

5.1.6.7. Calidad del agua.

Con el propósito de evaluar el estado de la calidad del agua antes de la ejecución del proyecto, estimar los potenciales impactos sobre este y con base en los cuerpos de agua susceptibles de intervención del proyecto por ocupación de cauce y vertimientos, se realiza la caracterización fisicoquímica, bacteriológica, microbiológica sobre los cuerpos de agua más representantes en el área de influencia del proyecto. Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, se desarrolló una campaña llevada a cabo en los meses de febrero y marzo de 2021, correspondiente a época seca y húmeda respectivamente.

5.1.6.7.1. Marco normativo

La normatividad nacional aplicable para los cuerpos de agua superficiales evaluados dentro del área de influencia del proyecto es el Decreto 1076 de 2015 y resolución 631 de 2015 para el cuerpo de agua receptor.

5.1.6.7.1.1. Decreto 1076 de 2015

El decreto nacional 1076 del 26 de mayo de 2015 es el decreto Único reglamentario del sector ambiente y desarrollo sostenible, el cual señala los usos permitidos de acuerdo con la calidad del agua en el capítulo 3 sobre ordenamiento del recurso hídrico y vertimientos, sección 9 con los siguientes artículos:

- Artículo 2.2.3.3.9.3. Tratamiento convencional y criterios de calidad para consumo humano y doméstico
- Artículo 2.2.3.3.9.4. Desinfección y criterios de calidad para consumo humano y doméstico.
- Artículo 2.2.3.3.9.5. Criterios de calidad para uso agrícola.
- Artículo 2.2.3.3.9.6. Criterios de calidad para uso pecuario.
- Artículo 2.2.3.3.9.7. Criterios de calidad para fines recreativos mediante contacto primario.
- Artículo 2.2.3.3.9.8. Criterios de calidad para fines recreativos mediante contacto secundario.

En la Tabla 74 se presentan los límites permisibles establecidos para los diferentes usos según el Decreto 1076 de 2015.

Tabla 74. Límites máximos permisibles en diferentes usos del recurso hídrico, Decreto 1076 de 2015

Variable	Unidades	2.2.3.3.9.3	2.2.3.3.9.4	2.2.3.3.9.5	2.2.3.3.9.6	2.2.3.3.9.7	2.2.3.3.9.8
		Consumo humano y doméstico - Tratamiento convencional	Consumo humano y doméstico - Desinfección	Agrícola	Pecuario	Recreativo contacto primario	Recreativo contacto secundario
Aluminio	mg/l	N.E*	N.E*	5	5	N.E*	N.E*
Amoniaco	mg/l	1	1	N.E*	N.E*	N.E*	N.E*
Arsénico	mg/l	0,05	0,05	0,1	0,2	N.E*	N.E*
Bario	mg/l	1	1	N.E*	N.E*	N.E*	N.E*
Berilio	mg/l	N.E*	N.E*	0,1	N.E*	N.E*	N.E*
Boro	mg/l	N.E*	N.E*	0,3 - 4	5	N.E*	N.E*
Cadmio	mg/l	0,01	0,01	0,01	0,05	N.E*	N.E*
Cianuro	mg/l	0,2	0,2	N.E*	N.E*	N.E*	N.E*

Variable	Unidades	2.2.3.3.9.3	2.2.3.3.9.4	2.2.3.3.9.5	2.2.3.3.9.6	2.2.3.3.9.7	2.2.3.3.9.8
		Consumo humano y doméstico - Tratamiento convencional	Consumo humano y doméstico - Desinfección	Agrícola	Pecuario	Recreativo contacto primario	Recreativo contacto secundario
Cinc	mg/l	15	15	2	25	N.E*	N.E*
Cloruros	mg/l	250	250	N.E*	N.E*	N.E*	N.E*
Cobre	mg/l	1	1	0,2	0,5	N.E*	N.E*
Cobalto	mg/l	N.E*	N.E*	0,05	N.E*	N.E*	N.E*
Color	Unidades Platino - cobalto	20	20	N.E*	N.E*	N.E*	N.E*
Compuestos fenólicos	mg/l	0,002	0,002	N.E*	N.E*	0,002	N.E*
Cromo	mg/l	0,05	0,05	0,1	1	N.E*	N.E*
Difenil Policlorados	mg/l	No detectable	No detectable	N.E*	N.E*	N.E*	N.E*
Flúor	mg/l	N.E*	N.E*	1	N.E*	N.E*	N.E*
Hierro	mg/l	N.E*	N.E*	5	N.E*	N.E*	N.E*
Litio	mg/l	N.E*	N.E*	2,5	N.E*	N.E*	N.E*
Manganeso	mg/l	N.E*	N.E*	0,2	N.E*	N.E*	N.E*
Mercurio	mg/l	0,002	0,002	N.E*	0,01	N.E*	N.E*
Molibdeno	mg/l	N.E*	N.E*	0,01	N.E*	N.E*	N.E*
Nitratos	mg/l	10	10	N.E*	100	N.E*	N.E*
Nitritos	mg/l	1	1	N.E*	10	N.E*	N.E*
Níquel	mg/l	N.E*	N.E*	0,2	N.E*	N.E*	N.E*
pH	Unidades de pH	5 - 9	6,5 - 9	4,5 - 9	N.E*	5 - 9	5 - 9
Plata	mg/l	0,05	0,05	N.E*	N.E*	N.E*	N.E*
Plomo	mg/l	0,05	0,05	5	0,1	N.E*	N.E*
Selenio	mg/l	0,01	0,01	0,02	N.E*	N.E*	N.E*
Sulfatos	mg/l	400	400	N.E*	N.E*	N.E*	N.E*
Tensoactivos	mg/l	0,5	0,5	N.E*	N.E*	0,5	0,5
Turbiedad	NTU	N.E*	10	N.E*	N.E*	N.E*	N.E*
Vanadio	mg/l	N.E*	N.E*	0,1	N.E*	N.E*	N.E*

Variable	Unidades	2.2.3.3.9.3	2.2.3.3.9.4	2.2.3.3.9.5	2.2.3.3.9.6	2.2.3.3.9.7	2.2.3.3.9.8
		Consumo humano y doméstico - Tratamiento convencional	Consumo humano y doméstico - Desinfección	Agrícola	Pecuario	Recreativo contacto primario	Recreativo contacto secundario
Coliformes totales	NMP/100ml	20000	1000	5000	N.E*	1000	5000
Coliformes fecales	NMP/100ml	2000	N.E*	1000	N.E*	200	N.E*
Saturación de oxígeno	%	N.E*	N.E*	N.E*	N.E*	70%	70%

N.E* No especificado en la norma.

Fuente: Decreto 1076 de 2015, MADS

5.1.6.7.1.2. Resolución 631 de 2015

Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales. Para el análisis de calidad de agua en el río Coello se tienen en cuenta los parámetros establecidos en el artículo 10, correspondiente a vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas (ARND) a cuerpos de agua superficiales de actividades de minería, parámetros de extracción de minerales de otras minas y canteras.

5.1.6.7.2. Metodología

Los muestreos de calidad de agua se realizaron a través del laboratorio acreditado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, AGQ PRODYCON COLOMBIA SAS. Adicionalmente, el laboratorio realizó el monitoreo teniendo en cuenta la guía para el monitoreo de vertimientos, aguas superficiales y subterráneas del IDEAM. 2002 y el protocolo de seguimiento del agua IDEAM. 2007. La recolección de muestras de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos se realizaron con base en los requerimientos exigidos en el documento de los términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental en proyectos de explotación minera del ANLA (2016). En la Tabla 75, se presentan los parámetros analizados con sus respectivos métodos analíticos.

Tabla 75. Variables y Métodos Analíticos por el Laboratorio

PARÁMETROS	UNIDADES	TÉCNICA	TDR	RES 631 DE 2015
INSITU				
% Saturación de Oxígeno	%	EPA 360.3_OXiDis_A_CONDUS	X	X

PARÁMETROS	UNIDADES	TÉCNICA	TDR	RES 631 DE 2015
Oxígeno Disuelto In Situ Medido MA	mg/L	SM 4500-OG/ASTMD-888-12_OxiDis_A_ELECTRM	X	X
pH In Situ Medido MA	Unidades de pH	SM 4500 H+B_pH_A_ELCTRM	X	X
Temperatura In Situ Medido MA	°C	SM 2550B_Tem_A_ELECTRM	X	X
PARÁMETROS MEDIDOS EN LABORATORIO				
Aceites y Grasas	mg/L	SM 5520 C_GyA_A_FTIR	X	X
Acenafteno	µg/L	EPA8270E Rev6 2018_ComHAP_A_CG_MS	X	X
Acenaftileno	µg/L	EPA8270E Rev6 2018_ComHAP_A_CG_MS	X	X
Acidez Total	mg/L CaCO ₃	SM 2310 B_Aci_A_VOLUM	X	X
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	SM 2320 B_AlcTotBic_A_CALC	X	X
Algas del Perifiton	ind/cm ²	SM 10300C_AlgPer_A_IDENTF	X	X
Algas del Perifiton	taxa	SM 10300C_AlgPer_A_IDENTF	X	X
Aluminio Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	X	X

PARÁMETROS	UNIDADES	TÉCNICA	TDR	RES 631 DE 2015
Antraceno	µg/L	EPA8270E Rev6 2018_ComHAP_A_CG_MS	X	X
AOX (Comp. Organicos Adsorbibles)	µg/L	PS-9129_AAOX_A_SUBCT	X	X
Arsénico Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	X	X
Benceno	µg/L	EPA 8260 D_SumBTEX_A_CG_MS_PT	X	X
Benzo (a) antraceno	µg/L	EPA8270E Rev6 2018_ComHAP_A_CG_MS	X	X
Benzo (a) pireno	µg/L	EPA8270E Rev6 2018_ComHAP_A_CG_MS	X	X
Benzo (b) fluoranteno	µg/L	EPA8270E Rev6 2018_ComHAP_A_CG_MS	X	X
Benzo (g,h,i) perileno	µg/L	EPA8270E Rev6 2018_ComHAP_A_CG_MS	X	X
Benzo (k) fluoranteno	µg/L	EPA8270E Rev6 2018_ComHAP_A_CG_MS	X	X
Cadmio Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	X	X
Calcio Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	X	X
Carbono Orgánico Disuelto	mg/L	SM 5310 B_COT_A_COM_IR		X

PARÁMETROS	UNIDADES	TÉCNICA	TDR	RES 631 DE 2015
Carbono Orgánico Total - COT	mg/L	SM 5310 B_COT_A_COM_IR	X	
Cianuro Disponible	mg/L	PS-9273_CiDis_A_SUBCT	X	X
Cianuro Libre	mg/L	PS-9041_CiaLib_A_SUBCT	X	X
Cianuro Total	mg/L	SM 4500 CN-E Mod_Cia_A_UV_VIS	X	X
Cloruros	mg/L	SM 4110 B Mod_Ani_A_CRM_ION	X	X
Cobre Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	X	X
Coliformes Fecales por NMP	NMP/100mL	SM 9221 E_ColFec_A_NMP	X	X
Coliformes Termotolerantes (Fecales)	u.f.c./100 ml	SM 9222D_ColTerFec_A_FIL_MEMB		X
Coliformes Totales	u.f.c./100 ml	ISO 9308-1:2014_FilMem_A_FIL_MEMB		X
Coliformes Totales por NMP	NMP/100mL	SM9221B Mod_ColFec_A_TUB_MUL	X	X
Color Real a 436 nm	m-1	ISO7887 2011MetB_ColRea_A_UV_VIS	X	X
Color Real a 525 nm	m-1	ISO7887 2011MetB_ColRea_A_UV_VIS	X	X
Color Real a 620 nm	m-1	ISO7887 2011MetB_ColRea_A_UV_VIS	X	X
Color Real a tres longitudes	m-1	ISO7887 2011MetB_ColRea_A_UV_VIS	X	X
Conductividad Eléctrica	µS/cm	SM 2510 B_ConEle_A_ELECTM	X	X

PARÁMETROS	UNIDADES	TÉCNICA	TDR	RES 631 DE 2015
Criseno	µg/L	EPA8270E Rev6 2018_ComHAP_A_CG_MS	X	X
Cromo Hexavalente	mg/L	SM 3500 Cr-B_Cro_A_UV_VIS	X	X
Cromo Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	X	X
DBO 5 Filtrada	mg/L	SM5210B-C/ASTM888MétC_Dbo_A_ELECTRM		X
DBO 5 Suspendida	mg/L	SM5210B-C/ASTM888MétC_Dbo_A_ELECTRM		X
DBO5	mg/L	SM5210B-C/ASTM888MétC_Dbo_A_ELECTRM		X
Dibenzo (a,h) antraceno	µg/L	EPA8270E Rev6 2018_ComHAP_A_CG_MS	X	X
DQO	mg/L	SM 5220 D_Dqo_A_UV_VIS	X	X
DQO Filtrada	mg/L	SM 5220 D_Dqo_A_UV_VIS		X
DQO Suspendida	mg/L	SM 5220 D_DqoSus_A_CALC		X
Dureza Cálcica	mg/L	SM 2340B C_Dur_A_VOLUM	X	
Dureza Total	mg/L	SM 2340B C_Dur_A_VOLUM	X	X
Etilbenceno	µg/L	EPA 8260 D_SumBTEX_A_CG_MS_PT	X	X
Fauna Íctica	taxa	EPA 841-B-99-002_MaInV_A_	X	X

PARÁMETROS	UNIDADES	TÉCNICA	TDR	RES 631 DE 2015
Fauna Íctica	Indiv	EPA 841-B-99-002_MaInv_A_	X	X
Fenantreno	µg/L	EPA8270E Rev6 2018_ComHAP_A_CG_MS	X	X
Fenoles	mg/L	SM 5530 B,C,D_Fen_A_UV_VIS	X	X
Fluoranteno	µg/L	EPA8270E Rev6 2018_ComHAP_A_CG_MS	X	X
Fluoreno	µg/L	EPA8270E Rev6 2018_ComHAP_A_CG_MS	X	X
Fosfatos	mg/L	SM 4110 B Mod_Ani_A_CRM_ION	X	X
Fósforo Reactivo Soluble	mg/L	PS-9207_FosRea_A-_SUBCT		X
Fósforo Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	X	X
Hidrocarburos	mg/L	SM 5520 C,F_Hid_A_FTIR	X	X
Hierro Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	X	X
Indeno (1,2,3-cd) pireno	µg/L	EPA8270E Rev6 2018_ComHAP_A_CG_MS	X	X
m,p-Xileno	µg/L	EPA 8260 D_SumBTEX_A_CG_MS_PT	X	X
Macroinvertebrados Bentónicos	ind/m2	EPA 841-B-99-002_MaInv_A_	X	

PARÁMETROS	UNIDADES	TÉCNICA	TDR	RES 631 DE 2015
Macroinvertebrados Bentónicos	taxa	EPA 841-B-99-002_MacInv_A_	X	
Macroinvertebrados bentónicos abundancia	ind/m2	EPA 841-B-99-002_MacBen_A_		X
Macroinvertebrados bentónicos riqueza	taxa	EPA 841-B-99-002_MacBen_A_		X
Magnesio Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	X	X
Manganeso Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	X	X
Mercurio Total	µg/L	SM 3112 B Mod_Met_A_AA_VF	X	X
Metilmercurio	mg/L	PC-373_Merc_A_ICP_MS	X	X
Molibdeno Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	X	X
Naftaleno	µg/L	EPA8270E Rev6 2018_ComHAP_A_CG_MS	X	X
Níquel Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	X	X
Nitratos	mg/L N	SM 4110 B Mod_Ani_A_CRM_ION		X
Nitratos	mg/L	SM 4110 B Mod_Ani_A_CRM_ION	X	
Nitritos	mg/l Br-	SM 4110 B Mod_Ani_A_CRM_ION	X	

PARÁMETROS	UNIDADES	TÉCNICA	TDR	RES 631 DE 2015
Nitritos	mg/L N	SM 4110 B Mod_Ani_A_CRM_ION		X
Nitrógeno Amoniacal	mg/L NH3-N	SM4500 NH3-F_NitAmo_A_UV_VIS		X
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	SM4500 NH3-F_NitAmo_A_UV_VIS	X	
Nitrógeno Kjeldahl	mg/L	PS-9084_NitKje_A_SUBCT	X	X
Nitrógeno Total	mg/L	DIN EN 12260_NitTot_A_UV_VIS	X	
Olor		SM 2150B/2160B Mod_Org_A_ORGLP	X	X
o-Xileno	µg/L	EPA 8260 D_SumBTEX_A_CG_MS_PT	X	X
Pireno	µg/L	EPA8270E Rev6 2018_ComHAP_A_CG_MS	X	X
Plata Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	X	X
Plomo Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	X	X
SAAM	mg/L	SM 5540 C_SAAM_A_UV_VIS	X	X
Sabor		SM 2150B/2160B Mod_Org_A_ORGLP	X	X
Sólidos Sedimentables	mL/L	SM 2540 F_SolSed_A_VOLUM	X	X
Sólidos Totales	mg/L	SM 2540B_SolTot_A_GRAV	X	
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	SM 2540 C_SolDisTot_Aa_GRAV	X	X

PARÁMETROS	UNIDADES	TÉCNICA	TDR	RES 631 DE 2015
Sólidos Totales en Suspensión (TSS)	mg/L	SM 2540 D_SolSusTot_A_GRAV	X	X
Sólidos Volátiles	mg/L	SM 2540 E_SolVol_A_GRAV		X
Sulfatos	mg/L	SM 4110 B Mod_Ani_A_CRM_ION	X	X
Sulfitos	mg/L	SM 4500-SO3-2 B_Sul_A_TRIT	X	X
Sulfuros	mg/L	SM 4500 S2-F_SulYod_A_VOLUM	X	X
Suma BTEX	µg/L	EPA 8260 D_SumBTEX_A_CG_MS_PT	X	X
Suma HAP's	µg/L	EPA8270E Rev6 2018_ComHAP_A_CG_MS	X	X
Tolueno	µg/L	EPA 8260 D_SumBTEX_A_CG_MS_PT	X	X
Turbidez	NTU	SM 2130 B_Tur_A_NEFEL	X	
Zinc Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	X	X

Fuente: Elaboración propia

5.1.6.7.3. Puntos de monitoreo

La definición de la ubicación de puntos de monitoreo tiene en cuenta los cuerpos de agua aledaños a los sitios de explotación minera y en los cuales se tiene contemplada la solicitud de permisos ambientales (tales como ocupación de cauce y vertimiento). En la Tabla 76 y Figura 80 se presenta la localización de los puntos de monitoreo.

Tabla 76. Puntos de monitoreo agua superficial época húmeda

ID	Cuerpo de agua	Fecha de monitoreo		Coordenadas origen único	
		época seca	época húmeda	Este	Norte
FQ1	Río Coello aguas arriba mina La Esmeralda	25-02-2021	27-03-2021	4767011,694	2033858,045
FQ2	Río Coello Intermedio	25-02-2021	27-03-2021	4767215,629	2033751,340
FQ3	Río Coello Aguas abajo mina La Esmeralda	25-02-2021	27-03-2021	4767570,701	2033711,666
FQ6	Drenaje El Salado	25-02-2021	26-03-2021	4766019,755	2033404,978
FQ7	Afluente Zanjón Los Huilos	25-02-2021	26-03-2021	4766353,883	2033998,442
FQ8	Zanjón Los Huilos	25-02-2021	26-03-2021	4766543,48	2034073,423
FQ9	Pit Explotación	25-02-2021	26-03-2021	4766554,298	2033583,981

Fuente: Elaboración propia

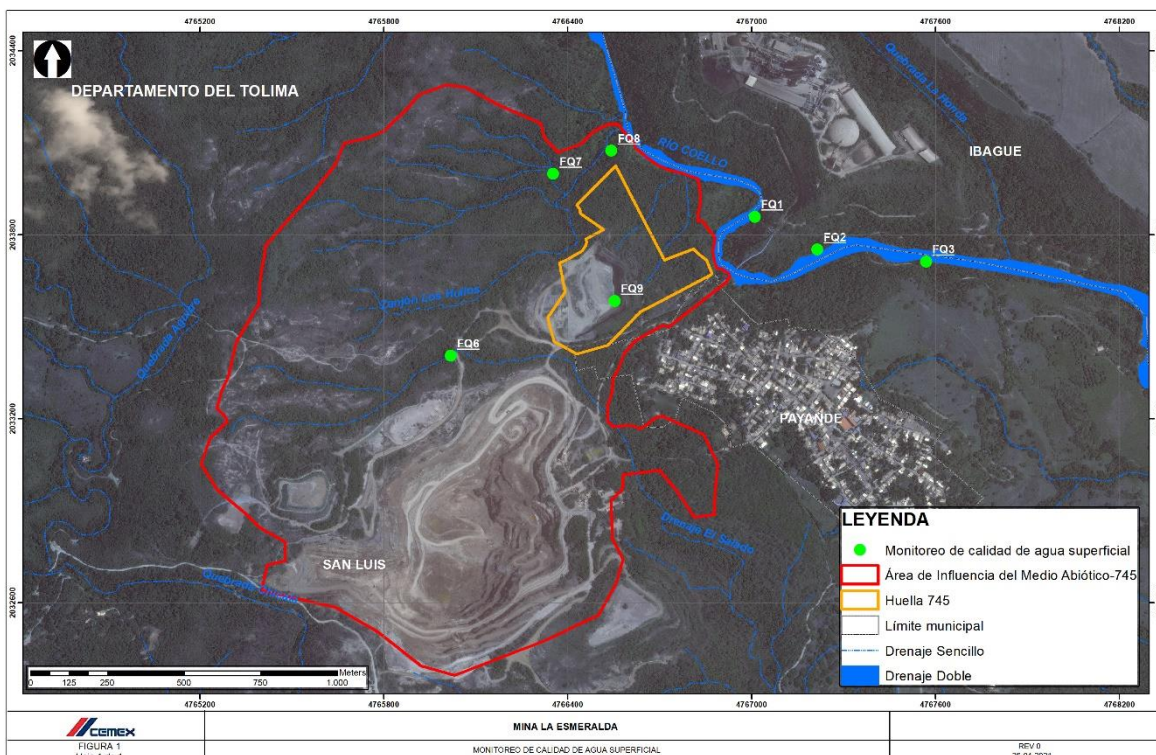


Figura 81. Localización sitios de monitoreo calidad de agua superficial

Fuente: Elaboración propia

5.1.6.7.4. Resultados

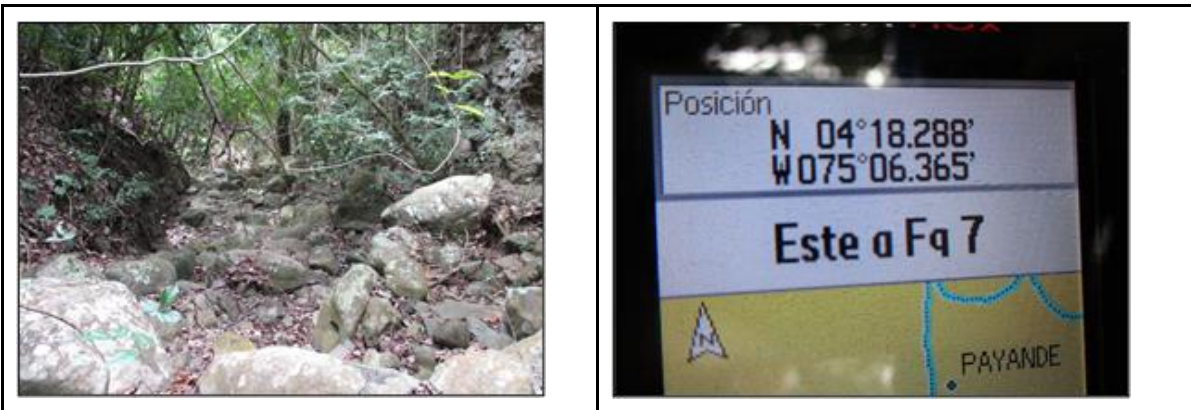
A continuación se presentan los resultados obtenidos para ambas época climáticas.

5.1.6.7.4.1. Época seca

El personal de campo y profesionales a cargo del monitoreo de las aguas superficiales evidenciaron que los cuatro (4) puntos de agua identificados como FQ6, FQ7, FQ8 y FQ9 se encontraban secos, dejado su evidencia con los registros fotográficos y diligenciamiento de las cadenas de custodia presentados en el Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.021.



Fotografía 51. FQ6 - Drenaje El Salado
Fuente: AGQ Prodycon Colombia S.A.S.



Fotografía 52. FQ7 Afluente Zanjón Los Huilos
Fuente: AGQ Prodycon Colombia S.A.S



Fotografía 53. FQ8 Zanjón Los Huilos
Fuente: AGQ Prodycon Colombia S.A.S



Fotografía 54. FQ9 Pit de explotación
Fuente: AGQ Prodycon Colombia S.A.S

Respecto al río Coello, teniendo en cuenta que los puntos de monitoreo corresponden al vertimiento previsto a realizar en este cuerpo de agua, el monitoreo programado correspondía a muestreo compuesto siguiendo la misma masa de agua con el fin de cumplir con el protocolo de modelación de calidad de agua. Teniendo en cuenta las características del río de montaña y encañonado en el sector de payandé para poder tomar las muestras, el plan de trabajo demandaba ingresar al río mediante la ayuda de botes y líneas de vida; no obstante, para cumplir con temas de seguridad, el caudal del río debía cumplir con niveles seguros para ejecutar la actividad.

El monitoreo se programó para la última semana de febrero, teniendo en cuenta que se debía tener inicialmente el modelo hidráulico que permite la determinación de horarios para cada punto y de esta forma la toma de muestras de agua siguiendo la masa de agua. Dentro de los insumos para la obtención del modelo hidráulico, se encuentra el levantamiento de topobatimetrías en el río Coello, las cuales se programaron para noviembre de 2020, pero se pudieron efectuar solo hasta finales de enero de 2021, cuando los caudales y niveles en el río Coello descendieron..

De acuerdo con los registros de la estación limnimétrica denominada COELLO PAYANDE con código 2121700193 ubicada en el municipio de San Luis y operada por Cortolima, se puede observar en la Figura 81 que hasta mediados del mes de febrero se mantuvieron caudales bajos en el río, sin embargo, a partir del 18 de febrero de 2021, los caudales se incrementaron drásticamente asociado a las lluvias presentadas en la parte alta de la cuenca y cuenca del río Combeima, cuerpo de agua afluente del río Coello aguas arriba de Payandé y que aporta gran cantidad de caudal a este río.

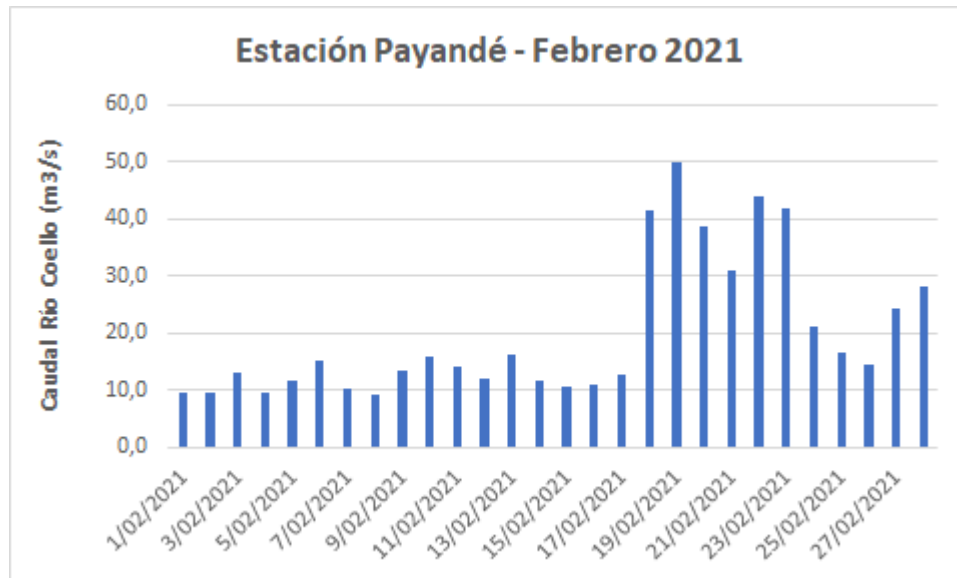


Figura 82. Comportamiento diario caudal río Coello Febrero de 2021

Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, no fue posible ejecutar el monitoreo en el río Coello, para época seca que corresponde el mes de febrero, dado que, el río Coello ya se encontraba con altos niveles que impedían el ingreso seguro para la ejecución de las actividades de toma de muestras siguiendo la misma masa de agua.

5.1.6.7.4.2. Época de lluvias

En la Tabla 77 se presentan los resultados obtenidos en el monitoreo realizado en el mes de marzo de 2021.

Tabla 77. Resultados monitoreo calidad de agua superficial época de lluvias

PARÁMETROS	UNIDADES	FQ1 (R, Coello aguas arriba) - MINA LA ESMERALDA	FQ2 (R, Coello intermedio) - MINA LA ESMERALDA	FQ3 (Intermedio 2) - MINA LA ESMERALDA	FQ6 (EI Salado) - MINA LA ESMERALDA	FQ7 (Afluente Zanjón Los Huilos) - MINA LA ESMERALDA	FQ8 (Zanjón Los Huilos) - MINA LA ESMERALDA	FQ9 (Pit de explotación) - MINA LA ESMERALDA
		A-21/036818	A-21/036823	A-21/036825	A-21/036819	A-21/036821	A-21/036822	A-21/036820
INSITU								
% Saturación de Oxígeno	%	105	100	101	73	98	98	113
Caudal Micromolinete In Situ	L/s					3,3	20,4	
Oxígeno Disuelto In Situ Medido MA	mg/L	8,33	6,43	6,43	4,62	5,96	5,96	6,26
pH In Situ Medido MA	Unidades de pH	8,1	7,5	7,4	7,3	8	8	7,7
Temperatura In Situ Medido MA	°C	22,5	22,9	23,6	23	25,3	25,3	31,2
PARÁMETROS MEDIDOS EN LABORATORIO								
Aceites y Grasas	mg/L	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4

PARÁMETROS	UNIDADES	FQ1 (R, Coello aguas arriba) - MINA LA ESMERALDA	FQ2 (R, Coello intermedio) - MINA LA ESMERALDA	FQ3 (Intermedio 2) - MINA LA ESMERALDA	FQ6 (El Salado) - MINA LA ESMERALDA	FQ7 (Afluente Zanjón Los Huilos) - MINA LA ESMERALDA	FQ8 (Zanjón Los Huilos) - MINA LA ESMERALDA	FQ9 (Pit de explotación) - MINA LA ESMERALDA
		A-21/036818	A-21/036823	A-21/036825	A-21/036819	A-21/036821	A-21/036822	A-21/036820
Acenafteno	µg/L	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Acenaftileno	µg/L	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Acidez Total	mg/L CaCO3	12,8	7,32	8,99	29,9	36,6	39,7	6,06
Alcalinidad Total	mg/L CaCO3	79,3	72,5	75,1	150	83,8	130	87,6
Algas del Perifiton	ind/cm2	88	24	16	122	612	855	51
Algas del Perifiton	taxa	12	7	2	5	3	1	3
Aluminio Total	mg/L	25,5	10,4	17,1	< 0,2	< 0,2	< 0,2	2,38
Antraceno	µg/L	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
AOX (Comp. Organicos Adsorbibles)	µg/L	< 50	< 50	80	< 50	< 50	< 50	< 50

PARÁMETROS	UNIDADES	FQ1 (R, Coello aguas arriba) - MINA LA ESMERALDA	FQ2 (R, Coello intermedio) - MINA LA ESMERALDA	FQ3 (Intermedio 2) - MINA LA ESMERALDA	FQ6 (EI Salado) - MINA LA ESMERALDA	FQ7 (Afluente Zanjón Los Huilos) - MINA LA ESMERALDA	FQ8 (Zanjón Los Huilos) - MINA LA ESMERALDA	FQ9 (Pit de explotación) - MINA LA ESMERALDA
		A-21/036818	A-21/036823	A-21/036825	A-21/036819	A-21/036821	A-21/036822	A-21/036820
Arsénico Total	mg/L	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04	< 0,04
Benceno	µg/L	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Benzo (a) antraceno	µg/L	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Benzo (a) pireno	µg/L	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Benzo (b) fluoranteno	µg/L	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Benzo (g,h,i) perileno	µg/L	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Benzo (k) fluoranteno	µg/L	< 0,086	< 0,086	< 0,086	< 0,086	< 0,086	< 0,086	< 0,086
Cadmio Total	mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Calcio Total	mg/L	23,8	20,4	20,1	53,2	46,5	68,7	26,5

PARÁMETROS	UNIDADES	FQ1 (R, Coello aguas arriba) - MINA LA ESMERALDA	FQ2 (R, Coello intermedio) - MINA LA ESMERALDA	FQ3 (Intermedio 2) - MINA LA ESMERALDA	FQ6 (EI Salado) - MINA LA ESMERALDA	FQ7 (Afluente Zanjón Los Huilos) - MINA LA ESMERALDA	FQ8 (Zanjón Los Huilos) - MINA LA ESMERALDA	FQ9 (Pit de explotación) - MINA LA ESMERALDA
		A-21/036818	A-21/036823	A-21/036825	A-21/036819	A-21/036821	A-21/036822	A-21/036820
Carbono Orgánico Disuelto	mg/L	19,1	18,4	19				
Carbono Orgánico Total - COT	mg/L				9,41	19,5	22,9	17,1
Cianuro Disponible	mg/L	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Cianuro Libre	mg/L	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Cianuro Total	mg/L	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Cloruros	mg/L	5,1	4,7	4,5	1,6	< 0,7	< 0,7	< 0,7
Cobre Total	mg/L	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Coliformes Fecales por NMP	NMP/100 mL	33	2000	2000	410	25	39	170
Coliformes Termotolerantes (Fecales)	u.f.c./100 ml	10800	17000	18000				

PARÁMETROS	UNIDADES	FQ1 (R, Coello aguas arriba) - MINA LA ESMERALDA	FQ2 (R, Coello intermedio) - MINA LA ESMERALDA	FQ3 (Intermedio 2) - MINA LA ESMERALDA	FQ6 (EI Salado) - MINA LA ESMERALDA	FQ7 (Afluente Zanjón Los Huilos) - MINA LA ESMERALDA	FQ8 (Zanjón Los Huilos) - MINA LA ESMERALDA	FQ9 (Pit de explotación) - MINA LA ESMERALDA
		A-21/036818	A-21/036823	A-21/036825	A-21/036819	A-21/036821	A-21/036822	A-21/036820
Coliformes Totales	u,f,c/100 ml	44000	38000	20000				
Coliformes Totales por NMP	NMP/100 mL	170000	58000	94000	24000	2600	1200	1500
Color Real a 436 nm	m-1	2	2	2	< 2	< 2	< 2	< 2
Color Real a 525 nm	m-1	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Color Real a 620 nm	m-1	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Color Real a tres longitudes	m-1							
Conductividad Eléctrica	µS/cm	365	186	181	312	388	462	246
Criseno	µg/L	< 0,089	< 0,089	< 0,089	< 0,089	< 0,089	< 0,089	< 0,089

PARÁMETROS	UNIDADES	FQ1 (R, Coello aguas arriba) - MINA LA ESMERALDA	FQ2 (R, Coello intermedio) - MINA LA ESMERALDA	FQ3 (Intermedio 2) - MINA LA ESMERALDA	FQ6 (El Salado) - MINA LA ESMERALDA	FQ7 (Afluente Zanjón Los Huilos) - MINA LA ESMERALDA	FQ8 (Zanjón Los Huilos) - MINA LA ESMERALDA	FQ9 (Pit de explotación) - MINA LA ESMERALDA
		A-21/036818	A-21/036823	A-21/036825	A-21/036819	A-21/036821	A-21/036822	A-21/036820
Cromo Hexavalente	mg/L	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Cromo Total	mg/L	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
DBO 5 Filtrada	mg/L	9	4	3				
DBO 5 Suspendida	mg/L	11,2	4,5	< 2,1				
DBO5	mg/L	20,2	8,51	4,7	< 2,1	3,38	3,41	< 2,1
Dibenzo (a,h) antraceno	µg/L	< 0,83	< 0,83	< 0,83	< 0,83	< 0,83	< 0,83	< 0,83
DQO	mg/L	43,11	52,72	33,9	< 10	< 10	< 10	< 10
DQO Filtrada	mg/L	15,9	< 10	< 10				
DQO Suspendida	mg/L	27,2	46,2	29,5				
Dureza Cálcica	mg/L	56,7	48,6	47,7	115	111	155	63

PARÁMETROS	UNIDADES	FQ1 (R, Coello aguas arriba) - MINA LA ESMERALDA	FQ2 (R, Coello intermedio) - MINA LA ESMERALDA	FQ3 (Intermedio 2) - MINA LA ESMERALDA	FQ6 (EI Salado) - MINA LA ESMERALDA	FQ7 (Afluente Zanjón Los Huilos) - MINA LA ESMERALDA	FQ8 (Zanjón Los Huilos) - MINA LA ESMERALDA	FQ9 (Pit de explotación) - MINA LA ESMERALDA
		A-21/036818	A-21/036823	A-21/036825	A-21/036819	A-21/036821	A-21/036822	A-21/036820
Dureza Total	mg/L	134	97,5	101	136	151	191	83,7
Etilbenceno	µg/L	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Fauna Ictica	Indiv	1	0	4	0	0	0	0
Fauna Ictica	taxa	1	0	3	0	0	0	0
Fenantreno	µg/L	< 0,109	< 0,109	< 0,109	< 0,109	< 0,109	< 0,109	< 0,109
Fenoles	mg/L	0,004	< 0,002	0,005	0,002	< 0,002	< 0,002	< 0,002
Fluoranteno	µg/L	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Fluoreno	µg/L	< 0,089	< 0,089	< 0,089	< 0,089	< 0,089	< 0,089	< 0,089
Fosfatos	mg/L	0,104	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Fósforo Reactivo Soluble	mg/L	0,16	0,119	0,162				

PARÁMETROS	UNIDADES	FQ1 (R, Coello aguas arriba) - MINA LA ESMERALDA	FQ2 (R, Coello intermedio) - MINA LA ESMERALDA	FQ3 (Intermedio 2) - MINA LA ESMERALDA	FQ6 (EI Salado) - MINA LA ESMERALDA	FQ7 (Afluente Zanjón Los Huilos) - MINA LA ESMERALDA	FQ8 (Zanjón Los Huilos) - MINA LA ESMERALDA	FQ9 (Pit de explotación) - MINA LA ESMERALDA
		A-21/036818	A-21/036823	A-21/036825	A-21/036819	A-21/036821	A-21/036822	A-21/036820
Fósforo Total	mg/L	0,82	0,46	0,53	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Hidrocarburos	mg/L	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4	< 4
Hierro Total	mg/L	29,8	13,4	19,8	< 0,1	< 0,1	< 0,1	1,46
Indeno (1,2,3-cd) pireno	µg/L	< 0,086	< 0,086	< 0,086	< 0,086	< 0,086	< 0,086	< 0,086
m,p-Xileno	µg/L	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Macroinvertebrados Bentónicos	ind/m2				23,3	41,1	2,22	16,7
Macroinvertebrados Bentónicos	taxa				10	8	1	6
Macroinvertebrados bentónicos abundancia	ind/m2	3,33	5,56	65,6				

PARÁMETROS	UNIDADES	FQ1 (R, Coello aguas arriba) - MINA LA ESMERALDA	FQ2 (R, Coello intermedio) - MINA LA ESMERALDA	FQ3 (Intermedio 2) - MINA LA ESMERALDA	FQ6 (El Salado) - MINA LA ESMERALDA	FQ7 (Afluente Zanjón Los Huilos) - MINA LA ESMERALDA	FQ8 (Zanjón Los Huilos) - MINA LA ESMERALDA	FQ9 (Pit de explotación) - MINA LA ESMERALDA
		A-21/036818	A-21/036823	A-21/036825	A-21/036819	A-21/036821	A-21/036822	A-21/036820
Macroinvertebrados bentónicos riqueza	taxa	2	4	11				
Magnesio Total	mg/L	18	11,3	12,5	3,51	8,54	6,85	4,27
Manganeso Total	mg/L	0,909	0,401	0,564	< 0,07	< 0,07	< 0,07	< 0,07
Mercurio Total	µg/L	< 1,753	< 1,753	< 1,753	< 1,753	< 1,753	< 1,753	< 1,753
Metilmercurio	mg/L	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Molibdeno Total	mg/L	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Naftaleno	µg/L	< 0,077	< 0,077	< 0,077	< 0,077	< 0,077	< 0,077	< 0,077
Níquel Total	mg/L	0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Nitratos	mg/L N	0,52	0,73	0,71	< 0,3	< 0,3	< 0,3	< 0,3
Nitritos	mg/L N	< 0,03	< 0,03	0,033	< 0,03	< 0,03	< 0,03	0,059

PARÁMETROS	UNIDADES	FQ1 (R, Coello aguas arriba) - MINA LA ESMERALDA	FQ2 (R, Coello intermedio) - MINA LA ESMERALDA	FQ3 (Intermedio 2) - MINA LA ESMERALDA	FQ6 (El Salado) - MINA LA ESMERALDA	FQ7 (Afluente Zanjón Los Huilos) - MINA LA ESMERALDA	FQ8 (Zanjón Los Huilos) - MINA LA ESMERALDA	FQ9 (Pit de explotación) - MINA LA ESMERALDA
		A-21/036818	A-21/036823	A-21/036825	A-21/036819	A-21/036821	A-21/036822	A-21/036820
Nitrógeno Amoniacal	mg/L NH3-N	< 0,3	< 0,3	< 0,3	< 0,3	< 0,3	< 0,3	< 0,3
Nitrógeno Kjeldahl	mg/L	< 5	5,22	< 5	< 5	< 5	< 5	5,07
Nitrógeno Total	mg/L				< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Olor		Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable
o-Xileno	µg/L	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Pireno	µg/L	< 0,097	< 0,097	< 0,097	< 0,097	< 0,097	< 0,097	< 0,097
Plata Total	mg/L	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
Plomo Total	mg/L	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,05
SAAM	mg/L	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Sabor		Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable	Aceptable

PARÁMETROS	UNIDADES	FQ1 (R, Coello aguas arriba) - MINA LA ESMERALDA	FQ2 (R, Coello intermedio) - MINA LA ESMERALDA	FQ3 (Intermedio 2) - MINA LA ESMERALDA	FQ6 (El Salado) - MINA LA ESMERALDA	FQ7 (Afluente Zanjón Los Huilos) - MINA LA ESMERALDA	FQ8 (Zanjón Los Huilos) - MINA LA ESMERALDA	FQ9 (Pit de explotación) - MINA LA ESMERALDA
		A-21/036818	A-21/036823	A-21/036825	A-21/036819	A-21/036821	A-21/036822	A-21/036820
Sólidos Sedimentables	mL/L	10	2	7	0,1	0,1	0,1	0,1
Sólidos Totales	mg/L				172	182	225	217
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	108	80	78	157	186	217	114
Sólidos Totales en Suspensión (TSS)	mg/L	1536	254	718	18	< 10	10	105
Sólidos Volátiles	mg/L	86	21	34				
Sulfatos	mg/L	16,4	19	18,8	134	7,3	19,4	33
Sulfitos	mg/L	145	515	402	612	507	487	350
Sulfuros	mg/L	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1
Suma BTEX	µg/L	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10

PARÁMETROS	UNIDADES	FQ1 (R, Coello aguas arriba) - MINA LA ESMERALDA	FQ2 (R, Coello intermedio) - MINA LA ESMERALDA	FQ3 (Intermedio 2) - MINA LA ESMERALDA	FQ6 (El Salado) - MINA LA ESMERALDA	FQ7 (Afluente Zanjón Los Huilos) - MINA LA ESMERALDA	FQ8 (Zanjón Los Huilos) - MINA LA ESMERALDA	FQ9 (Pit de explotación) - MINA LA ESMERALDA
		A-21/036818	A-21/036823	A-21/036825	A-21/036819	A-21/036821	A-21/036822	A-21/036820
Suma HAP's	µg/L	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Tolueno	µg/L	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Turbidez	NTU	346	332	353	5,26	116	18,3	< 2
Zinc Total	mg/L	0,113	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1

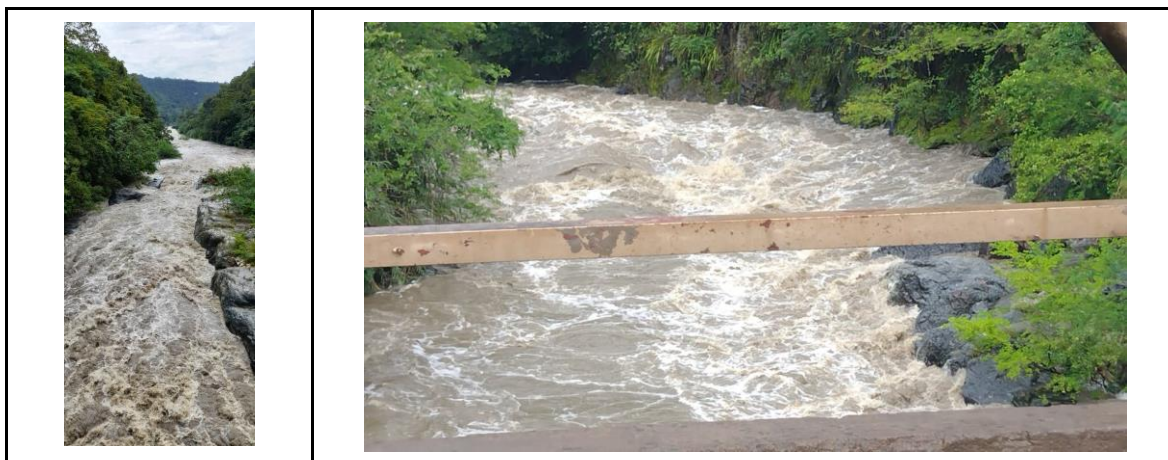
Fuente: AGQ Prodycon Colombia S.A.S

Como se observa en la Figura 82, en el mes de marzo de 2021 se siguieron presentando altos niveles en el río Coello a la altura del municipio de Payandé, por lo que no fue posible la ejecución del monitoreo en este cuerpo siguiendo la masa de agua. Sin embargo, para poder tener datos de calidad de agua, se seleccionaron tres puntos de acceso peatonal en donde se tomaron muestras puntuales a orillas del río.



Figura 83. Comportamiento diario caudal río Coello Marzo de 2021

Fuente: Elaboración Propia



Fotografía 55. Río Coello

Fuente: Elaboración Propia

El pH en los puntos del área de influencia de la Mina Esmeralda presentó valores entre 7.4 y 8.1 UND, siendo aguas ligeramente básicas. En su totalidad de los 7 puntos de monitoreo, estuvieron dentro de los límites de los artículos 2.2.3.3.9.3, Art 2.2.3.3.9.4 y 2.2.3.3.9.5 del Decreto 1076 de 2015 por lo cual el agua de estos puntos podría ser utilizada según cada artículo del decreto. El pH incide positiva o negativamente sobre el crecimiento de las microalgas, teniendo en cuenta que al ser muy ácido o muy básico hará que las microalgas se estresen y no lleven a cabo correctamente sus procesos metabólicos, afectando directamente su desarrollo y crecimiento. En este caso se observa que las densidades y organismos identificados en cada una de las comunidades no se están viendo afectados.

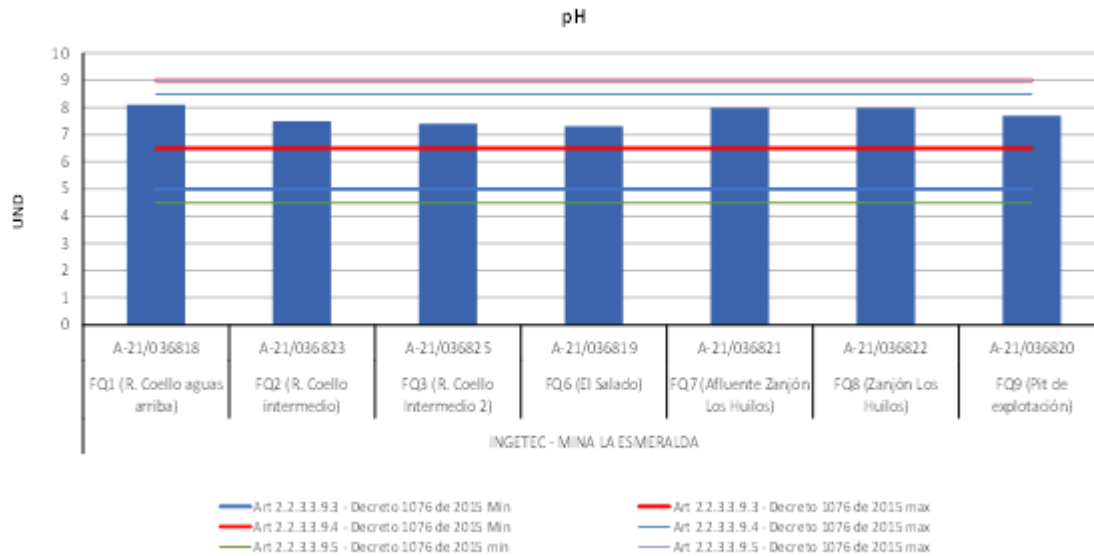


Figura 84. pH cuerpos de agua superficial
Fuente: Elaboración Propia

El parámetro de aluminio en los puntos de monitoreo mostró para 4 de los 7 puntos, valores bajos o por debajo del límite de detección, sin embargo, para 3 de los 7 puntos (sobre el Rio Coello FQ1 - FQ2 - FQ3) se evidenciaron valores entre 10.4 – 25.5 mg/L, lo que está por encima del límite permitido en los Art 2.2.3.3.9.5 y Art 2.2.3.3.9.6 del Decreto 1076 de 2015. El Aluminio es un componente natural del agua, debido principalmente a que forma parte de la estructura de las arcillas. Puede estar presente en sus formas solubles o en sistemas coloidales, responsables de la turbiedad del agua. Las concentraciones más frecuentes en las aguas superficiales oscilan entre 0,1 y 10 mg/L. Las concentraciones altas de aluminio, confieren al agua un pH bajo, debido a sus propiedades anfóteras, que hacen que sus sales se hidrolicen formando ácidos débiles. Estas aguas en los puntos sobre el Rio Coello no podrían utilizarse para actividades agrícolas ni pecuarias, por eso se recomienda tratamiento para mejorar su calidad.

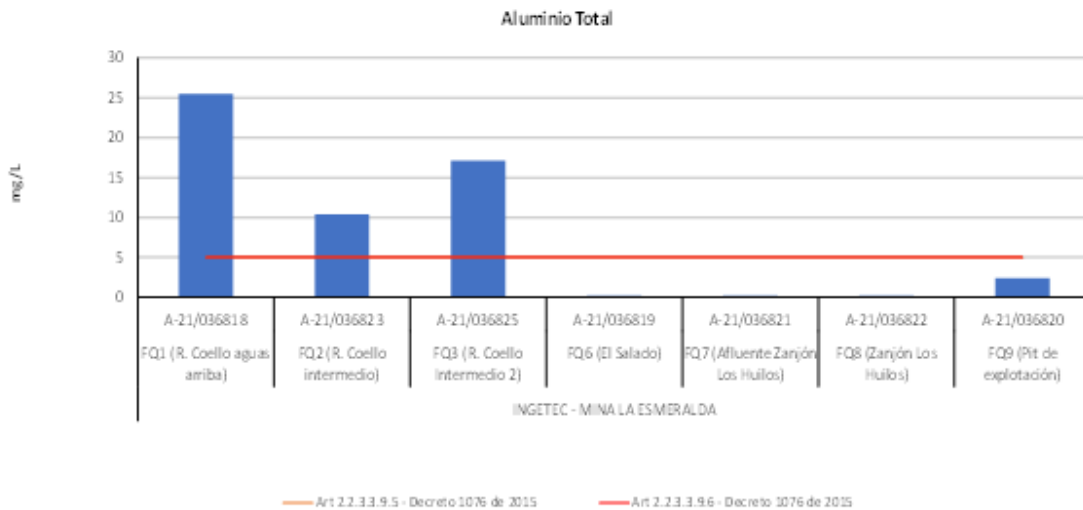


Figura 85. Aluminio cuerpos de agua superficial
Fuente: Elaboración Propia

La concentración de fenoles, en 5 de los 7 puntos de monitoreo estuvieron por debajo de límite detección y por lo tanto por debajo del permitido de 0.002 mg/L, según lo establecido en el artículo 2.2.3.3.9.3 del Decreto 1076 de 2015. Por otro lado, los puntos FQ1 (R. Coello aguas arriba) y FQ3 (R. Coello Intermedio 2), tuvieron una concentración por encima del límite permitido de 0.002 mg/L. Los fenoles están presentes en los ecosistemas como resultado del drenaje de aguas residuales domésticas e industriales en las aguas superficiales, además también se encuentran en el medio ambiente, por la producción y uso de plaguicidas y pesticidas, la degradación de productos fitosanitarios y la descomposición vegetal. El Fenol es tóxico y puede ser absorbido a través de la piel y el tracto gastrointestinal, produciendo para el humano, vasodilatación insuficiencia cardiaca, entre otros síntomas (Alcaraz, Fabiano, Cámara, 2012). Según el artículo 2.2.3.3.9.3, este tipo de agua en los puntos FQ1 y FQ3 no podría ser utilizado para el consumo humano y doméstico, hasta que se realice tratamiento para mejorar su calidad.

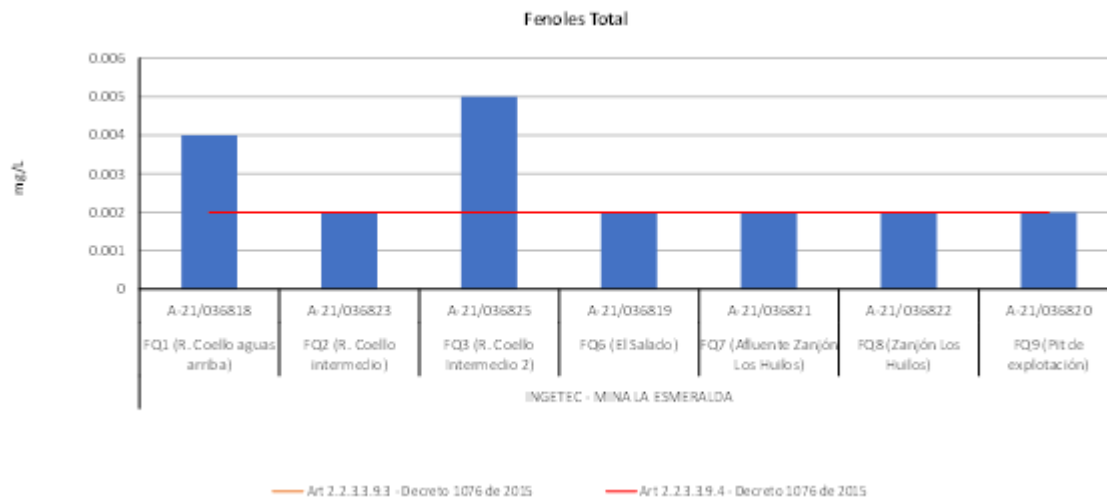


Figura 86. Fenoles cuerpos de agua superficial
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 86 se observa la concentración de Hierro, el cual es uno de los elementos más abundantes en la tierra, siendo esencial para los seres humanos y se utiliza en una variedad de procesos industriales. En el agua potable la concentración de hierro suele ser demasiado baja. Concentraciones altas, mayores de 2mg/L imparten color y sabor desagradable y causa tinciones en la ropa. Además, el hierro puede causar corrosión u obstrucción de tuberías y le da un mal aspecto al agua. El hierro se encuentra en el agua como bicarbonato ferroso, hidróxido ferroso, sulfato ferroso o hierro orgánico quelatado (Romero, 2009). En el caso del monitoreo, hubo 3 puntos con valores por fuera del límite establecido, estos fueron los 3 ubicados sobre el Rio Coello, ya que reportaron concentraciones entre 13.4 - 29.8 mg/L, cuando el límite establecido en el art 2.2.3.3.9.5 del Decreto 1076 de 2015, es de 5 mg/L.

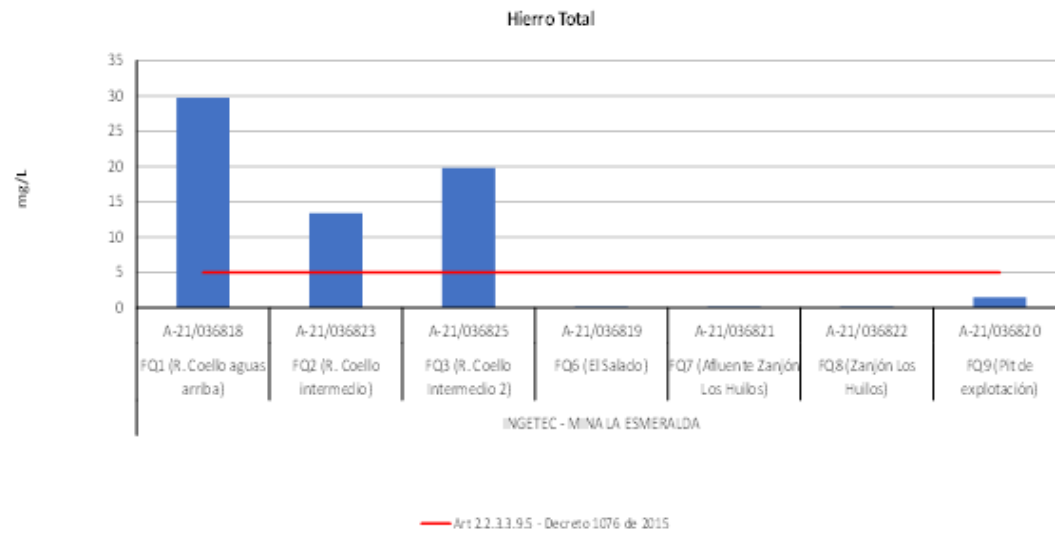


Figura 87. Hierro cuerpos de agua superficial
Fuente: Elaboración Propia

El parámetro de Manganeseo presentó para 3 de los 7 puntos, valores por encima del límite permitido en el artículo 2.2.3.3.9.5, del decreto 1076 de 2015. Los puntos sobre el Rio Coello tuvieron concentraciones entre 0.401 – 0.909 mg/L, lo que supera el límite establecido de 0,2 mg/L que reglamenta estas aguas para uso agrícola. El manganeseo es un elemento esencial para la vida animal; funciona como un activador enzimático. Sin embargo, grandes dosis de manganeseo en el organismo pueden causar daños en el sistema nervioso central. En concentraciones mayores a 0,15 mg/L, las sales disueltas de manganeseo pueden impartir un sabor desagradable al agua. Es por esto que se recomienda realizar tratamiento para mejorar su calidad y poder utilizar esta agua para el riego en uso agrícola.

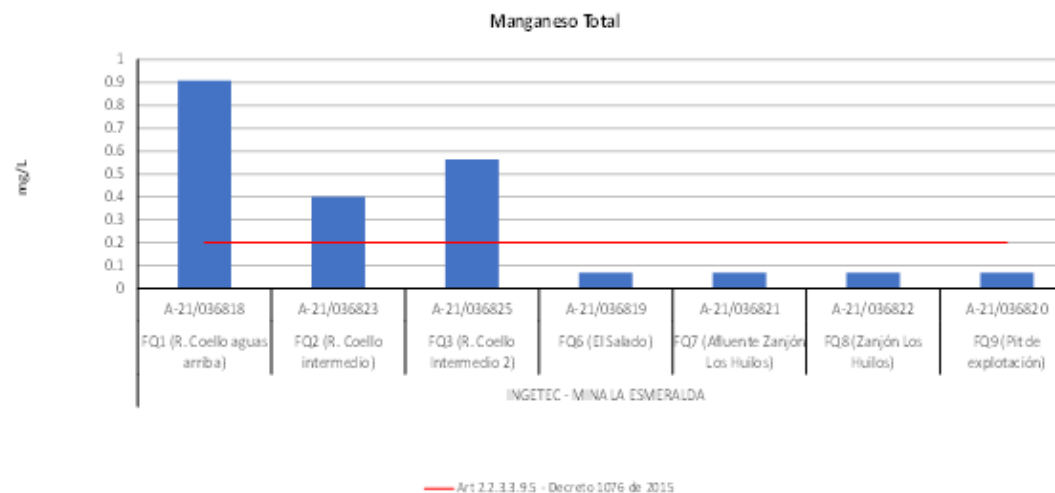


Figura 88. Manganeseo cuerpos de agua superficial
Fuente: Elaboración Propia

El parámetro del Níquel, mostró que en el FQ1 (R. Coello aguas arriba) hubo una concentración justo en el límite permitido en el 0.02 mg/L del Art 2.2.3.3.9.5 del Decreto 1076 de 2015. Los demás puntos de monitoreo estuvieron por debajo del límite de detección. Este metal crea sales que son bastante solubles en el agua, pero en general no se superan concentraciones de 5-10µg/L. El níquel es poco tóxico, sin embargo, hay sales que pueden llegar a ser cancerígenas. Es por esto que se recomienda realizar un tratamiento a estas aguas antes de ser utilizadas para mejorar así su calidad.

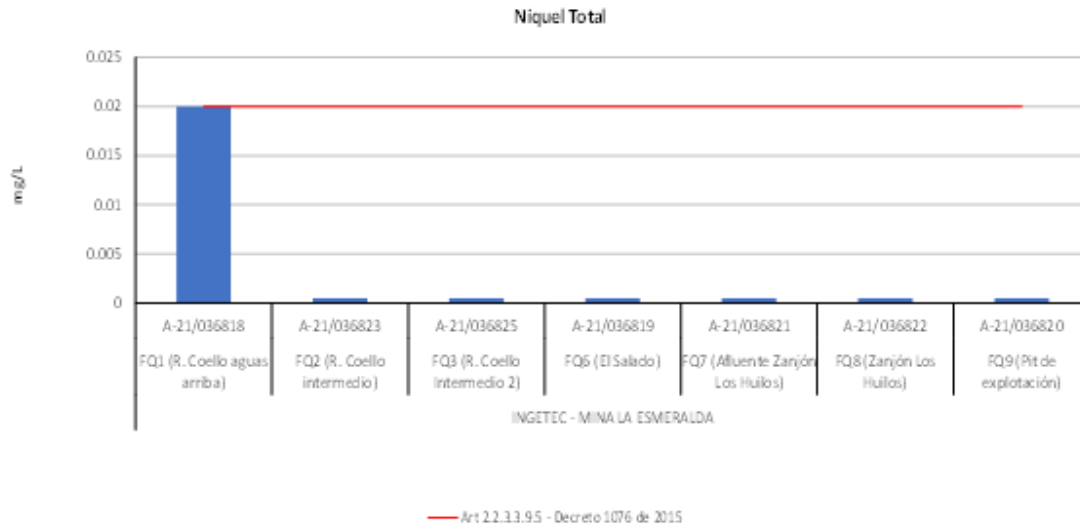


Figura 89. Níquel cuerpos de agua superficial
Fuente: Elaboración Propia

El parámetro de Turbidez presentó valores entre 332 – 356 NTU para los 3 de los 7 puntos, lo que está por encima de los límites permitidos en el Art 2.2.3.3.9.4 - Decreto 1076 de 2015, de 190 NTU. Los restantes puntos presentaron concentraciones por debajo del límite establecido. La turbidez es originada por las partículas en suspensión o coloides (arcillas, limo, tierra finamente dividida, plancton etc). En la práctica, la remoción de la turbiedad no es un proceso difícil de llevar a cabo en una planta de clarificación de agua; sin embargo, es uno de los que más influye en los costos de producción, porque, por lo general, requiere usar coagulantes, acondicionadores de pH, ayudantes de coagulación, etc. Aunque no se conocen los efectos directos de la turbiedad sobre la salud, esta afecta la calidad estética del agua, lo que muchas veces ocasiona el rechazo de los consumidores. Además, estos pueden reducir la eficiencia del proceso de desinfección, ya que las partículas pueden proteger físicamente a los microorganismos del contacto con los desinfectantes

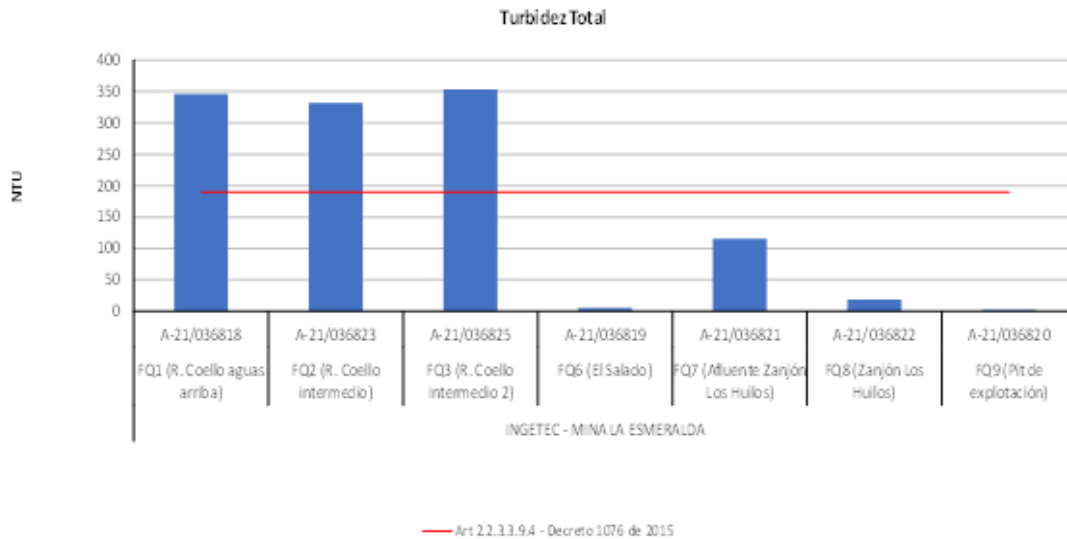


Figura 90. Turbidez cuerpos de agua superficial
Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo con lo estipulado en los artículos 2.2.3.3.9.3 y 2.2.3.3.9.5 del Decreto 1076 de 2015 la concentración de coliformes fecales obtenida para 5 de los 7 puntos, estuvieron por debajo de los límites establecidos en los art 2.2.3.3.9.3 y art 2.2.3.3.9.5 de 2000 y 1000 NMP/100mL, respectivamente, que rige para aguas de consumo humano con tratamiento tradicional y el riego de frutas que se consuman sin quitar la cáscara y hortalizas de tallo corto. Por otro lado, los puntos FQ2 (R. Coello intermedio) y FQ3 (R. Coello Intermedio 2), presentaron concentraciones superiores a ambos límites, esto puede estar relacionado con posibles entradas de material a los sistemas, producto de actividades humanas cercanas y heces de animales cercanos al punto. La bioindicación mostró que en su mayoría de los puntos hubo diversidades medias a altas, con organismos en algunos casos propios de aguas con buenas características. Esos puntos al tener una gran cantidad de oxígeno disuelto tienen una capacidad de mayor oxidación de la materia orgánica, lo que mejora su capacidad de depuración.

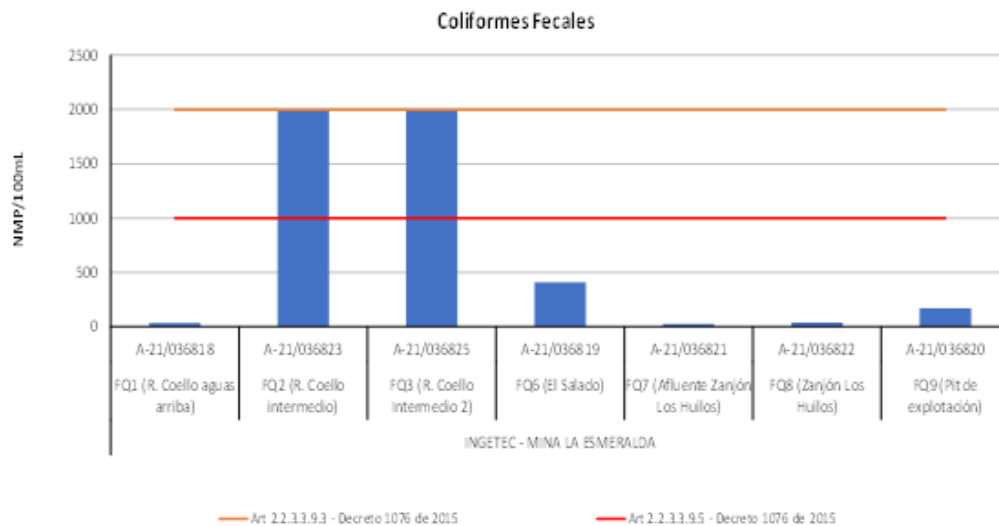


Figura 91. Coliformes fecales cuerpos de agua superficial
Fuente: Elaboración Propia

En cuanto a la concentración de coliformes totales como se observa en la Figura 91, al igual que lo sucedido en los coliformes fecales, que 3 de los 7 puntos presentaron una baja concentración de coliformes totales, los cuales estuvieron por debajo de los límites establecidos en los art 2.2.3.3.9.3 y art 2.2.3.3.9.5 y art 2.2.3.3.9.4. Los puntos FQ1, FQ2, FQ3 y FQ6, tuvieron concentraciones por encima de los 3 artículos que rigen para este parámetro. Esto puede ser causado por aportes alóctonos de material o incluso debido a las actividades aledañas como las residenciales, industriales, que pueden llegar a aumentar las concentraciones. Es en estos casos en donde se recomienda tratamiento fisicoquímico para mejorar su calidad y poder ser utilizados con distintos fines.

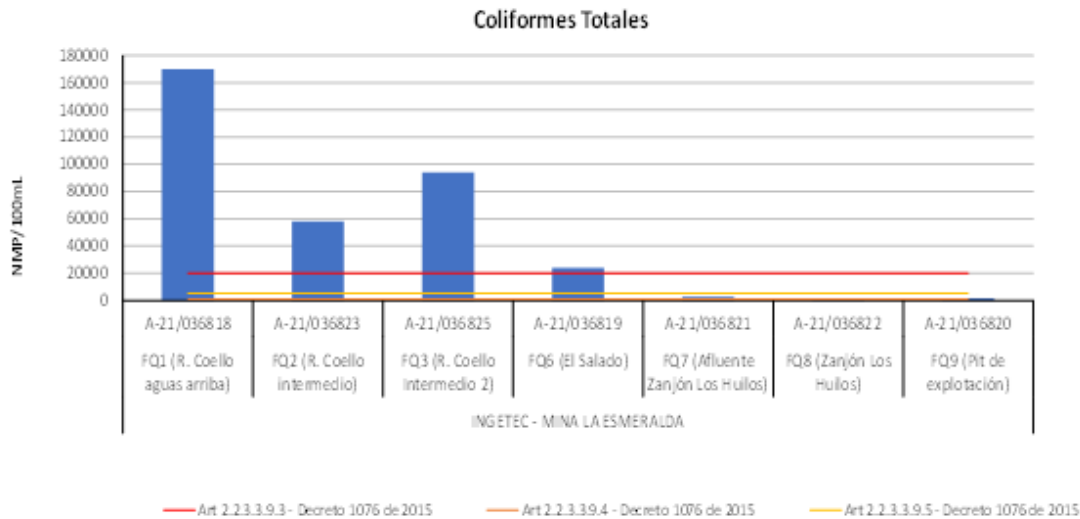


Figura 92. Coliformes totales cuerpos de agua superficial
Fuente: Elaboración Propia

En cuanto la concentración de oxígeno disuelto se evidenció concentraciones entre 4,62 – 8,33 mg/L. La concentración registrada de oxígeno disuelto se encuentra influenciada por las concentraciones de materia orgánica, los intercambios gaseosos generados en el medio, la producción fotosintética y la influencia de los procesos de aireación y agitación a los que es sometida el agua al interior del cuerpo hídrico. Las aguas corrientes superficiales no polucionadas suelen estar bien oxigenadas e incluso sobresaturadas (>7-8 mg/L). La oxigenación en un agua natural es mayor durante el día que en la noche, ya que en ausencia de iluminación la fotosíntesis cesa, mientras el consumo de oxígeno en funciones respiratorias se mantiene. Lo que indica una concentración aceptable, adecuadas para la vida de la mayoría de las especies de peces y otros organismos acuáticos, además buenas concentraciones para que el oxígeno pueda oxidar la materia orgánica presente en los sistemas. Con respecto a la temperatura se evidencia que en los puntos de monitoreo estuvo relativamente estable, solo subiendo unos grados entre cada uno de los sistemas (22,5-25,3 °C), solamente el FQ9 (Pit de explotación) subió hasta 31.2°C.

Con respecto a grasas y aceites, que son sustancias pobremente solubles que se separan de la porción acuosa y flotan formando natas, películas y capas iridiscentes sobre el agua. Este parámetro incluye ésteres de ácidos grasos, compuestos de cadena larga de hidrocarburos, etc. Estos compuestos afectan negativamente la transferencia de oxígeno a los organismos con los cuales se realiza el tratamiento biológico. Los valores en la muestra para grasas y aceites e Hidrocarburos en los puntos de monitoreo los 7 puntos estuvieron por debajo del límite de detección.

La conductividad para los puntos de monitoreo estuvo entre 181 y 462 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La conductividad de un agua natural está mediatizada por el terreno que atraviesa y por la posibilidad de disolución de rocas y materiales, el tipo de sales presentes, el tiempo de disolución, temperatura, gases disueltos, pH y toda la serie de factores que pueden afectar la solubilidad de un

soluto en agua. Esto muestra aguas con bajas cantidades de sales disueltas y por lo tanto una conductividad baja, siendo la cantidad de sales común a la que se encuentra en cuerpos de agua similares.

Al realizar la relación de la DBO/DQO, se obtienen valores por debajo de 0.2 lo que puede indicar que la materia orgánica puede ser oxidada biológicamente y se en su mayoría no se debe utilizar tratamiento químico para lograrlo. En la mayoría de los puntos hubo una alta concentración de oxígeno, lo que puede ayudar a degradar la materia orgánica presente, y al tener corriente, llevaría a que se depure más rápido la materia orgánica presente.

Con respecto al parámetro de Color verdadero, que es el producido por la reflexión de la luz en partículas minúsculas, denominadas coloides, se puede dar gracias a la descomposición de la materia orgánica (principalmente vegetales -ácidos húmicos y fúlvicos), el hierro y el manganeso son el origen natural de este parámetro. El origen antropogénico se debe a los residuos industriales y efluentes domésticos sin tratamiento (Libanio, 2008). Cuando es de origen natural, no representa riesgo directo para la salud, pero los consumidores pueden cuestionar su confiabilidad. Además de ello, la cloración del agua que contiene la materia orgánica disuelta responsable por el color puede generar productos potencialmente cancerígenos. En el monitoreo se evidenció que todos los puntos estuvieron por debajo del límite de detección.

En cuanto a Acidez y Alcalinidad, se evidenciaron valores para acidez entre 6.06 y 39.7 mg/L CaCO₃, mientras que, para la alcalinidad, hubo valores entre 72.5 - 150 mg/L CaCO₃, lo que indican que son aguas más alcalinas, lo que también se comprueba por el pH y por lo tanto que tienen la capacidad para soportar cambios en la acidez del pH. En cuanto a Dureza Total, se evidencio que los valores entre 83.7 - 136 mg/L. En caso de los puntos monitoreados se evidenciaron aguas moderadamente duras. Con respecto a la dureza cálcica hubo valores entre 48.6 – 155 mg/L CaCO₃, por lo que tiene buena calidad. Un agua dura puede formar depósitos en las tuberías y hasta obstruirlas completamente. Esta característica física es nociva, particularmente en aguas de alimentación de calderas, en las cuales la alta temperatura favorece la formación de sedimentos.

En la cantidad de metales presentes en los sistemas se puede observar que el Arsénico, Cadmio, Calcio, Cobre, Cromo, Cromo Hexavalente, Fosforo, Magnesio, Mercurio, Metilmercurio, Molibdeno, Plata, Plomo y Zinc, presentaron valores por debajo del límite de detección o muy bajos (As < 0.04 mg/L, Cd <0.01 mg/L, Ca 20.1 – 68,7 mg/L, Cu < 0.1 mg/L, Cr <0,05 Cr_{vi} <0.05 mg/L, P <0,1 – 0.82 mg/L, Mg 3.51 – 12.5 mg/L, Hg <0.001 mg/L, CH₃Hg <0.001 mg/L, Mo <0.01 mg/L, Pt <0.05 mg/L, Pb <0.05 mg/L, Zn <0,1 – 0.113 mg/L), lo que también evidencia que están por debajo de la norma establecida para calidad de aguas. Con respecto a los aniones se pudo observar que Cianuro, Cianuro disponible, Cianuro libre, Cloruros, Fluoruros, Fosfatos, Nitratos, Nitritos, Nitrógeno amoniacal, Sulfatos, Sulfitos y Sulfuros, presentaron valores muy bajos e incluso por debajo del límite de detección., por lo cual no están afectando la calidad de las aguas del monitoreo.

Los sólidos sedimentables, presentaron para los puntos sobre el Rio Coello, valores más altos que los 4 puntos restantes. Los sólidos totales disueltos, mostraron que los puntos sobre FQ6, FQ7, FQ8 y FQ9 valores más altos que los ubicados sobre el Rio Coello, esto probablemente debido a la gran cantidad de precipitación, que pudo haber erosionado los sustratos y por esto haber aumentado la gran cantidad de sólidos disueltos. En los sólidos totales en suspensión se evidenció que los puntos sobre el Rio Coello fueron los que mayor concentración mostraron 718-1536 mg/L, mientras que los puntos sobre FQ6, FQ7, FQ8 y FQ9, mostraron valores entre <10 – 105 mg/L. Esta diferencia pudo ser debida a la gran cantidad de sólidos provenientes de la crecida del río debido a las precipitaciones de los días anteriores, esto puede afectar las condiciones de sus aguas y de las comunidades autótrofas las cuales se ven afectadas por la falta de luz solar.

El parámetro de SAAM o sustancias activas al azul de Metileno, pueden reaccionar con aniones orgánicos en este caso tensioactivos, para formar sales hidrofóbicas. Este agente tensioactivo actúa modificando la tensión superficial del agua, disminuyendo la fuerza de adhesión de las partículas. Los detergentes determinados como SAAM, son un excelente indicador de calidad de agua para consumo humano, ya que cuando son detectados en suministros de abastecimiento, se deben tomar acciones correctivas, porque es indicativo de contaminación por aguas residuales. En el caso del monitoreo se presentaron valores por debajo del límite (<0.200 mg/L) de detección por lo que no estaría afectando las propiedades del agua.

La suma de BTEX y los HAP's mostraron valores muy bajos por debajo del límite de detección, por lo cual no está afectada la calidad de las aguas de las fuentes superficiales del área de influencia de la mina La Esmeralda.

En cuanto a caudal solo se logró tomar la medida en 2 de los 7 puntos de monitoreo, debido a que por ejemplo en los puntos ubicados en el Rio Coello (FQ1, FQ2 y FQ3) el caudal tuvo una creciente súbita y por seguridad del personal no se realiza la toma. En los puntos sobre FQ6 el salado, no se hace toma ya que el cuerpo de agua se encuentra sin flujo, al igual que sucedió en el Pit de explotación FQ9. El punto FQ7 (Afluente Zanjón Los Huilos), presentó un caudal de 3,3 L/s y por otro lado, el FQ8 (Zanjón Los Huilos), presentó un caudal de 20,4 L/s.

Respecto a los sedimentos en la Tabla 78 se presentan los resultados obtenidos en los puntos de monitoreo del río Coello.

Tabla 78. Resultados sedimentos río Coello

PARÁMETROS	FQ1 (R. Coello aguas arriba) - MINA LA ESMERALDA	FQ2 (R. Coello intermedio) - MINA LA ESMERALDA	FQ3 (Intermedio 2) - MINA LA ESMERALDA	Protocolo Internacional de Louisiana 29B. Capítulo 3.
	S-21/016366	S-21/016369	S-21/016370	
Aluminio Total	5694	5866	5701	-
Arsénico Total	5	4	4	10
Bario Total	85	100	97	20000
Cadmio Total	0,12	0,1	0,9	10
Calcio Total	3690	3771	3361	-
Cianuro Total	< 7,952	< 7,952	< 7,952	-
Cloruros	< 20	< 20	323	-
Cobre Total	22	23	17	-
Compuestos Orgánicos Halogenados - AOX	< 10	< 10	< 10	-

PARÁMETROS	FQ1 (R. Coello aguas arriba) - MINA LA ESMERALDA	FQ2 (R. Coello intermedio) - MINA LA ESMERALDA	FQ3 (Intermedio 2) - MINA LA ESMERALDA	Protocolo Internacional de Louisiana 29B. Capítulo 3.
	S-21/016366	S-21/016369	S-21/016370	
Conductividad Eléctrica	122	89.5	302	4000
Cromo Total	< 10,92	< 10,92	< 10,92	500
Fenoles	< 4	< 4	< 4	-
Grasas y Aceites	0,02	0	0	-
Hidrocarburos	18,4	20,6	21,3	-
Hierro Total	20098	24636	17281	-
Humedad	27	23	21	50
Manganeso Total	217	227	213	-
Mercurio Total	< 0,2	< 0,2	< 0,2	10
Níquel Total	10	10	10	-
Nitratos	262	241	279	-
Nitritos	<0,25	<0,25	<0,25	-
pH	,4	4,64	7,61	6.0 - 9.0
Plata Total	< 10	< 10	< 10	200

PARÁMETROS	FQ1 (R. Coello aguas arriba) - MINA LA ESMERALDA	FQ2 (R. Coello intermedio) - MINA LA ESMERALDA	FQ3 (Intermedio 2) - MINA LA ESMERALDA	Protocolo Internacional de Louisiana 29B. Capítulo 3.
	S-21/016366	S-21/016369	S-21/016370	
Plomo Total	2	2	3	500
Selenio Total	< 0,5	< 0,5	< 0,5	10
Sodio	< 719,047	< 719,047	< 719,047	-
Sulfatos	78	71	73	-
Sulfuros Ácidos Volátiles	<20	<20	<20	-
Suma BTEX	< 25	< 25	< 25	-
Suma HAP's	< 10	< 10	< 10	-
Tolueno	< 23,6	< 23,6	< 23,6	-
Vanadio Total	38,6	45,8	31,5	-
Zinc Total	24,9	29,5	23,5	500

Fuente: Elaboración Propia

El Potencial de Hidrógeno en los suelos es considerado como una de las principales variables debido a que controla muchos procesos químicos que se generan al interior de estos como la solubilidad de minerales y nutrientes que son esenciales para el desarrollo de las plantas. En general, el pH óptimo de estos suelos debe variar entre 6,5 y 7,0 para obtener los mejores rendimientos y la mayor productividad ya que se trata del rango donde los nutrientes son más fácilmente asimilables, y, por tanto, donde mejor se aportarán la mayoría de los cultivos, sin embargo, también hay nutrientes (generalmente microelementos) y cultivos que se adaptan mejor a pH más bien ácidos o básicos (Catalán Guillermo, 2016).

Para el presente monitoreo se evidencia un valor con características moderadamente neutras y en el punto identificado como FQ 2 (R.Coello) se identifica una tendencia a la acidez, tal como se evidencia en la Figura 92.

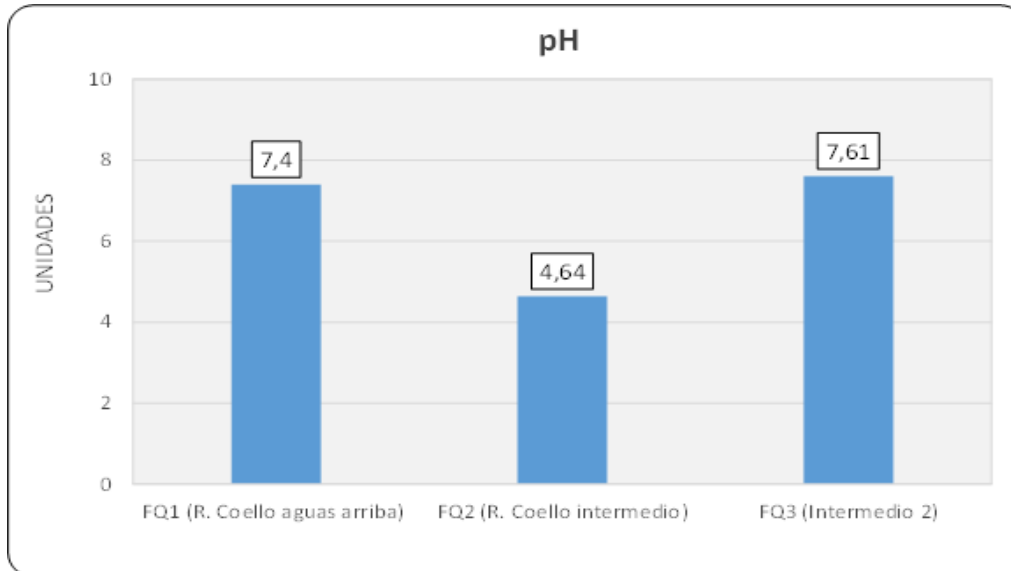


Figura 93. Comportamiento pH Sedimentos

Fuente: Elaboración Propia

Uno de los componentes que ayuda en la determinación de salinización del sedimento son los parámetros de cloruros y sulfatos, los cuales se pueden encontrar de forma natural en el medio. Para el presente monitoreo, los valores arrojados por sulfatos presentaron valores similares entre 71 y 78 mg/kg, por otro lado, para los cloruros el único punto que presentó un dato que no fuera inferior al límite de detección de la técnica analítica empleada por el laboratorio, fue en el punto identificado como FQ 3 (Intermedio 2) tal como se evidencia continuación. De igual manera se presentaron los resultados de la conductividad, donde es posible observar que las concentraciones fueron bajas y presentaron resultados entre 89,5 mg/kg y 302 mg/kg. Es importante mencionar que no se presenta evaluación normativa dado que no hay alguna norma contra la cual comparar estos resultados.

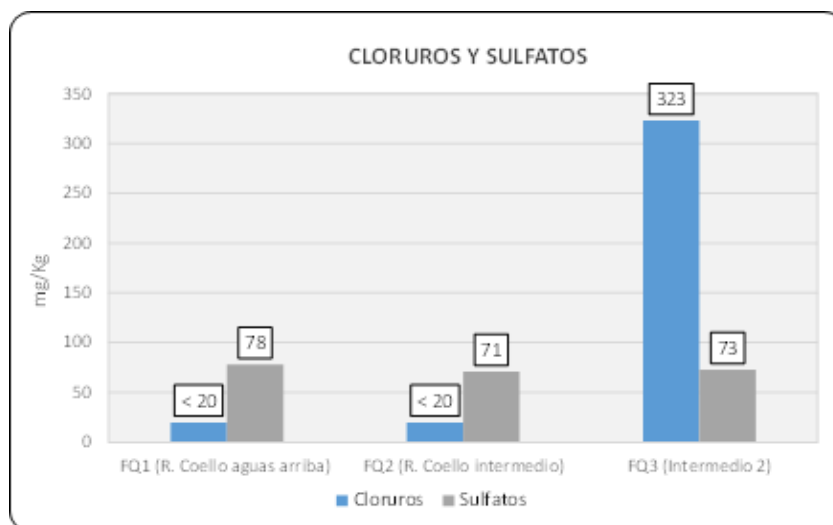


Figura 94. Comportamiento Cloruros y sulfatos sedimentos

Fuente: Elaboración Propia

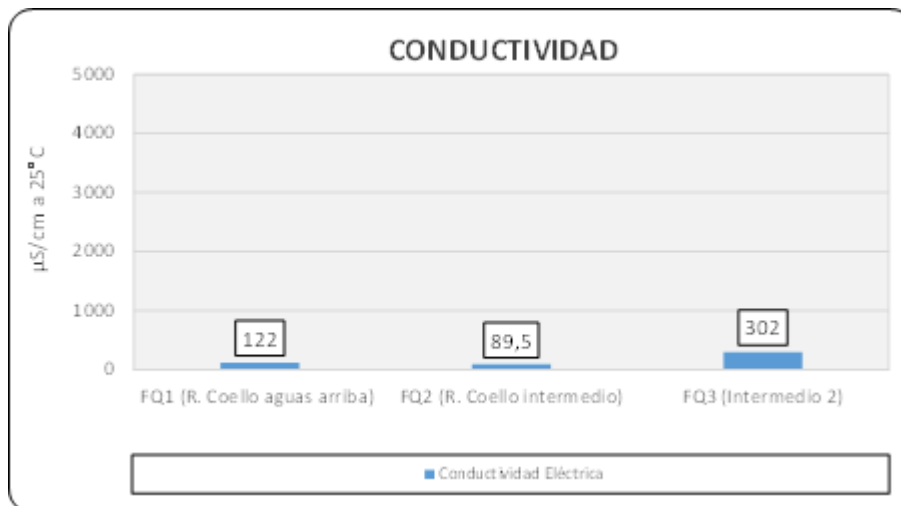


Figura 95. Comportamiento Conductividad sedimentos

Fuente: Elaboración Propia

Compuestos orgánicos como grasas y aceites, hidrocarburos totales, Compuestos Orgánicos Halogenados Suma HAP's y Suma BTEX evaluados en las muestras de sedimentos, registraron concentraciones bajas e inferiores a la técnica analítica realizada por laboratorio para las diferentes variables citadas, a excepción de la muestra identificada como FQ1 (R. Coello aguas arriba) donde supera el límite; este comportamiento puede deberse muy posiblemente a sustancias solubles de origen biogénico, asociados a la síntesis de plantas, animales, microbiota, bacterias, entre otros y por sustancias de origen patogénico; Cabe aclarar que entre los resultados obtenido para los hidrocarburos, estos presentaron concentraciones entre 18,4 y 21,3 mg/Kg, lo que permite dar a entender que esta característica es relacionada con la calidad del sedimento de la zona.

