d}$ dBA	%T	Límite Normativo dBA	Descripción del punto
3	60,6	66,6	21,1%	55,0	La Culebra

T% Porcentaje de Transgresión de la normatividad, valores positivos indican sobrepaso del valor establecido

Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Se puede observar en la figura anterior que el punto 2 supera el límite máximo permisible de nivel de ruido para esta zona (70 dBA), con un nivel de presión sonora de 71,8 dBA, es decir 1,8 dBA por encima de la norma, siendo la principal fuente de ruido el flujo vehicular de la vía principal sobre la que se hicieron las mediciones. Por otro lado para el punto 3 ubicado en un Sector de Ruido intermedio restringido en zonas con usos permitidos comerciales, se puede observar también supera el límite máximo permisible de nivel de ruido para esta zona (55 dBA), con un nivel de presión sonora de 66,6 dBA, es decir 11,6 dBA por encima del límite, las principales fuentes de ruido en este punto son el tráfico vehicular, el sonido producido por las campanas de la iglesia cercana y el comercio de la zona. El detalle de las mediciones efectuadas se incluye en el Anexo F2, el cual contiene el

informe presentado por el laboratorio.

En la Figura 5-274 y Figura 5-275 se presentan los resultados en referencia al día no hábil en horario diurno y nocturno respectivamente para la unidad funcional 1.

Figura 5-274. Puntos de monitoreo corregidos en horario diurno No hábil, Sector B. Zona de tranquilidad y ruido moderado - Sector C. Ruido Intermedio Restringido Zonas con otros usos relacionados como vías principales

MONITOREO DIURNO

		Punto	Valor Mínimo	Punto	Valor Máximo
Total de Puntos	1				
Numero de Puntos Fuera de Norma	1	1	75,8	1	75,8
% de Puntos Fuera de Norma	100,0%				

Punto	$L_{Aeq,d}$ dBA	$L_{RAeq,d}$ dBA	%T	Límite Normativo dBA	Descripción del punto
1	75,8	75,8	16,6%	65,0	San Jeronimo

T% Porcentaje de Transgresión de la normatividad, valores positivos indican sobrepaso del valor establecido

MONITOREO DIURNO

		Punto	Valor Mínimo	Punto	Valor Máximo
Total de Puntos	4				
Numero de Puntos Fuera de Norma	0	3	72,2	5	77,6
% de Puntos Fuera de Norma	0,0%				

Punto	$L_{Aeq,d}$ dBA	$L_{RAeq,d}$ dBA	%T	Límite Normativo dBA	Descripción del punto
5	74,6	77,6	-3,0%	80,0	Boca Tunel Salida Norte
2	77,2	77,2	-3,5%	80,0	Los Arrayanes
4	69,4	72,4	-9,5%	80,0	La Aldea
3	72,2	72,2	-9,8%	80,0	Cruce Vía (Quebrada Miserenga)

T% Porcentaje de Transgresión de la normatividad, valores positivos indican sobrepaso del valor establecido

Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Se observa en la zona de estudio para el punto 1, ubicado en una Zona de tranquilidad y ruido moderado, supera el límite máximo permisible para esta zona (65 dBA), con un nivel de ruido de 75,8 dBA, 10,8 dBA por encima del límite, la principal fuente de ruido en este punto es el tráfico vehicular lo cual hace que aumente considerablemente. También para aquellos puntos ubicados en un Sector de Ruido intermedio restringido en zonas con otros usos relacionados como vías principales, ninguno de los 4 puntos de monitoreo supera el valor límite permisible de nivel de ruido para esta zona (80 dBA), el punto de mayor nivel de ruido es el punto 5 con un nivel de 77,6 dBA, siendo la principal fuente de ruido el flujo vehicular de las vías principales sobre las que se hicieron las mediciones.

Figura 5-275. Puntos de monitoreo corregidos en horario nocturno no hábil, Sector B. Zona de tranquilidad y ruido moderado - Sector C. Ruido Intermedio Restringido Zonas con otros usos relacionados como vías principales

MONITOREO NOCTURNO

		Punto	Valor Mínimo	Punto	Valor Máximo
Total de Puntos	1				
Numero de Puntos Fuera de Norma	1	1	63,1	1	63,1
% de Puntos Fuera de Norma	100,0%				

Punto	$L_{Aeq,d}$ dBA	$L_{RAeq,d}$ dBA	%T	Límite Normativo dBA	Descripción del punto
1	60,1	63,1	26,2%	50,0	San Jeronimo

T% Porcentaje de Transgresión de la normatividad, valores positivos indican sobrepaso del valor establecido

MONITOREO NOCTURNO

		Punto	Valor Mínimo	Punto	Valor Máximo
Total de Puntos	4				
Numero de Puntos Fuera de Norma	2	5	63,4	2	72,9
% de Puntos Fuera de Norma	50,0%				

Punto	$L_{Aeq,d}$ dBA	$L_{RAeq,d}$ dBA	%T	Límite Normativo dBA	Descripción del punto
2	66,9	72,9	4,1%	70,0	Los Arrayanes
4	70,1	70,1	0,1%	70,0	La Aldea
3	64,2	64,2	-8,3%	70,0	Cruce Vía (Quebrada Miserenga)
5	63,4	63,4	-9,4%	70,0	Boca Tunel Salida Norte

T% Porcentaje de Transgresión de la normatividad, valores positivos indican sobrepaso del valor establecido

Fuente. (CIMA. Corporacion Integral del Medio Ambiente, 2016)

Finalmente en la figura anterior se ilustra el nivel de ruido ambiental nocturno registrado en la zona de estudio para el punto 1, ubicado en una Zona de tranquilidad y ruido moderado, reportando un nivel de presión sonora de 63,1 dBA, 13,1 dBA por encima del límite máximo establecido en la norma (50 dBA) se debe tener en cuenta que las principales fuentes de ruido en este punto son el paso constante de vehículos y el sonido producido por la campana de la iglesia. También para aquellos puntos ubicados en un Sector de Ruido intermedio restringido en zonas con otros usos relacionados, se puede observar que solo los puntos 2 y 4 superan el límite máximo permisible de nivel de ruido para esta zona (70 dBA), siendo el valor más alto el reportado por el punto 2 con un nivel de presión sonora de 72,9 dBA, las principales fuentes de ruido en este punto son el flujo vehicular de la vía principal sobre la que se hicieron las mediciones y la música proveniente de una finca aledaña. El detalle de las mediciones efectuadas se incluye en el Anexo F2, el cual contiene

el informe presentado por el laboratorio.

5.1.11 Amenazas Naturales

En este capítulo se presenta la identificación y zonificación de las amenazas en el AI. Para este análisis se tuvieron en cuenta varias técnicas de zonificación que describen sus aspectos metodológicos, alcances y limitaciones.

5.1.11.1 Aspectos básicos a tener en cuenta en la zonificación de las amenazas naturales

El análisis efectuado para la zonificación de amenazas naturales tiene en cuenta el "Concepto Regional" adaptado de Krynine & Judd (1957)[75], el cual establece que las características de cierto proceso dentro de una región dada, dependen de las condiciones geológicas, topográficas y climáticas de la región.

De acuerdo con este concepto, los procesos dentro de una "provincia geomorfológica" deben tener características similares:

- El modo o génesis de la formación de rocas y suelos es aproximadamente el mismo.
- El patrón de drenaje y las formas del terreno son similares.
- El clima es casi idéntico.

Se esperaría entonces que procesos como avenidas torrenciales, inundaciones, licuación, procesos erosivos y fenómenos de remoción en masa, los cuales son generados por lluvias y sismos (factores desencadenantes), ocurran en zonas con una susceptibilidad similar a cada proceso, la cual es definida por las condiciones propias del terreno.

Para la zonificación se tuvieron en cuenta tres principios básicos o fundamentales que se relacionan entre sí y que deben considerarse en este tipo de estudios, según Varnes (1984)[76]:

- El presente y pasado son claves para el futuro: adaptado al principio de similitud geomorfológica establecido por Krinine & Judd (op cit.), el cual establece que el suceso de cualquier proceso natural en el futuro se relaciona directamente con las condiciones geológicas, geomorfológicas e hidrológicas, que han llevado al desarrollo de procesos en el presente y en el pasado.

  Según García y Amórtegui (2009)[77], este principio no necesariamente señala que la

[75] Krynine & Judd (1957).Principles of Engineering Geology and Geotechnics. McGraw-Hill Book Company Inc., N.Y.
[76] Varnes, 1984. Landslide Hazard Zonation: A review of principles and practice. UNESCO, Paris. 1984.
[77] García, Manuel y Amórtegui, José (2009). Taller de capacitación en ingeniería geotécnica de oleoductos. Documento elaborado para ECOPETROL, Oleoducto Caño Limón – Coveñas. Cúcuta, Colombia.

ausencia de procesos en el presente y pasado sea un indicador de la no existencia de estos en el futuro. Más aún, la susceptibilidad a nuevos procesos puede incrementarse por actividades antrópicas que alteran las condiciones topográficas e hidrológicas naturales.

Es aplicable cuando las condiciones del pasado y del presente que produjeron los procesos son identificadas, y siguen ejerciendo una gran influencia o cuando pueden ser evaluados los efectos de los cambios por nuevas condiciones a las que se ha sometido el terreno. Esto conlleva al segundo principio.

- Identificación de las condiciones principales que causan los procesos. Las causas básicas para el desencadenamiento de los procesos por las amenazas en estudio pueden establecerse del análisis de varios casos de falla específicos. En un área dada, muchas de estas causas se reconocen y sus efectos pueden ser evaluados, al igual que relacionarse con los procesos naturales ocurridos en el pasado.

  Para el análisis de amenazas naturales de este proyecto se contó con la participación de geólogos, geotecnistas, ingenieros ambientales y forestales, que verificaron los resultados obtenidos con la herramienta SIG con la información recopilada de los reconocimientos de campo, relacionada con las amenazas naturales evaluadas.

- Estimación de los grados de amenaza: cuando se identifican las condiciones y procesos que inducen la inestabilidad y la ocurrencia de eventos naturales amenazantes, a veces es posible estimar su contribución relativa y dar alguna medición cualitativa o semi-cuantitativa en cada sitio estudiado, logrando de esta manera definir el grado de amenaza, que dependerá del número de factores actuantes que inducen a fallamiento, su severidad y su interacción.

En general, el término “zonificación” se aplica a la división de la superficie del terreno dentro de áreas, franjas o sectores con grados de amenaza actual o potencial de procesos claramente definidos. En la actualidad, existe una gran cantidad de métodos de zonificación de amenazas naturales, en los que se establecen los factores más influyentes que intervienen en la susceptibilidad del terreno a algún evento natural. Dicha susceptibilidad se determina evaluando la interacción de las condiciones geológicas, geomorfológicas, climáticas e hidrológicas.

Lo más importante e imprescindible en la búsqueda de la zonificación de amenazas naturales es comprender los factores intrínsecos o propios que definen su susceptibilidad (condiciones del terreno) que se relaciona en especial con la litología y estructura, condiciones del agua subterránea y de cobertura vegetal. El grado de amenaza se determina al relacionar la susceptibilidad del terreno con factores desencadenantes (como lo son las condiciones climáticas y sísmicas, actividad antrópica, etc.), los cuales también son categorizados de acuerdo con su capacidad de daño o de afectación.

El procesamiento de los datos en esta etapa define el intervalo de los grados de amenaza, que puede ser desde una evaluación muy simple y subjetiva hasta una evaluación con procedimientos sofisticados, con bases de datos complejos que requieren el uso de computadores (adaptado de Varnes, op. cit.).

5.1.11.2 **Técnicas utilizadas para la zonificación de amenazas naturales**

Investigar la existencia de zonas susceptibles a amenazas naturales, supone que se reconoce la existencia de procesos naturales. La importancia de su zonificación puede relacionarse con evadir, mitigar, prevenir o corregir la amenaza presente y futura, y concretamente para el presente estudio, establecer la influencia de eventuales procesos naturales en el proyecto y viceversa. Su estudio con menor o mayor detalle depende entre otros factores de:

- El propósito, contenido y la escala del estudio
- El tipo de análisis que se desea realizar
- El tipo de datos de entrada que se recolectarán

El método de zonificación considerado en el presente estudio tiene en cuenta varias técnicas de recopilación y análisis de información descritos por Varnes (op. cit.) y Van Westeen (1998)[78]. Estas técnicas son:

- Uso de Sensores Remotos: interpretación de imágenes satelitales y fotografías aéreas de diferentes épocas.

- Estudios de Campo: tienen como finalidad corroborar y complementar los procesos antiguos, existentes y potenciales identificados mediante el uso de sensores remotos.

- Sistemas de Evaluación Numérica de la Amenaza: técnica que evalúa cuantitativamente la importancia de los factores intrínsecos y detonantes que contribuyen al surgimiento de las amenazas naturales analizadas (Varnes op. cit.).

La definición de factores a tener en cuenta en la evaluación numérica dependen de las condiciones propias del sitio en evaluación, y su factor de ponderación depende del orden de importancia de cada uno de ellos.

En la zonificación se estudió y analizó para cada una de las amenazas la interacción entre la topografía, geología, geomorfología, uso del suelo, entre otros (factores intrínsecos) y las lluvias y sismos (factores detonantes).

[78]INGEOMINAS(1998). Introducción a los deslizamientos: Uso de los SIG en el mapeo de deslizamientos. Curso de Capacitación. Bogotá, Colombia.

- Superposición de Mapas e Integración Espacial de Información: Para el uso de esta técnica se obtuvo la información concerniente a topografía, geología, cobertura vegetal, usos del suelo, precipitación y amenaza sísmica; se definieron rangos y valores de ponderación para cada uno de los factores que influyen en la evaluación de la susceptibilidad del terreno y amenaza respecto a los eventos naturales.

  La definición de las variables o factores considerados en cada una de las amenazas se establecieron de acuerdo con las guías metodológicas establecidas en Varnes (op. cit.), Van Westeen (op. cit.), INGEOMINAS et al. (2001)[79] y de acuerdo con la experiencia de los integrantes del grupo de evaluación de riesgos del proyecto, conformado por profesionales de diferentes ramas de la ingeniería y de las ciencias.

  Según Van Westeen (op. cit.), la escala de análisis con el uso de esta técnica varía entre 1:2.000 y 1:25.000, y son utilizados para la prevención de desastres y la generación de mapas de riesgos, así como las fases de diseño de los trabajos de ingeniería.

- Análisis de Amenaza Convencionales: Para escalas mayores, en las que se requieren realizar trabajos de investigación y de ingeniería detallados de un sitio específico, se realizan este tipo de análisis, los cuales utilizan resultados obtenidos de forma cuantitativa de cada una de las variables relacionadas con el diseño.

  Esta técnica tiene como limitante principal la cantidad de información que se debe allegar para realizar este tipo de análisis, lo cual para la escala del proyecto demandaría bastantes recursos humanos, técnicos y económicos que están por fuera del objeto principal y alcance del presente estudio.

De acuerdo con las características del proyecto, que cubre un área de influencia de 8.175 ha, para este estudio se estableció una escala de trabajo 1:25.000. Se dio especial importancia a la definición de Sistemas de Evaluación Numérica de la Amenaza y a la Superposición de Mapas e Integración Espacial de Información para la zonificación espacial de las diferentes amenazas naturales consideradas en la definición del mapa de amenazas y susceptibilidad ambiental.

Para ello se utilizó un Sistema de Información Geográfica - SIG (ArcGIS), en el que se ingresaron a una base de datos la disposición espacial de las diferentes unidades de relieve, geología, geomorfología, hidrogeología, uso del suelo, entre otros aspectos, presentes en el AII. Según INGEOMINAS (op. cit.), estas unidades definen las variables geoambientales que intervienen en la determinación de la susceptibilidad del terreno a las amenazas naturales que se analizarán a continuación.

También se ingresó en el SIG la información concerniente a la variación de la precipitación

[79]INGEOMINAS y Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (2.001). Evaluación del riesgo por fenómenos de remoción en masa. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, Colombia.

y de la amenaza sísmica, que son los factores disparadores de las amenazas naturales a evaluar.

Para la caracterización de cada uno de los procesos amenazantes se tuvo en cuenta información técnica contenida en el Estudio de Impacto Ambiental, información secundaria y aspectos geotécnicos evaluados a lo largo del corredor de ruta de la línea de transmisión. Las amenazas naturales que se tuvieron en cuenta para este análisis son las siguientes:

- Amenaza sísmica: en su evaluación se tuvieron en cuenta aspectos técnicos considerados en el Mapa Nacional de Amenaza Sísmica[80], y evaluados en el numeral 0 de este documento.

- Amenaza por licuación: se analizó la información primaria y secundaria del proyecto y se definieron las unidades geológicas susceptibles (unidades cuaternarias recientes) a este tipo de amenaza, teniendo en cuenta los factores siguientes:

  - Características litológicas
  - Características geomorfológicas
  - Amenaza sísmica (factor detonante)

- Amenaza por procesos de remoción en masa: se realizó un estudio semi cuantitativo para la elaboración del mapa de amenaza por dicho proceso, el cual tuvo en cuenta los factores siguientes:

  - Características litológicas
  - Características hidrogeológicas
  - Características geomorfológicas
  - Uso del suelo actual
  - Densidad de drenajes
  - Densidad de fallas geológicas (control estructural)
  - Pendiente topográfica del terreno
  - Variación de la precipitación (factor detonante)
  - Amenaza sísmica (factor detonante)

- Amenazas por avenidas torrenciales: caracterización de cauces de agua que por sus características topográficas, geológicas, geomorfológicas e hidráulicas, ante factores detonantes como lluvias y sismos pueden desencadenar dichos procesos.

  - Características litológicas
  - Cobertura del suelo
  - Densidad de fallas geológicas (control estructural)

[80] INGEOMINAS – UNIVERSIDAD NACIONAL. Mapa Nacional de Amenaza Sísmica. Periodo de retorno 475 Años. Bogotá, 2010.

- Pendiente del terreno
- Variación de la precipitación (factor detonante)
- Amenaza sísmica (factor detonante)

- Amenaza por inundación: evaluación de las áreas susceptibles de afectación por este proceso, dando atención especial a cauces de corrientes principales y áreas aledañas bajas.

  - Características geomorfológicas de paisaje susceptibles a este proceso
  - Características geomorfológicas de relieve susceptibles a este proceso
  - Variación de la precipitación (factor detonante)

- Amenaza volcánica

Con base en información secundaria se evaluó la pertinencia de incluir este tipo de amenaza natural en el área de estudio.

- Amenaza por tsunamis

Debido a la ubicación del área de influencia y su altitud respecto a las zonas costeras más cercanas, la amenaza por este proceso en el área de estudio no aplica.

5.1.11.3 **Método de trabajo utilizado para la zonificación de las amenazas naturales**

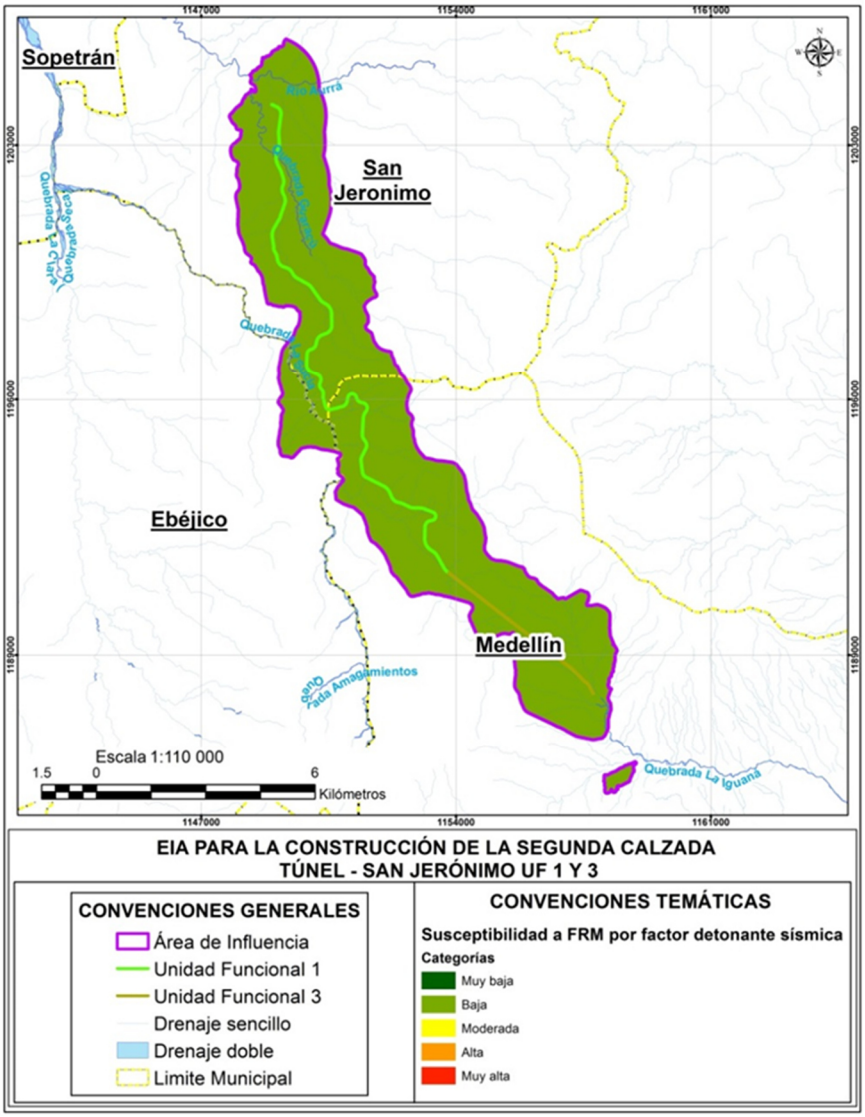
Para el análisis de cada una de las amenazas se adelantaron las siguientes etapas de trabajo:

- Recopilación y análisis de información existente.
- Elaboración del mapa base digital.
- Estudio de variables geoambientales. Análisis de variables como pendientes topográficas, geología, geomorfología, hidrogeología, uso del suelo actual, cobertura vegetal, densidad de fallas, densidad de drenajes, precipitación y amenaza sísmica.
- Implementación de la información en SIG.
- Análisis de los resultados.

5.1.11.4 **Amenaza Sísmica**

La evaluación de amenaza sísmica se realizó previamente en el numeral 5.1.9.2.9.4, con base en los resultados del Mapa de Amenaza Sísmica (INGEOMINAS & UNAL, 2010), que se presenta en términos de aceleración horizontal máxima en roca; este mapa representa un modelo probabilístico para el movimiento del terreno que podría esperarse por la ocurrencia de sismos en Colombia. El Mapa de Amenaza Sísmica (INGEOMINAS & UNAL, 2010), considera valores de PGA (cm/s²) en un rango desde 50 – 250 PGA. En la Figura 5-276 se presenta el mapa resultante de amenaza sísmica en el área de estudio.

Figura 5-276 Amenaza sísmica



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

5.1.11.5 **Amenaza por Licuación**

La zonificación por licuación se efectuó por medio de un método semi cuantitativo siguiendo los procedimientos de zonificación de un sistema de evaluación numérica y superponiendo las temáticas relacionadas en dicha evaluación, descrito por Varnes (1984) y Van Westeen (1998). En la zonificación también se tuvieron en cuenta los conceptos establecidos en Kramer (1996)[81] y Díaz (2005)[82], en lo relacionado a la generación de

[81]Kramer, Steven. Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice-Hall, New Jersey. 1996.

procesos de licuación.