Los fenoles por su lado, son compuestos orgánicos que se generan a través de la degradación microbiana y para el presente estudio, no se detectaron trazas significativas de este compuesto.

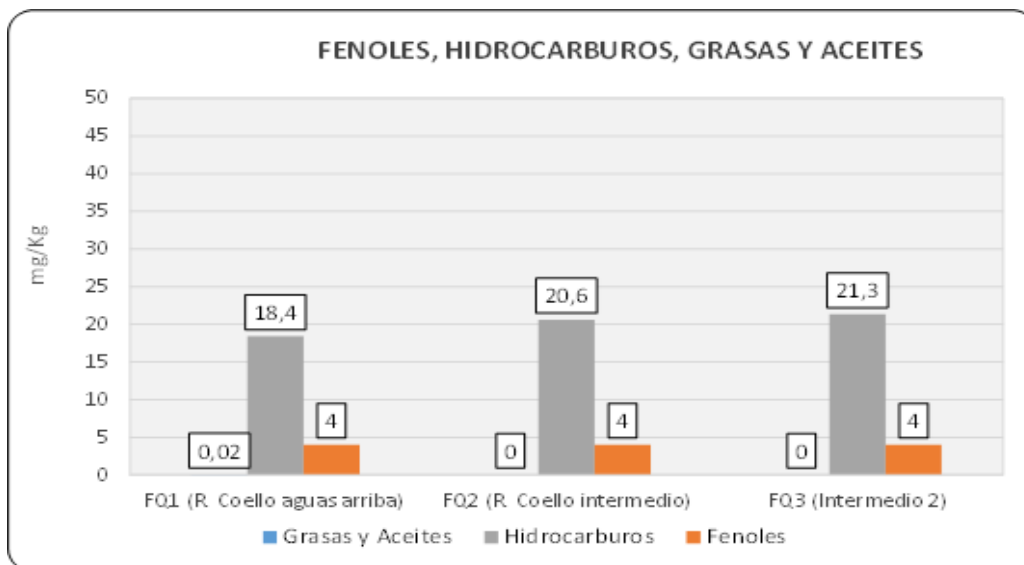


Figura 96. Comportamiento fenoles, hidrocarburos, grasas y aceites sedimentos

Fuente: Elaboración Propia

Los (HAPs) más estudiados son los monos aromáticos BTEX, el diaromático naftaleno y los triaromáticos fenantreno, antraceno y fluoreno, que generan un impacto negativo a los ecosistemas y afecta la salud de los seres vivos.

En el presente análisis los compuestos orgánicos como Suma HAP's, Suma BTEX y AOX evaluados en las muestras de sedimentos tomadas en los puntos evaluados, registraron concentraciones inferiores al límite de cuantificación.

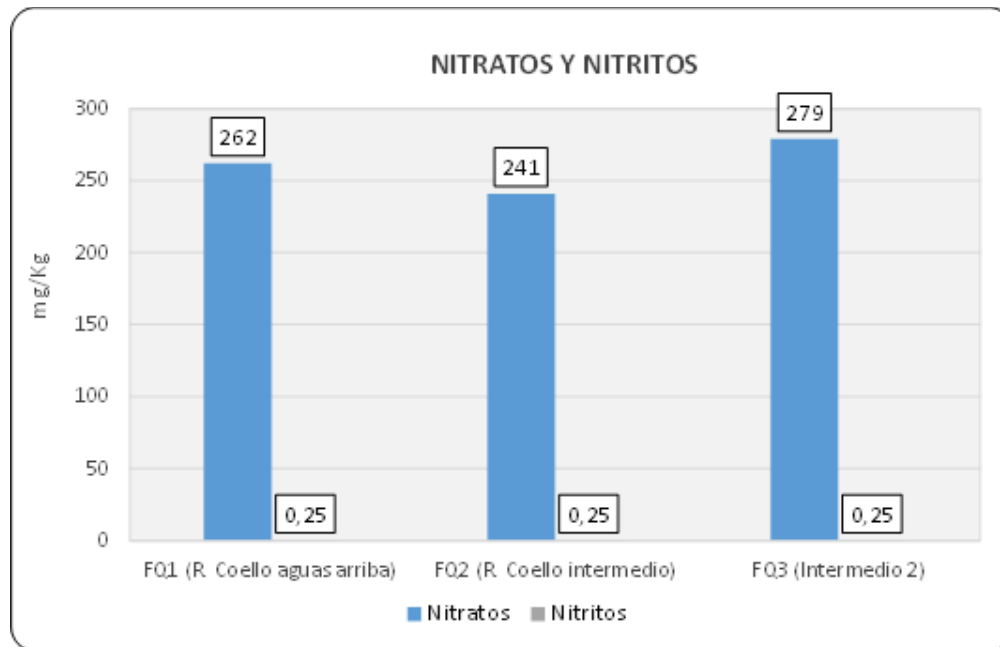


Figura 97. Comportamiento Nitratos y Nitritos sedimentos

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo con las concentraciones registradas para los diferentes metales pesados no esenciales y compuestos metálicos evaluados en las muestras de sedimento, es posible asociar su presencia en el medio a características naturales de los terrenos y a posibles actividades antropogénicas que son realizadas durante las labores propias del área de estudio ya que entre los diferentes puntos se presentaron concentraciones similares en cuanto a los parámetros evaluados. Cabe destacar que la disponibilidad y movilidad en el medio edáfico de algunos de estos compuestos metálicos dependen principalmente del comportamiento de parámetros como pH, contenidos de materia orgánica, carbonatos, minerales de la arcilla, textura, óxidos e hidróxidos.

- Índices de Contaminación (ICOs)

Como se observa en la Tabla 238 de acuerdo con los parámetros fisicoquímicos tomados para cada uno de los puntos en el área de influencia de la Mina La Esmeralda, el índice de contaminación por mineralización (ICOMI) para 3 de los 7 (FQ1 (R. Coello aguas arriba), FQ7 (Afluente Zanjón Los Huilos) y FQ8 (Zanjón Los Huilos)), mostró valores altos, es decir en estos puntos hubo gran cantidad de sales disueltas. El punto FQ6 (El Salado), fue en donde hubo un índice de contaminación más alto con 0.83. Los 3 puntos restantes presentaron contaminación media y baja, por sales disueltas.

Por su parte el índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS), mostraron la misma tendencia que se venía mostrando en la cantidad de sólidos, es decir que los puntos sobre el Río Coello fueron altos y muy altos, esto debido a la crecida del río y por tanto la erosión provocada en los sustratos. Los puntos restantes FQ6, FQ7, FQ8, FQ9, mostraron un

valor bajo (0.001 – 0.016); estos valores indican una cantidad baja de sólidos en suspensión que no dificulta la entrada de luz en la columna de agua y no se ven afectadas las comunidades autótrofas como las microalgas y por lo tanto tampoco influye en la concentración de oxígeno disuelto, ya que al aumentar la cantidad de sólidos suspendidos totales disminuye el oxígeno disuelto y por lo tanto la posibilidad de encontrar diversidad biológica.

El índice de contaminación por materia orgánica (ICOMO) presentó valores para el FQ1 y FQ2 ambos sobre el río Coello, valores de contaminación altos, esto probablemente debido a la cantidad de aportes alóctonos que entran al río, sin embargo, debido a la corriente y la gran cantidad de oxígeno disuelto en los puntos, esta materia orgánica puede oxidarse de una forma más rápida. Los puntos FQ3 y FQ6 mostraron valores medios y los restantes puntos FQ7, FQ8 y FQ9, mostraron valores del índice bajos, por lo que estos no se están viendo afectados, por la cantidad de material orgánico presente.

El índice de calidad de agua ICA, mostró que el punto FQ1 (R. Coello aguas arriba), fue clasificado como calidad Mala, seguido de los puntos FQ2, FQ3 y FQ6, con calidad Regular. Los puntos FQ7, FQ8 y FQ9, mostraron una calidad aceptable.

El cálculo del índice de Langelier, determinó que las aguas del río Coello y drenaje El Salado tienen tendencia a ser corrosivas, lo que indica que tienen la capacidad de disolver metales presentes en los cuerpos de agua, mientras que las aguas del zanjón Los Huilos y su afluente presentan tendencia a ser incrustante.

En relación con la capacidad de buffer, se tomó como parámetro representativo la alcalinidad total, la cual está determinada por el contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos y representa el principal sistema amortiguador de las aguas. Cuando las aguas tienen alcalinidades inferiores se vuelven muy sensibles a la contaminación, ya que no tienen capacidad para oponerse a las modificaciones que generen disminuciones del pH (acidificación).

El IACAL refleja la alteración potencial de la calidad del agua por presión de la actividad socioeconómica, a escala de subzonas hidrográficas, pues se calcula en función de la presión ambiental, entendida como la contribución potencial de cada agente social o actividad humana (población, industria, agricultura, minería) a las alteraciones del medio ambiente por consumo de recursos naturales, generación de residuos (emisión o vertimiento) y transformación del medio físico. Es decir, es la capacidad de generar un impacto ambiental. La afectación potencial se refiere a la posibilidad de generar un grado de alteración debido a una presión ambiental; por ejemplo, un vertimiento puede generar distintos impactos ambientales en función de diversos factores: la fragilidad del medio receptor, la concentración de presión ambiental en el área (existencia de muchos vertimientos) y la capacidad de recuperación del medio receptor.

En este orden de ideas, como se puede observar en la Tabla 82, la Subzona hidrográfica denominada Río Coello, presenta una clasificación general de IACAL entre MUY ALTA, indicando una alteración potencial de la calidad del agua, por las actividades que allí se desarrollan y afectan directamente el uso y disponibilidad del recurso.

Tabla 79. Índices de Contaminación (ICOs) para las fuentes superficiales del área de influencia

Índice de contaminación	INGETEC - MINA LA ESMERALDA						
	FQ1 (R. Coello)	FQ2 (R. Coello)	FQ3 (R. Coello)	FQ6 (El Salado)	FQ7 (Afluente)	FQ8 (Zanjón Los Huilos)	FQ9 (Pit de explotación)
	A-21/036818	A-21/036823	A-21/036825	A-21/036819	A-21/036821	A-21/036822	A-21/036820
ICOMO	0.64	0.62	0.56	0.55	0.36	0.30	0.23
ICOMI	0.72	0.39	0.41	0.83	0.72	0.80	0.43
ICOSUS	1.00	0.74	1.00	0.03	0.01	0.01	0.30
ICA	0.43	0.53	0.53	0.68	0.72	0.72	0.71

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 80. Índice de Langelier

Parámetro	Unidad	FQ1 (R, Coello aguas arriba) -	FQ2 (R, Coello intermedio)	FQ3 (Intermedio 2)	FQ6 (El Salado)	FQ7 (Afluente Zanjón Los Huilos)	FQ8 (Zanjón Los Huilos) -	FQ9 (Pit de explotación) -
pH	Unidades	8,10	7,50	7,40	7,30	8	8	7,70
Temperatura del agua	°C	22,50	22,90	23,60	23	25,30	25,30	31,20
Alcalinidad	mg/l	79,30	72,50	75,10	150	83,80	130	87,60
Dureza cálcica	mg/l	56,70	48,60	47,70	115	111	155	63
Sólidos disueltos	mg/l	108	80	78	157	186	217	114
A	---	0,10	0,09	0,09	0,12	0,13	0,13	0,11
B	---	2,14	2,13	2,12	2,13	2,08	2,08	1,97
C	---	1,75	1,69	1,68	2,06	2,05	2,19	1,80
D	---	1,90	1,86	1,88	2,18	1,92	2,11	1,94
pHs	Unidades	7,89	7,97	7,95	7,31	7,54	7,21	7,63
IL		0,21	-0,47	-0,55	-0,01	0,46	0,79	0,07
		Agua con tendencia a ser incrustante	Agua con tendencia a ser corrosiva	Agua con tendencia a ser corrosiva	Agua con tendencia a ser corrosiva	Agua con tendencia a ser incrustante	Agua con tendencia a ser incrustante	Agua con tendencia a ser incrustante

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 81. Capacidad Buffer

Parámetro	Unidad	FQ1 (R, Coello aguas arriba) -	FQ2 (R, Coello intermedio)	FQ3 (Intermedio 2)	FQ6 (El Salado)	FQ7 (Afluente Zanjón Los Huilos)	FQ8 (Zanjón Los Huilos) -	FQ9 (Pit de explotación) -
Alcalinidad	mg/l	79,30	72,50	75,10	150	83,80	130	87,60
CAPACIDAD DE BUFFER		Muy amortiguadas	Moderadamente amortiguadas	Muy amortiguadas	Muy amortiguadas	Muy amortiguadas	Muy amortiguadas	Muy amortiguadas

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 82. Índice IACAL

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	FQ1 (R, Coello aguas arriba)	FQ2 (R, Coello intermedio)	FQ3 (Intermedio 2)
Parámetros				
DBO ₅	mg/l	20,20	8,51	4,70
DQO	mg/l	43,11	52,72	33,90
DQO-DBO		22,91	44,21	29,20
SST	mg/l	1536	254	718
Nitrógeno total	mg/l	5,00	5,22	5,00
Fósforo total	mg/l	0,82	0,46	0,53

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	FQ1 (R, Coello aguas arriba)	FQ2 (R, Coello intermedio)	FQ3 (Intermedio 2)
Oferta hídrica	m3/s	39,30	39,30	39,30
	MMC (millones de m3/año)	1.239,36	1.239,36	1.239,36
Caudal medio mensual multianual	m3/s	39,30	39,30	39,30
Cargas contaminantes				
Carga DBO	t/año	25.035,17	10.546,99	5.825,01
Carga DQO	t/año	53.429,02	65.339,31	42.014
Carga DQO-DBO	t/año	28393,85	54792,32	36189
Carga SST	t/año	1.903.664,33	314.798,66	889.864
Carga nitrógeno total	t/año	6.196,82	6.469,48	6.196,82
Carga fósforo total	t/año	1.016,28	570,11	656,86
iacal				
iacalbbo	Calificación	20	9	5
	Categoría	5	5	4
		Alta	Alta	Alta

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	FQ1 (R, Coello aguas arriba)	FQ2 (R, Coello intermedio)	FQ3 (Intermedio 2)
iacal _{DQO-DBO}	Calificación	23	44	29
	Categoría	5	5	5
		Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
iacal _{SST}	Calificación	1.536	254	718
	Categoría	5	5	5
		Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
iacal _{NT}	Calificación	5	5	5
	Categoría	5	5	5
		Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
iacal _{PT}	Calificación	0,820	0,460	0,530
	Categoría	5	5	5
		Alta	Muy Alta	Muy Alta
IACAL TOTAL				
Promedio IACAL		5	5	4,8
IACAL		5	5	5

DESCRIPCIÓN	UNIDADES	FQ1 (R, Coello aguas arriba)	FQ2 (R, Coello intermedio)	FQ3 (Intermedio 2)
		Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta

Fuente: Elaboración Propia

5.1.6.8. Usos del agua.

5.1.6.8.1. Identificación de usos y usuarios del agua

En el presente numeral se exponen los resultados de la recopilación de información referente a los usos y usuarios del agua, actuales y proyectados, que se puedan ver afectados por las actividades del proyecto tales como ocupaciones de cauce. Para este fin, se tienen en cuenta:

- Los usos definidos por el POMCA del río Coello (CORTOLIMA, 2019) y POMCA del río Luisa y otros directos al Magdalena (CORTOLIMA, 2019).
- Las metas y objetivos de calidad definidos por la Corporación Autónoma Regional del Tolima (CORTOLIMA) en la resolución 601 de 2006.
- Los usuarios legalmente constituidos de acuerdo con la información entregada por CORTOLIMA (solicitadas para el año 2020)
- Recorridos en campo para la recolección de información primaria.

De acuerdo con el artículo 2.2.3.2.7.6 del Decreto 1076 de 2015 expedido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el proyecto tiene un orden de prioridad que se clasifica como se presenta en la Tabla 83.

Tabla 83. Orden de prioridad Usos del agua

Orden	Descripción
a	Utilización para el consumo humano, colectivo o comunitario, sea urbano o rural
b	Utilización para necesidades domésticas individuales
c	Usos agropecuarios comunitarios, comprendidos la acuicultura y la pesca.
d	Usos agropecuarios individuales, comprendidos la acuicultura y la pesca.
e	Generación de energía hidroeléctrica
f	Usos industriales o manufactureros
g	Usos Mineros
h	Usos recreativos y comunitarios

Orden	Descripción
i	Usos recreativos individuales

Fuente: Decreto 1075 de 2015 del MADS

5.1.6.8.1.1. Identificación de usos actuales y proyectados

Objetivos de calidad del agua

Los objetivos de calidad del agua de cuerpos de agua permiten establecer los usos actuales y proyectados, al ser una meta para la calidad del agua. Para las cuencas hidrográficas de Coello y Luisa los objetivos se establecen en la resolución 601 de 2006 de CORTOLIMA.

En el caso de la cuenca hidrográfica del río Luisa, se identifican dos tramos de interés:

- El denominado tramo 2 comprendido entre la Bocatoma del acueducto municipal de Rovira y Puente Alegre y ubicado en los municipios de Rovira y Valle de San Juan. En este tramo se da la entrada de la quebrada El Cobre al río Luisa, es decir comprende la microcuenca del drenaje El Salado.
- El denominado tramo 3 comprendido entre Puente Alegre y Puerto Amor y ubicado en los municipios de Valle de San Juan y San Luis. Este tramo estaría ubicado aguas abajo de la intervención del proyecto.

En el caso de la cuenca hidrográfica del río Coello, se identifican dos tramos de interés:

- El denominado tramo 4 comprendido entre el Puente vía Coello Cocora y el Puente Payandé y ubicado en el municipio de Ibagué. Este tramo finaliza aguas abajo de la banda de la Mina La Esmeralda.
- El denominado tramo 5 comprendido entre Puente Payandé y la Bocatoma del distrito de riego USOCOELLO. Este tramo estaría ubicado aguas abajo de la intervención del proyecto.

A continuación, se definen los usos definidos en los tramos de interés.

Tabla 84. Usos definidos de acuerdo a objetivos de calidad del agua

Cuenca	Tramo	Usos definidos	Artículo 1076 de 2015	Resolución 601 de 2006
Luisa	Tramo 2	Agrícola Asimilación - dilución	2.2.3.3.9.5	OD >5 mg/l DBO5 < 20 mg/l SST < 50 mg/l CT < 20000 NMP/100 ml CF < 2000 NMP/100 ml CE < 1000 uS/cm
	Tramo 3	Agrícola Contacto primario Preservación flora y fauna	2.2.3.3.9.5 2.2.3.3.9.7 2.2.3.3.9.10	OD >5 mg/l DBO5 < 10 mg/l SST < 20 mg/l CT < 1000 NMP/100 ml CF < 200 NMP/100 ml

Cuenca	Tramo	Usos definidos	Artículo 1076 de 2015	Resolución 601 de 2006
				CE < 1000 uS/cm
Coello	Tramo 4	Agrícola Preservación flora y fauna	2.2.3.3.9.5 2.2.3.3.9.10	OD >5 mg/l DBO5 < 5 mg/l SST < 20 mg/l CT < 20000 NMP/100 ml CF < 2000 NMP/100 ml
	Tramo 5	Consumo humano y doméstico Agrícola	2.2.3.3.9.3 2.2.3.3.9.5	OD >5 mg/l DBO5 < 5 mg/l SST < 20 mg/l CT < 20000 NMP/100 ml CF < 2000 NMP/100 ml CE < 1000 uS/cm

Fuente: Resolución 601 de 2006 de CORTOLIMA

Plan de ordenamiento y manejo de la cuenca - POMCA

Se tienen en cuenta las condiciones establecidas en los planes de ordenamiento de cuenca, con el fin de definir los usos del recurso hídrico en el área de estudio.

Cuenca hidrográfica río La Luisa

En el caso de la cuenca del río Luisa y otros directos al Magdalena se encuentra que la mayor demanda de agua está representada por la generación de energía hidroeléctrica, para la cual se presenta un único usuario correspondiente a la hidroeléctrica ENERLIM ubicada en el municipio de Rovira, sobre el río Luisa. La Captación se ubica aguas arriba de la entrada de la quebrada El Cobre, (aguas arriba de la Mina La Esmeralda). En la cuenca de la quebrada El Cobre (la cual es la directamente intervenida por el proyecto) no existe uso para generación hidroeléctrica.

Tabla 85. Caudal concesionado por tipo de uso de agua para la subzona hidrográfica del río Luisa y otros directos al Magdalena

Uso	Orden decreto 1076 de 2015	Usuarios concesionados	Caudal Concesional (l/s)
Generación eléctrica	e	1	2400
Agrícola	d	108	2062,1
Riego	c	2	1800
Acueductos	a	27	208,5
Doméstico	b	44	24,7
Consumo humano	b	6	13,7
Pecuario	d	7	11,8
Minero	g	1	2

Uso	Orden decreto 1076 de 2015	Usuarios concesionados	Caudal Concesional (l/s)
Recreativo	i	1	2

Fuente: Formulación POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

El siguiente uso de mayor importancia es el uso agrícola individual, para el cual las captaciones de mayor caudal se ubican directamente en el cauce del río Luisa. De acuerdo con lo reportado en el POMCA del río Luisa y otros directos al Magdalena, para la cuenca de la quebrada El Cobre la demanda hídrica agrícola está entre 0 y 492 l/s.

Posteriormente, se encuentra el uso agrícola comunitario (riego), el cual está representado por la concesión asignada para el distrito de riego de USOGUAMO, cuya fuente es el río La Luisa a la altura del municipio de Guamo (Aguas abajo de la Mina La Esmeralda). Para la cuenca de la quebrada El Cobre no existe demanda para riego.

Adicionalmente, el uso doméstico comunitario (Acueductos) se presentan sobre el río Luisa para el acueducto del Municipio de Rovira (Aguas arriba del proyecto) y el acueducto del municipio de Guamo (Aguas abajo del proyecto). Sobre la quebrada El cobre se presenta la concesión para el acueducto del municipio de San Luis. La Bocatoma se encuentra en la quebrada El Cobre, aguas arriba de la entrada de la quebrada Chicalá (cuerpo receptor de vertimiento de la mina La Esmeralda). Por otro lado, la bocatoma está aguas arriba de la entrada del drenaje El Salado.

Por último, se encuentra que existen 44 captaciones para consumo doméstico con necesidades individuales. De acuerdo con lo reportado en el POMCA del río Luisa y otros directos al Magdalena, para la cuenca de la quebrada El Cobre la demanda hídrica para usos domésticos individuales está entre 0 y 2 l/s.

De acuerdo con el POMCA del río Luisa y otros directos al Magdalena la demanda hídrica total en la cuenca de la quebrada El Cobre está entre 220 y 490 l/s.

Tabla 86. Usuarios de interés POMCA subzona hidrográfica del río Luisa y otros directos al Magdalena

Nombre	x	y	Caudal	Uso	Fuente	Coord. Sistema Origen Único	
						este	norte
Acueducto Municipio de San Luis	885993	962952	0,049	Doméstico	Quebrada El Cobre	4766515,3	2029099,8

Fuente: Diagnóstico POMCA río Luisa y otros directos al Magdalena. CORCUENCAS, 2019

Cuenca hidrográfica del río Coello

En el caso de la cuenca del río Coello, se encuentra el uso agrícola comunitario (riego), el cual está representado por la concesión asignada para el distrito de riego de USOCOELLO, cuya fuente es el río Coello a la altura del caserío Gualanday del municipio de Coello (esto se encuentra aguas abajo de la zona de intervención de la mina La Esmeralda). El uso principal del agua es irrigar las áreas de cultivo de arroz ubicadas en el municipio de Espinal y parte de los municipios de Guamo y Flandes.

La segunda demanda con mayor representación es la generación de energía hidroeléctrica, para la cual se presentan tres captaciones asociadas al usuario Hidrotolima Sas Esp, cuya fuente es el río Combeima. Adicionalmente, desde el distrito de riego USOCOELLO se desvían aguas para generación energética por parte de la empresa Hidrotolima sector "La Ventana".

Tabla 87. Caudal concesionado por tipo de uso de agua para la subzona hidrográfica del río Coello

Uso	Orden decreto 1076 de 2015	Usuarios concesionados	Caudal Concesional (l/s)
Riego	c	2	9640,1
Generación eléctrica	e	3	8497
Agrícola	d	257	5783,51
Acueductos	a	135	3622,64
Pecuario	d	18	336,33
Doméstico	b	384	232,09
Industrial	f	17	48,41
Recreativo	i	8	42,48
Consumo humano	b	66	30,21
Flora y fauna	-	1	1

Fuente: Gestión Integral de Recurso Hídrico, GIRH - CORTOLIMA, 2019.

El siguiente uso de mayor importancia es el uso agrícola individual, para el cual las captaciones de mayor caudal se ubican en la zona de la cuenca aguas arriba de la Mina La Esmeralda.

Posteriormente, se encuentra el uso doméstico comunitario (Acueductos), se encuentra que las bocatomas de acueductos se ubican en cuerpos de agua como el río Comeiba, quebrada Cay o río Cocora. Adicionalmente, desde el sistema USOCOELLO se captan las aguas para uso humano del municipio de Espinal, el corregimiento de Chicoral del mismo municipio, y el municipio de Coello.

Tabla 88. Usuarios de interés POMCA subzona hidrográfica del río Coello

Nombre	x	y	Caudal	Uso	Fuente	Coord. Sistema Origen Único	
						Este	Norte
USOCOELLO	894393	965045	9,64	Agrícola	Río Coello	4774915,7	2031180,46

Fuente: Gestión Integral de Recurso Hídrico, GIRH - CORTOLIMA, 2019.

Identificación de usuarios remitidos por Cortolima

Mediante oficio con número de radicado de salida 6153 del 6 de marzo de 2020 de Cortolima en respuesta a la solicitud con radicado No. 3885 y 3886 del 26 de febrero de 2020, se allega la base de datos de concesiones y vertimientos otorgados por la corporación sobre el río Coello y drenaje El Salado (Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.020)

En general se evidencia que los usuarios reportados en la cuenca del río Coello se localizan en las veredas Santa Isabel, La Laguna, El Hobo, La Flor y Jagua (todas localizadas al sur de la vereda de Payandé) en su mayoría para uso de riego y silvicultura con ocho usuarios y un total de 10,62 l concesionados, un usuario para uso pecuario en la vereda Santa Isabel, predio La Pedregosa con 10 l concesionados (Res 3260 de 2010) y otro usuario para uso doméstico en la vereda el Hobo,

predio El Diamante 1 con 0,05 l concesionados (Res 0418 de 2019). Lo anterior para un total de 20,67 l concesionados en el municipio de San Luis.

En la cuenca del río Coello – drenaje el Salado, la corporación reporta la concesión de 1,2 l de cinco usuarios para uso doméstico, todos localizados en el municipio de Rovira, colindante con el municipio de San Luis.

5.1.6.8.1.2. Identificación de usuarios en cuerpos susceptibles a intervención

Identificación de usuarios en recorridos de campo

Se realiza un recorrido de campo, con el fin de identificar puntos de captación registrados y no registrados en los cuerpos de agua que se pueden ver afectados por el proyecto y complementar la información secundaria recolectada. El recorrido se llevó a cabo en el mes de octubre del año 2020. La metodología consistió en realizar cinco recorridos directamente sobre los cuerpos de agua a intervenir: Zanjón los Huilos, drenaje 1 y drenaje 2 (Cuenca hidrográfica del río Coello) y drenaje El Salado (Subcuenca hidrográfica de la quebrada El cobre).

El recorrido 1 se realiza por la margen derecha del río Coello iniciando en el inicio de la planta de Caracolito (en el costado izquierdo del río) y finalizando en el Zajón los Huilos. En este se recorren dos afluentes del río Coello y un afluente del Zajón los Huilos (sin identificación en la cartografía).



Fotografía 56. Recorrido 1
Fuente: Elaboración propia

El recorrido 2 se realiza por la margen izquierda de un afluente del Zajón los Huilos sin identificación en la cartografía.



Fotografía 57. Recorrido 2
Fuente: Elaboración propia

El recorrido 3 inicia en la quebrada Chicalá y finaliza en el municipio de Payandé. En este se recorre la margen derecha e izquierda del drenaje El Salado, en su paso por la mina la Esmeralda.



Fotografía 58. Recorrido 3
Fuente: Elaboración propia

El recorrido 4 se desarrolló por la vía que conecta las vías de San Luis - Guamo con la vía Rovira, en este se recorren los cuerpos de agua: quebrada Chicalá, drenaje El Salado y un afluente del drenaje El Salado (sin identificación en la cartografía).



Fotografía 59. Recorrido 4
Fuente: Elaboración propia

El recorrido 5 se realiza por la margen derecha del río Coello, iniciando en el Zanjón los Huilos y finalizando en el municipio de Payandé. En este se cruzan los cuerpos de agua, zanjón Los Huilos, drenaje 1 y drenaje 2.

En la Figura 97 se presenta el trazado de los recorridos de campo realizados para la identificación de usos y usuarios.

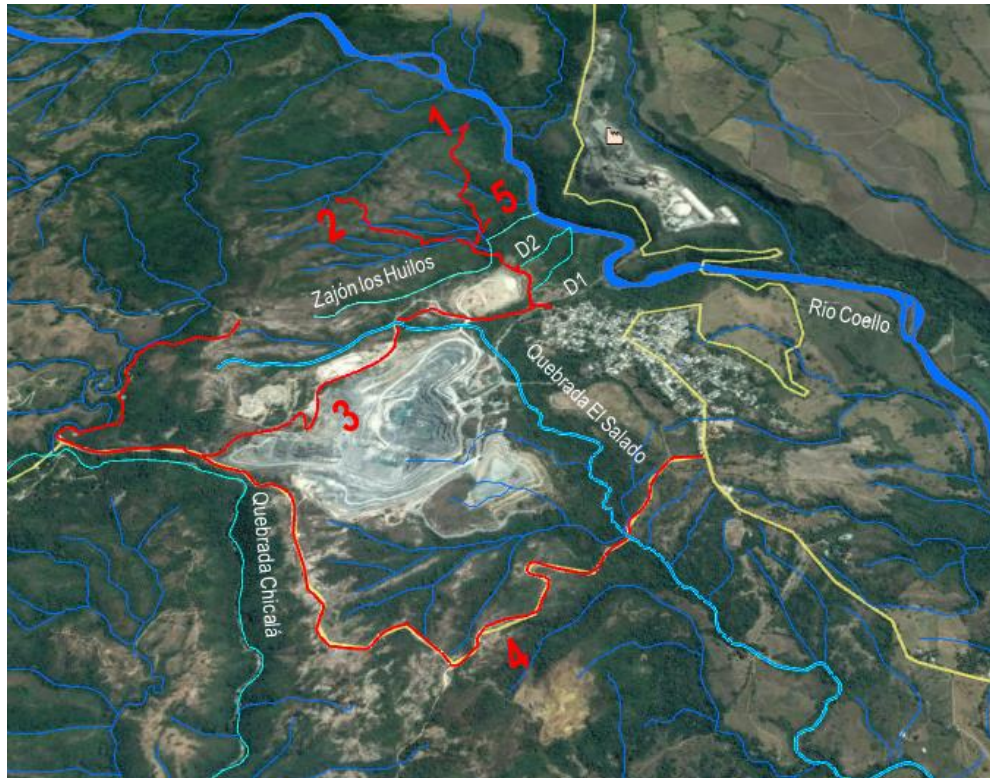


Figura 98. Recorrido de usos y usuarios

Fuente: Elaboración propia

En los recorridos realizados se encontró que no existen usuarios asociados en los cuerpos de agua que serán intervenidos directamente. Adicionalmente, no se encuentran viviendas o actividades en la zona del recorrido.

Se identifica la planta de tratamiento de agua potable - PTAP del corregimiento de Payandé, no obstante, esta toma el recurso de tres fuentes hídricas que no se encuentran en el área de estudio, quebradas el Aguirre, el Salto y Río Frío, por tal razón existen tres bocatomas, la de la quebrada el Aguirre con una capacidad de 6 l/s, la quebrada el Salto con capacidad de 11 l/s y la quebrada Río Frío con una capacidad de captación de 12 l/s. Estas quebradas hacen parte de la subcuenca de la quebrada El Cobre.



Fotografía 60. PTAP del corregimiento de Payandé

Fuente: Elaboración propia

Para el caso del río Coello, se identifica la estación limnigráfica sobre este en el tramo aguas abajo del paso del río por la Mina La Esmeralda, no se identifican usuarios del recurso.



Fotografía 61. Río Coello aguas arriba Mina La Esmeralda
Fuente: Elaboración propia



Fotografía 62. Río Coello aguas abajo Banda
Fuente: Elaboración propia



Fotografía 63. Río Coello aguas abajo Puentes via
Payandé 1
Fuente: Elaboración propia



Fotografía 64. Río Coello aguas abajo Puentes via
Payandé 2
Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo, en los drenajes 1 y 2 y el Zajón los Huilos se identifica que no existe flujo y no existen usuarios asociados.



Fotografía 65. Drenaje 1
Fuente: Elaboración propia



Fotografía 66. Drenaje 2
Fuente: Elaboración propia



Fotografía 67. Zajón los Huilos
Fuente: Elaboración propia

Se encontró que el drenaje El Salado no presenta flujo de agua, de manera que la totalidad del Caudal, es aportado por la descarga de la mina La Esmeralda, correspondiente a la escorrentía del fondo del PIT.

Por otro lado, se complementa el recorrido de usos y usuarios con la información levantada por CEMEX el día 22 de abril de 2013 sobre los usos del agua del drenaje El Salado. El tramo recorrido sobre el drenaje El Salado se estableció desde la Mina La Esmeralda hasta su desembocadura en la quebrada El Cobre, con el fin de identificar posibles captaciones, vertimientos o intervenciones realizadas en el cauce.

Durante el recorrido no se encontraron obras de captación en el cauce del drenaje El Salado. La mayoría de las obras corresponden a estructuras de descarga de aguas lluvias, o bateas para el paso de vías sobre la quebrada. Se identifica un punto de vertimiento asociado a las aguas residuales de la población de Payandé. Este corregimiento no cuenta con sistema de tratamiento de aguas residuales, razón por la cual existen cuatro zonas de vertedero de las cuales dos finalizan en el río Coello, una a un lote de terreno y la última en el drenaje El Salado. (CEMEX Colombia, 2016).



Fotografía 68. Drenaje El Salado
Fuente: Elaboración propia

Tabla 89. Vertimientos en recorridos de campo

Nombre	Este	Norte	Uso	Cuerpo de agua
Vertimiento mina La Esmeralda	4766553,3	2033109,17	Vertimiento ARnD	Drenaje El Salado
Vertimiento Payandé			Vertimiento ARD	Drenaje El Salado

Fuente: Modificación de Licencia Ambiental título minero 6823 (2017)

Usuarios legalmente constituidos

El inventario oficial de usuarios registrados, se solicitó a la corporación autónoma regional del Tolima CORTOLIMA, el día 8 de octubre de 2020. En este dan respuesta refiriendo a las bases de datos del SIRH (sistema de información del recurso hídrico) y a las páginas oficiales de la corporación. A continuación, se expone la información recopilada.

Captaciones

Con respecto a las captaciones, se encuentra que en el SIRH no se relacionan las captaciones en el área de influencia del proyecto.

Vertimientos

De acuerdo con las bases de datos reportadas por la corporación, en la Tabla 90 se presentan los vertimientos municipales.

Tabla 90. Vertimientos municipales

Municipio	X	Y	Q. Vertimiento (l/s)	Altura (msnm)	Nombre vertimiento	Fuente receptora	Coord. Sistema Origen Único	
							este	norte
Coello	909023,74	965829,63	0,42	280	Vto. Sector El Puente	Rio Coello	4789542,7	2031944,2
Cp gualanday	894671,19	965090,14	3,77	481	Vto. Sector La Garrucha	Rio Coello	4775193,9	2031225,2
Cp payande	887043,27	966697,43	8,69	706	Vto. La Profunda	Rio Coello	4767570,5	2032842,7
Cp payande	886858,85	967167,72	0,72	640	Vto. La Curva Del Mojicón	Rio Coello	4767386,8	2033313,1

Fuente: CORTOLIMA, 2018

5.1.6.8.1.3. Identificación de usos en el área de influencia

Teniendo en cuenta la información recolectada, a continuación se identifican los usos en los cuerpos de agua que se pueden ver afectados por las actividades del proyecto.

Uso consumo humano, colectivo o comunitario

En la subcuenca de la quebrada El cobre el uso para consumo humano colectivo o comunitario se representa en las captaciones del Acueducto Municipio de San Luis en la quebrada El cobre y del acueducto del corregimiento de Payandé en las quebradas el Aguirre, el Salto y Río Frío. Estas captaciones se encuentran aguas arriba del paso de los cuerpos de agua por la Mina La Esmeralda.

En la cuenca del río Coello este uso se encuentra representado por las captaciones para el municipio de Espinal, el corregimiento de Chicoral del mismo municipio, y el municipio de Coello, mediante la captación del distrito de riego USOCOELLO. Esta captación se encuentra aguas abajo del paso del río Coello por la Mina La Esmeralda.

Uso necesidades domésticas individuales

En los cuerpos de agua correspondientes al área de influencia no se identifica este uso. No obstante, en la microcuenca de la quebrada El cobre el uso para necesidades domésticas individuales se reporta en el POMCA con una magnitud entre 0 y 2 l/s.

Usos agropecuarios comunitarios

Este uso se encuentra representado en los cuerpos de agua que se pueden ver afectados por las actividades del proyecto, en la captación del distrito de riego USOCOELLO para riego de cultivos de arroz.

Usos agropecuarios individuales

En los cuerpos de agua directamente intervenidos por el proyecto, no se identifica este uso. No obstante, en el POMCA del Río Luisa y otros directos al Magdalena, se reporta para la cuenca de la quebrada El Cobre la demanda hídrica agrícola está entre 0 y 492 l/s.

Generación de energía hidroeléctrica

En la cuenca del río Coello este uso se encuentra representado por la captación de la empresa hidrotolima para generación energética en el sector “La Ventana”.

Usos recreativos comunitarios

Los usos recreativos comunitarios se ven representados en la subcuenca de la quebrada El cobre, para el cuerpo de agua Drenaje El Salado, en donde se ubican las cascadas de Payande o Chicalá, un atractivo turístico del corregimiento de Payandé en donde se da contacto primario con el recurso.

5.1.7. Hidrogeología.

5.1.7.1. Evaluación geológica/geofísica.

La operación minera La Esmeralda ha encaminado esfuerzos técnicos especializados para determinar el contexto geológico e hidrogeológico de las inmediaciones de la mina; sin embargo, para el desarrollo del estudio hidrogeológico es necesario inicialmente determinar los tipos de unidades litológicas y estructuras involucradas en el área de evaluación hidrogeológica y de acuerdo con lo establecido en los TdR-2016 ANLA.

En el marco geológico regional el área de la mina La Esmeralda, está localizada entre el flanco oriental de la Cordillera Central y el Valle del Río Magdalena. Afloran unidades del triásico, jurásico, neógeno y sedimentos cuaternarios, en un piedemonte afectado por fallas inversas, las cuales se localizan en la transición del Flanco Oriental de la Cordillera Central, así como de los Valles Superior y Medio del Magdalena. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-001.

El marco estructural regional presente en el área de evaluación hidrogeológica, se encuentra representado por algunas fallas que tienen el rumbo. Así mismo, la falla más representativa es la falla Gobernador que se caracteriza por ser una falla de tipo inversa o cabalgamiento, dicha falla pone en contacto a las rocas precámbricas de Tierradentro y la Formación Payandé. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-001. Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.001 y CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.002.

A continuación, se describen las unidades geológicas en un orden cronológico y secuencial asociada al contexto regional donde se ubica el título minero, 8-745 y se encuentran dentro del área de la modelación hidrogeológica.

5.1.7.1.1. Triásico

5.1.7.1.1.1. Formación Payandé (Trp).

Aflora en el Sector de Payandé y es donde se localiza la mina La Esmeralda en su complejo minero integrado por los títulos mineros 4205 y 6823, y corresponde a la unidad basal del modelo geológico como la unidad más antigua respecto al yacimiento de interés para el título minero 8-745. Está constituida por una secuencia calcárea marina, conformada por intercalaciones de caliza de grano medio a grueso de color gris claro a medio, dispuestas en capas tabulares con espesores decimétricos a métricos, con laminación interna. Hacia el sector occidental del área de estudio, ocurren localmente calizas marmorizadas por metamorfismo de contacto asociado con el Stock de Payandé. La unidad se encuentra intruída por diques

de pórfidos gris verdosos, que ocasionan metamorfismo de contacto. La distribución de esta unidad en planta para el área del proyecto se muestra en el Anexo Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-001, CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.024.

5.1.7.1.2. *Jurásico*

5.1.7.1.2.1. *Stock de Payandé (Jgp).*

Este cuerpo intrusivo aflora hacia la zona central y occidental del área de estudio, es de composición variada y de carácter dacítico y andesítico e intruye las rocas más antiguas generando metamorfismo de contacto. Aflora en la microcuenca alta de la quebrada Chicalá y parte de la microcuenca alta del drenaje El Salado. Los efectos por el metamorfismo de contacto son más notorios y se presentan en la Formación Payandé, en la cual se registran evidencias en la literatura de marmorización y aureolas de skarn. Afecta las Unidades pre cretáceas, siguiendo direcciones preferenciales de diaclasamiento, especialmente con orientación E – W. La distribución de esta unidad en planta para el área del proyecto se muestra en el Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-001, CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.024.

5.1.7.1.3. *Terciario*

5.1.7.1.4. 5.1.7.1.3.1. *Grupo Honda (Tsh).*

Aflora al oriente de Payandé, se presenta como parches aislados y discontinuos. El SGC, ha dividido en dos miembros; (i) el inferior consta de capas gruesas de arenitas conglomeráticas, verdes amarillas, feldespáticas y líticas, con cantos de andesita y rocas metamórficos con mucha mica, a veces calcáreas, con alto contenido de minerales pesados; intercaladas ocurren capas delgadas a medias de lodolitas rojas a abigarradas, las cuales forman pequeños valles. (ii) el nivel superior se encuentra representado por una sucesión alternante, más marcada, de areniscas cuarzo feldespáticas, de grano medio a conglomeráticas, verdes, amarillas, micáceas, algo calcáreas, con cantos de andesitas, en capas gruesas, con estratificación cruzada tangencial de bajo ángulo, intercalados con capas gruesas de arcillolitas fisiles, abigarradas. La distribución de esta unidad en planta para el área del proyecto se muestra en el Anexo CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-001, CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.024.

5.1.7.1.5. *Depósito de Caliche (Tsc).*

Ocupa una gran extensión de terreno sobre la zona central de las operaciones mineras, especialmente de la microcuenca del drenaje El Salado. Se ha catalogado como un depósito continental, conformado por fragmentos de caliza, limolitas y granodiorita envueltos en una matriz arcillosa, enriquecida en carbonatos provenientes de la disolución de las calizas de la Formación Payandé. Localmente y hacia el sector occidental, el caliche se enriquece en fragmentos de rocas intrusivas, areniscas y conglomerados, provenientes de la erosión del Stock de Payandé y la Formación Luisa. Suprayacen discordantemente las formaciones Pre Cretáceas y la Formación Honda. La distribución de esta unidad en planta para el área del proyecto se muestra en el Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-001; Anexo CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-001, CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.024.

5.1.7.1.6. *Cuaternario - Pleistoceno.*

5.1.7.1.6.1. *Abanico de Guamo (Qag)*

Constituida por una secuencia de bancos arenosos, con algo de gravas, cuya fracción gruesa es predominantemente pumácea, con esporádicos cantos de dacitas, rocas ígneas intrusivas y metamórficas. Los espesores máximos observados

pueden alcanzar los 25 m. Presentan, generalmente, compactación moderada a baja, lo que indica una alta permeabilidad¹. En la cartografía geológica del área de influencia del título minero 6823, corresponde a los depósitos de terrazas fluvio volcánicas (Qt). La distribución de esta unidad en planta para el área del proyecto se muestra en el Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-001; Anexo CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-001, CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.024.

5.1.7.1.7. Cuaternario - Holoceno.

5.1.7.1.7.1. Aluvial reciente (Qal)

Son depósitos de poco espesor (hasta 12 m) y extensión ubicados en las llanuras de inundación de los principales ríos de la región, producto de las crecientes invernales. Litológicamente, compuesta por limos, arenas y gravas de variada composición. La distribución de esta unidad en planta para el área del proyecto se muestra en el Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-001. Información del modelo geológico de superficie de esta unidad y en secciones de análisis, ver Anexo Anexo CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-001, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.002.

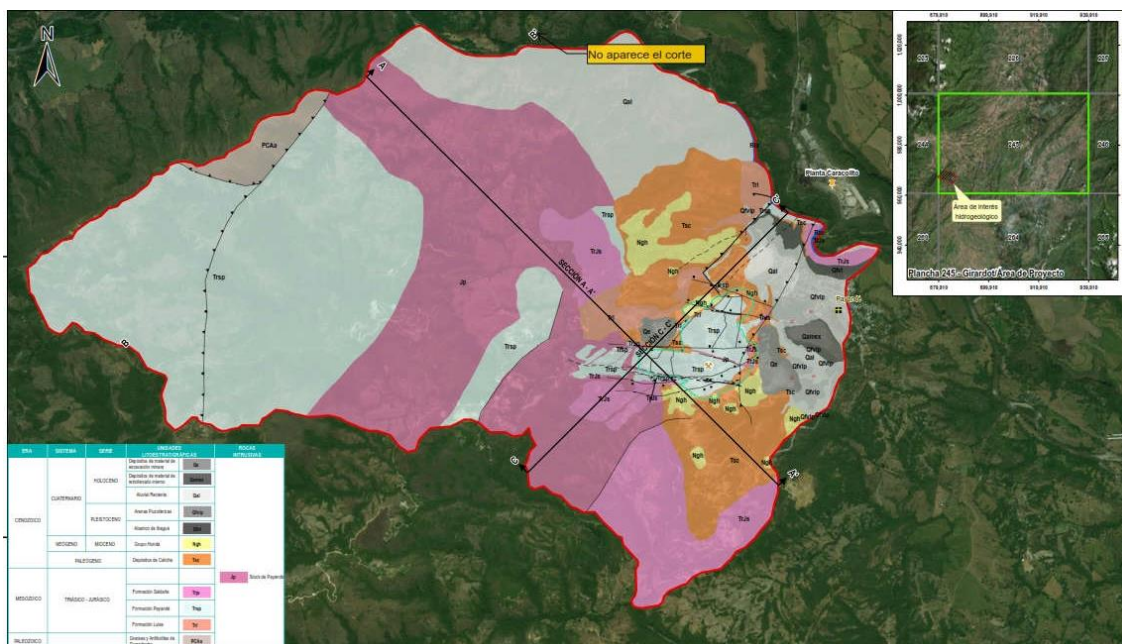


Figura 99. Geología regional área de modelación hidrogeológica mina La Esmeralda
Fuente: WES, 2019

¹ Estudio Hidrogeológico Mina La Esmeralda, municipio de San Luis, Tolima. WES, 2019

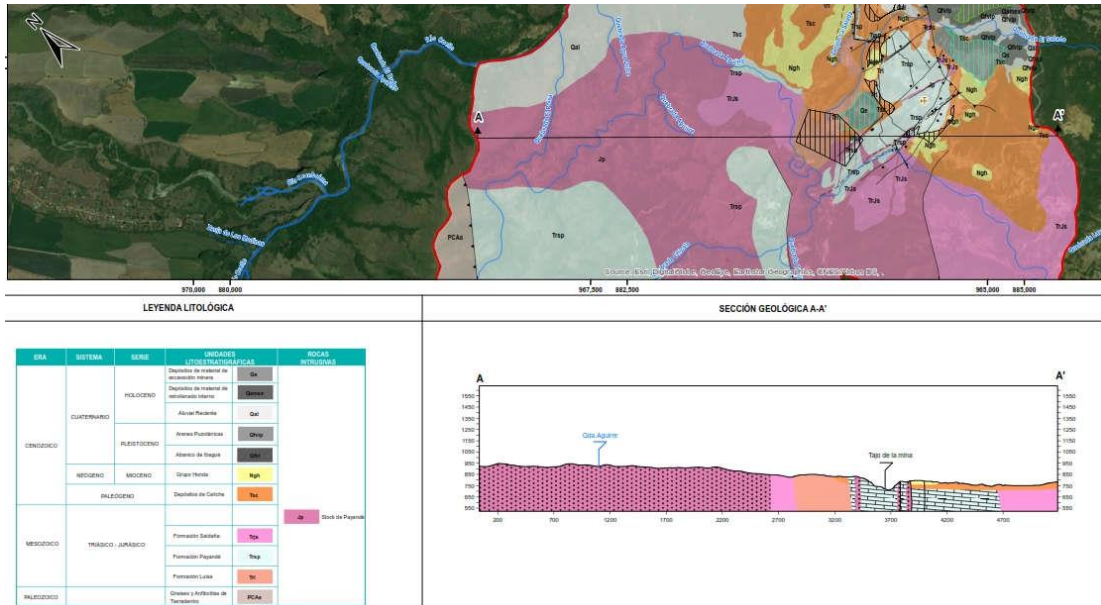


Figura 100. Sección geológica A-A' Área Evaluación Hidrogeológica Mina La Esmeralda
Fuente: WES, 2019

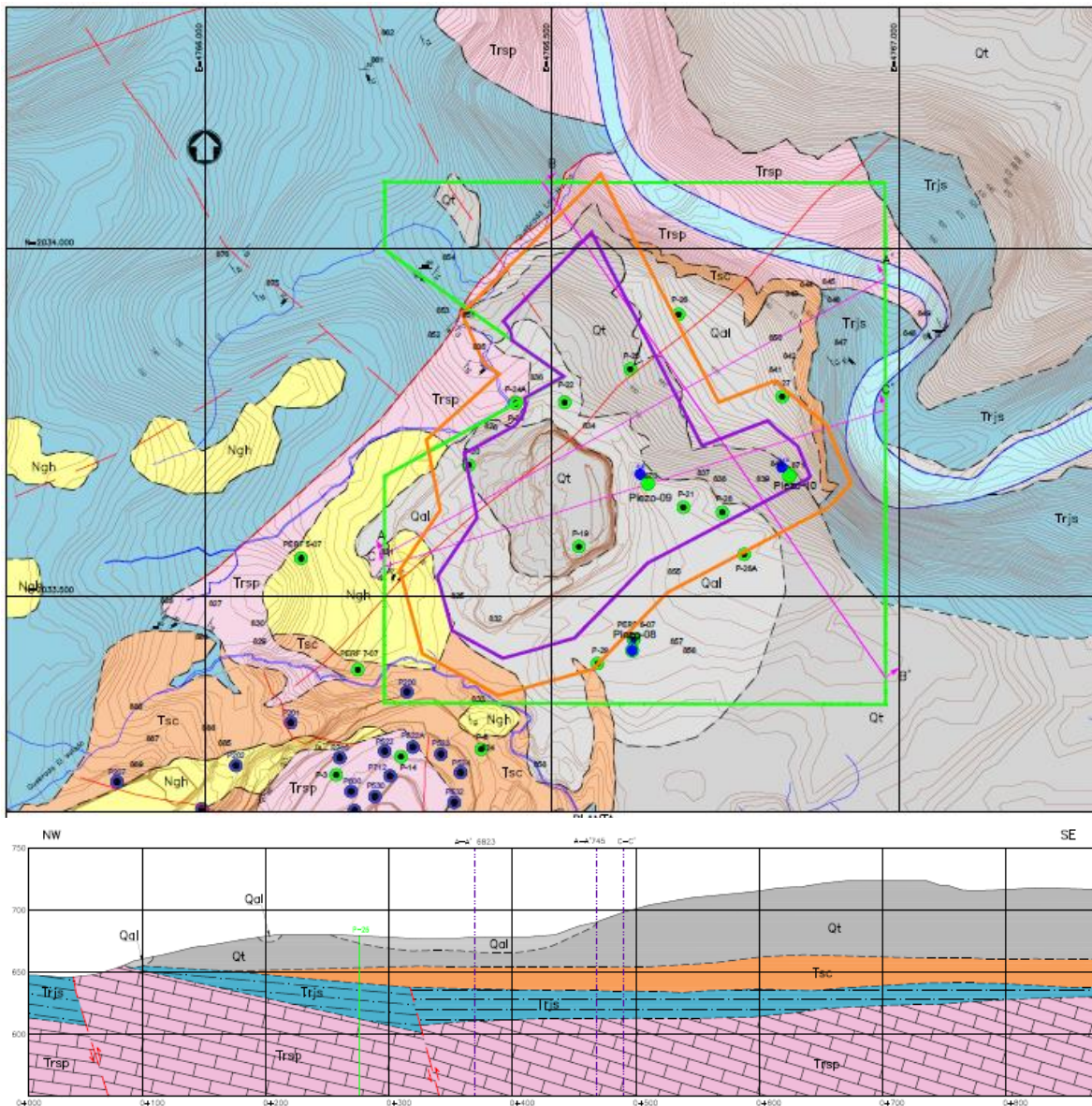


Figura 229. Geología en planta (arriba) y sección de análisis B-B' TM 745 Mina La Esmeralda. Se ilustra la distribución de las exploraciones directas e indirectas en el área de influencia

Fuente: Elaboración propia

5.1.7.2. Evaluación Hidráulica.

5.1.7.2.1. Condiciones litológico-estructurales relacionadas a la hidráulica.

En este numeral se incluye la caracterización y definición de las unidades hidrogeológicas, las cuales son determinadas a partir de la distribución litológica espacial y su probable capacidad para almacenar y transmitir agua. Para esta definición se tomaron como base los estudios previos realizados por la compañía GOTTA (2013 y 2018), WES (2029), en donde se identificaron seis unidades hidrogeológicas. En este documento se utilizó la clasificación adaptando la jerarquización

recomendada por la Asociación Internacional de Hidrogeología (Struckmeir, 1995), buscando clasificar las unidades hidrogeológicas básicamente como acuíferos, acuitardos o acuífugos. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-002, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.002.

5.1.7.2.1.1. Acuíferos discontinuos de extensión regional y local con moderada productividad.

El Abanico de Ibagué está conformado por gravas finas a medias, intercaladas con capas de arcillas y arenas con matriz arcillosa y los aluviales recientes lo conforman depósitos de lahares, glaciares, aluvio-torrenciales y flujos piroclásticos del río Coello; estos son materiales granulares poco consolidados. Lo anterior genera porosidades primarias y moderadas permeabilidades, a excepción de los estratos finos en los depósitos aluviales, donde dichas propiedades son bajas. En el caso de los depósitos aluviales, son poco espesos, lo que implica un flujo esencialmente intergranular con volúmenes de agua bajos.

A nivel regional, el Abanico de Ibagué presenta una alta importancia hidrogeológica debido a que conforma un acuífero de tipo libre a semiconfinado, continuo de extensión regional, con buena capacidad de producción y capacidad específica entre 1.0 y 2.0 L/s/m (Consortio Alvarado 2015, 2016), con porosidad primaria y conductividad hidráulica por el orden de 10 m/día. Sin embargo, en el área de estudio se observa que no tiene conexión con el acuífero regional.

El depósito aluvial presenta una baja importancia hidrogeológica debido a que su distribución es local y su extensión es limitada, puede presentar conductividades hidráulicas del orden de 10 m/d. Sin embargo, su baja extensión limita los recursos que pueda contener, ver Tabla 91. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-002, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.002.

5.1.7.2.1.2. Rocas Fisuradas o Sedimentos con Limitados Recursos de Agua Subterránea.

Dentro de esta categoría se enmarcan las demás unidades litológicas identificadas en el área de estudio.

- Acuíferos de carácter local y limitados recursos

En esta categoría se incluyen las unidades geológicas del Paleógeno al Triásico – Jurásico, las cuales se consideran que no ostentan importancia hidrogeológica, a pesar de que algunas poseen algún grado de fracturamiento. El contenido de agua en estas unidades está limitado a las zonas donde las fracturas se encuentran conectadas. Se observa que el nivel de agua es profundo.

La Formación Payandé y los diques andesíticos de la Formación Saldaña presentan características estructurales como intenso fracturamiento, que aumenta la permeabilidad secundaria relativa con respecto a la de las otras unidades hidrogeológicas; no obstante, estas zonas funcionan como zonas preferenciales de flujo de agua proveniente de otras unidades, mas no, de agua contenida en ellas mismas, ver Tabla 91. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-002, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.002.

La Formación Saldaña, corresponde a una unidad compuesta por andesitas porfídicas y el Stock de Payandé está compuesto por granodioritas, de origen ígneo. Se consideran unidades poco permeables (con porosidad y permeabilidad primaria despreciables), siendo entonces poco capaces de albergar agua. El fracturamiento observado dentro de las rocas que componen estas formaciones se explica por el carácter frágil (altamente silíceo) de ambas unidades litológicas (Formación Saldaña y Stock de Payandé). Esta característica estructural eventualmente podría aumentar su permeabilidad secundaria, sin embargo, estas estructuras poseen poca interconexión para albergar o transmitir flujos de agua imposibilitando además su acumulación en cantidades apreciables y potencialmente aprovechables, ver Tabla 91.

Finalmente, la Formación Luisa, compuesta por conglomerados y brechas arcósicas, lutitas y arcillolitas rojo-violáceas, altamente compactadas y cementadas, se considera que presenta una porosidad y permeabilidad primaria baja, sin potencial de almacenamiento de aguas subterráneas.

- Estratos sin capacidad acuífera productiva

Dentro de esta categoría se incluyen todas las unidades someras, las cuales se encuentran secas, dada la profundidad del nivel de agua en el sistema acuífero. La Formación Honda, es una unidad compuesta, en sus estratos más permeables, por areniscas y conglomerados, los cuales favorecen el flujo de agua subterránea a través de los poros dejados por los materiales; por otro lado, sus estratos más impermeables condicionan las características del flujo, es decir, la salida o entrapamiento del agua dentro de la unidad. A pesar de que en otras zonas del territorio nacional puede considerarse como un acuífero de moderada importancia, en el área de estudio no se identifica la presencia de agua, por lo que se clasifica como sin importancia hidrogeológica. Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-GLMA-002, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.002, ver Tabla 91 y Figura 100.

El Depósito de Caliche, es una roca sedimentaria química, exógena, con porosidad y permeabilidad primarias prácticamente nulas, por lo que se considera como un acuífugo. Posee un bajo fracturamiento, por lo tanto, una permeabilidad secundaria baja, ver Tabla 91 y Figura 100.

Tabla 91. Relación de unidades acuíferas en el área del título minero 6823

Sistema acuífero	Unidades litológicas	Litología	Estructura macro	Permeabilidad	K (m/d)	Importancia Hidrogeológica
Acuíferos con Flujo Principalmente Intergranular						
Acuíferos discontinuos de extensión local con moderada productividad	Abanico de Ibagué (Qai)	Cantos de rocas extrusivas e intrusivas en matriz arenosa y areno-tobácea. Depósitos de lahares, aluviales, glaciares, aluvio-torrenciales y flujos piroclásticos.	Material no consolidado	Media	>1	Baja
	Aluvión Reciente (Qal)	Está integrado por gravas finas a medias, intercaladas con capas de arcillas y arenas con matriz arcillosa.	Material no consolidado	Media	>100	Baja
Rocas fisuradas o sedimentos con limitados recursos de aguas subterráneas						
Acuíferos locales con limitados recursos	Formación Saldaña - TrJs	Tobas, aglomerados y lavas con intercalaciones de areniscas, limolitas y calizas. Pórfidos andesíticos y dacíticos.	Estratificación	Baja	<0,1	Muy baja

Sistema acuífero	Unidades litológicas	Litología	Estructura macro	Permeabilidad	K (m/d)	Importancia Hidrogeológica
	Stock de Payandé - Jp	Cuarzodioritas, granodioritas.	Dique	Baja	<0,1	Muy baja
	Formación Payandé - Trsp	Calizas oscuras y grises, en bancos potentes. Ocasionalmente intercaladas con limolitas negras	Estratificación	Baja	<0,1	Muy baja
	Formación Luisa - Trl	Conglomerados y brechas arcósicas, lutitas y arcillolitas rojo-violáceas.	Estratificación	Baja	<0,1	Muy baja
Estratos sin capacidad acuífera productiva	Depósitos de escombros (Qe)	Gravas y bloques de caliche, caliza, diques granodioríticos y andesíticos. Matriz a clasto soportados. Matriz areno arcillosa.	Material antrópico	Alta	>10	Muy baja
	Depósitos de material de retrolenado interno (Qamex)	Depósitos de material de retrolenado interno.	Material antrópico	Alta	>10	Muy baja
	Grupo Honda (Ngh)	Areniscas, arcillolitas y niveles conglomeráticos de color gris verdoso, a ocasionalmente de coloración rojiza.	Material no consolidado	Media	>0,1	Muy baja
	Depósitos de Caliche - Tsc	Bloques de caliza, granodiorita, andesita, areniscas en cemento calcáreo.	Estratificación	Baja	<0,1	Muy baja

Fuente: Wes, 2019.

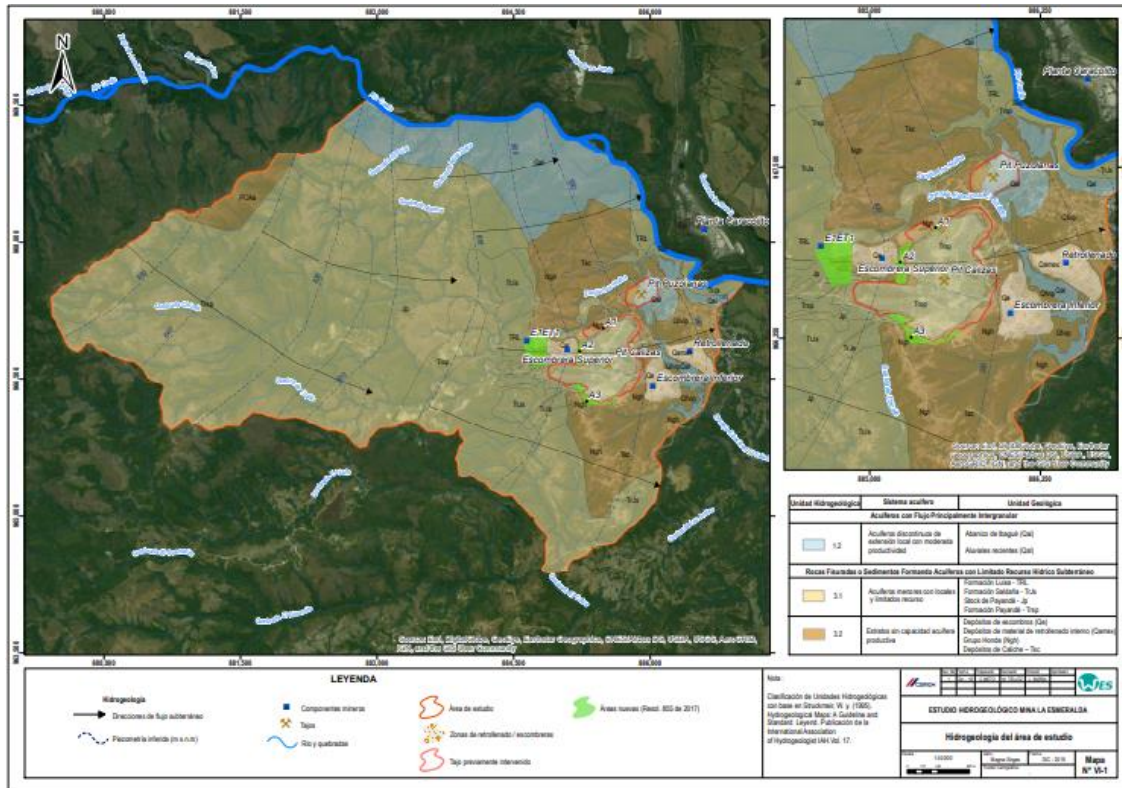


Figura 101. Mapa de distribución de las unidades hidrogeológicas en el área de la mina La Esmeralda Fuente: Wes, 2019.

5.1.7.2.2. Geometría del sistema acuifero.

El sistema hidrogeológico del área de estudio corresponde a un sistema profundo regional, limitado por los ríos Coello y Luisa, ubicados en la parte alta de la cuenca del Magdalena (cuenca Alto Magdalena), (ver Figura 101). Siendo estos ríos permanentes durante todo el año y los principales colectores del área, se tiene certeza de que presenta caudal base alimentado por el sistema acuifero. Aunque bien es cierto que en esta zona existen sistemas acuíferos más someros, como el caso del abanico de Ibagué, que abastecen a la población mediante pozos o aljibes (Consortio Alvarado 2015, 2016), el sistema encontrado en el área de estudio delimitada no tiene relación con este. Siendo así, el sistema acuifero ocupa una extensión de 2 835 km².

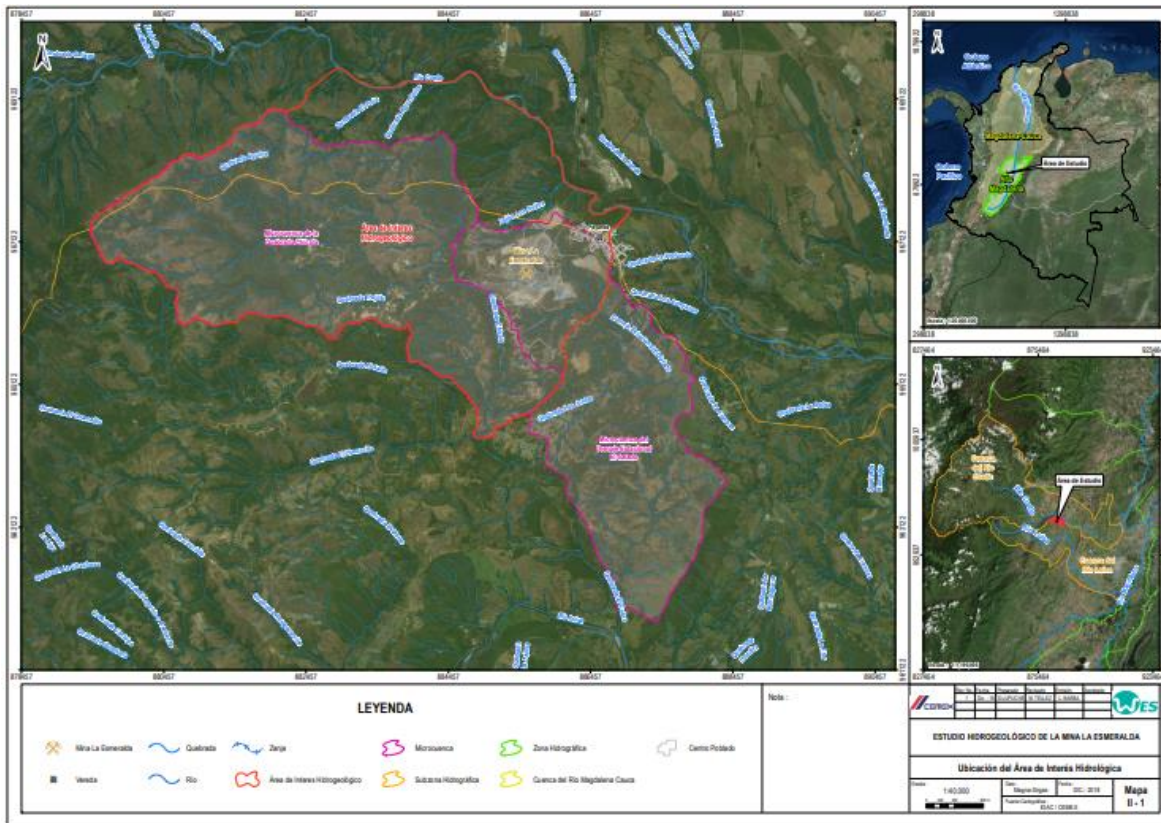


Figura 102. Mapa de interés hidrológico del área de estudio mina La Esmeralda.
Fuente: Wes, 2019.

La superficie del terreno del título minero limita al noreste, por el trazo del río Coello y al sur, oeste y norte por divisorias de agua superficial, que cubre 21,3 Km2 de superficie y abarca total y parcialmente a las microcuencas de las quebradas Chicala y el drenaje estacional El Salado respectivamente, corresponden a un volumen de control.

En cuanto a los límites verticales del sistema acuífero, abarca desde la superficie piezométrica, alcanzando el espesor de cada formación hasta llegar al basamento hidrogeológico.

La geometría puntual de las unidades hidrogeológicas a nivel del modelo de superficie y del subsuelo, se muestran a continuación:

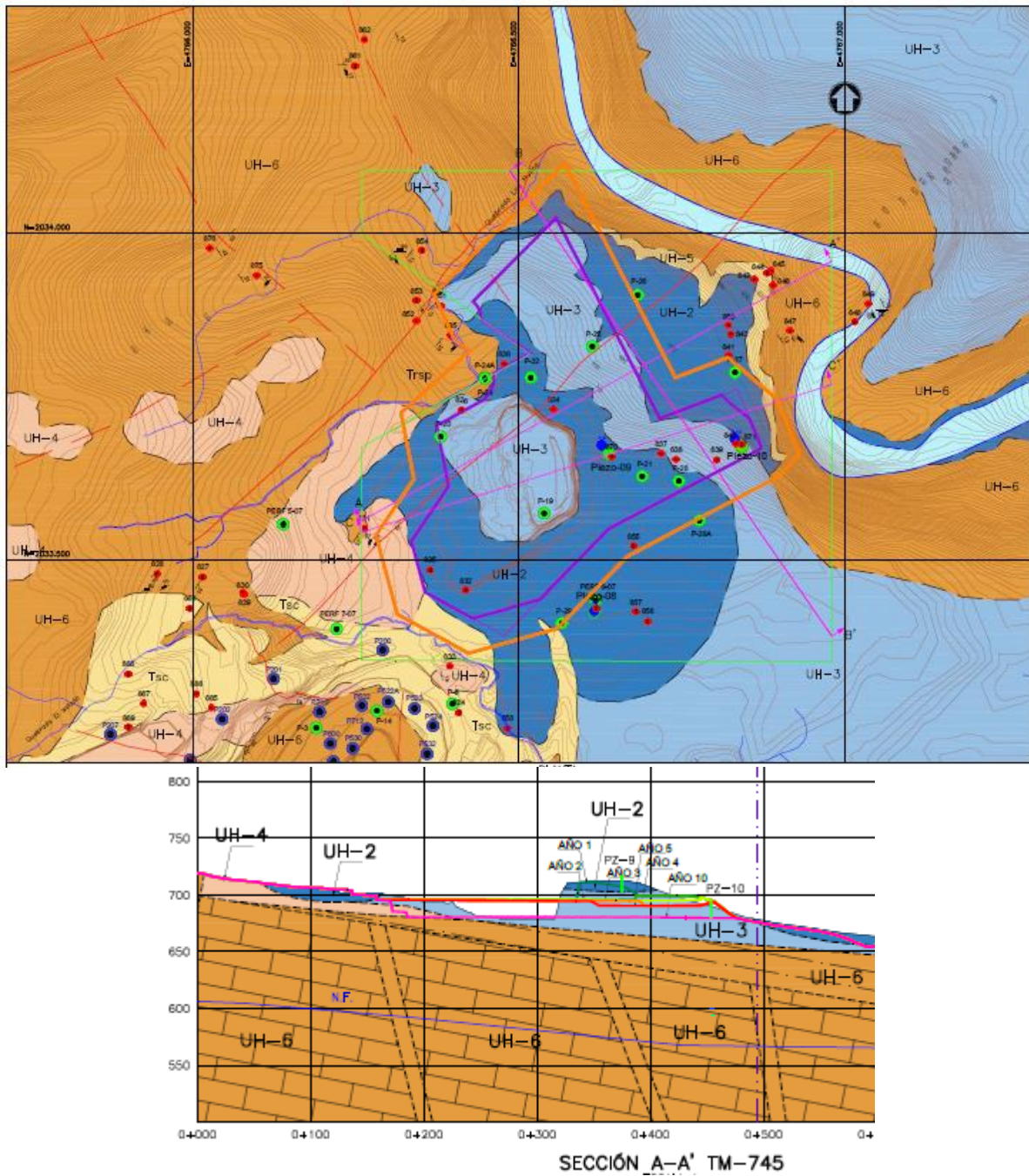


Figura 230. Unidades hidrogeológicas locales a nivel de superficie y del subsuelo, se ilustra la secuencia de avance proyectada para el título minero 745
Fuente: Elaboración propia

5.1.7.2.3. Superficie piezométrica.

A partir del análisis de la información recopilada del sistema acuífero se realizó una interpretación del trazado de la superficie piezométrica para el área de estudio, Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.024 al Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.029. Es necesario entender que al tratarse de un sistema acuífero único se considera también un nivel piezométrico único, compartido por todas las unidades que componen este sistema.

Como se presentó en el numeral 5.1.7, CEMEX construyó en el área, hasta la fecha, 6 piezómetros con los que pretendía monitorear el nivel freático en el acuífero cuaternario; durante la perforación se detectaron humedades que hicieron suponer que ya se habría alcanzado este nivel. Con el paso del tiempo (cerca de un año desde que fueron construidos los piezómetros) algunos de ellos se secaron (P7, P8, P9 y P10), es decir, que el nivel registrado durante la perforación se debía únicamente a humedad producida por lluvias, pero no correspondía al nivel en el acuífero, encontrándose este por debajo de la profundidad de perforación. Por otro lado, el piezómetro P1, que registraría el nivel de la Formación Luisa (TRL) y P3, que definiría el nivel en el Depósito de Caliche (Tsc), presentan fluctuaciones rápidas en el nivel registrado frente a las precipitaciones, lo que lleva a interpretar que esa agua proviene de las filtraciones de lluvia directa mas no la interceptación de un acuífero.

Para trazar entonces la superficie piezométrica del área de estudio, se parte de la base de que el nivel freático/piezométrico está controlado por la cota del río Coello y del río Luisa, los cuales son los principales colectores del área y tendrían conexión con el acuífero, es decir, que durante las épocas de baja precipitación el acuífero aporta caudal a estos ríos, conservando su caudal base. De acuerdo con los análisis hidroquímicos y el recorrido de campo realizado, se conoce que en el sumidero del pit aún no se alcanza el nivel freático, ya que evidencian que el agua del sumidero corresponde a agua superficial proveniente de escorrentía y una mínima parte de la quebrada Chicalá; actualmente la cota mínima del pit es la 620 m s.n.m.

Con esta información se hizo el trazado de la piezometría. Se observa que las líneas piezométricas están trazadas aproximadamente de norte a sur, es decir, que la dirección de flujo es aproximadamente este-oeste (Figura 102). El río Coello, como principal colector de aguas subterráneas de la zona recibe la descarga del acuífero de manera oblicua, es decir, que la descarga no es de manera perpendicular sino que tiene un ángulo más abierto.

Los niveles de agua en el área de estudio tienen profundidades entre 0 m (en el río Coello, donde aflora) y 817 m aproximadamente (al oeste del área, la cual es la zona de mayor altitud). En el área del tajo actual las profundidades se encontrarían entre los 52 y los 60 m, es decir, entre las cotas 590 y 600 m s.n.m.

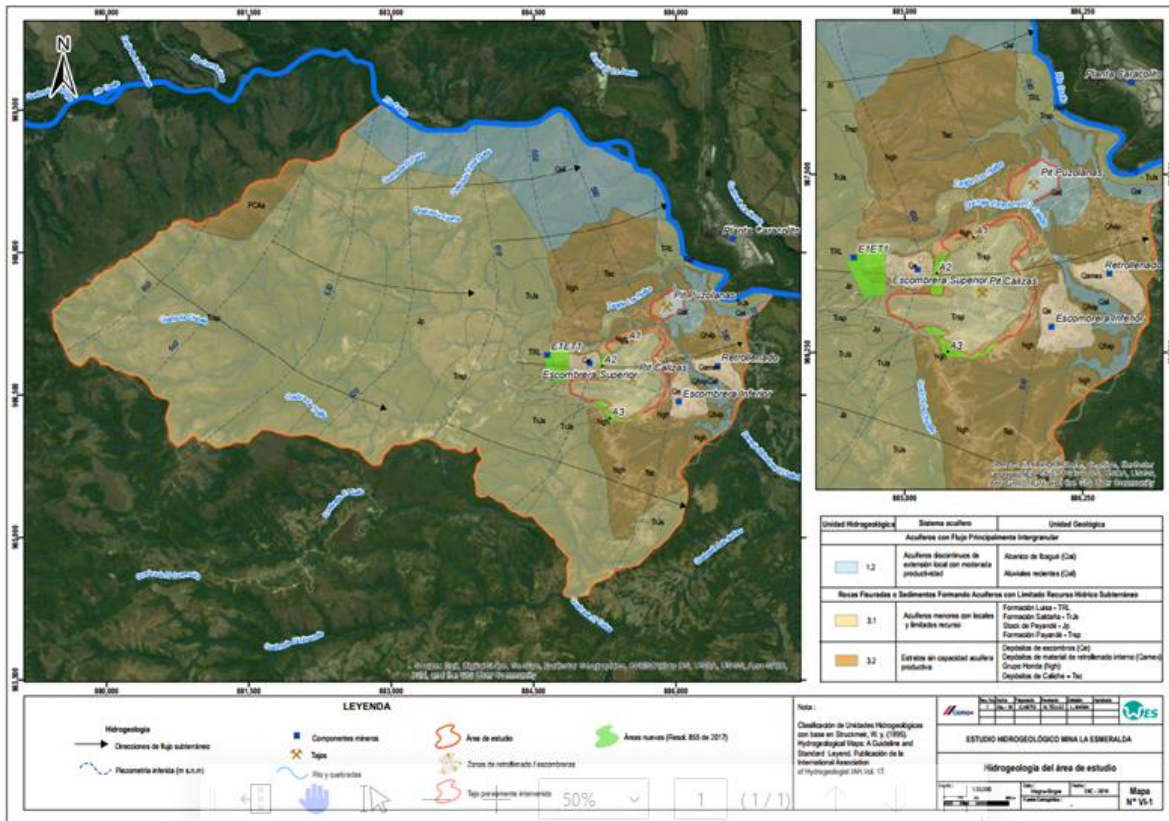


Figura 103. Mapa hidrogeológico del área de estudio mina La Esmeralda.
Fuente: Wes, 2019.

5.1.7.2.4. Balance del acuífero.

El balance se fundamenta en la aplicación del principio de la conservación de la masa, también conocido como ecuación de continuidad.

Esta establece que, para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período de tiempo, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada.

$$\Sigma Entradas - \Sigma Salidas = \Delta S$$

El desarrollo del balance hídrico para el área de estudio considera un sistema en equilibrio, entendiéndose por ello que la variación en el almacenamiento del acuífero para cada ciclo hidrológico sea despreciable. Este precepto tiene una base conceptual en los efectos de la extracción en el balance de los recursos subterráneos, lo cual afirma que en condiciones naturales a largo plazo el sistema acuífero permite que las entradas sean iguales a las salidas según la ecuación de continuidad, esto adquiere soporte al no considerar que exista, de acuerdo con el inventario, extracción subterránea en el área ni filtraciones producto de, por ejemplo, campos de riego de grandes extensiones.

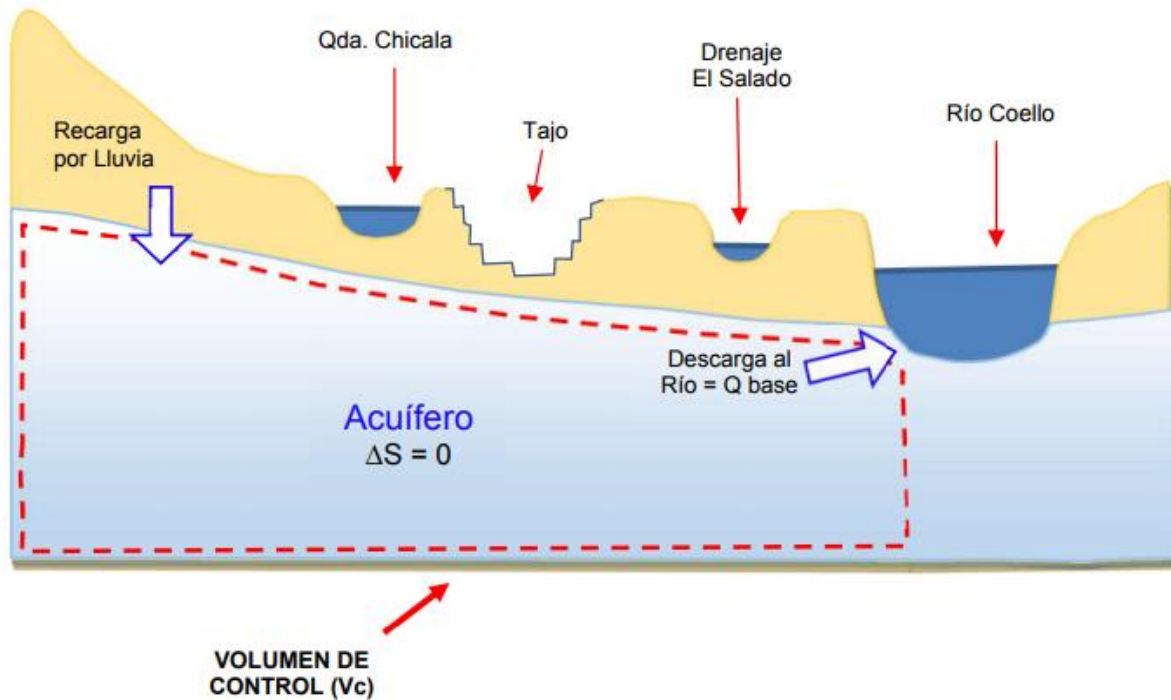


Figura 104. Esquema conceptual del balance hídrico en el área de estudio mina La Esmeralda.

Fuente: Wes, 2019.

El volumen de control está determinado por la Microcuenca Chicalá y la parte alta de la Microcuenca El Salado, definidas a partir de la proyección de la cuenca superficial, con un área de 21,3 km² y por los niveles de agua determinados por la superficie piezométrica y el basamento rocoso (Figura 103).

Como se estableció párrafos arriba, para el volumen de control se establece que el acuífero se encuentra en equilibrio, por lo que se obtiene la siguiente igualdad definiendo las variables de recarga por lluvia y caudal base:

$$\text{Recarga de Lluvia} = \text{Descarga al Río (Caudal Base)}$$

5.1.7.2.4.1. Recarga por Infiltración de Agua de Lluvia.

Dentro de los términos naturales que interactúan en el sistema ya establecido, se define la recarga potencial al acuífero como el proceso natural por el cual se produce el ingreso de agua al acuífero teniendo como única fuente la precipitación.

De acuerdo con la metodología propuesta de Losilla & Schosinsky (2000) aplicado al sistema de información geográfica la recarga de agua subterránea varía de un sitio a otro y de una época a otra, debido a las condiciones en las que el flujo ingresa al sistema. El agua de lluvia que ocurre después de que se satisface la diferencia de humedad del suelo, es la que recarga al almacén de aguas subterráneas.

Para obtener la recarga al acuífero en el área de estudio se ha optado por realizar un balance hídrico de suelos (BHS) aplicando herramientas del Sistema de Información Geográfica (SIG).

Esto implica contar con un balance promedio anual de entradas y pérdidas de las variables climáticas, es decir, la lluvia promedio anual y la evapotranspiración real promedio anual, además de los parámetros de propiedades del suelo.

La Figura 104 ilustra el diagrama de flujo de procesos con el cual se lleva a cabo el cálculo de recarga (IRp).

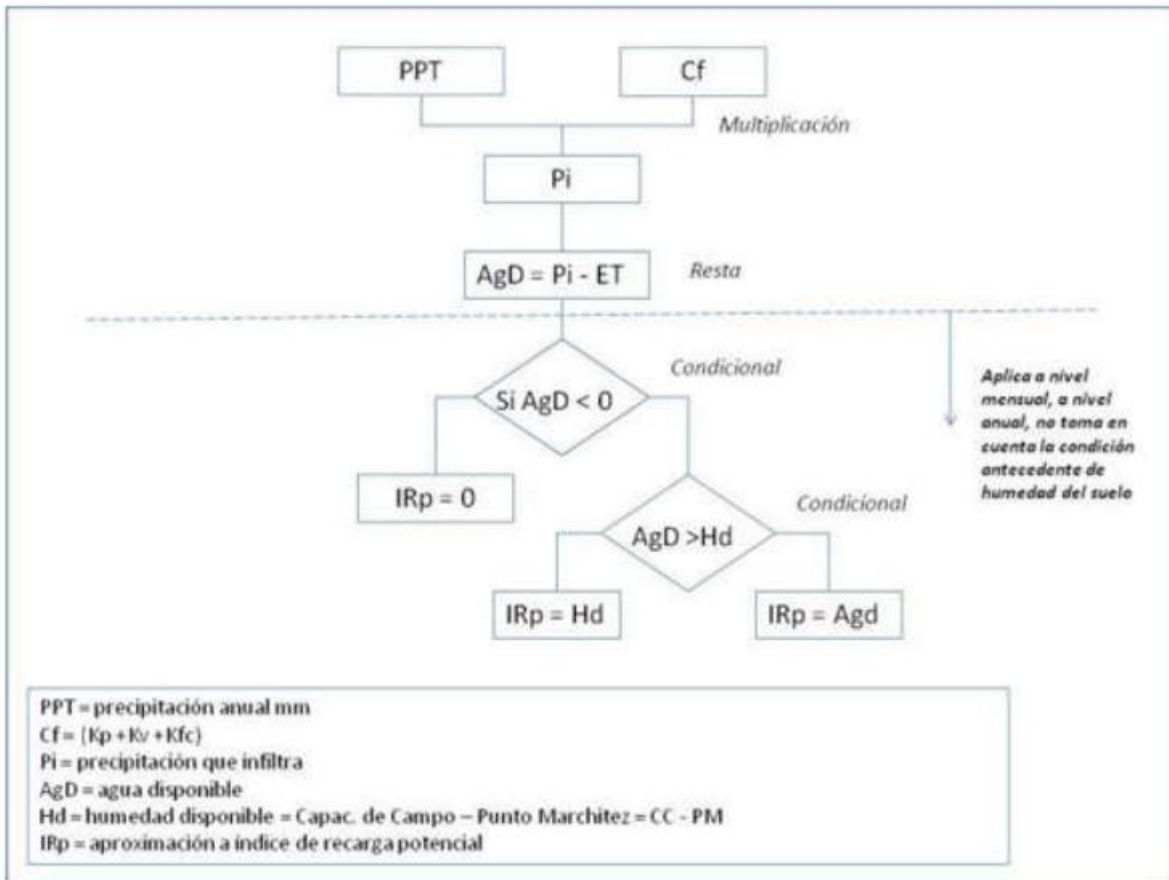


Figura 105. Esquema para el cálculo de recarga.

Fuente: (Losilla & Schosinsky, 2000). Tomado de Wes, 2019.

A continuación, se presentan las variables que influyen en el balance de suelo y los resultados de la recarga:

La información básica requerida para estimar la recarga en una superficie de terreno ha venido mejorando, gracias a que en la actualidad se cuenta con información digital que permite una mejor modelación espacial del territorio.

Para este estudio se cuenta con:

- Modelo de elevación digital del terreno de 12,5 m de píxel, ASTER para toda el área.
- Mapa de series de suelos.
- Mapa de uso-cobertura de la tierra.
- Datos climáticos: Lluvia y Evapotranspiración Real.

Toda esta información se presenta en capas o layers, en archivos tipo RASTER, los cuales permiten la interacción entre los mismos.

- Coeficiente de infiltración (C)

El "Manual de Instrucciones de Estudios Hidrológicos" realizado por las Naciones Unidas, propone la siguiente ecuación para el análisis del coeficiente de infiltración aparente, que corresponde a la fracción de lluvia que aparentemente se infiltra:

$$C = K_p + K_v + K_{fc}$$

Donde:

- C = Coeficiente de Infiltración.
- K_p = Fracción que infiltra por efecto de la pendiente.
- K_v = Fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal.
- K_{fc} = Fracción que infiltra por textura de suelo.

La Tabla 92 muestra los valores que componen el coeficiente de infiltración sugeridos en el Manual de Estudios Hidrológicos (ONU, 1972).

Tabla 92. Componentes del Coeficiente de Infiltración.

Por textura de suelo		K _{fc}
Arcilla compacta impermeable		0,1
Combinación de limo y arcilla		0,2
Suelo limo arenoso no muy compacto		0,4
Por pendiente		K _p
Plana	0,02%-0,06%	0,3
Moderada	0,3%-0,4%	0,2
Colinas	3% -4%	0,1
Por cobertura vegetal		K _v
Terrenos cultivados		0,1
Bosques		0,2

Fuente: (ONU, 1972). Tomado de Wes, 2019.