5.1.11.5.1 Conceptos básicos

Este proceso consiste en la pérdida súbita y temporal del contacto entre partículas y de la resistencia al corte en suelos arenosos uniformes y de baja densidad y en limos no plásticos saturados. Estos materiales pierden súbitamente su capacidad de soporte por la absorción de la energía liberada por los sismos, haciendo que se produzcan grandes deformaciones en terrenos relativamente planos y desplazamientos del suelo en terrenos montañosos.

En geología los materiales susceptibles a este fenómeno corresponden a algunos tipos de depósitos no consolidados (depósitos cuaternarios recientes) relacionados con la dinámica fluvial de las corrientes de agua. Como este proceso sólo ocurre en suelos saturados, la licuación es comúnmente observada cerca de ríos, bahías y otros cuerpos de agua (Kramer, 1996). Se reconocen siete factores que influyen en el potencial de un suelo a licuarse (Díaz, op. cit.). Estos son:

- Distribución del tamaño de los granos: La arena uniformemente gradada, con granos pocos finos o muy gruesos (arena limpia) tiene mayor probabilidad de licuarse y es posible que se vuelva más densa. Las arenas limosas y gravas también son susceptibles a la licuefacción bajo cargas cíclicas muy severas.

- Densidad: La licuefacción ocurre principalmente en suelos sueltos, saturados y no cohesivos, los cuales tienden a densificarse cuando están sujetos a cargas cíclicas. La tendencia a densificarse reduce el volumen de suelo y agua e incrementa la presión intersticial si los poros intergranulares se llenan de agua. Cuando la presión intersticial iguala la presión promedio total del suelo, éste pierde su resistencia y se licua. Si el suelo es denso, habrá menos posibilidad de que se produzca la licuefacción.

- Peso y profundidad del espesor de depósito de suelo. La presión entre partículas aumenta con la profundidad; mientras mayor sea la presión de contacto entre las partículas menor la probabilidad de que ocurra la licuación.

- Edad del depósito. Los suelos sueltos y sin cohesión por lo general son geológicamente jóvenes. Con el tiempo, actúan dos factores para incrementar la resistencia de un suelo típico: la compactación (que cambia la relación de vacíos) y varios procesos químicos (que actúan para cementar los granos del suelo).

- Una regla general es que los depósitos del holoceno tardío (menos de 3.000 años de antigüedad) tienen posibilidad de licuarse siempre y cuando presenten condiciones similares a las de los factores mencionados y estén bajo condiciones saturadas.

[82] Diaz, Abraham. Dinámica de suelos. Ed. Universidad Nacional Autónoma deMéxico y Limusa-Noriega editores. México. 2005.

- Origen del suelo. El suelo depositado por procesos fluviales se sedimenta lentamente y sus granos apenas están apenas en contacto unos con otros y tienen poca probabilidad de compactarse. De manera similar, los rellenos artificiales sin un adecuado proceso de compactación, generalmente por debajo del nivel del agua, pueden tener deficiencias similares. Estos materiales ante vibraciones sísmicas tienden a licuarse con facilidad.

- Profundidad del agua respecto a la superficie del terreno: Mientras esté más cercano el nivel freático a la superficie del terreno en los depósitos de suelos susceptibles a licuación, mayor será la probabilidad de que ocurra la licuación.

- Amplitud, frecuencia y duración de la vibración del terreno. La capacidad del suelo para resistir una vibración provocada por un sismo sin causar fallas depende de la intensidad del movimiento del terreno, su frecuencia y duración. Los movimientos más fuertes tienen mayor probabilidad de causar la falla del terreno susceptible a licuación.

5.1.11.5.2 Evaluación de la amenaza por licuación

La evaluación de amenaza por licuación requiere de información de detalle con la que no se cuenta en este proyecto, debido a la escala de trabajo. Por tal motivo, el alcance de esta evaluación de amenaza por licuación, únicamente comprende dos parámetros de análisis, litología y geomorfología y un agente detonante que corresponde a sismicidad.

5.1.11.5.3 Litología

Aspecto que tiene en cuenta los primeros cinco factores mencionados en el numeral anterior (distribución del tamaño de los granos, densidad, peso y espesor de depósito de suelo, edad del depósito y origen del suelo). La Tabla 5-166 presenta los rangos de valoración utilizados para la calificación de las variables Unidades litológicas y Geomorfología.

Tabla 5-166 Rangos de valoración de amenaza por licuación

Valor	Amenaza por licuación
0	Nula
1	Baja
3	Moderada
5	Alta

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

Las unidades geológicas del Paleozoico a Neógeno y los suelos residuales derivados de estas, así como algunos depósitos cuaternarios no son susceptibles a este proceso. En la Tabla 5-167 se presentan las unidades geológicas susceptibles a procesos de licuación.

Tabla 5-167 Valores de susceptibilidad por características litológicas

EDAD				SÍMB.	UNIDAD	PESO
EÓN	ERA	PERIODO	ÉPOCA			
FANEROZOICO	CENOZOICO	CUATERNARIO		Qll	Lleno antrópico	3
				Qal	Depósitos Aluviales	5
				Qcal	Depósitos coluvio aluviales	3
				Qt0 Qt1	Terrazas aluviales	3
				Qd	Depósitos de derrubio/depósitos de deslizamientos	3
		NEÓGENO	Mioceno	Ngas Pgam Pgai	Formación Amagá	0
		PALEÓGENO	Oligoceno			
	MESOZOICO	CRETÁCICO	Superior	Kdha - Kdhb	Diorita de Heliconia-diorita hornbléndica	0
			Inferior	Kida	Diorita de Altavista	0
				KvQG	Complejo Quebradagrande Miembro volcánico	0
		JURÁSICO		Jgr	Gabros de Romeral	0
	PALEOZOICO	PÉRMICO CARBONÍFERO DEVÓNICO SILÚRICO ORDOVÍCIO CÁMBRICO		Pzes Pev	Grupo Ayurá Montebello	0
				Pgnp	Granito néisico de Palmitas	0

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

5.1.11.5.4 Geomorfología

Formas del terreno como planicies de inundación, abanicos aluviales y terrazas, son susceptibles a este tipo de fenómenos. En la Tabla 5-168 se evalúa la susceptibilidad a este fenómeno de cada una de las unidades geomorfológicas que conforman el área de influencia. Otro aspecto a tener en cuenta es la presencia de agua en estos depósitos; es posible que los materiales arenosos sean licuables en los alrededores de cuerpos de agua como ríos y quebradas, ya que el nivel freático se localiza cerca o en la superficie del terreno en la base de las laderas y en las zonas llanas.

Tabla 5-168 Valores de susceptibilidad por características geomorfológicas

Z. Geoestruct	Prov. Geom	R. geomorf.	Unidad geomorfológica		Subunidad geomorfoógica	Componente geomorfológico	Símbolo	Peso
Cordillera	Cordillera Central	Denudativa	Montañas	Denudativas (D)	Filas y Vigas	Laderas (l)	Dl	0
						Valles estrechos aluviales y/o coluvio aluviales (ve)	Dve	5
						Coluvio de remoción (cr)	Dcr	3
						Lleno antrópico (ll)	Dll	3
				Denudativas estructurales (DS)	Filas y Vigas	Laderas (l)	DSl	0
						Valles estrechos aluviales y/o coluvio aluviales (ve)	DSve	5
						Coluvio de remoción (cr)	DScr	3
						Lleno antrópico (ll)	DSll	3
				Estructurales denudativas (SD)	Espinazo	Coluvio de remoción (cr)	SDcr	3
						Ladera estructural (le)	SDle	0
						Valles estrechos aluviales y/o coluvio aluviales (ve)	SDve	5
		Deposicional	Piedemonte	Denudativa estructural (DS)	Lomas y colinas	Lomerío (lo)	DSlo	0
						Laderas estructurales (le)	DSle	0
				Aluvio diluvial (FA)	Abanicos aluviales	Cuerpo y base de abanico aluvial (aa)	FAaa	3
						Abanico terraza (at)	FAat	3
				Coluvial (C)	Coluvio de remoción	Cono coluvial (cc)	Ccc	3
				Aluvial (A)	Valle aluvial	Valle estrecho aluvial (ve)	Fve	5

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

Como parámetro disparador e inherente al proceso de licuación están los sismos representados por la amenaza sísmica (ver numeral 5.1.9.2.9.4).

5.1.11.5.5 Amenaza por licuación

De acuerdo con lo establecido en Varnes (1984) se definió un sistema de evaluación numérica en el que se integró información litológica, geomorfológica y sísmica en el SIG

para definir la zonificación espacial del grado de amenaza por licuación. Con base en lo estipulado en Kramer (1996) y teniendo en cuenta las variables geoambientales acabadas de mencionar, así como la guía metodológica definida por INGEOMINAS et al. (op. cit.), para otras amenazas naturales, la evaluación de la amenaza por licuación se definió así:

$$AL = (SL + SG) * fs$$

Donde:

AL = Amenaza por licuación.
SL = Susceptibilidad por litología (tipo de materiales).
SG = Susceptibilidad por geomorfología (depósitos aluviales).
fs = Factor sismicidad (amenaza sísmica).

Con la ponderación de estos parámetros en la Tabla 5-169 se presentan los intervalos para la categorización y el grado de amenaza por licuación. En la Figura 5-278 se presenta la amenaza por licuación.

Tabla 5-169 Intervalos y categorías de la amenaza por licuación

Ponderación	Amenaza por licuación	
0	0	Nula
1 a 6	1	Baja
7 a 10	3	Moderada
> 10	5	Alta

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

- ***Amenaza Nula*:** zonas en las que no ocurren este tipo de fenómenos. Corresponde a zonas conformadas por depósitos cuaternarios como terrazas medias y altas, depósitos de materiales con compacidad media a densa con tamaños de partículas desde arcilla, arenas y gravas hasta de cantos y bloques, suelos residuales y transportados constituidos en buena parte por materiales limosos y arcillosos y afloramientos rocosos.

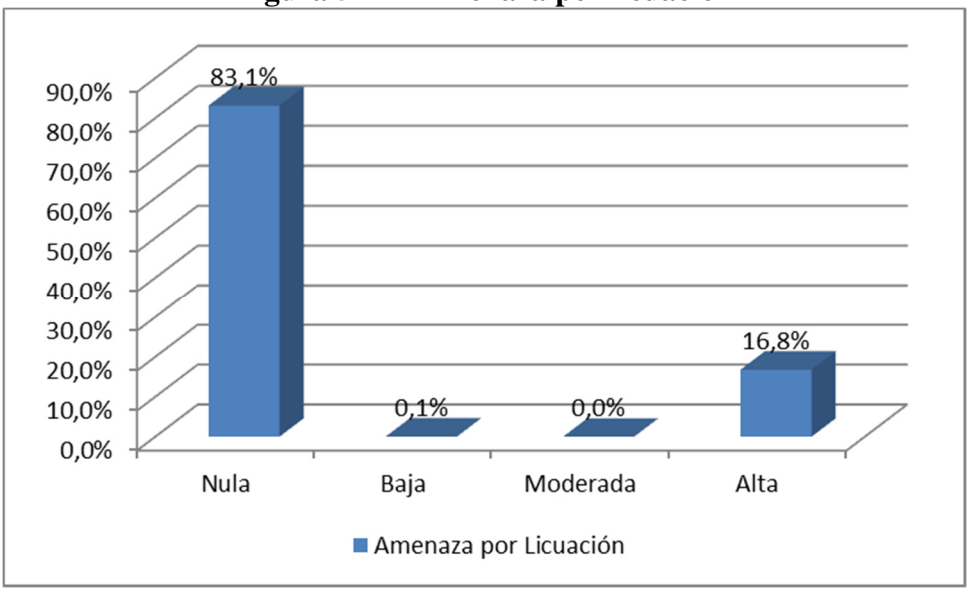
- ***Amenaza Baja*:** arenas de densidad media a alta y limos no plásticos de consistencia media en zonas con amenaza sísmica muy baja a moderada.

- ***Amenaza Moderada*:** gravas, arenas de densidad media a baja y limos no plásticos de consistencia media a blanda, en estado saturado o en posibilidad de estarlo, en zonas con amenaza sísmica moderada a alta.

- ***Amenaza Alta*:** arenas y gravas limpias, relativamente sueltas y limos de baja plasticidad o no plásticos de consistencia blanda, presentes en zonas inundables y permanentemente en estado saturado; se destacan depósitos aluviales no consolidados, terrazas bajas y conos aluviales.

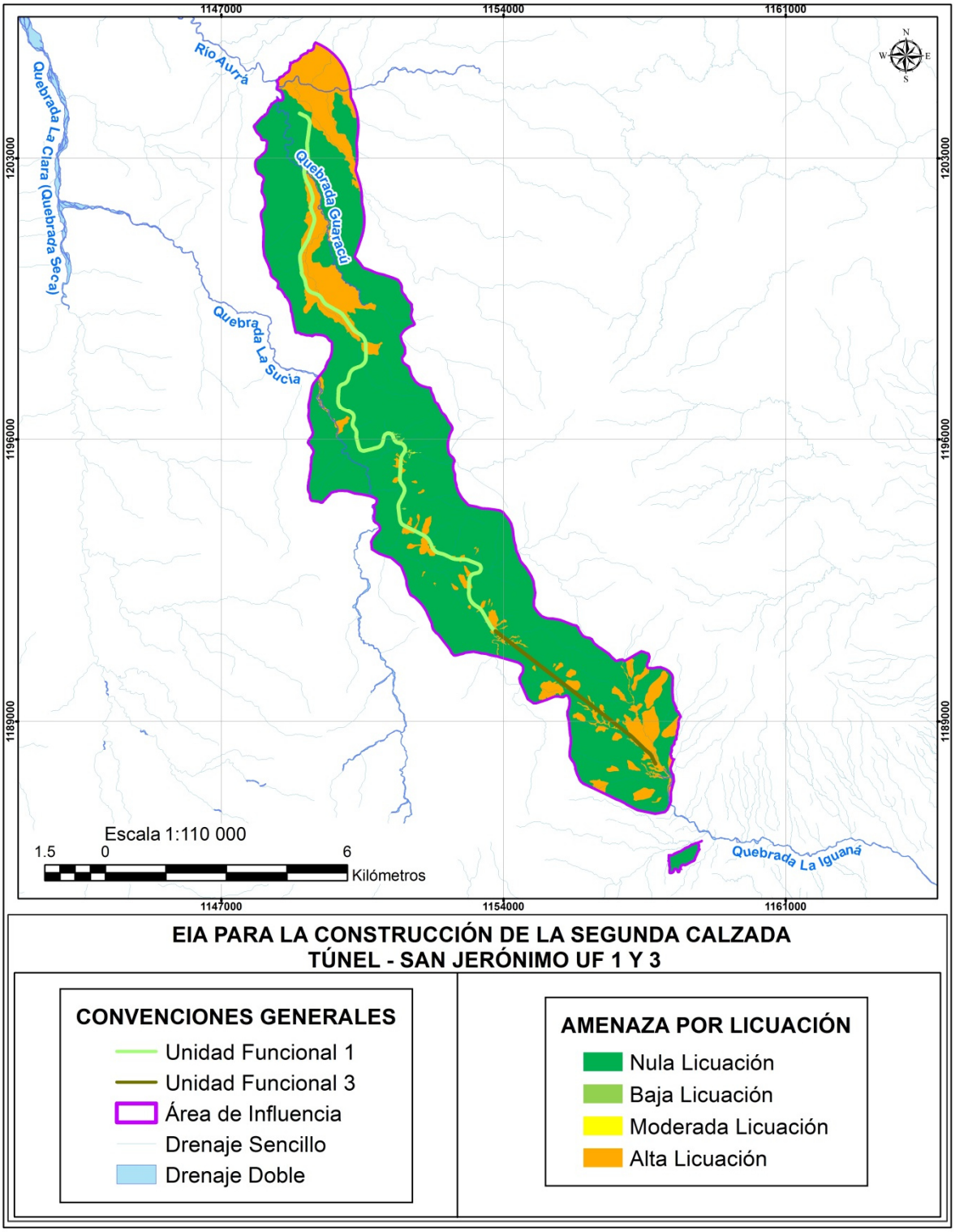
En Figura 5-277 y Figura 5-278 se muestra que el 83,1% del área de influencia no presenta amenaza por inundaciones y el 16,8% es de amenaza de bajo grado.

Figura 5-277 Amenaza por licuación



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

Figura 5-278 Amenaza por licuación

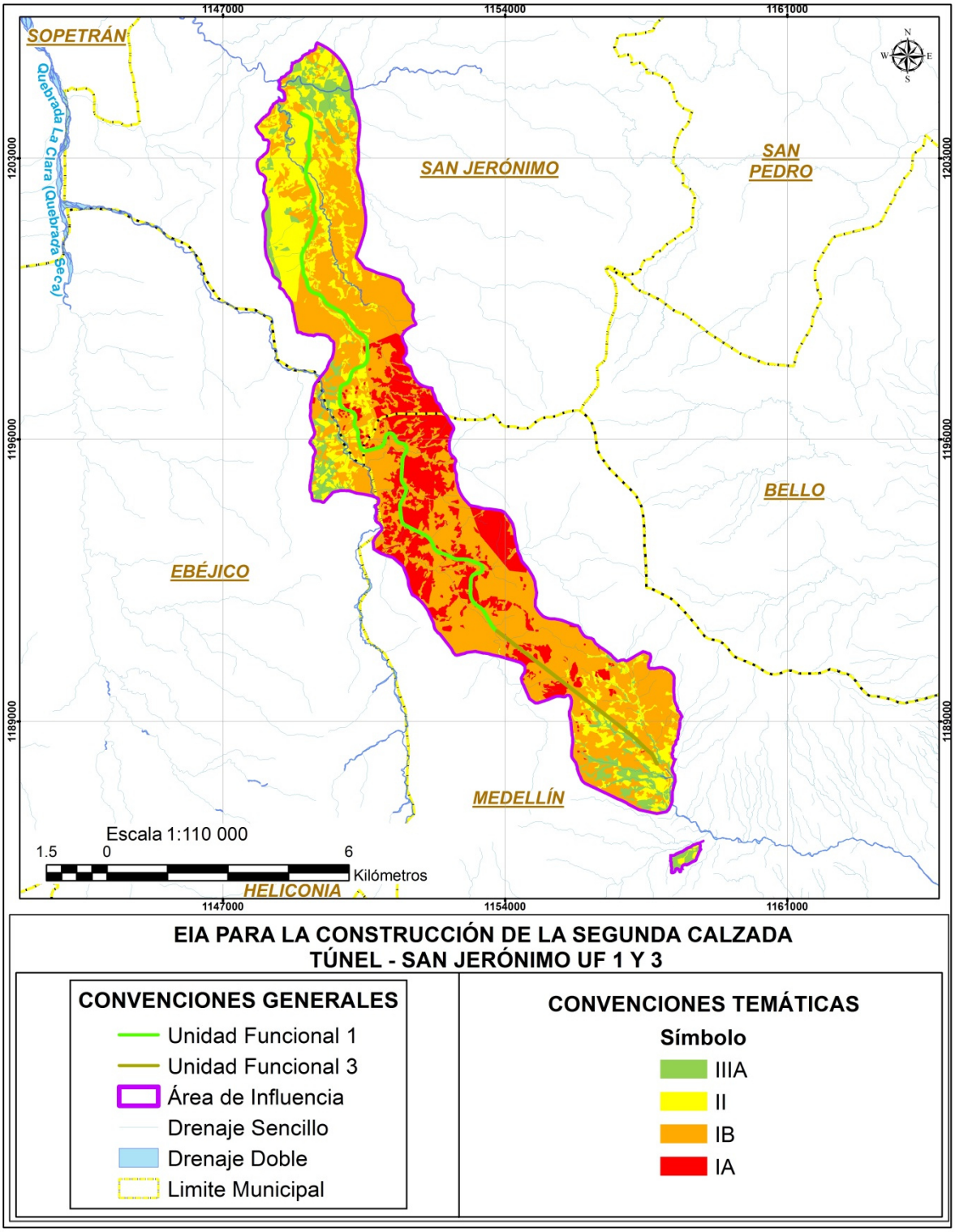


Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

5.1.11.6 **Amenaza por Fenómenos de Remoción en Masa**

La zonificación por fenómenos de remoción en masa (FRM) fue tratada en el capítulo de Geotecnia, cuyo resultado final se presentan en la Figura 5-279; para más detalle, remitirse al numeral 5.1.9.2.10 de este documento.

Figura 5-279 Mapa de Amenaza geotécnica



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

5.1.11.7 **Amenaza por avenidas torrenciales**

La zonificación por avenidas torrenciales se efectuó por medio de un método semi-cuantitativo, siguiendo los procedimientos de evaluación numérica y superponiendo temáticas tales como morfometría de las cuencas involucradas, precipitación y tiempos de concentración del área de influencia.

El sistema torrencial consta de tres partes, una que produce, otra que traslada y la tercera que recibe los detritos. Dicho sistema está íntimamente relacionado no solo con la producción de flujos de detritos, sino con las zonas de comienzo y transporte de avalanchas de suelo y roca en picos nevados de las cordilleras así como zonas propensas a procesos de remoción en masa adyacentes a corrientes de agua. La comprensión de esta unidad natural es fundamental para la evaluación de riesgos de montaña.

La evaluación de la amenaza por avenidas torrenciales se llevó a cabo distinguiendo los cursos de aguas principales, secundarios y menores, en los que eventualmente pueden desencadenarse este tipo de procesos o en los que ya ha sucedido, de cartografía IGAC a escala 1:25.000.

El cálculo del grado de amenaza se hizo de manera semi cuantitativa, por medio de la definición de variables geoambientales relacionadas con este tipo de amenaza, y la ponderación por pesos relativos de cada una de las variables, siguiendo procedimientos de zonificación por medio de sistemas de evaluación numérica y superponiendo las temáticas relacionadas en dicha evaluación.

Los criterios utilizados para la selección de los parámetros, corresponden a planteamientos prácticos preestablecidos, de fácil observación en el campo y con un alto grado de representatividad en cuanto a indicadores de potencialidad torrencial se refiere.

A continuación se presenta la descripción de las variables que se utilizaron para la evaluación semicuantitativa de ésta amenaza en el área de influencia.

5.1.11.7.1 Precipitación

Es un factor de gran importancia para determinar la potencialidad torrencial que presentan los cursos de agua y las cuencas aferentes, ya que constituye un agente activador de fenómenos torrenciales.

El caudal de las crecientes, y su capacidad erosiva, es incrementado por el caudal sólido de los materiales que arrastran, producto entre otros de la erosión superficial, del lavado de los deslizamientos someros y de la erosión de orillas en un proceso que da lugar a las avenidas torrenciales.

Puesto que la metodología está orientada a la identificación y zonificación de áreas potencialmente torrenciales y no al diseño de obras de control de crecidas o establecimiento de medidas en vertientes, resultó pertinente evaluar este parámetro a través de la generación del mapa de isoyetas anuales, considerando las estaciones de influencia en el área. Las precipitaciones altas aumentan la carga de los cursos de agua en el arrastre de los materiales presentes en sus cauces.

Se asignaron diferentes categorías de evaluación a los rangos de precipitación media anual, las unidades de estabilidad relativa, esto permitió homogenizar los diversos parámetros para posteriormente analizarlos; cada categoría está compuesta por un dígito numérico que va del 1 al 5, donde 1 corresponde a la condición más favorable y 5 representa la condición más desfavorable (ver Tabla 5-170).