En la Figura 105 se muestra la distribución espacial de cada uno de los componentes para el cálculo del coeficiente de infiltración.

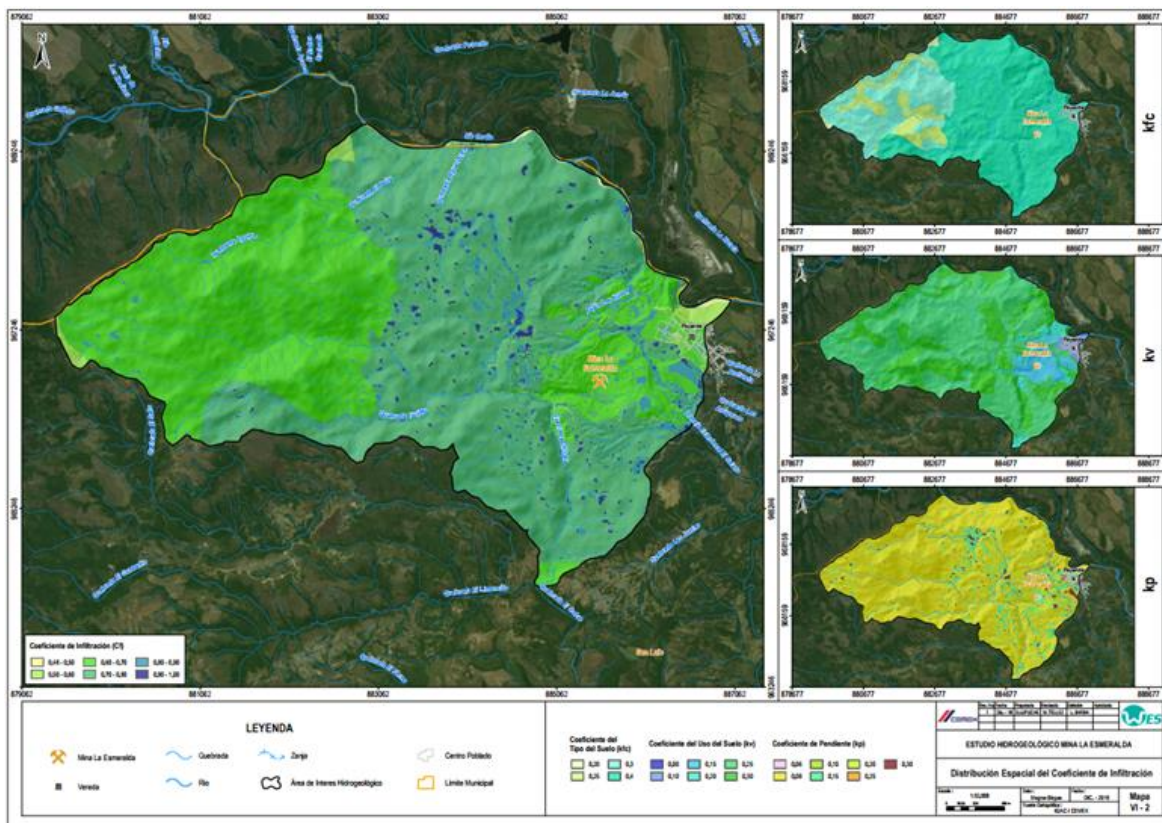


Figura 106. Distribución Espacial del Coeficiente de Infiltración, del área de estudio mina La Esmeralda.
Fuente: Wes, 2019.

5.1.7.2.4.2. Precipitación que Infiltra (P_i).

Es el proceso por el cual el agua en la superficie de la tierra entra en el suelo representando un porcentaje de la lluvia.

La tasa máxima a la que el agua puede entrar en un suelo se conoce como capacidad de infiltración. Si la llegada del agua a la superficie del suelo es menor que la capacidad de infiltración, toda el agua se infiltrará. Si la intensidad de precipitación en la superficie del suelo ocurre a una tasa que excede la capacidad de infiltración, el agua comienza a estancarse y se produce la escorrentía sobre la superficie de la tierra. Para determinar la precipitación que infiltra se usa la siguiente relación:

$$P_i = P \cdot C$$

Donde, P es la precipitación y C el coeficiente de infiltración.

La Figura 106 evidencia diferentes zonas de infiltración en el área de estudio. Para cuantificar la precipitación que infiltra solo basta utilizar el mapa "grid" de precipitación que infiltra y obtener el promedio para el área de estudio; la precipitación que infiltra en el área de estudio es de 1 216,39 mm/año que representa el 70,9% de la precipitación.

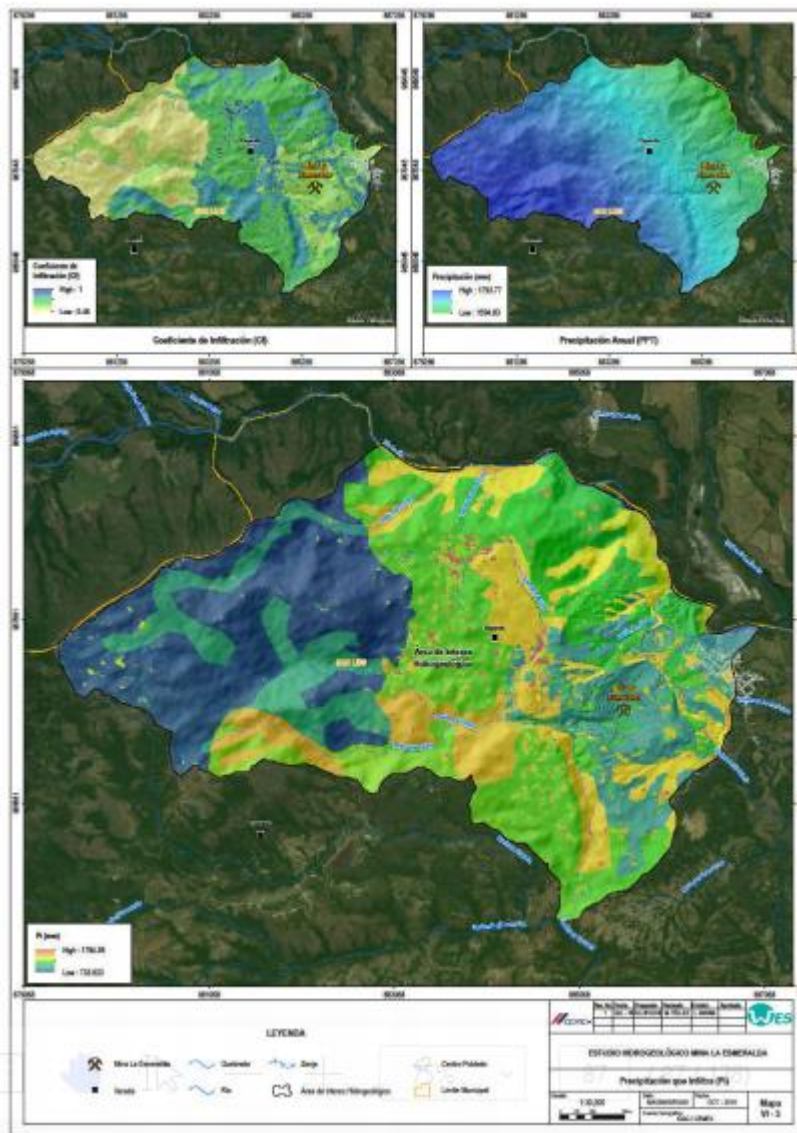


Figura 107. Distribución Espacial de la precipitación que infiltra (Pi), del área de estudio mina La Esmeralda.
Fuente: Wes, 2019.

5.1.7.2.4.3. Agua Disponible (AgD).

Para obtener el agua disponible en el área de estudio se requiere restar de la precipitación que infiltra el valor de la evapotranspiración real.

$$AgD = Pi - ETR$$

La evapotranspiración en una zona de cultivo se define como la transpiración de la planta, cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo, más la evaporación del suelo. La mayor capacidad de evapotranspiración de un cultivo es cuando el suelo se encuentra a capacidad de campo. Sin embargo, cuando la humedad del suelo es menor que la capacidad de

campo, las hojas de las plantas van cerrando las estomas, con el propósito de transpirar menos y así economizar el agua. Cuando la humedad del suelo llega al punto de marchitez permanente, la planta no transpira y muere.

La evapotranspiración real se toma a través del método de Turc. Esta metodología permite calcular la evapotranspiración real (ETR) de forma sencilla, está basada en un balance de masas, en función de elementos meteorológicos simples como la temperatura y la precipitación de la cuenca:

$$ETR = \begin{cases} \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} \text{ si } \frac{P}{L} > 0,316 \\ P \text{ si } \frac{P}{L} \leq 0,316 \end{cases}$$

$$L = 300 + 25T + 0,05T^3$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración Real (mm/año) T= Temperatura media anual (°C).

L= Función que depende de la temperatura

En la Figura 107 se presenta la distribución espacial de la ETP.

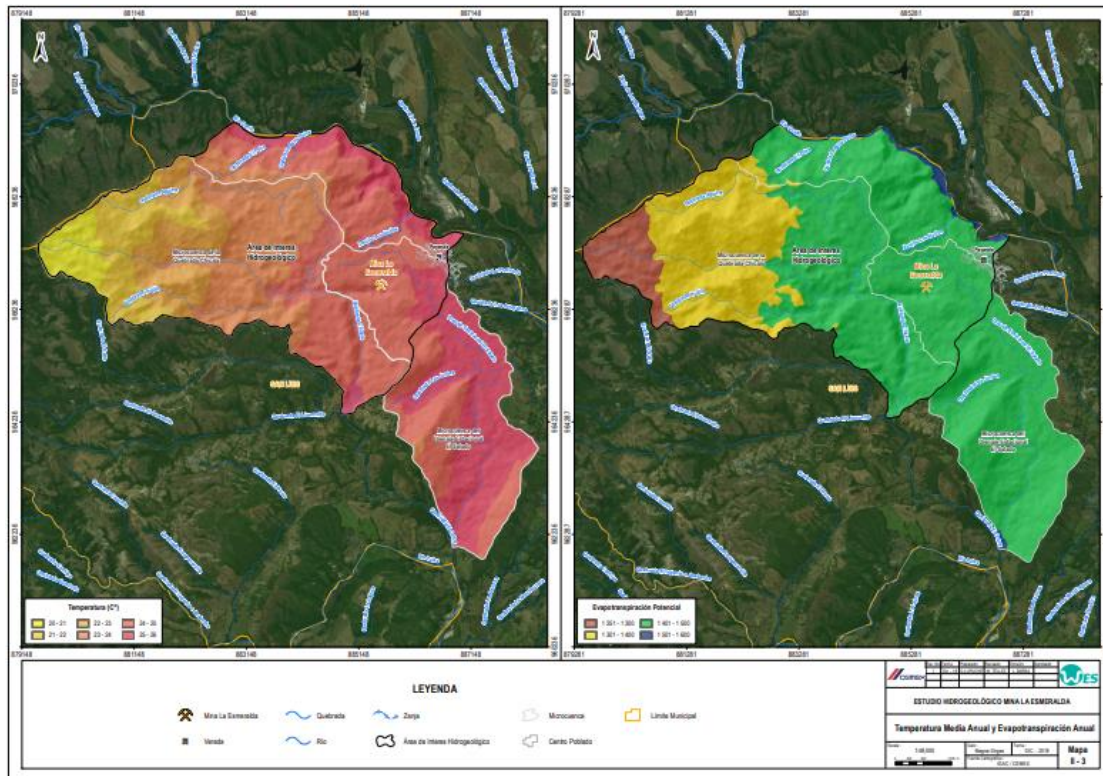


Figura 108. Distribución Espacial de la temperatura media anual y la evapotranspiración potencial del área de estudio mina La Esmeralda.

Fuente: Wes, 2019.

Luego de tener calculada la ETR se sustrae de la Pi y de esta manera se calcula el agua disponible. La Figura 108 muestra la distribución espacial del Agua Disponible AgD en el área de evaluación.

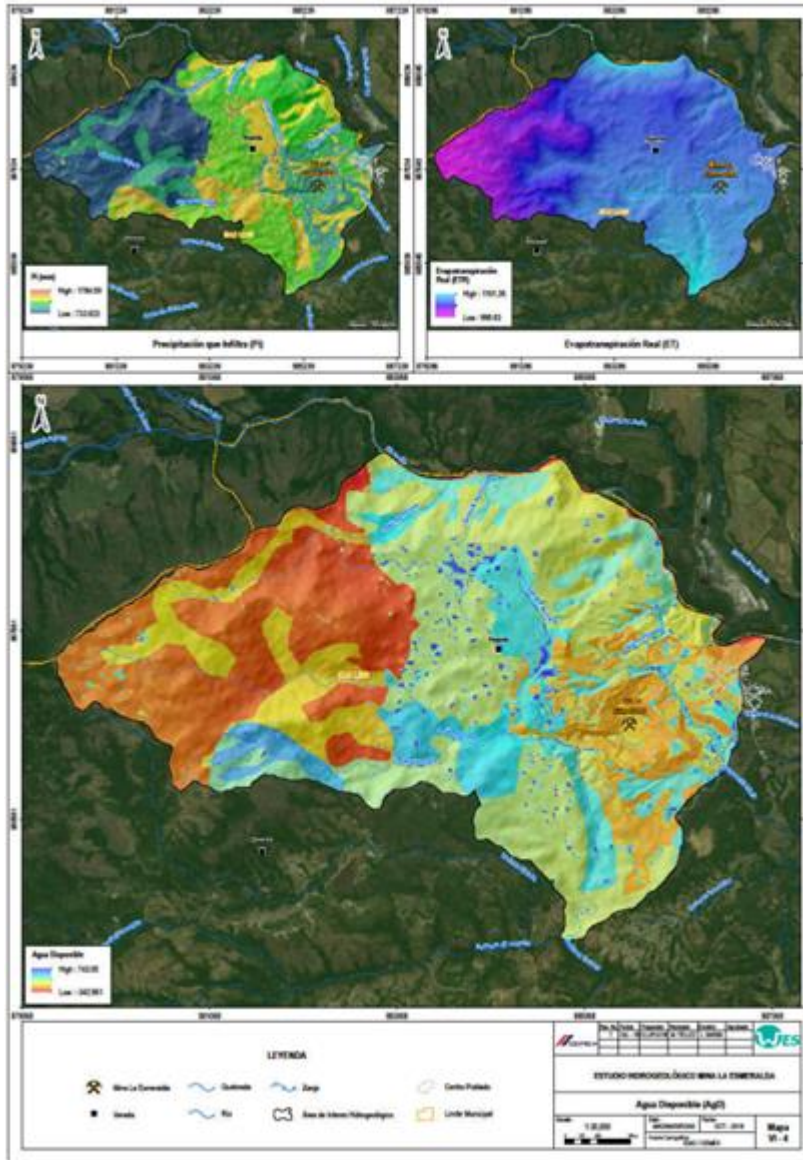


Figura 109. Distribución Espacial del agua disponible en el área de estudio mina La Esmeralda.
Fuente: Wes, 2019.

5.1.7.2.4.4. Humedad Disponible (Hd).

Es necesario conocer, además, la capacidad de campo y punto de marchitez del suelo. Estos valores, se obtienen directamente del laboratorio de suelos o se estiman mediante la Tabla 93. También es necesario conocer la profundidad aproximada de las raíces extractoras de agua, en la zona donde se ha de realizar el balance.

La forma natural de extracción de agua del suelo es mediante la transpiración de las plantas. Dicha extracción se realiza mediante las raíces; por lo tanto, la extracción de agua se realizará en una franja de suelo. La máxima humedad que puede tener un suelo que no se encuentre saturado, es igual a la capacidad de campo, es entonces cuando la planta tiene la máxima capacidad de transpiración. La mínima humedad que puede tener un suelo es aproximadamente igual al punto de marchitez, pues con humedades menores la planta muere. De lo anterior se deduce que un suelo, no saturado, a profundidades mayores que la profundidad de raíces se encuentra a capacidad de campo. En la Figura 109 se muestra la distribución espacial de la Humedad disponible en el área de evaluación.

Tabla 93. Aproximación de propiedades físicas del suelo.

Textura	Profundidad (mm)	Capacidad de Campo CC (mm)	Punto de Marchitez PM (mm)
Arcillosos	1 000	437,5	212,5
Limo/arcillas	800	343,2	166,4
Arcillo/arenoso	750	302,3	146,3
Franco arcilloso	500	182,3	87,8
Franco	400	123,2	56
Franco arenosos	300	63	27
Arenosos	200	29,7	13,2
Gravas	100	10,5	3,5

Fuente: Losilla M, 2013. Evaluación y zonificación hidrogeológica del cantón de Garabito, en edición final.
Tomado de Wes, 2019.

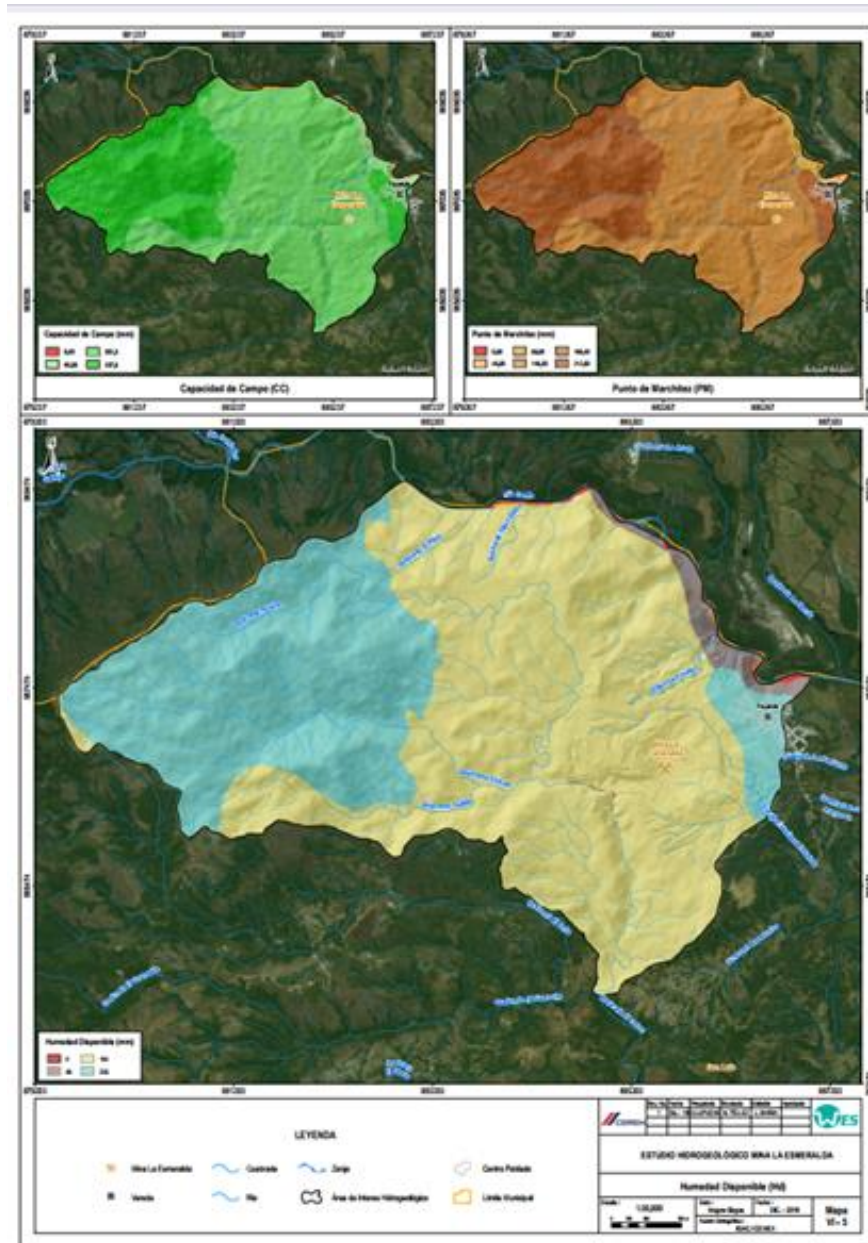


Figura 110. Distribución Espacial de la humedad disponible (Hd) en el área de estudio mina La Esmeralda. Fuente: Wes, 2019.

5.1.7.2.4.5. Recarga al Acuífero (IRp).

La recarga al acuífero se llevará a cabo, sólo si la cantidad de agua que infiltra es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y además satisfacer la evapotranspiración de las plantas; el agua sobrante es el volumen de agua que recarga al acuífero.

La Figura 110 muestra la recarga en mm calculada a través del balance de suelo para el periodo anual, utilizando el esquema de la Figura 105. De acuerdo con ese esquema, de existir zonas donde el Agua Disponible es menor que 0 (es decir, negativa) la recarga es igual a 0. En la Figura 110 se observa que la recarga en el área tiene valores entre 0 mm/año a 225 mm/año, donde las zonas de mayor recarga se concentran en el centro y noroeste del área de estudio. El valor total de la recarga es de 176,38 mm/año que equivale a 0,12 m³/s lo cual representa el 10,3% de la precipitación (1,16 m³/s).

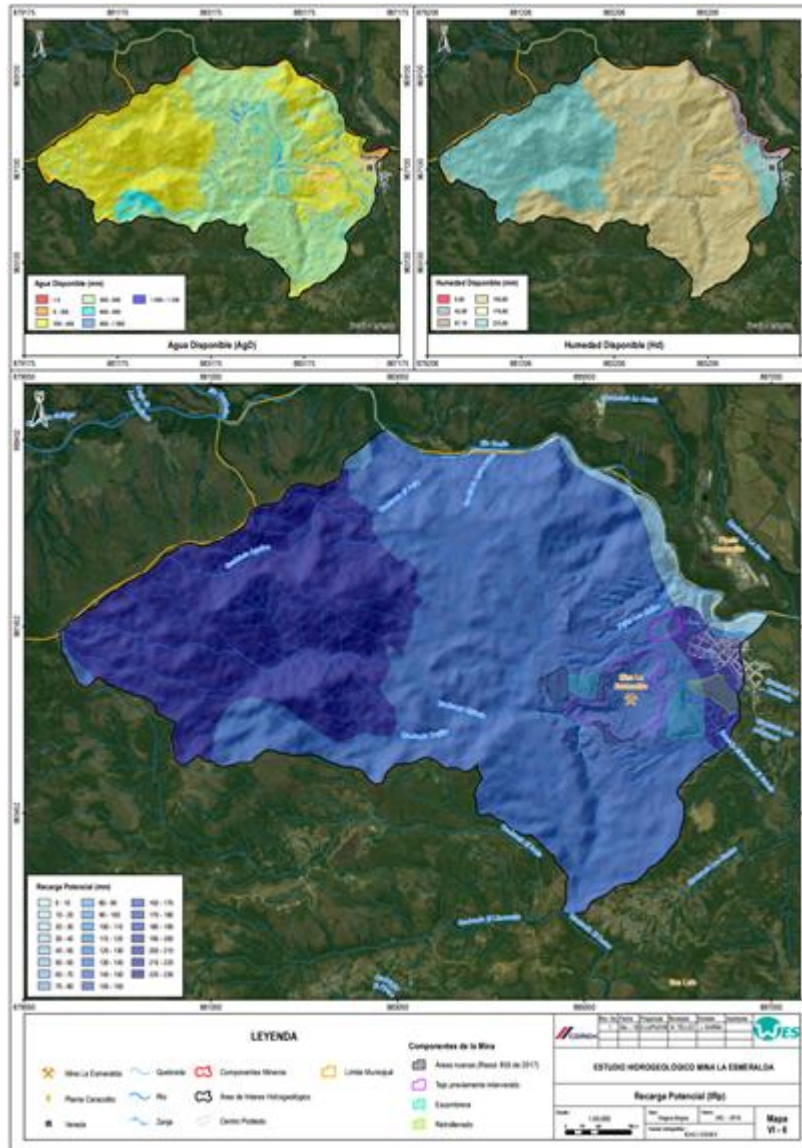


Figura 111. Distribución Espacial de la Recarga por Infiltración de Agua de Lluvia en el área de estudio mina La Esmeralda.

Fuente: Wes, 2019.

Los resultados del modelo conceptual muestran que el sistema se conforma por rocas de poca permeabilidad, de baja importancia hidrogeológica (Ngh, TRL, Tsc, TrJs, Jp y Trsp). Las unidades hidrogeológicas identificadas como acuíferos libres, corresponden a los sedimentos aluviales recientes y al abanico de Ibagué que para el área de influencia se asocia a los depósitos de terrazas (Qt), ubicados al NE de la mina La Esmeralda; ambos se consideran sistemas locales, de extensión

limitada y presenta baja importancia hidrogeológica de acuerdo con los parámetros hidráulicos y sus características litológicas.

La recarga en el área de estudio ocurre de manera local y por fuera del área de intervención del título minero 6823, donde dadas las condiciones favorables de pendiente, cobertura vegetal y tipo de suelo, el agua proveniente de la precipitación logra atravesar la zona vadosa y alcanza los niveles a una tasa de 176,38 mm/año (0,12 m³/s). Adicionalmente, el balance hídrico realizado para el zanjón Los Huilos, determina que la capacidad de almacenamiento máximo es de 158,3 mm, la infiltración potencial estimada es de 48,18 mm de la precipitación total anual promedio de 1617,3 mm que equivale al 2,98% de la precipitación total anual.

La infiltración potencial en las subcuencas en estudio, varía entre 2,98% y 4,86% de la precipitación total anual que cae sobre estas subcuencas. En los drenajes directos al río Coello (zanjón Los Huilos y drenajes NN1 y NN2) este porcentaje varía entre 2,98% y 4,31% equivalentes a 48,18 mm y 68,89 mm al año. Teniendo en cuenta, el área de modelación numérica y los resultados del balance hídrico para el área de influencia del título minero, guardan una proporción similar, en el sentido de que para las áreas de drenaje de los drenajes aferentes al río Coello se estima una infiltración del orden de 3% que es baja y concuerda con el modelo hidrogeológico donde se determinó que para la zona este donde se encuentran los drenajes NN1 y NN2 la recarga al acuífero es 0.

5.1.7.2.4.6. Volúmenes de Agua Involucrados en el Tajo La Esmeralda.

De considerar al tajo como almacén o recipiente cerrado en el que entran y salen distintos volúmenes de agua, es preciso reconocer distintas variables en el ámbito del tajo.

A continuación, se detallan los cálculos de los factores que se consideran como entrada (precipitación, escorrentía y escorrentía subsuperficial) y dos de salida (evaporación y bombeo), involucrados de manera evidente en la dinámica del tajo en términos hídricos, Tabla 94.

Tabla 94. Variables Contempladas en el Balance del Tajo.

Variable	Sigla (unidad)	Cantidad	Tipología
Datos Generales:			
Área total de la cuenca del tajo	At (m ²)	852 031,25	
Área de lámina libre de la laguna formada en el fondo del tajo (pit lake). Se toma como referencia el Google Earth con imagen del 2014 aproximándose a lo expuesto por la imagen satelital.			
Área sin laguna	Ad (m ²)	839 218,75	
Precipitación total en el área de la cuenca del tajo	PP (L/s)	45,33	
En el área sin laguna calculado con el balance del suelo			
Precipitación	Pa (mm/año)	1 678,2	
	(L/s)	44,65	
Evapotranspiración	ETR (mm/año)	814,1	

Variable	Sigla (unidad)	Cantidad	Tipología
	(L/s)	21,6	
Precipitación de Infiltración	Pi (mm/año)	1 143,7	
	(L/s)	30,43	
Recarga	REC (mm/año)	176,38	
	(L/s)	4,8	
Escorrentía: $PP - Pi = 44,65 - 30,43$ L/s	ESC (L/s)	14,22	Entrada
Agua disponible: $Pi - ETR = 30,43 - 21,6$	AgD (L/s)	8,83	
Escorrentía subsuperficial:	ESCsub (L/s)	4,63	Entrada
$AgD = ESCsub + REC$			
$ESsub = AgD - REC = 8,83 - 4,2$			
En el área de la laguna (pit lake):			
Precipitación directa: $Pb = PP - Pa = 45,33 - 44,65$	Pb (L/s)	0,68	Entrada
Evaporación de lámina libre	EV (mm /año)	1 738,9	Salida
	(L/s)	0,7	
Bombeo con base en los registros de CEMEX	Bomb	15	Salida

Fuente: Wes, 2019.

De manera esquemática, en la Figura 111 se ilustran dichos factores.

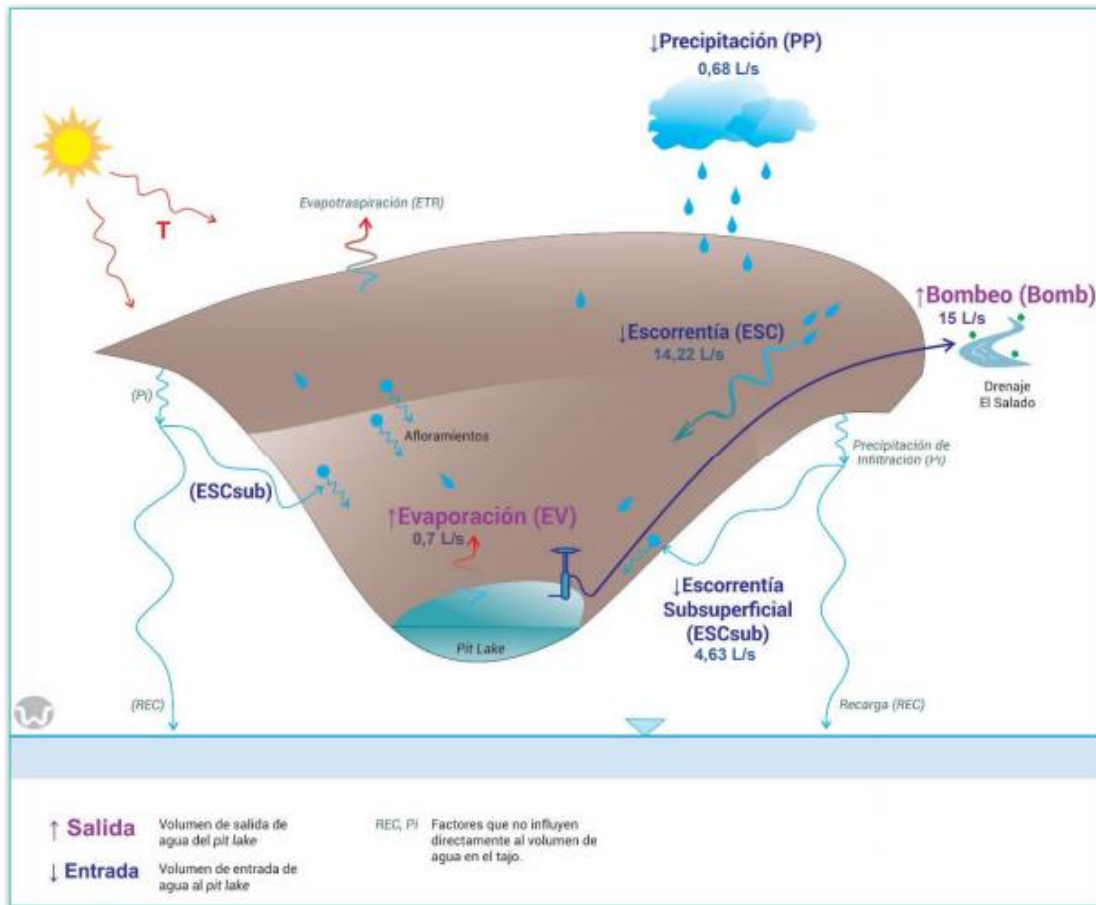


Figura 112. Variables del Balance del Tajo mina La Esmeralda.

Fuente: Wes, 2019.

Finalmente, simulando que el pit lake esté en equilibrio, el balance de entradas y salidas indicaría que el bombeo deberá ser mayor, cerca de ~20 L/s promedio anual para mantener la laguna a un nivel controlado (ver Tabla 95). Lo anterior sin contar con los afloramientos provenientes de la quebrada Chicalá, para lo cual se deberá estimar estas pérdidas monitoreando el caudal antes y después del paso por las cercanías del tajo.

Tabla 95. Balance del Tajo (L/s)

Entradas		Salidas	
ESC	14,22	Bomb	15
Pb	0,68	Ev	0,7
ESCsub	4,6		
Total entradas	19,5	Total salidas	15,7

Fuente: Wes, 2019.

5.1.7.3. Inventario Puntos de Agua Subterránea

Con el propósito de identificar y realizar el inventario de los puntos de agua presentes en el área de influencia de los títulos mineros 6823 y 745 del proyecto minero Mina La Esmeralda de CEMEX Colombia S.A. en el sector de Payandé se revisó su delimitación asociados principalmente a la cuenca del río Coello y las quebradas Chicalá, El Salado y el Zanjón Los Huilos, INGETEC ejecutó una campaña de campo para la identificación de los puntos de agua subterránea en Septiembre de 2020

Dentro del plan de trabajo y protocolo de identificación en campo de los tipos de puntos de agua subterránea se parte de la premisa de la siguiente clasificación:

- Manantial: se denomina cuando el agua infiltrada alcanza el nivel freático o una capa impermeable, la cual fluye lateralmente, y este flujo se cruza con la superficie topográfica.
- Pozo: pozo de agua o una perforación que constituye una obra de captación vertical que permite la explotación del agua freática contenida en los intersticios o las fisuras de una roca del subsuelo, en lo que se denomina acuífero, (def. www.wikiwater.fr/e28-los-diversos-tipos-de-pozos-y.html).
- Aljibe: pozo artesanal, generalmente a poca profundidad, pero que igualmente capta aguas subterráneas.

De acuerdo con las observaciones efectuadas en la campaña de campo en septiembre de 2020, se efectuó la verificación e identificación de puntos de agua subterránea en el área de influencia del proyecto minero, donde se evidenciaron nueve (9) puntos de agua subterránea tipo piezómetro.

En general, los piezómetros en el área de estudio se ubican principalmente sobre las diferentes unidades litológicas presentes en el proyecto minero, uno sobre las calizas de la formación Payandé, otro sobre unidades terciarias de la formación Honda, dos sobre los depósitos de escombreras, dos sobre los depósitos cuaternarios de puzolanas y tres sobre los depósitos cuaternarios aluviales. La localización de los puntos de agua subterránea identificados se relaciona en la Tabla 96 (ver Fotografía 69 a Fotografía 71) y en la Figura 112. En el Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.026 se presentan los formatos Funias de los puntos de agua subterránea inventariados.

Tabla 96. Relación de inventario de puntos de agua subterránea asociada a piezómetros en el área de estudio mina La Esmeralda.

Piezómetro	Coordenadas Magna Sirgas Origen Bogotá		Altura (m.s.n.m)	Coordenadas Origen Único Nacional		Profundidad (m)	Nivel freático registrado (m)	Fecha de medición	Hora de medición
	Este	Norte		Este	Norte				
PZ-01	885581	966200	572			43,4	42,79	25/09/2020	2:18 p. m.
PZ-02 Escombrera Inferior	886368	966368	533			36,6	36,24	25/09/2020	2:28 p. m.
PZ-03	886061	966904	512			41,15	21,85	25/09/2020	3:48 p. m.
PZ-05	885504	966205	572			228	60,65	25/09/2020	2:10 p. m.
PZ-07	886300	966939	513			27,4	27,42	25/09/2020	3:58 p. m.
PZ-08	886088	967280	531			41	39,62	25/09/2020	3:39 p. m.
PZ-09	886111	967512	529			41	40,33	25/09/2020	3:09 p. m.
PZ-10	886310	967531	514			56,2	Seco	25/09/2020	3:18 p. m.
PZ-Escombrera Superior	885133	966803	615			22,5	21,23	25/09/2020	2:45 p. m.

Fuente: Elaboración propia.



Fotografía 69. Medición del piezómetro PZ-05 sector pit sur mina La Esmeralda.
Fuente: Elaboración Propia



a.)



b.)

Fotografía 70. a.) Medición del piezómetro PZ-01. , b). Rocas de la formación Honda en el piezómetro PZ-01, sector pit sur mina La Esmeralda.
Fuente: Elaboración Propia



a.)

b.)

Fotografía 71. a.). Medición del piezómetro PZ-Escombrera Superior. , b). Morfología de la escombrera superior, sector occidental mina La Esmeralda.
Fuente: Elaboración Propia

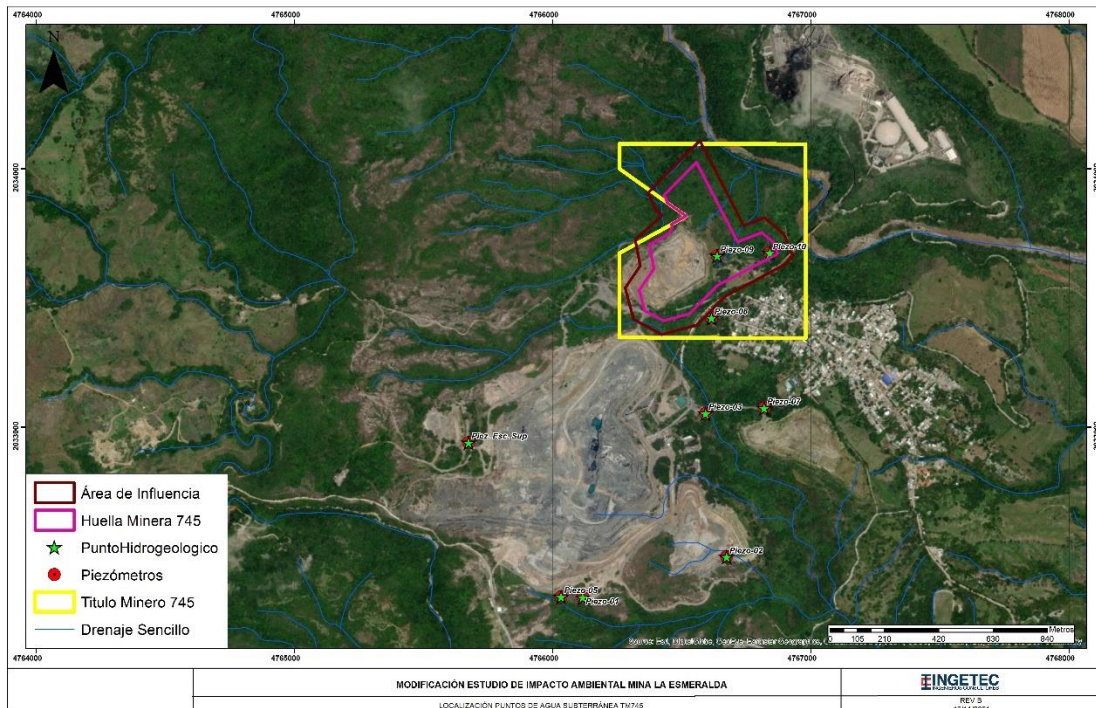


Figura 113. Localización de los puntos de agua subterránea asociados a los piezómetros identificados en el área de estudio mina La Esmeralda.
Fuente: Elaboración Propia

5.1.7.4. Evaluación Hidrogeoquímica e Isotópica - Resultados Modelo Wes.

5.1.7.4.1. Monitoreo de aguas subterráneas y superficiales.

Con el fin de determinar las zonas de recarga con potencial de descarga hacia el pit Calizas, aplicando el análisis hidroquímico e isotópico (2H y 18O), WES recolectó 12 muestras entre aguas subterráneas, subsuperficiales y superficiales (incluyendo el duplicado) en el monitoreo de 17 estaciones, cuyas actividades fueron ejecutadas entre el 20 y 26 de agosto del año 2020.

El muestreo hidroquímico e isotópico fue ejecutado por los especialistas de WES, al interior e inmediaciones del pit Calizas. La selección de los puntos de muestreo fue definida con base en análisis hidroquímicos históricos y experiencia de los hidrogeólogos de CEMEX sobre estaciones estratégicas de alta importancia. Las estaciones de monitoreo y/o extracción de aguas subterráneas se distribuyeron de la siguiente forma:

Ocho (08) piezómetros tipo tubo abierto de agua nativa, con un pH relativamente neutro, adyacentes al pit Calizas y en la margen derecha del río Coello (PZM1, PZM3, PZM5, PZM7, PZM8, PZM9, PZM Escombrera superior y PZM2 Escombrera Inferior).

Respecto a las aguas subsuperficiales, se monitoreó:

- Tres (03) filtraciones en el interior del pit Calizas. Dos (02) aflorando al suroeste y oeste de las paredes del pit y adyacente a la quebrada Chicalá aguas abajo (INF1 y INF3); y una (INF2) en la zona central del pit, al oeste del pit lake.

Respecto a las aguas superficiales, se recolectó:

- Tres (03) muestras de agua en tres quebradas principales en los alrededores del pit Calizas. Una (01) en la quebrada Chicalá aguas abajo (QCAGAB), otra en la quebrada Aguirre (QA) antes de la confluencia con la quebrada Chicalá y una (01) en el Drenaje El Salado aguas abajo (DSAGAB).
- Una (01) muestra en la Salida del Sistema de Descarga de la laguna de sedimentación (SSD), expresada en el vertimiento de efluentes mineros hacia el Drenaje El Salado
- Dos (02) muestras en el pit lake, ubicadas en la parte central del pit Calizas. Una exactamente al centro del pit (PL1) y la otra adyacente a la pared este del pit (PL2).

La Tabla 97 muestra la ubicación precisa de las estaciones de aguas subterráneas, la Tabla 98 de aguas subsuperficiales y la Tabla 99 de aguas superficiales. El Mapa II-2 muestra las estaciones monitoreadas y/o muestreadas en agosto de 2020. En el Anexo B se muestran las fichas técnicas de cada estación muestreada, donde se describe las características técnicas de cada estación. En el Anexo C se muestran los logplots con la descripción litológica de los tramos ranurados de cada estación monitoreada y muestreada.

Tabla 97. Ubicación de las estaciones de aguas subterráneas monitoreadas durante la campaña en campo.

Código	Coordenadas Magna Sirgas Bogotá		Altitud (m s.n.m.)	Profundidad Piezómetro (m b.n.t.)	Fecha de monitoreo y/o muestreo (dd-mm-aa)	Hora de muestreo (hh:mm)
	Este	Norte				
PZM3	886 065	966 906	714	41,15	26/08/2020	18:30
PZM5	885 507	966 196	776	218	24/08/2020	18:30

Nota: El piezómetro PZM5, antes piezómetro C19ME-05, fue el único que no se llegó a medir su profundidad durante la campaña de campo. La profundidad del piezómetro PZM5 se obtiene del logging. (*) No presenta diseño constructivo (log plots). No se tomó muestra en algunos piezómetros por estar secos. M b.n.t → Metros bajo el nivel del terreno. Fuente: WES Perú SAC, 2020

Tabla 98. Ubicación de las estaciones de aguas subsuperficiales monitoreadas durante la campaña en campo

Código	Coordenadas Magna Sirgas Bogotá		Altitud (m s.n.m.)	Fecha de monitoreo y/o muestreo (dd-mm-aa)	Hora de muestreo (hh:mm)	Ubicación referencial
	Este	Norte				
INF1	885 420	966 547	667	22/08/2020	11:17	Talud oeste del pit Calizas
INF2	885 584	966 727	646	22/08/2020	16:00	Adyacente al pit lake
INF3	885 336	966 410	709	22/08/2020	18:00	Talud suroeste del pit Calizas

Fuente: Wes, 2020.

Tabla 99. Ubicación de las estaciones de aguas superficiales monitoreadas durante la campaña en campo.

Código	Coordenadas Magna Sirgas Bogotá		Altitud (m s.n.m.)	Fecha de monitoreo y/o muestreo (dd-mm-aa)	Hora de muestreo (hh:mm)	Ubicación referencial
	Este	Norte				
QCAGAB	884 918	966 392	771	21/08/2020	11:30	Quebrada Chicalá aguas abajo
QA	884 291	966 798	841	21/08/2020	16:00	Quebrada Aguirre. Antes de la confluencia con quebrada Chicalá.
PL1	885 584	966 779	630	23/08/2020	11:00	Pit lake 1. Zona central de pit calizas
PL2	885 697	966 698	639	23/08/2020	11:30	Pit lake 2. Adyacente al talud este del pit Calizas
SSD	886 038	966 956	705	24/08/2020	09:00	Descarga de efluente minero al Drenaje El Salado
DSAGAB	886 561	966 158	694	24/08/2020	14:40	Vía Payandé hacia el salitre, 100 m aguas arriba de puente sobre Q. El Salado

Fuente: Wes, 2020.

5.1.7.4.1.1. Aguas subterráneas.

En la etapa de pre-campo con la información, suministrada por CEMEX, se realizó el análisis e interpretación (gap analysis) para definir los puntos de monitoreo y muestreo en aguas subterráneas. Inicialmente fueron elegidos los piezómetros: PZM1, PZM3, PZM5 y PZM7; estos por no estar secos, según los registros históricos de niveles de agua (ver Mapa II-1).

La descripción litológica de las zonas ranuradas de los piezómetros se extrajo de la EMPRESA COLOMBIANA DE HIDROGEOLOGÍA, en el año 2017.

El piezómetro 1 (PZM1), ubicado al sur del pit Calizas, presenta una profundidad de 43,63 m y una zona ranurada, aproximadamente, entre los 31 y 43 m de profundidad. Donde en los primeros 3 m presenta paquete de roca caliza (¿micrítica?) de color gris con algunos cambios en las tonalidades tornándose más blancas. En algunos niveles se observa la presencia de pirita. En los últimos 9 m de zona ranurada predomina las lodolitas arenosas y areniscas lodosas de color

crema con fragmentos calcáreas, aumentando la proporción lodosa de la matriz con respecto a las arenas a medida que se profundiza.

De este piezómetro no fue posible tomar muestra, ya que presentaba 1,67 metros de columna de agua (en adelante mca) donde el muestreador (bailer flex) extrajo agua con sedimentos. Probablemente colmatado. Ver Fotografía II-1.



Fotografía 72. Piezómetro 1 (PZM1) tipo tubo abierto.

Izquierda: Medición del nivel de agua mediante el Water Level Meters. Derecha: Muestreador (bailer 1") luego de introducirlo a PZM1, donde se observa extracción de sedimentos.

Fuente: WES Perú SAC, 2020

El piezómetro 3 (PZM3), ubicado al noreste del pit Calizas y aproximadamente a 55 m al sureste de la descarga de efluentes al Drenaje El Salado. Presenta 02 tramos ranurados, el primero de 16 a 22 m, donde predominan fragmentos (<1 cm) calcáreos carbonosos (90 – 95%) color gris oscuro caliza. Algunos fragmentos blancuzcos calcáreos (<5%) y granos de cuarzo (1 – 5 %) algunos de color gris oscuro con indicios de vetillas o venas de calcita. Se presenta niveles húmedos y secos.

El segundo tramo ranurado se encuentra entre 28 a 34 m de profundidad, aquí predominan los fragmentos calcáreos (caliza 0,5 cm) gris oscuro carbonosas (80%) fragmentos blancuzcos calcáreos (10 – 15%) cuarzo en arenas medias – gruesas (5%) húmedas. Se procedió a medir el nivel de agua y posteriormente a extraer la muestra en el PZM3, como se muestra de la Fotografía II-2.



Fotografía 73. Monitoreo y muestreo de Piezómetro 3 (PZM3) tipo tubo abierto.

Izquierda: Medición de la profundidad del agua en PZM3. Derecha: Extracción de muestra en el PZM3.

Fuente: WES Perú SAC, 2020

El piezómetro 5 (PZM5), llamado anteriormente C19ME-05, se ubica al sur del pit Calizas y aproximadamente a 80 m al oeste de PZM1. Es el piezómetro de mayor profundidad en la Mina La Esmeralda, con 218 m de profundidad. No se cuenta con un diseño constructivo de este piezómetro, siendo informado por CEMEX de la presencia de zona ranurada en los últimos 30 m de profundidad, es decir, entre 188 m y 218 m. Según el logueo realizado por GeoMinas Ingenieros S.A.S. en el 2019, la zona ranurada presenta predominancia de calizas de color gris medio, de grano muy fino, masiva, con laminaciones deformadas, presenta venillas de calcita. Presenta bajo contenido de sulfuros dentro de su estructura.

Además de un tramo de 4 m (195 a 199 m), donde predomina dique porfídico de color verde de grano fino, con fenocristales, hornblenda, con sulfuros diseminados y en venillas. Presenta baja frecuencia de venillas de calcita, posee sulfuros diseminados y en venillas muy finas.

Es el único piezómetro que presenta el casing por encima del dado de concreto. Este piezómetro presenta una obstrucción a 103 m de profundidad, no se pudo acceder a la muestra más profunda con el bailer flex; se realizó una purga necesaria, aproximadamente 20 L, con 02 bailers en línea de 1" de diámetro y 3 ft de alto, hasta mantener constante los parámetros de pH y CE, luego se procedió a la toma de la muestra. Ver Fotografía II-3.



Fotografía 74. Monitoreo y muestreo de Piezómetro 5 (PZM5) tipo tubo abierto.

Izquierda: Medición de la profundidad del agua en PZM5. Derecha: Extracción de muestra en el PZM5.

Fuente: WES Perú SAC, 2020

5.1.6.4.1.2. Aguas subsuperficiales

Las filtraciones que afloran en el interior de pit Calizas se ubican, en su mayoría, en la zona suroeste del pit. La recolección de muestra en estas filtraciones se realizó a través de un mapa de filtraciones proporcionada por CEMEX, donde se priorizó filtraciones representativas adyacentes a la quebrada Chicalá aguas abajo y las filtraciones más profundas. Con estos criterios, se determinó 03 puntos estratégicos para la recolección de muestras.

Las filtraciones 1 y 3 (INF1 y 3) al interior del pit Calizas, ubicadas en el talud oeste y suroeste, respectivamente, y la filtración 2 (INF2) adyacente al pit lake 1; presentan diminutos caudales (goteos) estimados por el método volumétrico, los bajos caudales favorecieron la exposición de las muestras al medio ambiente por lo que estas filtraciones fueron afectadas por evaporación. Y los valores de oxígeno disuelto (OD) no son representativos por estar expuesto por largo tiempo al O₂ atmosférico, durante la recolección de la muestra.

En la filtración 1 (INF1), la muestra fue tomada en la base del talud oeste debido al riesgo de caída de rocas. El caudal presentado en esta filtración fue estimado, teniendo como resultado 0,012 L/s. En este punto se observan varios goteos con similares caudales. Ver Fotografía II-6.

La filtración 2 (INF2), ubicada en la zona central del pit Calizas aproximadamente 50 m al sur del pit lake 1. En esta filtración se observa 6 zonas de goteo, cuyo caudal por goteo se estima en 0,118 L/s. Ver Fotografía II-7.

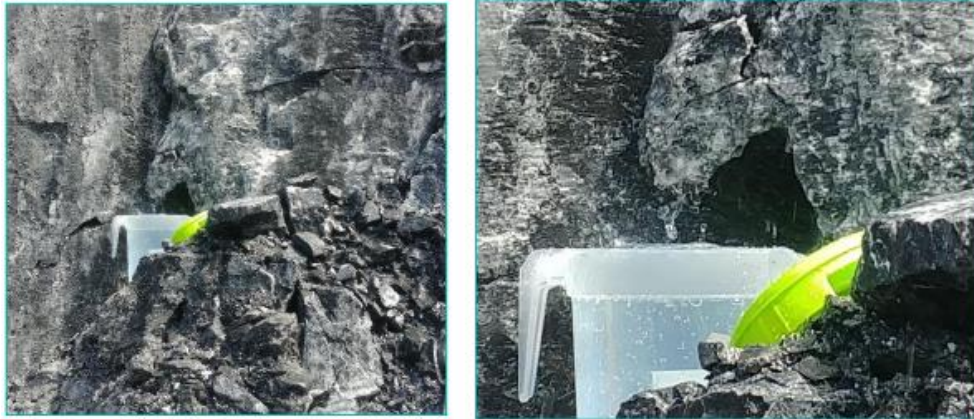
En la filtración 3 (INF3), con caudal mucho menor a INF1. En este punto se midieron 04 goteos donde se recolectó 1,5 L de agua en 5 horas. Obteniendo un caudal total de 3×10^{-4} L/s en los 04 goteos. Ver Fotografía II-8.



Fotografía 75. Filtración 1 (INF1) al interior del Pit Calizas.

Izquierda: Toma de muestra en INF1, se observan goteos en las fracturas de las rocas carbonatadas (Formación Payandé). Derecha: Medición del oxígeno disuelto (OD) mediante Dissolved Oxygen Test Kit.

Fuente: WES Perú SAC, 2020.



Fotografía 76. Filtración 2 (INF2) al interior del Pit Calizas..

Izquierda: Procedimiento de recolección de muestra y medición de caudal. Derecha: La misma fotografía de la izquierda, donde se observa de manera detallada el afloramiento de agua (goteos) en las fracturas de las calizas de la Formación Payandé.

Fuente: WES Perú SAC, 2020.



Fotografía 77. Filtración 3 (INF3) al interior del Pit Calizas.

Goteos casi imperceptibles en las calizas de la Formación Payandé.

Fuente: WES Perú SAC, 2020.

La selección de estaciones de monitoreo en aguas superficiales es de suma importancia, por ser probables zonas de recarga donde el agua infiltrada puede realizar un recorrido (corto o largo) y descargar en otros puntos que presente menor gradiente (pit Calizas).

En la etapa previa a la salida a campo, se evaluó el monitoreo y/o muestreo, aguas arriba y abajo, de las quebradas Aguirre, Chicalá y Drenaje El Salado, además de la Salida del Sistema de Descarga de las aguas del Pit minero hacia Drenaje El Salado (Mapa II-1).

Debido a la temporada seca en la que se encontraba la Mina La Esmeralda, durante el mes de agosto, algunos puntos ubicados aguas arriba de las quebradas estuvieron secos, según datos históricos presentan caudal en temporadas de lluvia (quebradas intermitentes). Por este motivo se realizó el monitoreo y muestreo en 06 cuerpos de agua superficiales, detalladas a continuación:

La estación QCAGAB, corresponde a la quebrada Chicalá aguas abajo, tomada a la altura del 4 km de la vía Payandé – Salitre, en el punto donde de voz es conocido como Los Corte.

La muestra se tomó sobre la margen izquierda donde se presenta en su mayoría bloques de roca de naturaleza carbonatada con venilla de cuarzo, afectado por el stock, de la formación Payandé. Se estimó un caudal de 170 L/s. Ver Fotografía II-9.

La estación QA, corresponde a la quebrada Aguirre a 270 m aguas arriba antes de la confluencia con la quebrada Chicalá, en el 4,5 km de la vía Payandé - río Frío entrando 500 m a la mano izquierda, en la entrada a la finca San Pedro. Presenta una longitud de cauce principal de 6,83 km (INGETEC, 2016). La muestra se tomó sobre la margen izquierda donde el sustrato es arena y roca con una pendiente suave. Se estimó un caudal de 21,5 L/s mediante el método del flotador. Ver Fotografía II-10.

La estación DSAGAB, corresponde al Drenaje El Salado aguas abajo, 100 m aguas arriba del puente sobre la vía Payandé – río Frío.

Inicialmente no presentaba caudal, debido a que este es alimentado por la salida del sistema de descarga de las aguas del pit Calizas. Luego de comenzar a descargar el agua, hace un recorrido de 1,1 km agua abajo hasta llegar a la estación DSAGAB con un caudal de 78,7 L/s. El tiempo de recorrido es aproximadamente de 1 h. Ver Fotografía II-11.

Inicialmente se tenía planificado el monitoreo y muestreo de DSAGAR, sin embargo, esta se presentó seca (Fotografía II-12). La estación aguas arriba normalmente se encuentra seca o con caudal reducido, lo cual ha dificultado su monitoreo durante la mayoría de las campañas desde el año 2003, ya que la presencia de lámina depende de la temporada de lluvias (INGETEC, 2016).

La estación SSD, corresponde a la salida del sistema de descarga de las aguas del pit Calizas hacia el Drenaje El Salado en la margen derecha (Fotografía II-13). Es aquí donde se recolectó la muestra duplicado.

Las estaciones PL1 y PL2 corresponden a los pit lake ubicados en el interior del pit Calizas. (Fotografía II-14 y Fotografía II-15)





Fotografía 78. Estación QCAGAB, ubicada en la quebrada Chicalá aguas abajo, al suroeste del Pit Calizas.
Arriba: Fotografía tomada desde QCAGAB con vista a aguas arriba. Abajo: De izquierda a derecha se observa el cálculo de alcalinidad con HCl 0,1M. Filtración de muestra para análisis de metales disueltos. Preservación de muestra con HNO₃ 7M, para análisis de metales totales y disueltos.
Fuente: WES Perú SAC, 2020.





Fotografía 79. Estación QA, ubicada en la quebrada Aguirre.

Arriba: Fotografía tomada desde la margen izquierda de la quebrada Aguirre en QA. Abajo: Las 02 fotografías muestran el método del flotador para el cálculo del caudal.

Fuente: WES Perú SAC, 2020.





Fotografía 80. Estación DSAGAB, ubicada en el Drenaje El Salado aguas abajo.

Arriba: Se observa seco el Drenaje El Salado aguas abajo sin la descarga activa del Sistema de Descarga de las aguas del Pit Calizas. Abajo: Se observa la estación DSAGAB con la descarga del efluente minero aguas arriba en el Sistema de Descarga.

Fuente: WES Perú SAC, 2020.



Fotografía 81. Estación DSAGAR, ubicada aguas arriba del Drenaje El Salado.

Fuente: WES Perú SAC, 2020.



Fotografía 82. Estación SSD en el Sistema de Salida de Descarga de agua del Pit Calizas. Izquierda: Sedimentador Descarga de Agua. Derecha: Caudalímetros donde se vierte agua del Pit Calizas hacia el Drenaje El Salado, durante el monitoreo el agua rebosó la poza de sedimentación.
Fuente: WES Perú SAC, 2020.



Fotografía 83. Estación PL1, en el Pit Lake 1 en la parte central del Pit Calizas.
Fuente: WES Perú SAC, 2020.



Fotografía 84. Estación PL2, en el Pit Lake 2 adyacente a la pared este del Pit Calizas.
Fuente: WES Perú SAC, 2020.

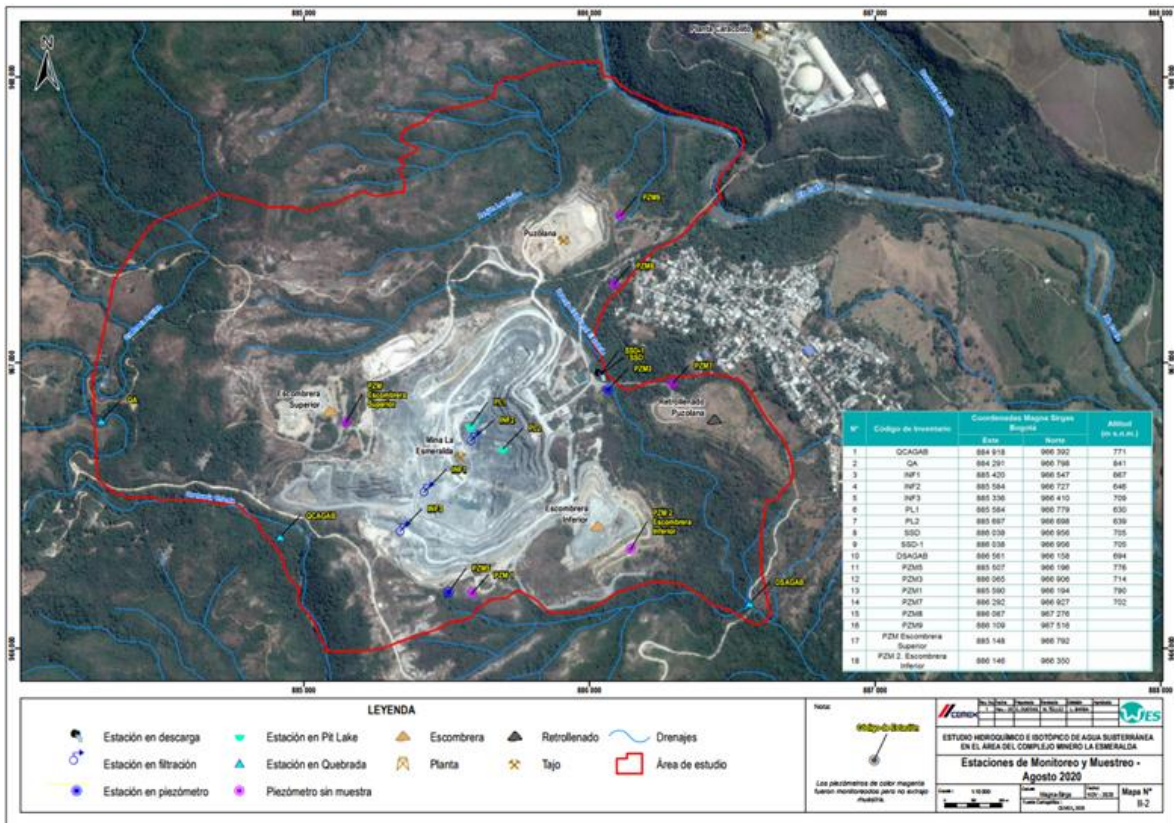


Figura 114. Estaciones Monitoreada y/o Muestreada en agosto 2020.
Fuente: WES Perú SAC, 2020.

5.1.7.4.2. Metodologías aplicadas

5.1.7.4.2.1. Muestreo y monitoreo en campo.

El muestreo fue ejecutado por WES, durante el mes de agosto de 2020 en la Mina La Esmeralda y alrededores, quienes aseguraron el cumplimiento de estándares de muestreo en las quebradas principales y piezómetros seleccionados, además de las medidas de seguridad y bioseguridad necesarias.

Todos los piezómetros ubicados en los alrededores del pit Calizas, fueron monitoreados (a excepción del piezómetro 10). Solo dos piezómetros no se encontraron secos; sin embargo, debido a obstrucciones situadas por encima y debajo de los niveles de agua en los piezómetros PZM3 y PZM5, respectivamente; fue necesario conformarse con purga y muestreo mediante el bailer. Se modificó el procedimiento de muestreo de los piezómetros lo menos posible para comparar con datos hidroquímicos históricos de monitoreos pasados.

En los siguientes subcapítulos se describen los parámetros muestreados en campo y enviados al laboratorio ALS Perú. Los muestreos de agua toman como referencia los protocolos nacionales e internacionales establecidos y recomendados por distintas entidades (IDEAM 2018; Nielsen 1991; Kovalevsky et al. 2004; US EPA 2016).

5.1.7.4.2.2. Parámetros fisicoquímicos de campo.

En cada punto de muestreo, se registraron los siguientes parámetros fisicoquímicos, medidos mediante medidores de bolsillo de WES (calibrados diariamente):

- Temperatura (T, ± 1 oC).
- Conductividad eléctrica (EC, ± 20 μ S/cm): Calibración diaria con soluciones estándar de 1 413 μ S/cm, y 12 880 μ S/cm en caso de aguas saladas.
- pH = $-\log_{10}[aH^+]$ ($\pm 0,2$): Logaritmo negativo de la actividad de protones, describe las características ácidas / alcalinas del agua. Calibrado diariamente con buffer de pH 4, 7 y 10.
- Potencial redox (ORP, ± 50 mV): $ORP + 210 \text{ mV} \approx \text{Potencial redox Eh (mV)}$ con referencia al SHE (standard hydrogen electrode), importante sobre todo en aguas subterráneas con parcial o completa reducción de O₂. Controlado diariamente con una solución estándar de 240 mV.
- Oxígeno disuelto ($\pm 0,8$ mg O₂/L): Mediante Dissolved Oxygen Test Kit para registrar el avance de la reducción de O₂ en las aguas subterráneas.
- Turbidez ($\pm 2\%$ + 0,02 NTU): Mediante turbidímetro de HACH (2100P) calibrado con soluciones estándar de < 0,1 NTU, 15, 100 y 750 NTU. Sustituye al análisis gravimétrico de sólidos totales suspendidos (TSS) del laboratorio tras secado a 104 oC. En piezómetros sólo indica de cuantos finos son movilizados por el bombeo o quedan todavía en agua subterránea estancada entre filtro y nivel freático.

Se apuntó además observaciones de campo como apariencia y olor para las muestras.

5.1.7.4.2.3. Parámetros de laboratorio

➤ Parámetros hidroquímicos

En el laboratorio de ALS Perú (Informe de Ensayo en Anexo D.3) se analizaron los siguientes parámetros hidroquímicos:

- Sólidos totales disueltos y totales (TDS y TSS), gravimétricamente, luego de secado a 180°C.

- Aniones (F⁻, Cl⁻, Br⁻, SO₄²⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻) por IC (Ion Chromatography). TDS y Aniones no requieren filtración o preservación.
- Alcalinidad HCO₃⁻ (+ CO₃²⁻ a pH > 8,3, mg CaCO₃/L), determinado por titulación de 0,1 N HCl hasta un pH de 4,5, tanto en campo como en laboratorio, lo que facilita al laboratorio un control de balance iónico interno. La muestra sólo requiere filtración en caso de aguas muy turbias.
- Cationes/ Metales Disueltos (Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, Sb, Se, Si, Sn, Sr, Ti, Tl, V, Zn). Mediante filtros desechables de 0,45 µm se separa sólidos suspendidos de los disueltos. Cada frasco (digitube) de 50 mL es tres veces enjuagado y llenado con agua filtrada, y luego acidificada in situ con 2 mL de 7 N HNO₃ de alta pureza para impedir la precipitación de hidróxidos y/o carbonatos de metales a pH < 2 hasta el análisis por ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) en el laboratorio.
- Metales Totales (= disueltos + suspendidos), para determinar el porcentaje de hidróxidos de metales suspendidos y su posible contribución a excedencias de límites permisibles según normas nacionales e internacionales. Luego de enjuagar la botella, la muestra no filtrada es acidificada in situ con 2 mL 7N HNO₃, de igual manera que los metales disueltos, a fin de conservar todos metales en forma disuelta a pH < 2 hasta el análisis por ICP-MS en el laboratorio.

La Dureza Total (mg CaCO₃/L) es calculada como suma de los cationes polivalentes, que es equivalente al análisis directo por titulación EDTA que daría resultados casi idénticos. A pH neutro es esencialmente la suma de Ca²⁺ y Mg²⁺; no hay aguas ácidas que pudieran contribuir significativamente Al³⁺ y Fe³⁺ a la dureza.

Los resultados completos se presentan en el Anexo D.1, D.2 y D.5.

➤ Parámetros Isotópicos (²H – ¹⁸O)

Los isótopos del agua (²H+¹⁸O, ± 0,8 y 0,2 ‰ SMOW) fueron analizados por LGR Láser en la University of Waterloo Environmental Isotopes Laboratory (uwEILab), Ontario, Canadá. Los resultados se observan en el Anexo D.4.

Las muestras isotópicas (²H y ¹⁸O) no requieren filtración y preservación, por lo que fueron almacenadas en recipientes (Cooler) y refrigeradas con Ice Packs hasta la entrega al laboratorio. Tapas con cerradura hermética impiden un fraccionamiento isotópico por evaporación de los frascos de ²H-¹⁸O hasta el análisis.

La Tabla 100 resume los métodos usados y lista las cantidades de muestras tomadas por cada parámetro.

Tabla 100. Preparación y análisis de los parámetros inorgánicos

Muestras tomadas	Parámetro	Método, Precisión, Filtración, Preservación	Volumen
ALS-CorpLab, Lima, Perú			
12	TDS y TSS	Gravimétricamente, tras secado a 180 °C	180 mL
12	Aniones (F ⁻ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻)	IC	180 mL
12	Alcalinidad HCO ₃ ⁻ (+ CO ₃ ²⁻ a pH > 8,3)	Volumetría (± 2 mg HCO ₃ ⁻ /L o mg CaCO ₃ /L)	180 mL
12	Cationes/ Metales Disueltos	Filtración 0,45 µm, + 1 mL 6 N HNO ₃ , ICP-MS	50 mL, Digitube
12	Metales Totales	Sin filtración	50 mL, Digitube
uwEILab (University of Waterloo Environmental Isotopes Laboratory), Ontario, Canada			
12	² H y ¹⁸ O	LGR Laser (Potable Water) (± 0,8	50 mL, Digitube

Muestras tomadas	Parámetro	Método, Precisión, Filtración, Preservación	Volumen
		& 0,2 ‰ SMOW)	

Fuente: WES Perú SAC, 2020.

5.1.7.4.2.4. Control de calidad (Qa/Qc)

- Balance iónico

Para evaluar la confiabilidad y calidad de los análisis químicos, se calculó el balance iónico de cada muestra mediante los:

- Cationes principales Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, y
- Aniones principales HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻, a través de las siguientes fórmulas estándar:

$$\text{Error del balance iónico IBE}(\%) = \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones} \left(\frac{\text{meq}}{\text{meq}}\right)}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones} \left(\frac{\text{meq}}{\text{meq}}\right)} * 100\% \quad (1)$$

con:

$$c_{eq}[\text{meq/L}] = \frac{m[\text{mg}]}{V[\text{L}] * M[\text{g/mol}]} * \text{carga del ión} \quad (2)$$

Los resultados muestran un signo positivo cuando predominan los cationes y negativo cuando predominan aniones. Los análisis químicos se consideran aceptables con un error del balance iónico (IBE) entre -10 y +10 %, para análisis de aguas dulces (Figura 114). También se puede calcular el error aceptable en función a la conductividad eléctrica, es decir, aceptando mayores errores en aguas poco mineralizadas:

$$\text{IBE aceptable}(\%) = \pm 253,5 * EC(\mu\text{S/cm})^{-0,5461} \quad (3)$$

En las aguas predominan los cationes principales disueltos Ca²⁺, Mg²⁺ y Na⁺, así como los aniones principales HCO₃⁻, SO₄²⁻ y Cl⁻, mientras la solubilidad y consecuentemente la concentración de metaloides y metales pesados es tan baja que no contribuyen significativamente al balance iónico, debido a pH neutro (7,3 – 8,4) de las aguas y contacto con calizas. La suma de estos metales traza queda siempre inferior a 0,2 eq.‰.

Los cálculos hidroquímicos para el control de calidad se detallan en el Anexo E.

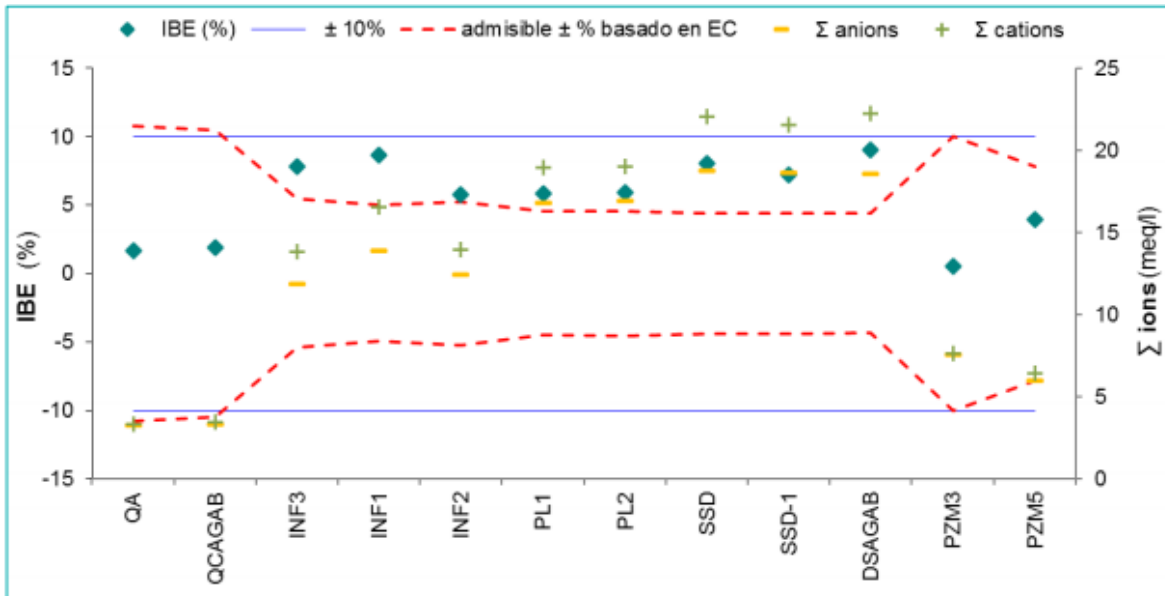


Figura 115. Error del Balance Iónico (%) y suma de Concentraciones de los Principales Cationes y Aniones (meq/L), durante el monitoreo en agosto 2020
Fuente: WES Perú SAC, 2020.

Los escasos parámetros hidroquímicos seleccionados en el pasado (HIDROCERON 2007 y GOTTA 2013) no permitieron balancear los iones, clasificar tipos de agua, o graficar la hidroquímica, como se hizo aquí gracias a análisis completos, que consisten en el barrido de aniones por IC (cromatografía de iones), alcalinidad, y metales disueltos por ICP-MS (espectrometría de masa). Este es el mínimo estándar que deben seguir todos futuros monitoreos.

Los datos son además corroborados por la conductividad eléctrica (CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$), registrada en campo, y los sólidos disueltos (TDS en mg/L) del laboratorio, que correlacionan bien entre sí (Figura 115), y que, divididos entre 100 y 70, aportan resultados similares a la suma de los aniones y cationes (en meq/L):

$$\sum \text{Aniones} \approx \sum \text{Cationes (meq/L)} \approx \text{EC}/100 (\mu\text{S}/\text{cm}) \approx \text{TDS}/70 (\text{mg}/\text{L}) \quad (4)$$

El coeficiente de actividad (a_i) es igual a 1 a moderada mineralización. En consecuencia, la actividad (concentración efectiva) y concentración (mg/L) de iones son idénticas (Debye & Hückel 1923):

$$a_i = \gamma_i c_i \quad (5)$$

Con coeficiente de actividad $\gamma_i = 1,0$

Cuando la salinidad es elevada, la actividad de los iones se ubica debajo de la concentración, el coeficiente de actividad disminuye a $\gamma_i < 1$, por lo que deja de existir una correlación lineal entre CE y TDS (factor $\sim 0,7$) y la CE aumenta gradualmente más lenta que los sólidos disueltos (Figura 115).

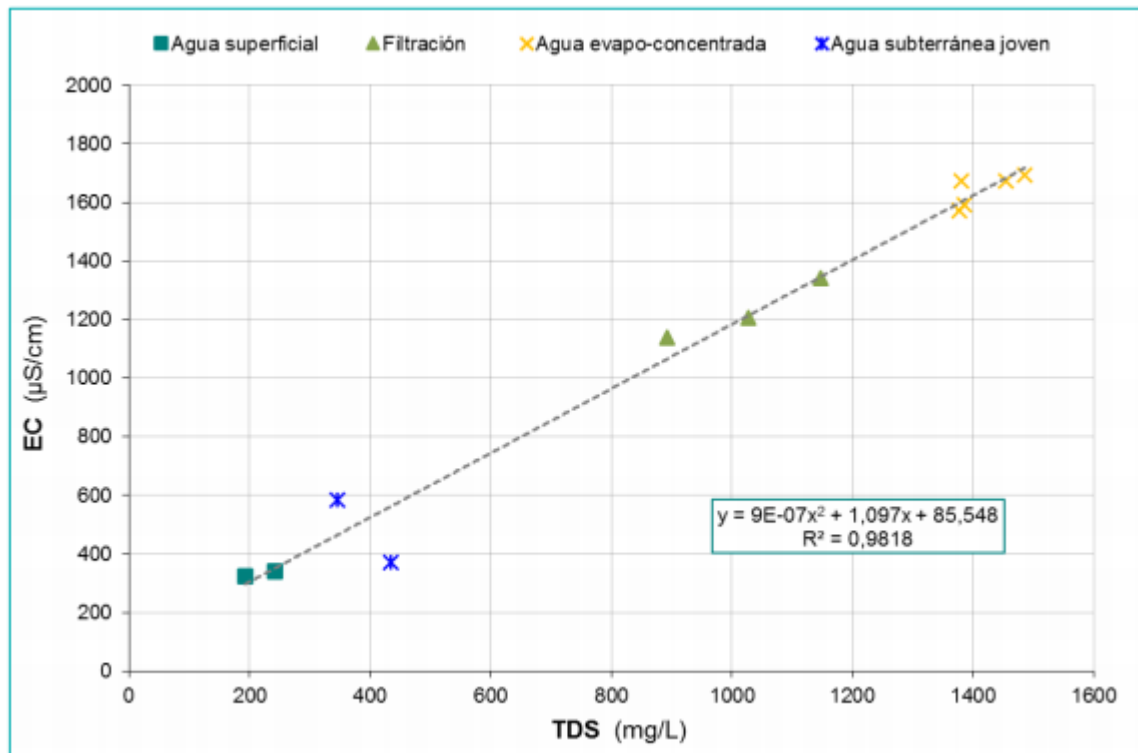


Figura 116. Correlación entre CE (µS/cm) y TDS (mg/L) de monitoreos realizados en agosto de 2020

Fuente: WES Perú SAC, 2020.

El control de los datos mediante la comparación de la Dureza Total Calculada y la analizada por el laboratorio, no se realizó debido a que este último no fue realizado por el laboratorio ALS Perú, por no ser necesario para el presente estudio.

- Metales Totales y Disueltos

Las aguas subterráneas son claro-cristalinas, con presencia de pocos finos movilizados durante el bombeo o muestreo con bailer. Por lo tanto, se analiza en aguas subterráneas sólo metales disueltos de muestras filtradas. Únicamente en las aguas superficiales de ríos potencialmente turbios, es necesario -y de hecho se analizó- Metales Totales (= disueltos + suspendidos), para determinar el porcentaje de hidróxidos de metales suspendidos y la posible contribución a excedencias de límites permisibles según normas nacionales e internacionales.

Las concentraciones de metales totales (C_{tot} = disueltos + suspendidos), correspondientes a muestras no filtradas, son iguales o superiores, nunca inferiores, a las de los mismos cationes disueltos (C_{dis}) de muestras filtradas, lo que confirma la validez de los datos y un considerable porcentaje de algunos metaloides y metales pesados (Al, Mn, Cu, Ni, Mo) en suspensión (C_{sus}).

$$C_{tot} = C_{sus} + C_{dis} \quad (6)$$

Las concentraciones de los cationes mayoritarios disueltos y totales (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , y K^{+}) son prácticamente idénticas, debido a su alta solubilidad, y por ello se ajustan a la línea diagonal de 45° (Figura 116).

Hidróxidos de metaloides y metales pesados en suspensión o adsorbidos a $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y arcillas elevan las concentraciones totales de Al, Mn, Cu, Ni, Mo, As, etc.; sin embargo, sobre las disueltas del mismo metal, particularmente a bajas concentraciones cerca o debajo del límite de detección (LD), donde se magnifican las diferencias o varianzas relativas entre concentraciones totales y disueltas (Figura 116), las concentraciones totales nunca son inferiores a las disueltas, incluso cerca de los límites de detección donde se sobredimensionan potenciales errores, demuestran la alta precisión del muestreo y análisis.

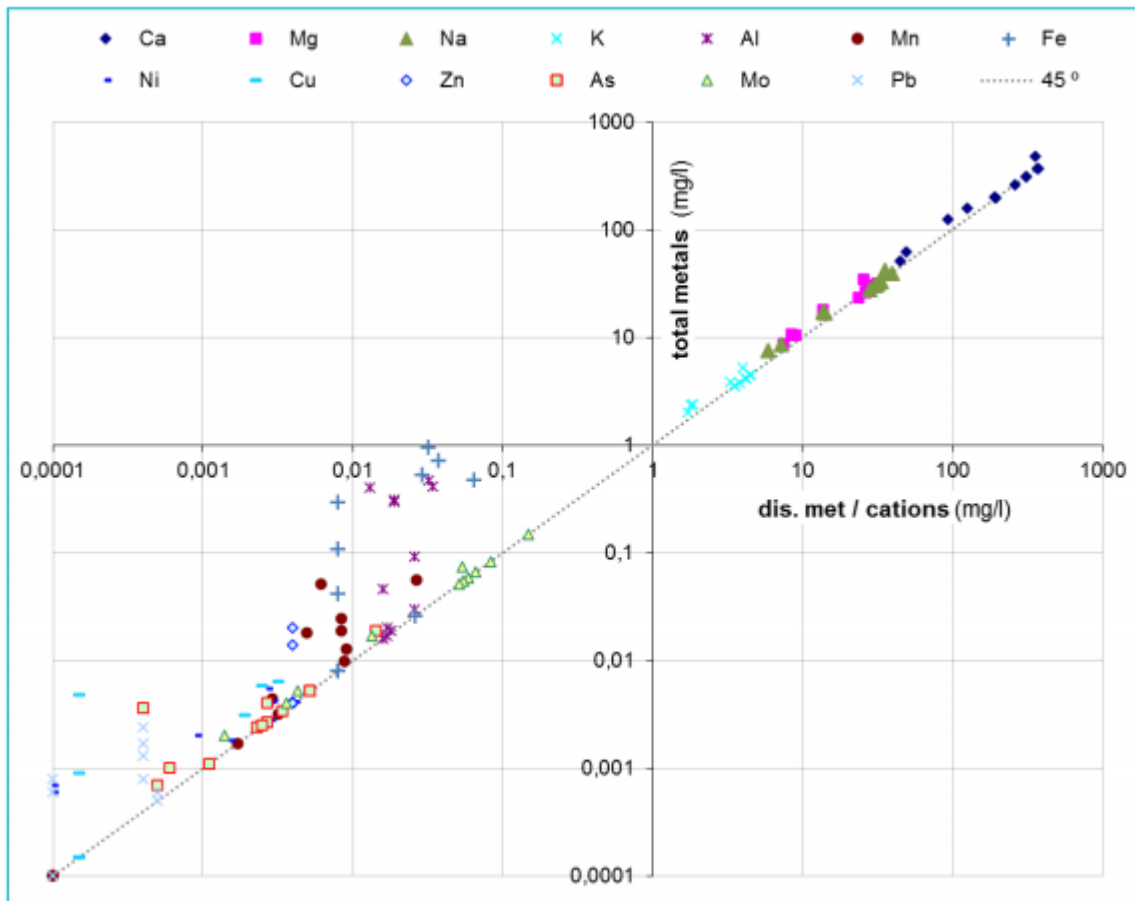


Figura 117. Comparación de las concentraciones de metales disueltos y totales de muestras filtradas y no filtradas de aguas superficiales y subterráneas en agosto 2020

Nota: La línea diagonal de 45° indica valores de $C_{tot} = C_{dis}$, sin componentes en suspensión.

Fuente: WES Perú SAC, 2020

- Isótopos del Agua ($^2\text{H} - ^{18}\text{O}$)

El laboratorio asegura la calidad de los datos mediante análisis de muestras de referencia estándar con signatura isotópica conocida y medición de duplicados que proporcionaron resultados prácticamente idénticos. Los datos próximos a la GMWL (global meteoric water line) proporcionan también un control de calidad.

Los análisis de $^2\text{H} - ^{18}\text{O}$ de agosto 2020 fueron comparados con registros continuos de la estación meteorológica de Bogotá (Figura 121) y validados mediante comparación entre sí, por ejemplo;

- obteniendo resultados casi idénticos del duplicado de campo SSD y SSD-1 en la poza de sedimentación que almacena el agua bombeada del pit Calizas (Figura 123).

- alineación de su característico desplazamiento por evaporación en la misma línea de evaporación con la estación DSAGAB, Drenaje El Salado Aguas Abajo, que se alimentaba solo de esta descarga de la poza en temporada relativamente seca en agosto 2020 (Figura 123).

La intercepción de esta línea de evaporación (EvL), de pendiente 4,5, con las líneas meteóricas (GMWL y LMWL) prácticamente idénticas, revela una signatura inicial de estas aguas similar a los registros de GOTTA entre mayo y agosto 2013. Los datos de $\delta^{18}O$ y δ^2H del agosto 2020 son consistentes con los registros isotópicos de HIDROCERON (2007) y GOTTA (2013).

5.1.7.4.3. Resultados de la hidroquímica de las aguas subterráneas y superficiales.

5.1.7.4.3.1. Quebradas Aguirre y Chicalá.

Las estaciones QA (quebrada Aguirre) y QCAGAB (quebrada Chicalá aguas abajo) contenían en agosto 2020, a pesar de ser temporada relativamente seca, agua de precipitaciones recientes que durante el poco tiempo de contacto con la litología del stock Payandé y hacia abajo con las calizas de la formación Payandé elevó su mineralización ligeramente a 325 y 342 $\mu S/cm$ (192 y 242 mg TDS/L), casi completamente bicarbonatada (95 y 89 eq.%), de tipo Ca-Mg-HCO₃-(SO₄). Un mayor porcentaje de flujo base de las calizas presentaría mayor mineralización (Tabla 101, Figura 117 y Figura 118).

Debido al pH neutro (8,2 y 8,4), existen solo concentraciones traza de metaloides y metales pesados, solo Al³⁺ subiendo a 0,4-0,5 mg/L y Fe³⁺ a 0,5 mg/L casi completamente como Al(OH)₃ y Fe(OH)₃/FeOOH en suspensión, debido a la ligera turbidez natural del agua superficial (30 y 38 NTU) durante creciente caudal tras precipitaciones recientes y mayor porcentaje de escorrentía superficial. Estos finos con sus hidróxidos de metales en suspensión no perjudican la buena calidad de esta agua, aunque excedan, en un poco más de 0,2 mg/L, las recomendaciones de la Resolución 2115 del 2007 (Ministerio de la Protección Social – Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial).

5.1.7.4.3.2. Piezómetros PZM3 y PZM5.

El agua del piezómetro PZM5 de 218 m de profundidad presenta características muy similares, conductividad eléctrica de 584 $\mu S/cm$ (346 mg TDS/L), de tipo Ca-Mg-HCO₃, y el pH con 7,3 ligeramente menor que en los otros puntos (Tabla 101, Figura 117 y Figura 118). La reducción de aproximadamente 40 % del O₂ a 3,6 mg/L, un ORP relativamente bajo de 84 mV (\approx 294 mV Eh) y 0,01 mg As/L son los únicos indicios de que podría haber mezcla con algún porcentaje de agua subterránea subóxica del acuífero.

El agua subterránea de los piezómetros PZM3 y 5, muestra una signatura isotópica muy similar a las filtraciones y aguas superficiales, sólo muy ligeramente más pesada. La hidroquímica indica que en ambos casos no es representativa del agua subterránea circundante, sino mayormente de precipitaciones recientes y escorrentía superficial infiltrada en el taladro o casing del piezómetro y acumulada en la columna de agua estancada sobre el filtro, de donde se tuvo que extraer la muestra con bañero.

De ahí también la baja mineralización de 434 mg TDS/L, tipo Ca-HCO₃-SO₄, en PZM3, menor que en las filtraciones al pit Calizas. El pH 7,7 y las condiciones óxicas (121 mV ORP, 5 mg O₂/L) impiden que haya significantes concentraciones de metaloides y metales pesados.

La turbidez y 0,3-0,4 mg Al/L y 0,7-0,9 mg Fe/L, mayormente Al(OH)₃ y Fe(OH)₃, son solo consecuencia de finos inevitablemente movilizadas durante el muestreo de los piezómetros, no formarían parte del agua subterránea clara-cristalina, donde todos componentes suspendidos quedan siempre filtrados.

Tabla 101. TDS (mg/L), pH, Dureza, Saturación de Calcita y Tipos de Aguas Subterráneas y Superficiales en la Mina La Esmeralda

Punto	HCO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃	Ca	Mg	Na	K	Al	Mn	Fe	Cu	Zn	∑ Metales traza	TDS mg/L	pH	Dureza total mg CaCO ₃ /L	SI CaCO ₃	Tipo de agua > 10 eq. %
	eq. %																		
QA	95	4,7	0,4	0	67	22	9	1,3	0,11	0,009	0,05	0	0	0,17	192	8,2	149	0,6	Ca-Mg-HCO ₃
QCAGAB	89	11	0,5	0	71	20	7	1,4	0,1	0,005	0,1	0	0	0,21	242	8,4	158	0,7	Ca-Mg-HCO ₃ -SO ₄
INF3	10	89	0,1	0,1	70	19	10	0,8	0,01	3,00E-05	0	0	0	0,02	892	8,1	617	0,6	Ca-Mg-Na-SO ₄
INF1	9	90	0,3	0,75	79	14	7	0,7	0,01	2,00E-05	0	0	0	0,01	1148	8,1	763	0,7	Ca-Mg-SO ₄
INF2	17	81	0,4	2	69	18	12	0,7	0,01	8,00E-04	0	0	0	0,02	1028	7,9	607	0,7	Ca-Mg-Na-SO ₄ -HCO ₃
PL1	15	85	0,4	0	82	10	7	0,5	0,02	0,002	0,01	0	0	0,03	1386	7,7	877	0,7	Ca-Mg-SO ₄ -HCO ₃
PL2	8	91	0,4	0	81	11	7	0,5	0,01	3,00E-04	0	0	0	0,01	1378	7,9	881	0,7	Ca-Mg-SO ₄
SSD	12	88	0,4	0	83	10	7	0,5	0,01	0,002	0	0	0	0,02	1380	7,9	1 028	0,9	Ca-Mg-SO ₄
DSAGAB	11	89	0,4	0	83	10	6	0,5	0,01	5,00E-04	0	0	0	0,01	1486	8,1	1 038	1,1	Ca-SO ₄
PZM3	62	37	0,8	0,04	83	8	8	1,1	0,03	0,003	0,02	0	0	0,06	434	7,7	346	0,7	Ca-HCO ₃ -SO ₄
PZM5	91	8	0,4	0	72	18	9	0,7	0,02	0,015	0,03	0	0	0,07	346	7,3	291	0,2	Ca-Mg-HCO ₃ -SO

Nota: INF1, 2 y 3: Filtraciones en el interior del pit Calizas, aguas sulfatadas de avanzada mineralización. SSD, DSAGAB, PL1 y 2: Agua de sumideros del pit Calizas, afectadas por evaporación en la poza de sedimentación y en El Drenaje El Salado. QA, QCAGAB, PZM3 y 5: Aguas poco mineralizadas.