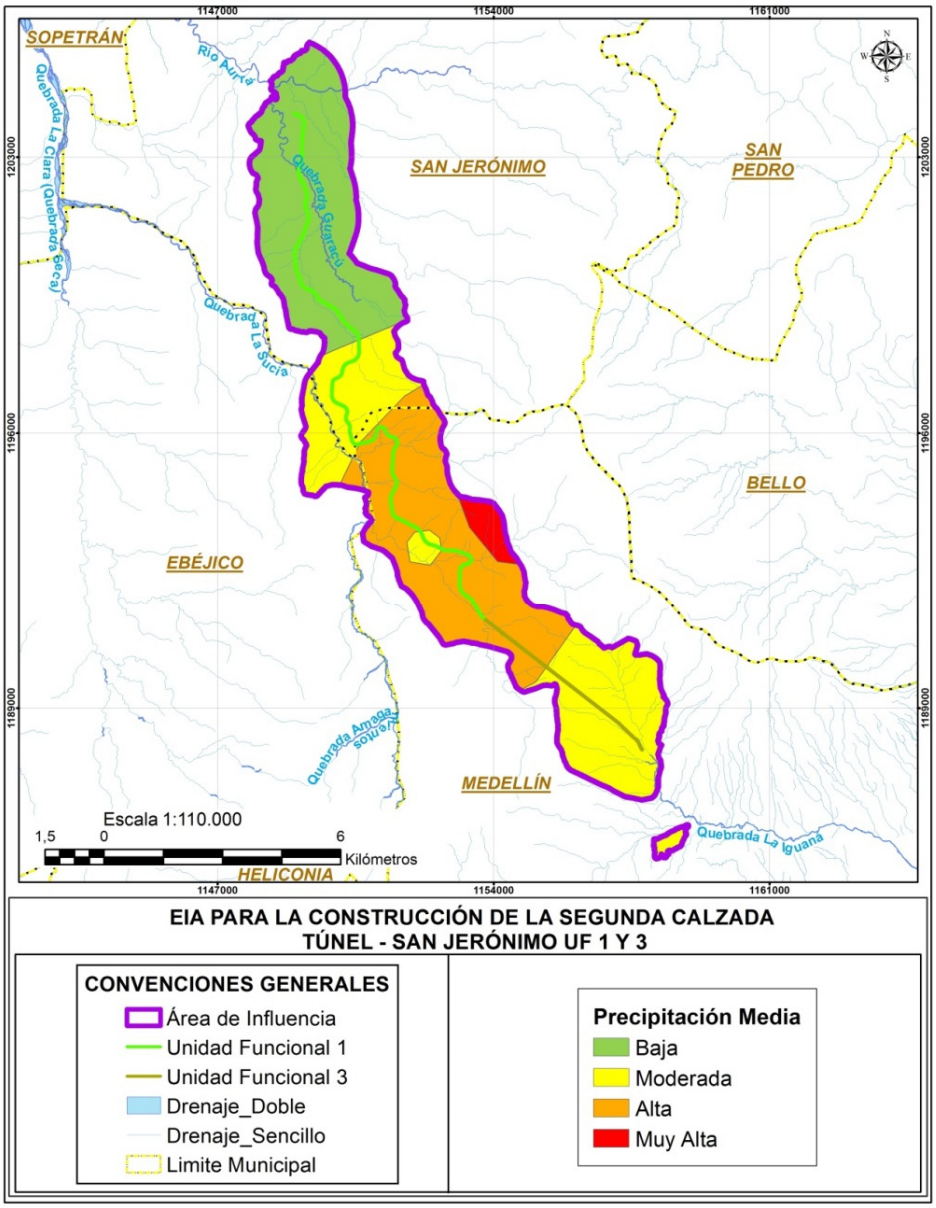
Tabla 5-170Categorías de evaluación para la precipitación total anual el área de influencia

Rango de Precipitación(mm)	Categoría	Calificación
<1600	Muy Baja	1
1600 – 2000	Baja	2
2000 – 2200	Moderada	3
2200 – 2400	Alta	4
> 2400	Muy Alta	5

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

El resultado de este análisis de reclasificación para el parámetro de Precipitación se muestra en la Figura 5-280.

Figura 5-280Mapa de categorización de la Precipitación como factor de torrencialidad en el área de influencia



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

5.1.11.7.2 Densidad de drenaje

La densidad de drenaje fue definida por Horton (1.932) como la longitud de los canales (L) por unidad de área (A).Se reconoce que la densidad de drenaje es un valioso indicador de las relaciones entre clima, vegetación y la resistencia del substrato rocoso o edáfico a la erosión.

Este parámetro constituye un elemento indicativo de las causas o agentes que contribuyen a la integración de la red hídrica. Para el asunto en consideración, es necesario tener en cuenta que durante el transcurso, o con posterioridad más o menos inmediata a los períodos de precipitaciones, escurre por la superficie de la cuenca una cantidad de agua que al ir encauzándose en los diferentes tributarios, termina por concentrarse en el colector, configurando así un sistema hidrográfico.

Si la zona posee una cuenca bien desarrollada, la superficie medida de los terrenos a través de los cuales tiene lugar el escurrimiento, es reducida y el río alcanza los cursos con prontitud. También se debe tener en cuenta, que la erosión retrocedente y, consecuentemente la profundización de los lechos fluviales, están controlados por los siguientes factores:

- Características litológicas
- Características climáticas
- Magnitud de la pendiente

Si se toma una unidad de área, la extensión de los cursos de agua es menor en una zona árida que en una húmeda. Por otra parte, la densidad de drenaje tiende a ser baja, cuando los materiales son muy permeables (arenas y gravas), debido a que la infiltración es alta quedando poca disponibilidad de agua, que pueda alimentar a los cauces en superficie. Esta situación se ve favorecida cuando se trata de una topografía llana, bajo clima árido. En regiones húmedas, con pendientes marcadas y rocas impermeables, la densidad de drenaje tiende a ser máxima.

En síntesis, climas húmedos tienden a densidades de drenaje más bajas que en regiones áridas de litologías comparables, como resultado de la protección de la cobertura vegetal. Por otra parte, áreas de bajo relieve y buena infiltración muestran generalmente una densidad de drenaje más baja que zonas con mayores relieves o baja permeabilidad. Se puede admitir en consecuencia, que para una cuenca dada existe cierta concordancia entre el coeficiente de escurrimiento y la densidad de drenaje de la misma.

Se asignaron valores entre 1 y 5 a cada uno de los índices de Densidad de Drenaje (Dd) calculados para la morfometría de las cuencas. Al integrar los índices, se generó un conjunto de posibles combinaciones a partir de las cuales se definieron cinco (5) clases morfométricas con base en la posible respuesta de los torrentes ante un evento de precipitación. Así, las clases morfométricas vienen definidas por la integración de la densidad de drenaje, las cuales generan características muy particulares que permiten evaluar la respuesta de los torrentes, desde muy lenta hasta muy rápida y violenta, para generar crecidas torrenciales.

El resultado de esta operación permite clasificar cada punto del mapa dentro de cinco categorías que se describen en la Tabla 5-171

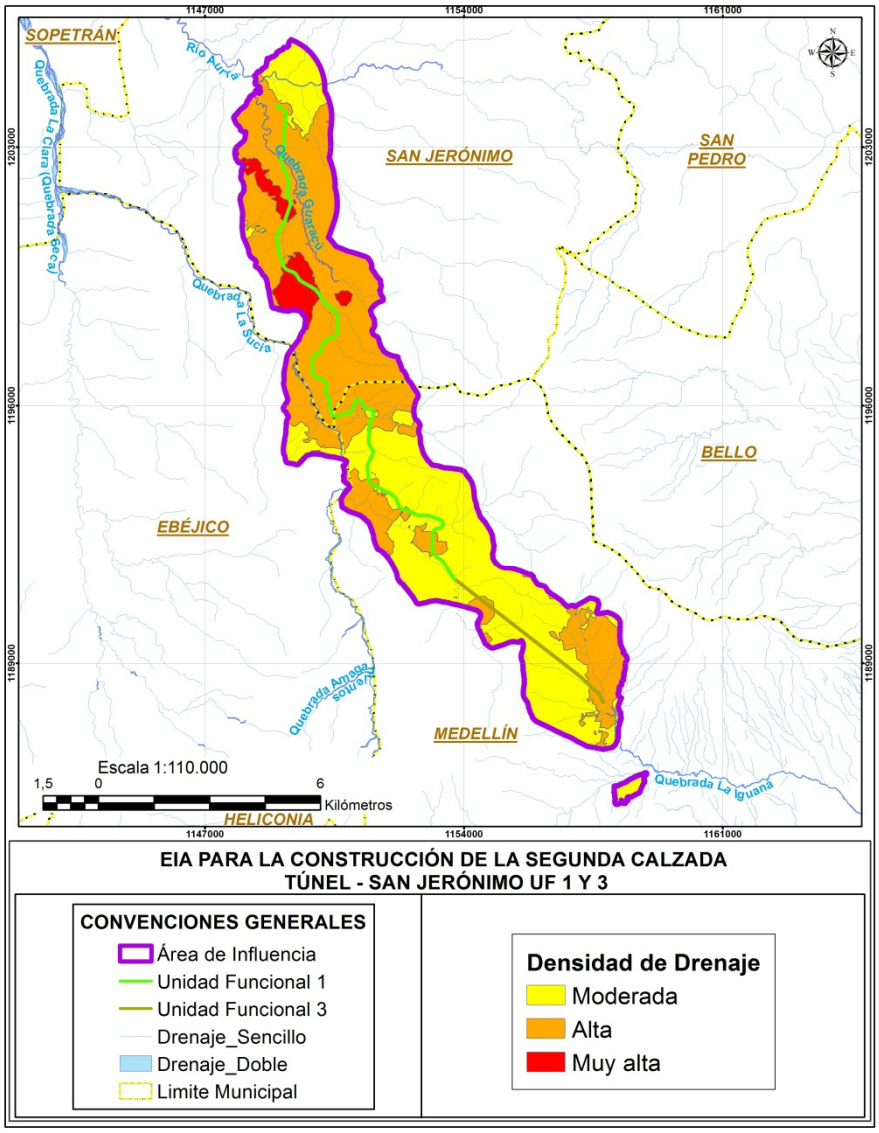
Tabla 5-171Categorías de evaluación para la Densidad de drenaje en el área de influencia

Rangos Densidad de drenajes(Km/Km^2)	Valoración	Valoración
<2.0	1	Muy Baja
2.0–2.7	2	Baja
2.7–5.5	3	Moderada
5.5–7.0	4	Alta
>7.0	5	Muy Alta

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

El resultado de este análisis de reclasificación para el parámetro de Densidad de drenaje (km/km^2) es como se muestra en la Figura 5-281.

Figura 5-281 Mapa de categorización de la Densidad de Drenajes (Dd) como factor de torrencialidad en el área de influencia



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

5.1.11.7.3 Tiempos de Concentración, Tc

El tiempo de concentración es el tiempo que tardaría una gota de agua en recorrer la longitud desde el punto más distante de la corriente de agua de una cuenca, hasta el lugar de medición. Los tiempos de concentración son calculados a partir de las características físicas de la cuenca, las cuales son: pendientes, longitudes, elevaciones medias y área de la cuenca. Es de notar que todas las fórmulas tienen factores de corrección que aplican según la cobertura de la cuenca (German Monsalve, 1.999: p.180).

Según Verstappen (1.983) es uno de los parámetros más importantes para determinar caudal pico, y es indicativo del grado de erodabilidad de los suelos y rocas, porcentaje de erosión y de las condiciones climáticas imperantes en la cuenca. Es un factor que depende de las características físicas de las rocas, capacidad de infiltración, cobertura vegetal, topografía y ciclos de erosión-depositación. Si se relaciona con la morfometría de la cuenca, elevados valores de densidad de drenaje, indican el predominio del escurrimiento sobre la infiltración, bajo almacenamiento subsuperficial y subterráneo, rocas o sedimentos de texturas finas de relativamente baja permeabilidad y elevada susceptibilidad a la erosión. Sus efectos teóricos sobre un hidrograma indican tiempos de concentración cortos.