Fuente: WES Perú SAC, 2020

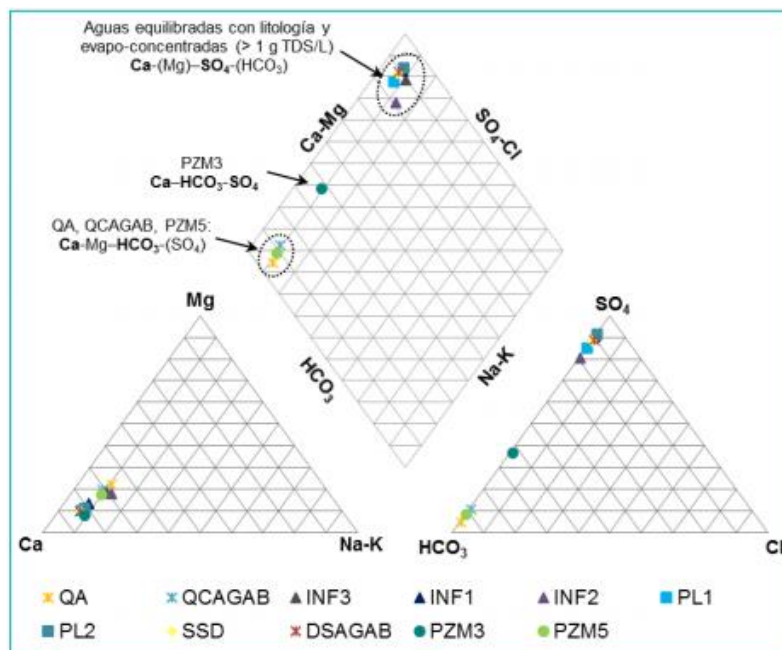


Figura 118. Diagrama Piper y concentraciones (meq/L) de iones principales en las aguas muestreadas en agosto de 2020.

Nota: Aguas equilibradas con la litología y evapo-concentradas (filtraciones y aguas de sumideros).

Fuente: WES Perú SAC, 2020

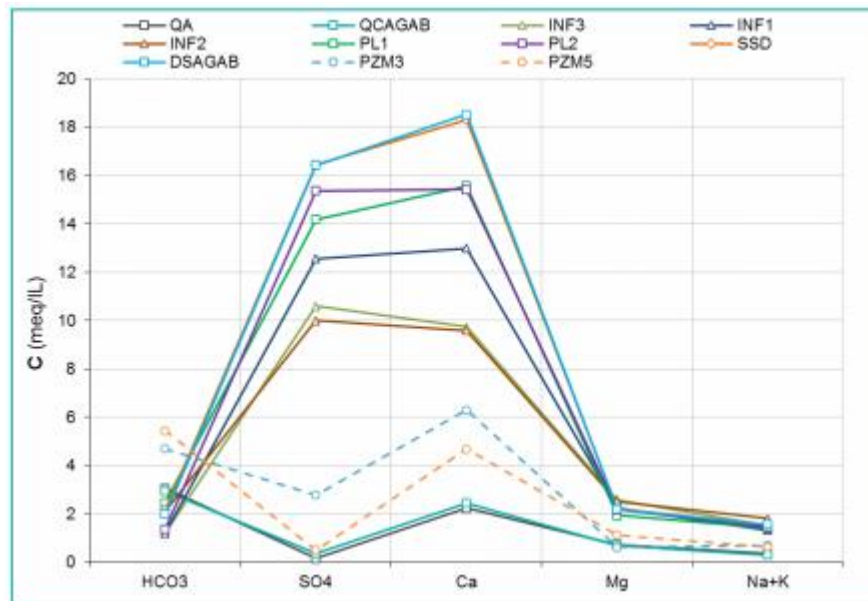


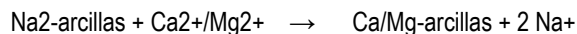
Figura 119. Diagrama Schoeller de concentraciones (meq/L) de iones principales en las aguas superficiales y subterráneas.

Nota: Las líneas discontinuas representan los piezómetros PZM3 y PZM5.

Fuente: WES Perú SAC, 2020

5.1.7.4.3.3. Filtraciones en el pit de calizas

Las filtraciones en el interior del pit Calizas INF1, 2 y 3 afloran preferentemente sobre intercalaciones menos permeables de las calizas entre las paredes suroccidentales y los sumideros del tajo, y muestran con la mineralización de 1138 - 1340 $\mu\text{S}/\text{cm}$ o 608-763 mg TDS/L una equilibración más avanzada con la litología que las aguas estancadas de los piezómetros. En el agua de tipo Ca-Mg-(Na)-SO₄-(HCO₃) existe Cl⁻ solo en concentraciones traza (0,1-0,4 eq.%), mientras Na⁺ representa al 7-12 eq.% de los cationes, lo que demuestra que son aguas subterráneas jóvenes cuyo Na⁺ proviene casi exclusivamente del intercambio de cationes en intercalaciones arcillosas de la formación Payandé (Tabla 101, Figura 117 y Figura 118):



El predominio de sulfato (SO₄²⁻) indica la oxidación de sulfuros en contacto con O₂ atmosférico en zonas previamente saturadas colgantes gradiente arriba (al oeste) del pit y lixiviación de SO₄²⁻ de las superficies frescas y reactivas en las paredes del pit, las rocas trituradas debajo y la escombrera superior. Pero en contacto con las calizas, el poco ácido generado no supera la capacidad buffer, se mantiene el pH $8 \pm 0,1$, y aparecen a consecuencia metaloides y metales pesados solo en concentraciones traza. Con la oxidación de los sulfuros se liberan también Mo⁶⁺ y Se⁶⁺ que forman oxianiones (MoO₄²⁻, SeO₄²⁻) altamente solubles, típicos de drenaje neutro. Los datos indican que se libera incluso 0,02-0,07 mg U₆⁺/L, como UO₂(CO₃)₃⁴⁻, tal vez proveniente de cenizas volcánicas o el contacto con el stock Payandé.

5.1.7.4.3.4. Sumideros del tajo y drenaje El Salado

Las características hidroquímicas e isotópicas de las filtraciones continúan casi iguales en los pit lake (PL1 y PL2), donde aumenta la mineralización a 1593 y 1571 $\mu\text{S}/\text{cm}$ o 1386 y 1378 mg TDS/L en contacto con las rocas trituradas con superficies frescas reactivas en el pit. El tipo de agua sigue siendo Ca-Mg-SO₄-(HCO₃) (Figura 117), donde siguen restos de Mo⁶⁺ y U⁶⁺ disueltos, mientras otros metaloides y metales pesados siguen en concentraciones traza cerca o debajo del límite de detección.

Esta agua permanece solo poco tiempo en los sumideros, por lo cual no se observa desplazamiento significativo de los isótopos 2H-18O por evaporación, sigue la signatura pegada a la línea meteórica. Esto cambia en la poza de sedimentación (SSD) a donde se bombea el agua de los sumideros. Ahí permanece el agua suficiente tiempo para evaporarse 5-6 % de su volumen, lo que genera mínima evapo-concentración (enriquecimiento de solutos por evaporación) a 1672 $\mu\text{S}/\text{cm}$ o 1380 mg TDS/L. Sigue igual la relación de los iones, tipo Ca-(Mg)-SO₄, el pH 7,9, y sólo trazas de metaloides y metales pesados, con restos de Mo⁶⁺ y U⁶⁺ de la oxidación de sulfuros en la pared del tajo y la zona no saturada detrás.

Como el Drenaje El Salado estaba seco en agosto 2020, solo se alimentaba de la poza de sedimentación, siendo esta agua la única encontrada en el arroyo en DSAGAB. El desplazamiento isotópico indica avance de la evaporación a $7,4 \pm 1$ vol.%, lo que coincide con el aumento de la mineralización a 1486 mg TDS/L, tipo Ca-SO₄. No cambia nada en la relación de los iones desde la poza de sedimentación (SSD), lo que demuestra que no hubo ninguna mezcla con otra agua. Si hubiera alguna mezcla la mineralización del agua del arroyo se hubiera diluido y se elevaría el porcentaje de HCO₃-.

Con esta mineralización se superan ligeramente las recomendaciones de potabilidad de 1000 mg TDS/L de la OMS, de SO₄²⁻ (789 mg/L vs. 500 recomendados por la OMS y 400 mg/L por el Art.2.2.3.3.9.3 del Decreto 1076 de 2015, Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible), y de U⁶⁺ (0,017 mg/L vs. 0,015 mg/L de la OMS).

Con respecto a las características químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana, se supera con 371 mg Ca²⁺/L los 60 mg/L de la Resolución 2115 (2007) y con 0,05 mg Mo⁶⁺ /L la recomendación canadiense y colombiana de 0,01 mg/L para evitar acumulación de molibdeno en suelos y cultivos (CCME 1987; Art.2.2.3.3.9.5 / Criterios de calidad para uso agrícola).

Ninguna de estas concentraciones pudiera afectar la salud de humanos o ganado. Son límites técnicos basados en sabor, coloración y otros aspectos del agua, no basados en aspectos de salud.

5.1.7.4.4. Resultados de la isotopía

5.1.7.4.4.1. Registro y contexto de análisis anteriores

Los registros isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$) de HIDROCERON (2007) y GOTTA (2013) confirman la filtración de agua superficial de la quebrada Chicalá a la parte occidental del pit Calizas, donde las fallas facilitan una conexión hidráulica. Esta filtración difusa (INF3) fue de muy bajo caudal en agosto de 2020.

Las aguas estancadas en el pit Calizas eran más afectadas por evaporación en 2006 que, en 2013, tal vez por menor tasa de bombeo y mayor tiempo de residencia en el sumidero en 2006. Las tasas de evaporación en el sumidero varían entre 2 y 13 %.

Las variaciones mensuales de $\delta^{18}\text{O}$ $\delta^2\text{H}$ en las precipitaciones de mayo a agosto 2013 se reflejaron casi iguales en las aguas de los sumideros del pit Calizas, lo que demuestra que las aguas estancadas contienen principal o exclusivamente agua meteórica de precipitaciones recientes con poco tiempo de residencia en los sumideros, debido a la alta tasa de bombeo (20-30 l/s). El porcentaje de precipitación directa en el pit Calizas, de escorrentía superficial hacia el pit, y de

filtración de la quebrada Chicalá a la parte occidental del pit Calizas, requeriría un balance hídrico y análisis mensuales o por lo menos trimestrales de las variaciones estacionales.

Igual como en agosto 2020, no hubo indicios de agua subterránea (flujo base) con signatura isotópica constante (promedio ponderado anual) en los sumideros. Lo que reafirma principalmente la presencia de agua meteórica en los sumideros en el pit Calizas. Las variaciones isotópicas del mayor afloramiento PCG-02 en el pit mostraban que provenía de precipitaciones recientes, que no tenía conexión hidráulica con aguas subterráneas de signatura isotópica constante (WES 2018; Figura 119 y Figura 120).

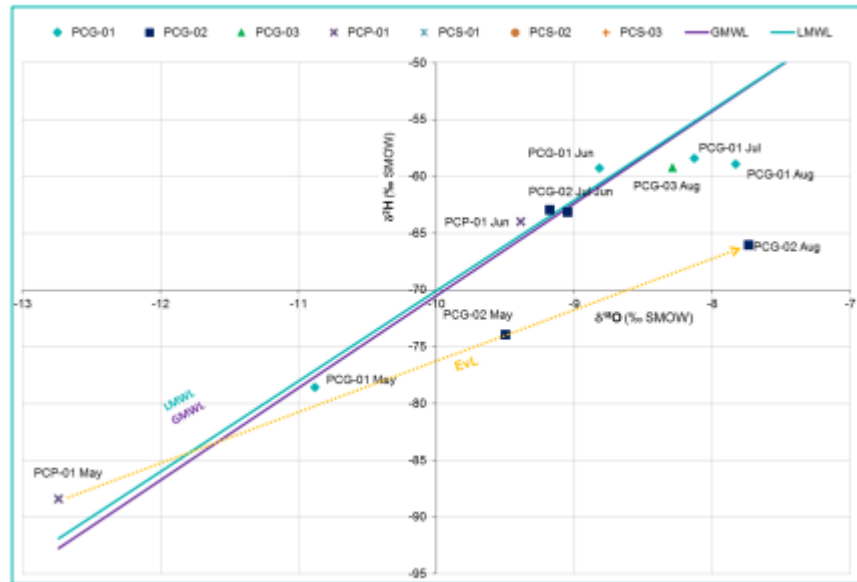


Figura 120. Composición isotópica de precipitaciones y sumideros del pit (Gotta 2013).
Fuente: GOTTA (2013).

El informe de HIDROCERON (2007) no especifica fechas de monitoreo, que serían importantes para poder considerar variaciones estacionales en la interpretación de los datos isotópicos. Este estudio no incluyó análisis hidroquímicos. Estos comienzan con GOTTA (2013), y es actualizada por INGETEC (2016) basado en los datos de 2013. Son los parámetros más básicos de quebradas, solo poco de los sumideros del pit. Con SGS (2018) comienza la caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas en los piezómetros, enfocado en la calidad del agua. Con solo pocos parámetros hidroquímicos selectos, no se podía todavía comparar las aguas superficiales y subterráneas con las del sumidero para determinar su origen.

De ahí surgió la necesidad de combinar análisis isotópicos con hidroquímica completa, sobre todo aniones por IC y metales por ICP-MS, para determinar si son las filtraciones, más escorrentía superficial, o agua subterránea que alimenta los sumideros (pit sumps) o pequeños pit lakes.

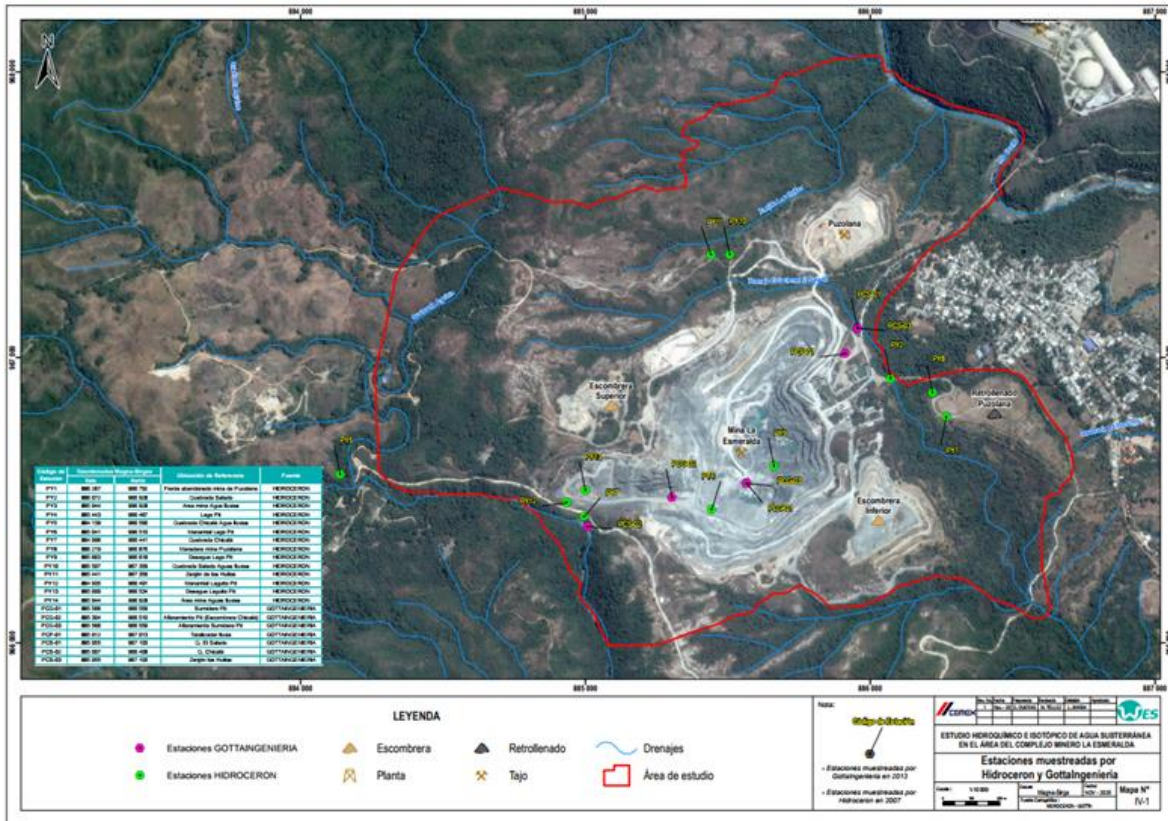


Figura 121. Estaciones Muestreadas por Hidroceron (2007) y GOTTA (2013).
Fuente: WES Perú SAC, 2020

5.1.7.4.4.2. Metodología usada para el análisis isotópico

- Isótopos locales comparados con la estación meteorológica de Bogotá

La estación meteorológica de Bogotá al costado del aeropuerto El Dorado (Figura 121) proporciona desde 1971 datos mensuales continuos de los isótopos 2H y 18O, que facilitan la interpretación de variaciones de δ2H- δ18O en la Mina La Esmeralda, 113 km al WSW de Bogotá, aunque sean isotópicamente más pesadas, debido al efecto de altitud.

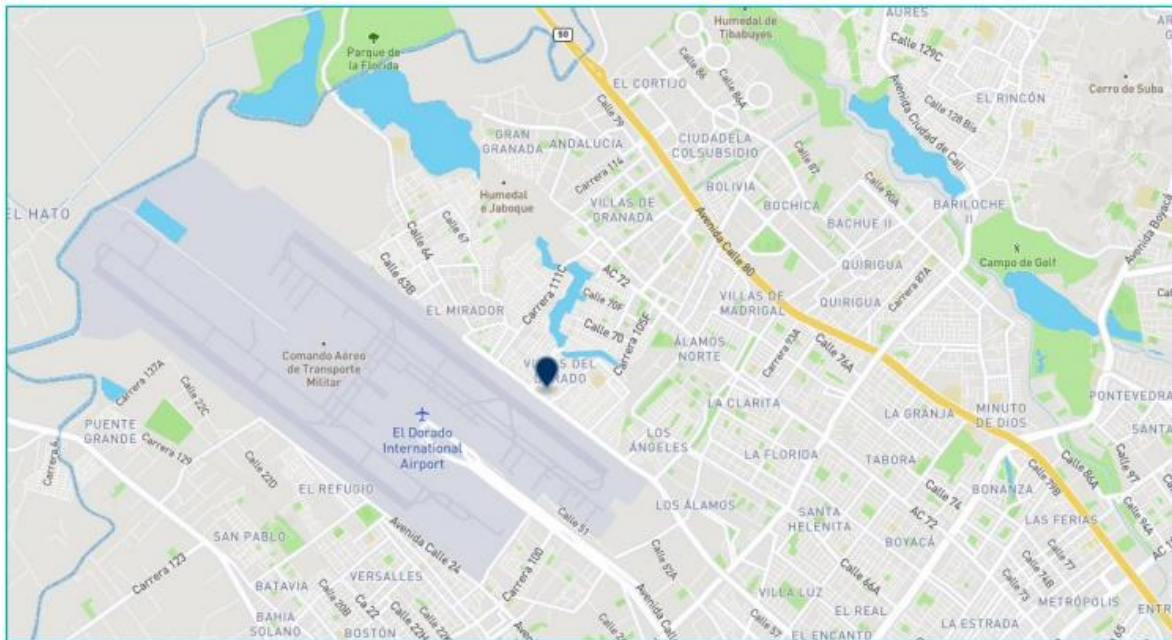


Figura 122. Ubicación de la Estación Meteorológica de Bogotá (2 250 m s.n.m.) con registros mensuales continuos de ^2H - ^{18}O entre 1971 y 2016.

Fuente: Google Maps, Modificado de WES Perú SAC, 2020

- Variaciones estacionales y línea meteórica local (LMWL) de ^2H - ^{18}O

Las variaciones estacionales de la signatura $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ en las precipitaciones dependen casi exclusivamente del efecto de masa (rain out), i.e. cuanto más intensas las lluvias, más ligera su signatura isotópica. Debido a mínimas variaciones estacionales de la temperatura en latitudes tropicales, esta no influye significativamente en la composición isotópica de las precipitaciones, contrario a lo que se suele observar entre latitudes subtropicales y polares. Por tanto, se registra precipitaciones isotópicamente más ligeras durante la temporada de intensas lluvias entre abril y julio, particularmente en mayo y junio, y nuevamente en octubre y noviembre, debido a lluvias bimodales con la migración de la zona de convergencia intertropical (ZCIT) cerca al ecuador. En los meses más secos, enero – febrero - marzo, quedan las precipitaciones más enriquecidas de ^2H - ^{18}O .

Consecuentemente se desplaza el promedio ponderado hacia signaturas bajas de $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ de temporada húmeda, inferior al promedio no ponderado de los 12 meses (Figura 122):

$$\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i * P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} = \delta_{IWAvg} \quad (7)$$

con: P_i (mm/mes): precipitaciones mensuales

δ_i (‰ SMOW): $\delta^{18}\text{O}$ o $\delta^2\text{H}$ de las precipitaciones mensuales

δ_{IWAvg} (‰ SMOW): promedio anual ponderado (long-term weighted average) de la signatura $\delta^{18}\text{O}$ o $\delta^2\text{H}$ de las precipitaciones.

El promedio ponderado es la signatura que deben representar las aguas subterráneas locales, más un diminuto enriquecimiento de ^{18}O y ^2H por evaporación inicial en la superficie de los suelos antes de la infiltración, pero es este efecto

generalmente casi insignificante en el clima húmedo de Colombia.

La correlación lineal de las variaciones estacionales de $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ resulta en una línea meteórica local (LMWL) prácticamente idéntica al promedio global (GMWL, global meteoric water line):

$$\left(\frac{(\text{}^2\text{H}/\text{}^1\text{H})_{\text{muestra}}}{(\text{}^2\text{H}/\text{}^1\text{H})_{\text{estándar}}} - 1 \right) * 1000\text{‰} \text{VSMOW} = \delta^2\text{H} \approx 8.13 \delta^{18}\text{O} + 10.8 \text{‰} \quad (8)$$

Esto demuestra que las precipitaciones colombianas provienen de humedad oceánica sin mayor porcentaje de vapor de evapotranspiración, como ocurre en la selva amazónica, que genera un mayor exceso de 2H en precipitaciones de selva y sierra peruana y boliviana.

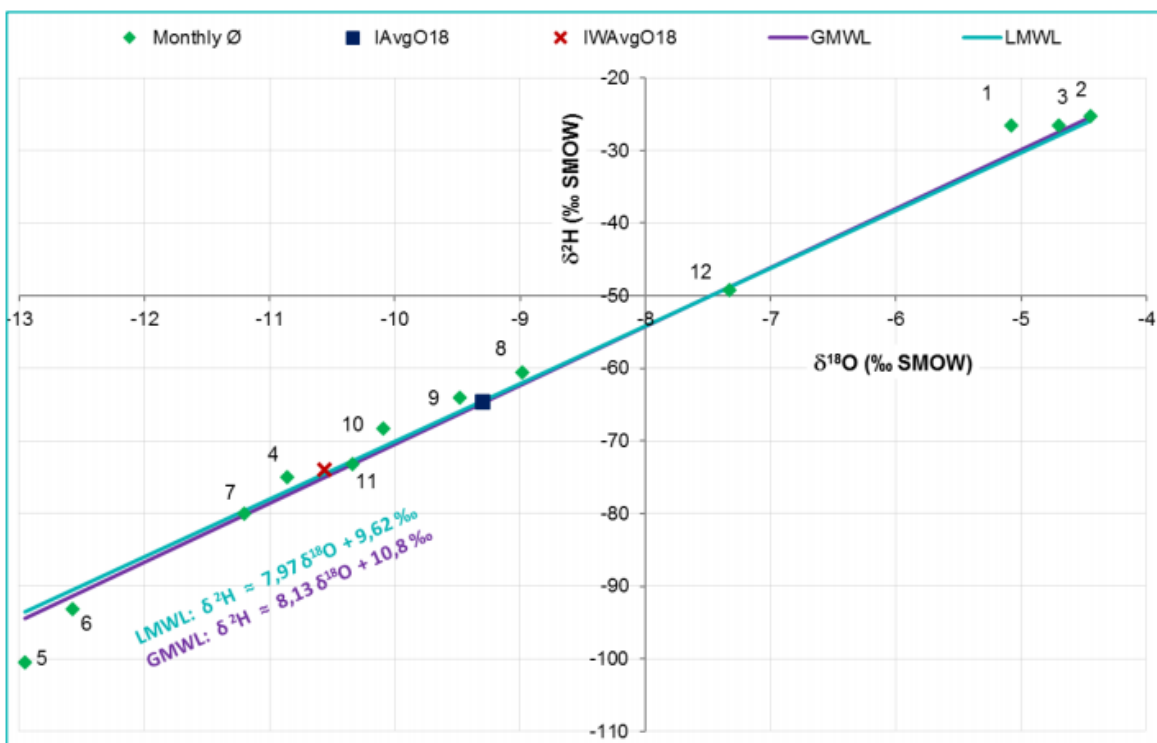


Figura 123. Composición isotópica de precipitaciones mensuales (promedio) y Línea Meteórica Global (GMWL) y Local (LMWL) de Bogotá (2 250 m s.n.m.) Promedios mensuales, anual (IAvgO18), y promedio ponderado (IWAvgO18 = $\frac{\sum(\delta_i \cdot P_i)}{\sum P_i}$ según la cantidad de precipitación mensual).

Fuente: GNIP, modificado de WES Perú SAC, 2020.

Durante la evaporación se enriquecen los isótopos pesados ^{18}O y ^2H en el agua, mientras se empobrecen en el vapor. A 100% humedad, el transporte de moléculas de H_2O es bidireccional y el fraccionamiento isotópico solo de equilibrio ($\epsilon^{18}\text{O}_{\text{v-l}} \approx -10 \text{‰}$ a 25 °C y -11‰ a 10 °C). Debido a menor tamaño molecular y energía de unión del ^2H , el fraccionamiento es más de 8 veces mayor para ^2H que para ^{18}O . De ahí la pendiente 8 de la Global Meteoric Water Line (GMWL). y variaciones 8 veces mayores del $\delta^2\text{H}$ que del $\delta^{18}\text{O}$ a lo largo de la línea meteórica.

La relación entre $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ es lineal, de pendiente 8, debido al fraccionamiento isotópico de equilibrio (sin componente cinético) a 100 % humedad relativa durante la condensación en nubes, que afecta proporcionalmente tanto al ^2H como al ^{18}O .

Durante evaporación a menos de 100 % humedad ocurre además fraccionamiento cinético que eleva el fraccionamiento total del 18O a 15-17 ‰, mientras es poco significativo para 2H que es mucho menos sensitivo al fraccionamiento cinético que los isótopos de oxígeno relativo a su enorme fraccionamiento de equilibrio, i.e. 2H es relativamente menos empobrecido por fraccionamiento cinético durante la evaporación que 18O (https://en.wikipedia.org/wiki/Kinetic_fractionation). A consecuencia, el 2H es más apto que el 18O para calcular el avance de la evaporación.

Debido a mayor fraccionamiento isotópico (de equilibrio + cinético) durante la evaporación que durante la condensación (solo de equilibrio a 100 % humedad), son las precipitaciones isotópicamente más ligeras que el agua oceánica inicial ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H} \approx 0$ ‰ V-SMOW) y se genera el "exceso de deuterio" de ~ 10.8 ‰ [ecuación 8], que refleja el mayor fraccionamiento isotópico cinético del 18O que del 2H.

Luego contribuyen efectos de masa, temperatura, continentalidad y/o altitud al empobrecimiento de los isótopos pesados tierra adentro, pero suelen continuar alineadas a lo largo de la GMWL.

- Desplazamiento ^2H - ^{18}O por evaporación

El desplazamiento de la signatura isotópica en las aguas estancadas de los pit lakes desde la LMWL a lo largo de la EvL (evaporation line) de inclinación 4,5 (CLARK & FRITZ 1997, p. 43), confirmado en Ticlio (sierra central de Perú) por WES (2016), permite calcular la fracción de agua residual (f) o el porcentaje evaporada (1-f), basado en el fraccionamiento isotópico, descrito a continuación:

El factor de fraccionamiento α entre reactante A y producto B (ejemplo, agua y vapor durante la evaporación) es:

$$\alpha = \frac{R_B/R_{St}}{R_A/R_{St}} = \frac{R_B}{R_A} = \frac{1000+\delta_B}{1000+\delta_A} \quad (9)$$

Donde:

R: Ratio isotópico de reactante (A), producto (B) y estándar (St) δ : $\delta^{18}\text{O}$ o $\delta^2\text{H}$ del reactante (A, agua) y producto (B, vapor).

El factor de enriquecimiento ϵ es aproximadamente la diferencia entre signatura isotópica del producto y del reactante, si el fraccionamiento no es demasiado alto:

$$\epsilon(\text{‰}) = (\alpha - 1) * 1000\text{‰} = \frac{\delta_B - \delta_A}{1000 + \delta_A} * 1000\text{‰} \approx 1000 * \ln \alpha \approx \delta_B - \delta_A \quad (10)$$

Al evaporarse, preferentemente los isótopos ligeros, se enriquecen los isótopos pesados en el agua residual. Al quedar el producto (vapor) isotópicamente más ligero durante la evaporación, son el fraccionamiento $\alpha_{v-l} < 1$ y el factor de enriquecimiento negativo ($\epsilon_{v-l} < 0$ ‰).

El vapor está aproximadamente 10 ‰ empobrecido de 18O relativo al agua líquida, cuando el fraccionamiento es sólo de equilibrio durante condensación o evaporación a 100 % humedad. A baja temperatura aumenta el fraccionamiento de equilibrio ligeramente (Tabla 102), a 22 ± 2 °C es de $18\epsilon_{v-l} = -9.6 \pm 0.3$ ‰ para 18O (Clark & Fritz 1997, front page; Kakiuchi & Matsuo 1979). El fraccionamiento cinético a menos de 100 % humedad eleva el fraccionamiento total a 16 ‰.

El fraccionamiento de 2H – casi exclusivamente de equilibrio – es más de 8 veces mayor ($2\epsilon_{v-l} = -90 \pm 3$ ‰) por menor tamaño molecular y energía de unión. De ahí la inclinación 8 a 8,2 de las líneas meteóricas.

Tabla 102. Factores de fraccionamiento (α) y enriquecimiento $\{\epsilon = (\alpha-1)*1000\}$ de 18O y 2H durante equilibrio (100 % humedad), en función a la temperatura de transición líquido/vapor.

T (°C)	T (K)	ϵ_{v-l} (‰)		α_{v-l}		Ratio ϵ
		18O	2H	18O	2H	
0	273	-12,2	-99,9	0,988	0,9	8,21
5	278	-11,5	-94,5	0,989	0,906	8,24
8	281	-11,1	-91,4	0,989	0,909	8,24
10	283	-10,8	-89,3	0,989	0,911	8,23
20	293	-9,81	-79,5	0,99	0,92	8,11

Fuente: Clark & Fritz (1997, cover page); Kakiuchi & Matsuo (1979).

El diminuto fraccionamiento cinético de 2H, relativo a su enorme fraccionamiento de equilibrio, lo hace más apto que 18O para estimar el porcentaje de agua residual tras evaporación, calculando como destilación Rayleigh, o aproximándose como fraccionamiento de equilibrio en condiciones cerradas (parte final de la siguiente ecuación; Gat 2010, p.29), lo que da resultados casi idénticos (ecuación 11), mientras la evaporación no esté demasiado avanzada:

$$f = \left(\frac{\delta_A + 1000}{\delta_{A_0} + 1000} \right)^{1/\alpha-1} = \left(\frac{\delta_A + 1000}{\delta_{A_0} + 1000} \right)^{1000/\epsilon} \approx 1 - \frac{\delta_{A_0} - \delta_A}{\epsilon} \quad (11)$$

Donde:

$\epsilon(\text{‰}) = (\alpha-1)*1000\text{‰}$: Fraccionamiento isotópico total

δA : δ^{18O}/δ^{2H} de las aguas enriquecidas en los isótopos pesados por evaporación

δA_0 : Signatura inicial pre-evaporación de las aguas subterráneas.

5.1.7.4.4.3. Valores isotópicos en el área de estudio mina La Esmeralda

Tal como se espera para una evaporación alrededor de los 20 °C, se obtiene con 18O las mismas tasas de evaporación asumiendo un fraccionamiento efectivo de $\epsilon_{18Ov-l} = -16 \text{‰}$ (-10 ‰ fraccionamiento de equilibrio, más -6 ‰ fraccionamiento cinético).

Fracciones residuales de $f = 95$ a 82 % del agua (estancada o de muy lenta filtración) significan pérdidas de 5 a 18 % del volumen inicial por evaporación (Tabla 103).

Tabla 103. δ^{18O} y δ^{2H} (‰ SMOW) de las aguas, valor inicial pre-evaporación en la intersección con la LMWL de Bogotá, y porcentaje de agua evaporada (1-f).

Punto de monitoreo	δ^{18O}	δ^{2H}	Valor inicial pre- evaporación		Porcentaje de agua evaporada (%)
			δ^{18O_0}	δ^{2H_0}	
INF3	-4,7	-40	-8,1	-55	18
SSD	-7,5	-53,9	-8,5	-58	5,4

Punto de monitoreo	$\delta^{18}O$	δ^2H	Valor inicial pre- evaporación		Porcentaje de agua evaporada (%)
			$\delta^{18}O_0$	δ^2H_0	
SSD-1	-7,6	-54,5	-8,6	-59	5,9
DSAGAB	-7,3	-53	-8,5	-59	7,4

$\epsilon^{18}O_{v-l} = -9.8 \text{ ‰}$, $\epsilon^{2}H_{v-l} = -79.5 \text{ ‰}$ a 20 °C

Fuente: WES Perú, 2020.

El entorno de la Mina La Esmeralda está a 700 – 850 m s.n.m., es decir 1550 – 1400 m más bajo que la estación meteorológica de Bogotá, donde el promedio anual ponderado de las precipitaciones es de $-10,6 \text{ ‰}$ $\delta^{18}O$ y -74 ‰ δ^2H .

Con un gradiente vertical de $\sim 2 \pm 0,5 \text{ ‰}$ SMOW del $\delta^{18}O$, y 8 veces mayor del δ^2H , el promedio ponderado en Payandé debería estar por $-7,7 \pm 0,5 \text{ ‰}$ y $-52 \pm 4 \text{ ‰}$ SMOW. Debido a la posición en el valle, habrá ligero empobrecimiento de los isótopos pesados por las lluvias anteriores en la sierra. Esto corresponde con los valores encontrados por GOTTA en las precipitaciones y aguas superficiales en La Esmeralda entre mayo y agosto 2013, que sugieren un promedio ponderado alrededor de $-8,7 \pm 0,5 \text{ ‰}$ y $-60 \pm 4 \text{ ‰}$ SMOW del $\delta^{18}O$ y δ^2H .

Las aguas no están afectadas significativamente por evaporación, excepto en INF3, SSD y DSAGAB, muestran muy poca variación isotópica en agosto 2020, son muy homogéneas, y son isotópicamente un poco más pesadas que en GOTTA (2013), con el $\delta^{18}O$ entre $-7,3$ y $-8,3 \text{ ‰}$ SMOW, debido a que estas aguas provienen principalmente de precipitaciones recientes de las últimas semanas, que reflejan temporada relativamente seca con isotopía más pesada.

Las muestras del pit lake (PL1 y 2) no son significativamente afectados por evaporación, debido a poco tiempo de estadía en los sumideros por frecuente bombeo a la piscina de sedimentación, donde luego sí se evapora 5-6 % del agua (muestra SSD y su duplicado SSD-1). Luego avanza la evaporación de esta descarga de la piscina de sedimentación en el arroyo seco, sin mezcla con otra agua en agosto 2020, a $7.4 \pm 0.3 \text{ ‰}$ en DSAGAB, 900 m río abajo de la piscina de sedimentación.

La diminuta filtración INF3, tomada durante horas porque solo goteaba de la pared suroeste del pit Calizas, está afectada por $18 \pm 1 \text{ ‰}$ de evaporación, debido a exposición superficial de esta humedad durante el muy lento flujo en la pared. Su línea de desplazamiento por evaporación (EvL), de inclinación 4,5 debajo de la línea meteórica, revela un valor inicial idéntico a la de quebrada Chicalá aguas abajo en agosto 2020 (Figura 123). Esto parece confirmar que puede ser filtración de esta quebrada, lo que ya se dedujo de la revisión de los datos isotópicos de HIDROCERON (2007) y GOTTA (2013). Ver Figura 124.

Similar valor isotópico entre los sumideros PL1 y 2, el agua de quebrada Chicalá y las mayores filtraciones al tajo (INF1 y 2) confirma – igual como la hidroquímica- que estos sumideros se alimentan principalmente de estas filtraciones, más las precipitaciones recientes directas y escorrentía superficial en las paredes del pit Calizas. Si los sumideros recibiesen agua subterránea directamente debajo, tendrían un valor constante que reflejaría el promedio anual ponderado, sin las variaciones observadas en GOTTA (2013). Si se registrara las variaciones estacionales de 2H – 18O en los pit lakes, se podría demostrar, de manera más clara, que los pit lakes no provienen de afloramientos de agua subterránea, sino solo de filtraciones someras y escorrentía superficial (Figura 125).

Las aguas no afectadas por evaporación, y la intercepción de las líneas de evaporación (EvL) de INF3, SSD y DSAGAB con las líneas meteóricas (GMWL y LMWL) prácticamente idénticas, revela un valor inicial de estas aguas similar a los registros de GOTTA entre mayo y agosto 2013. Los datos de $\delta^{18}O$ y δ^2H de agosto 2020 son consistentes con los registros isotópicos de HIDROCERON (2007) y GOTTA (2013).

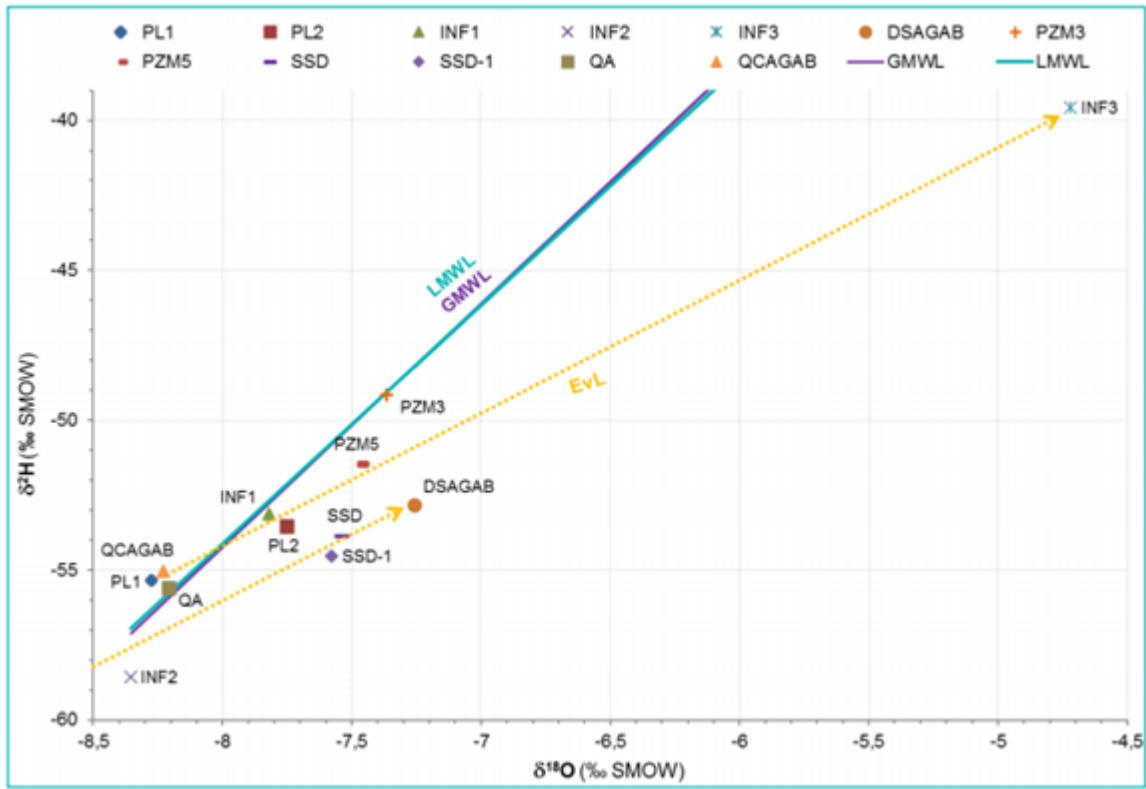


Figura 124. Valores 2H-18O de las aguas superficiales y subterráneas.
Fuente: WES Perú SAC, 2020.

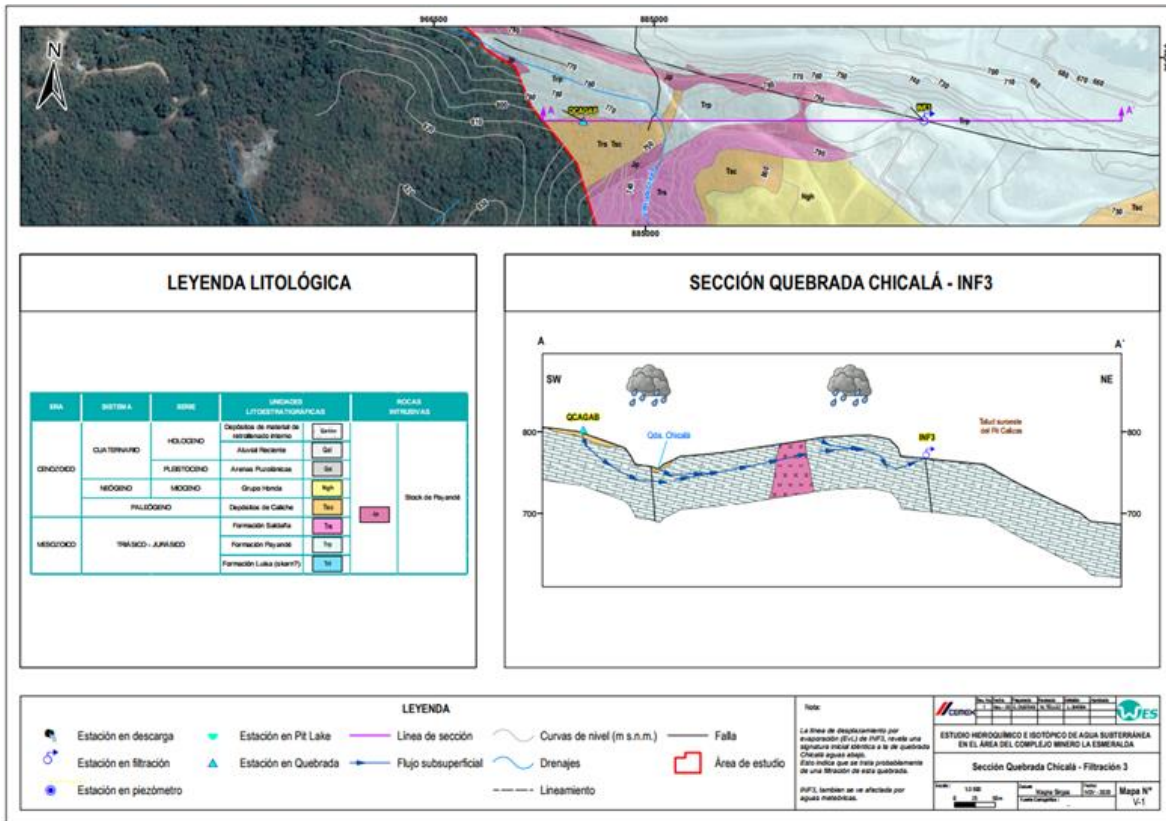


Figura 125. Interpretación de la relación entre la quebrada Chicalá y la filtración INF3.
Fuente: WES Perú SAC, 2020.

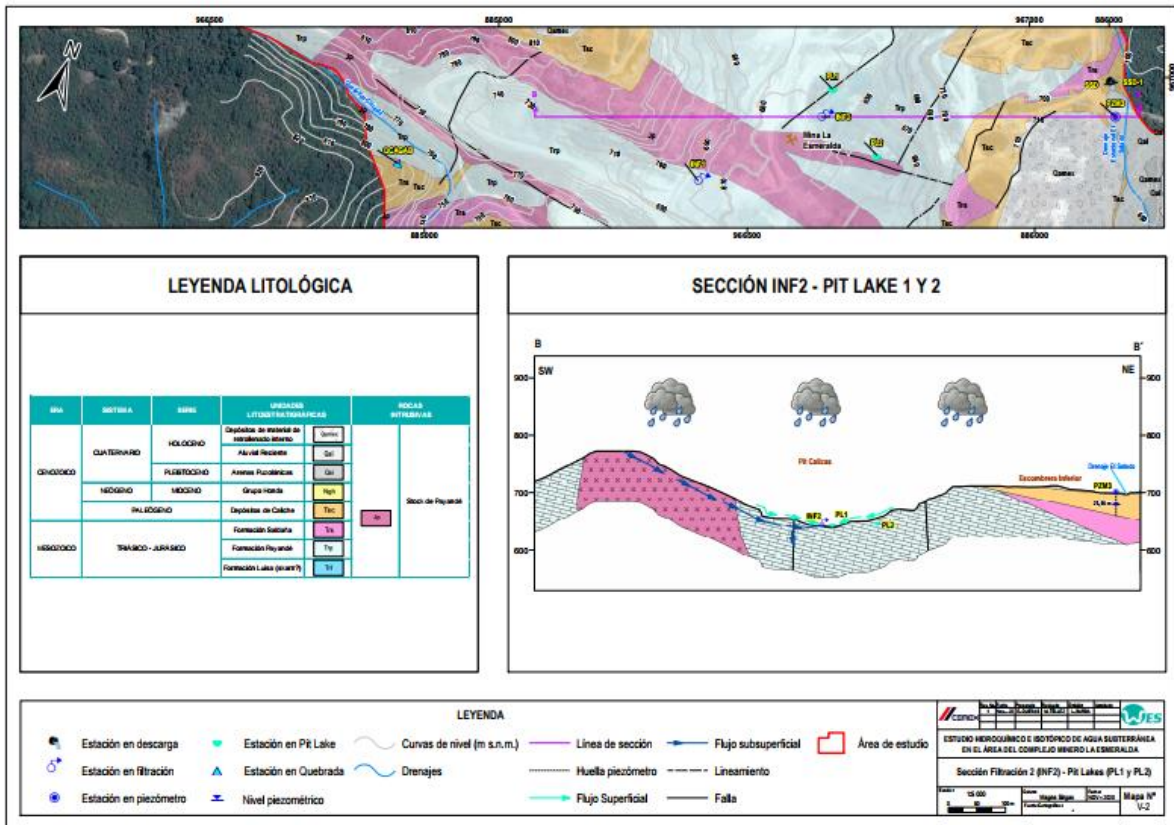


Figura 126. Interpretación de la relación entre los Pit Lake PL1 – PL2 y filtraciones INF1 y INF2.
Fuente: WES Perú SAC, 2020.

5.1.7.4.4.4. Consideraciones a la isotopía INGETEC

El objetivo principal de la aplicación de isótopos ambientales de δD y $\delta^{18}O$ es comprender el funcionamiento del sistema hidrogeológico determinando características relacionadas al origen del agua, zonas de recarga, direcciones de flujo, conexiones y posibles patrones de mezcla entre las diversas fuentes de agua, así como su vulnerabilidad. Se evidencian problemas metodológicos desde la planeación de la red de muestreo, donde no existen muestras representativas de las aguas subterráneas asociadas a las unidades geológicas objeto de explotación, que permitan realizar los análisis de proveniencia de las aguas con patrones de mezcla no identificados.

En cuanto a la línea meteórica, ésta constituye una herramienta utilizada para la interpretación de los resultados isotópicos de muestras de agua provenientes de los hidrosistemas investigados. La concentración de isótopos estables δD y $\delta^{18}O$ está controlada en la lluvia por diversos factores, entre los que se encuentran, la temperatura de formación de las nubes, la topografía o altura sobre el nivel del mar, la latitud, la continentalidad (transporte de las masas húmedas desde el mar hacia el continente), la época del año y la cantidad de precipitación (Clark y Fritz, 1997), es por ello que existe un error en las interpretaciones realizadas dado que como referente se ha utilizado la línea isotópica local para Bogotá, localizada a 2.600m de altura, cuando la zona del proyecto presenta altitudes entre los 500 m y 800 m de altura, siendo el patrón de comparación erróneo, ya que no se utilizó al menos la línea isotópica para Colombia (Rodríguez, 2008) o la línea isotópica mundial.

En estos estudios tampoco se evidencia la utilización de isótopos inestables o radiactivos como el Tritio (3H), orientado a determinar la edad del agua y las tasas de renovación, entre otros, por lo que su objetivo como validador del modelo

hidrogeológico conceptual planteado, la metodología isotópica aplicada necesita ser complementada y reinterpretada con complemento y análisis de balance de masas, para poder determinar los escenarios de mezclas posibles en los diferentes reservorios presentes en la zona de estudio.

5.1.7.5. Evaluación Hidrogeoquímica e Isotópica - Resultados Análisis Ingetec.

Basado en el inventario de puntos de agua subterránea, se definió la campaña de muestreo de aguas subterráneas. No obstante, una vez en campo, se determinó que varios de los puntos de agua identificados se encontraron secos, por lo que se tomó la muestra en dos puntos denominados piezómetro 3 y piezómetro 5.

Tabla 104. Localización puntos de monitoreo calidad de agua subterránea

Fecha Del Monitoreo	Ubicación	No Muestra	Coordenadas Planas Origen Único		Coordenadas Geográficas Wgs84	
			Norte	Este	Latitud	Longitud
25/02/2021	PIEZÓMETRO 1*	A-21/026647	2032346.874	4766106.253	4.28984	-75.10818
25/02/2021	PIEZÓMETRO 3	A-21/023129	2033047.636	4766593.234	4.29619	-75.10381
25/02/2021	PIEZÓMETRO 5	A-21/023128	2032350.405	4766028.565	4.28987	-75.10888
25/02/2021	PIEZÓMETRO 7*	A-21/026654	2033090.130	4766820.891	4.29658	-75.10176
25/02/2021	PIEZÓMETRO 8*	A-21/026650	2033427.904	4766623.140	4.29963	-75.10355
25/02/2021	PIEZÓMETRO 9*	A-21/026656	2033660.069	4766632.659	4.30173	-75.10347

*El sistema se encontró seco

Fuente: AGQ Prodycon Colombia S.A.S.

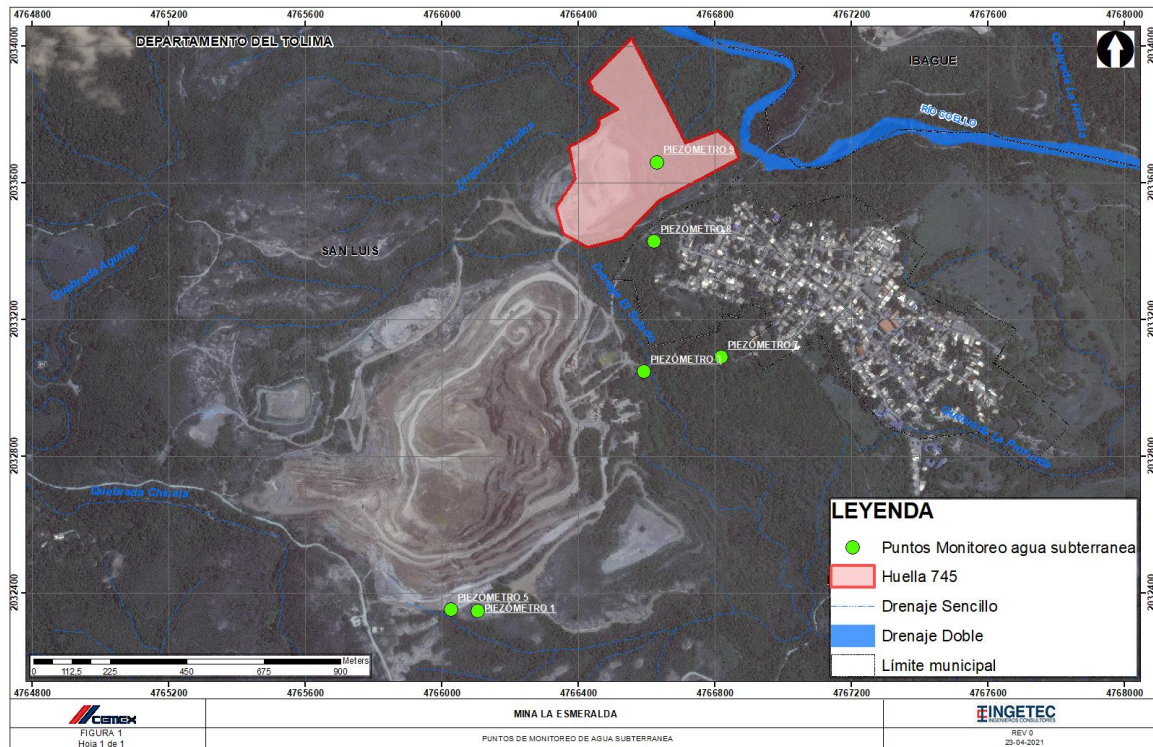


Figura 127. Localización monitoreo agua subterránea
Fuente: elaboración propia.



Fotografía 85. Piezómetro 1
Fuente: elaboración propia.



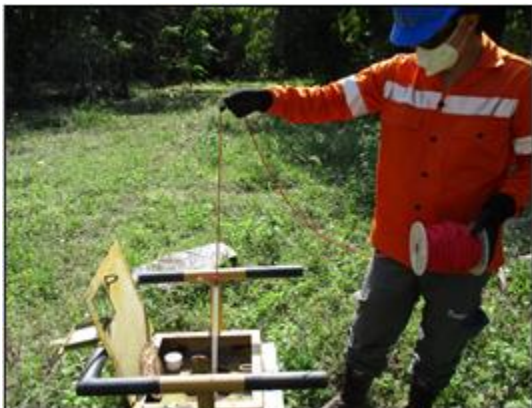
Fotografía 86. Piezómetro 3
Fuente: AGQ Prodycon Colombia S.A.S.



Fotografía 87. Piezómetro 5
Fuente: AGQ Prodycon Colombia S.A.S.



Fotografía 88. Piezómetro 7
Fuente: AGQ Prodycon Colombia S.A.S.



Fotografía 89. Piezómetro 8
Fuente: AGQ Prodycon Colombia S.A.S.



Fotografía 90. Piezómetro 9
Fuente: AGQ Prodycon Colombia S.A.S.

5.1.7.5.1. Calidad del agua

Se realizó la campaña de muestreo el día 25 de febrero de 2021. La toma de muestras para análisis de laboratorio, análisis in situ, preservación y transporte se realizó por personal técnico del laboratorio de calidad de agua acreditado para muestreo simple, compuesto e integrado (AGQ Prodycon Colombia S.A.S.). En el Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.027 se presenta resolución de acreditación del laboratorio, certificados de calibración de los equipos, formatos de campo y resultados.

Los parámetros muestreados corresponde a los establecidos en los términos de referencia de EIA Proyectos de explotación minera: pH, conductividad eléctrica, aniones y cationes (Na^+ , K^+ , Mg^{++} , Ca^{++} , Fe^{++} , SO_4^- , Cl^- , NO_3^- , CO_3^- , HCO_3^-), Coliformes totales y fecales, E Coli, SDT, Eh, grasas y aceites, TPH.

En la Tabla 105 se presenta los resultados obtenidos.

Tabla 105. Resultados monitoreo calidad de agua subterránea

Parámetros	Unidades	Técnica	25/02/2021	
			Proyecto Mina La Esmeralda	
			Piezómetro 3	Piezómetro 5
			A-21/023129	A-21/023128
INSITU				
Oxígeno Disuelto In Situ Medido MA	mg/L	SM 4500-OG/ASTMD-888-12_OxiDis_A_ELECTRM	3.04	3.06
pH In Situ Medido MA	Unidades de pH	SM 4500 H+B_pH_A_ELCTRM	6.7	6.6
Temperatura In Situ Medido MA	°C	SM 2550B_Tem_A_ELECTRM	28.9	30.7
PARÁMETROS MEDIDOS EN LABORATORIO				
Aceites y Grasas	mg/L	SM 5520 C_GyA_A_FTIR	< 4	< 4
Alcalinidad Total	mg/L CaCO3	SM 2320 B_AlcTotBic_A_CALC	193	297
Aluminio Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	0.338	< 0.2
Arsénico Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	0.06	< 0.04
Bicarbonatos	mg/L CaCO3	SM 2320 B_AlcTotBic_A_CALC	193	297
Cadmio Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	< 0.01	< 0.01
Calcio Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	235	115
Carbonatos	mg/L	SM2320B_CarBicHid_A_CALC	< 5	< 5
Cloruros	mg/L	SM 4110 B Mod_Ani_A_CRM_ION	9.6	2.3
Cobre Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	< 0.1	< 0.1
Coliformes Fecales por NMP	NMP/100mL	SM 9221 E_ColFec_A_NMP	2	< 1.84
Coliformes Totales por NMP	NMP/100mL	SM9221B Mod_ColFec_A_TUB_MUL	2700	9200
E coli	NMP/100mL	SM 9221B Mod Coliformes Totales / Ecoli NMP En aguas	0	0

Parámetros	Unidades	Técnica	25/02/2021	
			Proyecto Mina La Esmeralda	
			Piezómetro 3	Piezómetro 5
			A-21/023129	A-21/023128
Conductividad Eléctrica	μS/cm	SM 2510 B_ConEle_A_ELECTM	1152	590
Cromo Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	< 0.05	< 0.05
DBO5	mg/L	SM5210B-C/ASTM888MétC_Dbo_A_ELECTRM	3.55	23.9
Dureza Total	mg/L	SM 2340B C_Dur_A_VOLUM	614	299
Fluoruros	mg/L	SM 4110 B Mod_Ani_A_CRM_ION	0.52	< 0.5
Hidrocarburos	mg/L	SM 5520 C,F_Hid_A_FTIR	< 4	< 4
Hierro Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	7.4	1.39
Magnesio Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	19.2	9.91
Mercurio Total	μg/L	SM 3112 B Mod_Met_A_AA_VF	< 1.753	< 1.753
Níquel Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	< 0.02	< 0.02
Nitratos	mg/L N	SM 4110 B Mod_Ani_A_CRM_ION	0.39	0.38
pH	Unidades de pH	SM 4500 H+B_pH_A_ELCTRM	7.22	7.23
Plomo Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	< 0.05	< 0.05
Potasio Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	4.14	< 4
Potencial Redox	mV	SM 2510 B_PotRed_A_ELCTRM	0	0
Sodio Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	28.9	13.7
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	SM 2540 C_SolDisTot_Aa_GRAV	944	420

Parámetros	Unidades	Técnica	25/02/2021	
			Proyecto Mina La Esmeralda	
			Piezómetro 3	Piezómetro 5
			A-21/023129	A-21/023128
Sulfatos	mg/L	SM 4110 B Mod_Ani_A_CRM_ION	458	53.4
Zinc Total	mg/L	EPA 200.7_MetTot_A_ICP_OES	< 0.1	< 0.1

Fuente: AGQ Prodycon Colombia S.A.S.

La temperatura es considerada un factor abiótico que regula los procesos vitales para los organismos vivos, así como también afecta las propiedades físicas y químicas de otros factores bióticos en un ecosistema como son: la solubilidad de nutrientes, solubilidad de gases, estado físico de nutrientes y propiedades fisicoquímicas del medio, todas estas interacciones afectan a su vez la distribución, diversidad y el grado de actividad metabólica de los organismos vivos. Para el presente monitoreo se registraron valores de 28,2°C esto para el piezómetro 3 y un valor de 30.7°C para el Piezómetro 5; este comportamiento es acorde a las condiciones climáticas de la zona y a las características de las aguas subterráneas; por lo que se puede inferir que la temperatura se ve influenciada únicamente por factores climáticos como la radiación solar o los intercambios propios de la actividad ecosistémica del medio; descartando posibles afectaciones de tipo térmico. Este parámetro no presenta límite establecido en el Decreto único reglamentario 1076 de 2015; sin embargo, su monitoreo es importante, ya que este parámetro se relaciona de manera directa con la densidad, la viscosidad, la capacidad del agua para retener gases en solución, la tensión superficial, el pH y la solubilidad de moléculas orgánicas e inorgánicas que se generan en el ambiente acuático (UPRM, 2002).

En cuanto a las concentraciones de oxígeno disuelto se reportaron concentraciones bajas, las cuales se encuentran directamente influenciadas por los procesos de aireación y agitación a los que es sometida el agua, y que contribuyen con la difusión de este elemento en el medio; sin embargo, es frecuente encontrar aguas con bajo oxígeno disuelto o totalmente anóxicas. Así que teniendo en cuenta los valores de oxígeno registrados en ambos piezómetros, es factible decir que se encuentran dentro de las características para este tipo de agua (subterránea).

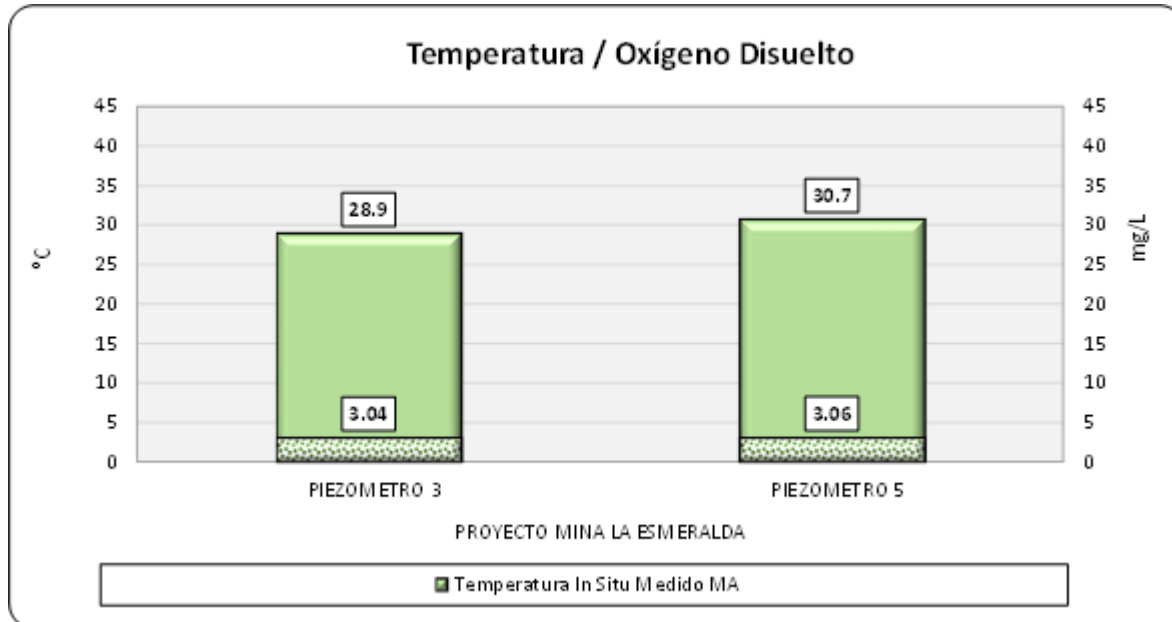


Figura 128. Comportamiento Temperatura/Oxígeno – Agua subterránea
Fuente: AGQ Prodycon Colombia S.A.S.

La alcalinidad se define como la medida para neutralizar ácidos, la cual le confiere propiedades buffer, por lo que pone resistencia a los cambios en el pH, estando directamente relacionado con la cantidad de iones carbonatos y bicarbonatos presentes en el agua (Romero, 1995). Conocer la alcalinidad del agua es fundamental para determinar su capacidad de mantener los procesos biológicos y una productividad sostenida, ya que el valor de esta variable en el agua tiene influencia en las cinéticas de reacciones químicas, así como también refleja cambios en la calidad de las fuentes de agua (Roldán y Ramírez, 2008).

El registro de alcalinidad en las muestras presentó valores de 193 mg/L CaCO_3 y 297 mg/L CaCO_3 respectivamente para el Piez 3 y 5 (Ver gráfica 2). El agua subterránea evaluada según el rango estipulado por Keven (1989) indica que se sitúa en un rango de alcalinidad "Alta". Teniendo en cuenta que la alcalinidad se debe exclusivamente a la presencia de bicarbonatos y está relacionada al comportamiento básico del agua se infiere que la presencia de éstas sales es considerada igualmente alta en los mismos puntos; esto a su vez, se debe principalmente a las interacciones de la escorrentía (agua subterránea) con el suelo, la roca y los sólidos transportados; provocando la presencia de sales de ácidos débiles, y los bicarbonatos que son compuestos que contribuyen a la alcalinidad, puesto que se forman en cantidades considerables por la acción del CO_2 sobre la materia básica del suelo. Esta variable no presenta límites establecidos en los artículos comparativos del Decreto 1076 de 2015.

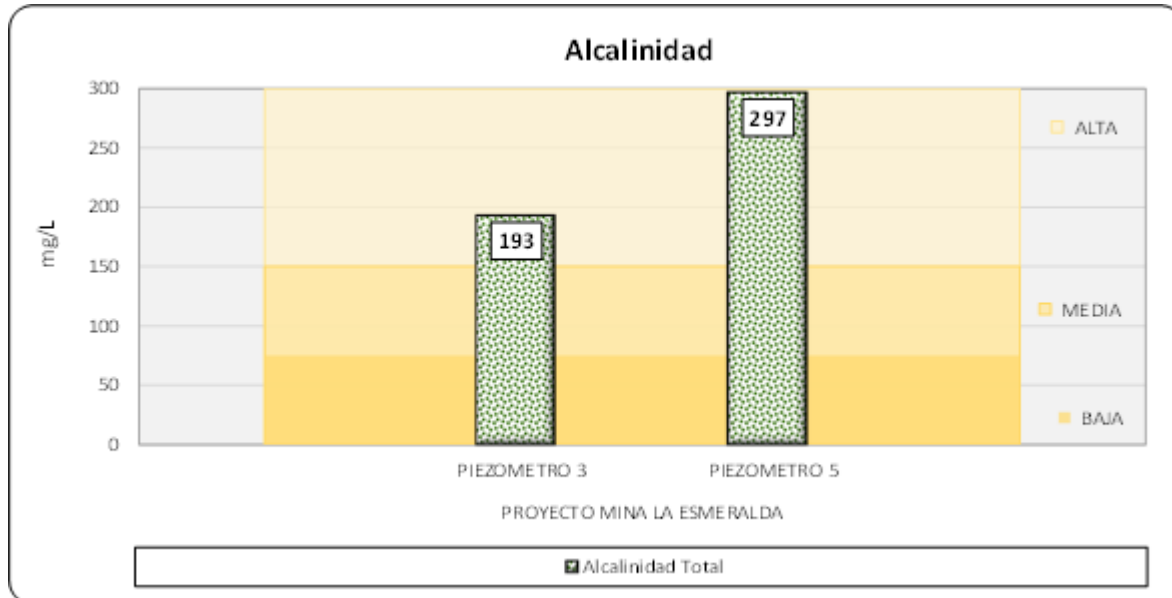


Figura 129. Comportamiento Alcalinidad – Agua subterránea
Fuente: AGQ Prodycon Colombia S.A.S.

El término pH, visto como una forma de expresar la concentración del ion hidrógeno o, más exactamente, la actividad de este ion (H⁺). En general se usa para expresar la intensidad de la condición ácida o alcalina de una solución, sin que esto quiera decir que mida la acidez o la alcalinidad totales. (Romero 2009). De acuerdo con las mediciones registradas en campo y laboratorio, los valores de pH exhibieron magnitudes entre 6,7 und a 7,22 und para la muestra tomada del piezómetro 3 y un comportamiento similar para el piezómetro 5 al reportar valores de 6,6 und y 7,23 und (Figura 129). Respecto a lo anterior, se evidencia que se registran características neutras en ambos casos y en ambas mediciones (campo y laboratorio); dicho comportamiento puede asociarse a la presencia de bicarbonatos y de algunos materiales disueltos presentes en el agua subterránea estabilizando los niveles de acidez en el agua.

Con relación al Decreto normativo, es posible evidenciar cumplimiento con relación a los límites permisibles establecidos en los artículos 2.2.3.3.9.3., 2.2.3.3.9.4, 2.2.3.3.9.4. y 2.2.3.3.9.5. (5.0 - 9.0, 6.5 -9.0 y 4.5 - 9.0 unidades) en el punto evaluado

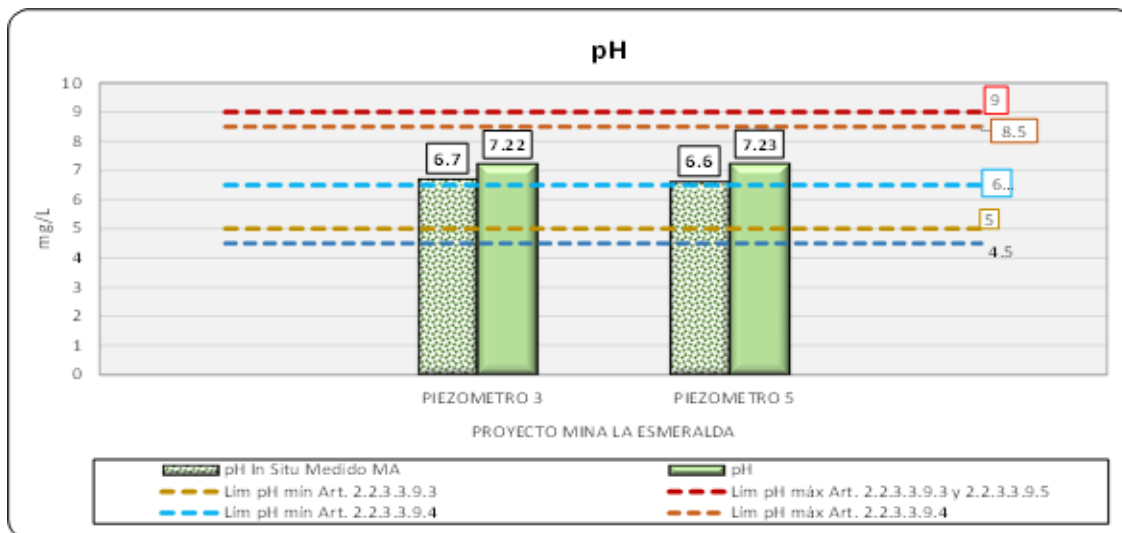


Figura 130. Comportamiento pH – Agua subterránea
Fuente: AGQ Prodycon Colombia S.A.S.

La conductividad del agua es una expresión numérica de su habilidad para transportar una corriente eléctrica, que depende de la concentración total de sustancias disueltas ionizadas en el agua y de la temperatura a la cual se haga la determinación, por tanto, cualquier cambio en la cantidad de sustancias disueltas, en la movilidad de los iones disueltos y en su valencia, implica un cambio en la conductividad. Por esta razón, el valor de la conductividad se usa mucho en análisis de aguas para obtener un estimativo rápido del contenido de sólidos disueltos. (Romero 2009). La variación de la conductividad proporciona información acerca de la productividad primaria y descomposición de la materia orgánica, e igualmente contribuye a la detección de fuentes de contaminación, a la evaluación de la naturaleza geoquímica del terreno (Faña, 2002). Para el presente monitoreo, se obtuvo un valor de 1152 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para la muestra proveniente del piezómetro 3 evidenciando una mineralización importante al ser superior de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, comportamiento que puede asociarse a la presencia de iones en el agua, así como de sales y otros compuestos químicos en solución, a diferencia del piezómetro 5 que reportó una mineralización media acentuada al reportar un valor de 590 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Tabla 106. Relación Conductividad – Mineralización del agua.

Conductividad	Mineralización
Conductividad <100 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Mineralización muy Débil
100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < Conductividad <200 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Mineralización Débil
200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < Conductividad < 333 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Mineralización Media
333 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < Conductividad < 666 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Mineralización Media Acentuada
666 $\mu\text{S}/\text{cm}$ < Conductividad < 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Mineralización Importante
> 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Mineralización Elevada

Fuente: Análisis del agua. (Rodier, Legube, & Merlet, 2009).

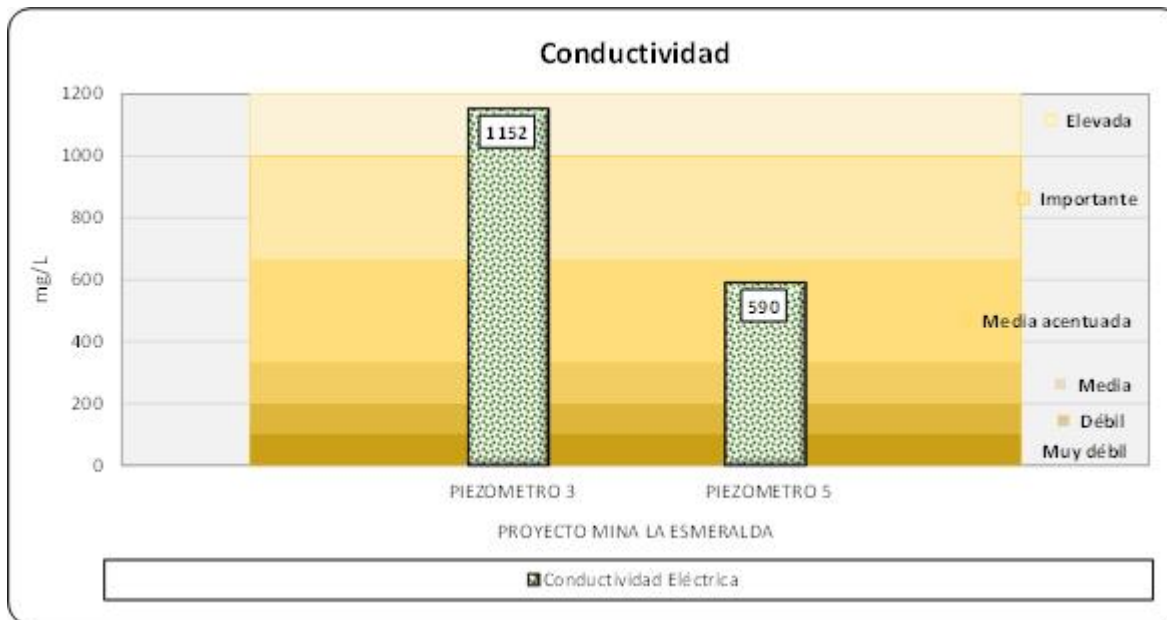


Figura 131. Comportamiento Conductividad – Agua Subterránea.
Fuente: AGQ Prodycon Colombia S.A.S.

Los cloruros son la especie química de mayor influencia en la mineralización de las aguas como cloruros de sodio (NaCl) y Potasio (KCl). Los cloruros de potasio, calcio y magnesio pueden ser más tóxicos para organismos acuáticos que el de sodio (Benoit & Stephan, 1988). Para el monitoreo efectuado, se registraron concentraciones de 9,6 mg/L y 2,3 mg/L donde es evidente el cumplimiento normativo frente al límite normativo vigente (250 mg/L) en sus artículos 2.2.3.3.9.3. y 2.2.3.3.9.4. (Figura 131).

Por otra parte, los sulfatos reportaron una concentración de 458 mg/L en el punto tomado del piezómetro 3 y un valor más bajo para la muestra tomada del piezómetro 5 (Figura 131). La concentración de este tipo de sales en el piezómetro 3 supera el criterio normativo indicado en el artículo 2.2.3.3.9.3. y 2.2.3.3.9.4 del decreto 1076 de 2015, al ser superior a 400 mg/L.

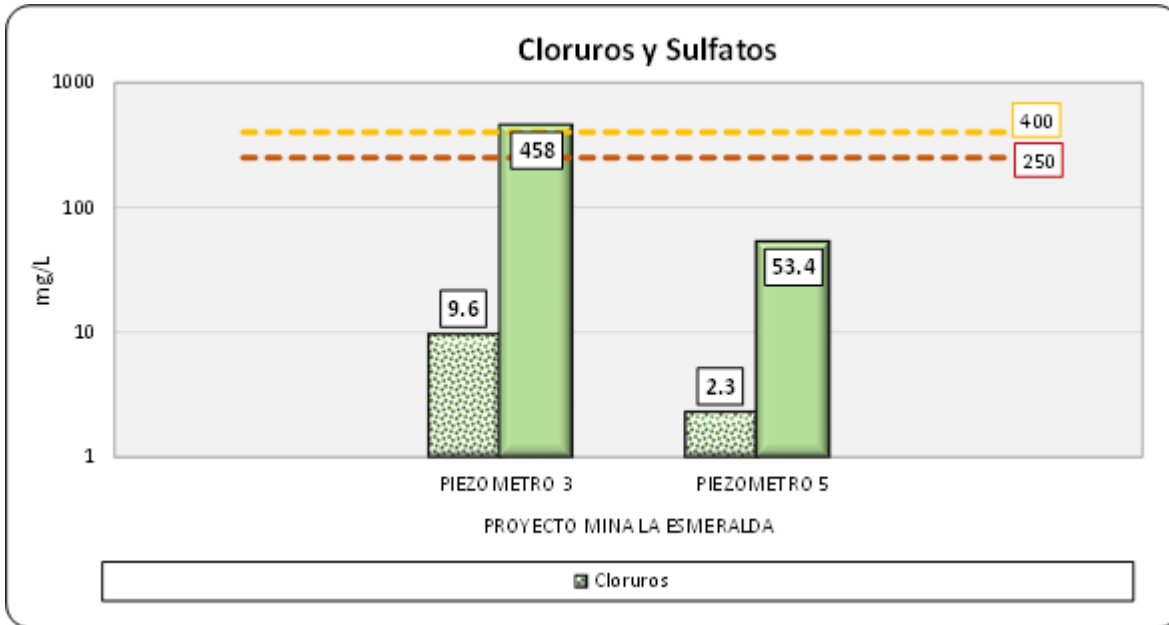


Figura 132. Comportamiento cloruros y Sulfatos-agua subterránea
Fuente: AGQ Prodycon Colombia S.A.S.

La dureza o grado hidrométrico de un agua corresponde a la suma de las concentraciones de cationes metálicos a excepción de los metales alcalinos y del ion hidrógeno. En la mayoría de los casos la dureza se debe principalmente a los iones calcio y magnesio a los que se añaden algunas veces los iones hierro, aluminio, manganeso y estroncio. (Rodier 2009). Para la muestra de agua subterráneas tomada del piezómetro 3, se reportó un valor de 614 mg/L CaCO₃, los cuales permite clasificar la muestra monitoreada en agua “muy dura” (Romero 2009); a diferencia de la muestra proveniente del piezómetro 5 que se encuentra en un rango de clasificación como agua “Dura”; comportamiento asociado posiblemente a las formaciones geológicas en donde se encuentra el agua, la presencia de minerales producto de los sustratos propios del suelo. Cabe resaltar que dentro de la normatividad de referencia no hay límites estipulados, por lo tanto, no se puede dar un juicio normativo.

Tabla 107. Clasificación del agua según su dureza total.

Dureza Mg/L	Clasificación
0 -75	Blanda
75 - 150	Moderadamente dura
150 - 300	Dura
>300	Muy dura

Fuente: Calidad del agua. (Romero, 2009)

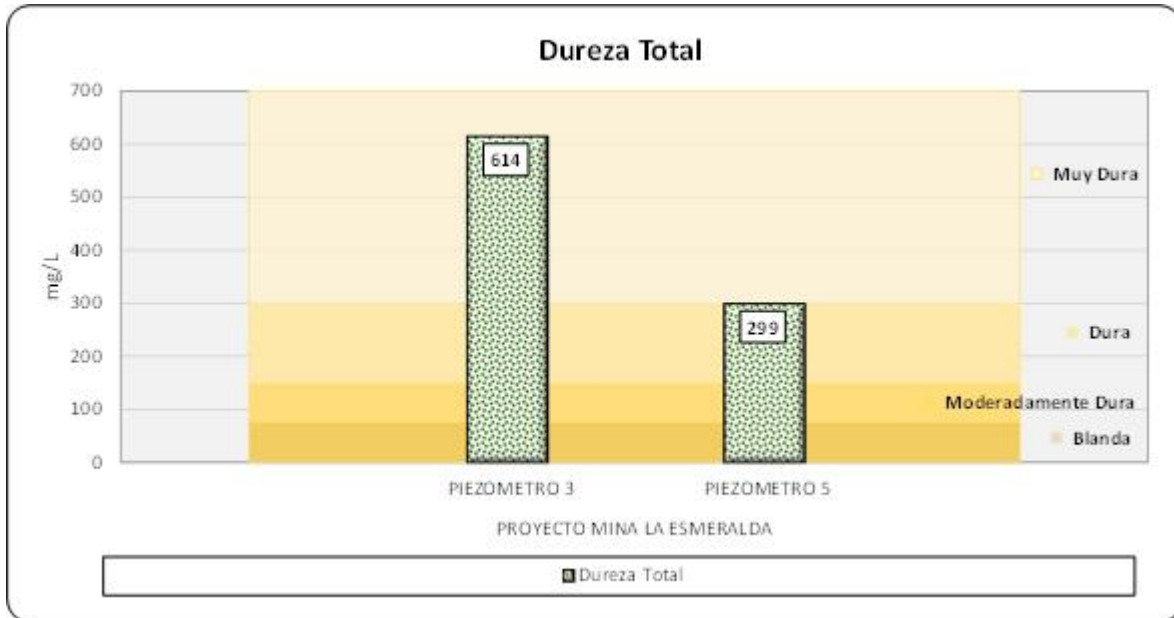


Figura 133. Comportamiento Dureza Total -agua subterránea
Fuente: AGQ Prodycon Colombia S.A.S.

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) es la cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos aerobios para degradar la materia orgánica presente en el agua, a su vez, es una medida cuantitativa de la contaminación del agua por materia orgánica. Los resultados obtenidos de Demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) en los puntos monitoreados arrojaron valores bajos que no superan los 24 mg/L,, estos valores son característicos del tipo de agua analizada.

Para los compuestos orgánicos como Aceites y Grasas e Hidrocarburos Totales determinados en las muestras de agua subterránea no reportan concentraciones significativas siendo dichas concentraciones bajas e inferiores al límite de la técnica analítica empleada en el laboratorio para el análisis de las muestras descartando de esta forma la presencia de trazas significa de este tipo de compuestos orgánicos o alguna alteración sobre la calidad del agua subterránea a razón de las actividades desarrolladas en la zona de estudio. En cuanto al cumplimiento normativo es importante destacar que los artículos 2.2.3.3.9.3., 2.2.3.3.9.4. y 2.2.3.3.9.5. del Decreto 1076 del 2015 no presentan criterios máximos permisibles para su comparación.

La contaminación fecal ha sido uno de los principales riesgos sanitarios en el agua, porque supone la incorporación de microorganismos patógenos procedentes de enfermos y portadores de estas, y la transmisión hídrica a cualquier población susceptible. Por ello el control sanitario de riesgos microbiológicos es tan importante, y constituye una medida sanitaria básica para mantener un grado de salud adecuado en la población.

Entre tanto la carga microbiológica es evaluada mediante el análisis de coliformes totales y coliformes fecales. El primero en referenciar son los coliformes totales, los cuales presentaron un contenido importante de microorganismos al reportar 2700 NMP/100mL en la muestra tomada del piezómetro 3 y un valor de 9200 NMP/100mL en el piezómetro 5; valores que superan los límites establecidos en los artículos 2.2.3.3.9.4. y 2.2.3.3.9.5 del decreto 1076 de 2015 (Figura 133). Para el caso de los coliformes fecales la concentración fue de 2 NMP/100mL (piezómetro 3) y <1,84 NMP/100mL (piezómetro 5). Según los resultados obtenidos es posible evidenciar que se cumple a satisfacción con los límites máximos estipulados en los artículos 2.2.3.3.9.3. y 2.2.3.3.9.5. del Decreto en mención.

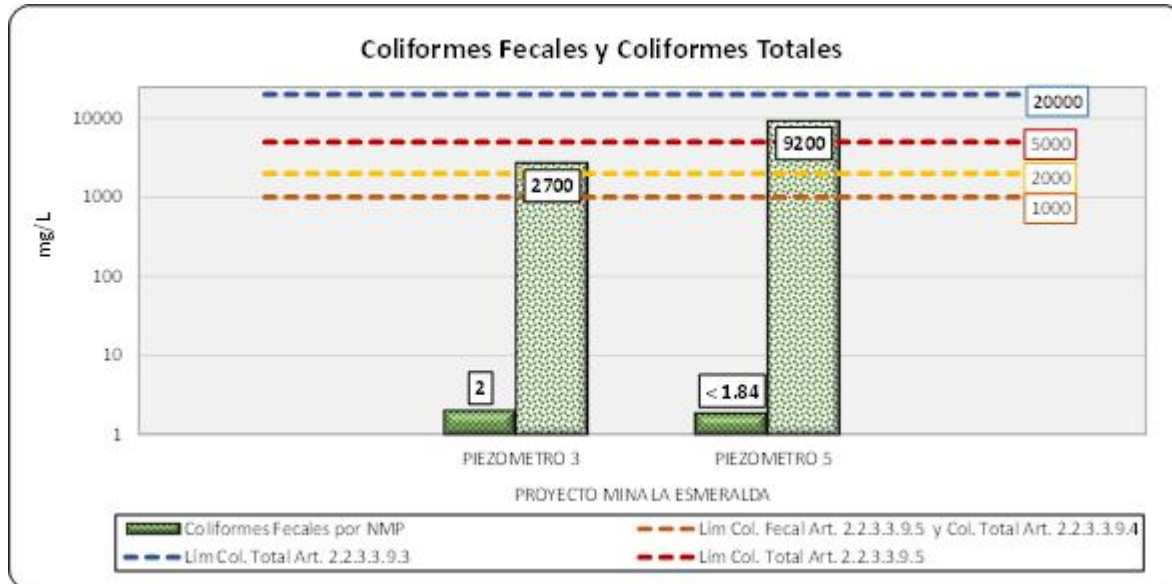


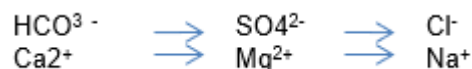
Figura 134. Comportamiento comunidades microbiológicas
Fuente: AGQ Prodycon Colombia S.A.S.

La información obtenida para los compuestos metálicos y metales pesados evaluados en las muestras de agua subterránea, muestra que existen bajas o nulas concentraciones para estos, descartando de esta forma cualquier tipo de alteración sobre la calidad del agua subterránea; cabe destacar que las concentraciones reportadas en su mayoría para los diferentes metales pesados y compuestos metálicos evaluados se ubican por debajo de los criterios establecidos en los artículos 2.2.3.3.9.3, 2.2.3.3.9.4 y 2.2.3.3.9.5 del Decreto único reglamentario 1076 de 2015, a excepción del arsénico y hierro que presentaron concentraciones superiores a los límites estipulados en la norma en la muestra tomada del piezómetro 3. Esta característica podría relacionarse con las posibles características del suelo en la zona.

5.1.7.5.2. Composición hidrogeoquímica

El origen de las aguas subterráneas y la composición química primaria se encuentra en el agua lluvia, una vez está infiltrada dependerá directamente de los minerales con que entre en contacto en el acuífero, y del tiempo de interacción que tenga con ellos, el que puede llegar a ser de miles de años. Así, a mayor tiempo de permanencia en el acuífero, mayor será la cantidad de sales presentes en el agua, debido a la mayor disolución de éstas. Se determina una secuencia entonces, la cual dice que las aguas con menor tiempo de permanencia en el subsuelo serán generalmente bicarbonatadas, y con el paso del tiempo se vuelven sulfatadas y finalmente cloruradas.

Análogamente para los cationes, aguas inicialmente cálcicas pasan a ser magnésicas y luego sódicas:



Este análisis se basa en la relación que tienen los cationes y aniones mayores del agua subterránea con la composición mineralógica de las rocas por las cuales esta circula, incluyendo, además, el tiempo de permanencia y transporte. Los cationes que se analizan son el Calcio (Ca^{++}), Magnesio (Mg^{++}), Sodio (Na^+) y el Potasio (K^+), y los aniones analizados son, el Bicarbonato (HCO_3^-), los Sulfatos ($\text{SO}_4^{=}$) y los Cloruros (Cl^-).

5.1.7.5.2.1. Balance iónico

Con el fin de determinar la calidad de los análisis y establecer la confiabilidad de los resultados del laboratorio, se procedió a calcular el balance iónico para cada muestra (balance de error), el cual es medido a través de la condición de electro-neutralidad (EN) ya que la suma de cargas positivas y negativas en el agua deben estar balanceadas:

$$EN (\%) = [\Sigma \text{Cationes} + \Sigma \text{Aniones} / \Sigma \text{Cationes} - \Sigma \text{Aniones}] * 100$$

Los errores obtenidos para las dos muestras de agua subterránea se presentan en la Tabla 108.