Existen diversas metodologías para la estimación del tiempo de concentración que han sido desarrolladas a partir de conceptualizaciones semi-empíricas. Las más empleadas en los estudios de hidrología son las siguientes:

- **Kirpich**

$$Tc = 0.06628 \cdot \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

Desarrollada a partir de información del SCS, recomendada para cuencas rurales en zonas montañosas, con canales bien definidos y pendientes empinadas (de 3% a 10%).

- **U.S. Corps of Engineers**

$$Tc = 0.0882 \cdot \frac{L^{0.76}}{S^{0.19}}$$

- **Chow**

$$Tc = 0.0197 \cdot \frac{L^{0.64}}{S^{0.32}}$$

Donde:

L: Longitud total del cauce principal en (Km)
S: Pendiente Promedio en (m/m)
Tc: Tiempo de Concentración en (min)

Se asignaron valores entre 1 y 5 a cada rango de tiempos de concentración calculados para las cuencas menores identificadas en el área El resultado de esta operación permite clasificar cada punto del mapa dentro de cinco categorías que se describen en la Tabla 5-172

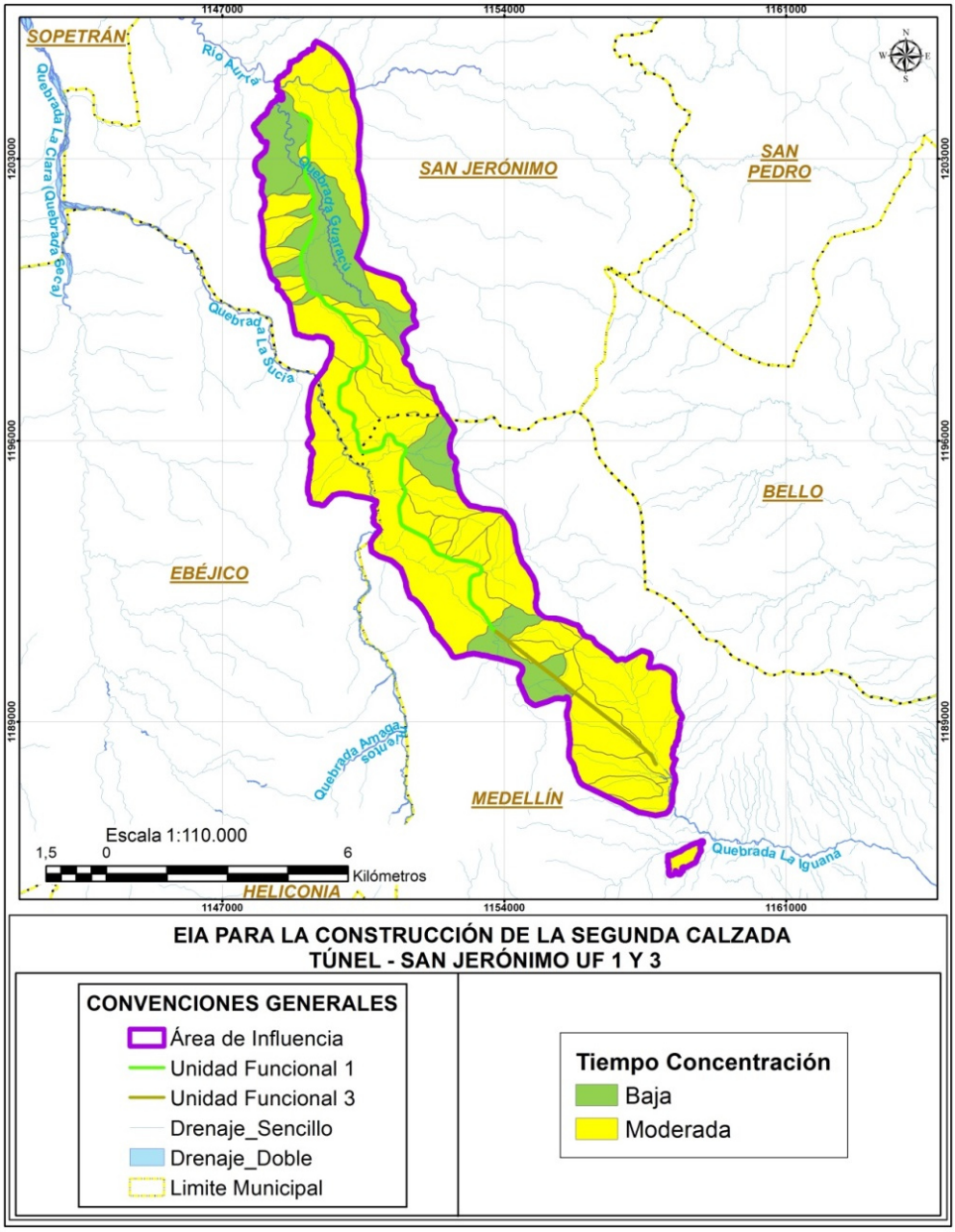
Tabla 5-172Categorías de evaluación para el tiempo de concentración en el área de influencia

Rango de Tiempo de Concentración (min)	Valoración	Valoración
> 240	1	Muy Baja
240 - 60	2	Baja
60 - 15	3	Moderada
15 - 5	4	Alta
< 5	5	Muy Alta

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

El resultado de este análisis de reclasificación para el parámetro de tiempo de concentración se muestra en la Figura 5-282.

Figura 5-282 Mapa de categorización de tiempo de concentración como factor de torrencialidad en el área de influencia



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

5.1.11.7.4 Categorización de la amenaza por avenidas torrenciales

La evaluación de la amenaza por avenidas torrenciales está definida de la siguiente manera:

$$Amenaza\ Torrencial\ (AT)=0.4P+0.4Tc+0.2Dd$$

Dónde:

AT=Amenaza por avenidas torrenciales.
P=Nivel de amenaza según la precipitación media total anual
Tc= Nivel de amenaza según el tiempo de concetración
Dd=Nivel de amenaza según la densidad de drenaje.

Se asignaron diferentes categorías de evaluación a los rangos de precipitación media anual, las clases morfométricas medidas como densidad de drenaje y el tiempo de concetración, esto permitió homogenizar los diversos parámetros para posteriormente analizarlos; cada categoría está compuesta por un dígito numérico que va del 1 al 5, donde 1 corresponde a la condición más favorable y 5 representa la condición más desfavorable.

Con la ponderación de estos parámetros en la Tabla 5-173, se presentan los intervalos para la categorización y grado de amenaza por avenidas torrenciales.

Tabla 5-173Intervalos y categorías de la amenaza por avenidas torrenciales

Rango de Valoración de la variable AT	Categoría
0–1	Muy Baja
1–2	Baja
2–3	Moderada
3–4	Alta
4–5	Muy Alta

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

El significado de cada uno de estos rangos a raíz de los eventos de torrencialidad se indica en la Tabla 5-174.

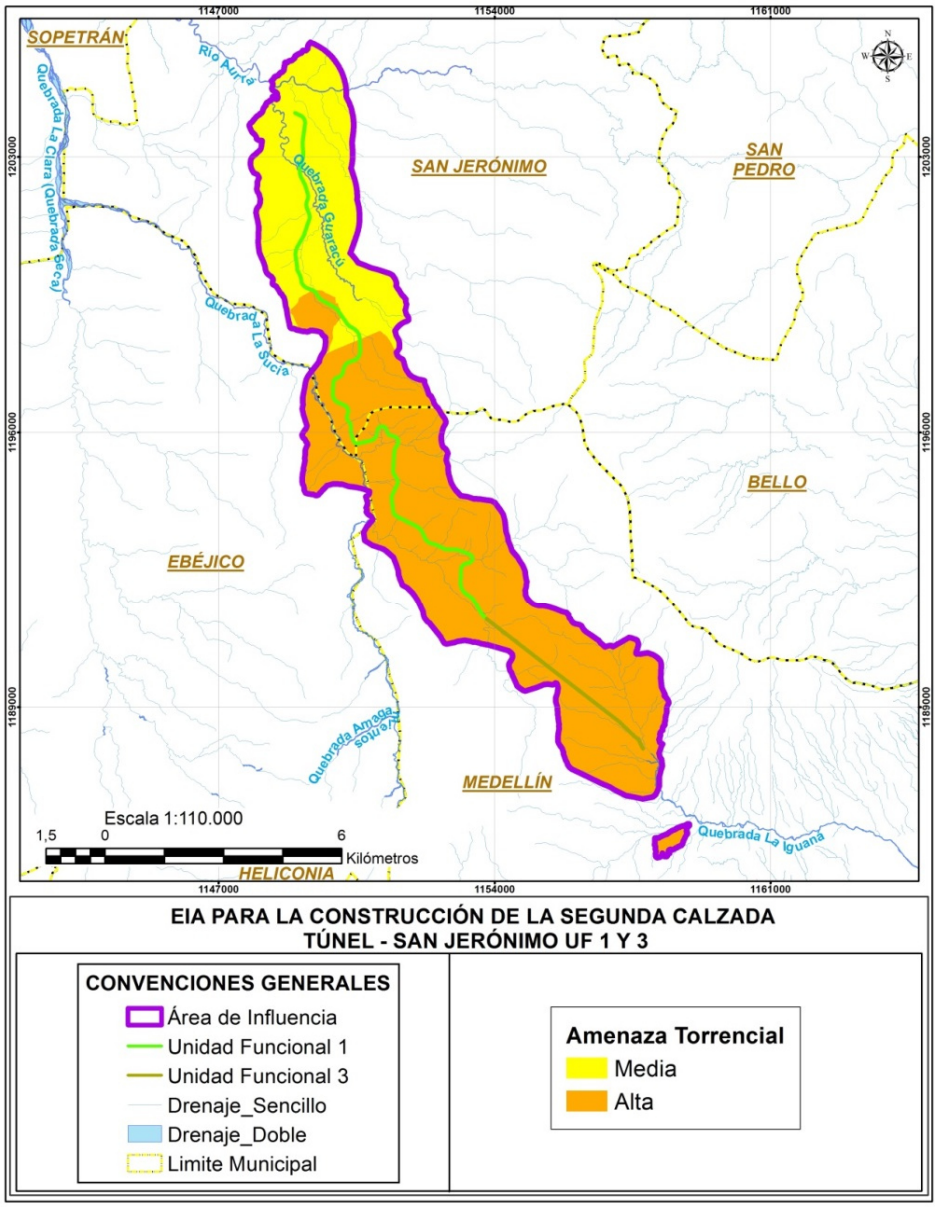
Tabla 5-174 Tipos de amenaza por avenidas torrenciales en las cuencas del área de influencia

Nivel de Amenaza	Rango	Descripción
0–1	Muy Baja	Son áreas que tienen poca o baja activación como respuesta a lluvias de larga duración cubriendo zonas extensas. Generalmente, son los interfluvios y drenajes de primer orden que drenan directamente al río principal de la cuenca.
1–2	Baja	Son áreas que se activan como respuesta a lluvias de larga duración cubriendo zonas extensas. Generalmente, son los interfluvios y drenajes de primer orden que drenan directamente al río principal de la cuenca.
2–3	Moderada	Presentan una cobertura vegetal variada desde los bosques hasta cultivos, potencialmente inestables por movimientos en masa, pendiente, procesos erosivos y crecientes de los cursos de agua; poseen una respuesta hidrológica moderadamente rápida. Generalmente presentan crecidas en las épocas de mayor precipitación.
3–4	Alta	Áreas potencialmente inestables por pendiente y movimientos en masa; poseen una respuesta hidrológica rápida con una cobertura del suelo que incluye matorrales, asociación de cultivos y pastizales y pastizales naturales. Generalmente presentan crecidas en periodos lluviosos.
4–5	Muy Alta	Áreas caracterizadas por presentar fuertes precipitaciones y condiciones de humedad antecedentes altos, con predominio de cultivos, pastizales y vegetación arbustiva. En áreas inestables y potencialmente inestables que responden rápida y violentamente a lluvias de alta intensidad y corta duración, pueden generar crecidas torrenciales.

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

En la Figura 5-283 se representan las zonas de amenaza por avenidas torrenciales en el área de influencia.

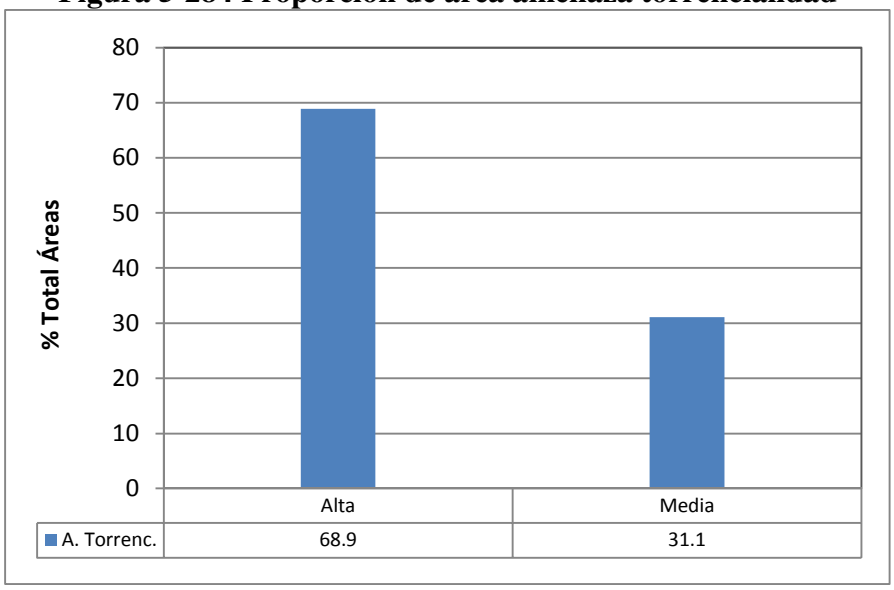
Figura 5-283 Amenaza por avenidas torrenciales



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

La Figura 5-284 muestra que el 68.9% del AII se localiza en zonas de alta amenaza a la torrencialidad; mientras el 31.1 % corresponde a amenaza media o moderada.

Figura 5-284 Proporción de área amenaza torrencialidad



Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

5.1.11.8 **Amenaza por inundaciones**

Las inundaciones son fenómenos producidos por el aumento de caudales con desborde del cauce normal de los cuerpos de agua, ocurren en época de lluvias y afecta especialmente las zonas de baja topografía y planicies, tienen una dinámica específica en el año de acuerdo con el comportamiento hidrológico de la zona.

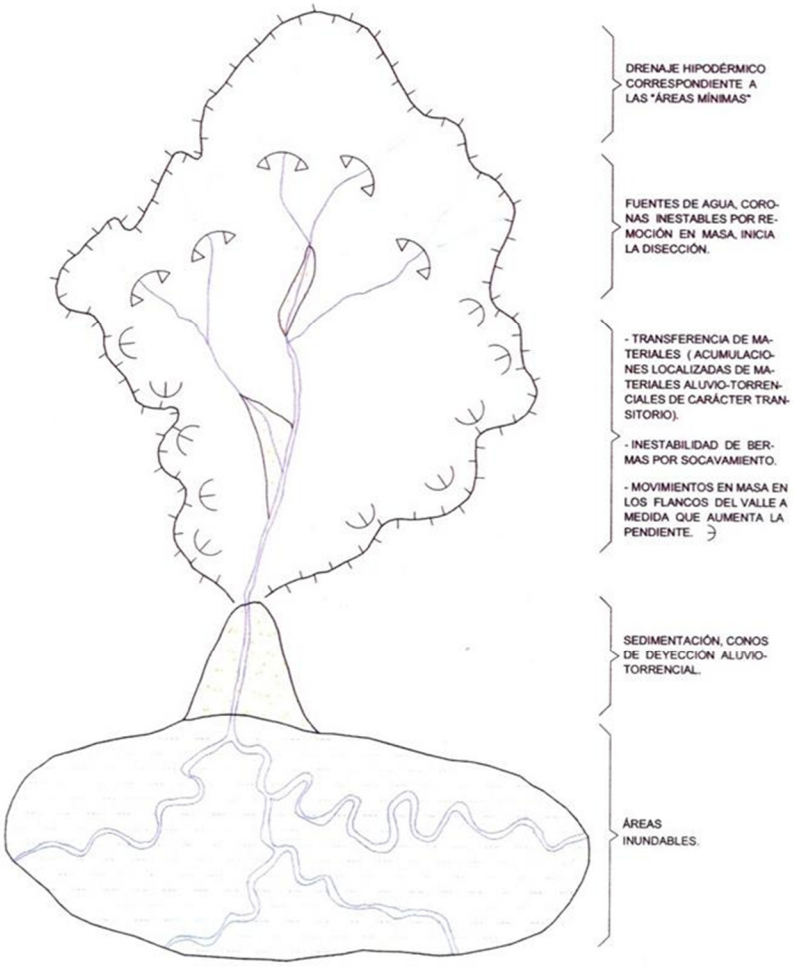
En el área de estudio la susceptibilidad de inundación está asociada a relieves de terrazas y barras longitudinales, áreas próximas a los cauces e influenciadas por las precipitaciones en el área y zonas altas de la región.

El estudio referente a nivel nacional y de mayor relevancia fue realizado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, para evaluar la susceptibilidad a inundación en todo el territorio nacional a escala 1:100.000. Para esto, el instituto tomó como línea base los meses de octubre y diciembre de 2001 (condiciones meteorológicas normales) para realizar los análisis espaciales, acompañados de fotointerpretación para zonificar el territorio nacional en zonas inundables periódicamente (por recurrencia de eventos), zonas inundadas (cota alcanzada durante el fenómeno de la Niña 2010 – 2011) y zonas susceptibles a inundación (extraídas con base en el análisis de sistemas morfogenéticos del territorio nacional en el año 2010 (IDEAM 2012).

5.1.11.8.1 Metodología

Según Flórez (2003), los modelados aluviales[83] resultan de la dinámica fluvial de las corrientes de agua. Un sistema fluvial se entiende bajo el concepto de sistema de transferencia que corresponde con una cuenca hidrográfica en la que se diferencian áreas de la cuenca o sectores del cauce del drenaje llamados básicamente "área de aporte", "transporte" y "sedimentación", elementos que conforman una cadena[84] (ver Figura 5-285).

Figura 5-285 Sistema de Transferencia



Fuente: Modificada por Consultoria Colombiana S.A.

De acuerdo con la fuente anterior y para entender el sistema de transferencia se debe tener en cuenta las siguientes definiciones:

[83] Modelado: término opuesto al de relieve y se define como el conjunto de geoformas y de formaciones superficiales correlativas de los procesos morfogénicos (modeladores), y estos explicados por factores de la dinámica externa (viento, agua, glaciares, hombre). Ej.: modelado eólico - dunas, modelado glacial - morrenas.
[84] Catena: conjunto de todos los elementos interrelacionados que integran un modelado.

- Área de aporte: Las partes altas de una cuenca reciben el agua lluvia, la concentran, y por escurrimiento y disección, el caudal y los sedimentos van a los ejes de drenaje.
- Área de transporte. El proceso es básicamente el transporte, aunque por disección hay también arranque de materiales en el fondo y márgenes, que se incorporan como sedimentos a las corrientes.
- Área de sedimentación. En las partes bajas (piedemontes o bordes de llanuras) disminuye su competencia y capacidad de carga, con la pérdida notable de su pendiente longitudinal, y ocurre sedimentación en conos aluviales o aluvio-torrenciales. Por la baja profundidad del cauce, sus aguas se desbordan durante el periodo lluvioso, formando áreas de inundación y desborde de las corrientes de agua en la llanura aluvial (partes bajas o depresionales).A continuación se presenta la zonificación por inundación, la cual se realizó utilizando un sistema semicuantitativo, siguiendo los procedimientos de zonificación del sistema de evaluación numérica y superponiendo las temáticas relacionadas en dicha evaluación, descritos por Varnes (op cit.) y Van Westeen (op cit.).

5.1.11.8.2 Evaluación de amenaza por inundación

De acuerdo con lo anterior, para el estudio de zonificación de amenazas se tuvieron en cuenta dos aspectos relacionados con la geomorfología de los terrenos del área de influencia, que corresponden al paisaje y las unidades geomorfológicas. La valoración de susceptibilidad a inundaciones por características geomorfológicas, se realizó con base en los criterios que se establecen en la Tabla 5-175, donde 1 corresponde a muy baja susceptibilidad y 5 a muy alta. La Tabla 5-176 muestra la calificación del territorio, aplicando los mencionados criterios.

Tabla 5-175 Intervalos y categorías de amenaza por inundaciones

Valor	Amenaza por inundaciones
1	Muy Baja
2	Baja
3	Moderada
4	Alta
5	Muy Alta

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

Tabla 5-176 Susceptibilidad a inundaciones por características geomorfológicas

Z. Geoestruct	Prov. Geom	Unidad geomorfológica		Subunidad geomorf.	Componente geomorfológico	Símbolo	Calificación por inundación
Cordillera	Cordillera Central	Montañas	Denudativas (D)	Filas y Vigas	Laderas (l)	**Dl**	1
					Valles estrechos aluviales y/o coluvio aluviales (ve)	**Dve**	2
					Coluvio de remoción (cr)	**Dcr**	1
					Lleno antrópico (ll)	**Dll**	1

Z. Geoestruct	Prov. Geom	Unidad geomorfológica		Subunidad geomorf.	Componente geomorfológico	Símbolo	Calificación por inundación
			Denudativas estructurales (DS)	Filas y Vigas	Laderas (l)	DSl	1
					Valles estrechos aluviales y/o coluvio aluviales (ve)	DSve	2
					Coluvio de remoción (cr)	DScr	1
					Lleno antrópico (ll)	DSll	1
			Estructurales denudativas (SD)	Espinazo	Coluvio de remoción (cr)	SDcr	1
					Ladera estructural (le)	SDle	1
					Valles estrechos aluviales y/o coluvio aluviales (ve)	SDve	2
Cordillera	Cordillera Central	Piedemonte	Denudativa estructural (DS)	Lomas y colinas	Lomerío (lo)	DSlo	1
					Laderas estructurales (le)	DSle	1
			Aluvio diluvial (FA)	Abanicos aluviales	Cuerpo y base de abanico aluvial (aa)	FAaa	2
					Abanico terraza (at)	FAat	1
			Coluvial (C)	Coluvio de remoción	Cono coluvial (cc)	Ccc	1
			Aluvial (F)	Valle aluvial	Valle estrecho aluvial (ve)	Fve	3

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

Se definió como factor detonante de las inundaciones a la precipitación, la razón es que su ocurrencia siempre esta asociada al incremento de los caudales superficiales de las fuentes de agua y la posibilidad de desbordamiento de los cauces, trayendo como consecuencia dicho fenómeno natural.

Se asignaron diferentes categorías de evaluación a los rangos de precipitación media anual, cada categoría está compuesta por un digito numérico que va del 1 al 5, donde 1 corresponde a la condición más favorable y 5 representa la condición más desfavorable (ver Tabla 5-177).

Tabla 5-177 Categorías de evaluación para la precipitación total anual en las cuencas de la zona de estudio

Rango de Precipitación(mm)	Categoría	Calificación
<1600	Muy Baja	1
1600 - 2000	Baja	2
2000 - 2200	Moderada	3
2200 - 2400	Alta	4
> 2400	Muy Alta	5

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

La evaluación de la amenaza por inundación se definió así:

$$AI= (0.7*SG)+(0.3*P)$$

Dónde:

AI= Amenaza por inundación.
SG= Susceptibilidad geomorfológica por paisaje y relieve
P= Calificación por precipitación.