Tabla 108. Balance iónico resultados calidad de aguas subterráneas

Sitios de monitoreo	Cationes					Aniones			Error
	Calcio	Magnesio	Sodio + potasio	Potasio	Sodio	Bicarbonatos	Cloruros	Sulfatos	
	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	%
PZ3	11,75	1,5744	1,3462	0,1035	1,2427	3,1652	0,2688	9,618	5,84
PZ5	5,75	0,81262	0,6891	0,1	0,5891	4,8708	0,0644	1,1214	8,98

Fuente: Elaboración Propia

Se acepta un valor máximo en el error del balance iónico de $\pm 10\%$ conforme los términos de referencia para EIA proyectos de explotación minera, por lo que los resultados obtenidos se consideran válidos.

5.1.7.5.2.2. Clasificación por iones dominantes

La clasificación de las aguas subterráneas por iones dominantes corresponde al anión o catión que sobrepasa el 50% de la suma respectiva. En caso de no sobrepasar el 50%, se nombran los iones más abundantes. Para esta clasificación se emplean los diagramas de Piper y Stiff. En la Figura 134 se presenta la clasificación del tipo de agua conforme se ubique en el diagrama.

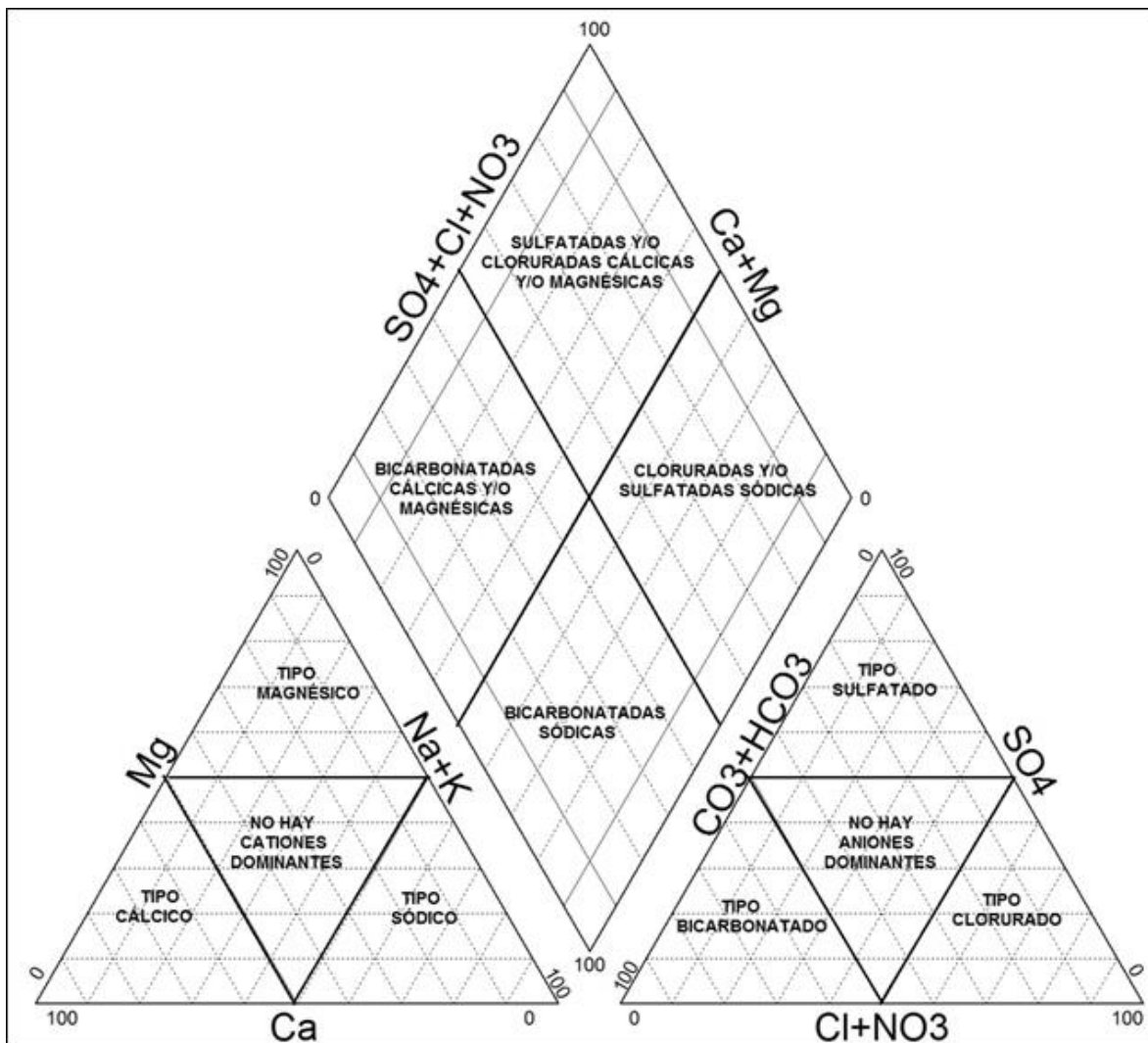


Figura 135. Tipos de agua Diagrama Piper
Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo al diagrama obtenido y presentado en la Figura 135 y a la clasificación establecida en la Figura 134, se observa que el agua del punto PZ5 presenta dominancia de aniones de bicarbonatos clasificándose como agua bicarbonatada cálcica y el punto PZ3 presenta dominancia de cationes de calcio y aniones de sulfato, por lo que se clasifica como agua sulfatada cálcica.

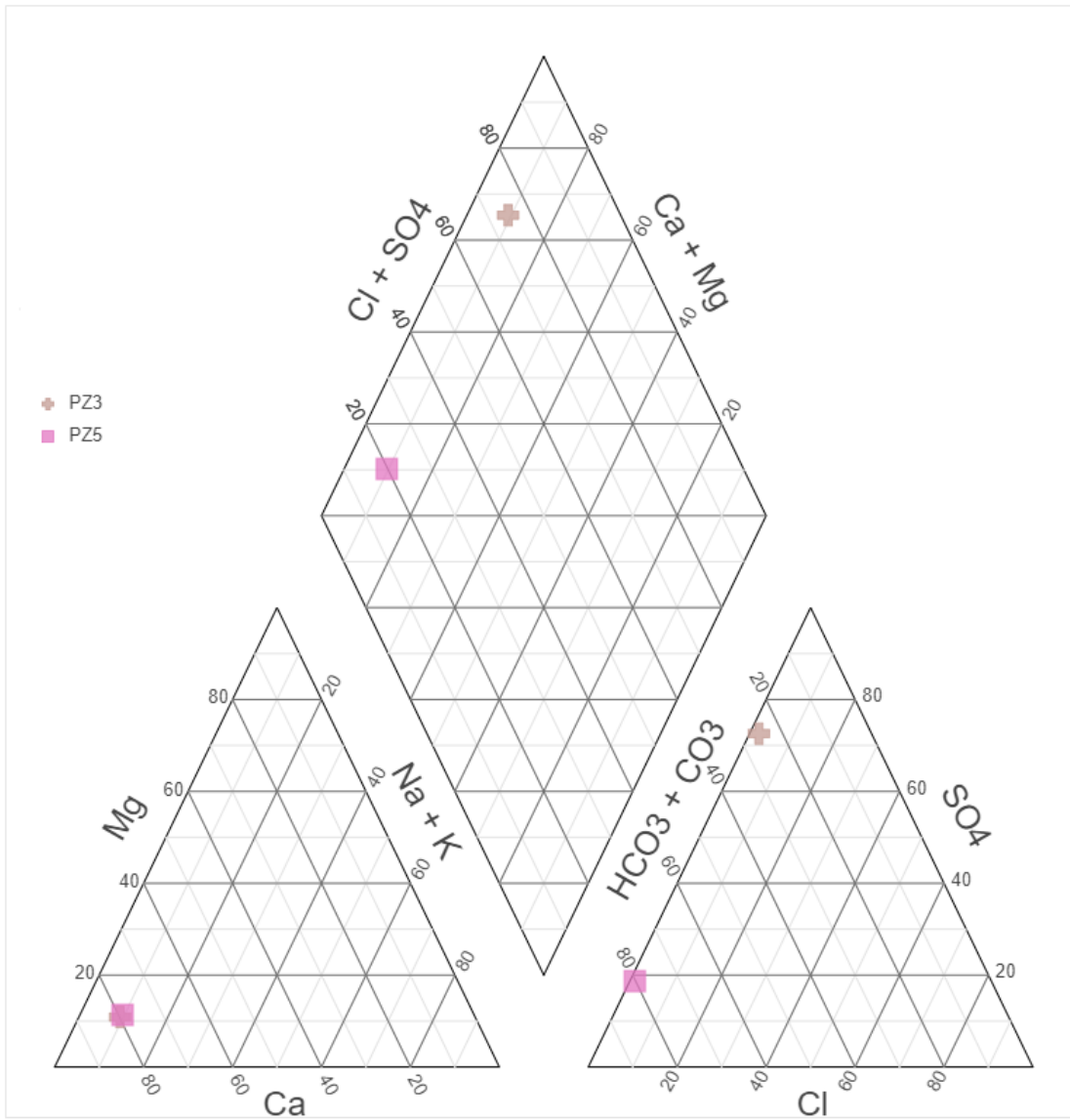


Figura 136. Diagrama Piper aguas subterráneas mina La Esmeralda
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 109. Composición del agua diagrama Piper

Muestra	Cationes			Aniones		
	Calcio	Magnesio	Sodio + potasio	Bicarbonatos	Cloruros	Sulfatos
	%	%	%	%	%	%
PZ3	80%	11%	9%	24%	2%	74%
PZ5	79%	11%	10%	80%	1%	19%

Fuente: Elaboración Propia

El diagrama de Stiff nos ratifica la clasificación presentada en el diagrama de Piper, en donde se presenta una secuencia con predominancia sulfatada y bicarbonatada cálcica en los PZ3 y PZ5 respectivamente.

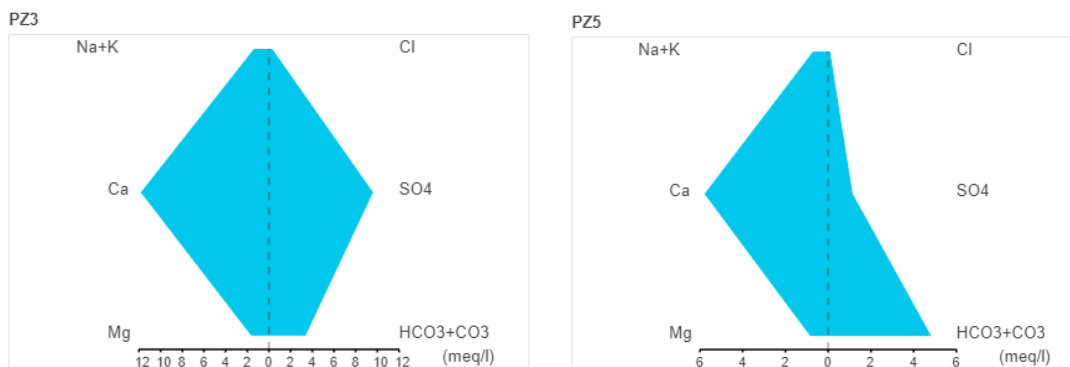


Figura 137. Diagrama Stiff aguas subterráneas mina La Esmeralda

Fuente: Elaboración Propia

El agua subterránea del punto PZ3 presenta mayor concentración de sulfatos para el caso de los aniones, y para los cationes mayor concentración de calcio, seguida del magnesio y en menor medida de sodio y potasio.

El agua subterránea del punto PZ5 presenta mayor concentración de bicarbonatos, seguida de los sulfatos y en menor cantidad cloruros. Para los cationes se presenta el mismo caso, es decir, mayor concentración de calcio, frente al sodio y el magnesio, siguiendo la secuencia de Chevotareb y por lo que se puede inferir que el agua tiene un menor tiempo de permanencia en el subsuelo.

5.1.7.6. Resultados del Modelo Hidrogeológico Conceptual.

El sistema hidrogeológico encontrado dentro del área de estudio corresponde a un sistema profundo regional, limitado por los ríos Coello y Luisa, los cuales constituyen las principales zonas de descarga del sistema, aunado a los pozos y manantiales existentes. La denominada área de estudio, limitada al noreste, por el trazo del río Coello y al sur, oeste y norte por divisorias de agua superficial, corresponden a un volumen de control. En cuanto a los límites verticales del sistema

acuífero, abarca desde la superficie piezométrica, alcanzando el espesor de cada formación hasta llegar a la cota 500 m s.n.m, cota en la que se considera que no habría interacción directa con la zona de explotación.

Se conforma por rocas de poca permeabilidad, de baja importancia hidrogeológica (Ngh, TRL, Tsc, TrJs, Jp y Trsp), y sedimentos antrópicos (Qe y Qamex), que a pesar de presentar altas permeabilidades, es decir, que tendrían la posibilidad de almacenar y/o transmitir agua subterránea, no se encuentran saturados, por lo cual no presentan importancia hidrogeológica. Los únicos acuíferos identificados corresponden a los sedimentos aluviales recientes y al abanico de Ibagué, ubicados al NE de la mina La Esmeralda; ambos se consideran sistemas locales, de extensión limitada y presenta baja importancia hidrogeológica.

La recarga en el área de estudio ocurre de manera local, donde dadas las condiciones favorables de pendiente, cobertura vegetal y tipo de suelo, el agua proveniente de la precipitación logra atravesar la zona vadosa y alcanza los niveles acuíferos, a una tasa de 176,38 mm/año (0,12 m³/s).

Otra entrada de agua al sistema hidrogeológico acotado por el área de estudio está dada por el agua proveniente desde el sistema regional, aguas arriba de esta.

En cuanto a las descargas, el río Coello constituye una zona de descarga tanto de aguas superficiales como del sistema hidrogeológico, donde el agua proveniente de la recarga local y del sistema aguas arriba fluye en sentido oblicuo al río Coello hasta alcanzarlo y aflorar, alimentando de esta manera el caudal del río, permitiendo que tenga flujo continuo durante todo el año. La dirección de flujo es aproximadamente este-oeste, Figura 137.

Los niveles de agua en el área de estudio tienen profundidades entre 0 m (en el río Coello, donde aflora) y 820 m aproximadamente (al oeste del área, la cual es la zona de mayor altitud). En el área del tajo actual las profundidades se encuentran entre los 52 y los 60 m.

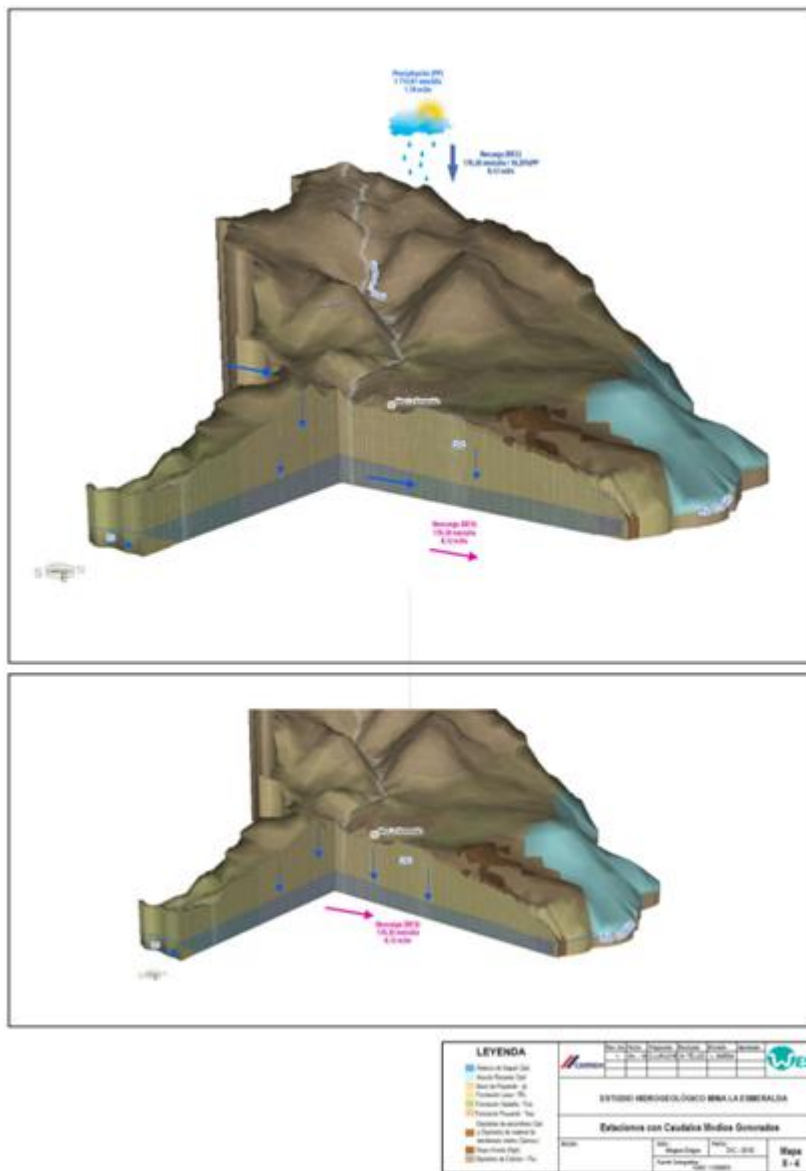


Figura 138. Esquema del Modelo Hidrogeológico Conceptual (3D).

Fuente: WES Perú SAC, 2019.

5.1.7.7. Modelo numérico del flujo de las aguas subterráneas.

5.1.7.7.1. Estructura del modelo numérico

La construcción del modelo numérico tiene los siguientes objetivos:

1. Representar el sistema hidrogeológico actual, de manera que sea posible la realización de predicciones tomándolo como base.

2. Predecir los efectos que el plan de minado pueda producir sobre el sistema hidrogeológico, en términos de volumen de agua y/o niveles.
3. Estimar el volumen de agua a extraer durante la vida útil del proyecto minero.
4. Predecir los cambios que pueda producir sobre el sistema la expansión de las zonas de sobrantes de excavación minera.

El plan de minado autorizado por medio de la Resolución 855 de 2017 de la ANLA, consiste en la expansión areal de la mina; a través del modelo hidrogeológico numérico se pretende conocer si esta expansión producirá cambios en el sistema hidrogeológico sobre el que se emplaza la mina. Así mismo, se pretende realizar una expansión de las zonas de disposición de los sobrantes de excavación, por lo cual, también se desea conocer sus efectos.

La estructura del modelo numérico debe representar lo más cercano posible a lo planteado en el modelo conceptual, de manera que se adecue a las condiciones actuales, siendo confiables las predicciones a realizar.

La presente sección detalla las especificaciones para la construcción del modelo numérico, mostrando la manera cómo fueron representadas las condiciones de borde, las hidrounidades identificadas y zonas de recarga.

5.1.7.7.2. Dominio de la modelación y malla

La discretización espacial supone dividir el dominio (área de evaluación hidrogeológica) en una serie de elementos o celdas que lo cubren sin solaparse. El método de elementos finitos resuelve la ecuación de flujo de agua subterránea en los vértices de los elementos (normalmente prismas de base triangular), y dentro de cada uno de los elementos interpola linealmente. El error cometido es muy pequeño si el tamaño del elemento es pequeño en relación con la variabilidad de la función interpolada (en este caso son los niveles piezométricos). Sin embargo, es recomendable evitar construir elementos demasiado pequeños ya que conducirán a un aumento del tiempo de cálculo innecesario.

Los límites del modelo numérico corresponden a los límites del área de estudio establecidos en la Figura 71, es así como la zona del modelo abarca un área de cubre 21,3 km² en planta (~3.5 km de largo x ~6,0 km de ancho), mientras que en profundidad se ha extendido hasta la cota de 500 m s.n.m, en un total de 6 capas, donde las 5 primeras tiene un espesor de 20 m, siguiendo la geometría de la topografía para evitar posibles intersecciones y además son funcionales para representar la geología de la zona (principalmente el depósito aluvial) y el avance del minado, mientras que la última capa tiene un espesor variable, entre 0,1 y 870 m.

La discretización espacial de los elementos de la malla se ha adaptado a los elementos discretos principales que conforman la geometría de la zona tales como ríos y las estructuras mineras.

Debido a que la malla ha sido discretizada heterogéneamente, para dar mayor énfasis a zonas concretas (ríos y las estructuras mineras), el tamaño de los elementos es variable siendo los tamaños de aristas más grandes del orden de 200 m y los más pequeños del orden de 2 m (Figura 138). Cada capa contiene 108 935 elementos con un total de 653 610 repartidos en las 6 capas. Por otro lado, cada capa está compuesta por un total de 54 686 nodos obteniendo un total de 382 802 nodos en el modelo.

Finalmente, es fundamental destacar que el modelo ha sido construido con el código de modelación Feflow 7.1, módulo F3 (DHI, 2016).

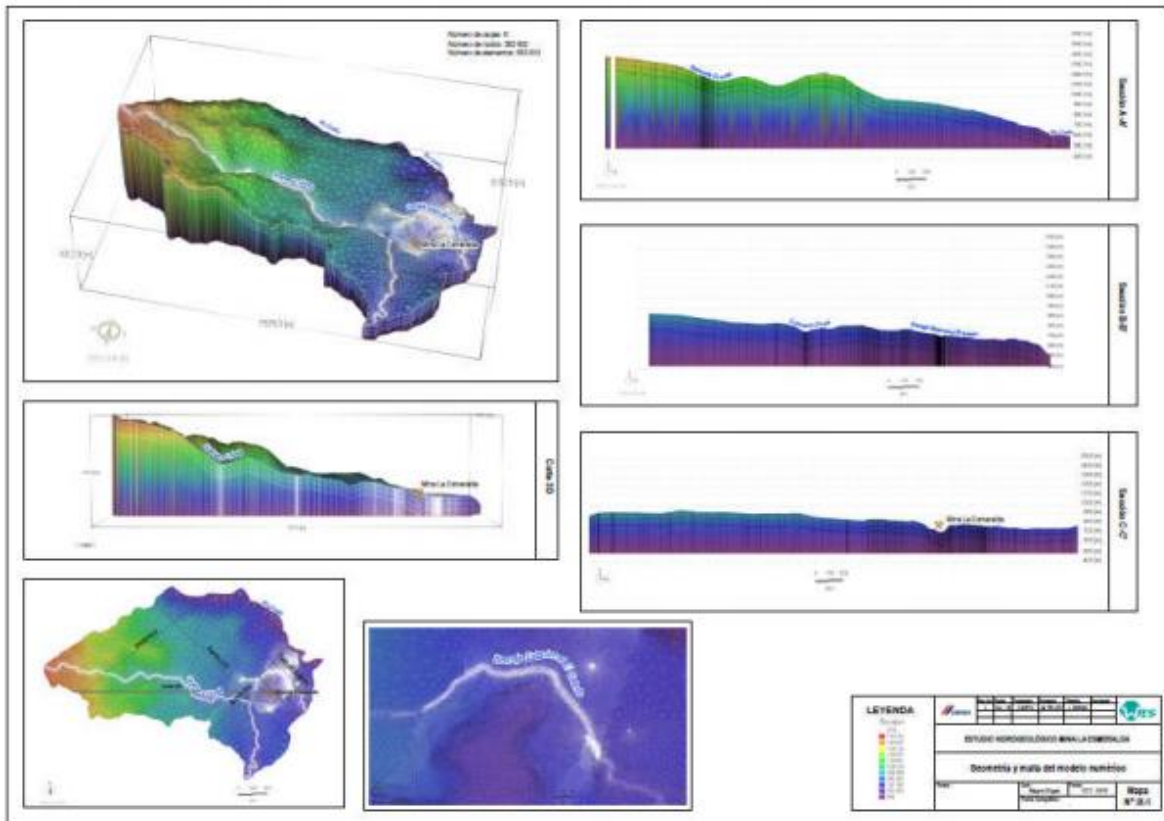


Figura 139. Geometría y Malla del Modelo Numérico.
Fuente: WES Perú SAC, 2019.

5.1.7.7.3. Zonas de permeabilidad

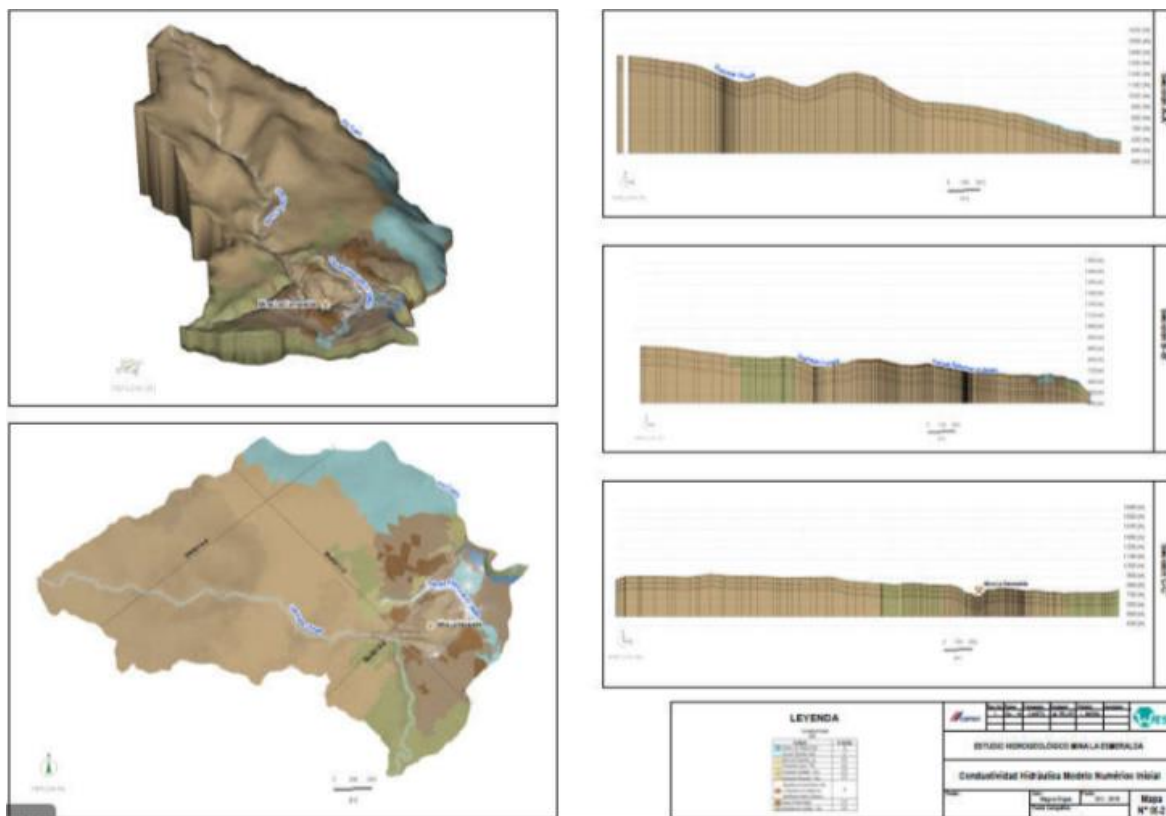
Para asignar los datos de permeabilidad a cada una de las unidades hidrogeológicas identificadas se tomó como referencia los resultados de las pruebas slug, teniendo en cuenta que estos piezómetros registran el nivel de diferentes unidades litológicas. Siendo así, se ingresó como valor inicial de K los valores iguales para las unidades que fueron atravesadas por un mismo piezómetro al desconocer a cuál de ellos corresponde finalmente el valor de conductividad, siempre con la premisa de que es una variable sometida a calibración.

En ese sentido, para los sedimentos aluviales se ingresó como conductividad hidráulica inicial un valor de $2,7E+0$ m/d, las Formaciones de Caliche $2,1E-1$ m/d, Honda $2,1E-1$ m/d, Luisa $2,1E-1$ m/d, Payandé $2,1E-1$ m/d y arenas puzolánicas $8,6E+0$ m/d. Para las demás unidades se estableció como valor inicial el valor de referencia ingresado en la Tabla 64. A partir de estos valores se dio inicio al proceso de calibración del modelo, buscando ajustarse a los resultados obtenidos en las pruebas, pero también guardando coherencia con la Tabla 64.

Los resultados que se extraen del procesado reflejan una variación de las permeabilidades en cada una de las unidades siendo la más impermeable el Gneis seguida por la Formación Caliche y las más permeables de todas, las unidades antrópicas de sobrantes de excavación minera y retrolenado y los aluviales recientes.

En cuanto a la isotropía/anisotropía de las rocas encontradas en el área, sin información que demuestre lo contrario, se presume que no presentan cambios de permeabilidad en ninguna dimensión del espacio, por lo cual se les aplicó una isotropía a todas estas unidades; las unidades del cuaternario sí podrían ostentar cambios de permeabilidad en la dirección z, por lo cual, en estas unidades se dispuso una anisotropía en K_z de 10% de K_x .

En la se muestra la malla de elementos finitos con la distribución de las diferentes permeabilidades asociadas a cada uno de los distintos materiales presentes en el área de estudio correspondiendo a las distintas hidrounidades planteadas y sus respectivas conductividades hidráulicas, Figura 139.



5.1.7.7.4. Zonas de recarga potencial

Las zonas de recarga distribuidas dentro del modelo numérico han sido asignadas en la primera capa del modelo, de acuerdo con los resultados de la estimación de la recarga presentados en la Figura 80, sección 5.1.6.2.4.4.

La estimación de la recarga constituye uno de los componentes esenciales del balance de masas del modelo, por constituir un ingreso de agua local relevante al sistema acuífero.

De acuerdo con el balance hídrico desarrollado en el presente informe, la asignación de la recarga consiste en distribuir 176,38 mm/año, que equivale a 0,12 m³/s, teniendo en cuenta que existen zonas con mayor potencial de recarga que otras. De acuerdo con la metodología utilizada para estimar el valor de recarga, se debe considerar que es favorecida por la vegetación encontrada, condiciones topográficas, suelo, capacidad de infiltración, capacidad de campo, punto de marchitez y profundidad de las raíces. Teniendo en cuenta que los valores de recarga son estimados, este es un parámetro sujeto a calibración. Es importante aclarar que la condición de recarga es únicamente aplicado a la primera capa del modelo.

En la Figura 140 se ilustra la distribución de las zonas de recarga por precipitación calibradas en la zona de estudio.

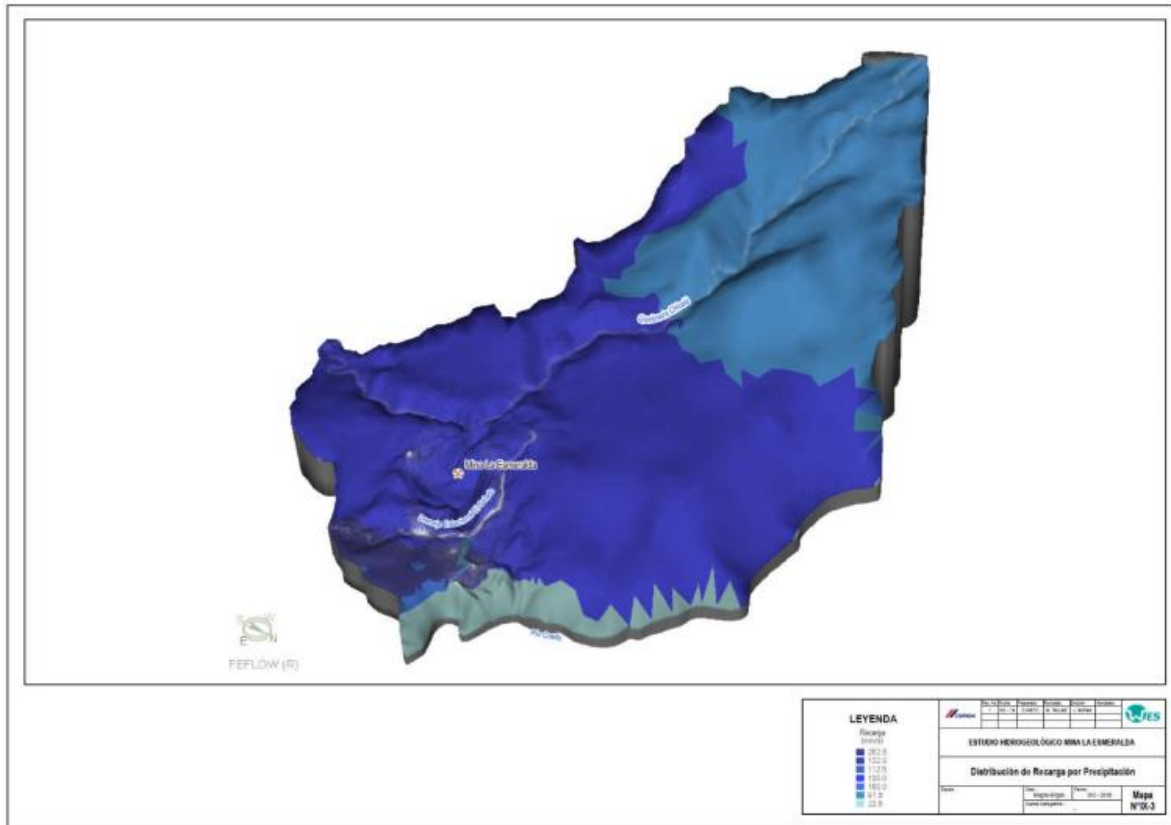


Figura 141. Distribución de Recarga por Precipitación.
 Fuente: WES Perú SAC, 2019.

5.1.7.7.5. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno correspondientes a los límites del modelo permiten asignar condiciones físicas, reales o supuestas a los propios límites. Se puede diferenciar condiciones de nivel fijo, donde el nivel piezométrico es bien conocido o condiciones de caudal fijo, donde el flujo es el conocido.

Partiendo de estas premisas se desglosan a continuación cada una de las condiciones de contorno que fueron utilizadas para los distintos componentes que integran el modelo:

5.1.7.7.5.1. Río Coello.

El río Coello, como principal colector de agua dentro del sistema hidrogeológico modelado, fue representado mediante la condición de primer tipo – Dirichlet, estando emplazado únicamente en la capa 1, haciendo que el nivel del río se ajuste al nivel de la topografía, aproximadamente en la cota 500 m s.n.m.

5.1.7.7.5.2. Quebrada Chicalá y drenaje Estacional El Salado.

De acuerdo con el modelo conceptual, tanto la quebrada Chicalá como el drenaje estacional El Salado están desconectados del acuífero, ya que este es profundo y por lo cual, la única interacción existente entre estos drenajes superficiales y el acuífero, es el posible goteo desde los drenajes hacia el acuífero. Dadas estas condiciones, fueron simuladas dentro del

modelo con condición mixta de tercer tipo – Cauchy, imponiéndoles una restricción de caudal, de manera que el acuífero no les aporte agua.

5.1.7.7.5.3. Conexión entre el área de estudio con el acuífero regional.

Como se estableció en la sección 5.1.7.2.2., el sistema hidrogeológico estudiado corresponde a un sistema profundo regional, limitado por los ríos Coello y Luisa, ubicados en la parte alta de la cuenca del Magdalena (cuenca Alto Magdalena). Siendo estos los límites del sistema, se hizo necesario disminuir el dominio del modelo al área de estudio definida en la Figura 71, por lo que para darle continuidad al sistema hidrogeológico se incorporaron dos condiciones de borde de nivel fijo, una al oeste del área, simulando la entrada desde el sistema regional, y otra al este, simulando la salida hacia el sistema regional. Las dos corresponden a condiciones de tipo 1 o Dirichlet, siendo el nivel fijo de la condición oeste de 665 m y de la este de 570 m, coincidiendo con los valores de la piezometría trazada en la sección 5.1.7.2.3. Esta condición de borde fue aplicada en todas las capas del modelo y fue sometida a proceso de calibración.

En la Figura 141 se presentan las condiciones de borde incluidas dentro del modelo.

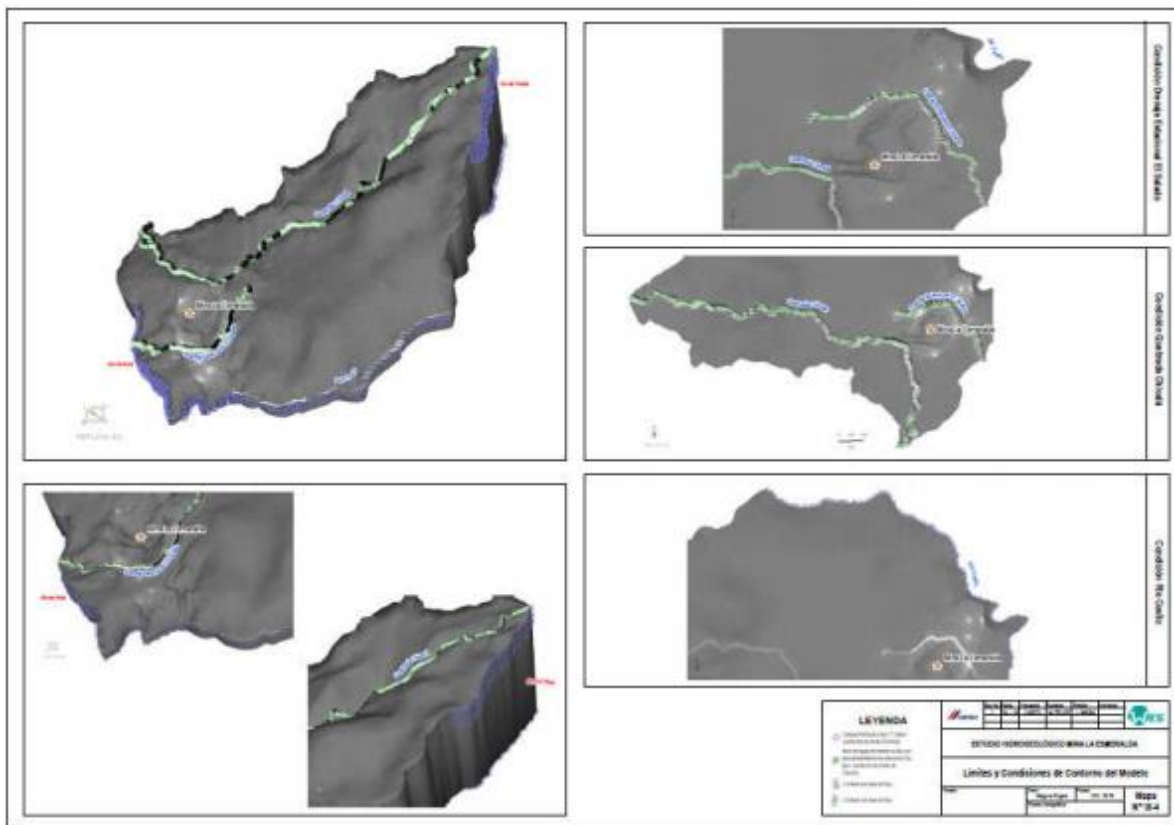


Figura 142. Límites y Condiciones de Contorno del Modelo.
Fuente: WES Perú SAC, 2019.

5.1.7.7.5.4. Pozos de observación.

Ante la ausencia en la zona de pozos que capten el nivel freático directamente, se introdujeron dentro del modelo con el objetivo de su calibración, 13 pozos artificiales, cuyo nivel es tomado de la piezometría presentada en la Figura 72. Estos

13 pozos se ubican a lo largo del dominio del modelo, pero en la cercanía de las instalaciones mineras se ha concentrado la mayoría, ya que esta es la zona de mayor interés.

En la Figura 142 se muestra la distribución de dichos pozos.

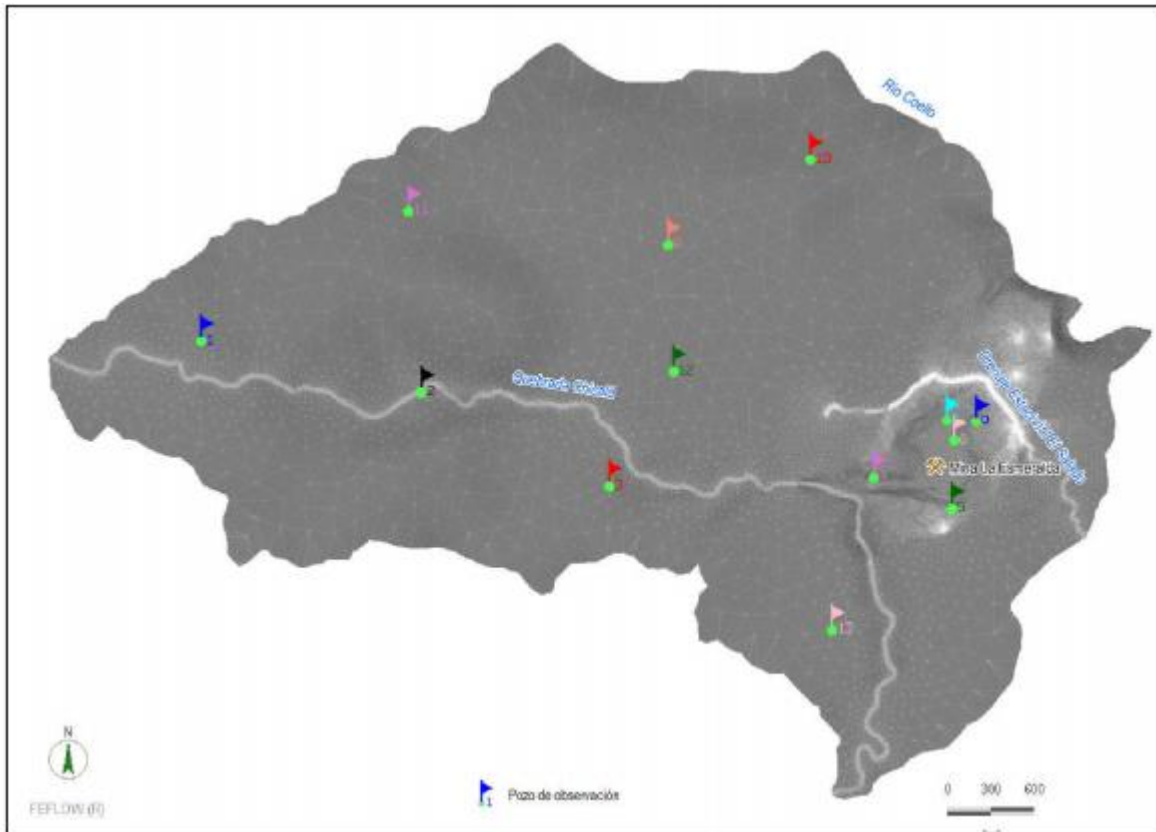


Figura 143. Pozos de observación ingresados en el modelo para calibración..

Fuente: WES Perú SAC, 2019.

Resultados y discusión del modelo en estado estacionario.

5.1.7.7.6. Resultados y discusión del modelo en estado estacionario.

Partiendo de la premisa que los modelos más simples, de resultados coherentes, permiten enriquecer paulatinamente las investigaciones futuras, en el modelo desarrollado se buscó la simplificación del sistema, de una realidad que es más compleja; los datos de precipitación, infiltración y escorrentía, además de las características hidráulicas de las unidades hidrogeológicas deberán ser también objeto de refinamiento en futuros estudios.

La influencia de la recarga de aguas lluvias constituye un caudal de restitución que se manifiesta superficialmente con el flujo base del río Coello.

El modelo intenta representar las salidas de agua que se producen hacia el río Coello, así como la interacción del dominio del modelo seleccionado, con el sistema hidrogeológico a escala regional.

El contar con un modelo calibrado, donde se representan muy cerca a lo definido en el modelo conceptual las condiciones de balance hídrico y los niveles de agua, permite realizar predicciones acerca de los cambios que albergará este hidrosistema ante alguna presión externa, en este caso, la expansión de la mina La Esmeralda.

Los estudios hidrogeológicos que se han desarrollado en el entorno de las operaciones mineras presentan información relevante. Sin embargo, existe un horizonte limitado de información sobre el cual se manifiesta la incertidumbre de los datos ingresados al modelo:

- Principalmente destaca el disminuido número de datos hidráulicos y la caracterización de las principales unidades hidrogeológicas ya que se requeriría un aumento en la densidad a fin de afinar la caracterización con mayor representatividad. Adicionalmente, se debe buscar que esta caracterización sea independiente para cada una de las unidades hidrogeológicas.
- Limitada información hidrometeorológica local que permita ser correlacionada con los datos obtenidos a partir del Balance y Modelo Conceptual.

El carácter de la calibración hace que sea un proceso iterativo, en el que distintas hipótesis se suceden (aceptándose o rechazándose), lo que puede llevar a una redefinición del modelo conceptual. Supone trabajar no sólo con los valores de los parámetros, sino también con la geometría de la zonificación.

La calibración lleva a plantear nuevas situaciones no reflejadas por la información suministrada que permita integrar en el modelo los conocimientos geológicos e hidrogeológicos del modelador. Esto obliga a confirmar que realmente la hipótesis del modelador es verdadera para representarla en el modelo, o bien, a adaptar valores de parámetros que pueden resultar incoherentes en un escenario real.

Debido a la falta de datos representativos de carga hidráulica repartidos por la zona, así como por el objetivo de simplificar la realidad de este modelo, se ha procedido a una calibración de este por un procedimiento que implica la validación de todos los parámetros presentes. Así pues, el modelo se ha podido calibrar en función de diversas variables (caudales y niveles piezométricos).

Para dar validez al resultado, se ha procedido en primer lugar a comprobar la geometría de la superficie piezométrica con criterios hidrogeológicos. Entre estos criterios se ha verificado que la superficie piezométrica no estuviese por encima de la topografía, que las líneas de flujo tuviesen sentido hidrogeológico y que las isopiezas representen de forma similar el modelo conceptual.

Por otro lado, se ha constatado que las permeabilidades obtenidas para los niveles resultantes estuvieran dentro del rango realístico que se conoce de los ensayos realizados, así como el sentido hidrogeológico para el tipo de rocas en cuestión.

Así mismo, se ha comprobado que la quebrada Chicalá y el drenaje El Salado no estaban recibiendo agua del acuífero. El área del modelo numérico en régimen estacionario representa adecuadamente los niveles piezométricos regionales, que son sometidos fundamentalmente al aporte de la recarga por precipitación de agua de lluvia, a la conexión con el acuífero regional y a la salida hacia el río Coello.

Es preciso rescatar que no se cuenta con registros de niveles piezométricos regionales fuera de las operaciones mineras. El modelo hidrogeológico y numérico regional es responsabilidad de la administración hídrica competente, de manera que no es posible establecer parámetros comparativos entre los resultados obtenidos en el presente informe con un modelo numérico integral de la cuenca.

Considerando las condiciones de contorno y la zonificación de parámetros, el modelo numérico desarrollado reproduce adecuadamente los supuestos representados en el modelo conceptual, tanto en la representación puntual de niveles piezométricos en el área de la mina, como en el ámbito global, a través de la representación general de la piezometría estimada, tal como se aprecia en la Tabla 110, Tabla 111 y Figura 143.

Tabla 110. Recarga Calibrada dentro del Modelo.




Zona de recarga	Recarga modelo conceptual (mm/año)	Recarga calibrada modelo numérico (mm/año)
1	177 - 225	202.5
2	141 - 177	122
3	141 - 177	120
4	177 - 225	112.5
5	45 - 101	100
6	45 - 101	67.5
7	0 - 45	22.5





Fuente: WES Perú SAC, 2019.

La información específica de niveles piezométricos fuera del ámbito de las operaciones mineras, limita el desarrollo de la calibración automática, por lo que ésta se ha desarrollado de manera manual, variando los valores de recarga y conductividad hidráulica de manera iterativa.

En el proceso de calibración se procedió a ajustar los valores máximos de recarga y los valores de conductividad hidráulica de las respectivas zonas. Los parámetros hidráulicos ya calibrados se presentan en la Tabla 111. En esta tabla es destacable que, a través del proceso de calibración, se logró obtener resultados coherentes con lo establecido en el modelo conceptual, conservando los valores de permeabilidad relativa presupuestos.

Tabla 111. Parámetros de Calibración en el Modelo

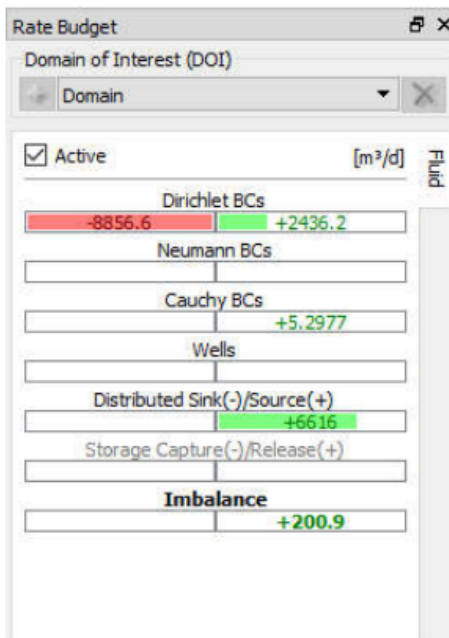
Unidades geológicas	Litología	Permeabilidad	K modelo conceptual (m/d)	K calibrado modelo numérico (m/d)
 Abanico de Ibagué (Qai)	Cantos de rocas extrusivas e intrusivas en matriz arenosa y areno-tobácea. Depósitos de lahares, aluviales, glaciares, aluvio-torrenciales y flujos piroclásticos.	Media	>1	1
 Aluvión Reciente (Qal)	Está integrado por gravas finas a medias, intercaladas con capas de arcillas y arenas con matriz arcillosa.	Media	>100	200
 Formación Saldaña - TrJs	Tobas, aglomerados y lavas con intercalaciones de areniscas, limolitas y calizas. Pórfidos andesíticos y dacíticos.	Baja	<0,1	0,07
 Stock de Payandé - Jp	Cuarzodioritas, granodioritas	Baja	<0,1	0,05
 Formación Payandé - Trsp	Calizas oscuras y grises, en bancos potentes. Ocasionalmente intercaladas con limolitas negras	Baja	<0,1	0,09
 Formación Luisa - Trl	Conglomerados y brechas arcósicas, lutitas y arcillolitas rojo-violáceas.	Baja	<0,1	0,06

Unidades geológicas	Litología	Permeabilidad	K modelo conceptual (m/d)	K calibrado modelo numérico (m/d)	
	Depósitos de escombros (Qe)	Gravas y bloques de caliche, caliza, diques granodioríticos y adesíticos. Matriz a clasto soportados. Matriz areno arcillosa.	Alta	>10	90
	Depósitos de material de retrolenado interno (Qamex)	Depósitos de material de retrolenado interno.	Alta	>10	90
	Grupo Honda (Ngh)	Areniscas, arcillolitas y niveles conglomeráticos de color gris verdoso, a ocasionalmente de coloración rojiza.	Media	>0,1	0,1
	Depósitos de Caliche – Tsc	Bloques de caliza, granodiorita, andesita, areniscas en cemento calcáreo.	Baja	<0,1	0,04

Fuente: WES Perú SAC

En cuanto a la comparación del balance hídrico conceptual con el arrojado mediante el modelo numérico se puede observar que los valores encajan a lo observado y expuesto en el modelo conceptual, manteniéndose el mismo orden de magnitud.

Resultado Modelo Numérico



CONDICIÓN	OUT m ³ /d	IN m ³ /d	
Relación sistema acuífero regional BORDE ESTE	4 283,10	444,21	
Relación sistema acuífero regional BORDE OESTE	28,31	1635,90	
Río Coello	4 545,20	349,07	
Total Dirichlet	8 856,61	2 429,18	
Quebrada Chicalá	0,00	0,17	
Drenaje Estacional El Salado	0,00	5,13	
Total Cauchy	0,00	5,30	
Recarga por precipitación	Distributed sink(-)/source(+)	0,00	6 616,00
TOTAL	8 856,61	9 050,48	
*Desbalance		200,9	

Representación Física del Balance

CONDICIÓN	OUT m ³ /d	IN m ³ /d	
Relación sistema acuífero regional BORDE ESTE	4 283,10	444,21	
Relación sistema acuífero regional BORDE OESTE	28,31	1635,90	
Río Coello	4 545,20	349,07	
Total Dirichlet	8 856,61	2 429,18	
Quebrada Chicalá	0,00	0,17	
Drenaje Estacional El Salado	0,00	5,13	
Total Cauchy	0,00	5,30	
Recarga por precipitación	Distributed sink(-)/source(+)	0,00	6 616,00
TOTAL	8 856,61	9 050,48	
*Desbalance		200,9	

*Error numérico residual

Figura 144. Cálculo del Balance Hídrico – Estado Actual.
Fuente: WES Perú SAC, 2019.

Por otro lado, en cuanto a la calibración respecto a los pozos de observación ingresados al modelo, se obtuvo un RMS de 12,66 y un gráfico de dispersión que se presenta en la Figura 144. Según los resultados anteriores el modelo fue satisfactoriamente calibrado, Figura 145.

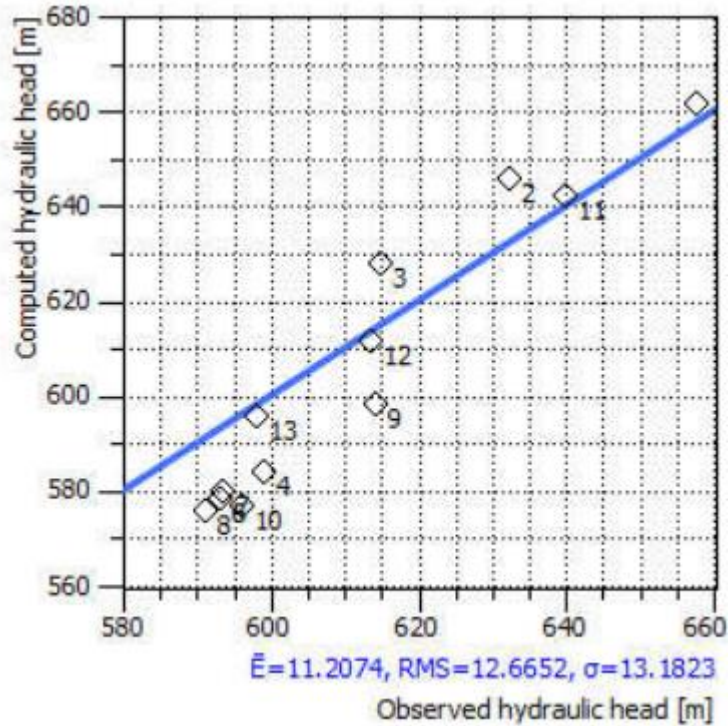


Figura 145. Gráfico de valores del potencial hidráulico calculado y observado en pozos de observación.

Fuente: WES Perú SAC, 2019.

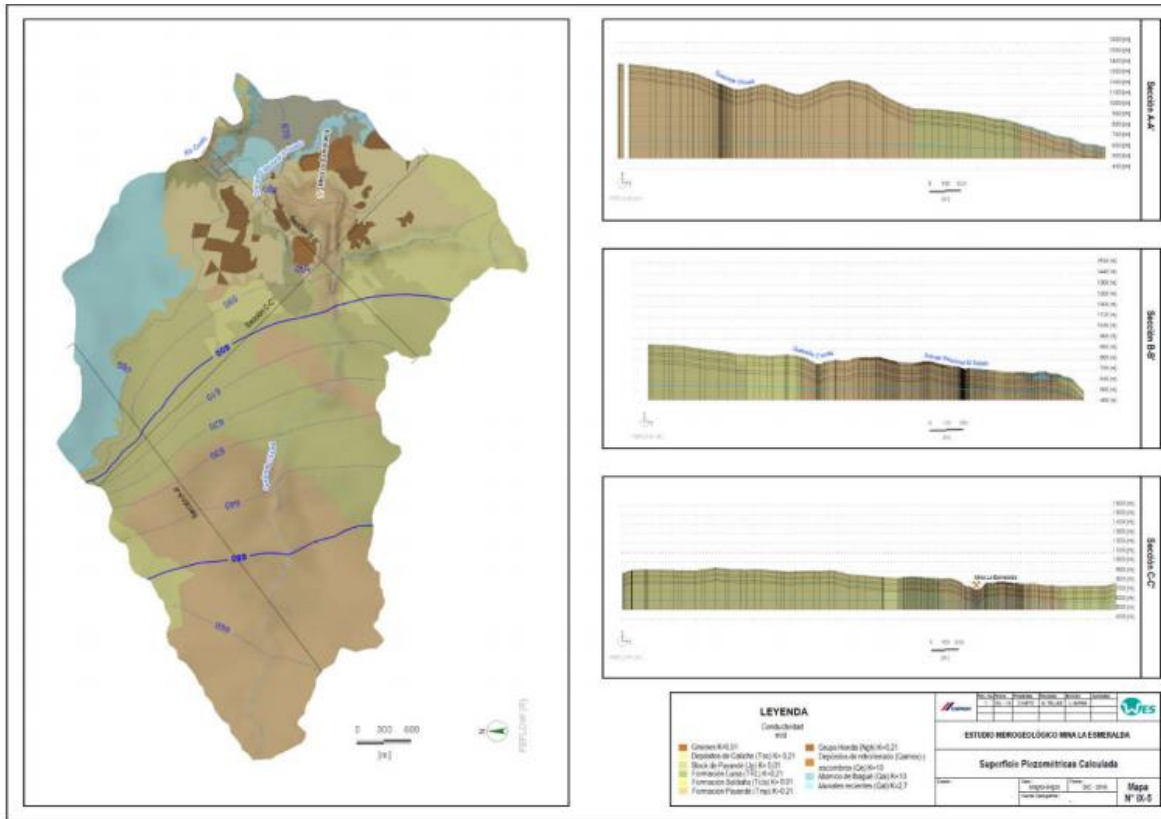


Figura 146. Superficies Piezométricas Calculadas.
Fuente: WES Perú SAC, 2019.

Finalmente, a partir de los resultados se construyó la sección presentada en la Figura 146, se observa la profundidad máxima del tajo actualmente (620 m s.n.m), la quebrada Chicalá, drenaje El Salado y el nivel piezométrico en el área. En esta figura se observa que la profundidad del nivel de agua respecto a la topografía actual del tajo está entre 125 m y 16 m (cota mínima actual), por lo cual actualmente no existiría injerencia de las operaciones de excavación sobre el agua subterránea; además se evidencia claramente la desconexión de los drenajes superficiales con el agua en el acuífero, que fluye en dirección W-E.

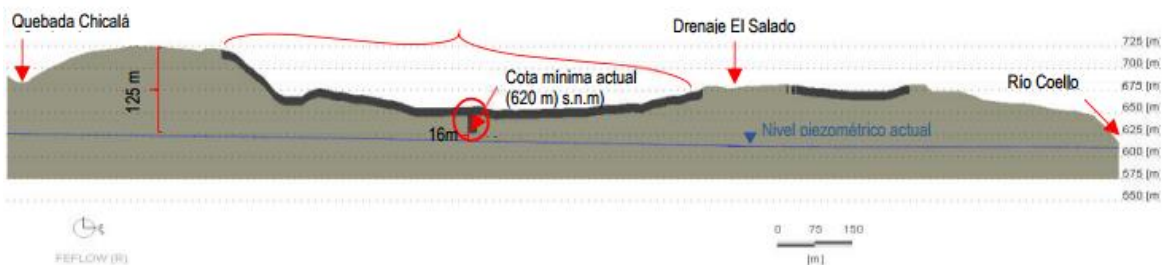


Figura 147. Vista General del Nivel Piezométrico.
Fuente: WES Perú SAC, 2019.

De acuerdo con la secuencia de avance minero proyectado para el título 745, los resultados del modelo hidrogeológico local del área de influencia y los resultados de los registros de mediciones de los piezómetros instalados, la superficie freática se encuentra por debajo de la cota máxima de las excavaciones, la explotación solo involucrará el aprovechamiento entre 20

y 35 m de los depósitos de arenas de puzolanas; la trazabilidad de los niveles registrados en los piezómetros instalados, exponen que éste para época de lluvias o de estiaje ratifica los resultados obtenidos en el modelación numérica, donde la profundidad del nivel de agua respecto a la topografía actual del tajo está entre 180 m y 20 m (cota mínima actual), por lo cual no existirá injerencia de las operaciones de excavación sobre el agua subterránea.

5.1.7.7.7. Simulaciones numéricas predictivas

Como se estableció inicialmente, las simulaciones predictivas a realizar corresponden a 3 escenarios:

1. Expansión del tajo hacia las áreas A1, A2 y A3.
2. Expansión de la escombrera superior (área E1ET1)
3. Desagüe de la quebrada Chicalá

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones realizadas.

5.1.7.7.7.1. Expansión del tajo hacia áreas A1, A2 y A3.

De acuerdo con la Resolución No. 01452 del 15 de noviembre de 2017, la expansión del tajo aprobada por la ANLA, para un horizonte de 12,5 años (año 2030) contempla lo siguiente:

0,1 ha del área A1 para explotación de caliza en el Tajo central del Pit actual. 1,9 ha del área A2 para explotación de caliza en el Tajo central del pit actual. 2,4 ha del área A3 para explotación de caliza en el Tajo Sur del pit actual.

En consecuencia, a través del modelo numérico se busca conocer los efectos que dicha expansión acarreará sobre el sistema hidrogeológico del área de estudio. Se debe tener en cuenta que actualmente la cota mínima del tajo está mínimo 16 m por encima del nivel piezométrico interpretado (Figura 146), por lo cual no ha conllevado ningún efecto sobre el mismo.

La representación de las áreas de expansión se realizó a través de la inactivación de las zonas correspondientes al tajo y la entrada en operación de nodos tipo seepage face, como se ilustra en la Figura 147. Los nodos tipo seepage face permiten simular que, una vez la base del tajo entre en contacto con el nivel piezométrico, el agua subterránea saldría del sistema a través de la conformación del pit lake en superficie lo que supondría la necesidad del bombeo continuo por parte de la operación minera.

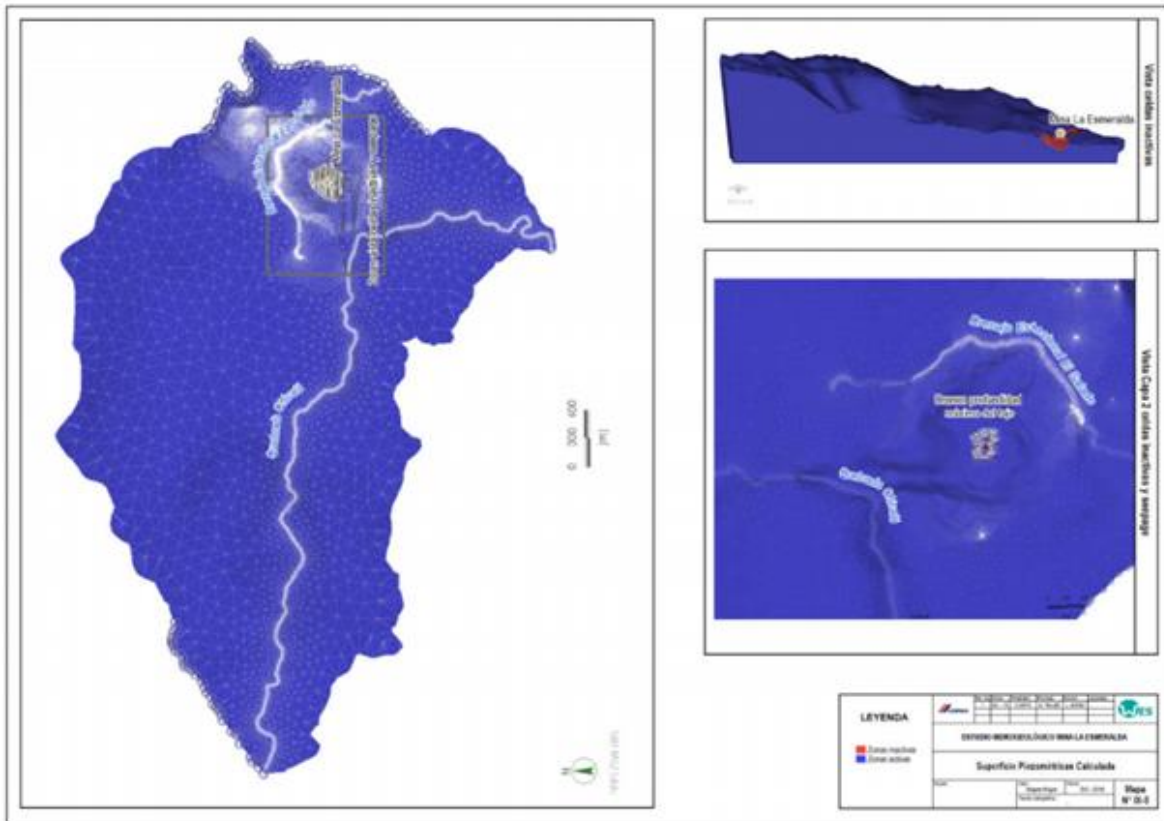


Figura 148. Representación en el Modelo Numérico de la Expansión del Tajo.
Fuente: WES Perú SAC, 2019.

5.1.7.7.2. Expansión de las zonas de sobrantes de excavación minera.

Dentro del plan de expansión con horizonte de 12,5 años, se pretende ampliar la escombrera superior al área denominada E1ET1, la cual ocupa una extensión de 7,3 ha. De acuerdo con el modelo numérico calibrado, estas zonas de origen antrópico, debido a la naturaleza y tipo de material acumulado son más permeables que el terreno natural sobre el que se emplazan. Dado que el sistema acuífero estudiado es profundo, en toda el área de estudio y específicamente en la desmontera, el emplazamiento de estas zonas de alta conductividad no presenta injerencia sobre la piezométrica, pero debido al cambio de material superficial, es probable que presente cambios en el volumen de recarga de la zona.

Acorde con lo anterior, la ampliación de la escombrera superior fue simulada con un cambio en el valor de recarga de la zona sobre la cual se emplaza. El valor de la recarga impuesto corresponde al valor promedio de recarga en las zonas de escombreras actuales, siendo este un valor de 180 mm/año.

En la Figura 148 se observa la representación de la zona E1ET1 dentro del modelo numérico.

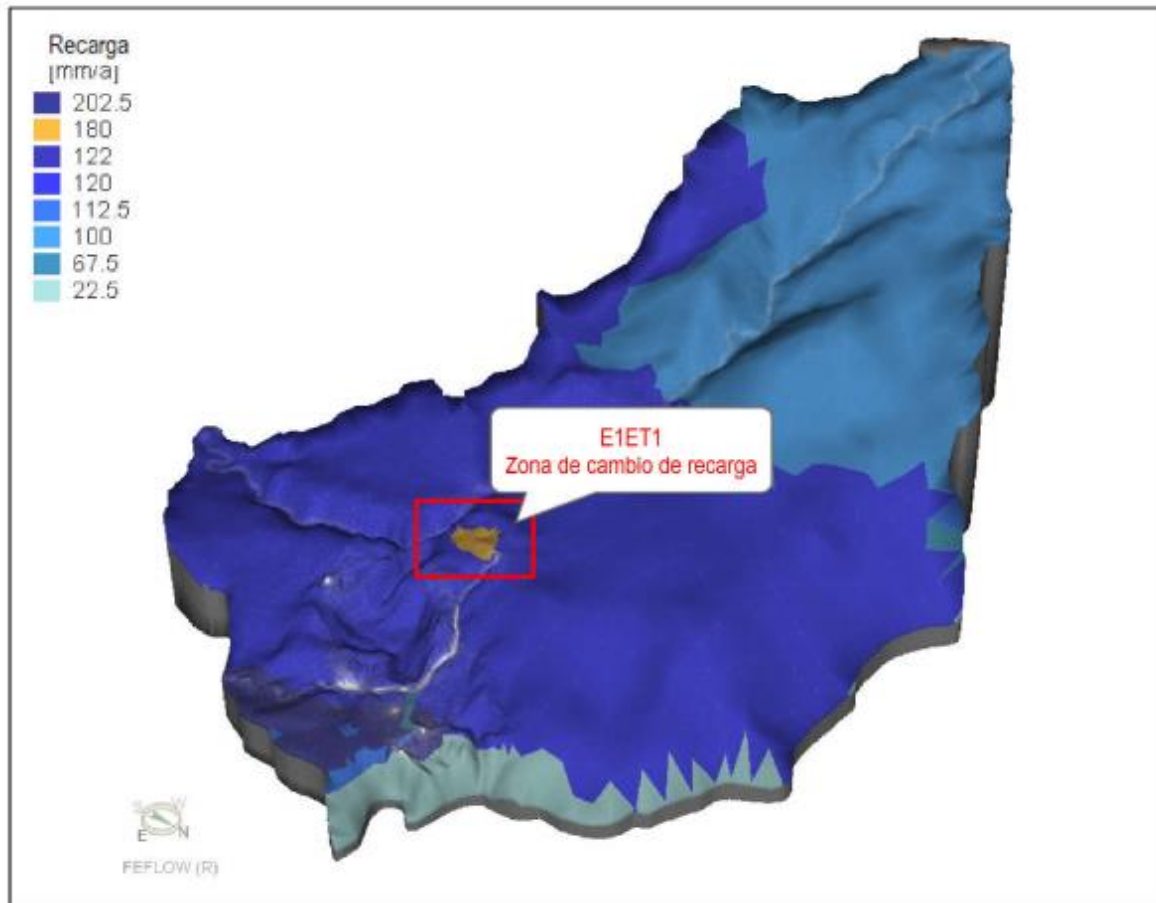


Figura 149. Representación en el Modelo Numérico de la Expansión de la Escombrera Superior Área E1ET1.

Fuente: WES Perú SAC, 2019.

La simulación realizada permite observar que la expansión de la zona de depósito de escombros genera un aumento en la recarga del sistema hidrogeológico de aproximadamente 11 m³/d, lo cual se considera despreciable, al comparar con el total de recarga de 6 616 m³/d (0,16% del total de la recarga). En ese sentido, esta ampliación no generaría tampoco ningún cambio importante en los niveles piezométricos del área, Figura 149.

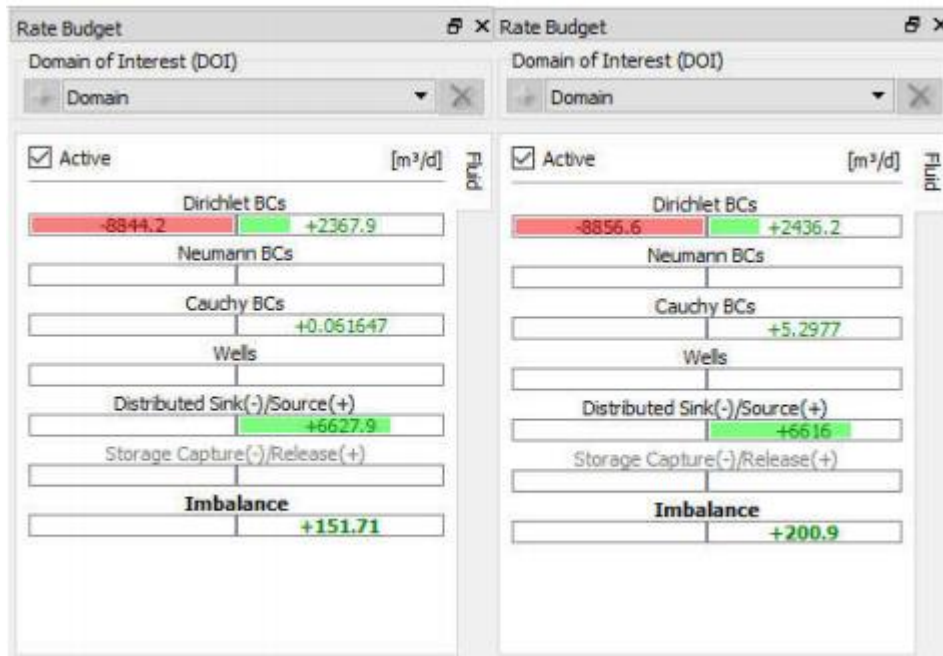


Figura 150. Balance Hídrico Escenario Ampliación de la Escombrera Superior E1ET1 (izquierda) vs Balance Hídrico Calibrado (derecha).

Fuente: WES Perú SAC, 2019.

5.1.7.7.3. Infiltración de la quebrada Chicalá.

De acuerdo con la dureza de la roca se utilizan dos métodos de explotación, uno mecánico directamente con retroexcavadoras tipo Cat 390, o con la implementación de voladuras por medio de la utilización de agentes explosivos. Los diseños de explotación se hacen de acuerdo con parámetros preestablecidos resultado de diversos estudios técnicos que ha realizado la empresa para la optimización de las voladuras de acuerdo con las características litológicas y estructurales de la roca y la cercanía de la población de Payandé.

Las vibraciones producidas por voladura están en función de las siguientes variables: la cantidad de carga de explosivo por retardo expresadas en kilogramos (carga máxima instantánea (Q)), distancia entre la voladura y el punto de interés del monitoreo expresados en metros (R), constante de relación a las propiedades del lugar y de la roca que depende del grado de confinamiento según la geología (k), y finalmente, una constante relacionada a las propiedades del lugar y las rocas (usualmente es -1,6(B)), con las cuales se expresa lo siguiente:

Fórmula de predicción de vibraciones del terreno (modelo general):

$$V = K \left[\frac{R}{\sqrt{Q}} \right]^B$$

Los de vibraciones están expresados en in/seg

Donde:

K= 500 Roca de confinamiento bajo, altamente fisurada.

K= 1140 Cara libre en roca normal, confinamiento normal.

K= 5000 Roca dura, confinamiento alto

Para hacer la simulación de las vibraciones que se generan en el sector norte de la ampliación del área sujeta a la modificación, se tiene en cuenta como norma a seguir, la norma alemana DIN, la cual reglamenta como máximo nivel

permitido de vibración 0,12 in/seg. Se consideró entonces una distancia prudente de 600 m teniendo en cuenta la distancia de atenuación de la onda de voladura, para evaluar en el modelo un escenario hipotético de desagüe de la quebrada Chicalá hacia el pit y poder compararlo con la realidad presentada.

Es necesario tener en cuenta que naturalmente el material sobre el cual discurre la quebrada Chicalá, al tratarse de la zona no saturada, presenta menores permeabilidades que los materiales en la zona saturada. También es necesario aclarar nuevamente que el flujo de la quebrada Chicalá hacia el pit ocurre de manera natural, por simple acción de la gravedad, al encontrarse el pit aguas debajo de la quebrada.

Así mismo, se debe recordar, que la geología estructural en perforaciones exploratorias en la pared sur del pit, señala la presencia de un dique que eventualmente actuaría como barrera hidráulica al flujo de la quebrada Chicalá; adicionalmente el buzamiento de la estratificación de la Formación Payandé en contra del talud, dificultaría el flujo lateral hacia la cantera.

Con las premisas anteriores, los resultados presentados a continuación corresponden a plenas interpretaciones bajo supuestos como que las voladuras generase algún aumento en la permeabilidad 600 m alrededor de la pared del pit en el cual fueran realizadas (ver Figura 150), en este caso en la pared Sur, la más cercana a la quebrada.

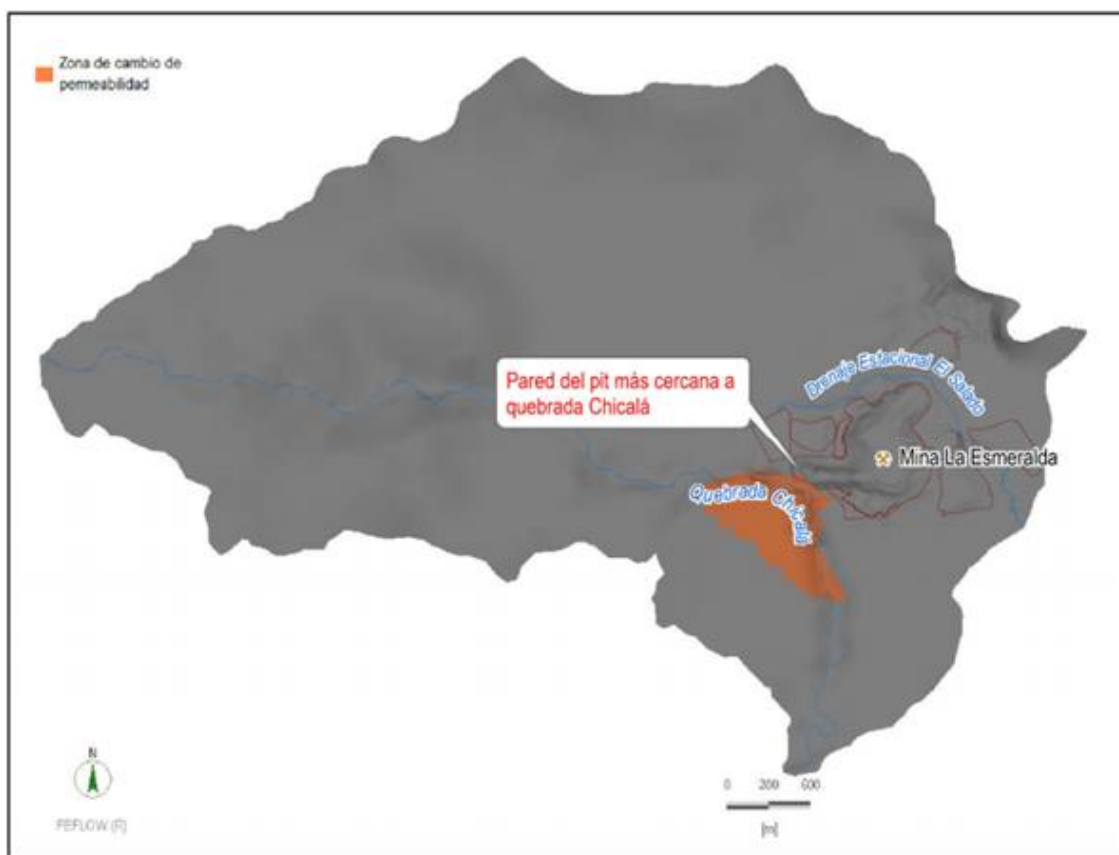


Figura 151. Zona donde se Aplicó el Cambio de Permeabilidad dentro del Modelo Numérico.

Fuente: WES Perú SAC, 2019.

La conductividad hidráulica calibrada en el modelo numérico para el área presentada en la Figura 150 es de 0,05 m/d. Para la evaluación a realizar se aumentó esa conductividad calibrada en 1, 2 y 3 órdenes de magnitud para verificar si existe cambio en el aporte que hace la quebrada Chicalá, observado a través del balance (rate Budget) de salida del modelo numérico. La Figura 151 muestra la comparación de los escenarios modelados.

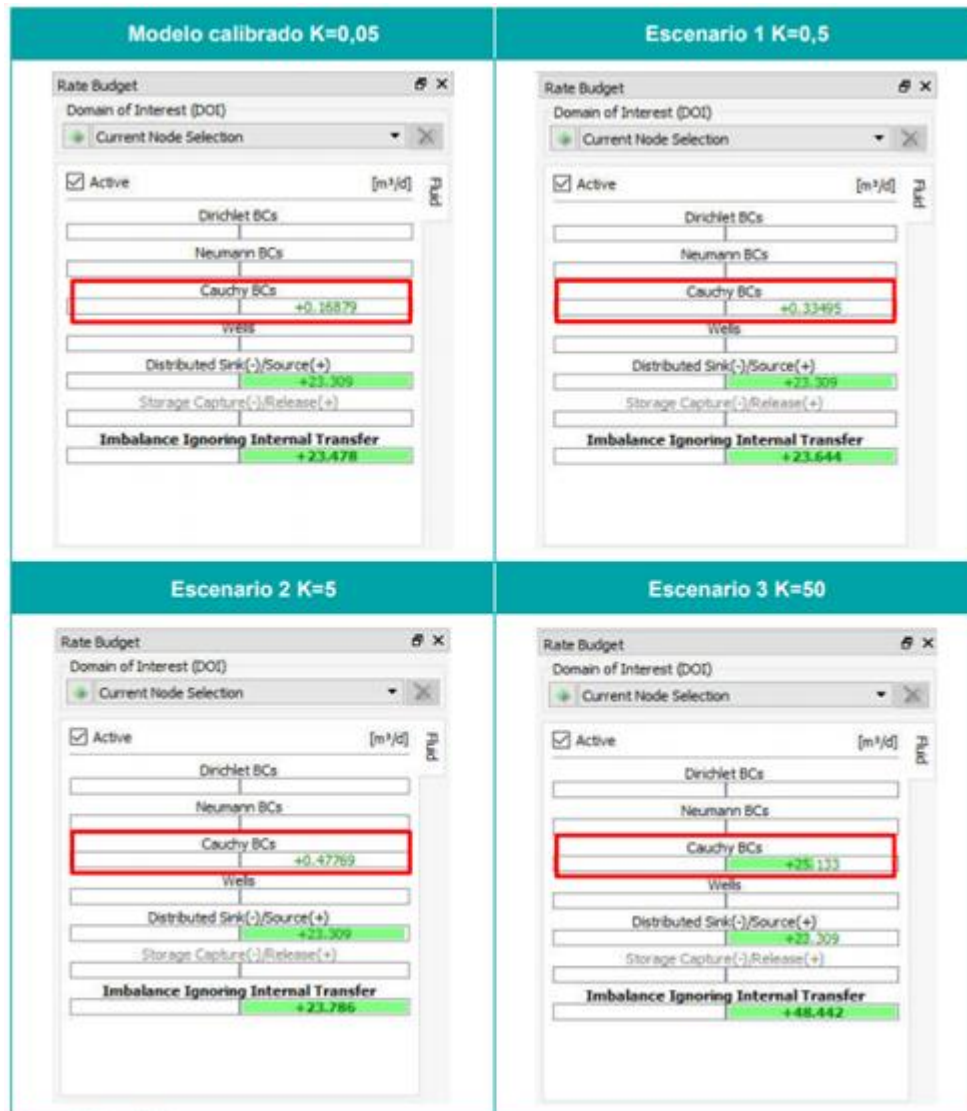


Figura 152. Comparación del Balance Obtenido en los Escenarios de Evaluación de Desagüe de la Quebrada Chicalá.

Fuente: WES Perú SAC, 2019.

Al comparar los tres escenarios de cambio de conductividad con los resultados del modelo calibrado, se observa que sí existe un aumento en el valor de goteo de la quebrada Chicalá hacia el sistema, es decir, que probablemente si la conductividad aumentará de 1 a 3 órdenes de magnitud, también aumentaría el drenaje desde la quebrada Chicalá hacia el pit.

El caudal de infiltración natural de Chicalá estimado por el modelo calibrado es de 0,17 m³/d; de acuerdo con la Actualización del Estudio Hidrológico e Hidrogeológico en la zona de Influencia del PIT Final de la Mina la Esmeralda (GOTTA INGENIERÍA SAS, 2013) el caudal promedio de la quebrada Chicalá es de 250 L/s (21 600 m³/d), es decir que el goteo de la quebrada representa el 0,00078%. En el peor de los escenarios, es decir, donde la conductividad hidráulica tuviese un valor de 50 m/d, el valor de desagüe de Chicalá sería de 25 m³/d, por lo que el desagüe extremo representaría sólo el 0,11% del total del caudal de la quebrada, lo que conduce a concluir que en un evento poco probable en donde la conductividad hidráulica de los materiales sobre los cuales discurre la quebrada Chicalá aumentase en 3 órdenes de

magnitud, producto de las voladuras realizadas para la explotación minera, el aumento en el desagüe de la quebrada representaría apenas una pequeña parte del caudal total, lo que no sería significativo y no afectaría el caudal ecológico de la quebrada.

5.1.8. Geotecnia.

En este capítulo se presenta un compilado de los trabajos efectuados por parte de CEMEX referentes al componente geotécnico de las obras que se desarrollarán para el proyecto la Esmeralda en el título minero 745. En este orden de ideas, el objetivo fundamental de este capítulo es el de dar a conocer de manera general las actividades de exploración geotécnica ejecutadas, los criterios de diseño considerados y los análisis efectuados, que llevaron a la definición de las características de las excavaciones y rellenos planteados. Mayores detalles de las diferentes actividades a llevar a cabo y su incidencia en el entorno se presentan en el Capítulo 3 Descripción del Proyecto.

Vale la pena resaltar que dentro del contexto geotécnico, el término “características” para el caso de obras en superficie, hace referencia principalmente a la definición de alturas e inclinación de los taludes (sean en corte o relleno) y de los tipos o medidas de protección y soporte necesarios para garantizar su estabilidad, para lo cual se ha tomado como lineamiento los requerimientos contenidos en los términos de referencia (TDR), emitidos por la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA, 2016). Según este documento el componente geotécnico para los proyectos de desarrollo minero como el que se llevará a cabo en el TM 745 contempla el análisis de las excavaciones a cielo abierto requeridas para efectuar las actividades de extracción de los minerales de interés económico, en este caso las arenas puzolánicas que lo componen.

Las escombreras, lugar de disposición de los materiales estériles producto de las actividades de extracción en el título minero, ya hacen parte de las zonas previamente licenciadas, para mayor detalle véase Capítulo 3 Descripción del Proyecto.

Partiendo de la categorización antes descrita, el análisis del componente geotécnico de los EIA, conforme los TdR de la Autoridad, se debe estructurar en torno a los siguientes ejes temáticos:

- Definición de la amenaza sísmica para la zona del proyecto.
- Plan de investigación geotécnica y de ensayos.
- Caracterización geotécnica de los materiales.
- Criterios de diseño y análisis geotécnicos de estabilidad.
- Evaluación de la amenaza por remoción en masa.
- Monitoreo geotécnico
- Consideraciones geotécnicas para la etapa de cierre.

Se resalta que aspectos como el plan de investigación geotécnica, la caracterización de materiales, los criterios de diseño, análisis de estabilidad y consideraciones para el cierre tienden a ser particulares a cada grupo de obras, mientras que la evaluación de amenaza y criterios para el monitoreo geotécnico pueden ser tomados de manera integral para todo el proyecto.

5.1.8.1. Información de referencia

Establecido el marco de referencia general del capítulo de geotecnia según los TdR de la autoridad ambiental, el presente capítulo se enfoca en mostrar la información de índole geotécnica extraída de la documentación disponible y las visitas técnicas realizadas a la zona del proyecto. Dicho esto, los siguientes son los documentos base a partir de los cuales se conformó el componente geotécnico del estudio de impacto ambiental para la mina La Esmeralda:

- Moreno, José Joaquín. *Estudio de Impacto y Plan de Manejo Ambiental. Contrato de Concesión No. 8-745 Mineral: Arenas Puzolánicas*. (2003). CEMEX.
- Rincón Rafel Hernándo. *Estudio Geotécnico Mina de Caliza Payandé (Tol.)*. *Análisis Cinemático y Seudoestático de Estabilidad de Taludes Mineros*. (2004). CEMEX
- CEMEX COLOMBIA S.A. Actualización del Estudio Geotécnico de las Escombreras de la Mina de Caliza La Esmeralda. Payandé (Tol). (2015). CEMEX.
- INGETEC. *Modificación del Plan de Manejo Ambiental. Título Minero 4205. Cap 4 Caracterización Ambiental del Área de Estudio. Documento CEMEX-INF-15-02*. (2016). CEMEX
- Cemex. *Actualización Programa De Trabajo Y Obras. Contrato De Concesión 8- 6823*. (2018)
- INGENIERÍA GEOLÓGICA Y PERFORACIONES - IGP - *Estudio Geotécnico y Análisis de Estabilidad para Escombreras de la Mina La Esmeralda*. IGP-PY-FO-016. (2019). CEMEX
- GEOLOGÍA Y GEOTECNIA INGENIERÍA (2019). Exploración geotécnica superficial y ensayos de laboratorio.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, a continuación se mencionan los aspectos geotécnicos del Estudio de Impacto Ambiental para el título minero 745 en donde se llevarán a cabo las actividades del proyecto La Esmeralda.

5.1.8.2. Sismicidad de la zona del proyecto.

Uno de los principales elementos para la caracterización sísmica del sitio de estudio corresponde al marco tectónico regional del área de interés propuesto como parte de la NSR-10 (AIS, 2010) que es la normativa vigente de construcción sísmo resistente en Colombia. La NSR-10 define que para Ibagué el cual es el municipio más cercano al corregimiento de Payandé (Tolima) la aceleración del terreno (Aa en el nomenclatura de la NSR-10) asociada a un periodo de retorno de 475 años (10% de probabilidad de excedencia en 50 años) es de 0,20 g, el cual corresponde a una zona de amenaza sísmica intermedia.

Este valor de aceleración pico del terreno será el adoptado para efectos del presente estudio, valor que se encuentra sustentado en los siguientes aspectos:

- Dentro del área de influencia del título minero se presentan fallas menores de tipo inverso acompañadas de algunos movimientos normales oblicuos y perpendiculares a la dirección principal (E-W) descritas con detalle en el Capítulo 5.1.1 Geología. La cercanía a estas fallas es la base para llevar a cabo una evaluación de los sismos más cercanos y de mayor intensidad registrados por el Servicio Geológico Colombiano. Para tal fin las se analizó la información procedente del catálogo sísmico nacional compilado por la Red Sismológica Nacional de Colombia (RSNC) entre los años 1993 y 2020 (27 años de registro), en este sentido, en la Figura 152 se presentan los epicentros de los sismos con magnitud mayor o igual que 2,0 (MI) que se han registrado para este periodo de tiempo.
- De la información analizada se desprende que la sismicidad cercana a la zona de estudio (distancia epicentral menor o igual a 20 km) corresponde a sismos de baja profundidad (sismicidad cortical) con magnitudes por debajo de la magnitud umbral definida en el Estudio General de Amenaza Sísmica de Colombia (AIS, 2009) de 4,0. El sismo de mayor magnitud con distancia epicentral menor o igual a 20 km corresponde a un evento ocurrido el 21 de abril de 2006 con magnitud 3,4 (MI), profundidad de 4,5 km y una distancia epicentral a la mina la Esmeralda de 6,2 km. El sismo más cercano a la zona del proyecto (ocurrido el 14 de enero de 2013) presentó una magnitud 3,0 una profundidad de 13,6 km y una distancia epicentral de 0,8 km. Como se mencionó anteriormente la sismicidad local para la zona de estudio según el catálogo de la RSNC presenta magnitudes inferiores a la magnitud umbral de daño (M = 4,0), por lo cual se esperaría que los eventos que han ocurrido desde la puesta en funcionamiento de la RSNC (1993) no generarían daños en la infraestructura que se planea instalar en superficie.
- Para distancias epicentrales de hasta 50 km el sismo de mayor magnitud registrado en la RSNC corresponde a un evento con epicentro en el municipio del Guamo ocurrido el 19 de junio de 2012, con magnitud 3,8, profundidad 4,9 km y una distancia epicentral a la zona de estudio de 38,70 km.

En la Tabla 112 se presenta un listado de los sismos registrados por la RSNC en las inmediaciones de la mina La Esmeralda. En dicha tabla se resalta en color rojo el sismo cercano de mayor magnitud y en color naranja el sismo más cercano a la zona de estudio.

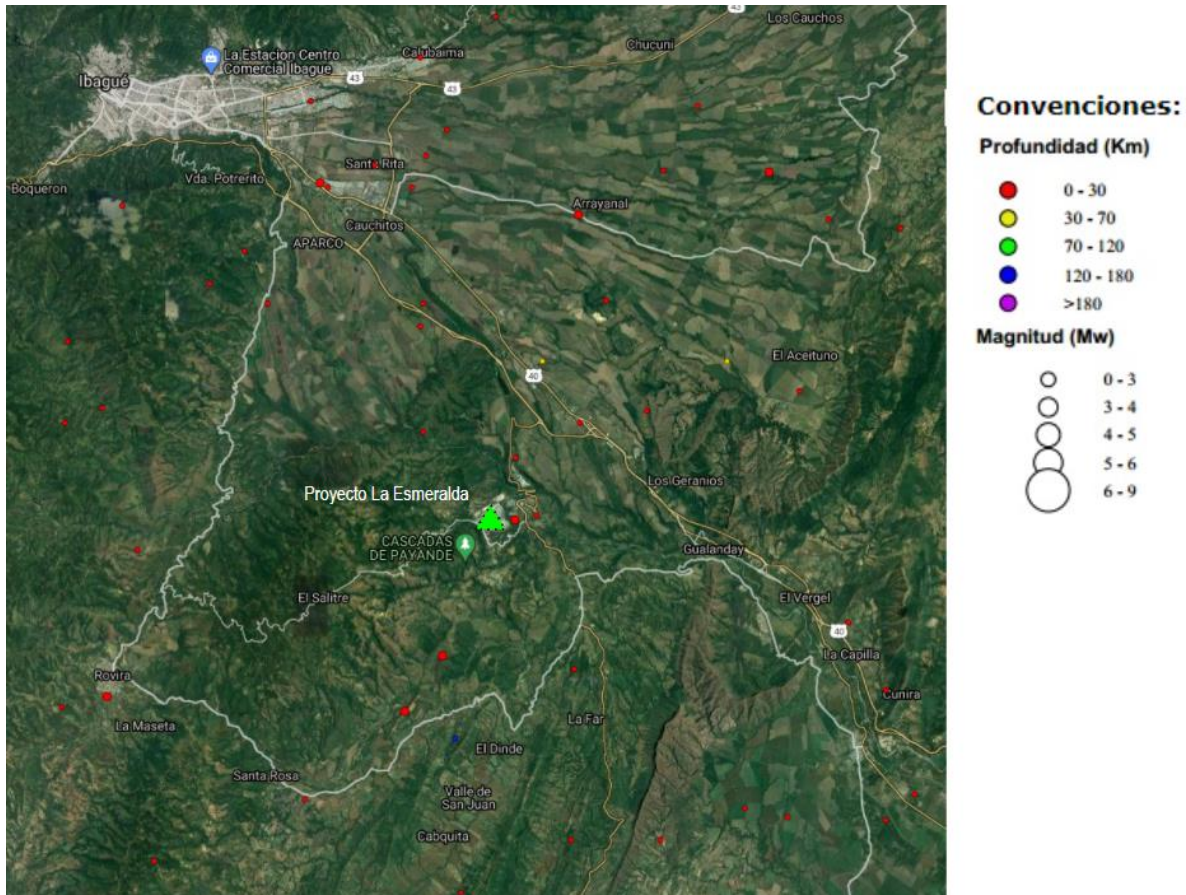


Figura 153. Registro del Catálogo Sísmico Colombiano (RCSC) de sismos más cercanos al área del estudio de magnitud mayor a 2,0.

Fuente: SGC, 2020.

Tabla 112. Reporte de sismicidad Red Sísmológica Nacional de Colombia (1993-2020) para el corregimiento de Payandé en el departamento del Tolima

Fecha	Lat. (grados)	Long. (grados)	Prof. (Km)	Mag MI	Distancia Epicentral (Km)	Fecha	Lat (grados)	Long. (grados)	Prof. (Km)	Mag. MI	Distancia Epicentral (Km)
1993-06-09	4,234	-75,243	1,2	3,0	16,8	2003-12-21	4,325	-75,133	13,3	2,3	4,0
1993-09-05	4,376	-75,207	16,5	2,2	14,0	2004-03-10	4,339	-75,003	21,4	2,3	12,3
1994-02-23	4,229	-75,14	5,9	3,1	8,7	2005-06-15	4,166	-75,12	0,1	2,2	15,0
1994-03-08	4,184	-75,051	7,4	2,0	14,3	2005-07-10	4,415	-75,05	8,7	2,3	14,3

Fecha	Lat. (grados)	Long. (grados)	Prof. (Km)	Mag MI	Distancia Epicentral (Km)	Fecha	Lat (grados)	Long. (grados)	Prof. (Km)	Mag. MI	Distancia Epicentral (Km)
1994-10-06	4,328	-75,257	0,0	2,3	17,0	2005-11-21	4,468	-75,108	1,9	2,1	18,7
1994-11-08	4,284	-75,232	0,0	2,5	14,0	2005-12-10	4,349	-75,092	46,0	2,2	5,7
1995-02-14	4,37	-75,07	22,0	2	8,8	2006-04-21	4,248	-75,127	4,5	3,4	6,2
1995-04-21	4,415	-75,014	8,5	3	16,4	2006-06-02	4,356	-75,256	4,0	2,5	17,7
1996-02-02	4,328	-75,079	15,7	2,5	4,4	2006-10-13	4,230	-75,258	4,2	2,3	18,5
1996-04-27	4,191	-74,973	28,0	2,3	19,2	2007-01-23	4,437	-75,038	3,8	2,1	17,1
1996-06-13	4,349	-75,028	33,4	2,1	10,3	2007-05-26	4,411	-75,169	19,4	3	14,2
1996-09-27	4,333	-75,244	25,4	2,4	15,7	2007-07-08	4,400	-75,08	19,3	3	11,5
1998-11-15	4,259	-74,986	1,5	2,9	14,2	2007-12-29	4,195	-75,022	4,0	2,7	15,0
1999-01-07	4,454	-75,134	0,0	2,1	17,4	2010-04-10	4,369	-75,133	4,0	2,1	8,2
1999-04-08	4,369	-75,187	4,0	2,4	11,8	2010-06-27	4,42	-75,132	6,8	2,7	13,7
1999-04-26	4,409	-75,137	0,0	2,5	12,6	2011-01-08	4,417	-75,15	27	2,1	13,9
2000-09-21	4,177	-75,226	1,2	2,3	19,0	2011-04-23	4,409	-75,166	4,0	2	13,8
2001-08-10	4,332	-75,056	0,0	2,1	6,7	2011-06-26	4,429	-75,125	4,0	2,1	14,5
2001-09-15	4,192	-75,007	10,2	2,4	16,3	2011-08-16	4,403	-75,237	4,0	2,4	18,5
2001-11-23	4,184	-75,082	0,1	2,8	13,2	2011-09-26	4,243	-75,081	12,6	2	7,0
2001-12-03	4,316	-75,101	0,1	2,2	1,9	2012-11-21	4,395	-74,968	18,8	2	18,7
2002-03-17	4,198	-75,174	0,1	2,2	13,6	2013-01-14	4,295	-75,102	13,6	3	0,8
2003-01-16	4,296	-75,094	4,1	2,1	1,5	2013-08-05	4,2	-74,963	6,3	2	19,5
2003-02-07	4,387	-75,195	1,2	2,5	13,8	2014-01-08	4,219	-75,122	153	2,3	9,2
2003-07-01	4,159	-75,146	0,1	2,8	16,3	2014-06-22	4,236	-74,973	7,8	2,9	16,5
2003-08-19	4,398	-74,993	22	2,4	16,7	2016-06-29	4,439	-75,172	0,1	2,3	17,1
2003-10-28	4,361	-75,134	0,1	2,6	7,4						

* (MI. Escala de Richter)

Fuente: Servicio Geológico Colombiano - SGC-, Red Sismológica Nacional de Colombia. Catálogo Sísmico. Payandé, Tolima. 2020

5.1.8.3. Exploración Geotécnica

Como parte de todo proceso minero, en desarrollo de los trabajos que se adelantan en la mina La Esmeralda específicamente en el TM 4205 se han llevado a cabo gran cantidad de perforaciones con las cuales es posible definir el modelo geológico geotécnico que a su vez es la base del modelo de extracción minera. No obstante, en el presente apartado se detalla principalmente las perforaciones ejecutadas con fines geotécnicos las cuales de acuerdo con la información de referencia aportan a caracterizar la zona del título minero 745.

Dicho esto, en el marco de diferentes estudios adelantados desde el año 2000, se han llevado a cabo las siguientes perforaciones geotécnicas tanto para la zona de las escombreras de la Mina La Esmeralda como para la zona de extracción. Las características de estas perforaciones se presentan a continuación.

Tabla 113. Perforaciones efectuadas Mina La Esmeralda.

Año de ejecución	ID	Coord. Origen Único		Coord. Sistema Magna Sirgas Origen Bogotá		Longitud (m)
		Este	Norte	Este	Norte	
2002	PE-01-002	4 766 583,69	2 032 937,67	886 056	966 791	35,0
	PE-02-002	4 766 528,37	2 032 700,81	886 001	966 554	40,0
	PE-03-002	4 765 666,02	2 032 986,95	885 138	966 839	26,0
	PE-04-002	4 765 475,17	2 033 053,2	884 947	966 905	31,5
2014	PE-05-014	4 765 585,01	2 032 966,07	885 057	966 818	39,9
	PE-06-014	4 765 667,97	2 032 953,96	885 140	966 806	23,0
	PE-07-014	4 766 558,21	2 032 592,8	886 031	966 446	40,0
	PE-08-014	4 766 753,05	2 032 516,55	886 226	966 370	37,0
	PE-09-014	4 766 969,61	2 032 959,12	886 442	966 813	42,0
2019	P-1 (PHV-01)	4 765 629,99	2 032 961,01	885 102	966 813	30,0
	P-2 (INC-01)	4 765 698,10	2 033 049,89	885 170	966 902	15,0
	P-3 (INC-02)	4 765 699,00	2 032 980,90	885 171	966 833	10,0

Año de ejecución	ID	Coord. Origen Único		Coord. Sistema Magna Sirgas Origen Bogotá		Longitud (m)
		Este	Norte	Este	Norte	
	P-4 (PHV-02)	4 766 634,30	2 032 671,67	886 107	966 525	30,0
	P-5 (INC-03)	4 766 629,37	2 032 718,67	886 102	966 572	15,0
	P-6 (INC-04)	4 766 593,51	2 032 809,69	886 066	966 663	10,0
	P-7(PHV-03)	4 766 775,64	2 032 940,4	886 248	966 794	28,0
	P-8 (INC-05)	4 766 806,19	2 062 888,8	886 235	996 751	15,0
	P-9 (INC-06)	4 766 824,56	2 032 891,34	886 297	966 745	10,0

Fuente: Ingeniería Geológica y Perforaciones - IGP - *Estudio geotécnico y análisis de estabilidad para escombreras de la mina La Esmeralda*. IGP-PY-FO-016. (2019).

Por otro lado, se ejecutaron unas líneas de refracción sísmica en la zona de estudio, con el fin de estimar espesores de suelos y características de rigidez de los materiales a bajas deformaciones. La Tabla 114 presenta la ubicación de una de las tres líneas de refracción sísmica ejecutadas (realizada sobre la escombrera superior, utilizada para la caracterización de la extensión de la escombrera superior), mientras que la Fotografía 91 presenta una foto de las labores de las líneas y perforaciones ejecutadas en la zona de influencia del proyecto durante el año 2019.

Tabla 114. Localización de la línea de refracción sísmica efectuadas en Mina La Esmeralda para la zona de la escombrera superior. TM 745

Línea de refracción sísmica	Punto	Sist. Coord. Origen Único		Coord. Sistema Magna Sirgas Origen Bogotá	
		Este	Norte	Este	Norte
Línea 1	Inicio perfil	4 765 631,27	2 033 028,29	885 103,18	966.880,30
	Fin de perfil	4 765 625,92	2 032 914,21	885 097,99	966.766,18

Fuente: Ingeniería Geológica y Perforaciones - IGP - *Estudio geotécnico y análisis de estabilidad para escombreras de la mina La Esmeralda*. IGP-PY-FO-016. (2019)



Fotografía 91. Labores de exploración geotécnica área de influencia Mina Esmeralda.

Fuente: Ingeniería Geológica y Perforaciones - IGP - *Estudio geotécnico y análisis de estabilidad para escombreras de la mina La Esmeralda*. IGP-PY-FO-016. (2019)

Adicionalmente, durante el año 2019 la empresa consultora GYG S.A.S realizó la extracción de muestras cuyo objetivo era el de efectuar la caracterización geotécnica y complementar la formulación del modelo geológico-geotécnico desarrollado para la explotación minera existente. La localización de las muestras extraídas para la caracterización geotécnica de la zona norte de la mina, por tipo de material se presenta a continuación.

Tabla 115. Muestreo efectuado en la zona norte de la Mina La Esmeralda.

Material	Nº Muestra	Sist. Coord. Origen Oeste		Coord. Sistema Magna Sirgas Origen Bogotá		Cota (msnm)
		Norte (m)	Este (m)	Norte (m)	Este (m)	
Caliza gris	M-1	967 049	885 767	2 033 196	4 766 295,14	674
	M-2	967 051	885 772	2 033 198	4 766 300,14	674
	M-3	967 060	885 776	2 033 206,99	4 766 304,15	674
Caliza blanca	M-4	967 030	885 794	2 033 176,97	4 766 322,1	674
	M-5	967 030	885 794	2 033 176,97	4 766 322,1	674
	M-6	967 030	885 794	2 033 176,97	4 766 322,1	674
Limolita	M-7	967 087	885 696	2 033 234,09	4 766 224,21	688
	M-8	967 087	885 696	2 033 234,09	4 766 224,21	688

Material	N° Muestra	Sist. Coord. Origen Oeste		Coord. Sistema Magna Sirgas Origen Bogotá		Cota (msnm)
		Norte (m)	Este (m)	Norte (m)	Este (m)	
Caliche	M-9	967 188	885 816	2 033 334,89	4 766 344,32	702
Arena puzolánica	M-10 y M-10A	967 406	886 032	2 033 552,53	4 766 560,56	708
	M-11 y M-11A	967 317	885 891	2 033 463,75	4 766 419,48	700
	M-12	967 502	886 064	2 033 648,45	4 766 592,69	710
	M-13	966 727	886 810	2 032 872,63	4 767 337,38	690
	M-14	967 427	886 028	2 033 573,53	4 766 556,6	678
	M-15	967 427	886 028	2 033 573,53	4 766 556,6	678
	M-16	967 427	886 028	2 033 573,53	4 766 556,6	678

Fuente: Geología y Geotecnia S.A.S Ingenieros Consultores (2019).

A partir de las exploraciones de campo antes descritas, se pudo establecer las características generales del perfil del suelo en la zona de estudio, las cuales se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 116. Perfiles tipo Mina La Esmeralda. Zona de operación minera

Zona	Perfil Tipo
Operación minera TM 745	<p>Depósitos Aluviales: Se distribuye por el sector oriental del área, particularmente sobre la vertiente del drenaje El Salado. Estos depósitos están conformados por aluviones de carácter arenoso con clastos angulosos de tamaño variable. Los clastos están constituidos por fragmentos de caliza, limolita, granodiorita, areniscas conglomeráticas, soportados por una matriz arenosa de color crema y pardo. Los depósitos aluviales forman una topografía plana disectada por las corrientes de agua. Su espesor es de hasta 10,0 m.</p> <p>Arenas Puzolánicas: Este material corresponde al mineral de interés económico y es donde se desarrollarán las actividades de operación minera referentes al TM 745. Se trata de una secuencia de arenas volcánicas de características puzolánicas, cuya granulometría varía entre fina y conglomerática, con intercalaciones de cenizas volcánicas muy finas. Aunque la matriz del depósito es predominantemente arenosa, es posible que se presenten lentes continuos clastosoportados de guijarros y cantos e incluso bloques de fragmentos líticos de origen principalmente ígneo y metamórfico. Estos fragmentos presentan formas entre subangular a subredondeada y hacia la parte basal de la explotación tienden a ser más tabulares que en la parte superior. El espesor total de la secuencia de arenas oscila entre 35 m y 60 m (GYG, 2019).</p>

Fuente: Geología y Geotecnia S.A.S Ingenieros Consultores (2019).

Los detalles de la información previamente resumida se presenta en CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.031.

5.1.8.4. Caracterización geotécnica.

El proceso de caracterización geotécnica consiste en la determinación de las propiedades mecánicas de los materiales sobre los cuales se efectuarán las obras. Estas propiedades se determinan según el problema que se esté enfrentando, pero, en términos generales, se puede hablar de propiedades de resistencia y deformabilidad. En este sentido, el insumo primordial para llevar a cabo el proceso de caracterización geotécnica lo constituye la realización de sondeos o perforaciones a partir de los cuales se pueden efectuar ensayos de campo y de laboratorio.

Para el caso del proyecto en estudio, a partir de las exploraciones efectuadas y de diversos estudios adelantados con anterioridad se obtuvo la información requerida que permitió efectuar la caracterización geotécnica aquí presentada, la cual se basa en una serie de criterios de falla que permiten definir las características que es necesario conocer y por tanto los tipos de ensayos a ejecutar. En este sentido, y como una primera aproximación al proceso de caracterización geotécnica realizado, a continuación se presentan los criterios de falla adoptados para el presente estudio.

5.1.8.4.1. Criterios de falla

Un criterio de falla se puede definir como una expresión matemática con la que se pretende representar el comportamiento de un material cuando es sometido a esfuerzos, buscando predecir bajo qué condiciones se presentará la ruptura del mismo. Debido a la naturaleza heterogénea de los materiales térreos, algunos de los criterios de falla empleados son de carácter empírico, obtenidos a partir de una gran cantidad de ensayos de laboratorio y de experiencias acumuladas, el ejemplo típico de este tipo de criterio de falla es el caso de los macizos rocosos. Así mismo, existen otros criterios de falla que obedecen a modelos matemáticos de amplia aceptación, como el criterio de falla de Mohr-Coulomb de amplio uso dentro de la geotecnia. Para el caso de los materiales con los que se espera trabajar en la mina La Esmeralda, particularmente en el título minero 745, los criterios de falla adoptados son los siguientes:

Criterio generalizado de Hoek y Brown - macizos rocosos fisurados

A partir de la experiencia adquirida en diversos proyectos, Hoek & Brown (1980) formularon un criterio de falla que es una extensión de su propuesta para roca intacta, con la diferencia fundamental que se incluye una serie de parámetros adicionales que permiten tener en cuenta las características del macizo rocoso (fracturamiento, condiciones de las discontinuidades). Dicho criterio ha tenido modificaciones a lo largo de los años siendo la fórmula presentada por Hoek, et al. (2002) la última versión del mismo. Teniendo en cuenta lo anterior, el criterio generalizado de Hoek y Brown a usarse en macizos rocosos fisurados se expresa de la siguiente forma:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left[\frac{m_b \sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right]^a$$

Ecuación 40.

Donde:

m_b = constante de Hoek y Brown para el macizo rocoso

a = parámetro que depende de las características del macizo rocoso que, en el caso de la roca intacta, era igual a 0,5.

s = parámetro adimensional que depende del tipo de roca, de las discontinuidades y de las características del macizo como tal que, en el caso de la roca intacta, es igual a uno (1).

Las expresiones para el cálculo de los diferentes parámetros se muestran a continuación:

$$m_b = m_i * e^{\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14 D} \right)}$$

Ecuación 41.

Donde:

GSI = sistema de clasificación geomecánica propuesto por Hoek, del que se hablará más adelante.

D = factor que depende del grado de alteración o perturbación que sufre el macizo rocoso por efecto del uso de explosivos y la relajación de esfuerzos. Varía desde 0 (para macizos rocosos inalterados) a 1.0 (para macizos muy alterados). En el caso de taludes en donde se ha efectuado voladura, el valor mínimo a adoptar recomendado es del orden de 0,6 para la zona afectada por la voladura, la cual no se extiende más allá de unos cuantos metros desde la cara libre (Hoek & Brown, 2019)

Los valores de los parámetros s y a , están dados por las siguientes expresiones:

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)} \quad a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right)$$

Ecuación 42.

Es importante destacar que en este criterio de falla se asume que la masa de roca es aproximadamente homogénea e isotrópica, por lo que en los casos donde el mecanismo de falla se encuentra fuertemente controlado por discontinuidades (estratificación o esquistosidad), la validez de los resultados es cuestionable (Hoek, 2006). Es así que para la aplicabilidad del GSI y por ende de este criterio de falla se debe tener en cuenta aspectos de escala, tal y como se especifica en la siguiente figura tomada de Hoek et.al (2013).

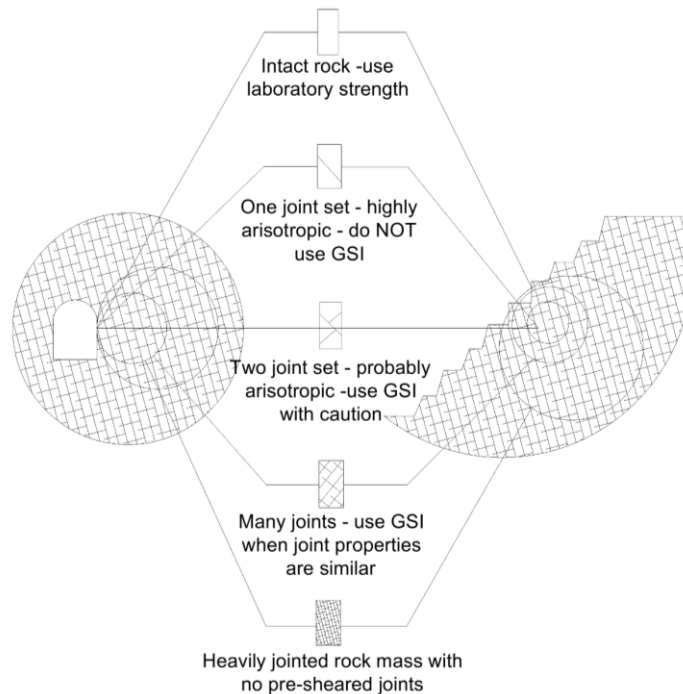


Figura 154. Limitaciones del uso del GSI a partir de la escala de análisis empleada. Adaptado de Hoek et.al (2013). Fuente: Hoek, E. Carter, T.G. Diederichs, M.S. Quantification of the Geological Strength Index chart. American Rock Mechanics Association ARMA13-672. 47th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium. 2013. San Francisco, CA, USA.

Criterio de Barton y Choubey (1977) - macizos rocosos anisotrópicos

Así como existen criterios de falla para macizos de comportamiento isotrópico, también se han establecido criterios para macizos cuyo comportamiento es anisotrópico en donde su estabilidad está definida por la presencia de sistemas de diaclasas. Para el caso de estos macizos anisotrópicos se ha encontrado que la resistencia al corte de las discontinuidades tiene una componente predominantemente friccional y en menor grado cohesiva, en donde la rugosidad de las paredes de la discontinuidad es uno de los factores que más influye, así como el material de relleno en caso de que éste exista. Partiendo de lo anterior, se han formulado una serie de criterios de falla de diferentes clases, sin embargo, para el caso del presente estudio se utilizó el criterio de tipo empírico propuesto por Barton & Choubey (1977), en donde la rotura del material se da siguiendo los planos de discontinuidad, según la siguiente expresión:

$$\tau = \sigma'_n * \tan \left[JRC * \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma'_n} \right) + \phi'_r \right]$$

Ecuación 43.

Donde:

τ = Esfuerzo cortante efectivo sobre el plano de discontinuidad.

σ'_n = Esfuerzo normal efectivo al plano de discontinuidad. τ

ϕ'_r = Ángulo de fricción residual. Si las paredes de la discontinuidad se encuentran sanas $\phi'_r = \phi_b$ (ángulo de fricción básico).

JRC = Coeficiente de rugosidad de la discontinuidad.

JCS = Resistencia a compresión de las paredes de la discontinuidad. Dado que en los ensayos realizados se efectuaron sobre discontinuidades que no se encontraban alteradas el valor de JCS se toma igual a la resistencia a la compresión simple de la roca σ_{sci} .

Para determinar el coeficiente de rugosidad JRC, el cual varía entre 0 y 20, se puede recurrir a perfiles de rugosidad estándar, como el mostrado en la siguiente figura.

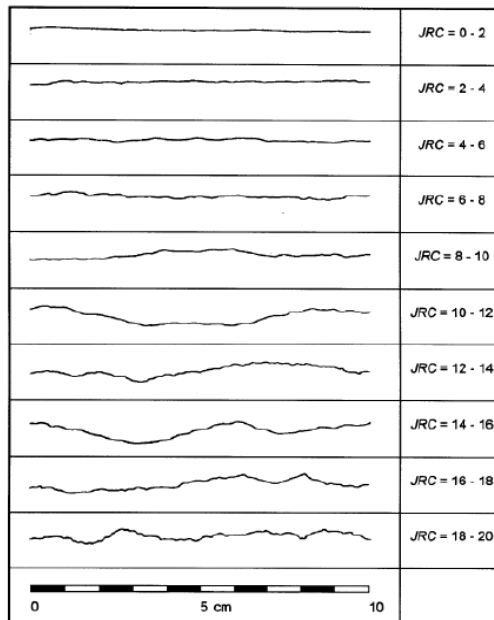


Figura 155. Perfiles de rugosidad y sus valores JRC correspondientes.

Fuente: Barton, N. Choubey, V. 1977. *The shear strength of rock joints in theory and practice*. Rock Mechanics. 10, pp. 1 - 54.

Criterio de Mohr-Coulomb. Material c' - ϕ' - suelos y macizos rocosos

Es el criterio que es implementado con mayor frecuencia en geotecnia dada su simplicidad y capacidad de representar las fallas que se han observado en terreno. En esta propuesta la resistencia a cortante del material a lo largo de un plano definido está dada mediante la siguiente expresión:

$$\tau = c' + \sigma'_n * \tan \phi'$$

Ecuación 44.

Donde:

- τ = Esfuerzo cortante en un plano dado.
 σ'_n = Esfuerzo normal efectivo al plano analizado = $\sigma_n - u$ = Esfuerzo vertical - presión de poros
 c' = Cohesión efectiva
 ϕ' = Ángulo de fricción interna.

Para el caso del presente estudio, este criterio fue empleado para definir las propiedades de resistencia de los materiales tipo suelo y de aquellos que se obtienen como resultado de las actividades de voladura necesarias para obtener el material de cantera. Este material es comúnmente denominado “Esteril” y se dispone en “Escombreras“. Como principal característica de estos estériles se puede mencionar su gran heterogeneidad en términos de tamaño de partículas y componentes, ya que en esencia son la combinación de todos los materiales presentes en la zona de estudio.

Además de su uso en suelos y materiales “estériles” para efectos de los estudios aquí presentados, el criterio de Mohr - Coulomb también se empleó como complemento del proceso de caracterización del macizo rocoso fisurado mediante el cálculo de los valores equivalentes de cohesión y ángulo de fricción obtenidos a partir del criterio de falla de Hoek-brown para macizos rocoso fisurados, tal y como se plantea en Hoek et.al (2002).

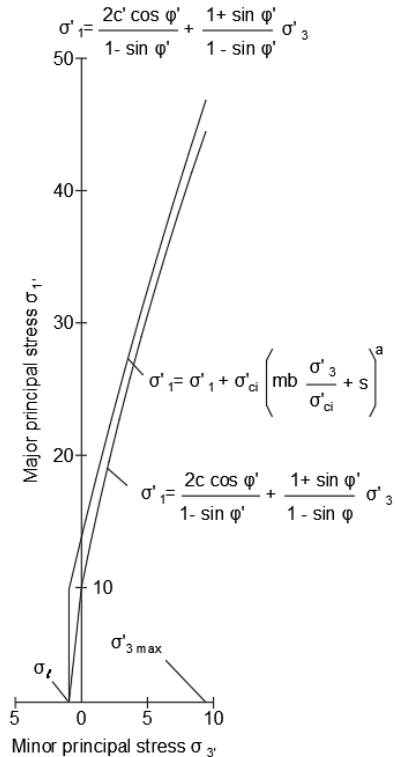


Figura 156. Relación entre los esfuerzos principales mayor y menor y su equivalencia en el criterio de Mohr-Coulomb.
Fuente: Hoek, E. Carranza-Torrez, C. Corkum, B. *Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition*. Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto, 2002, 1, 267-273.

Establecido lo anterior, a continuación se procede a describir los resultados del proceso de caracterización de materiales, el cual como se afirmó anteriormente se basó en los registros de los sondeos efectuados, experiencias previas y referencias bibliográficas.

5.1.8.4.2. Propiedades geotécnicas de los materiales de la zona de estudio

Para el caso de los materiales presentes en la mina La Esmeralda el proceso de caracterización geotécnica se ha basado en diferentes estudios adelantados a la fecha, los cuales se mencionaron de manera general en el numeral 5.1.8.1. Información de referencia; mayores detalles de estos trabajos se desglosan en la siguiente tabla.

Tabla 117. Estudios previos usados como referencia para la caracterización geotécnica

Título del estudio	Año	Material Caracterizado
Geología y Geotecnia S.A.S Ingenieros Consultores.	2019	Rocas de la Formación Honda y Abanico de Ibagué (puzolanas)
Estudio geotécnico y análisis de estabilidad para escombreras de la mina	2019	Materiales estériles de las escombreras superior, inferior y retrolenado. Rocas de la Formación Honda y Abanico de Ibagué

Título del estudio	Año	Material Caracterizado
La Esmeralda. IGP-PY-FO-016. Ingeniería Geológica y Perforaciones.		(puzolanas)
Actualización del estudio geotécnico de las escombreras de la mina de caliza la esmeralda. Payandé (Tol) - Cemex Colombia S.A.	2014	Materiales estériles de las escombreras superior, inferior y retrollenado. Rocas de la Formación Honda y Abanico de Ibagué (puzolanas)
Estudio geotécnico mina de caliza Payandé (Tol.). Análisis cinemático y seudoestático de estabilidad de taludes mineros. Rafael Rincón.	2004	Macizo rocoso de la formación Payandé (Calizas y mármoles)

Fuente: Elaboración propia

En general, los estudios geotécnicos previamente mencionados se enfocaron en la determinación de las propiedades de resistencia y deformación de los materiales, para lo cual se llevaron a cabo los siguientes ensayos de laboratorio en suelos y roca:

- Contenido de humedad
- Peso unitario
- Granulometría
- Límites de Atterberg
- Corte directo
- Ensayo triaxial cíclico
- Prueba de compresión inconfiada
- Prueba de compresión simple
- Carga puntual
- Tracción indirecta

A continuación se presenta el número de ensayos discriminados por tipo de prueba ejecutados para cada uno de los estudios mencionados.

Tabla 118. Ensayos geotécnicos realizados sobre la caliza en el estudio geotécnico mina Payandé (Tol.).

Ensayos	Cantidad
Peso unitario en roca	15
Compresión inconfiada	1
Corte directo en discontinuidades	16
Carga puntual	27

Fuente: Rincón, Rafael. *Estudio geotécnico mina de caliza Payandé (Tol.) Análisis cinemático y seudoestático de estabilidad de taludes mineros*. CEMEX. (2004).

Tabla 119. Ensayos geotécnicos sobre suelo realizados en el estudio de Actualización del estudio geotécnico de las escombreras de la mina de caliza la esmeralda. Payandé (Tol) - Cemex Colombia S.A (2014)

Ensayos	Cantidad
Humedad	39
Peso unitario	17
Corte directo	14
Límites de Atterberg	33
Granulometría	34
Compresión simple	3

Nota: El estudio incluye los resultados de laboratorio ejecutadas en el año 2000, 2008 y 2014.

Fuente: Ingeniería Geológica y Perforaciones - IGP - *Estudio geotécnico y análisis de estabilidad para escombreras de la mina La Esmeralda. IGP-PY-FO-016. (2019).*

Tabla 120. Ensayos realizados en el Estudio geotécnico y análisis de estabilidad para escombreras de la mina la esmeralda. IGP-PY-FO-016. (2019).

Material	Ensayos	Cantidad
Estériles	Humedad	21
	Peso unitario	14
	Límites de Atterberg	15
	Granulometría	6
	Compresión inconfiada	6
	Carga puntual*	9

Nota (): Efectuado sobre bloques de roca comprendidos dentro del cuerpo de las escombreras*

Fuente: Ingeniería Geológica y Perforaciones - IGP - *Estudio geotécnico y análisis de estabilidad para escombreras de la mina La Esmeralda. IGP-PY-FO-016. (2019).*

Tabla 121. Ensayos geotécnicos realizados por GYG (2019).

Ensayos	Cantidad
Granulometría	5
Límites de Atterberg	5
Peso unitario	13
Corte directo	5
Triaxial ciclico	1
Compresión inconfiada	4
Tracción Indirecta	4

Fuente: Ingeniería Geológica y Perforaciones - IGP - *Estudio geotécnico y análisis de estabilidad para escombreras de la mina La Esmeralda. IGP-PY-FO-016. (2019).*

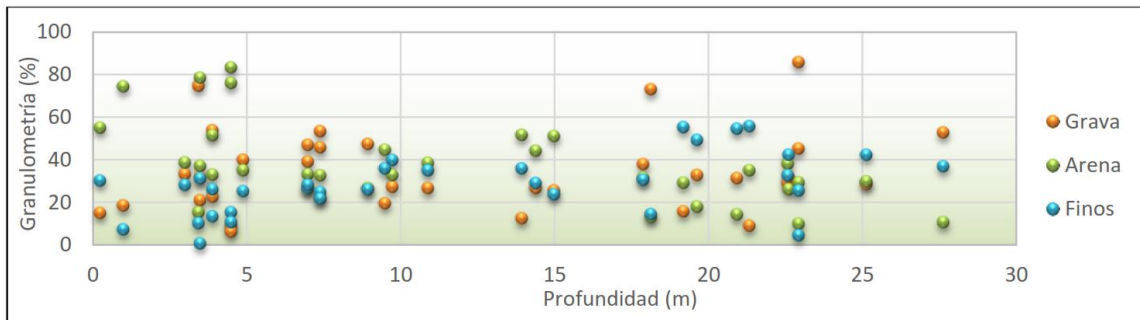
El compilado de los resultados de los ensayos efectuados en cada uno de los estudios previamente relacionados se presentan en CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.032.

Una vez descritos los ensayos efectuados, en los siguientes párrafos se presentan los resultados del proceso de caracterización geotécnica de materiales discriminado en dos zonas de interés: zona de operación minera y zonas de disposición de materiales estériles (se presentan a modo de revisión, sin embargo hace parte de la zona ya tramitada para disposición véase Capítulo 3. Descripción del proyecto).

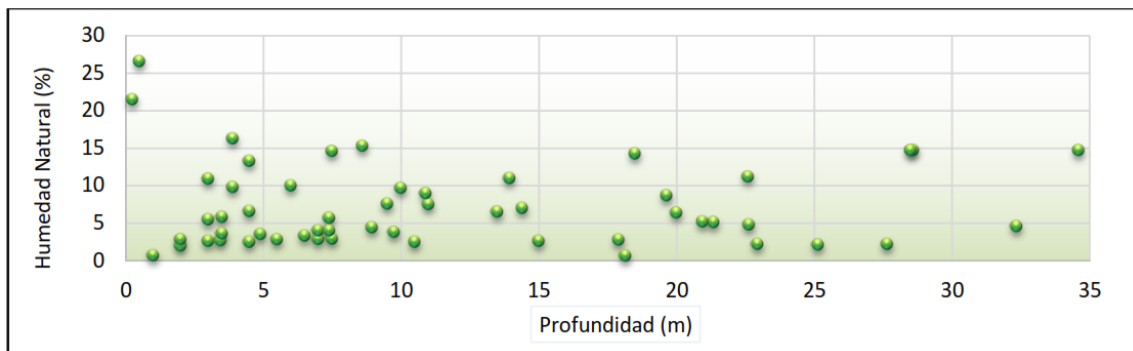
Propiedades índice y de resistencia de los materiales de escombreras

De acuerdo a los resultados de ensayos, la humedad natural de los materiales que yacen en las escombreras oscila entre 0,7% y 26,6%. En lo referente a distribución granulométrica, existe una alta heterogeneidad en el material, no obstante se observan mayores porcentajes de tamaños arenas y gravas (materiales granulares), en donde los tamaños asociados a gravas varían con porcentajes que oscilan entre el 6,2% y el 85,7 %, mientras que los porcentajes de finos registran valores inferiores a 55,7% (siendo este el valor máximo identificado) como se muestra en la Figura 156 en donde es posible identificar que la heterogeneidad antes descrita.

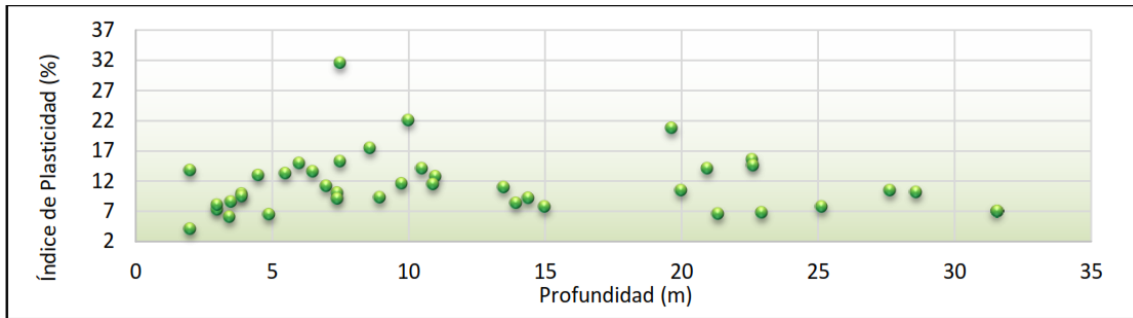
El proceso de clasificación de suelos permite identificar que los materiales de las escombreras existentes se clasifican como arenas arcillosas y gravas en matriz arcillo limosa, (SC), (GC) y (GC - GM). La fracción fina de estos materiales presenta límites líquidos que oscilan entre 17,5% y 47,0% mientras que el límite plástico se encuentra entre 12,0% y 24,0%. La Figura 156 muestra la distribución del índice de plasticidad que resulta de la diferencia entre límite líquido y el índice de plasticidad el cual oscila entre 3,6% y 31,1%, este parámetro caracteriza una matriz del relleno con muy baja plasticidad.



(a)



(b)



(c)

Figura 157. Porcentaje de tamaños de partículas (a), humedad (b) e índice de plasticidad (c) en profundidad en las escombreras de la zona de influencia de la Mina Esmeralda.

Fuente: Ingeniería Geológica y Perforaciones - IGP - *Estudio geotécnico y análisis de estabilidad para escombreras de la mina La Esmeralda*. IGP-PY-FO-016. (2019).

En lo referente a las propiedades de resistencia de los materiales de la escombrera o estériles mineros, para su determinación se recurrió a los resultados de los ensayos de campo realizados a la matriz de estos materiales, la cual se caracteriza por ser de tipo limo arenosa. Estos ensayos corresponden a pruebas tipo SPT (Standard Penetration Test), donde los parámetros del material se obtuvieron asumiendo un criterio de falla basado en la teoría de Mohr-Coulomb, siguiendo el método propuesto por González A. (1989). El resultado final del procedimiento efectuado se puede observar en la Figura 157, de donde se obtiene un valor de ángulo de fricción interna (ϕ) de 32° y una cohesión de 1,5 kPa.

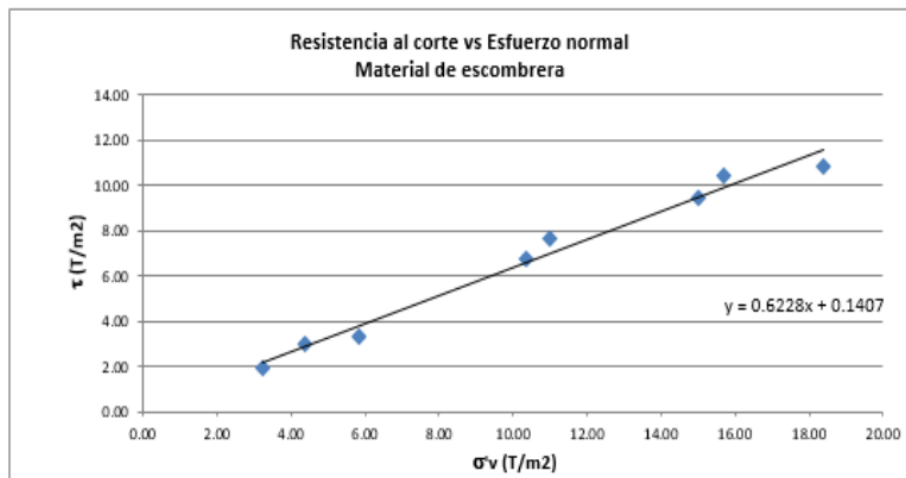


Figura 158. Correlación parámetros de resistencia a partir de los resultados de exploración directa del subsuelo.

Fuente: Ingeniería Geológica y Perforaciones - IGP - *Estudio geotécnico y análisis de estabilidad para escombreras de la mina La Esmeralda*. IGP-PY-FO-016. (2019).

Respecto los parámetros de resistencia a partir de resultados de pruebas de compresión simple se destaca la caracterización de la unidad de suelos estériles (bloques de roca) con valores que oscilan entre 15,4 MPa y 226,5 MPa; con respecto a las pruebas de carga puntual también ejecutados sobre bloques de roca se obtuvieron valores del índice de carga puntual que oscilan entre 2,17 y 10,0 MPa los pesos unitarios obtenidos para los bloques de roca varían entre 24,8 kN/m³ y 27,0 kN/m³.

Propiedades índice y de resistencia de los suelos de la zona de estudio

Para la zona de estudio se identificaron materiales cuyas características permiten clasificarlos desde el punto de vista geotécnico como suelos. Estos materiales corresponden a los depósitos cuaternarios de tipo aluvial los cuales se dividen en dos grupos principales. El primero de estos grupos corresponde a aluviales recientes ubicados hacia la superficie del terreno mientras que el segundo se relaciona con terrazas aluviales, que para efectos del presente estudio se han denominado de manera genérica "Arenas Puzolánicas" y que son el principal componente del título minero 745.

Dicho lo anterior, los aluviones recientes son suelos arenosos con clastos angulosos de tamaño variable. Los clastos están constituidos por fragmentos de caliza, limolita, granodiorita, areniscas conglomeráticas, soportados por una matriz arenosa de color crema y pardo, en cuya caracterización se recurrió a literatura de referencia y a experiencias previas del consultor en materiales de características similares. En este sentido, teniendo en cuenta las sugerencias dadas por Ng, C. W., Huang, H. W., & Liu, G. B. (2008) en su texto *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground* estos materiales pueden presentar una cohesión de 15 kPa y un ángulo de fricción de 30°.

Por otra parte y con base en los resultados de los ensayos realizados sobre las arenas puzolánicas pertenecientes a las terrazas aluviales, fue posible identificar que desde el punto de vista granulométrico el material es una arena con porcentajes mayores al 90% en composición. Para el porcentaje restante (i.e. <10%), la cantidad de finos nunca fue menor a la cantidad de gravas que se encontraron en las muestras. En cuanto a propiedades índice el material presenta una humedad natural baja con valores inferiores al 10%; adicionalmente, la fracción fina obtenida no mostró un comportamiento plástico.

De los resultados de los ensayos de corte directo se puede notar que el ángulo de fricción obtenido es muy constante con valores entre 37° y 39°, no así la cohesión, la cual presenta una variación entre 4 y 60 kPa. Lo anterior, se puede asociar a elementos composicionales propios del material en los que la actividad puzolánica podría estar teniendo alguna incidencia aportándole ciertas características cementantes, lo que finalmente estarían redundando en un valor de cohesión relativamente alto. Este aspecto composicional actuando en conjunto con presiones negativas de poros, serían los factores que estarían favoreciendo las condiciones de estabilidad de taludes verticales reales identificados en campo (véase Fotografía 92).

Dada la variabilidad antes descrita en los valores de cohesión, se realizó un análisis tipo retro-cálculo de estabilidad (*back-analysis*) (i.e. asumiendo una condición límite considerar un Factor de Seguridad cercano a 1,0), con lo que se buscó establecer un intervalo más ajustado para el valor de cohesión y que represente de una manera más precisa las condiciones que se tendrán en los taludes excavados. Dicho análisis se llevó a cabo para la geometría y condiciones reales del talud de mayor altura (i.e. sección crítica) mostrado en la Fotografía 92, el cual presenta una altura de 32 m, y una inclinación superior al 80°. Se aclara que la condición base de análisis para la sección mencionada parte de un valor de ángulo de fricción fijo de 38° en donde se calculan los valores de Factor de seguridad para un intervalo de valores de cohesión comprendido entre 10 y 120 kPa en las arenas puzolánicas del abanico de Ibagué (Ver Figura 158, donde se considera un valor de cohesión de 20 kPa).

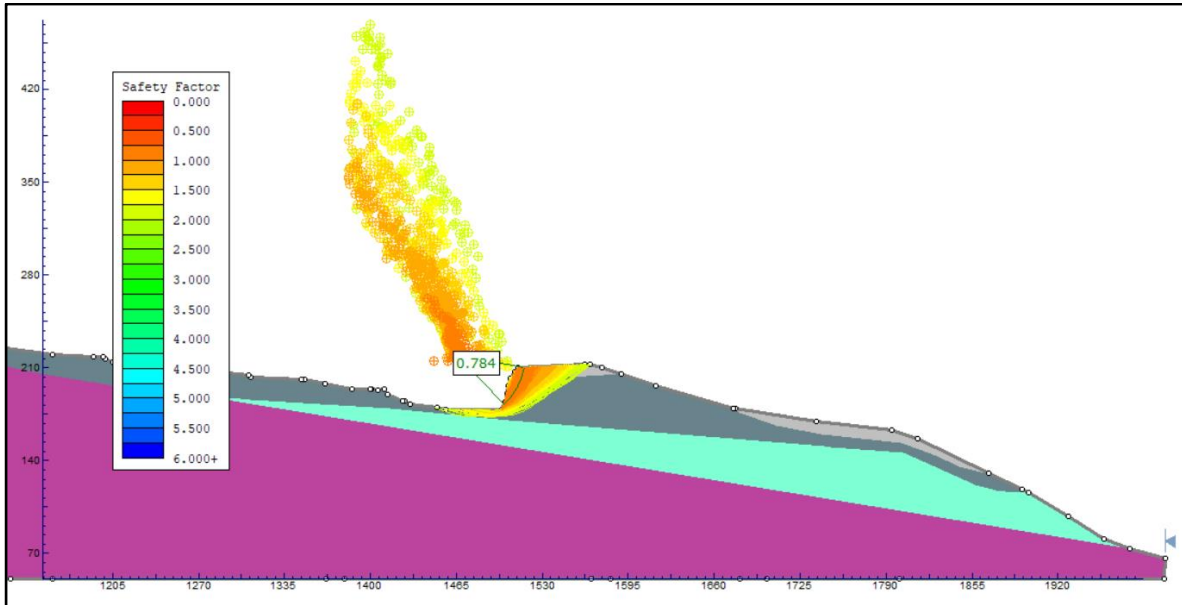


Figura 159. Retroanálisis condición actual arenas puzolánicas.
Fuente: Elaboración Propia

El resultado del análisis de sensibilidad para el parámetro cohesión en el talud crítico excavado en arenas puzolánicas se presenta en la Figura 159.

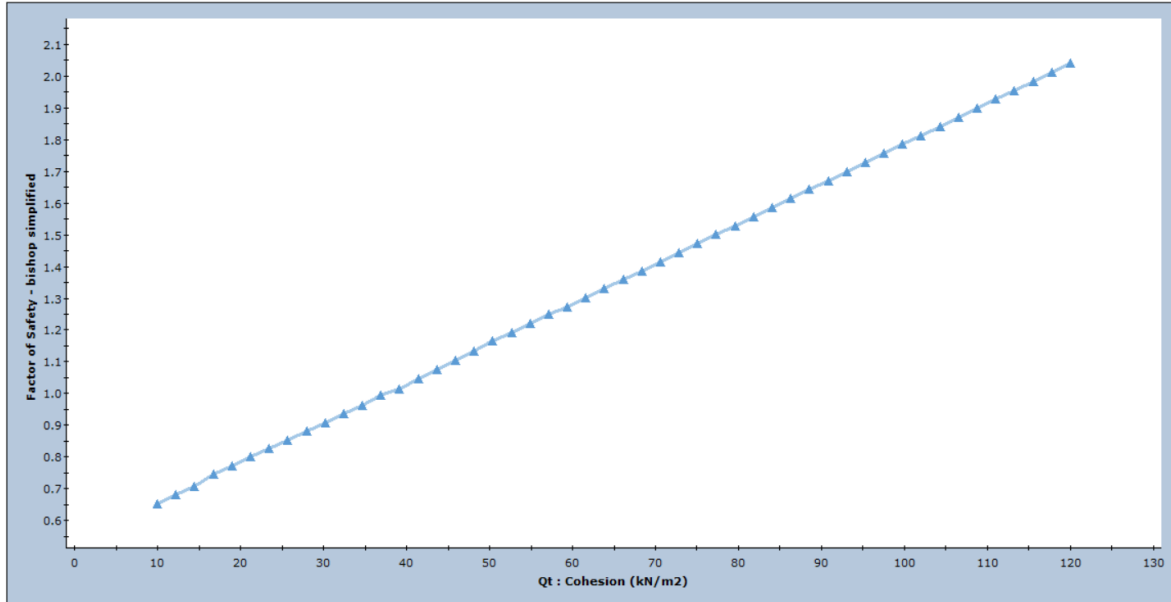


Figura 160. Análisis de sensibilidad cohesión arenas puzolánicas
Fuente: Elaboración Propia

A partir de los resultados obtenidos, se puede establecer que la cohesión mínima del material analizado sería del orden de 40 kPa para las condiciones de altura e inclinación del talud consideradas y que son presentadas en la Fotografía 22, dado que para esta cohesión se tiene la condición límite de FS = 1,00. Teniendo en cuenta que el talud evaluado no presenta signos de procesos de remoción en masa, es de prever que su factor de seguridad es mayor a 1,00, por lo que de manera

conservadora se ha establecido que el valor característico de cohesión a considerar en los análisis es aquel obtenido para un valor de FS de 1,30 el cual corresponde a 60 kPa (valor reportado por el ensayo de corte directo en la muestra M16). Por lo anterior, la definición del valor de cohesión tiene en cuenta tanto los resultados de la campaña de investigación geotécnica como las observaciones de las visitas de reconocimiento adelantadas a la zona de estudio.

Propiedades índice y de resistencia de la roca intacta

Bajo los depósitos cuaternarios se encuentra una unidad de roca meteorizada químicamente, grado III-II, denominada "Caliche", cuyo espesor es variable. La unidad está conformada por fragmentos de caliza, limolitas y granodiorita envueltos en una matriz arcillosa, enriquecida en carbonatos provenientes de la disolución de las calizas de la Formación Payandé, donde asociado a su grado de meteorización química no se es posible identificar estructuras (asociado a un elevado grado de meteorización y un bajo valor de GSI=30).

5.1.8.4.2.1. Parámetros geotécnicos adoptados

De acuerdo a lo anteriormente expuesto la Tabla 122 presenta un resumen de las propiedades índices y los parámetros de resistencia adoptados para los materiales tipo suelo y estéril presentes en la zona de estudio.

Tabla 122. Propiedades geotécnicas materiales en escombreras y suelos en la zona de estudio.

Material	γ (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Fricción (°)	Propiedades índice
Estéril Escombrera Superior	17	20	34	$\omega_n=2,5 - 10,9\%$ IP= 6,8 - 14,8%
Abanico de Ibagué (Arena puzolánica)	17	60 (*)	38	%T200: 5,9% Material tipo SM-SW
Depósito aluvial	20	15	30	-

Fuente: Ingeniería Geológica y Perforaciones - IGP - *Estudio geotécnico y análisis de estabilidad para escombreras de la mina La Esmeralda. IGP-PY-FO-016. (2019).*

Nota (*): Las arenas puzolánicas registran el comportamiento de un material con cierto grado de cementación lo cual se puede ver favorecido por condiciones de saturación parcial. El valor de cohesión se obtiene a partir de retro análisis, considerando la situación del talud expuesto (Septiembre 2020, véase Fotografía 92).

Del mismo modo y a partir de los ensayos de laboratorio relacionados previamente y realizados en el marco de estudios previos, se definieron las propiedades geotécnicas de los macizos rocosos que se resumen a continuación.

Tabla 123. Propiedades geotécnicas macizos rocosos. Criterio Hoek - Brown.

Material	σ_{ci} (MPa)	m_i	GSI	m_b	s	a
Rocas Formación Lusa	86	13	40	1,20	0,0008	0,511
Rocas Formación Honda	9,2	13	55	2,18	0,005	0,504
Caliza Formación Payandé	63	8	57	1,45	0,006	0,500
Rocas Formación Saldaña	30	13	50	1,10	0,0008	0,511
Caliche	21	9	30	0,56	0,0002	0,522

Fuente: Ingeniería Geológica y Perforaciones - IGP - *Estudio geotécnico y análisis de estabilidad para escombreras de la mina La Esmeralda. IGP-PY-FO-016. (2019).* Rincón, Rafael. *Estudio geotécnico mina de caliza Payandé (Tol.) Análisis cinemático y pseudoestático de estabilidad de taludes mineros.* CEMEX. (2004).

Perturbación = 0,2, correspondiente a macizos rocosos expuestos para condiciones de bajo grado de afectación.

En función de los parámetros establecidos previamente y con el fin de evaluar de manera general la estabilidad de los macizos rocosos, a continuación se presentan sus valores equivalentes considerando el criterio de falla Mohr Coulomb.

Tabla 124. Propiedades geotécnicas macizos rocosos. Criterio Mohr Coulomb. Tomado de Rincón (2004) e IGP (2019).

Material	γ (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Fricción (°)
Rocas Formación Luisa	25	288	40
Rocas Formación Honda	26	600	47
Caliza Formación Payandé	26	1255	42
Rocas Formación Saldaña	26	585	38
Caliche	25	152	38

Fuente: Ingeniería Geológica y Perforaciones - IGP - *Estudio geotécnico y análisis de estabilidad para escombreras de la mina La Esmeralda. IGP-PY-FO-016. (2019).*

Rafael Rincón. *Estudio geotécnico mina de caliza Payandé (Tol.) Análisis cinemático y pseudoestático de estabilidad de taludes mineros. CEMEX. (2004).*

Con el objetivo de lograr una visión más integral de las condiciones de estabilidad de la zona de explotación para el Título 745 se consideró conveniente llevar a cabo análisis de tipo probabilísticos en los que se tenga en cuenta la variabilidad de los materiales y que sirvan de complemento al enfoque tradicional de tipo determinístico. Al respecto, dado que en mecánica de suelos y en general en geotecnia es habitual no contar con un número suficiente de datos que permita definir las funciones de densidad de probabilidad que reflejan el comportamiento de las variables involucradas dentro de los análisis, es importante mencionar lo expresado por Duncan (2000), Hoek (2006) y Phoon & Ching (2015), entre otros, quienes establecen que el asumir una distribución de probabilidad normal o log-normal constituye, en la mayoría de los casos, una aproximación válida en lo referente al comportamiento de las variables de índole geotécnica.

Teniendo en cuenta lo anterior y para el caso de las propiedades de los materiales en la zona de estudio, se asumió que estos siguen una distribución normal, cuyo uso dentro de los análisis de probabilidad pasa por la determinación de dos (2) parámetros: la media (μ) y la desviación estándar (σ). Así mismo, se consideró que los datos disponibles son representativos del material por lo que el valor adoptado como media (μ) es efectivamente la media de la distribución normal asumida. En lo referente a la definición de la desviación estándar (σ) se siguieron las recomendaciones dadas por Duncan (2000) y otros investigadores, quienes recomiendan el uso del denominado coeficiente de variación (C_v). Este parámetro C_v , es una medida de la variabilidad o dispersión de los datos con respecto a la media (μ) y se define mediante la siguiente expresión:

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu}$$

Ecuación 45.

Haciendo uso de este concepto, se recurrió a valores reportados en literatura de este coeficiente de variación (C_v) para diferentes parámetros geotécnicos. Los valores de C_v reportados por diferentes autores y los adoptados para efectos de los análisis llevados a cabo en el presente estudio se resumen en la Tabla 125.

Tabla 125. Valores de coeficiente de variabilidad para algunos parámetros geotécnicos

Parámetro geotécnico	Cv	Cv (adoptado para el estudio)*
Peso unitario ^{a b}	3-10%	3%
Ángulo de fricción interna ^a	2-13%	5%
Cohesión y Resistencia no drenada en suelos ^b	10-50%	20%

^a Tomado de: Duncan (2000)

^b Tomado de Javankhoshdel & Bathurst (2014) después de Phoon & Kullaway(1999)

* Definido a partir de experiencias previas del consultor y del conocimiento que este posee de los materiales del área de estudio.

Fuente: Elaboración Propia

Definidos los parámetros característicos se recurrió a las propiedades de la distribución normal, según las cuales el 95% de los datos que obedecen esta distribución se encuentran en un rango de dos (2) veces la desviación estándar, tal y como se puede observar en la Figura 160.

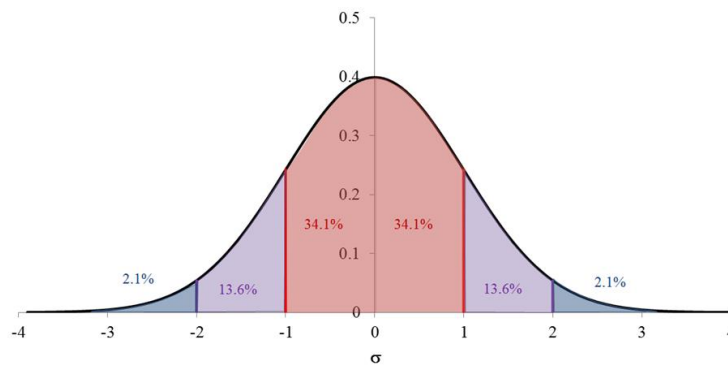


Figura 161. Relación del área bajo la curva de la distribución normal y la desviación estándar.

Fuente: Elaboración Propia

Partiendo de los valores de coeficiente de variabilidad adoptados se calculó la desviación estándar (σ) de tal manera que se abarque el 95% de posibilidades siguiendo una distribución normal, lo cual permitió definir el intervalo de variación de cada uno de los parámetros. Los resultados se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 126. Parámetros de los materiales para análisis probabilísticos

Material	Determinístico (Valores Promedio)			Desviaciones estándar (σ) para cada Parámetro			Relativo máximo y mínimo para cada Parámetro (2σ)		
	ϕ' (°)	c' (kPa)	γ (kN/m ³)	$\sigma_{\phi'}$ (°)	$\sigma_{c'}$ (kPa)	σ_{γ} (kN/m ³)	Rel máx-mín ϕ' (°)	Rel máx-mín c' (kPa)	Rel máx-mín γ (kN/m ³)
Estéril Escombrera Superior	34	20	17	1,7	4,0	0,5	3,4	8,0	1,0

Material	Determinístico (Valores Promedio)			Desviaciones estándar(σ) para cada Parámetro			Relativo máximo y mínimo para cada Parámetro (2σ)		
	ϕ' (°)	c' (kPa)	γ (kN/m ³)	σ ϕ' (°)	σ c' (kPa)	σ γ (kN/m ³)	Rel máx-mín ϕ' (°)	Rel máx-mín c' (kPa)	Rel máx- mín γ (kN/m ³)
Abanico de Ibagué (Arena puzolánica)	38	60	17	1,9	12,0	0,5	3,8	24,0	1,0
Depósito aluvial	30	15	20	1,5	3,0	0,6	3,0	6,0	1,2
Rocas Formación Luisa	40	288	25	2,0	57,6	0,8	4,0	115,2	1,5
Rocas Formación Honda	47	600	26	2,4	120,0	0,8	4,7	240,0	1,6
Rocas Formación Saldaña	38	525	26	1,9	105,0	0,8	3,8	210,0	1,6
Caliza Formación Payandé	42	1255	26	2,1	251,0	0,8	4,2	502,0	1,6
Caliche	38	152	25	1,9	30,4	0,8	3,8	60,8	1,5

Fuente: Elaboración Propia

5.1.8.5. Criterios para la evaluación de la estabilidad de las obras

En esta parte del documento se detallan los criterios considerados dentro de las evaluación geotécnica de las excavaciones y rellenos a llevarse a cabo para el proyecto La Esmeralda.

5.1.8.5.1. Mecanismos de falla considerados y métodos de análisis

De acuerdo a los materiales involucrados dentro de los análisis, se identificaron dos mecanismos de falla predominantes para las excavaciones como para los rellenos del proyecto minero La Esmeralda; estos mecanismos corresponden a la falla general por corte y la falla gobernada por el sistema de discontinuidades (i.e. bloques de roca). Siendo la primera una falla que tiende a ser más de carácter global (por ejemplo a la escala del talud de los bloques de avance) y la segunda una falla más local (escala de bancos intermedios).

Falla General por Corte

Este mecanismo implica que la falla se da por el incremento de esfuerzos cortantes a lo largo de una superficie predefinida, la cual puede ser circular, tal como se muestra en la siguiente figura.

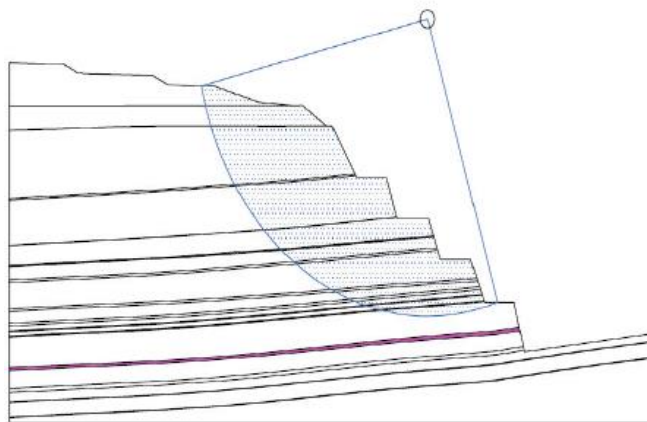


Figura 162. Mecanismo de falla general por corte. Superficie Circular.

Fuente: Ingeniería Geológica y Perforaciones - IGP - *Estudio geotécnico y análisis de estabilidad para escombreras de la mina La Esmeralda. IGP-PY-FO-016. (2019).*

Para el caso particular de los materiales presentes en la zona de interés, IGP (2019) definió que éste es el mecanismo de falla predominante en las escombreras, en el que la superficie de falla se aproxima a una curva circular que involucra en esencia los materiales estériles, sin profundizar hacia los materiales de cimentación dadas las diferencias en términos de resistencia, trayendo como consecuencia que el contacto entre el relleno conformado y su cimentación sea un límite para la superficie de falla. De igual manera, teniendo en cuenta los efectos de escala y condiciones de fracturamiento, se ha establecido que la estabilidad global de los taludes conformados por macizos rocosos, se debe evaluar siguiendo este mismo mecanismo de falla, el cual también es aplicable para materiales menos consolidados que la roca como lo son los suelos localizados hacia la superficie de la zona de estudio.

En la evaluación del mencionado mecanismo se empleó un método en el que se evalúan las fuerzas actuantes que ejercen un efecto desestabilizador sobre la masa de suelo y las fuerzas resistentes que se oponen a él. Dicho enfoque se conoce comúnmente como “Método de equilibrio límite” del cual existe una variedad de propuestas formuladas por diferentes autores siendo las de mayor aceptación las planteadas por Bishop (1955) Spencer (1967) y Morgenstern & Price (1965), dado que son las que presentan mejor estabilidad numérica y/o son las que tienen en cuenta tanto el equilibrio de fuerzas como el equilibrio de momentos para las secciones de análisis. Para el caso de los análisis adelantados, el consultor IGP usó la propuesta de Morgenstern & Price (1965) mediante el uso del software Slide® de la compañía canadiense Rocscience.

5.1.8.5.2. Nivel de agua sub-superficial.

Para la definición del nivel del agua usado en los análisis de estabilidad, se recurrió a la información de la red de piezómetros instalados en la zona, dicha información se sintetiza en las siguientes tablas.

Tabla 127. Niveles de agua en los piezómetros instalados Mina La Esmeralda.

ID	Coord. Origen Único		Coord. Sistema Magna Sirgas Origen Bogotá		Cota (msnm)	Profundidad lámina de agua (m) 25/09/2020
	Este	Norte	Este	Norte		
Piezo-01	4 766 117,69	2 032 340,67	885 590	966 194	700	42,8
Piezo-02	4 766 674,69	2 032 497,67	886 147	966 351	620	36,3
Piezo-03	4 766 592,69	2 033 052,67	886 065	966 906	650	21,9
Piezo-07	4 766 819,69	2 033 073,67	886 292	966 927	670	27,4
Piezo-08	4 766 614,69	2 033 422,67	886 087	967 276	670	39,8
Piezo-09	4 766 636,69	2 033 662,67	886 109	967516	670	40,3
Piezo-10	4 766 840,69	2033674,67	886 313	967528	650	56,2
Piezo-05	4 766 034,69	2 032 342,67	885 507	966 196	767	60,7

Fuente: Cemex (2020).

Tabla 128. Niveles de agua en los piezómetros instalados en la escombrera superior de la Mina La Esmeralda.

ID	Coord. Origen Único		Coord. Sistema Magna Sirgas Origen Bogotá		Profundidad (m)	Profundidad promedio lámina de agua (m)
	Este	Norte	Este	Norte		
PE-05-014	4 765 584,69	2 032 964,67	885 057	966 818	39,9	27,3
PE-06-014	4 765 667,69	2 032 952,67	885 140	966 806	23,0	21,6

Fuente: Ingeniería Geológica y Perforaciones - IGP - Estudio geotécnico y análisis de estabilidad para escombreras de la mina La Esmeralda. IGP-PY-FO-016. (2019).

La anterior información sirvió de base para la definición de los niveles freáticos a considerar en el escenario bajo Condiciones Normales (el cual se explica más adelante) para el mecanismo de falla general por corte.

5.1.8.5.3. Coeficiente de aceleración sísmica

En los análisis de estabilidad que evalúan la condición con sismo se recurrió a un modelo pseudo-estático, el cual consiste en simular los efectos del temblor mediante la aplicación de una carga horizontal y vertical. Esta carga adicional se aplica por medio de un coeficiente de aceleración, el cual corresponde a una fracción de la aceleración de la gravedad. Para el caso del presente estudio se usaron los lineamientos que al respecto establece la legislación colombiana a través de su norma sismo resistente NSR (2010), específicamente lo consignado en el título H, según el cual para análisis pseudo-estáticos el coeficiente de aceleración horizontal k_h a utilizar es igual a:

$$k_h = KST * A_a * Fa * I$$

Ecuación 46.

Donde:

KST= Coeficiente sísmico de diseño para análisis pseudoestático de taludes. Sus valores mínimos según la Norma Colombiana de Construcción Sismo Resistente (AIS-10) se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 129. Valores de KST/amax Mínimos para Análisis Seudoestático de Taludes. (AIS-10)

Material	KST/amax mínimo	Análisis de Amplificación
Suelos, enrocados y macizos rocosos muy fracturados (RQD < 50%).	0,80	Ninguno
Macizos rocosos (RQD > 50%)	1,00	Ninguno
Todos los materiales térreos.	0,67	Amplificación de onda unidimensional en dos columnas y promediar
Todos los materiales térreos.	0,50	Amplificación de onda bidimensional

Aa= Coeficiente de aceleración sísmico para un periodo de retorno dado.

Fa = Factor de amplificación que tiene en cuenta los efectos de sitio en el rango de periodos cortos.

I = Coeficiente de Importancia.

Dicho lo anterior, se resalta que los análisis efectuados se plantearon para la condición crítica de estabilidad correspondiente a aquella en la que se tengan los taludes de mayor altura, considerando de manera conservadora un sismo con periodo de retorno tal alto como 475 años. Partiendo de esta consideración, se recurrió a la información consignada en la norma sismorresistente de Colombia NSR-10 (AIS,2010), según la cual Payandé se encuentra en la denominada Zona de Amenaza sísmica intermedia en la que el coeficiente de aceleración pico del terreno (PGA, en inglés) para el periodo de retorno ya mencionado, es igual a un valor de 0,20g.

Con respecto al valor de KST, la norma NSR-10 establece que para macizos rocosos con RQD > 50% como el presente en la zona de estudio se debe adoptar un valor igual a 1,0, mientras que para materiales tipo suelo, representados en este caso por los estériles que serán dispuestos en la escombreras, el valor a asignar del coeficiente KST es igual a 0,8. En lo referente al factor de amplificación F_a , al consultar el título A de la NSR-10 se obtiene un valor de 1,0 para taludes en roca competente como es el caso de la Mina La Esmeralda (i.e. perfil A según NSR). Por su parte, para las escombreras se ha considerado que dada su composición, estas se pueden asimilar a lo que sería un perfil tipo C donde el factor de amplificación (F_a) es igual a 1,2. En lo referente al coeficiente de importancia (I) se considera igual a 1,0 ya que el pit de la mina en estudio, en la etapa de operación, se incluye dentro del Grupo I, correspondiente a estructuras de ocupación normal (AIS, 2010). De lo anterior se obtiene que el coeficiente k_h a usar dentro de los análisis pseudo-estáticos para condiciones de mayor exigencia correspondientes a la etapa de cierre tanto para los taludes en roca como para los taludes en suelo es

igual a 0,20 g. Este valor es mayor al mínimo definido en los Términos de Referencia (TdR) de la Autoridad, en donde se establece que el valor de aceleración horizontal a utilizar en los análisis de estabilidad no puede ser menor a 0,667 veces el PGA (ANLA, 2016).

Con respecto a la componente de aceleración vertical (k_v) se aplicó el criterio establecido en la norma NSR-10 en su sección H.7.1.2 Efecto del tipo de Solicitud según la cual "Para el caso de fuentes sismogénicas cercanas (menores de 25 km de distancia epicentral) con potencial de generación de eventos superficiales (profundidad focal menor de 20 km), debe considerarse el aporte de la componente vertical de la señal sísmica en el análisis de respuesta del terreno". Para el caso de los análisis efectuados se asumió un $k_v=0,5k_h$, es decir 0,10 g.

5.1.8.5.4. Criterios para la Evaluación de la Amenaza

Para la evaluación de la amenaza geotécnica, la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) en sus Términos de Referencia (TdR) para estudios ambientales, la clasifica en tres niveles: alto, medio y bajo en función de los factores de seguridad obtenidos de los análisis de estabilidad (métodos determinísticos). En la siguiente tabla se presentan dichos criterios:

Tabla 130. Criterios de Análisis para la Evaluación de la Amenaza. Términos de referencia de la ANLA.

Grado de amenaza	Condiciones normales FS	Condiciones extremas (500 años) FS
Amenaza baja	>1,9	>1,9*
Amenaza media	1,2 – 1,9	1,2 -1,9 *
Amenaza alta	<1,2	<1,0

*La tabla se ha reproducido tal cual se encuentra en la referencia.

Fuente: Autoridad Nacional de Licencias Ambientales -ANLA-. *Términos de Referencia para la Elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA Proyectos de Explotación Minera*. Minambiente. (2016).

Como se puede observar, existe un intervalo de factor de seguridad no considerado para el análisis de condiciones extremas entre los grados de amenaza media y baja, además de no presentar diferencia alguna entre condiciones normales y extremas para la definición de un nivel de amenaza baja, lo cual contradice la práctica habitual.

En vista de lo anteriormente expuesto, para efectos del presente estudio, se adoptó la clasificación de amenaza planteada por los términos de referencia para Estudios de Impacto Ambiental (EIA) del Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial aplicables a Proyectos para Explotación de Materiales para la Construcción (MAVDT, 2010), los cuales en su numeral 5.2.9.4 establecen una clasificación de amenaza que se reproduce en la Tabla 131. Al respecto cabe destacar que esta clasificación se rige bajo los mismos principios definidos por la Autoridad ambiental en sus TDR del año 2016, es decir, los niveles de amenaza se categorizan a partir de los factores de seguridad obtenidos tanto para un escenario de condiciones normales como para los escenarios de condiciones extremas de sismo e incremento del nivel freático.

Tabla 131. Criterios de Análisis para la Evaluación de la Amenaza según MAVDT(2010)

Grado de amenaza	Condiciones normales	Condiciones extremas (500 años)
	FS	FS
Amenaza baja	>1,9	>1,3
Amenaza media	1,2 – 1,9	1,0 -1,3
Amenaza alta	<1,2	<1,0

Fuente: Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial - MAVDT- *Términos de Referencia para Estudios de Impacto Ambiental para la Explotación de Materiales de Construcción*. Dirección de Licencias, Permisos y Trámites Ambientales, República de Colombia (2010).

De la tabla anterior se deduce que los análisis de estabilidad que lleven a la evaluación de la amenaza deben efectuarse para las denominadas condiciones “normales” y “extremas” a las que podría estar expuesta el área de estudio. En este sentido y para efectos del estudio geotécnico de la mina La Esmeralda, se ha definido las siguientes características para los escenarios de análisis:

- Escenario “Normal”: corresponde a una condición tal que no se presenta sismo y la definición del nivel de agua en el talud corresponde al nivel identificado de las perforaciones efectuadas y a las condiciones de campo observadas en los taludes existentes en la zona de estudio,
- Escenarios “Extremos”: presenta dos situaciones, una con sismo y niveles de agua normales y otra en la que no se tiene sismo pero si se alcanza una condición tal que el talud presente un aumento importante en su nivel freático.

A partir de los criterios anteriormente expuestos, a continuación se procede a mostrar los resultados de los análisis de estabilidad.

De manera complementaria, se llevó a cabo la evaluación de amenaza en función de los detonantes identificados en la zona del proyecto y la zonificación geotécnica obtenida a partir de la evaluación de susceptibilidad ante procesos morfodinámicos descrita en la sección 5.1.8.5.5.1.

5.1.8.5.5. Criterios para la zonificación geotécnica

De acuerdo con los lineamientos de los TdR, para la zona del proyecto se deben conjugar cartográficamente diferentes tipos de variables, para de esta manera obtener una serie de polígonos que indiquen el grado de susceptibilidad a la ocurrencia de procesos morfodinámicos. Esta evaluación de la susceptibilidad es un indicativo de las características de estabilidad general en la zona de influencia de las obras del Proyecto La Esmeralda y constituye la línea base para su zonificación geotécnica y la evaluación de la amenaza geotécnica para la zona del proyecto. Dicho esto, en los siguientes párrafos se procede a explicar la metodología seguida para alcanzar estos objetivos.

5.1.8.5.5.1. Metodología para la evaluación de susceptibilidad ante procesos morfodinámicos

Para el caso de la evaluación de la susceptibilidad de procesos de morfodinámicos en las zonas de influencia de las obras en superficie a ejecutar en desarrollo del proyecto La Esmeralda en el TM 745, se siguió el denominado “Método Heurístico” planteado entre otros en Suarez (2003), CENAPRED (2004) y en el documento conjunto JTC-1 titulado “Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning” preparado por la ISSMGE (Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica), ISRM (Sociedad internacional de Mecánica de Rocas) y la IAEG (Asociación internacional para la Ingeniería Geológica y el Medio ambiente), que se basa en categorizar y ponderar las variables

causantes de inestabilidad según la influencia esperada de estos en la generación de movimientos en masa. Definidas estas variables, la información es procesada mediante el uso del software ArcGIS®, con lo que se definen zonas de susceptibilidad homogénea en tres niveles: Alto, Medio y Bajo.

En el análisis efectuado para el proyecto en estudio se estableció una ponderación en términos de una escala numérica que va de 1 a 5, donde el valor 1 significa que el parámetro considerado presenta una susceptibilidad baja a que se presenten procesos de morfodinámicos, mientras que un valor asignado de 5 implica lo contrario, es decir, una alta susceptibilidad a que se presenten deslizamientos.

A manera de contexto se considera relevante aclarar que dentro del marco del presente estudio se realizaron dos evaluaciones de la susceptibilidad por movimientos en masa. La primera evaluación tiene un enfoque geomorfológico donde se usaron mapas temáticos como morfometría, cobertura vegetal, geología, estructuras y procesos. Los resultados de esta evaluación son indicativos de las condiciones actuales del terreno y es un instrumento para inferir zonas de potencial inestabilidad. El enfoque de la segunda evaluación es geotécnico, e involucra un análisis más detallado de variables que en la evaluación geomorfológica. Su objetivo principal es determinar las condiciones de estabilidad para las zonas en donde se instalarán elementos de infraestructura superficial. Aunque se hace uso de algunas de las temáticas usadas en el enfoque geomorfológico, el enfoque geotécnico relaciona información de detalle proveniente del mapeo de formaciones superficiales, factores de seguridad obtenidos de análisis de estabilidad y fenómenos detonantes de la inestabilidad como los sismos y las precipitaciones pico reportadas en la zona. Teniendo en cuenta lo anterior y en particular que ambos enfoques difieren en la escala de los mapas temáticos usados y en variables analizadas, los resultados de las evaluaciones de la susceptibilidad por fenómenos de remoción en masa son coherentes más no idénticos.

Teniendo en cuenta la anterior aclaración, los factores considerados dentro del análisis de susceptibilidad mostrado en esta sección fueron las siguientes:

- Unidad Geológica Superficial
- Estructuras (fallas)
- Relieve (geomorfología y pendientes)
- Inventario de deslizamientos y procesos erosivos

Teniendo en cuenta que la susceptibilidad morfodinámica se enfoca principalmente en las zonas donde se proyectan los trabajos, se establece que los factores previamente mencionados son los que abordan los preceptos establecidos en los términos de referencia de la autoridad ambiental. A continuación, se explica cómo se consideró cada uno de estos factores dentro de la evaluación de susceptibilidad y subsecuente zonificación con enfoque geotécnico.

Unidad Geológica Superficial

Para la definición de las unidades geológicas superficiales (UGS) se siguieron los criterios y conceptos definidos en la Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2015) particularmente aquellos referentes a la definición de las denominadas unidades geológicas para ingeniería (UGI). Estas UGI se definen como zonas con alto grado de homogeneidad con respecto a las propiedades geotécnicas básicas ya que los materiales allí localizados presentan características similares en términos composicionales, además de cumplir las características de área y espesores mínimos cartografiados. Para la definición de las UGI, el SGC (2015), propone que los materiales se clasifiquen de acuerdo con su origen en los siguientes cuatro grupos principales:

- Rocas
 - Suelos residuales y saprolitos
 - Suelos transportados en cualquier ambiente (depósitos aluviales, de ladera o coluviales, costeros, volcánicos, eólicos y glaciares)
 - Suelos antrópicos
-

Asignado el grupo al cual hace parte el material, el SGC establece los lineamientos para clasificar las Unidades Geológicas para Ingeniería tomando como referencia los trabajos efectuados por Hemerlín (1985) y Salazar (1995) en lo referente a clasificación de Unidades Geológicas Superficiales. Partiendo de estas recomendaciones y de la de nomenclatura igualmente sugerida, para el caso de la zona objeto de estudio se tienen las UGI mencionadas en la siguiente Tabla.

Tabla 132. UGI/UGS. Proyecto La Esmeralda TM 6823.

Origen de la UGI	Tipo de UGI/UGS	Características generales	Nomenclatura
Depósito	Aluviales recientes	Corresponden a los materiales cuaternarios de edad reciente presentes más a superficie. Está conformado por aluviones de carácter arenoso con clastos angulosos de tamaño variable. Los clastos están constituidos por fragmentos de caliza, limolita, granodiorita, areniscas conglomeráticas, soportados por una matriz arenosa de color crema y pardo. Los depósitos aluviales forman una topografía plana disectada por las corrientes de agua. Su espesor es de hasta 10 m.	Stag (Suelo transportado aluvial grueso)
	Terrazas	Secuencia de arenas volcánicas de características puzolánicas, cuya granulometría varía entre fina y conglomerática, con intercalaciones de cenizas volcánicas muy finas. Aunque la matriz del depósito es predominantemente arenosa, es posible que se presenten lentes continuos clastosoportados de guijarros y cantos e incluso bloques de fragmentos líticos de origen principalmente ígneo y metamórfico. Corresponden al material de interés económico genéricamente denominado "Arenas Puzolánicas" que conforman el TM 745 y su espesor total oscila entre 35 m y 60 m.	Sttv (Suelo transportado de terraza volcánica)
Suelos antrópicos	Escombreras o Botaderos	Estos materiales están constituidos por bloques de rocas granodioritas de color rosado y dioritas principalmente, de forma angulosa a subangulosa con diámetros hasta de 1,5 m, se evidencia además la presencia de bloques de arenisca, calizas y puzolanas en menor proporción, embebidos en una matriz areno arcillosa de color gris claro a beige con abundantes gravas, contiene rastros de arcilla de baja plasticidad.	Sale (Suelo antrópico de llenos de escombros)
Rocas	Depósito de Caliche (Tsc)	Es un depósito continental conformado por fragmentos de caliza, limolitas y granodiorita envueltos en una matriz arcillosa, enriquecida en carbonatos provenientes de la disolución de las calizas de la Formación Payandé. Localmente y hacia el sector occidental, el caliche se enriquece en fragmentos de rocas intrusivas, areniscas y conglomerados, provenientes de la erosión del Stock de Payandé y la Formación Luisa. Suprayace discordantemente las formaciones Precretáceas y la Formación Honda. El espesor estimado en los cortes geológicos es de 120 m.	Raa (Roca alterada de matriz arcillosa)
	Rocas de la Formación Saldaña (Trjs)	Está conformada en la base de intercalaciones de vulcanitas y tobas con capas de arenitas, calizas y calizas arenosas; y en la parte superior por intercalaciones de lutitas calcáreas, arenitas,	Ria (Roca intermedia de matriz arenosa)

Origen de la UGI	Tipo de UGI/UGS	Características generales	Nomenclatura
		conglomerados, limolitas y en menor proporción, vulcanitas y tobas.	
	Rocas de la Formación Payandé(Trp)	Conjunto de calizas grises, en parte arenosa o silícea, con intercalaciones de chert, cortada por diques de pórfidos de color gris verdoso, que ocasionan metamorfismo de contacto. Presenta una secuencia de capas medias a gruesas de calizas y un cuerpo intermedio de limolitas arcillosas laminares, de color verde a gris claro (roca fresca) y naranja (roca meteorizada), con presencia de pirita y láminas de calcita.	Ria (Roca intermedia de matriz arenosa)

Fuente: Elaboración propia

Una vez identificadas estas UGI/UGS, se procedió a su clasificación en alguno de los cuatro dominios establecidos por la Autoridad a asignar en la GDB los cuales corresponden a: suelo depositado, roca meteorizada y roca poco meteorizada asignándoles un índice de susceptibilidad de acuerdo a sus características composicionales tal y como se muestra en la siguiente Tabla.

Tabla 133. Índices de Susceptibilidad para las las UGS del Proyecto La Esmeralda TM 745.

Dominio a asignar en GDB	Unidad geológica superficial (UGI)	Índice de susceptibilidad	Observaciones
Suelo depositado	Stag (Suelo transportado aluvial grueso)	4	Aluvial matriz arenosa que corresponde a la formación Qal.
	Sttv (Suelo transportado de terraza volcánica)	2	Terraza compuesto por arenas de origen volcánico que corresponden a la formación Qta.
	Sale (Suelo antrópico de llenos de escombros)	4	Material no aprovechable obtenido de las labores de explotación y dispuesto en las escombreras.
Suelo residual	N.A	-	No se presenta en el área.
Roca altamente meteorizada	Raa (Roca alterada de matriz arcillosa)	3	Principalmente compuesta por el depósito de Caliche (Tsc).
Roca meteorizada	Ria (Roca intermedia de matriz arenosa)	1	Los macizos rocosos expuestos de las formaciones: Saldaña (Trjs) y Payandé(Trp).

Fuente: Elaboración propia

Se considera que tiene un peso equivalente al 30% dentro del análisis heurístico adelantado. Este factor busca representar mediante las denominadas "unidades geológicas superficiales (UGS) las características particulares de los materiales a nivel del terreno, aclarando que la metodología empleada para su definición y denominación ya se ha presentado en este capítulo. Una vez identificadas estas UGS, se procedió a su clasificación en alguno de los cuatro grupos establecidos por

la autoridad en la GDB los cuales corresponden a: suelo depositado, suelo residual, roca meteorizada y roca poco meteorizada. A modo ejemplo, se tiene que una UGS correspondiente a un material Aluvial se clasifica en la categoría "Suelo Transportado" mientras que "La roca de la Formación Payandé" hará parte del grupo "Roca meteorizada".

Estructura

Representando un 30% del peso total de los factores considerados dentro del análisis de susceptibilidad, esta variable se ha abordado mediante el efecto que sobre la estabilidad tienen las fallas presentes en la zona de estudio. Para tal fin se ha establecido una zona de influencia de estas fallas o "buffer", En este caso la ponderación ha considerado las fallas principales y sus ramales como los principales elementos de inestabilidad general. Al tener en cuenta la presencia de fallas, indirectamente se está considerando otro aspecto de índole estructural como lo es el grado de fracturamiento del macizo y por ende su efecto sobre las condiciones de estabilidad general (Chacón et.al, 2006). Con respecto a las áreas en donde no se identificaron estructuras relevantes, se adopta un valor de ponderación bajo para considerar estructuras menores y por ende un grado de fracturamiento igualmente menor. Los respectivos pesos dentro de la ponderación adoptada se presentan a continuación.

Tabla 134. Índices de Susceptibilidad para los parámetros relacionados con estructuras. Proyecto La Esmeralda TM 745.

Tipo de falla	Índice de susceptibilidad
Falla Principal (Bufér 50,0 m)	4
Falla secundaria (20,0 m)	3
Demás áreas	1

Fuente: Elaboración propia

Relieve

Se consideró que esta variable tiene un 20% dentro del peso total del análisis Este parámetro es el que incluye a la geomorfología dentro del análisis cuya construcción y ponderación siguió los lineamientos que se reproducen en la siguiente tabla:

Tabla 135. Índices de Susceptibilidad para las pendientes del terreno. Proyecto La Esmeralda TM 745.

Rango de inclinación del terreno	Índice de susceptibilidad
Zonas planas y Taludes conformados con pendientes hasta del 25%	1
Taludes con inclinaciones mayores al 25% y menores o iguales al 50%	2
Taludes con inclinaciones mayores al 50% y menores o iguales al 75%	3
Taludes con inclinaciones mayores al 75% y menores o iguales al 100%	4
Taludes con inclinaciones mayores al 100%	5

Fuente: Elaboración propia

Movimientos en masa

Los procesos identificados en la zona del Proyecto Esmeralda se describen en la sección 5.1.7.6 Procesos de inestabilidad identificados en la zona de estudio. Tal como se afirma en dicha sección, estos procesos se relacionan principalmente con la presencia de erosión de tipo pluvial y antrópica, y roca meteorizada. En cuanto a los sitios en donde se identificaron

procesos erosivos, estos se relacionan principalmente con pérdida de cobertura vegetal sin que impliquen movimientos importantes de materiales térreos. A esta variable se le ha asignado un 20% del peso total dentro de la evaluación adelantada. La ponderación de cada uno de estos procesos se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 136. Índices de Susceptibilidad asociados al parámetro “Inventario de deslizamientos y procesos erosivos”.
Proyecto La Esmeralda TM 745.