Aplicando la evaluación anterior, a las condiciones geomorfológicas y la categorización de la precipitación, para el área de influencia, se encontró la distribución espacial de las zonas con tendencia a inundaciones, las cuales se pueden observar en la Figura 5-286.

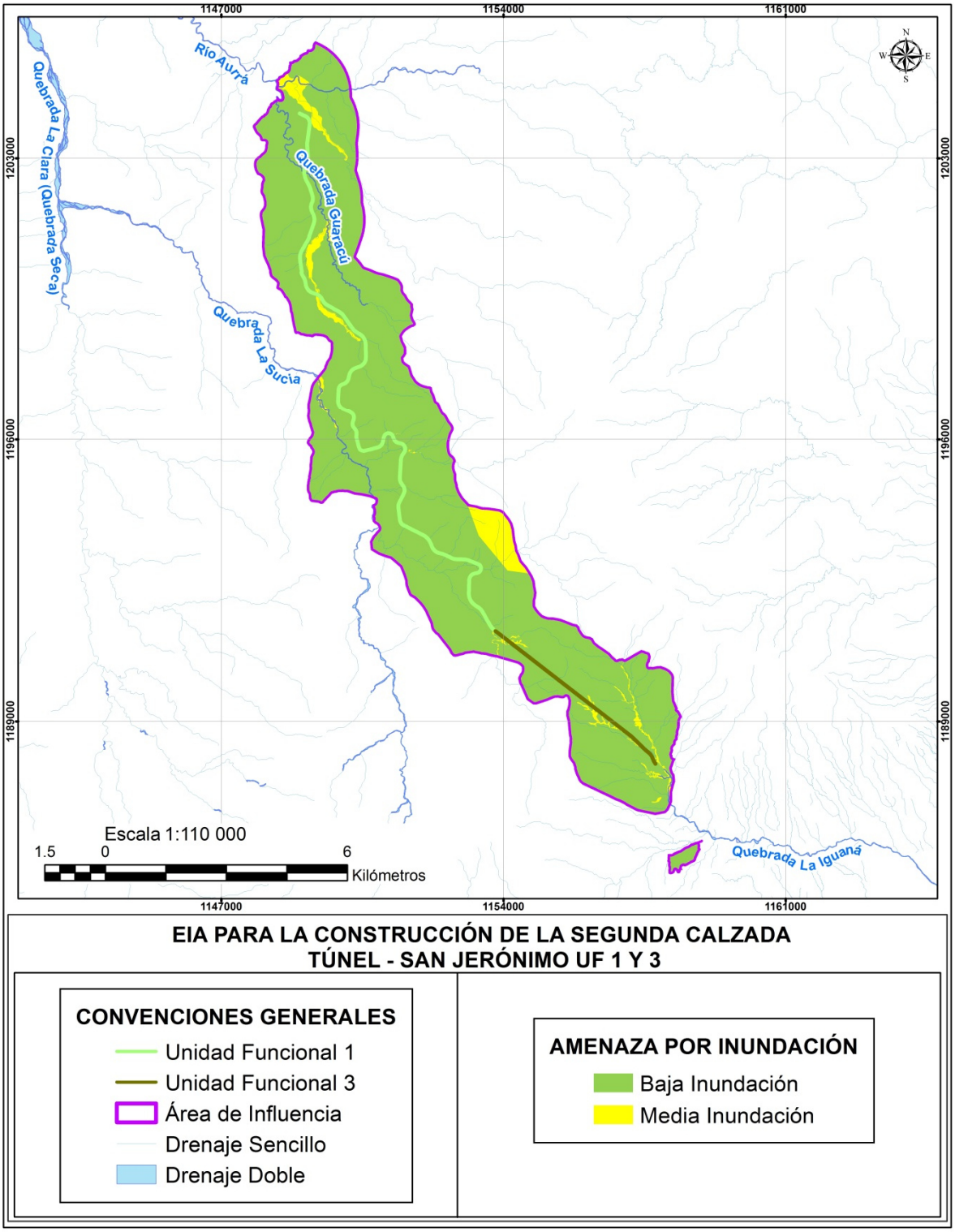
De acuerdo con los resultados obtenidos a partir de la Figura 5-286, se elaboró la Tabla 5-178, donde se presentan los resultados de las áreas clasificadas según el nivel de amenaza por inundación dentro del área de influencia, encontrándose que el 94.6% del área se encuentra en zonas de amenaza baja.

Tabla 5-178 Amenaza por inundación

Amenaza por Inundación	Área de Influencia	
	Área (ha)	%
Baja	5.063,17	94,6
Moderada	287,32	5,4
Total	5.350,49	100,00%

Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

Figura 5-286 Amenaza por inundación en el área de influencia



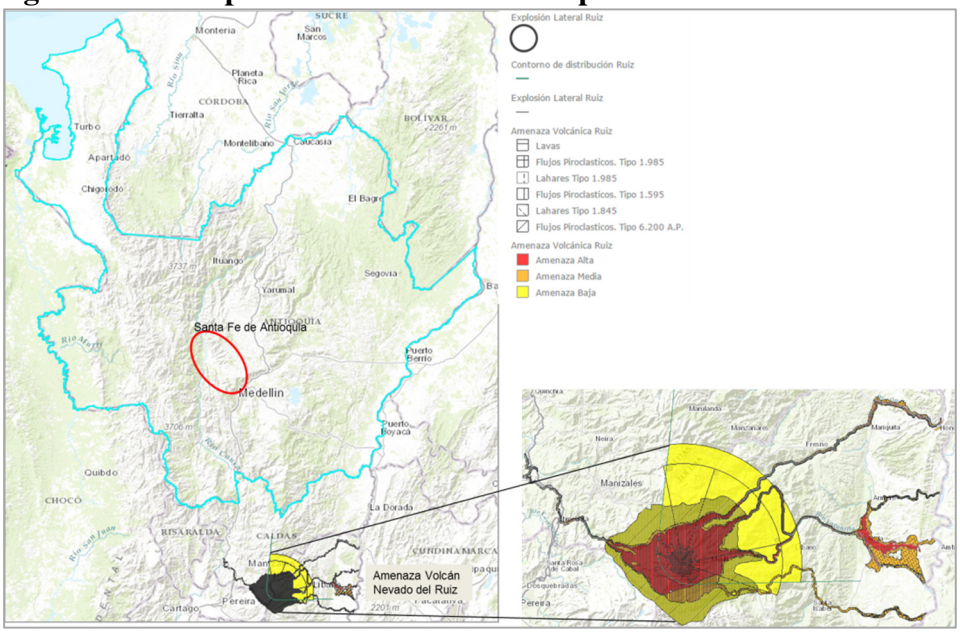
Fuente: Consultoría Colombiana S.A., 2016

5.1.11.9 **Amenaza volcánica**

La información que se relaciona en este numeral, está basada la página web del Instituto Geológico Colombiano, SGC.

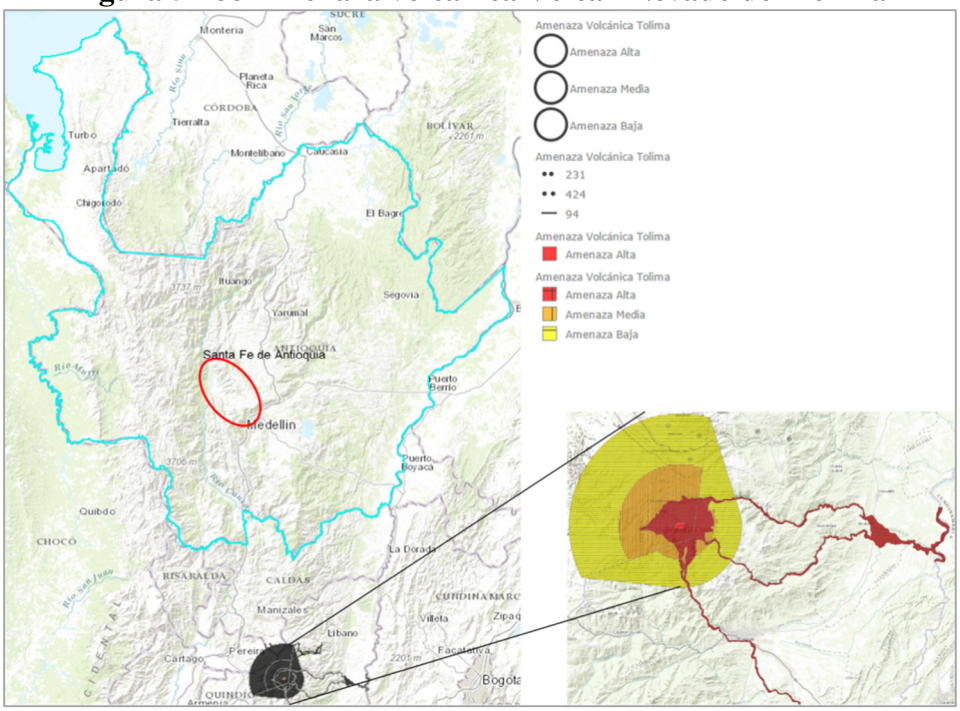
Los volcanes en Colombia se ubican principalmente a lo largo de la Cordillera Central, desde el límite colombo – ecuatoriano hasta la confluencia de los departamentos de Risaralda, Caldas y Tolima. En el departamento de Antioquia, la influencia volcánica es de muy bajo grado. Los focos volcánicos más cercanos al AII del proyecto se encuentran muy distantes y no tienen influencia, ver Figura 5-287, Amenaza volcán Nevado del Ruiz, Figura 5-288 Amenaza volcán Nevado del Tolima y Figura 5-289 Amenaza Volcán Santa Isabel.

Figura 5-287 Mapa de Amenaza volcánica por Volcán Nevado del Ruiz



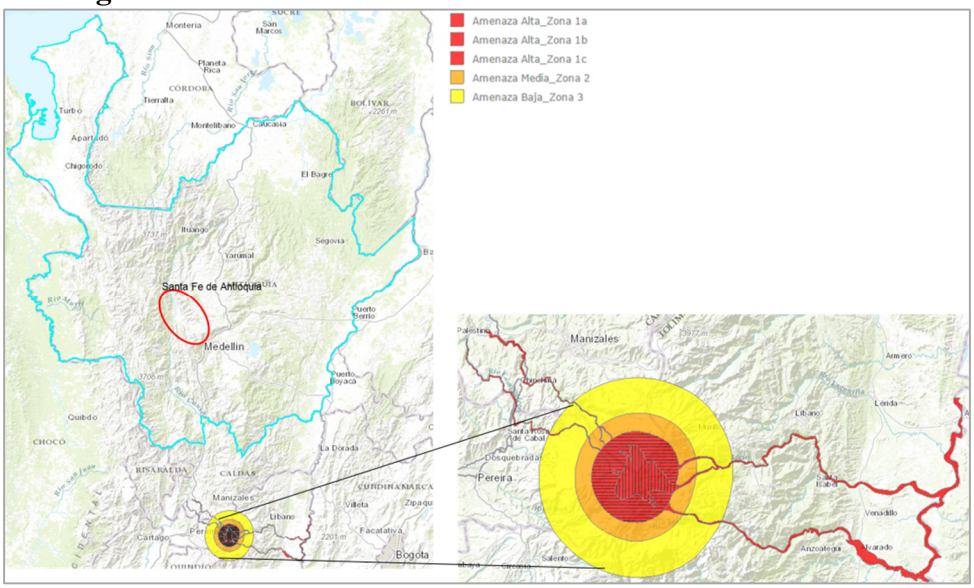
Fuente: http://srvags.sgc.gov.co/JSViewer/Amenaza_volcanica_JS/

Figura 5-288 Amenaza volcánica Volcán Nevado del Tolima



Fuente: http://srvags.sgc.gov.co/JSViewer/Amenaza_volcanica_JS/

Figura 5-289 Amenaza volcánica Volcán Nevado Santa Isabel



Fuente: http://srvags.sgc.gov.co/JSViewer/Amenaza_volcanica_JS/