Tipo de procesos	Índice de susceptibilidad
Sin proceso alguno	1
Erosión pluvial	2
Erosión antrópica	3
Roca meteorizada	4
Remoción en masa	5

Fuente: Elaboración propia

Detallada la metodología empleada, se aclara que para este análisis de susceptibilidad de procesos morfodinámicos para la zona de influencia de las obras, no se incluyen sismos. La respuesta ante este detonante es evaluada de manera puntual en los sitios en donde se ejecutarán los trabajos de operación minera, a través de los análisis de estabilidad de taludes y de manera general mediante la evaluación de amenaza; análisis que son presentados más adelante.

El mapa de zonificación geotécnica se presenta en el plano CAP05.1-CMAB-LES6823-GTMA-001. De manera ilustrativa se presenta a continuación.

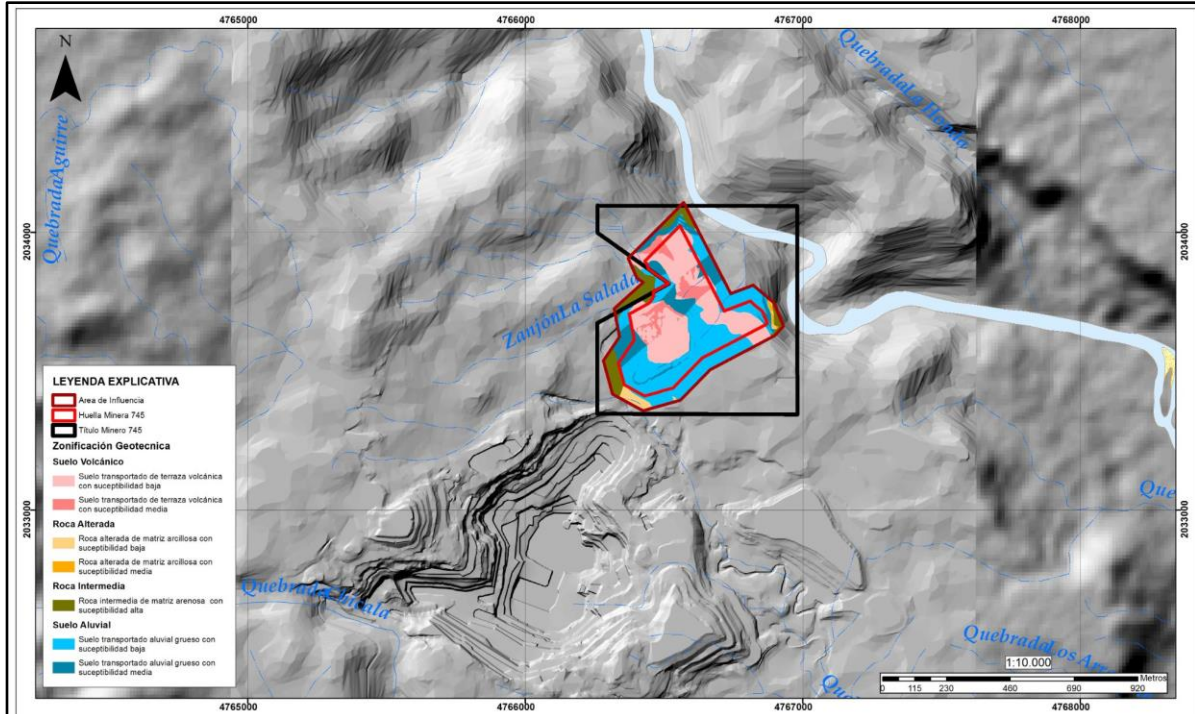


Figura 163. Plano zonificación geotécnica Área de influencia Título Minero 745.

5.1.8.6. Procesos de inestabilidad identificados en el área de estudio

En la zona norte del título 745, donde afloran las arenas puzolánicas y que actualmente su exposición es resultado de los procesos de explotación del título 4205, no hay evidencia de rasgos asociados a inestabilidades y procesos erosivos.

En la parte alta del talud de aproximadamente 30,0 m de alto, no hay evidencia de grietas que den indicios de inestabilidades en la zona. Así mismo, los rasgos identificados en la cara expuesta del talud, están relacionado al efecto de la maquinaria utilizada durante su extracción y no a procesos erosivos superficiales, lo cual está relacionado a la alta pendiente del talud que impide que el agua de escorrentía genere este efecto sobre la superficie. La Fotografía 92 muestra la condición de los taludes en la zona de extracción de la arena puzolánica.



Fotografía 92. Zona de extracción arenas puzolánicas (N:2 033587, E:4 766 578)
Fuente: Elaboración propia

Se identifican taludes de entre 5 y 10 m de altura de caliche. Estos taludes registran procesos erosivos en superficie, con presencia de surcos producto de las acciones de la lluvia de escorrentía. La Fotografía 93 presenta los procesos erosivos sobre los taludes de caliche.



Fotografía 93. Procesos erosivos talud caliche, al costado noroeste de la escombrera superior.
Fuente: Elaboración propia

La Escombrera Inferior reposa discordantemente sobre rocas sedimentarias compuestas por limolitas arena arcillosas y areniscas de grano grueso pertenecientes a la Formación Honda. Al igual que la escombrera superior, el cuerpo de la escombrera inferior está conformado por bloques de roca de forma angulosa a subangulosa con diámetros hasta de 1,5 m constituidos por rocas granodioritas, dioritas principalmente, se evidencia además la presencia de bloques de arenisca y calizas en menor proporción, embebidos en un matriz limo arenosa.

De acuerdo con las visitas de reconocimiento, los taludes y bermas que conforman la escombrera Inferior se encuentran 100% revegetalizados inclusive se evidencia la presencia de arbustos y árboles sobre toda el área de la escombrera. La cobertura vegetal sobre el área de la escombrera contribuye significativamente con la estabilidad de los taludes.

Finalmente, la escombrera Retrolleado reposa discordantemente sobre una antigua zona de explotación de rocas ígneas (puzolanas) donde se generaron cortes hasta de 25 m de profundidad. El cuerpo de la escombrera está conformado por una mezcla de rocas ígneas principalmente por puzolanas con tamaños que varían entre 2 cm y 0,5m principalmente.

Las aguas lluvias son debidamente manejadas por medio de estructuras hidráulicas construidas en la pata de los taludes y entregadas a los drenajes naturales aledaños. De acuerdo con las visitas de reconocimiento, los taludes y bermas que conforman la escombrera Retrolleado se encuentran 100% revegetalizados.

Respecto al resto de taludes del área estudiada, la evaluación de procesos erosivos y de remoción en masa para el área de influencia se basa en lo establecido en el Capítulo 5.1.1 Geología de este documento. En general, los depósitos cuaternarios de la zona y los suelos residuales de las diferentes formaciones tienen espesores pequeños de suelo, que junto a la baja pluviosidad de la zona, se refleja en la escasa presencia de movimientos de remoción en masa en la zona.

5.1.8.7. Evaluación de estabilidad para los trabajos de operación minera

Teniendo en cuenta los criterios de análisis definidos anteriormente, a continuación se presenta la evaluación de estabilidad en la zona de extracción y en la zona de deposición de material sobrante correspondiente a las escombreras.

5.1.8.7.1. Análisis estabilidad falla general por corte taludes Pit Minero del título 745

A continuación se presenta el resumen de la evaluación de estabilidad en la zona de extracción. La evaluación de estabilidad se desarrolló a partir de análisis de equilibrio límite de falla general por corte.

La Figura 163 presenta en planta las secciones de análisis de estabilidad por falla general por corte para la proyección de los taludes de extracción de cierre del futuro tajo del Título 745. De la Figura 164 a la Figura 166 se presenta la evaluación de estabilidad en condición estática de los taludes finales de explotación minera para el Título 745, considerando las actividades de explotación enmarcadas en el TM6823, 10 años posterior a finalizar las actividades de extracción de las arenas puzolánicas. En la Tabla 137, se presenta el resumen de los factores de seguridad obtenidos para cada uno de los taludes de corte en condición estática y pseudo-estática.

Es de importancia aclarar que los análisis ejecutados para la condición de aguas máximas ($R_u=0,2$ para todos los materiales salvo para la arenas puzolánicas considerando sus características de permeabilidad relativamente alta y los registros de los piezómetros instalados en la zona y sus registros históricos). Los resultados de la condición previamente mencionada y pseudo-estática para las mismas secciones se presentan en CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.033.

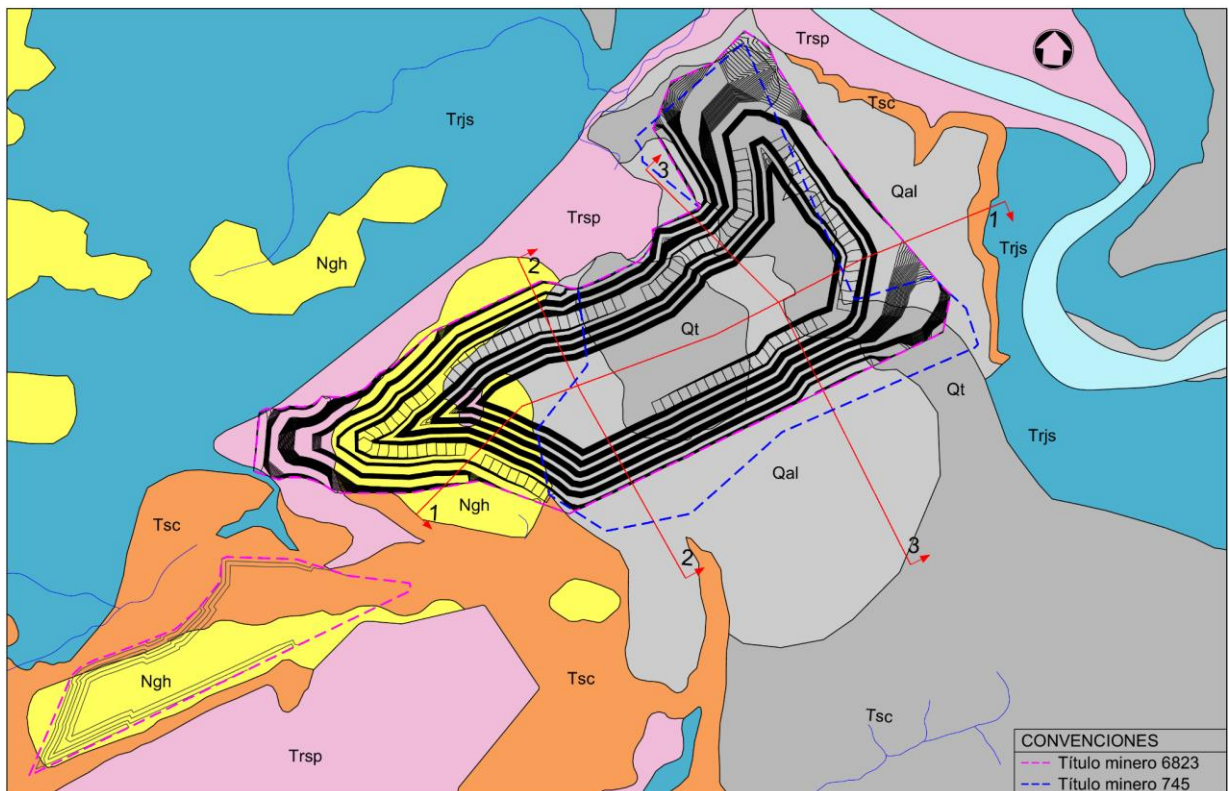


Figura 164. Secciones de análisis evaluación de estabilidad de taludes TM 745.

Fuente: Elaboración propia

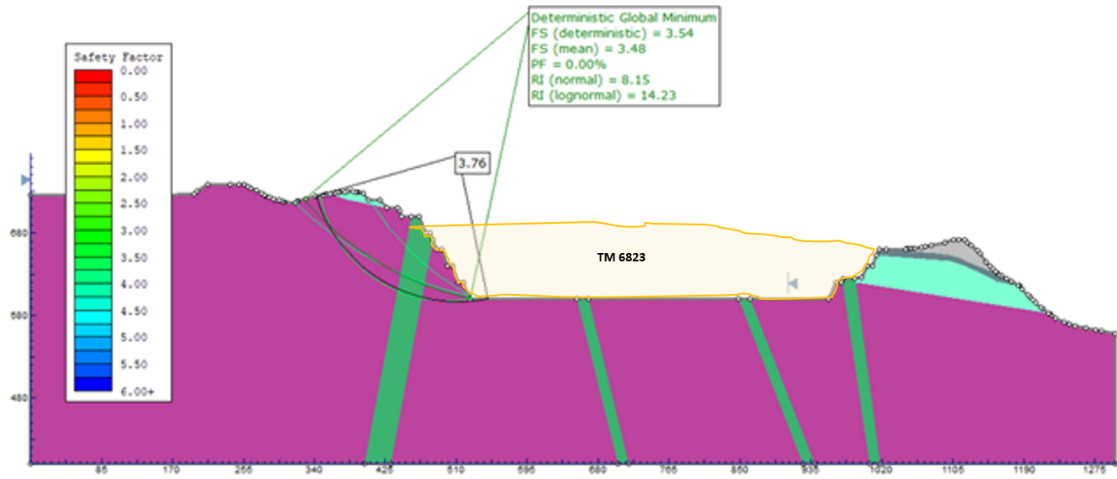


Figura 165. Sección 1 talud final explotación Titulo Minero 745.
Fuente: Elaboración propia

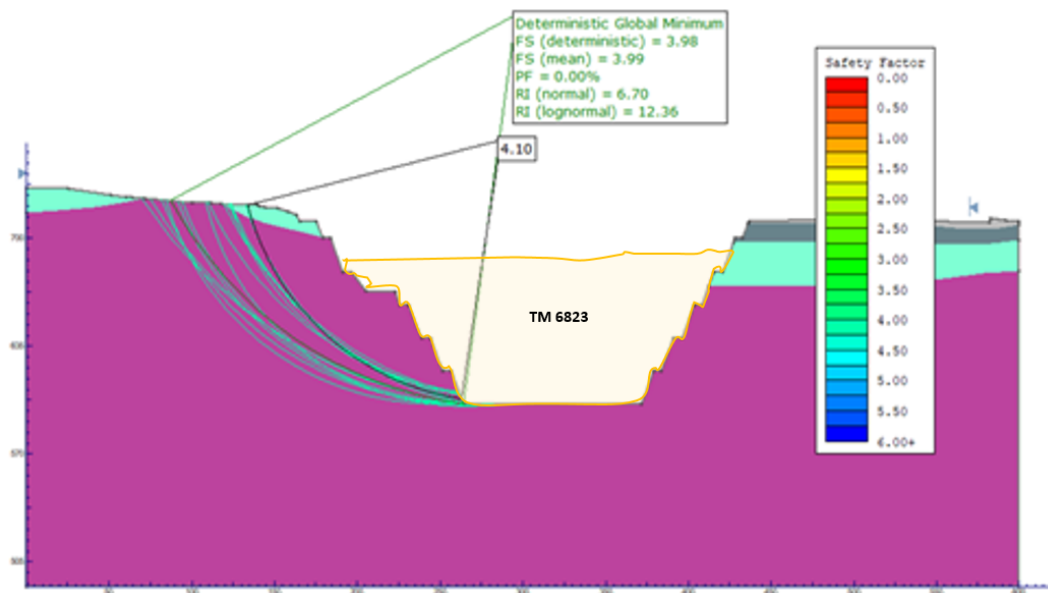


Figura 166. Sección 2 talud final explotación Titulo Minero 745.
Fuente: Elaboración propia

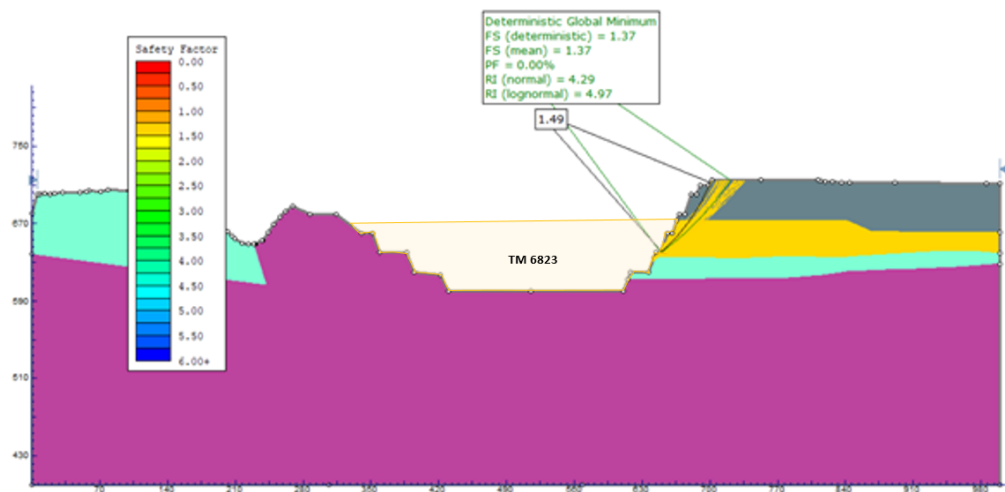


Figura 167. Sección 3 talud final explotación Titulo Minero 745.

Fuente: Elaboración propia

A continuación se presenta el histograma con los resultados de factor de seguridad en condición estática obtenidos a partir del análisis probabilístico de Montecarlo (10.000 simulaciones) para la sección 3, considerando las funciones de distribuciones normales para los diferentes parámetros de resistencia de cada uno de los materiales registrados en la Tabla 38.

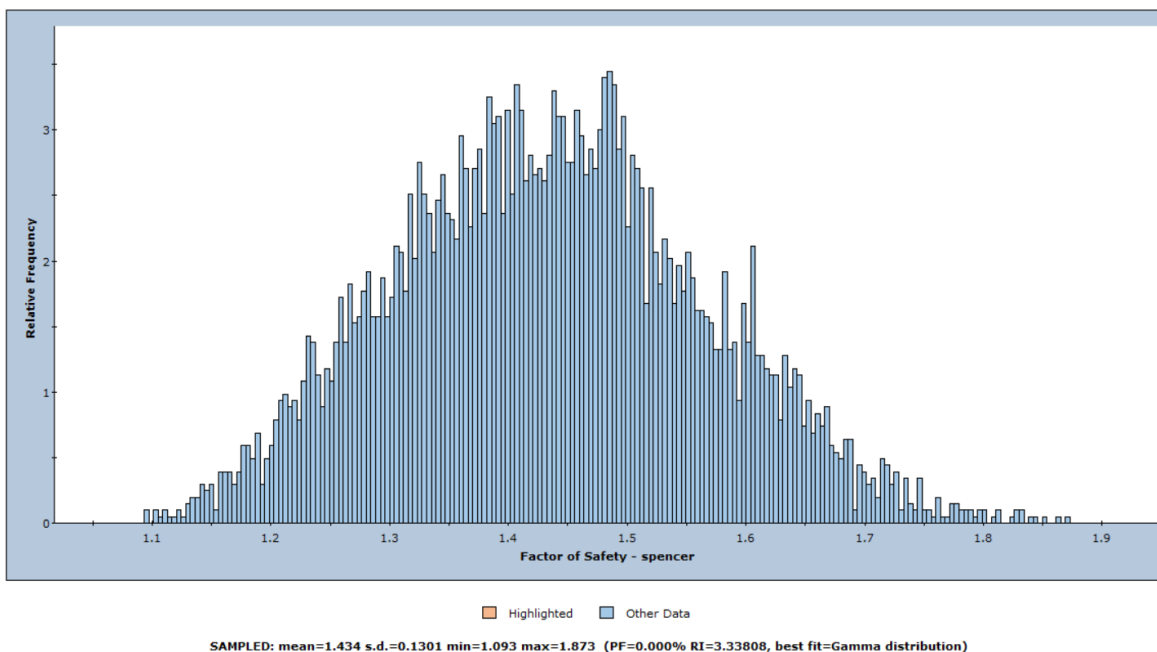


Figura 168. Histograma Factores de Seguridad obtenidos a partir de 10.000 simulaciones ejecutadas mediante la metodología MonteCarlo para la Sección 3 del Titulo Minero 745.

Fuente: Elaboración propia

Del histograma previamente presentado, se identifica que el FS promedio fue de 1,37, igual al valor determinístico. Los valores obtenidos del análisis permiten asociar los resultados de factores de seguridad de los 10.000 análisis simulados a una función de distribución Normal, obteniendo una probabilidad de falla (FS <1,0) menor al 0,01%. El resumen de los

resultados obtenidos para las cuatro secciones de análisis para las condición estática, aguas máximas y pseudo-estático, se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 137. Resumen factor de seguridad y probabilidad de falla de los taludes de cierre del título 745 mediante el método de equilibrio límite.

Sección	FS estático / Prob. de falla (%)		FS agua max. / Prob. de falla (%)		FS pseudo-estático / Prob. de falla (%)	
	FS	Prob. de falla (%)	FS	Prob. de falla (%)	FS	Prob. de falla (%)
1-1	3,54	≤ 0,01	3,13	≤ 0,01	2,50	≤ 0,01
2-2	2,68	≤ 0,01	2,37	≤ 0,01	2,12	≤ 0,01
3-3	1,37	≤ 0,01	1,24	0,36	1,01	42,15

Nota: Cada una de las secciones previamente analizadas fue evaluada para las dos caras expuestas. Si bien en esta tabla se presentan los factores de seguridad inferiores y su valor asociado de probabilidad de falla, el CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.033 se presenta el resumen de todos los resultados obtenidos.

Fuente: Elaboración propia

En general, los porcentajes de probabilidad asociados a los análisis probabilísticos de estabilidad son bajos o nulos, salvo por el valor registrado para una condición pseudo-estática sobre la sección 3-3, donde se obtiene una probabilidad de falla de 42,15 %. Este valor, se asocia igualmente a la probabilidad de que se desarrolle el sismo, cuya probabilidad de que se presente en los próximos 50 años es del orden del 10 %, asociado a su periodo de retorno del sismo es de 475 años. Por lo anterior, se establece que la probabilidad de falla realmente es inferior a que falle por un eventual sismo de esa magnitud en los próximos 50 años es inferior al 5,0 %.

Partiendo de la información recopilada y presentada en el Capítulo 5.1.9. Atmósfera se puede establecer que los efectos de voladuras generan un coeficiente de aceleración sísmica inferior al producido por el sismo asociado a un periodo de 475 años de periodo de retorno.

5.1.8.7.2. Análisis de estabilidad Escombreras de la mina La Esmeralda

Definidas las condiciones de análisis, se llevó a cabo la evaluación de estabilidad mediante el método del equilibrio límite para las secciones mostradas en la Figura 168, obteniéndose los resultados resumidos en la Tabla 138. El material de esteril de la operación será almacenado en la extensión de la escombrera superior y retrollenado Chicalá, los cuales se encuentran licenciados en la resolución 855 de 2017 correspondiente al título minero 4205 de mina La Esmeralda.

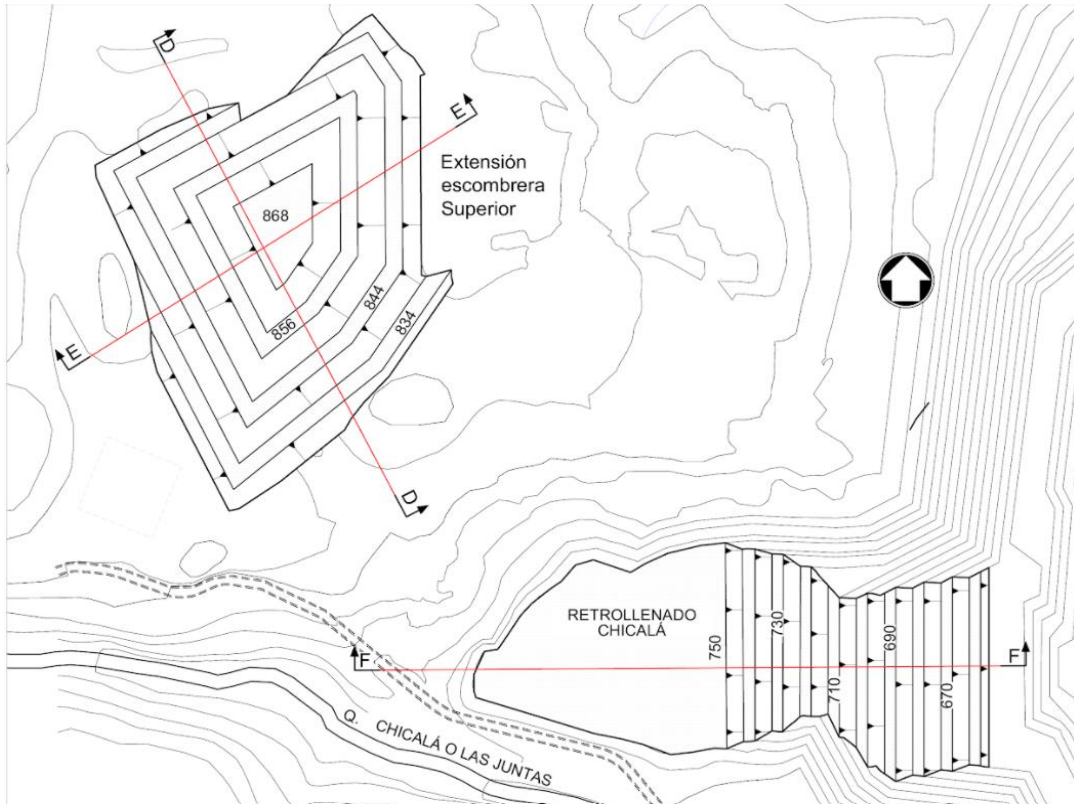


Figura 169. Secciones de análisis. Estabilidad de taludes en escombreras de la mina La Esmeralda.
Fuente: Ingeniería Geológica y Perforaciones - IGP - Estudio geotécnico y análisis de estabilidad para escombreras de la mina La Esmeralda. IGP-PY-FO-016. (2019).
Fuente: Elaboración propia

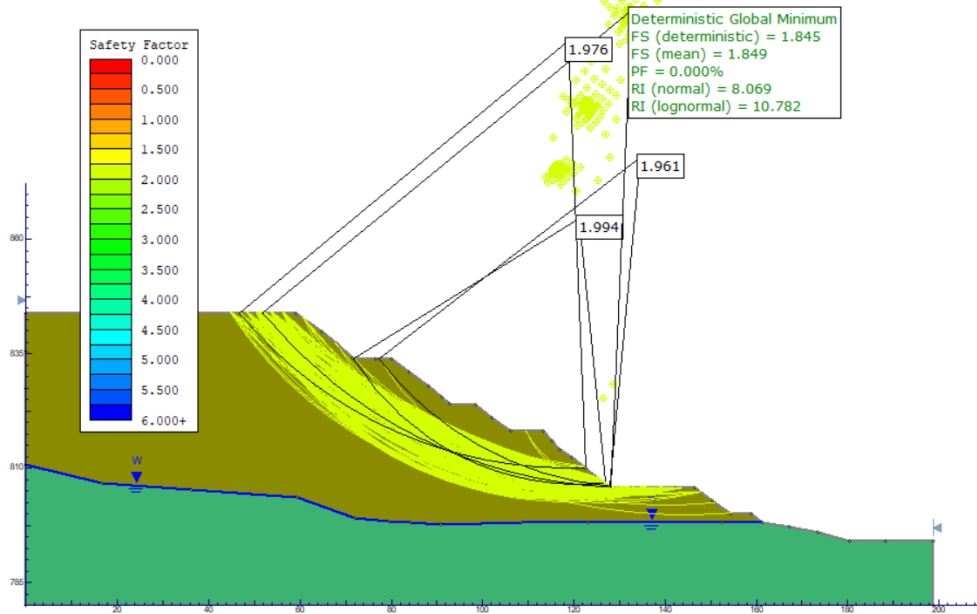


Figura 170. Sección A-A Escombrera superior actual.
Fuente: Elaboración propia

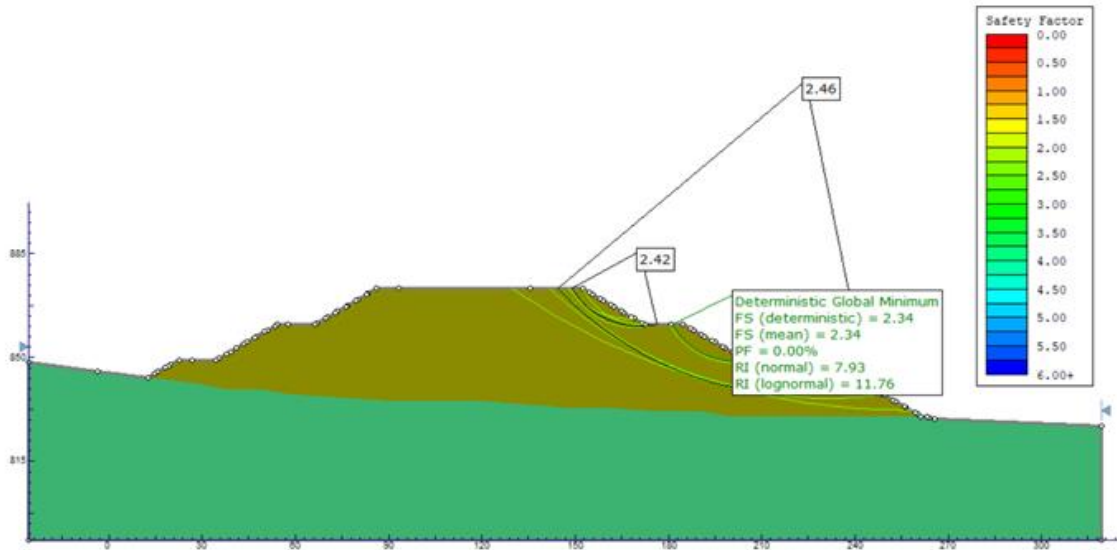


Figura 171. Sección D-D Extensión escombrera superior.
Fuente: Elaboración propia

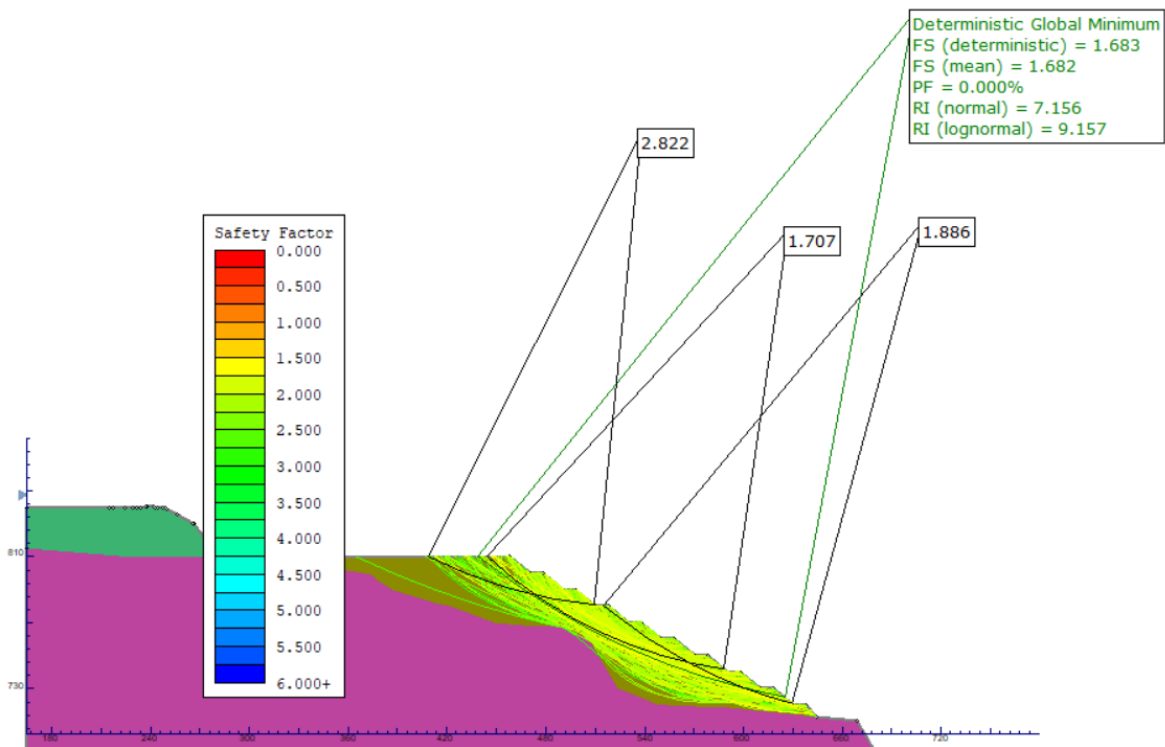


Figura 172. Sección F-F Escombrera retrolenado.
Fuente: Elaboración propia

Los resultados previamente presentados corresponden a los análisis de estabilidad en condición estática de las escombreras a constituir a partir de los materiales de descapote provenientes de las actividades de extracción para el título

minero 745. Los resultados para una condición de aguas extremas y condición pseudo-estática se presentan en CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.033.

Tabla 138. Resultados de los análisis de estabilidad Escombreras Mina La Esmeralda.

Escombrera	Sección	FS estático / Prob. de falla (%)		FS agua max. / Prob. de falla (%)		FS pseudo-estático / Prob. de falla (%)	
Superior actual	A-A	1,85	≤ 0,01	1,49	≤ 0,01	1,25	≤ 0,01
	B-B	2,01	≤ 0,01	1,72	≤ 0,01	1,36	≤ 0,01
	C-C	2,13	≤ 0,01	1,91	≤ 0,01	1,51	≤ 0,01
Superior Futura	D-D	2,34	≤ 0,01	1,97	≤ 0,01	1,53	≤ 0,01
	E-E	2,36	≤ 0,01	1,98	≤ 0,01	1,52	≤ 0,01
Retrolenado	F-F	1,68	≤ 0,01	1,33	≤ 0,01	1,12	3,40

Fuente: Elaboración propia

Los resultados arrojan probabilidades de falla iguales a cero, salvo para la escombrera de retrolenado considerando una condición pseudo-estática. No obstante, considerando que la falla se da únicamente cuando se presenta el sismo cuyo periodo de retorno es 475 años, la probabilidad de falla es inferior a 0,5 %.

Finalmente, el detalle de los volúmenes previstos a disponer en cada una de las escombreras se presenta en el Capítulo 3. Descripción del proyecto.

5.1.8.8. Evaluación de la Amenaza

A partir de los resultados de los análisis de estabilidad y siguiendo los criterios establecidos en la se han definido las condiciones de amenaza particulares desde el punto de vista de estabilidad de taludes tanto para condición normal como para las condiciones extremas de aguas máximas y sismo en la zona del PIT. Los resultados se resumen en la siguiente Tabla.

Tabla 139. Evaluación de Amenaza para los taludes de la mina La Esmeralda

Zona	Talud	FS y Nivel de Amenaza					
		Condición Normal	Amenaza	Condición Extrema - Aguasmax	Amenaza	Condición Extrema - Sismo	Amenaza
Zona Extracción	1 -1 Suroeste	3,54	Baja	3,13	Baja	2,50	Baja
	1 -1 Noreste	4,15	Baja	3,52	Baja	2,09	Baja
	2 -2 Noroeste	3,98	Baja	3,55	Baja	2,87	Baja
	2 -2 Sureste	2,68	Baja	2,37	Baja	2,12	Baja

Zona	Talud	FS y Nivel de Amenaza					
		Condición Normal	Amenaza	Condición Extrema - Aguasmax	Amenaza	Condición Extrema - Sismo	Amenaza
	3-3 Noroeste	6,35	Baja	5,75	Baja	4,24	Baja
	3-3 Sureste	1,37	Media	1,24	Media	1,01	Media

Nota (*): Los factores de seguridad incluidos tienen en cuenta el resultado obtenido mediante el mecanismo de falla por corte global. Los análisis de estabilidad de cuñas, planares y por volteo se presentan en el Estudio de Impacto ambiental correspondiente al Título 6823.

Fuente: Elaboración propia

En general, la evaluación de estabilidad en los taludes de corte de explotación arrojaron resultados que permiten identificar amenaza principalmente Baja. Por otro lado, para ciertas condiciones y secciones de análisis particulares, logró identificar amenaza Media.

A continuación se presentan las figuras de amenaza en el área de influencia para la condición de estabilidad de taludes asociadas a la explotación minera considerando la no existencia (sin proyecto) y la existencia del proyecto (con proyecto). Cabe la pena resaltar que los mapas de amenaza presentados a continuación hacen referencia únicamente a la estabilidad asociada al secuenciamiento minero y que cualquier tipo de posible inestabilidad en el área de influencia independiente a la excavación a cielo abierto, se presenta en el mapa de susceptibilidad de procesos de remoción en masa.

Los resultados gráficos de la evaluación de la AMENAZA para el escenario de riesgo relacionado con la falla en los taludes de excavación (procesos remoción en masa). La primera figura presenta la Amenaza en el Área de Influencia para la condición estática en el escenario actual (véase Figura 158), mientras que la segunda figura lo presenta para la condición pseudoestática en el escenario de cierre (20 años, finalizan las actividades incluidas en el TM 6823). Lo anterior, teniendo en cuenta que cada una de ellas corresponde a las condiciones de mayor grado de amenaza en función del tiempo de exposición para cada uno de los escenarios.

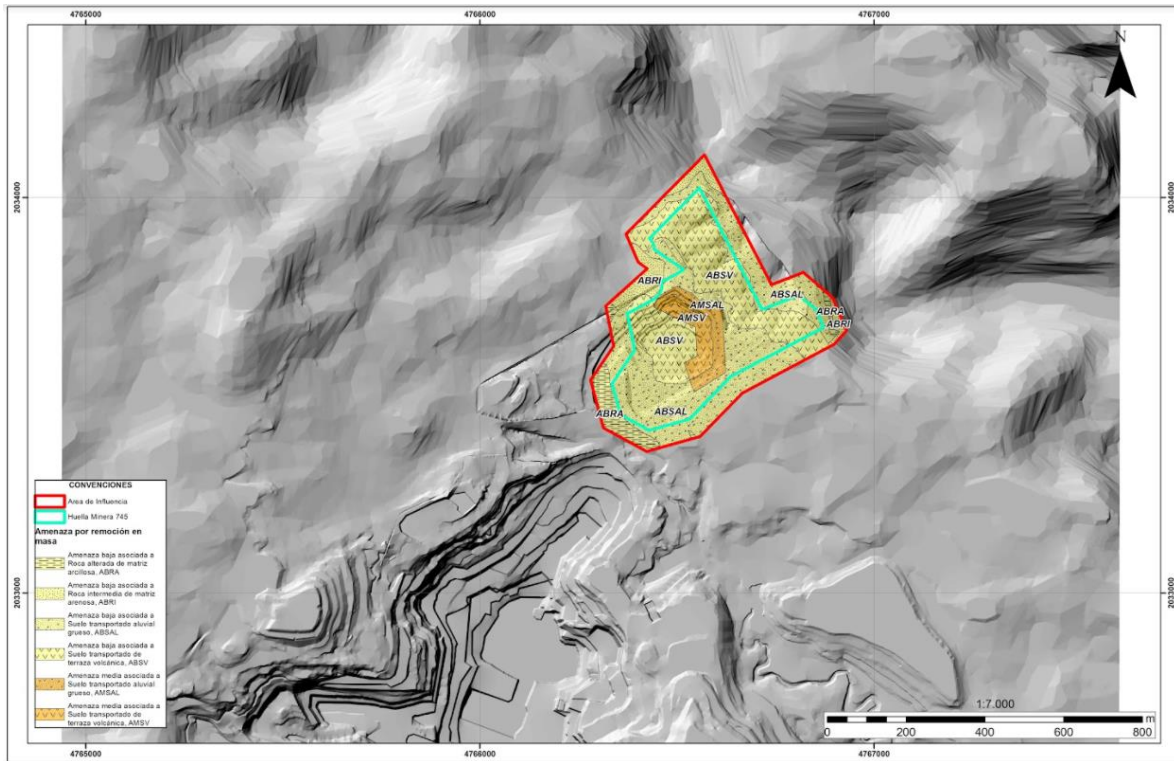


Figura 173. Evaluación de la Amenaza por estabilidad de taludes (Procesos remoción en masa) - Escenario actual.
Condición estática.
Fuente: Elaboración Propia

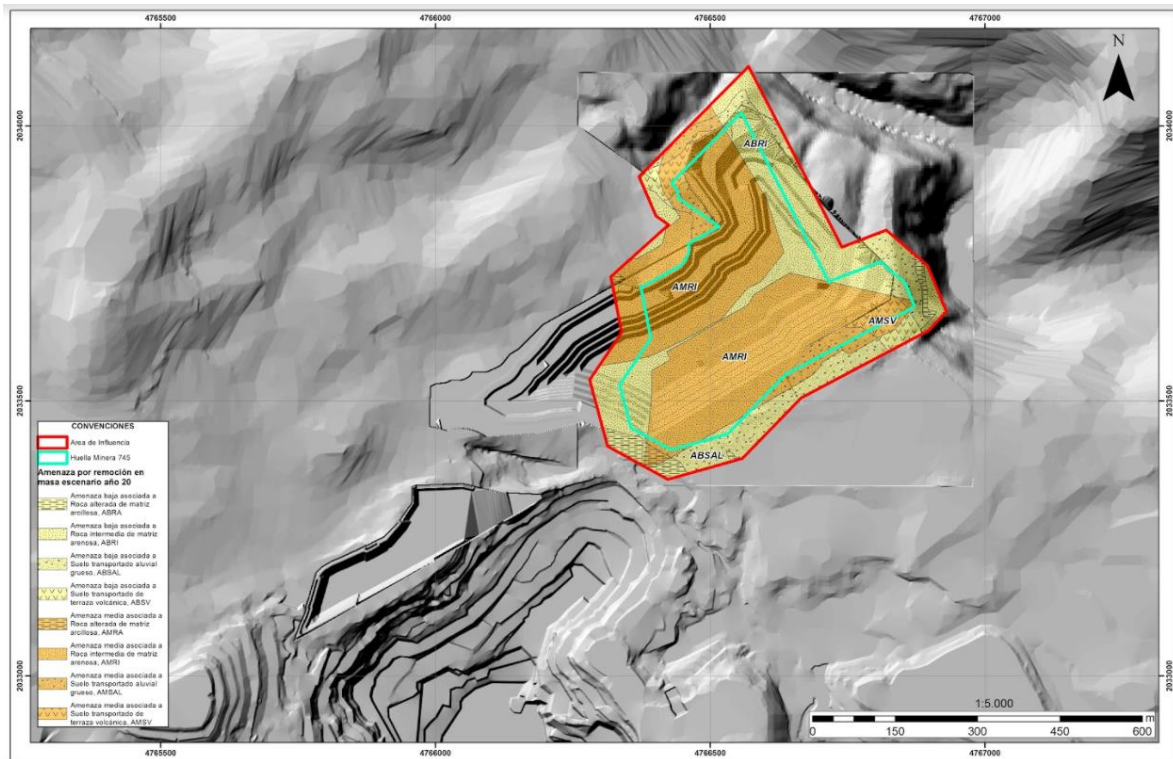


Figura 174. Evaluación de la Amenaza por estabilidad de taludes (Procesos remoción en masa) - Escenario cierre (20 años). Condición extrema por sismo.

Fuente: Elaboración Propia

5.1.8.9. Conformación de Taludes

Las características morfométricas del tajo de avance de la explotación y del tajo final de explotación, para las excavaciones a realizarse en el título 745, son las siguientes:

Tabla 140. Características geométricas de las excavaciones a realizarse en el TM 745, CEMEX (2018)

Parámetro	Dimensión
Altura de banco de trabajo	≤ 20,0 m
Altura de banco pit final	≤ 20,0 m
Ancho de berma de operación	5,0 a 15,0 m
Ancho de berma pit final	5,0 a 15,0 m
Ángulo de talud de trabajo	>75°
Ángulo de talud pit final	70°
Ángulo de pendiente de desagüe	2%

Fuente: CEMEX. Actualización Programa de Trabajos y Obras (2018).

La utilización de taludes verticales ($\geq 70^\circ$) para las arenas puzolánicas asociadas a los trabajos de extracción del título

minero 745, es justificada a partir del comportamiento observado en los taludes de corte que hacen parte de la operación minera llevada a cabo en materiales de características similares en el título minero 186-73 localizado hacia el suroriente del TM 745 superpuesto al TM 4205 (CEMEX, 2003).

5.1.8.10. Monitoreo Geotécnico

El plan de monitoreo complementario al existente que se implemente debe responder en primera medida a las necesidades manifiestas de la operación logrando un balance entre calidad de información obtenida y su utilidad en la toma de decisiones. En este sentido, las alternativas que se manejan en el mercado en términos de monitoreo geotécnico de minas y canteras son muchas y variadas, cubriendo un amplio espectro según las necesidades particulares de la operación y el presupuesto disponible para tal fin. Así, hoy en día es posible encontrar desde los tradicionales puntos de control de movimientos (prismas) hasta sofisticadas herramientas de medición de desplazamientos mediante técnicas láser o de radar.

Partiendo de la base anteriormente expuesta y teniendo en cuenta el sistema de monitoreo existente cuyas principales características y resultados ha venido siendo reportado en los diferentes informes de cumplimiento ambiental (ICA), se considera que un sistema de instrumentación geotécnica compuesto por visitas de inspección al sitio, puntos de control topográfico (i.e. monumentos y/o prismas), piezómetros e inclinómetros instalados en los puntos considerados críticos o de mayor interés es suficiente para lograr los objetivos de un plan de monitoreo en la zona objeto de la modificación, brindando información valiosa y oportuna para la toma de decisiones.

Dicho lo anterior, a continuación se detallan las características de los diferentes componentes e instrumentos que hacen parte del sistema de monitoreo geotécnico.

5.1.8.10.1. Inspecciones Visuales de los Taludes por Parte de Personal Capacitado

Este tipo de monitoreo se efectúa mediante visitas periódicas al sitio por parte de profesionales capacitados en geotecnia o personas entrenadas, en donde se realizan inspecciones visuales que permiten identificar signos de inestabilidad en los taludes de la operación minera. En términos generales los aspectos a analizar y evaluar dentro de una visita de inspección incluyen:

- Identificación de grietas
- Geometría general de los taludes
- Identificación de acumulaciones de agua y condiciones superficiales de flujo
- Deformaciones excesivas

En la práctica minera, la periodicidad de las inspecciones es un tema dinámico que viene dado en función de la importancia de la zona donde se efectúan los trabajos, considerando factores tales como si es una zona activa o inactiva de la mina, si existen antecedentes de inestabilidades o no, de las condiciones climáticas, entre otros. No obstante, para el caso particular de la operación objeto de la modificación, dada su extensión y localización, se considera apropiado llevar a cabo un recorrido mensual durante su operación, haciendo especial énfasis en sitios y momentos puntuales (e.g excavación de taludes norte y este, en rellenos de altura máxima). Conforme al avance de la operación y el comportamiento de los taludes, este recorrido se podrá efectuar a una mayor o menor frecuencia.

5.1.8.10.2. Puntos de Control Topográfico - Prismas

Dentro del sistema de instrumentación geotécnica, el monitoreo permanente de movimientos mediante el uso de prismas y estación total es esencial, ya que constituye una herramienta de primera mano, particularmente cuando la toma de decisiones no da espera e involucra la seguridad de los colaboradores y bienes de la empresa.

En cuanto a los equipos y materiales requeridos para la implementación de esta herramienta de medición cabe destacar que debido a la dinámica y dimensiones de una operación minera, el uso de puntos fijos de referencia o monumentos de concreto presenta dificultades, particularmente en la zona de rellenos o escombreras que estén activas, razón por la cual para estos puntos se recomienda el uso de prismas adosados a varillas metálicas que permitan una fácil reubicación de los puntos de medición en caso de ser necesario. En vista de lo anterior se recomienda que la instalación de los elementos fijos se realice hacia la superficie en zonas de taludes definitivos en donde se sabe que las actividades mineras no los afectarán, mientras que la ubicación de puntos móviles debe obedecer a los intereses del departamento de operación minera y producto de recomendaciones de especialista en geotecnia.

Con respecto a los puntos de referencia los mismos deben estar bien demarcados para su fácil identificación y ubicación deben ser tal que se encuentren en zonas estables alejadas de la influencia de las actividades mineras (excavación, cargue, transporte y disposición de materiales).

La periodicidad en la toma de medidas será función de la actividad minera desarrollada en el sitio en particular y si existen evidencias o no de movimientos en el punto evaluado. Para el caso de la mina la Esmeralda y particularmente la escombrera superior dispuesta actualmente los puntos de control existentes al año 2019 se presentan en la siguiente Tabla.

Tabla 141. Puntos de control topográfico instalados en las Escombreras del Proyecto La Esmeralda, año 2019.

Escombrera	ID	Sist. Coord. Origen Único		Coord. Sistema Magna Sirgas Origen Bogotá		Cota (msnm)
		Este (m)	Norte (m)	Este (m)	Norte (m)	
Superior	ES1	4 765 671	2 032 961	885 143	966 814	807,50
	ES2	4 765 668	2 032 981	885 140	966 834	807,80
	ES3	4 765 665	2 033 001	885 138	966 854	808,27
	ES4	4 765 662	2 033 020	885 135	966 874	808,71
	ES5	4 765 660	2 033 040	885 132	966 894	809,36
	ES6	4 765 657	2 033 060	885 129	966 913	810,19
	ES7	4 765 699	2 032 933	885 172	966 786	796,28
	ES8	4 765 700	2 032 953	885 172	966 806	795,96
	ES9	4 765 701	2 032 972	885 173	966 826	795,61
	ES10	4 765 702	2 032 992	885 174	966 846	795,62
	ES11	4 765 703	2 033 012	885 175	966 866	795,80
	ES12	4 765 703	2 033 032	885 176	966 886	796,10

Fuente: Ingeniería Geológica y Perforaciones - IGP - *Estudio geotécnico y análisis de estabilidad para escombreras de la mina La Esmeralda. IGP-PY-FO-016. (2019).*

Complementariamente, se debe llevar a cabo la toma de lecturas como mínimo dos veces al año con el fin de identificar desplazamientos relativos en los diferentes periodos.

5.1.8.10.3. Piezómetros

Se destaca que estos elementos más que dar una información que defina un nivel de alarma en particular sirven para confirmar hipótesis de diseño y evaluar condiciones del nivel freático, permitiendo estar alerta ante posibles situaciones de riesgo que lleven a inestabilidades en los taludes. La localización y características particulares de estos instrumentos depende en gran medida del modelo geológico de la zona de estudio, así como de la red de instrumentos actualmente en uso. Actualmente la escombrera superior de la mina La Esmeralda cuenta tanto con piezómetros de tubo abierto tipo Casagrande como de tipo hilo vibrátil. Su localización se muestra en la Tabla 142.

Tabla 142. Piezómetros instalados en las escombreras del proyecto La Esmeralda año 2019.

Tipo	Sitio de Instalación	Punto	Profundidad instalación (m)
Piezómetro de hilo vibrátil	Escombrera Superior	PHV-01-19	27,5
Piezómetro tipo Casagrande	Escombrera Superior	PE-05-014	39,9
		PE-06-014	23,0

Fuente: Ingeniería Geológica y Perforaciones - IGP - *Estudio geotécnico y análisis de estabilidad para escombreras de la mina La Esmeralda. IGP-PY-FO-016. (2019).*

Por otro lado, la zona de influencia del proyecto es monitoreada con ocho piezómetros que permiten identificar las condiciones de flujo a través del medio poroso, su ubicación se presenta a continuación.

Tabla 143. Piezómetros instalados Mina La Esmeralda.

ID	Sist. Coord. Origen Único		Coord. Sistema Magna Sirgas Origen Bogotá		Cota (msnm)
	Este (m)	Norte (m)	Este (m)	Norte (m)	
Piezo-01	4 766 118	2 032 341	885 590	966 194	700
Piezo-02	4 766 675	2 03 2498	886 147	966 351	620
Piezo-03	4 766 593	2 033 053	886 065	966 906	650
Piezo-07	4 766 820	2 033 074	886 292	966 927	670
Piezo-08	4 766 615	2 033 423	886 087	967 276	670
Piezo-09	4 766 637	2 033 663	886 109	967 516	670
Piezo-10	4 766 841	2 033 675	886 313	967 528	650
Piezo-05	4 766 035	2 032 343	885 507	966 196	767

Fuente: Cemex (2020).

Para complementar el sistema de auscultación para identificar las características de flujo subsuperficial, se prevé la instalación de dos piezómetros para la zona noroeste y suroeste de la zona de extracción del título minero 745. A continuación se presenta la ubicación recomendada de los piezómetros de hilo vibrátil a instalar.

Tabla 144. Piezómetros proyectados a instalar Mina La Esmeralda.

ID	Sist. Coord. Origen Único		Coord. Sistema Magna Sirgas Origen Bogotá		Cota (msnm)
	Este	Norte	Este	Norte	
Piezo-11	4 766 649	2 033 963	886 121	967 816	665
Piezo-12	4 766 275	2 033 707	885 747	967 560	715

Fuente: Elaboración propia

La ubicación no es definitiva, podrá ser ajustada en la zona norte del Pit de extracción. Mientras que la profundidad de los sensores se definirá en función de los materiales identificados.

5.1.8.10.4. Inclinómetros

Con respecto a los inclinómetros, su ubicación está limitada por las actividades de operación minera y más allá de definir un valor límite o de alarma permiten establecer un control e identificación de posibles superficies de rotura. Para el caso de los trabajos objeto de estudio los inclinómetros instalados en la escombrera superior se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 145. Inclinómetros instalados en las escombreras del proyecto La Esmeralda año 2019.

Sitio de Instalación	Inclinómetro	Profundidad instalación (m)
Escombrera Superior	INC-01-19	15,0
	INC-02-19	10,0

Fuente: Ingeniería Geológica y Perforaciones - IGP - *Estudio geotécnico y análisis de estabilidad para escombreras de la mina La Esmeralda. IGP-PY-FO-016. (2019).*

Teniendo en cuenta el depósito que quedará expuesto, se recomienda la instalación de dos inclinómetros en la zona este del PIT, con el fin de verificar las condiciones de estabilidad en la zona. La ubicación se presenta a continuación.

Tabla 146. Inclinómetros proyectados a instalar proyecto La Esmeralda.

Sitio de Instalación	Sist. Coord. Origen Único		Coord. Sistema Magna Sirgas Origen Bogotá	
	Este	Norte	Este	Norte
PIT	4 766 793	2 033 806	886 265	967 659
	4 765 248	2 032 953	884 720	966 806

Fuente: Elaboración propia

5.1.8.11. Componente Geotécnico etapas de cierre y post cierre.

En esta fase del proyecto los trabajos se orientan hacia la generación de una adecuación geomorfológica del terreno en las zonas de tajos del PIT de tal forma que se logren alcanzar los factores de seguridad mínimos que garanticen las condiciones de estabilidad a largo plazo de los taludes.

Dentro de las obras a implementar en esta etapa se encuentran:

- Remoción de material erosionado: perfilado de taludes del tajo de forma tal que el material superficial suelto a lo largo de los taludes sea removido, esto para evitar el desarrollo de fenómenos erosivos o de remoción en masa que puedan comprometer la estabilidad de los taludes.
- Retiro de bloques inestables: Se deben realizar labores de “desabombe” en los taludes de los tajos para retirar cualquier tipo de bloque que presente riesgo potencial de caída. Este mismo tratamiento debe realizarse en las zonas de escombreras para mantener los taludes de éstas libres de sobre-tamaños que impidan la implementación de medidas de protección como lo son la instalación de biomantos para revegetalización.
- Reconformación de taludes inestables: En el evento que los taludes del tajo no cumplan con los factores de seguridad mínimos establecidos, estos deben ser intervenidos mediante el retiro de material, con el propósito de aumentar el factor de seguridad, y por ende, estabilizar las zonas intervenidas.

Adicionalmente, en los taludes que no requieren medidas de estabilización, el plan de cierre contempla medidas para la protección frente a la erosión, mediante el uso de mantos biodegradables, que generen un sustrato mientras se desarrolla la capa vegetal, evitando que la misma se lave y/o erode por la acción de las lluvias.

5.1.9. Atmósfera.

5.1.9.1. Meteorología.

Con el fin de realizar la caracterización climatológica e hidrológica de la zona de estudio se identificaron las estaciones operantes por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) en cercanías a la zona de estudio.

Para la caracterización del clima en la zona de estudio se utilizaron los registros de las estaciones que se presentan en la Tabla 147. Las estaciones climatológicas utilizadas son operadas por el IDEAM y se localizan en el departamento del Tolima (Figura 174). A la fecha de solicitud de la información las estaciones se encontraban activas.

Tabla 147. Características de las estaciones climatológicas utilizadas

Código	Departamento	Municipio	Categoría	Nombre	Corriente	Coordenada X	Coordenada Y	Elevación (msnm)	Entidad
2124504	Tolima	Ibagué	SS	Apto Perales	Opia	4762681,2	2047205,8	928	IDEAM
2121508	Tolima	Espinal	CO	Chicoral	Coello	4778611,5	2025866,4	475	IDEAM

Fuente: IDEAM.

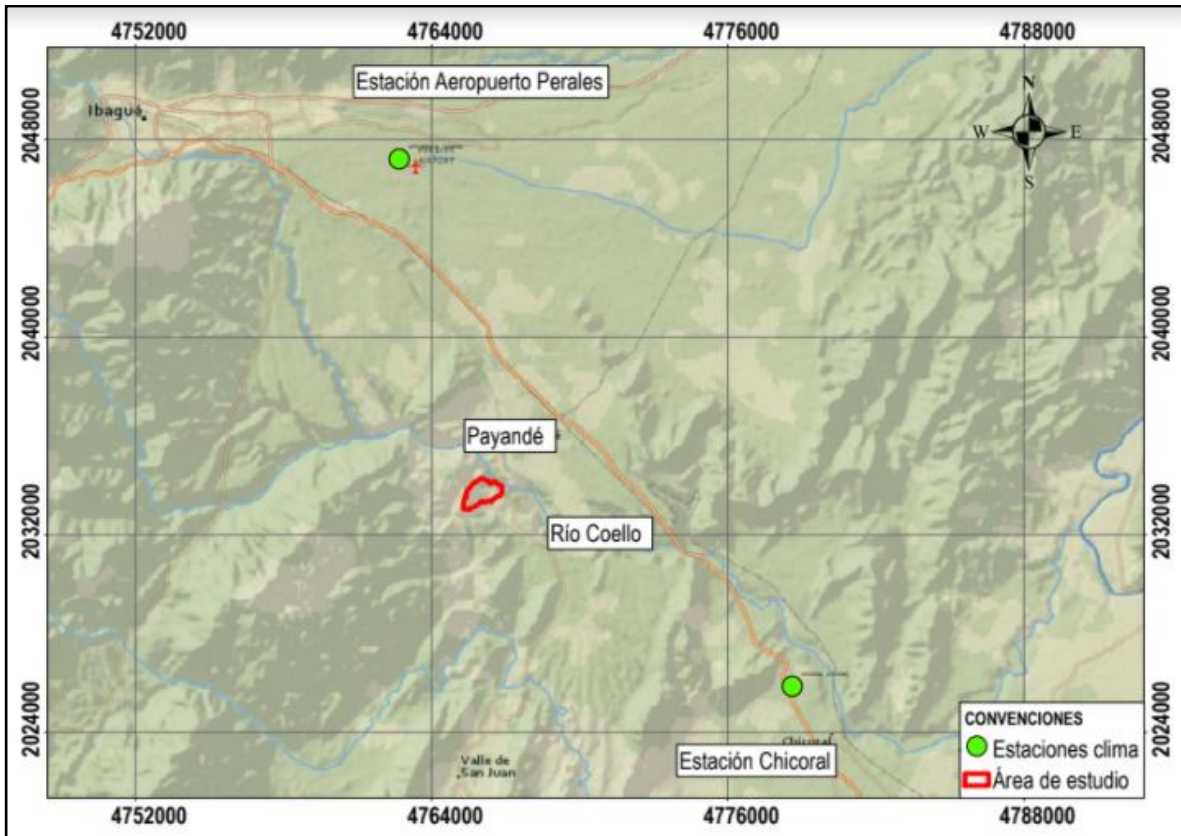


Figura 175. Localización estaciones climatológicas
Fuente: Elaboración propia.

5.1.9.1.1. Análisis de consistencia y homogeneidad estaciones hidroclimatológicas.

A los registros mensuales de brillo solar, temperatura, velocidad del viento, evaporación y humedad relativa se les realizaron cinco pruebas de normalidad con el objetivo de definir el conjunto de pruebas paramétricas o no paramétricas que evaluarán la consistencia y la homogeneidad de las series.

Para tal efecto se realizaron las pruebas de Shapiro Wilk, Kolmogorov Smirnov, Anderson Darling, Lillie y Shapiro Francia para un nivel de significancia del 5%. Se encontró que todas las estaciones analizadas se comportan bajo una distribución de probabilidad no paramétrica, es decir que no siguen una distribución normal.

A partir de los resultados anteriores se definieron las pruebas no-paramétricas a aplicar en las estaciones con el fin de evaluar la homogeneidad y consistencia mediante pruebas de estabilidad en la media (Mann-Whitney y Kruskal-Wallis), estabilidad en la varianza (Siegel Turkey) y tendencia (Spearman y Kendall). Las pruebas utilizadas se describen en el Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.034.

Las pruebas fueron realizadas con ayuda del software RStudio para un nivel de significancia de $\alpha = 5\%$. Se rechaza la hipótesis nula si el valor de p asociado al resultado observado es menor que el nivel de significación establecido. El p -value muestra la probabilidad de haber obtenido el resultado hallado si se supone que la hipótesis nula es cierta. Los resultados para cada serie de los parámetros de la estación Apto Perales se resumen en la Tabla 148 y en la Tabla 149 se presentan los resultados para las series de los parámetros de la estación Aeropuerto Perales y Chicoral respectivamente.

Tabla 148. Resumen de pruebas estadísticas aplicadas a los registros de la estación Apto Perales

Pruebas	Parámetro	Brillo Solar	Evaporación	Humedad Relativa	Temperatura Media	Temperatura Máxima	Temperatura Mínima	Vel. Viento
	Test	p.value	p.value	p.value	p.value	p.value	p.value	p.value
Normalidad	Shapiro-Wilk	4,682E-19	4,086E-09	2,355E-19	6,842E-02	2,972E-30	1,644E-07	1,681E-41
	Kolmogorov-Smirnov	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Anderson-Darling	3,700E-24	4,098E-04	3,700E-24	1,989E-02	3,700E-24	4,159E-11	3,700E-24
	Lillie	1,603E-12	2,149E-03	1,799E-39	1,086E-02	6,503E-58	1,053E-19	3,372E-175
	Shapiro-Francia	2,405E-17	1,208E-08	8,271E-18	1,020E-01	1,197E-27	4,091E-07	8,970E-38
Tendencia	Spearman	4,347E-01	8,186E-01	1,953E-02	7,292E-01	4,316E-01	1,304E-01	9,094E-01
	Kendall	4,347E-01	8,227E-01	1,915E-02	7,308E-01	4,252E-01	1,293E-01	8,986E-01
Varianza	Siegel Turkey	1,425E-01	8,093E-01	3,650E-02	1,150E-02	8,098E-01	8,643E-01	6,002E-01
Media	Mann Whitney	3,399E-01	8,840E-01	2,866E-01	7,095E-01	7,865E-01	6,612E-01	3,156E-01
	Kruskall-Wallis	4,323E-01	2,417E-01	6,488E-01	3,971E-01	8,323E-01	6,733E-01	7,263E-02

Fuente: Elaboración propia.

Según la Tabla 148 los registros de brillo solar, evaporación, velocidad media del viento, temperatura máxima y temperatura mínima presentan una buena calidad en los datos, al cumplir con la hipótesis de no tendencia e igualdad en la media y la varianza en el 100% de las pruebas. Para la humedad relativa y temperatura media según el test de Siegel Turkey, las varianzas no son iguales, cumpliendo con el 80% de las pruebas realizadas. A partir de los resultados anteriores se utilizaron los registros de la estación Aeropuerto Perales para la caracterización climatológica de la zona de estudio.

Tabla 149. Resumen de pruebas estadísticas aplicadas a los registros de la estación Chicoral

Pruebas	Parámetro	Humedad Relativa	Temperatura Media	Temperatura Máxima	Temperatura Mínima
	Test	p.value	p.value	p.value	p.value
Normalidad	Shapiro-Wilk	1,185E-08	1,565E-05	2,323E-06	2,320E-10
	Kolmogorov-Smirnov	0,0	0,0	0,0	0,0
	Anderson-Darling	8,409E-08	1,853E-07	5,016E-06	2,952E-13
	Lillie	1,618E-07	1,442E-07	4,241E-10	3,676E-19
	Shapiro-Francia	5,857E-08	2,703E-05	6,058E-06	8,664E-10
Tendencia	Spearman	7,367E-01	4,832E-01	8,339E-01	5,722E-01
	Kendall	7,317E-01	4,852E-01	8,315E-01	5,833E-01
Varianza	Siegel Turkey	6,086E-01	4,724E-01	9,228E-01	5,404E-01
Media	Mann Whitney	5,051E-01	9,645E-01	3,609E-01	3,953E-01

Pruebas	Parámetro	Humedad Relativa	Temperatura Media	Temperatura Máxima	Temperatura Mínima
	Test	p.value	p.value	p.value	p.value
	Kruskall-Wallis	1,900E-01	3,271E-01	3,744E-01	3,684E-01

Fuente: Elaboración propia.

Según la Tabla 149 los registros de humedad relativa, temperatura media, temperatura máxima y temperatura mínima presentan una buena calidad en los datos, al cumplir con la hipótesis de no tendencia e igualdad en la media y la varianza en el 100% de las pruebas. A partir de los resultados anteriores se utilizaron los registros de la estación Chicoral para la caracterización climatológica de la zona de estudio.

5.1.9.1.1.1. Boxplot

Se construyeron diagramas de cajas y bigotes con el fin de determinar la tendencia de los datos para cada mes y posibles datos anómalos. Este método gráfico establece como umbral el segundo y tercer cuartil más o menos 1,50 veces la distancia intercuartílica (Q3-Q1), valores que determinan las patillas del diagrama. Los datos por fuera de este rango pueden entenderse como valores extremos que se alejan de la tendencia general de los registros. La posible anomalía de los valores extremos fue luego evaluada mediante la prueba no paramétrica de Walsh.

De la Figura 175 a la Figura 182 se presentan los boxplot de las series de la estación Aeropuerto Perales y de la Figura 183 a la Figura 186 se presentan los boxplot de las series de la estación Chicoral.

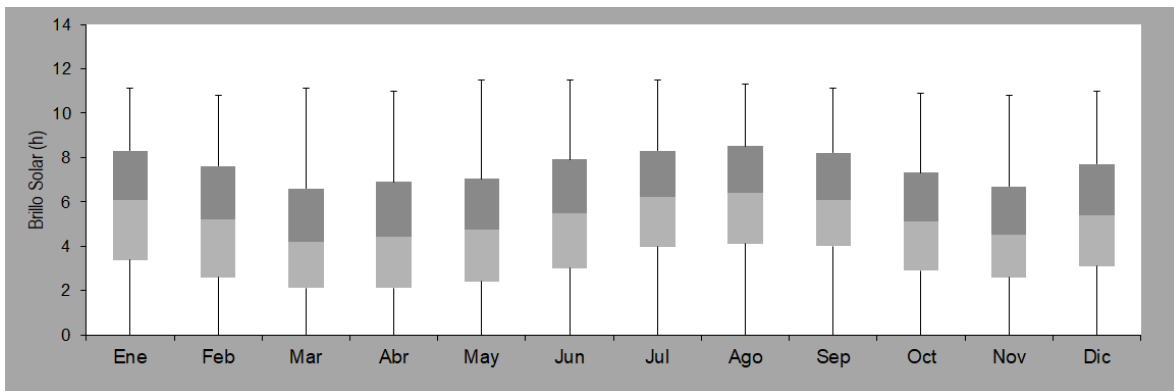


Figura 176. Boxplot Brillo Solar - Estación Aeropuerto Perales

Fuente: Elaboración propia.

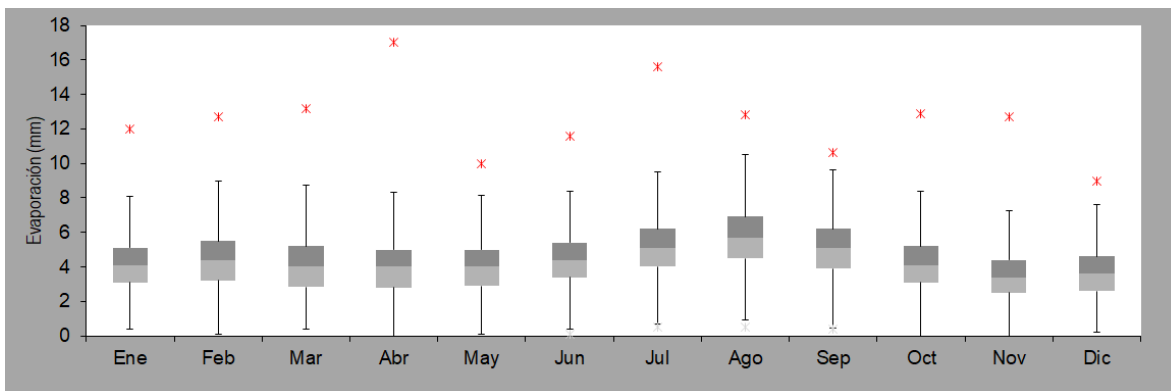


Figura 177. Boxplot Evaporación - Estación Aeropuerto Perales
Fuente: Elaboración propia.

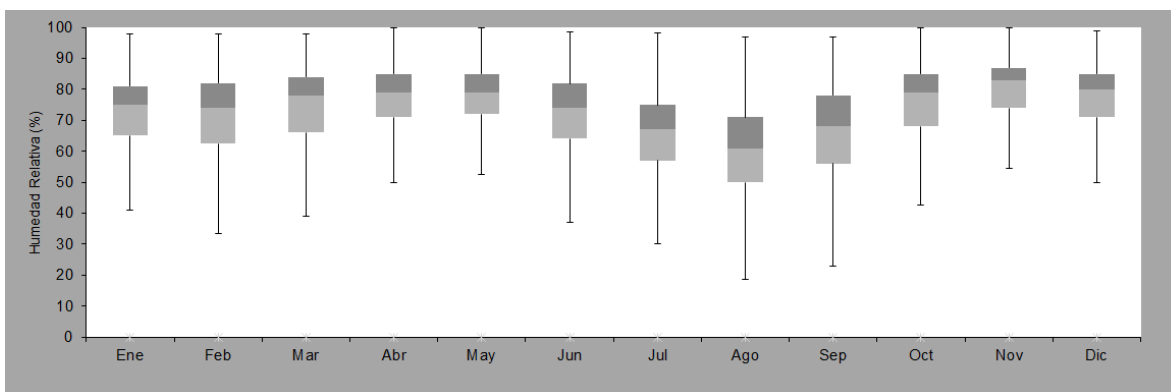


Figura 178. Boxplot Humedad Relativa - Estación Aeropuerto Perales
Fuente: Elaboración propia.

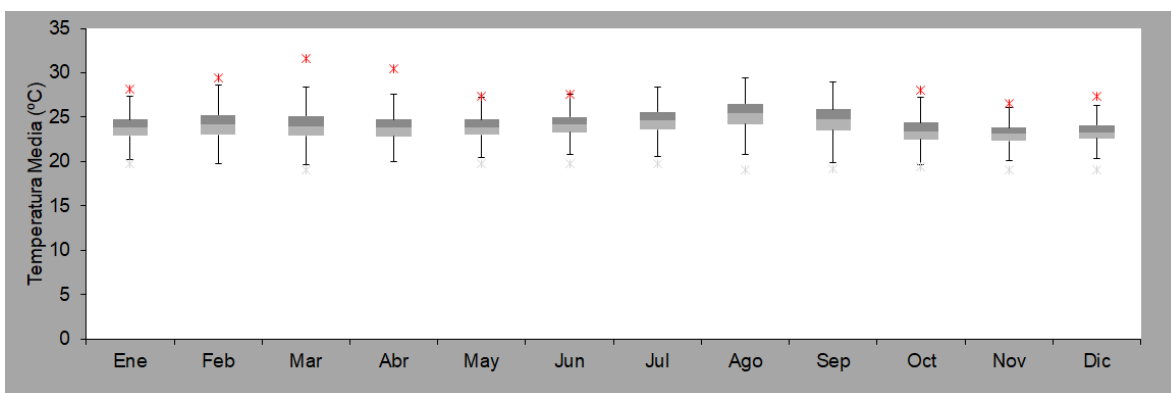


Figura 179. Boxplot Temperatura Media - Estación Aeropuerto Perales
Fuente: Elaboración propia.

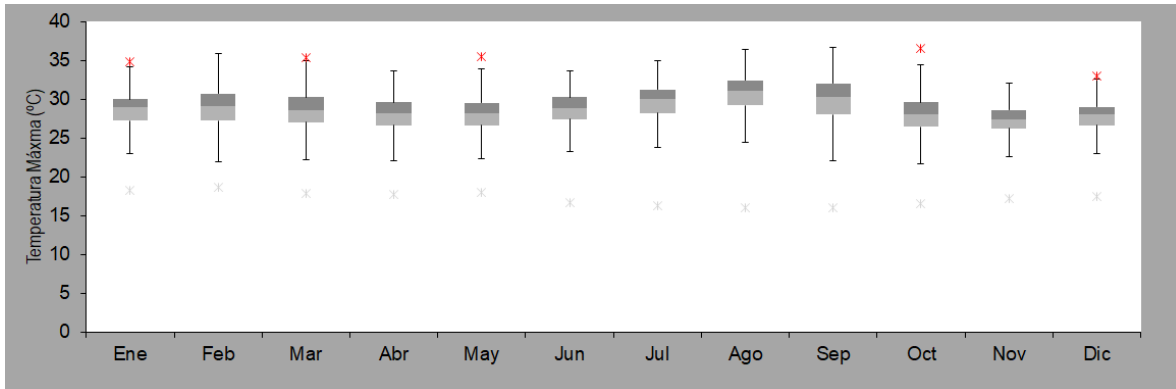


Figura 180. Boxplot Temperatura Máxima - Estación Aeropuerto Perales
Fuente: Elaboración propia.

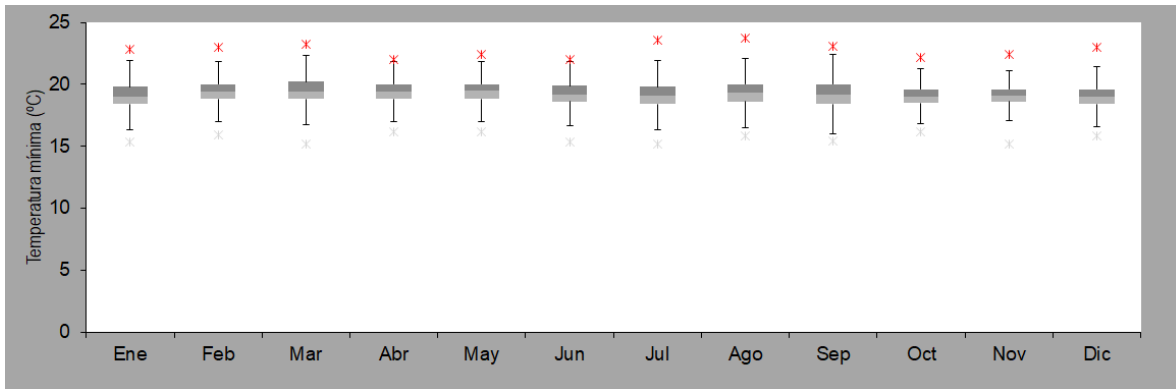


Figura 181. Boxplot Temperatura Mínima - Estación Aeropuerto Perales
Fuente: Elaboración propia.

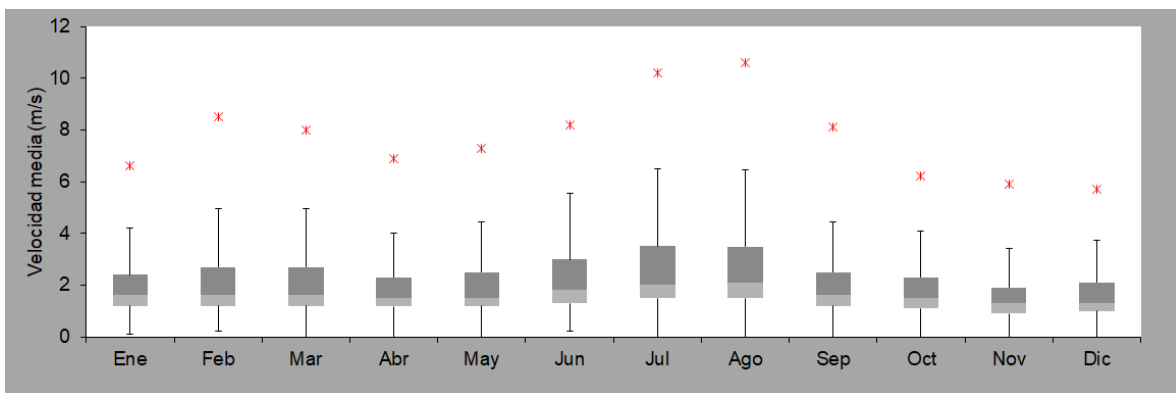


Figura 182. Boxplot Velocidad Media del Viento - Estación Aeropuerto Perales
Fuente: Elaboración propia.

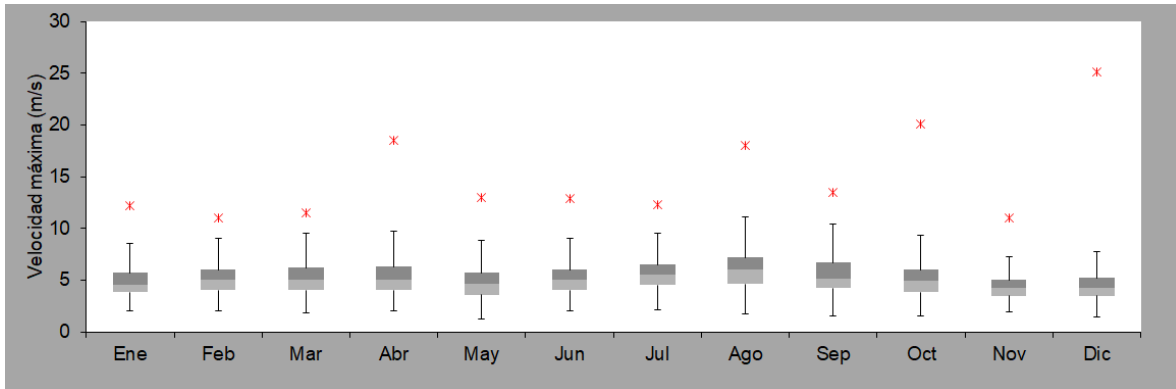


Figura 183. Boxplot Velocidad Máxima del Viento - Estación Aeropuerto Perales
Fuente: Elaboración propia.

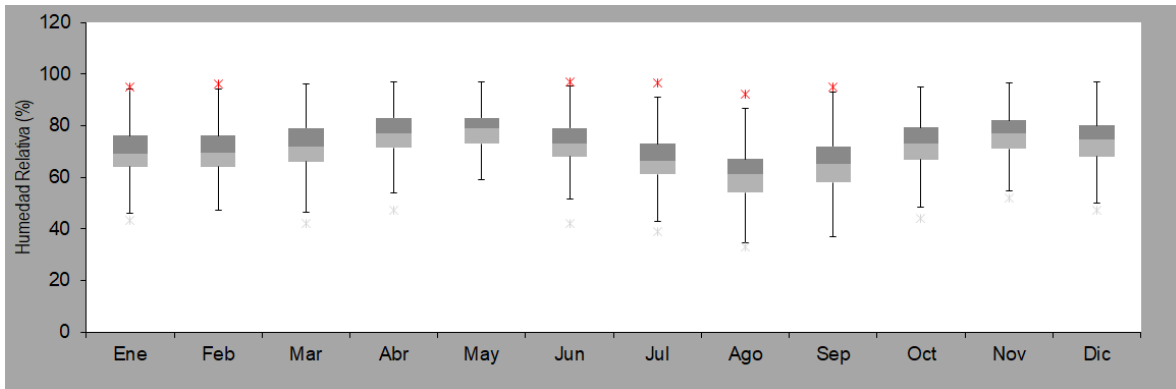


Figura 184. Boxplot Humedad Relativa - Estación Chicoral
Fuente: Elaboración propia.

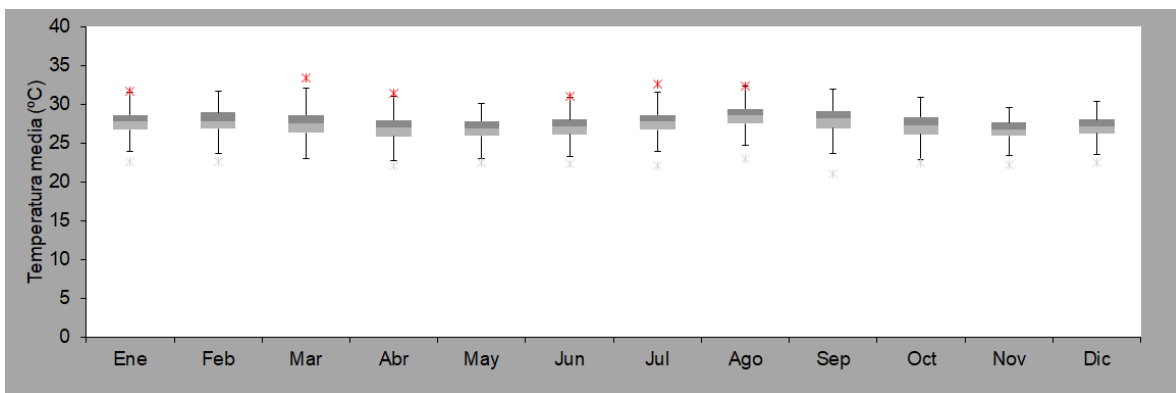


Figura 185. Boxplot Temperatura Media - Estación Chicoral
Fuente: Elaboración propia.

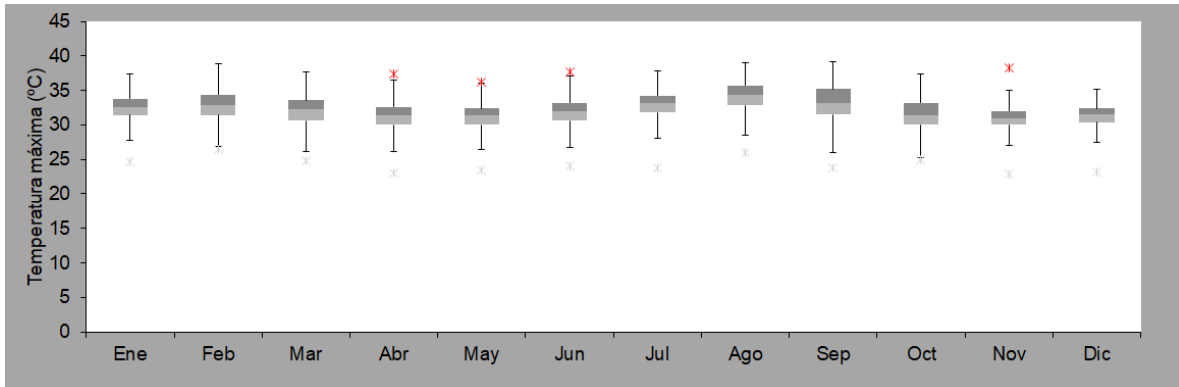


Figura 186. Boxplot Temperatura Máxima - Estación Chicoral
Fuente: Elaboración propia.

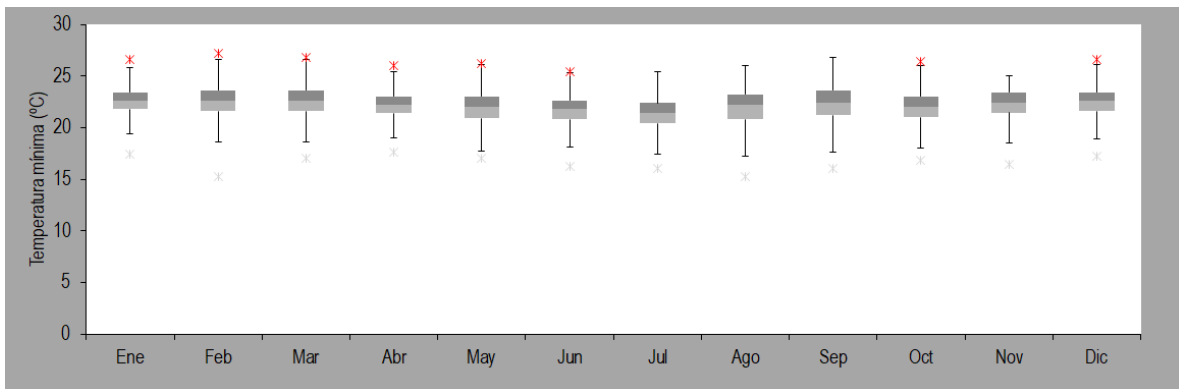


Figura 187. Boxplot Temperatura Mínima - Estación Chicoral
Fuente: Elaboración propia.

5.1.9.1.1.2. Test de Walsh

Dentro del análisis exploratorio se pueden encontrar datos considerados como extremos anómalos, los cuales son definidos como outliers. Para determinar si estos datos son efectivamente consecuencia de errores en el proceso de medición, registros y/o manipulación de la información, estos pueden ser evaluados mediante el test de Walsh. Ésta consiste en una prueba no paramétrica desarrollada por Walsh para detectar datos anómalos (outliers) en un conjunto de datos. Este test requiere una muestra con $n > 220$ para obtener un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$, $n > 60$ para un nivel de significancia de $\alpha = 0,10$.

Para la serie X_1, X_2, \dots, X_n que representa el conjunto de datos ordenados n ascendentemente, se identifican los números r de posibles outliers.

$$c = \text{ceiling}(\sqrt{2n}), k = r + c, b^2 = \frac{1}{\alpha}, a = \frac{1 + b\sqrt{(c - b^2)/(c - 1)}}{c - b^2 - 1}$$

Donde ceiling representa el número entero superior más próximo.

1. Los r valores más pequeños son outliers con un nivel de significancia α siempre y cuando se cumpla que

$$X_r - (1 + a)X_{r+1} + aX_k < 0$$

2. Los r valores más grandes son outliers con el nivel de significancia α siempre y cuando se cumpla que

$$X_{n+1-r} - (1 + a)X_{n-r} + aX_{n+1-k} > 0$$

Los datos detectados como anómalos en la aplicación de cada una de las técnicas utilizadas fueron definidos como posiblemente erróneos y fueron contrastados con los registros históricos de años clasificados como Niño y Niña de acuerdo con el índice ONI (Oceanic Niño Index). Si el valor no se encuentra asociado a ningún tipo de evento macroclimático fue removido de las series.

De la Figura 187 a la Figura 196 se presentan las gráficas de las series diarias de los parámetros climatológicos de las estaciones Aeropuerto Perales y Chicoral.

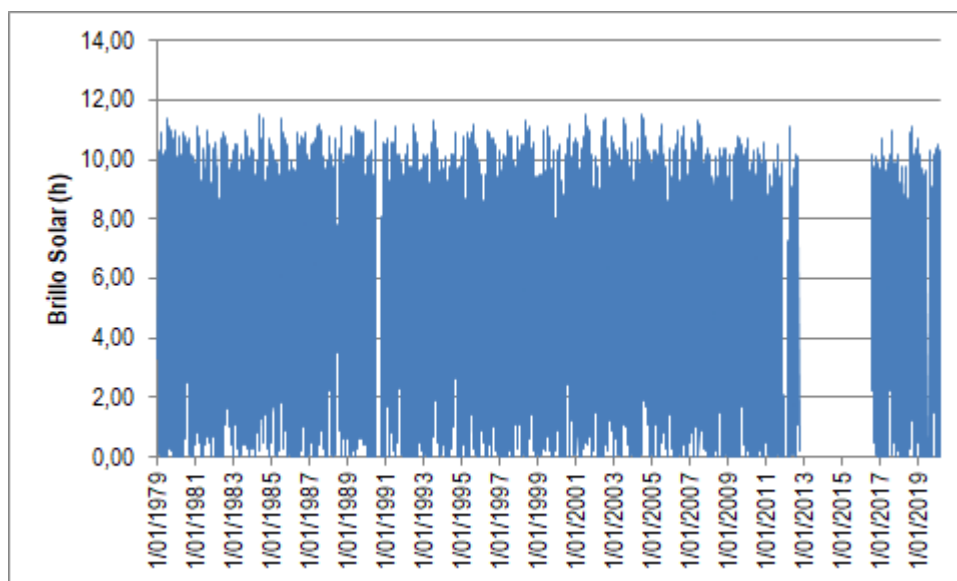


Figura 188. Análisis de datos dudosos - Estación Aeropuerto Perales - Brillo solar
Fuente: Elaboración propia.

El test de Walsh para los registros diarios de brillo solar en la estación Aeropuerto Perales no arrojó valores anómalos, por lo que se trabajará la serie de datos diarios completa.

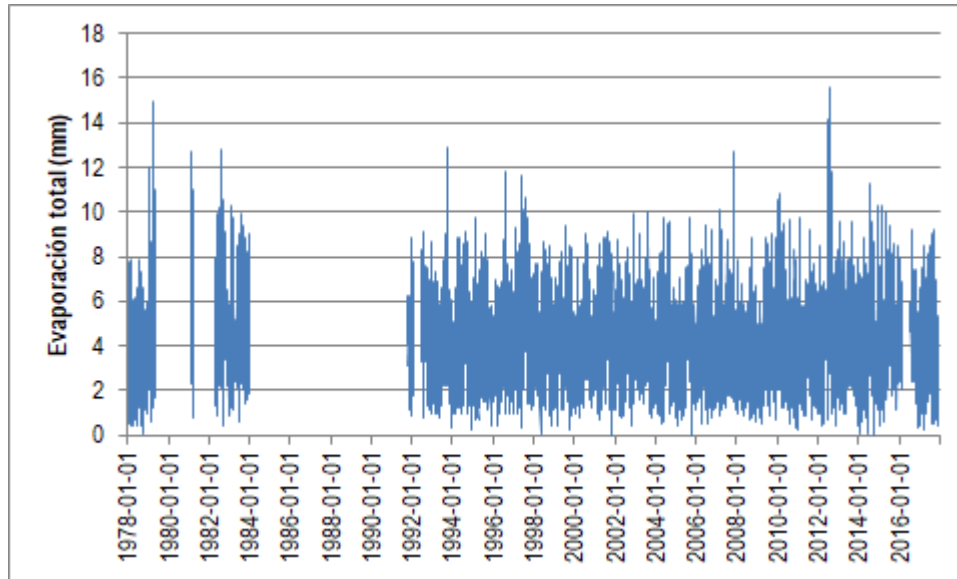


Figura 189. Análisis de datos dudosos - Estación Aeropuerto Perales - Evaporación
Fuente: Elaboración propia.

El test de Walsh para los registros diarios de evaporación en la estación aeropuerto perales registró cuatro valores anómalos que serán eliminados de las listas. Estos valores se presentan en la Tabla 150.

Tabla 150. Dato anómalos Evaporación - Apto Perales

Valor	Fecha
14,20	10/7/2012
15,00	20/4/1979
15,60	20/7/2012
17,00	13/4/1979

Fuente: Elaboración propia.

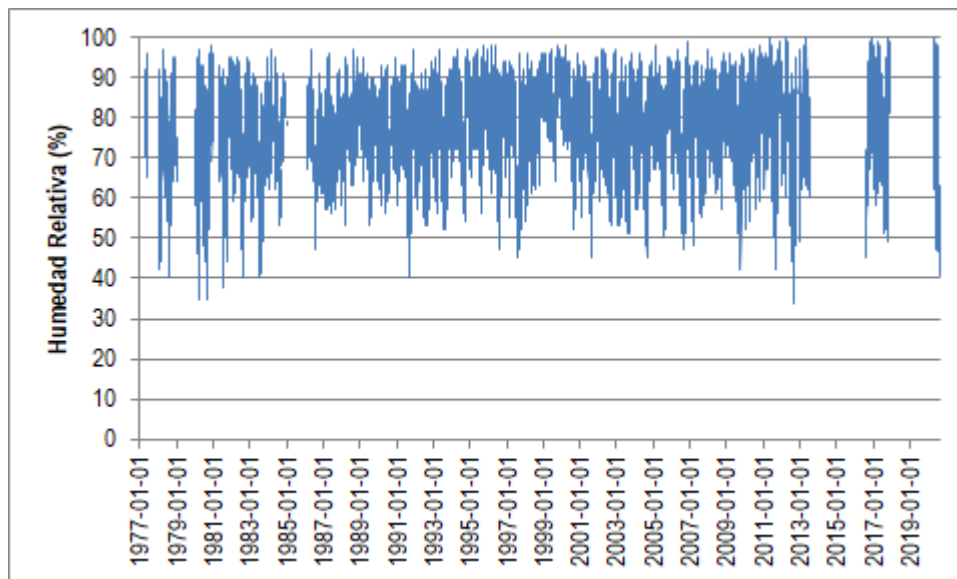


Figura 190. Análisis de datos dudosos - Estación Aeropuerto Perales - Humedad relativa
Fuente: Elaboración propia.

El test de Walsh para los registros diarios de humedad relativa en la estación aeropuerto perales no arrojó valores anómalos, por lo que se trabajará la serie de datos diarios completa.

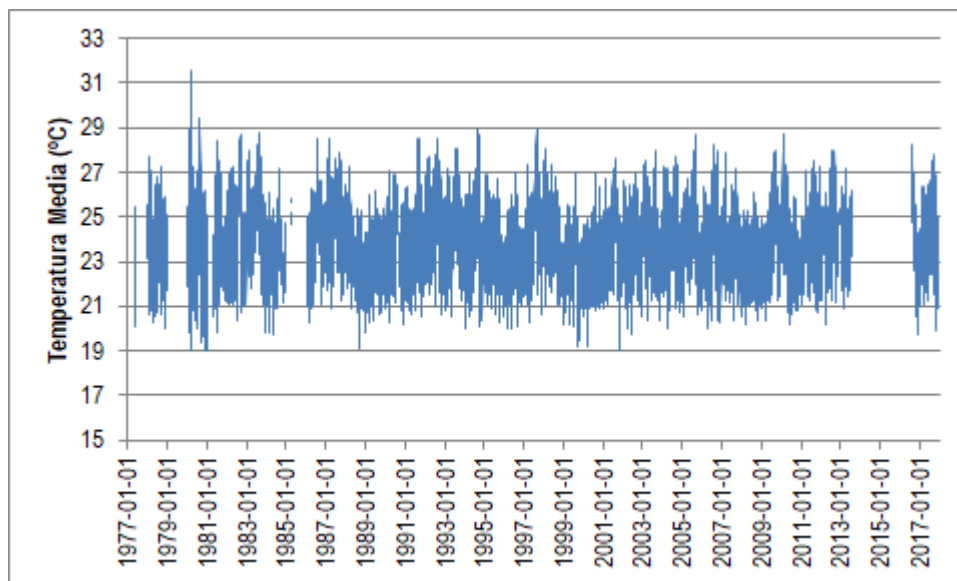


Figura 191. Análisis de datos dudosos - Estación Aeropuerto Perales - Temperatura media
Fuente: Elaboración propia.

El test de Walsh para los registros diarios de temperatura media en la estación aeropuerto perales registró tres valores anómalos que serán eliminados de las listas. Estos valores se presentan en la Tabla 151.

Tabla 151. Datos anómalos Temperatura media - Apto Perales

Valor	Fecha
30,6	11/3/1980
31,0	13/3/1980
31,6	9/3/1980

Fuente: Elaboración propia.

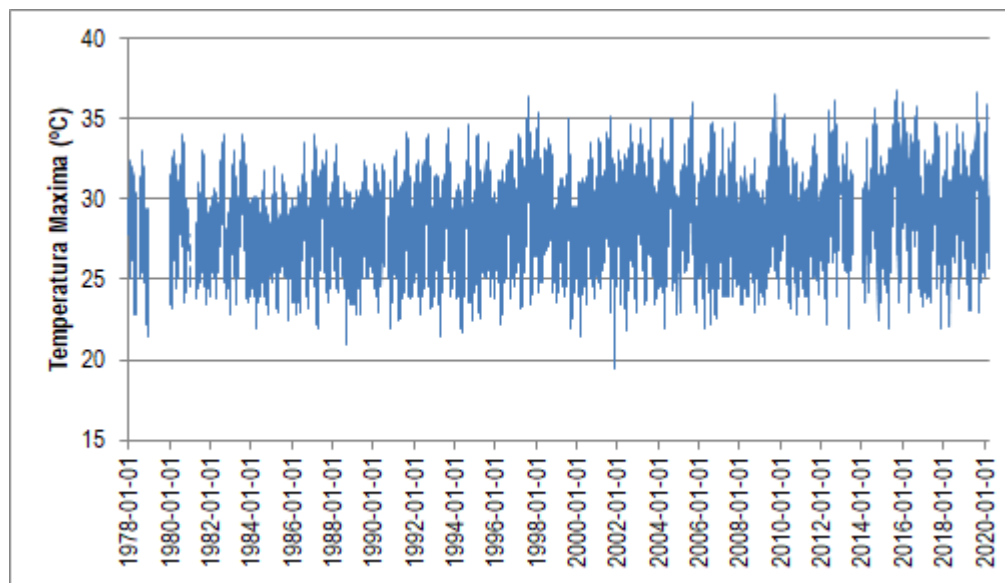


Figura 192. Análisis de datos dudosos - Estación Aeropuerto Perales -Temperatura máxima

Fuente: Elaboración propia.

El test de Walsh para los registros diarios de temperatura máxima en la estación aeropuerto perales registró dos valores anómalos, estos valores se presentan en la Tabla 152, sin embargo estos valores detectados como anómalos no serán eliminados por ser menores que los valores máximos de la serie de medios.

Tabla 152. Dato anómalos Temperatura máxima - Apto Perales

Valor	Fecha
23,2	20/2/1980
23,6	6/10/1980
23,7	6/5/1989

Fuente: Elaboración propia.

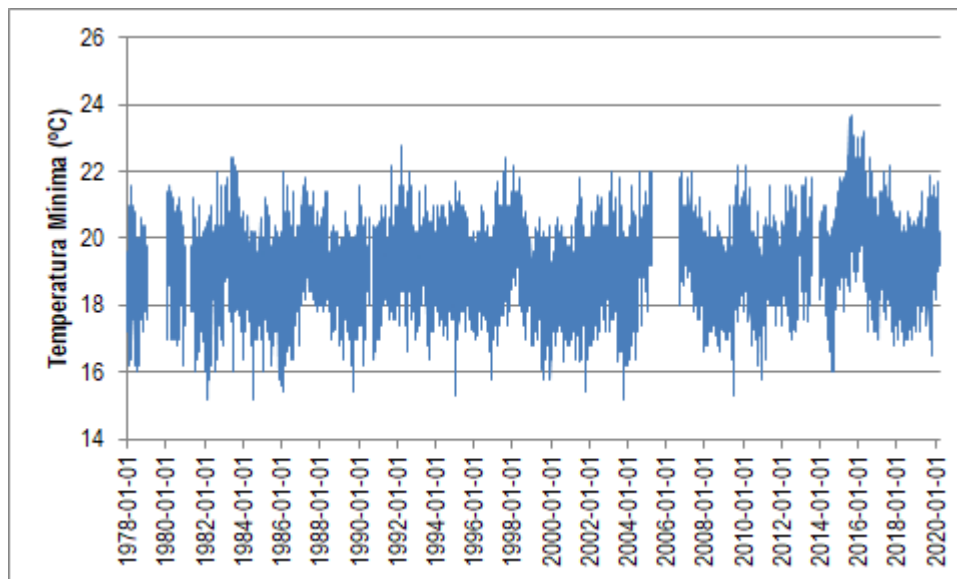


Figura 193. Análisis de datos dudosos - Estación Aeropuerto Perales -Temperatura mínima
Fuente: Elaboración propia.

El test de Walsh para los registros diarios de temperatura mínima en la estación aeropuerto perales registró tres valores anómalos, estos valores se presentan en la Tabla 153 estos valores se eliminarán de la serie diaria para la caracterización climatológica.

Tabla 153. Datos anómalos Temperatura mínima - Apto Perales

Valor	Fecha
23,2	27/3/2016
23,6	5/7/2015
23,7	24/8/2015

Fuente: Elaboración propia.

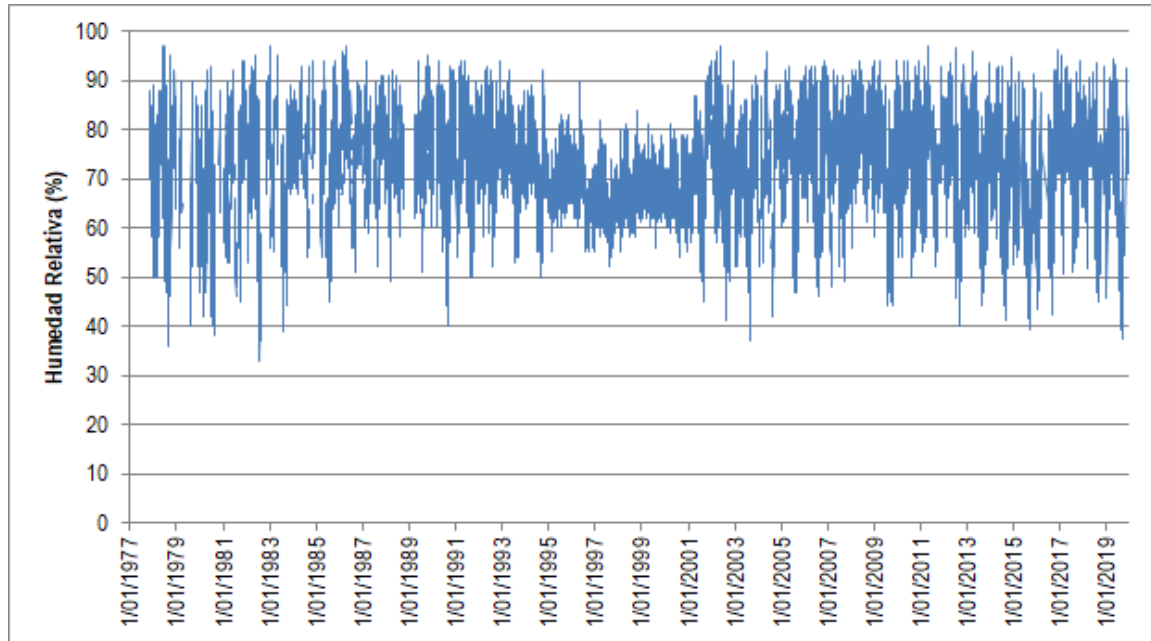


Figura 194. Análisis de datos dudosos - Estación Chicoral - Humedad relativa

Fuente: Elaboración propia.

El test de Walsh para los registros diarios de humedad relativa en la estación Chicoral no arrojó valores anómalos, por lo que se trabajará la serie de datos diarios completa.

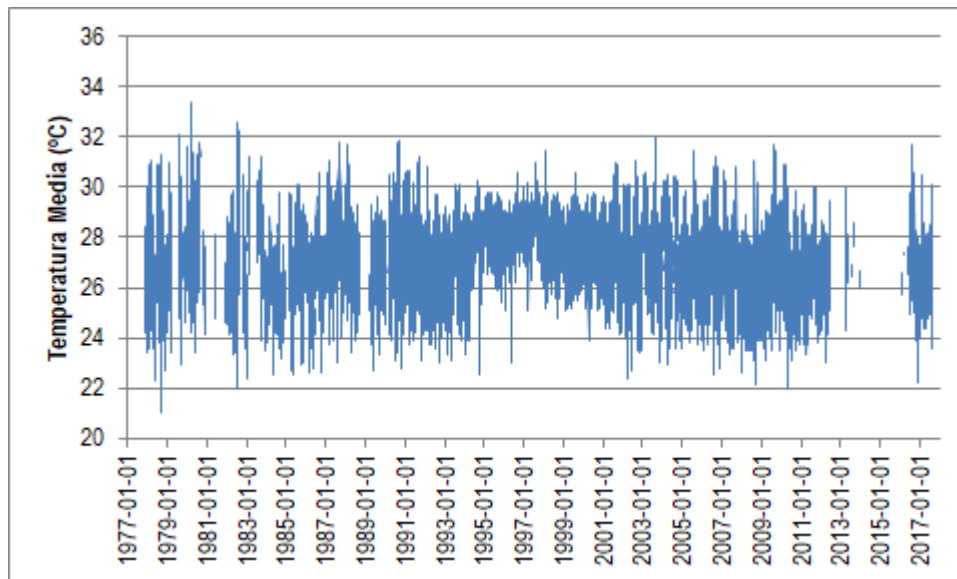


Figura 195. Análisis de datos dudosos - Estación Chicoral - Temperatura media

Fuente: Elaboración propia.

El test de Walsh para los registros diarios de temperatura media en la estación Chicoral arrojó un valor anómalo, concretamente 33,4 °C registrado el 13 de febrero de 1978 por lo que se eliminará el registro de la serie de datos diarios completa.

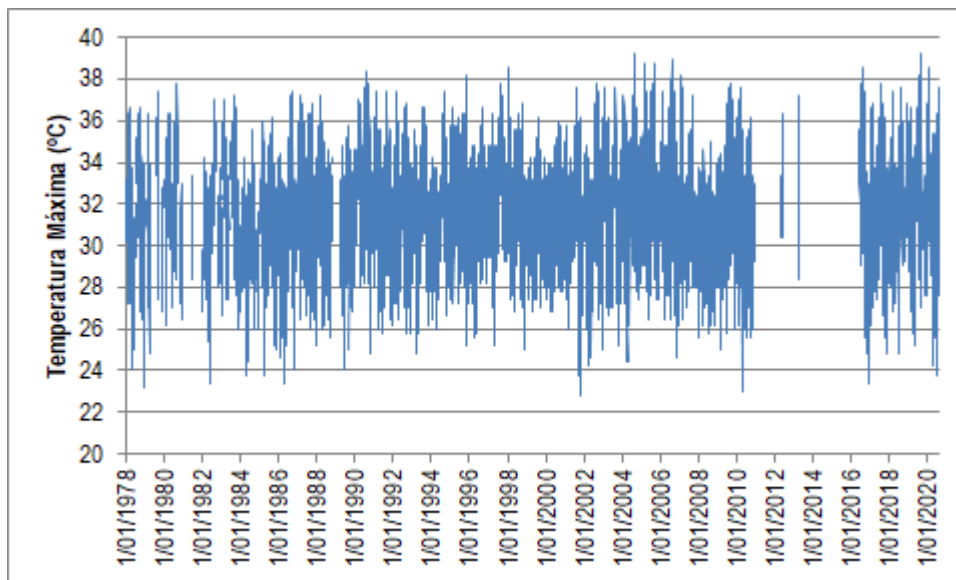


Figura 196. Análisis de datos dudosos - Estación Chicoral - Temperatura máxima
Fuente: Elaboración propia.

El test de Walsh para los registros diarios de temperatura máxima en la estación Chicoral no arrojó valores anómalos, por lo que se trabajará la serie de datos diarios completa.

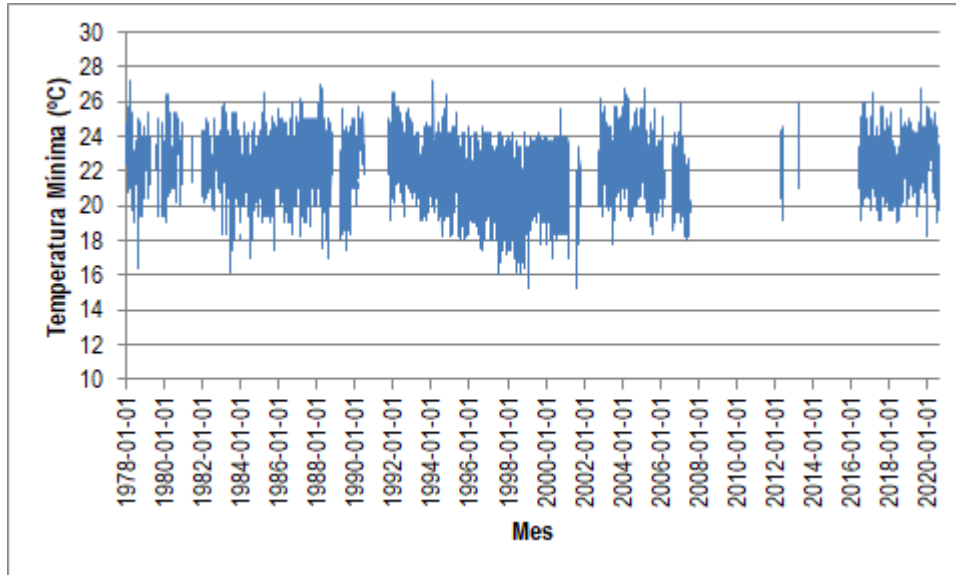


Figura 197. Análisis de datos dudosos - Estación Chicoral - Temperatura mínima
Fuente: Elaboración propia.

El test de Walsh para los registros diarios de temperatura mínima en la estación Chicoral no arrojó valores anómalos, por lo que se trabajará la serie de datos diarios completa.

5.1.9.1.2. Temperatura

La caracterización de temperatura media, mínima y máxima se realizó con los registros de las estaciones Aeropuerto Perales y Chicoral. La estación Aeropuerto Perales cuenta con un periodo de registro de 1977 a 2017 exceptuando los años 1979, 2014 y 2015, mientras que la estación Chicoral cuenta con registros de 1977 a 2017 exceptuando los años 2014 y 2015.

5.1.9.1.2.1. Temperatura media

En la estación Aeropuerto Perales, la temperatura media registrada es de 24,01 °C registrando la máxima temperatura en el mes de agosto y la temperatura más baja en el mes de noviembre. En la Figura 197 se presenta el valor de temperatura media mensual para la estación Aeropuerto Perales.

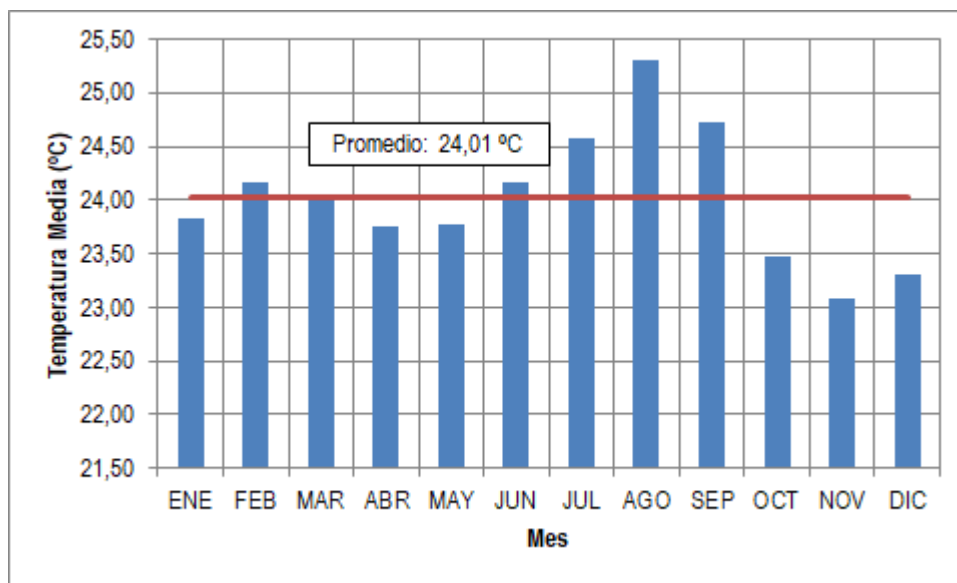


Figura 198. Variabilidad de la temperatura media mensual multianual - Estación Apto Perales
Fuente: Elaboración propia.

En la estación Chicoral, la temperatura media registrada es de 27,32 °C registrando la máxima temperatura en el mes de agosto y la temperatura más baja en el mes de noviembre. En la Figura 198 se presenta el valor de temperatura media mensual para la estación Aeropuerto Perales.

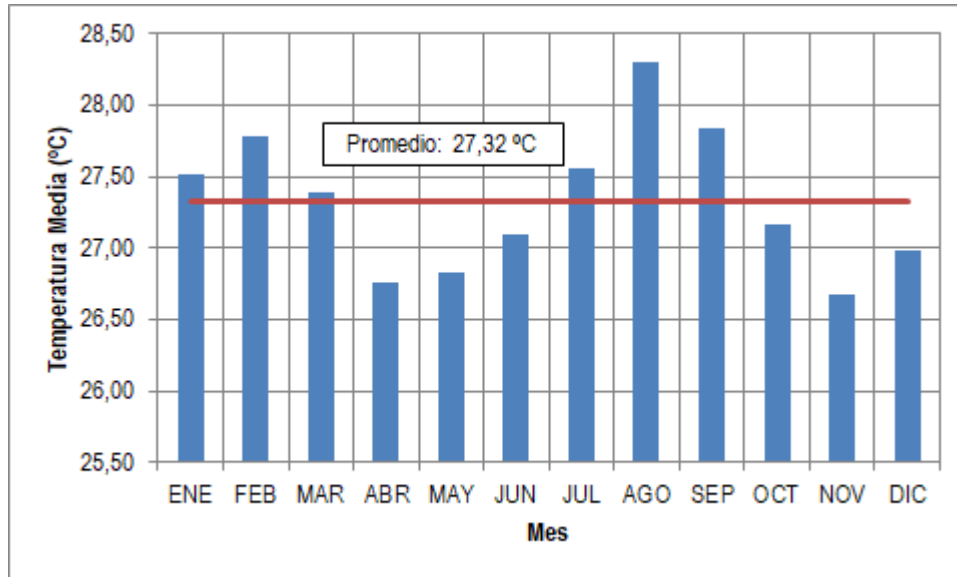


Figura 199. Variabilidad de la temperatura media mensual multianual - Estación Chicoral
Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento de la temperatura media registrado en las dos estaciones es similar, ya que presentan un comportamiento bimodal con temperaturas superiores al promedio en los meses de enero a marzo y de julio a septiembre (junio a septiembre en el caso de Apto Perales), y temperaturas promedio más bajas el resto del año.

Tabla 154. Temperatura media mensual multianual. Periodo 1977 - 2017.

Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM
Apto Perales	23,84	24,16	24,03	23,76	23,77	24,16	24,57	25,30	24,73	23,47	23,09	23,31	24,01
Chicoral	27,52	27,78	27,39	26,76	26,83	27,09	27,56	28,30	27,83	27,16	26,68	26,98	27,32

Fuente: Elaboración propia.

5.1.9.1.2.2. Temperatura mínima

Como se observa en las Figura 199, Figura 200 y en y en la Tabla 155, las temperaturas mínimas más bajas se presentan en el mes de julio mientras que las temperaturas mínimas más altas se registran en el mes de febrero. La temperatura mínima más alta se registra en la estación Chicoral con 19,92 °C (Elevación de instalación 475 msnm) y la temperatura mínima más baja se registra en la estación Aeropuerto Perales con 17,16 °C.

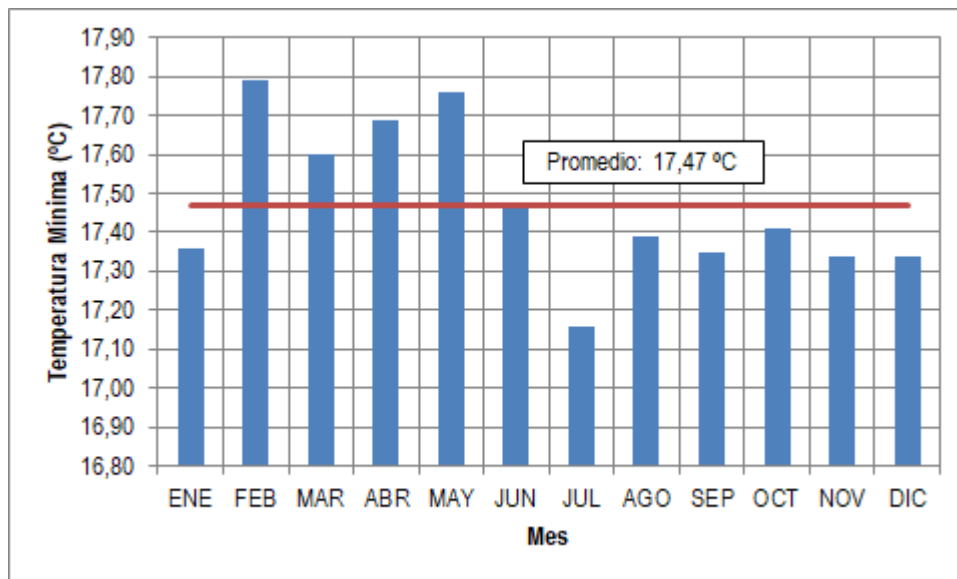


Figura 200. Variabilidad de la temperatura mínima mensual multianual - Estación Apto Perales
Fuente: Elaboración propia.

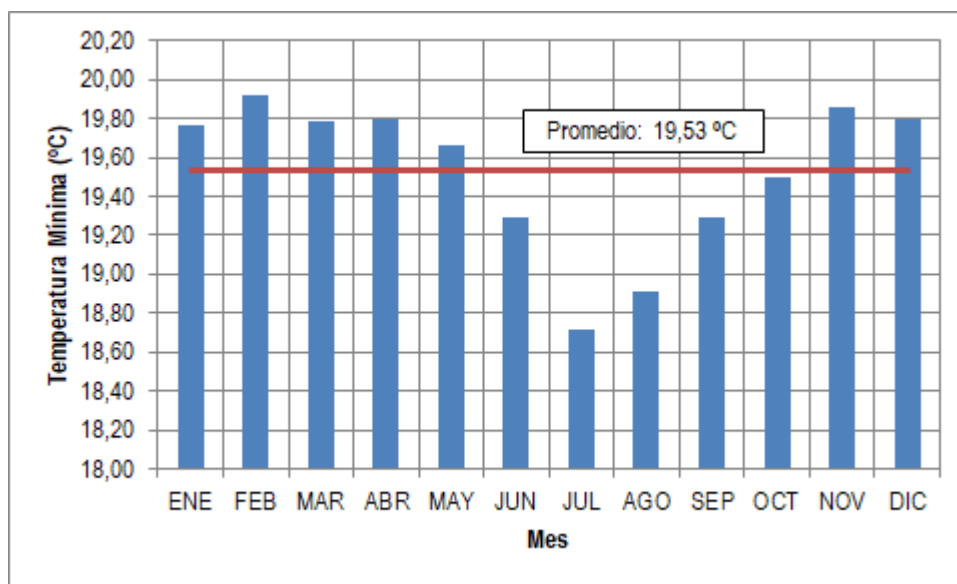


Figura 201. Variabilidad de la temperatura mínima mensual multianual - Estación Chicoral
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 155. Temperatura mínima mensual multianual. Periodo 1977 - 2020.

Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM
Apto Perales	17,36	17,79	17,60	17,69	17,76	17,46	17,16	17,39	17,35	17,41	17,34	17,34	17,47
Chicoral	19,77	19,92	19,79	19,80	19,66	19,29	18,72	18,91	19,29	19,50	19,86	19,80	19,53

Fuente: Elaboración propia.

5.1.9.1.2.3. Temperatura máxima

Las temperaturas máximas más altas se presentan en los meses de agosto y septiembre y las temperaturas máximas más bajas se registran en los meses de noviembre y diciembre. La temperatura más alta se registra en la estación Chicoral con 36,83 °C y la temperatura máxima más baja se registra en la estación Apto Perales con 30,26 °C. En la Figura 201 y en la Figura 202 se presenta el valor de temperatura máxima mensual para las estaciones analizadas.

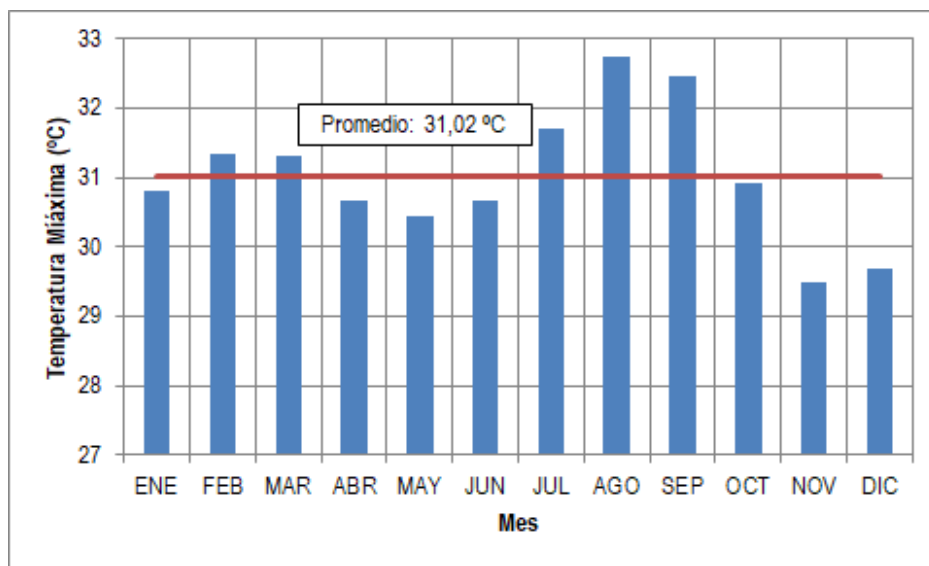


Figura 202. Variabilidad de la temperatura máxima mensual multianual - Estación Apto Perales
Fuente: Elaboración propia.

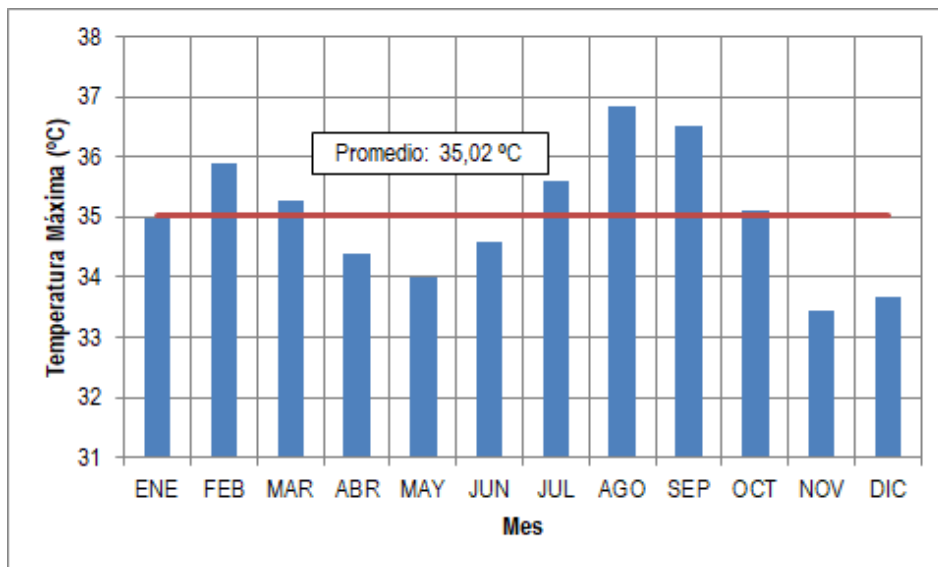


Figura 203. Variabilidad de la temperatura máxima mensual multianual - Estación Chicoral
Fuente: Elaboración propia.

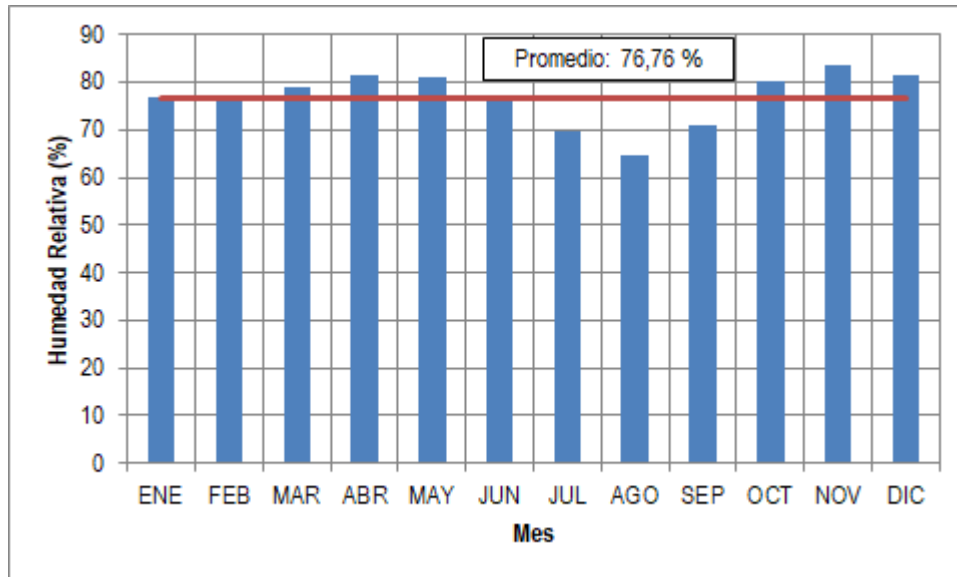
Tabla 10. Temperatura máxima mensual multianual. Periodo 1977 - 2020

Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM
Apto Perales	30,81	31,359	31,32	30,676	30,45	30,66	31,70	32,74	32,47	30,92	29,50	29,67	31,02
Chicoral	34,98	35,89	35,26	34,39	33,99	34,59	35,59	36,83	36,52	35,12	33,46	33,68	35,02

Fuente: Elaboración propia.

5.1.9.1.3. Humedad relativa

La humedad relativa media mensual multianual, de acuerdo con la información disponible en la estación Aeropuerto Perales es de 76,76% en promedio. En la Figura 203 se presenta la variación de la humedad relativa mensual de la estación, en donde se observa que en el periodo de junio a septiembre los valores de humedad relativa registrados son inferiores al valor promedio y superiores el resto del año (Ver Tabla 157).



.Figura 30. Variabilidad de la humedad relativa media mensual multianual. Periodo 1977 - 2020, Apto Perales
Fuente: Elaboración propia.

La humedad relativa media mensual multianual, de acuerdo con la información disponible en las estaciones Chicoral es del 71,63% en promedio. En la Figura 204 se presenta la variación de la humedad relativa mensual de la estación, en donde se observa que para esta estación, en los periodos de julio a septiembre y de enero a marzo los valores de humedad relativa registrados son inferiores al valor promedio y superiores en el resto del año. (Véase Tabla 157).

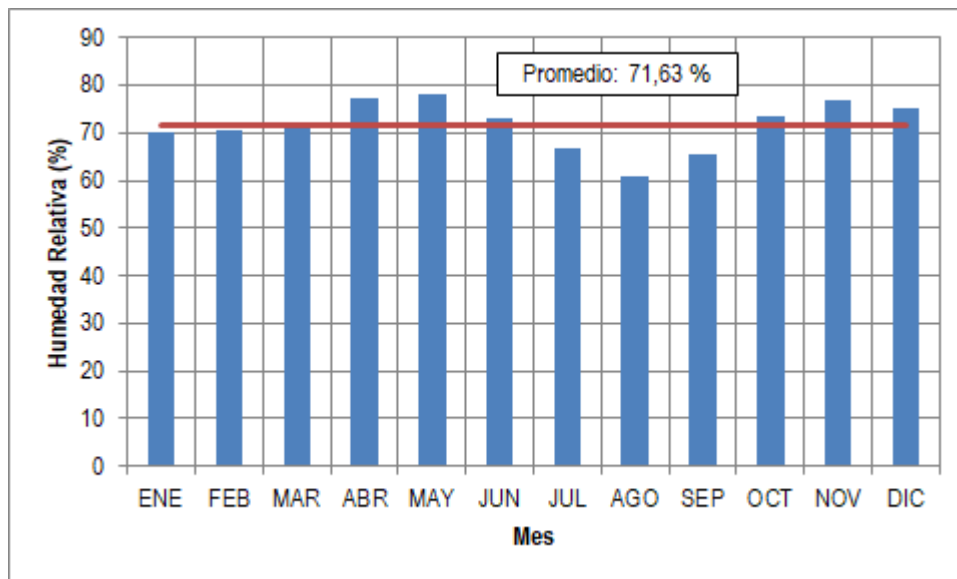


Figura 205. Variabilidad de la humedad relativa media mensual multianual. Periodo 1978 - 2020, Chicoral.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 157. Humedad relativa media mensual multianual. Periodo 1977 - 2020.

Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM
Apto Perales	76,65	76,31	78,96	81,29	80,99	76,06	69,72	64,51	71,14	80,25	83,76	81,58	76,77
Chicoral	70,00	70,69	72,19	77,11	77,92	73,10	66,94	60,98	65,49	73,39	76,81	74,94	71,63

Fuente: Elaboración propia.

5.1.9.1.4. Brillo Solar

Para caracterizar el brillo solar, se cuenta con información desde el año 1979 hasta el año 2020 en la estación Aeropuerto Perales. De acuerdo con los datos, el valor promedio de brillo solar mensual multianual es de 160,4 horas para un total de 1925,41 horas al año.

Como se muestra en la Figura 205, los valores totales mensuales superiores al valor promedio se presentan en los meses de junio a septiembre, diciembre y enero, en los meses restantes los valores son inferiores al promedio como se presenta en la Tabla 158.

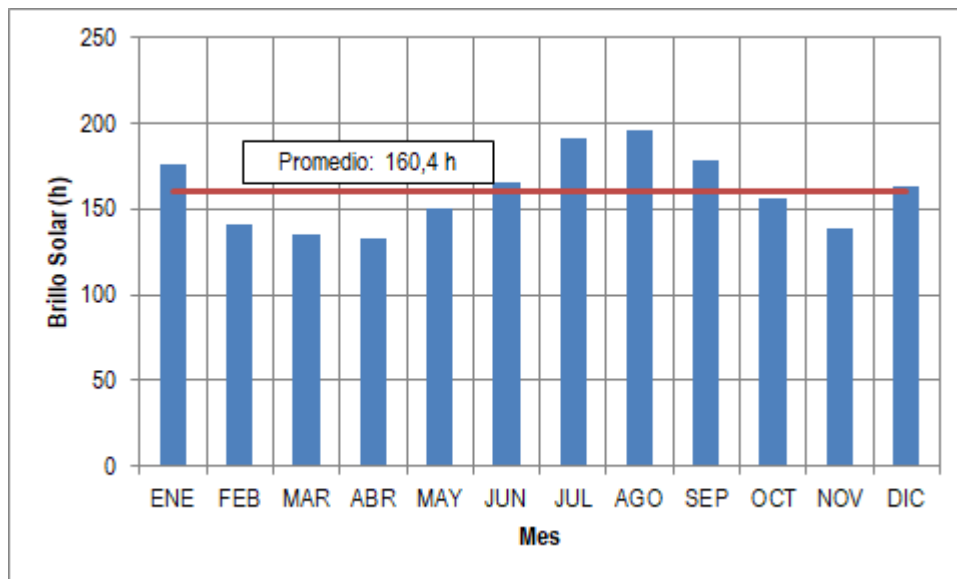


Figura 206. Variabilidad del brillo solar medio mensual multianual. Periodo 1979 - 2020.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 158. Brillo solar medio mensual medio mensual multianual. Periodo 1979 - 2020.

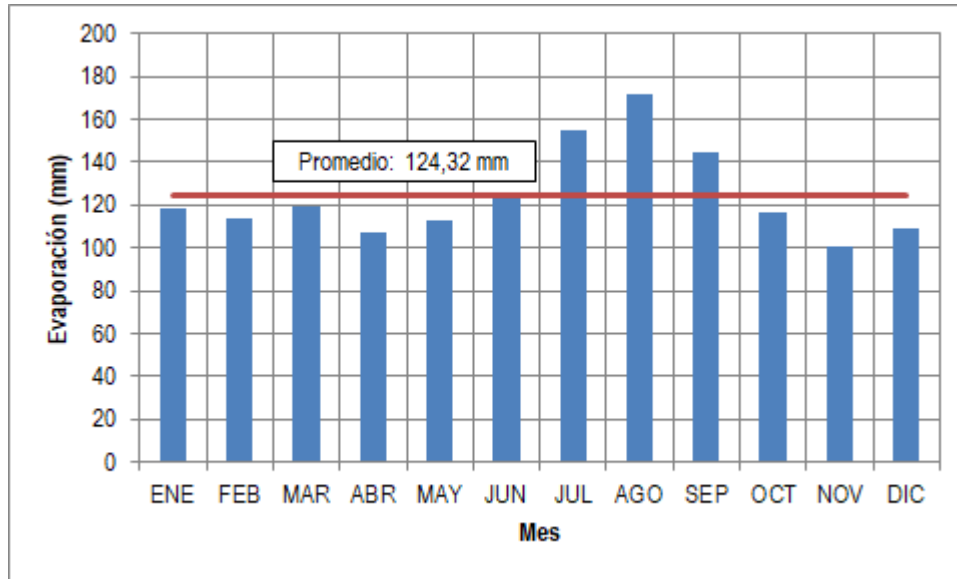
Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Apto Perales	176,14	140,81	135,42	132,93	150,16	165,55	191,34	196,33	178,25	156,10	138,97	163,41	1925,41

Fuente: Elaboración propia.

5.1.9.1.5. Evaporación

Para caracterizar la evaporación, se cuenta con información en la estación Aeropuerto Perales para el periodo 1978 - 2017. De acuerdo con los registros el valor promedio de evaporación mensual es de 124,32 mm para un total de 1491,9 mm al año.

Como se muestra en la Figura 206, los valores mensuales que superan la media se presentan en los meses de enero a abril. El valor máximo se registra en marzo (193 mm en promedio) y el valor mínimo en noviembre (117 mm en promedio) como se presenta en la Tabla 159.



.Figura 33. Variabilidad de la evaporación media mensual multianual. Periodo 1978 - 2017
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 159. Evaporación media mensual multianual. Periodo 1978 - 2017.

Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Apto Perales	118,3	113,8	119,5	107,3	113,1	123,9	154,4	171,7	144,5	116,3	100,2	109,0	1491,9

Fuente: Elaboración propia.

5.1.9.1.6. Presión atmosférica

Debido a que no se tienen registros de este parámetro en las estaciones cercanas a la zona del proyecto, la presión atmosférica se estimó a partir de la relación que existe entre la temperatura media y la elevación en el sitio de las estaciones Aeropuerto Perales y Chicoral utilizando la Ecuación 13.

$$p = p_o \times e^{\left(\frac{-g \times z}{R_{da} \times T_m}\right)}$$

Ecuación 47. Presión atmosférica en el sitio de interés

Donde:

p es la presión atmosférica en el sitio de interés, mm Hg
 p_o es la presión atmosférica al nivel del mar, 760 mm Hg (1013 mbar)
 g es la aceleración de la gravedad, 9,81m/s²
 z es la elevación de instalación de la estación (msnm)
 R_{da} es la constante de gas del aire seco, 289 J/Kg-K
 T_m es la temperatura media en el sitio del proyecto, K

Los resultados de presión atmosférica estimada se presentan en la Tabla 160.

Tabla 160. Presión atmosférica estimada para las estaciones climatológicas.

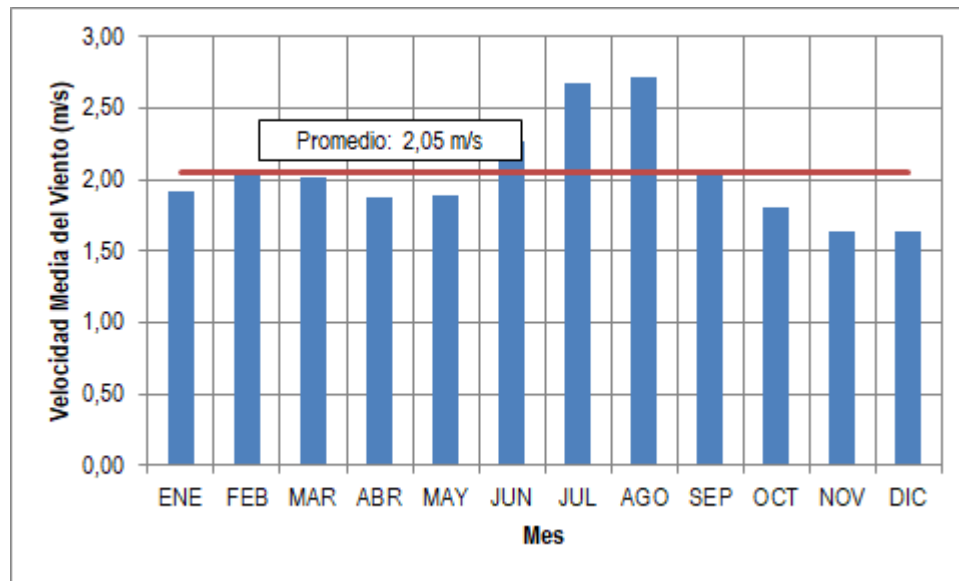
Estación	Temperatura Media (°C)	Temperatura Media (K)	Elevación (msnm)	Presión Atmosférica (mm Hg)
Aeropuerto Perales	24,01	297,01	928	683,6
Chicoral	27,32	300,32	475	720,3

Fuente: Elaboración Propia.

5.1.9.1.7. Viento

La velocidad del viento media mensual multianual, de acuerdo con la información disponible en la estación Aeropuerto Perales es de 2,04 m/s.

En la Figura 207 se presenta la variación de la velocidad del viento a nivel mensual, en donde se observa que la velocidad máxima se presenta en el mes de agosto y la velocidad mínima se presenta en el mes de noviembre. Entre el mes de junio a agosto la velocidad media del viento es superior a los 2,04 m/s. (Véase Tabla 161).



.Figura 34. Variabilidad de velocidad media mensual multianual. Periodo 1977 - 2017

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 161. Velocidad media mensual multianual. Periodo 1977 - 2017

Estación	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROM
Apto Perales	1,92	2,07	2,01	1,87	1,89	2,27	2,68	2,72	2,06	1,81	1,63	1,64	2,05

Fuente: Elaboración propia.

Para la caracterización de velocidad y dirección de los vientos se elaboraron las tablas de frecuencia de velocidad de acuerdo con la escala de Beaufort (Tabla 162) y de dirección (Tabla 163) a partir de registros horarios de la estación Aeropuerto Perales, para el periodo 2002-2019.

Tabla 162. Frecuencia de velocidad media del viento en la estación Aeropuerto Perales

Valor en la Escala de Beaufort	Denominación	Límite Superior	Datos diurnos		Datos nocturnos	
		m/s	F. Observada	F. Relativa	F. Observada	F. Relativa
0	Calma	0,2	255	0,5%	619	1,3%
1	Ventolina	1,5	31845	62,7%	35264	73,8%
2	Ligero	3,3	18126	35,7%	11332	23,7%
3	Suave	5,4	557	1,1%	516	1,1%
4	Moderado	7,9	22	0,0%	24	0,1%
5	Fresco	10,7	3	0,0%	6	0,0%
6	Fuerte	13,8	2	0,0%	0	0,0%
7	Muy fuerte	17,1	0	0,0%	0	0,0%
8	Ventarrón	20,7	2	0,0%	1	0,0%
9	Ventarrón Fuerte	24,4	0	0,0%	0	0,0%
10	Temporal	28,4	1	0,0%	1	0,0%
11	Borrasca	32,6	1	0,0%	0	0,0%
12	Huracán	100	0	0,0%	0	0,0%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 163. Frecuencia de dirección del viento en la estación Aeropuerto Perales

Dirección	Datos diurnos		Datos nocturnos	
	F. Observada	F. Relativa	F. Observada	F. Relativa
E	8307	16,3%	4404	9,2%
NE	4035	7,9%	3393	7,1%
N	6205	12,2%	8744	18,3%
NW	2670	5,3%	5537	11,6%
W	5337	10,5%	12612	26,4%
SW	4152	8,2%	4611	9,7%
S	9729	19,1%	3941	8,3%
SE	10379	20,4%	4521	9,5%
Total	50814	100,0%	47763	100,0%

Fuente: Elaboración propia.

Con esta información se elaboraron las rosas de vientos diurnas (entre las 6 a.m. y las 5 p.m.) y nocturnas (entre las 6 p.m. y las 5 a.m.) de la estación Aeropuerto Perales para el periodo de información horaria disponible (2002-2019), como se presenta a continuación en la Figura 208 y Figura 209.

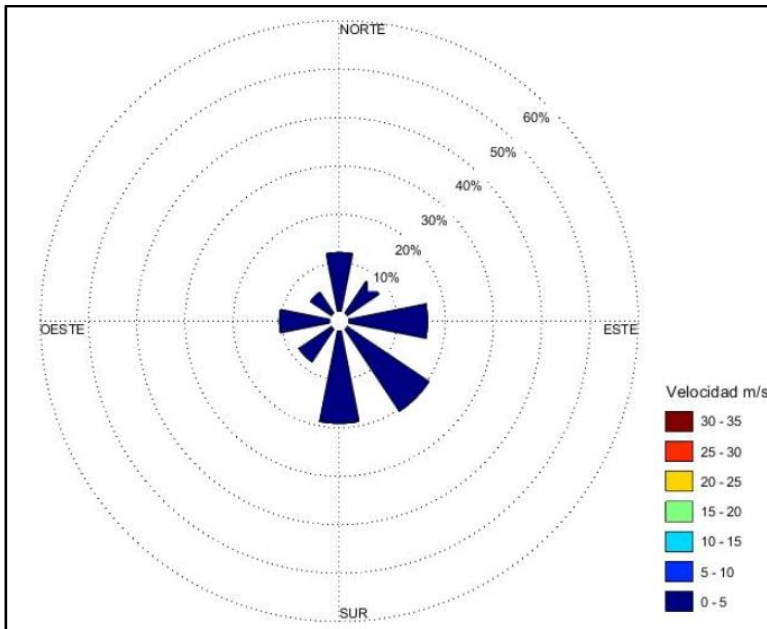


Figura 209. Rosa de vientos diurna, estación Aeropuerto Perales
Fuente: Elaboración propia.

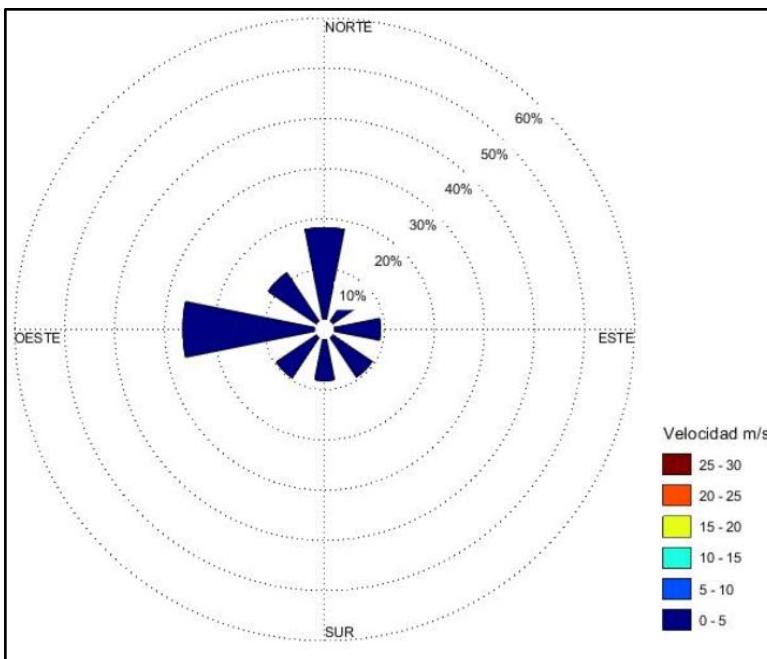


Figura 210. Rosa de vientos nocturna, estación Aeropuerto Perales
Fuente: Elaboración propia.

De lo anterior se observa que los vientos predominantes provienen del sur y sureste durante el día con frecuencias del 19,1% y 20,4% respectivamente y del oeste y el norte durante la noche con frecuencias de 26,4% y 18,3% respectivamente.

Las velocidades medias registradas son en su mayoría menores a 5,4 m/s y las clasificaciones de los vientos que más se presentan son ventolina (0,2-1,5 m/s) y viento ligero (1,5-3,3 m/s) tanto en el día como en la noche.

En el mes de octubre de 2020 se realizaron recorridos en el área de influencia para la identificación de fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos.

5.1.9.2. Fuentes de emisión

Un inventario de emisiones es la base de datos de las fuentes de emisión objeto de estudio, las cuales tienen asociadas diferentes variables y características que las clasifican. Esta herramienta permite identificar, georreferenciar, clasificar, consolidar, cuantificar y caracterizar las emisiones atmosféricas existentes en un área de estudio para la toma de decisiones en procesos de regulación, modelación o gestión de calidad del aire.

5.1.9.2.1. Inventarios de fuentes de emisión de la visita técnica

Se realizó un recorrido en el área de influencia del proyecto para identificar y georreferenciar las fuentes de emisión existentes. La única fuente de emisión encontrada fue la mina 4205, conocida como mina La Esmeralda, la cual se encuentra ubicada en el corregimiento de Payandé, municipio de San Luis, a unos 300 m por el costado oriental del centro poblado. Esta mina está bajo el Contrato de Concesión 8-4205 de CEMEX Colombia S.A para la explotación de calizas para la producción de cemento. Cada título minero o contrato de concesión cuenta con una licencia ambiental independiente. En la Tabla 164 y Tabla 165 se presentan las fuentes de emisiones presentadas en los modelos de dispersión de la mina 4205, así como las actividades asociadas a cada fuente.

Tabla 164. Fuentes dispersas de emisión (mina 4205) Escenario A

ID	Fuente	Actividades	Área (ha)*
OPIT1S	Pit Mina 4205	Remoción y manejo de material estéril, extracción de caliza, cargue de materiales, voladuras, trituración de caliza	21,071
VOL1	Trituradora primaria	Trituración material	0,04
VOL2	Trituradora secundaria		0,04

* El área presentada corresponde al área de la fuente de emisión en el modelo AERMOD y no corresponde al área real de intervención de la mina 4205.

Tabla 165. Fuentes lineales de emisión (mina 4205) Escenario A

ID	Fuente	Actividades	Longitud (km)*
TRAMOA	Vía interna Mina 4205 Tramo A	Acarreo de caliza y material estéril	1,398
TRAMOB	Vía interna Mina 4205 Tramo B		2,301
TRAMOC	Vía interna Mina 4205 Tramo C		0,687

TRAMOD	Vía interna Mina 4205 Tramo D	1,249
TRAMOE	Vía interna Mina 4205 Tramo E	2,699

* La longitud presentada corresponde a la longitud de la fuente de emisión en el modelo AERMOD y no corresponde a la magnitud real de las rutas de acarreo

Fuera del área de influencia del proyecto, en el recorrido se identificaron siete fuentes fijas de emisión adicionales. Seis de ellas correspondientes a la planta de Caracolito, las cuales cuentan con su respectivo sistema de control de emisiones, mientras que la otra corresponde a una planta trituradora de un tercero. Estas fuentes no están inmersas en el área de influencia del proyecto TM745, pero dada la cercanía al proyecto y su potencial aporte de contaminantes al territorio, se incluyeron en el inventario. En la Tabla 166 y Anexo CAP5.1-CMAB-LES745-AN#5.1.035 se presentan las fuentes identificadas.

Tabla 166. Inventario de fuentes de emisión visita técnica

ID	Nombre fuente de emisión	Descripción	Coordenadas Origen único	
			X	Y
FE1	Horno línea 1	Planta Caracolito	4767138,99	2034338,11
FE2	Horno línea 2	Planta Caracolito	4767229,66	2034346,76
FE3	Enfriador horno línea 1	Planta Caracolito	4767012,96	2034361,18
FE4	Enfriador horno línea 2	Planta Caracolito	4766999,92	2034554,71
FE5	Molino de carbón Raymond 4	Planta Caracolito	4767022,42	2034328,6
FE6	Molino de carbón Pfeiffer	Planta Caracolito	4767077,29	2034322
FE7	Trituradora	Planta de triturado	4767483,79	2032482,53

Fuente: Elaboración propia



Fotografía 94. Planta Caracolito

Fuente: Elaboración propia

5.1.9.2.2. Aforos vehiculares

Se realizó la medición de dos vías en 3 puntos de aforo vehicular con el fin de conocer el flujo de vehículos en las fuentes de emisión lineales. La primera vía corresponde a la conexión del corregimiento Payandé con la mina La Esmeralda, en esta se ubicaron dos puntos de medición: el primero en la entrada de la mina por el sur este y el segundo en la entrada de la mina en el noroeste (municipio de Payandé). La segunda vía se ubica en la cabecera municipal del corregimiento Payandé, corresponde a la vía San Luis-Guamo, en el punto conocido como la Virgen. Esta intersección es el punto de salida del corregimiento hacia el puente Payandé que hace la conexión con el municipio de Ibagué.

Tabla 167. Ubicación de puntos de aforo

Vía	Punto de aforo	Coordenadas origen único	
		Este	Norte
Vía Mina Esmeralda - Corregimiento Payandé	Punto 1a – Entrada Mina Payandé	4766724,46	2033509,31
	Punto 1b – Paso Mular		
Vía San Luis - Guamo	Punto 2 – Entrada Payandé (La Virgen)	4767102,29	2033465,79

Fuente: Elaboración propia



Figura 211. Ubicación de aforos vehiculares

Fuente: Elaboración propia

El aforo se realizó en jornadas continuas de 24 horas para un día hábil correspondiente al día 7 de octubre del 2020 empezando a las 2 pm y finalizando a las 2 pm del día 8 de octubre del 2020. Asimismo, se realizó el aforo para un día festivo correspondiente al día 11 de octubre comenzando a las cero horas.

Este aforo se realizó por medio de conteo de vehículos los cuales se discretizó en vehículos livianos y pesados. Los vehículos livianos se componen por motos, automóviles, camionetas y microbuses. Los vehículos pesados se conforman por camiones de dos ejes pequeños (C2P), camiones de 2 ejes grandes (C2G), camiones de tres ejes (C3), camiones de cuatro ejes (C4) y camiones de cinco ejes (C5).

Finalmente, se discretizó el conteo de las motos según su motor, es decir de dos tiempos y de cuatro tiempos, como también los automóviles y camionetas según su combustible diésel o gasolina. Ver Anexo CAP5.1-CMAB-LAES745-AN#5.1.036.

Por otra parte, la vía aforada en el punto 1 se caracteriza por ser una vía en material granular más conocida como una vía destapada, donde su número de carriles se reduce a uno ya que es una vía terciaria. En la Fotografía 95 y Fotografía 96 se exponen las características de la vía.

La vía aforada en el punto 2 corresponde a una vía secundaria pavimentada con dos carriles para el tránsito. En la Fotografía 97 se presentan las características de la vía.



Fotografía 95. Vía 1 punto 1a Entrada Mina Payandé
Fuente: Elaboración propia



Fotografía 96. Vía 1 punto 1b Entrada Mina Payandé
Fuente: Elaboración propia



Fotografía 97. Vía 2 punto 2 Entrada Payandé (La Virgen)
Fuente: Elaboración propia

5.1.9.2.2.1. Resultados Vía 1

En la Tabla 168 se presentan los resultados para el aforo vehicular en el día hábil para la vía de conexión del corregimiento Payandé con la mina La Esmeralda. En la Tabla 169 se presentan los resultados para el día no hábil.

Como se observa en la Tabla 168 el flujo vehicular es característico de una vía terciaria el cual muestra un bajo número de vehículos que transitan por esta vía. Para el día hábil, el tránsito promedio diario (TPD) se registró en 282 vehículos en la entrada y 245 en la salida. De los vehículos registrados en su gran mayoría eran motos, representando el 78% del conteo total. El siguiente vehículo con mayor representación fueron los automóviles, camionetas y microbuses con un 16% del conteo total. En menor representación se presentaron bicicletas y camiones entre 2 ejes y 5 ejes.

Por otra parte, es importante resaltar que el periodo que mostró mayor flujo vehicular fue el periodo diurno. Para el día hábil el mayor pico de flujo vehicular automóviles, camionetas y microbuses se reportó entre las 2 pm y 10 pm del día 7 de octubre del 2020 y entre las 6 am y 2 pm del día 8 de octubre del mismo año.

Tabla 168. Resultados día hábil, vía 1

Punto de muestreo	Punto 1a Entrada Mina Payandé						Punto 1b Paso Mular						Total	
	7 de octubre 2020						7 de octubre 2020							
	14:00 - 22:00		22:00 - 06:00		06:00 - 14:00		14:00 - 22:00		22:00 - 06:00		06:00 - 14:00			
Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	
A - Automóviles camionetas y microbuses	9	16	5	6	31	24							45	46
B - Buses					1	1							1	1
E - Buses especiales													0	0
C2G - Camión de 2 ejes pequeño	2	2			1								3	2
C2G - Camión de 2 ejes grande	2	2			1	1							3	3
C3 - Camión de 3 ejes													0	0
C4- Camión de 4 ejes	1												1	0
C5- Camión de 5 ejes		1				1							0	2
Bicicletas		5	1	2	2		7	7					10	14
Motos	28	17	12	9	29	12	48	89	4		98	50	219	177
Otros														

Fuente: Elaboración propia

Para el día no hábil se mantuvo el número de motos y se registró una disminución en el número de camionetas y automóviles en 10 vehículos. En el día no hábil no se registró ningún tipo de camión (situación que sí se presentó para el día hábil). Por otro lado, se registró un total de 2 buses especiales, este tipo de vehículo no se presentó en el día hábil. El TPD en la entrada fue de 273 y en la salida de 210 vehículos.

En el caso de los automóviles, camionetas y microbuses el mayor flujo se presenta en el periodo nocturno entre las 4 pm y las 8 am. igualmente para las motos, el mayor flujo se dio entre las 4 pm y las 12 m.

Tabla 169. Resultados día no hábil, vía 1

Punto de muestreo	Punto 1a Entrada Mina Payandé						Punto 1b Paso Mular						Total	
	12 de octubre 2020						12 de octubre 2020							
	00:00 - 08:00		08:00 - 16:00		16:00 - 00:00		00:00 - 08:00		08:00 - 16:00		16:00 - 00:00			
Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	
A - Automóviles camionetas y microbuses	15	7	7	7	14	19							36	33
B - Buses			1	1									1	1
E - Buses especiales					2	2							2	2
C2G - Camión de 2 ejes pequeño													0	0
C2G - Camión de 2 ejes grande													0	0
C3 - Camión de 3 ejes													0	0
C4 - Camión de 4 ejes													0	0
C5 - Camión de 5 ejes													0	0
Bicicletas	3				3		1		6	7	3	4	16	11
Motos	10	5	14	8	42		40	12	70	70	42	68	218	163
Otros													9	15

Fuente: Elaboración propia

5.1.9.2.2.2. Resultados Vía 2

En la Tabla 170 se presentan los resultados para el aforo vehicular en el día hábil para la vía San Luis-Guamo, en el punto conocido como la Virgen. En la Tabla 171 se presentan los resultados para el día no hábil.

Como se observa en la Tabla 170 la vía presenta para el día hábil, un TPD de entrada de 1545 vehículos y de salida de 1400. De estos un 50% correspondió a automóviles, camionetas y microbuses y un 36% a motos. Los camiones corresponden al 12% y se encontraron mayoritariamente (70%) representados por camiones de dos ejes (grandes y pequeños).

Por otra parte, es importante resaltar que el periodo que mostró mayor flujo vehicular fue el periodo diurno. Para el día hábil el mayor pico de flujo vehicular automóviles, camionetas y microbuses se reportó entre las 2 pm y 10 pm del día 7 de octubre del 2020 y entre las 6 am y 2 pm del día 8 de octubre del mismo año.

Tabla 170. Resultados día hábil, vía 2

Punto de muestreo	Punto 2 La virgen entrada a Payandé						Total	
Fecha	7 de octubre 2020							
Hora	14:00 - 22:00		22:00 - 06:00		06:00 - 14:00			
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
A - Automóviles camionetas y microbuses	351	320	31	37	394	299	776	656
B - Buses	9	10					9	10
E - Buses especiales								
C2G - Camión de 2 ejes pequeño	40	19	6	4	24	30	70	53
C2G - Camión de 2 ejes grande	14	13	4	6	45	46	63	65
C3 - Camión de 3 ejes	8	7		4	20	23	28	34
C4- Camión de 4 ejes					2		2	0
C5- Camión de 5 ejes	7	20			1	3	8	23
Bicicletas	6				20	19	26	19
Motos	275	222	31	40	256	278	562	540
Otros							1	0

Fuente: Elaboración propia

Para el día no hábil se produce un aumento aproximado del 50% en el número de motos y camionetas y automóviles. En el día no hábil no se registró ningún tipo de camión (situación que sí se presentó para el día hábil). Por otro lado, se registró un total de 5 buses especiales, este tipo de vehículo no se presentó en el día hábil. Se disminuye el número de camiones de 2 ejes y no se registra la presencia de camiones de 3, 4 o 5 ejes. El TPD en la entrada fue de 3041 y en la salida de 2253 vehículos.

En el caso de las motos y los automóviles, camionetas y microbuses el mayor flujo se presenta en el periodo entre las 8 am y las 12 m.

Tabla 171. Resultados día no hábil, vía 2

Punto de muestreo	Punto 2 La virgen entrada a Payandé						Total	
Fecha	12 de octubre 2020							
Hora	00:00 - 08:00		08:00 - 16:00		16:00 - 00:00			
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
A - Automóviles camionetas y microbuses	95	60	1470	243	184	1006	1749	1309
B - Buses	6	4	19	4	6	5	31	13
E - Buses especiales			2	2	3	2	5	4
C2G - Camión de 2 ejes pequeño	5	4	17	4	1	7	23	15
C2G - Camión de 2 ejes grande	5	9	8	2		5	13	16
C3 - Camión de 3 ejes							0	0
C4- Camión de 4 ejes							0	0
C5- Camión de 5 ejes							0	0
Bicicletas	114	22	54	65	2	5	170	92
Motos	98	73	873	155	127	576	1098	804
Otros			2				2	

Fuente: Elaboración propia

5.1.9.2.3. Inventario de receptores sensibles

Durante la ejecución del inventario de fuentes de emisión, se realizó paralelamente el inventario de receptores sensibles dentro del área de influencia del componente atmosférico. Los receptores sensibles se entienden como los sitios de interés social o ambiental que son altamente vulnerables ante la presencia de un impacto por contaminación atmosférica, bien sea por ruido o calidad del aire, dadas sus condiciones de salud, importancia ecológica o social.

En el inventario se resaltan 3 institutos educativos, una unidad hospitalaria, centros de recreación y deporte y parques. En la Tabla 172 se presentan los receptores sensibles identificados.

Tabla 172. Coordenadas de receptores sensibles

Fuente Receptora	Coordenadas	
	Este	Norte
Institución Educativa San Miguel Payandé	4766710,314	2033405,358
Parque La Virgen Parte Alta	4766939,284	2033430,027
Centro de Salud Payandé Serafín Montaña Cuellar	4767177,949	2033241,744
Iglesia Santa Bárbara - Payandé	4767256,842	2033181,65
Coliseo Payandé	4767280,845	2033188,615
Parque Principal Payandé	4767282,809	2033163,619
I.E. San Miguel (escuela)	4767323,816	2033176,557
Ancianato Hogar de Vida San Martín	4767322,812	2033173,56
Casa Cultural Payandé	4767210,765	2033117,734
Cementerio Payandé	4767680,344	2032915,13
Cancha de Fútbol	4767537,652	2032394,481
Club Campestre y Recreacional Chicalá	4767405,311	2032835,54
Estación Policía Payandé	4767408,333	2032851,532
Centro de Desarrollo Infantil Mi Bohío 2	4767071,911	2033192,908
Cancha Barrio Santa Bárbara	4767264,049	2033329,598
Servicio de Piscinas	4766980,093	2033303,006

Fuente: Elaboración propia

El registro fotográfico correspondiente se presenta en la Fotografía 98 a la Fotografía 114. Su localización se puede observar en la Figura 211 y en el Plano CAP05.1-CMAB-LAES745-ATMO-004.



Fotografía 98. Institución Educativa San Miguel Payandé
Fuente: Elaboración propia



Fotografía 99. Parque La Virgen Parte Alta
Fuente: Elaboración propia



Fotografía 100. Centro de Salud Payandé Serafin
Montaña Cuellar
Fuente: Elaboración propia



Fotografía 101. Iglesia Santa Bárbara - Payandé
Fuente: Elaboración propia



Fotografía 102. Coliseo Payandé
Fuente: Elaboración propia



Fotografía 103. Parque Principal Payandé
Fuente: Elaboración propia



Fotografía 104. Club Campestre y Recreacional Chicalá
Fuente: Elaboración propia



Fotografía 105. Ancianato Hogar de Vida San Martín
Fuente: Elaboración propia



Fotografía 106. Casa Cultural Payandé
Fuente: Elaboración propia



Fotografía 107. Centro de Desarrollo Infantil Mi Bohío 2
Fuente: Elaboración propia



Fotografía 108. Institución Educativa San Miguel Payandé
Fuente: Elaboración propia



Fotografía 109. I.E. San Miguel (escuela)
Fuente: Elaboración propia



Fotografía 110. Cancha de Fútbol
Fuente: Elaboración propia



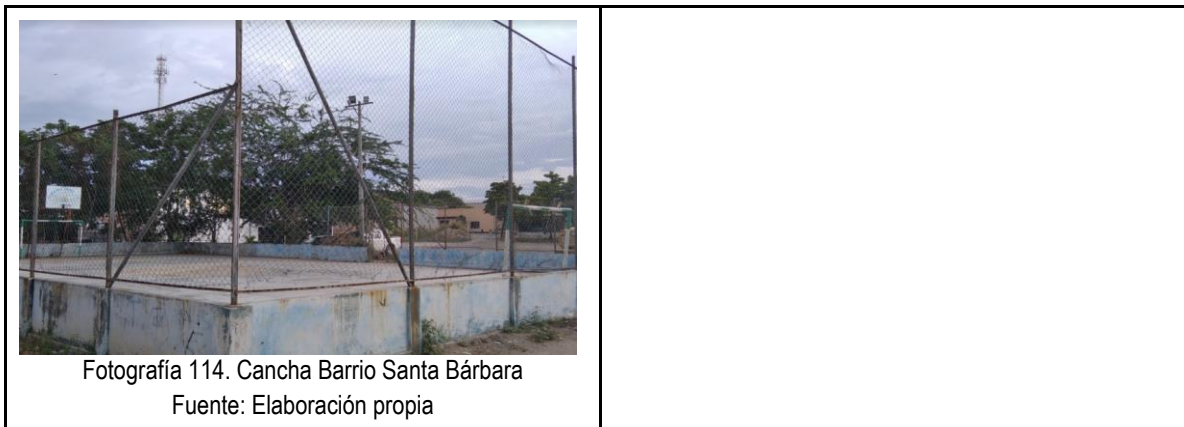
Fotografía 111. Cementerio Payandé
Fuente: Elaboración propia



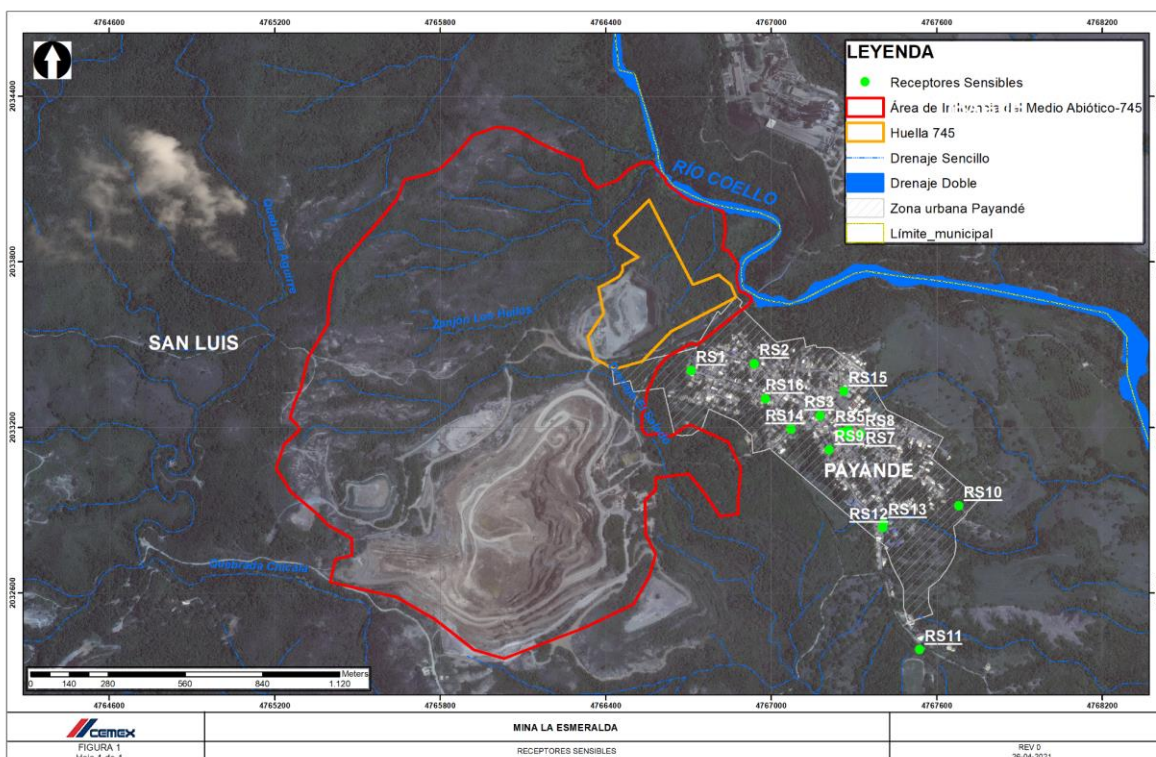
Fotografía 112. Estación Policía Payandé
Fuente: Elaboración propia



Fotografía 113. Servicio de piscina
Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia



5.1.9.2.4. Estimación de la emisión atmosférica.

La estimación de emisiones existente en el área de influencia del proyecto comprende las actividades industriales y comerciales presentes, así como las actividades rutinarias de la comunidad que lleguen a generar contaminación atmosférica. Para este ejercicio se utilizaron factores de emisión acordes a las actividades y fuentes identificadas. Un factor de emisión es un valor representativo que intenta relacionar la cantidad de un contaminante emitido a la atmósfera con un

valor de actividad asociada con la descarga de ese contaminante; estos factores se expresan normalmente como el peso del contaminante dividido por una unidad de peso, volumen, distancia o la duración de la actividad de emisión de contaminante².

Los factores de emisión utilizados fueron los dispuestos en el documento AP-42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors. Volume I: Stationary Point and Area Sources. El AP-42 es una compilación de múltiples factores de emisión de las principales actividades económicas que generan emisiones atmosféricas en sus procesos³. A continuación se presenta la estimación de emisiones por cada fuente identificada:

- Mina 4205

La mina 4205 es una de las fuentes de emisión más representativas del área de influencia. Cada título minero o contrato de concesión cuenta con una licencia ambiental independiente, y en el seguimiento ambiental de la mina 4205 se han desarrollado modelos de dispersión para evaluar la contaminación atmosférica del proyecto. En el último informe del modelo de dispersión presentado a la autoridad ambiental en el 2019⁴, se estimaron las emisiones de cada contaminante por cada fuente de emisión. Se utilizaron factores de emisión del libro AP-42 de la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) para el cálculo, asociados a las actividades. En la Tabla 173 se presentan las emisiones estimadas en cada fuente de emisión y por cada contaminante.

Tabla 173. Emisiones mina 4205 Escenario A

Emisiones mina 4205 (g/s)						
ID	Fuente	PM10	PM2.5	NO2	SO2	CO
OPIT1S	Mina 4205	1,32E-02	7,30E-03	-	-	-
TRAMOA	Mina 4205 Tramo A	6,27E-02	6,83E-03	1,74E-04	5,49E-06	2,34E-05
TRAMOB	Mina 4205 Tramo B	6,27E-02	6,83E-03	1,74E-04	5,49E-06	2,34E-05
TRAMOC	Mina 4205 Tramo C	6,27E-02	6,83E-03	1,74E-04	5,49E-06	2,34E-05
TRAMOD	Mina 4205 Tramo D	6,27E-02	6,83E-03	1,74E-04	5,49E-06	2,34E-05
TRAMOE	Mina 4205 Tramo E	6,27E-02	6,83E-03	1,74E-04	5,49E-06	2,34E-05
VOL1	Trituradora primaria	6,60E-05	6,60E-05	-	-	-
VOL2	Trituradora secundaria	2,11E-05	2,11E-05	-	-	-

Fuente: CEMEX, 2019

- Aforos vehiculares

Como se mencionó en la identificación de fuentes de emisión, en el área de influencia solo se identificaron dos vías significativas que pueden generar contaminación atmosférica en el territorio: la primera vía corresponde a la conexión del corregimiento Payandé con la mina La Esmeralda, y la segunda vía se ubica en la cabecera municipal del corregimiento Payandé, corresponde a la vía San Luis-Guamo. Las emisiones asociadas a estas fuentes de emisión son de dos tipos:

² Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Guía para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas. Bogotá. 2017.

³ U.S. Environmental Protection Agency. Fifth Edition Compilation of Air Pollutant Emissions Factors, Volume 1: Stationary Point and Area Sources - AP42. North Carolina: Office of Air Quality Planning and Standards. 2009.

⁴ CEMEX Colombia. Modelo de dispersión mina de caliza la esmeralda. 2019.

levantamiento o resuspensión de partículas por el rodamiento de vehículos, y la combustión interna de la flota vehicular asociada. En primera instancia, el factor de emisión para el cálculo de emisiones por resuspensión corresponde al descrito en el Capítulo 13.2 Emisiones Fugitivas, sección 13.2.2 Vías sin pavimentar, del compilado AP-42 de la EPA. En la Tabla 174 se describe la metodología de cálculo:

Tabla 174. Factores de emisión aforos vehiculares

Actividad	Ecuación	Variables	Unidades	Contaminantes
Tráfico vehicular vía pavimentada	$E_{ext} = [k (sL)^{0.91} \times (W)^{1.02}] (1 - P/4N)$	sL: carga de finos en superficie (g/m ²) W: Peso promedio del vehículo (Ton) K: constante empírica P: número de días con precipitaciones mayores a 0,254 mm durante 365 días vkt: kilómetros totales recorridos por la flota	g/vkt	PM10 PM2.5

Fuente. Elaboración Propia

El número de días con eventos de precipitación se tomó de la caracterización meteorológica. Debido a que no se conoce con certeza el contenido de finos y de humedad en superficie de las vías en estudio, la EPA ofrece un rango medio de valor típicos de estos parámetros, en función del tipo de vía y flujo vehicular. Se utilizaron los valores dispuestos en la Tabla 175 y en la Tabla 176 se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 175. Datos emisiones rodamiento en vías sin pavimentar Escenario A

Tramo vial	Longitud (km)	TPD total	W (t)	sL (g/m ²)	M (%)	S (mph)	P (días)
Mina - Payandé	1,02	493	1,07	0,50	1,00	12,50	145
San Luis - Guamo	11,706	4098	2,59	0,100	3,00	25,00	

Fuente. Elaboración Propia

Tabla 176. Resultados emisiones rodamiento en vías sin pavimentar Escenario A

Emisiones lineales vías pavimentadas (g/s)			
Tramo vial	PST	PM10	PM2.5
Mina - Payandé	0,010	0,002	0,000
San Luis - Guamo	0,525	0,101	0,024

Fuente. Elaboración Propia

Por otro lado, las emisiones producto de la combustión de la flota vehicular circundante en la vía se estimaron utilizando el modelo IVE. Este modelo es ampliamente reconocido para estudios de inventario de emisiones en países no desarrollados o que no cuentan con factores de emisión asociados a las condiciones locales. El modelo IVE fue desarrollado en conjunto por el Centro para la Investigación y Tecnología Ambiental (CE-CERT) de la Escuela de Ingeniería de la Universidad de California en Riverside (UCR), Investigación de Sistemas Sustentables Globales (GSSR) y el Centro de Investigación de Sistemas Sustentables Internacionales (ISSRC); financiado por la Agencia de Protección del Medioambiente de Estados Unidos (EPA)⁵.

⁵ U.S. Environmental Protection Agency. International Vehicle Emissions Model. Recuperado de <http://www.issrc.org/ive/>. 2010

Las bases de datos más representativas son la de flota vehicular y la de patrones de conducción, ya que son particulares a la localidad o ubicación de las fuentes móviles. Las demás variables son de fácil determinación con base en las políticas ambientales y de tránsito del país. La flota vehicular fue clasificada de acuerdo con la base de datos de la flota vehicular del del Ministerio de Tránsito en la página Datos Abiertos de Colombia⁶ y los resultados del aforo vehicular realizado en las vías. La flota se clasificó entonces de la siguiente manera:

Tabla 177. Resumen flota vehicular existente

Tipo flota	Combustible	Tamaño	Control o mezcla aire / combustible	Norma emisiones / Control emisiones
Liviano	Gasolina	Pequeño	Multipunto Inyección de combustible	LEV
	Gasolina	Pequeño	Multipunto Inyección de combustible	ULEV
	Gasolina	Pequeño	Multipunto Inyección de combustible	EuroII
	Gasolina	Mediano	Multipunto Inyección de combustible	EuroII
	Gasolina	Pequeño	Multipunto Inyección de combustible	EuroIII
	Gasolina	Mediano	Multipunto Inyección de combustible	EuroIII
	Gasolina	Pequeño	Multipunto Inyección de combustible	EuroIV
	Gasolina	Mediano	Multipunto Inyección de combustible	EuroIV
	Diésel	Mediano	Inyección de combustible	EuroII
	Diésel	Mediano	Inyección de combustible	EuroIII
	Diésel	Mediano	Inyección de combustible	EuroIV
Mediano	Diésel	Pequeño	Inyección de combustible	EuroII
	Diésel	Pequeño	Inyección de combustible	EuroIII
	Diésel	Pequeño	Inyección de combustible	EuroIV
	Diésel	Mediano	Inyección de combustible	EuroIV
	Diésel	Mediano	Inyección de combustible	EuroV
	Gasolina	Grande	Multipunto Inyección de combustible	EuroII
	Gasolina	Grande	Multipunto Inyección de combustible	EuroIII

⁶ Ministerio de Comunicaciones; Ministerio de Transporte. Registro Nacional Automotor 2017. Bogotá.

Tipo flota	Combustible	Tamaño	Control o mezcla aire / combustible	Norma emisiones / Control emisiones
	Gasolina	Grande	Multipunto Inyección de combustible	EuroIV
Pesado	Gasolina	Mediano	Inyección de combustible	Euroll
	Gasolina	Mediano	Inyección de combustible	Eurolll
	Gasolina	Mediano	Inyección de combustible	EuroIV
	Diésel	Grande	Inyección de combustible	Euroll
	Diésel	Grande	Inyección de combustible	Eurolll
	Diésel	Grande	Inyección de combustible	EuroIV
	Diésel	Grande	Inyección de combustible	EuroV
Motocicleta	Gasolina	Pequeño	Dos ciclos, Inyección de combustible	Ninguna
	Gasolina	Pequeño	Cuatro ciclos, Carburador	Ninguna
	Gasolina	Pequeño	Cuatro ciclos, Carburador	Catalizador
	Gasolina	Pequeño	Cuatro ciclos, Inyección de combustible	Catalizador
	Gasolina	Mediano	Dos ciclos, Inyección de combustible	Ninguna
	Gasolina	Mediano	Cuatro ciclos, Carburador	Ninguna
	Gasolina	Mediano	Cuatro ciclos, Carburador	Catalizador
	Gasolina	Mediano	Cuatro ciclos, Inyección de combustible	Catalizador
	Diésel	Mediano	Cuatro ciclos	Ninguna
	Diésel	Mediano	Cuatro ciclos	Catalizador

Fuente: Modificado del Registro Nacional Automotor - MinTransporte, 2017.

La clasificación anterior integra una subdivisión adicional correspondiente a la antigüedad del vehículo: menor 79 000 km, entre 80 000 km y 160 000 km y mayor de 160 000 km recorridos para vehículos iguales o mayores a C2, mientras que las motocicletas se subdividieron en menor a 26 000 km, entre 26 000 km y 50 000 km y mayor a 50 000 km. Por otra parte, la determinación de los patrones de conducción requiere un estudio específico de velocidad, aceleración y elevación bajo diferentes clases de vehículos a lo largo de la vía, así como de una caracterización de partidas en frío y caliente en los

establecimientos aledaños a la vía. En ausencia de esta información, los anteriores datos se aproximaron con resultados de estudios de movilidad y emisiones móviles en el país en carreteras con alto y bajo tráfico⁷.

Los parámetros ambientales de cálculo para el modelo IVE fueron determinados bajo las condiciones actuales normativas de calidad de combustible, normas de tránsito y condiciones ambientales promedio de la zona. Los resultados de las simulaciones con el modelo IVE se muestran en la Tabla 178.

Tabla 178. Resultados emisiones por combustión interna escenario A

Resumen Emisiones móviles (g/s)						
Tramo vial	CO	NOX	SOX	PST	PM10	PM2.5
Mina - Payandé	0,0289	0,0039	0,0001	0,0008	0,0006	0,0005
San Luis - Guamo	1,3739	0,2423	0,0077	0,0218	0,0174	0,0153

Fuente. Elaboración Propia

- Planta Caracolito

La planta Caracolito, se encuentra ubicada en el Km 3.5 de la vía Buenos Aires- Payandé, en la ciudad de Ibagué (Tolima) y cuenta con su propia licencia ambiental independiente al complejo minero. La planta recibe todos los materiales minados del complejo La Esmeralda actuales y tiene la capacidad licenciada para procesar los materiales minados de los títulos 745 y 6823 futuros. La principal infraestructura que se encuentra dentro de la planta es: molino de carbón, molino de cemento, enfriador, estaciones elevadoras y bandas transportadoras, silos de almacenamiento y hornos en línea. Como la planta de cemento cuenta con su propia licencia ambiental, en donde los procesos de las actividades mineras y de procesamiento de cemento están claramente segmentadas, se optó por no incluir la planta de cemento en la estimación de emisiones atmosféricas.

⁷ Giraldo Amaya, L. (2005). Estimación del Inventario de Emisiones de fuentes Móviles para la Ciudad de Bogotá e Identificación de Variables Pertinentes. Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Bogotá: Universidad de los Andes