

**ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE
SAL DE ZIPAQUIRÁ, CORRESPONDIENTE AL TÍTULO MINERO HIQO-03**

**RICARDO FABIO AMAYA VILLAR
DAMIAN ISAAC PÉREZ ROMERO**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO
ESCUELA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA
2016**

ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE
SAL DE ZIPAQUIRÁ, CORRESPONDIENTE AL TÍTULO MINERO HIQO-03

RICARDO FABIO AMAYA VILLAR
DAMIAN ISAAC PÉREZ ROMERO

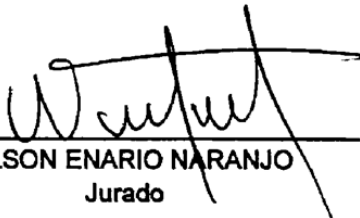
Trabajo presentado como requisito para optar el título de
INGENIERO GEOLÓGO

Director
JORGE ELIECER MARIÑO MARTINEZ
Ingeniero Geólogo – UPTC
Phd – Universidad de Illinois

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO
ESCUELA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA
2016

Nota de aceptación


JÓRGE ELICER MARIÑO MARTINEZ
Director del proyecto


WILSON ENARIO NARANJO
Jurado


MARÍA DEL CARMEN FUENTES
Jurado

*“Cuando quieras emprender algo,
habrá mucha gente que te dirá que
no lo hagas, cuando vean que no te
pueden detener, te dirán como lo
tienes que hacer, y cuando finalmente
vean que lo has logrado, dirán que
siempre creyeron en ti”*

John Maxwell

Dedicatoria

A Dios por darme la valentía, fortaleza y sabiduría para afrontar este reto.

A la memoria de mi hermano Efraín José, que siempre me acompaña en cada paso que doy.

A mis tíos y tías por su apoyo incondicional que se constituyó en pieza fundamental para alcanzar esta meta.

A mis padres Carlos Amaya y Blanca Villar, por su irrestricta confianza en mí y los sacrificios que han hecho para formarme como un hombre íntegro.

A todas aquellas personas que de un modo u otro contribuyeron en gran medida en mi vida para la consecución de este logro.

RICARDO FABIO

Dedicatoria

A mi madre.

A Dylan.

Damián Isaac Pérez Romero

AGRDECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

La empresa COLSALMINAS L.t.d.a.

Las Ingenieras Nidia Yolima Bobadilla, Directora de la mina de sal de Zipaquirá y Evelin Dayana Cuchigay, Jefe de mina.

Héctor Gordillo, Luis Martínez, don Guillermo y todos los demás mineros que siempre estuvieron prestos a resolvernros cualquier inquietud y a cualquier colaboración.

Carlos Vargas y Germán Herrera, por sus orientaciones y colaboración incondicional

Phd Jorge Mariño. Director del proyecto, por su guía, colaboración y apoyo a este trabajo.

Mayury Méndez. Nuestra colega y compañera de trabajo, por su compañía y disposición.

TABLA DE CONTENIDO

1.	OBJETIVOS	2
1.1	OBJETIVO GENERAL	2
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
2	GENERALIDADES	3
2.1	EVOLUCÓN DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRÁ	3
2.2	LOCALIZACIÓN	4
2.3	VIAS DE COMUNICACIÓN	5
2.4	CLIMA	5
2.5	VEGETACIÓN	7
2.6	HIDROGRAFÍA	7
2.7	FISIOGRAFÍA	8
2.8	DESCRIPCIÓN MORFOMÉTRICA DE LAS MICROCUENCAS	9
2.8.1	MICROCUENCA EL GAVILÁN	9
2.8.2	MICROCUENCA LA ARTESA	10
2.8.3	MICROCUENCA LA SALINA	11
2.9	SUELOS	12
3	METODOLOGÍA GENERAL PARA LA EXPLORACIÓN Y EVALUACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	13
4	GEOLOGÍA	16
4.1	GEOLOGÍA REGIONAL	16
4.2	GEOLOGÍA HISTÓRICA	16
4.3	GEOLOGIA DEL YACIMIENTO	17
4.3.1	Edad del Depósito	17
4.3.2	Litología del Yacimiento	18
4.4	ESTRATIGRAFÍA	24
4.4.1	Formación Chipaque (K ₂ CP)	25
4.4.2	Grupo Guadalupe	28
4.4.3	Formación Guaduas (K ₂ E1g)	34
4.4.4	Formación Bogotá	35

**ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE
ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03**

4.4.5	Depósitos de Terraza Alta (Qta)	35
4.5	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	36
4.5.1	Estructuras Presentes	36
5	GEOMORFOLOGIA	39
5.1	AMBIENTES GEOMORFOLÓGICOS:	39
5.1.1	Ambiente Estructural	39
5.1.2	Ambiente Denudacional	41
5.1.3	Ambiente Coluvial	42
5.1.4	Ambiente Fluvio-Lacustre	43
5.1.5	Factores Antrópicos	43
6	HIDROQUIMICA	44
6.1	PRUEBAS HIDROQUÍMICAS	44
6.1.1	Análisis Químicos	45
6.1.2	Análisis Físicos	52
6.2	MAPA DE DISTRIBUCIÓN HIDROQUÍMICA	54
6.3	ANÁLISIS DE GRAFICAS POR ELEMENTOS DISCRIMINADOS	55
7	HIDROLOGIA	59
7.1	Componentes Hidrometereológicas	59
7.1.1	Precipitación	59
7.1.2	Temperatura	63
7.1.3	Brillo Solar	66
7.1.4	Humedad Relativa	66
7.1.5	Evaporación	67
7.2	EVAPOTRANSPIRACIÓN	68
7.2.1	Evapotranspiración Potencial	68
7.2.2	Evapotranspiración Real	74
7.3	BALANCE HIDRICO	75
8	GEOFÍSICA	76
8.1	GRAVIMETRÍA	76
8.1.1	Modelo gravimétrico	77
8.2	GEOELÉCTRICA	79
8.2.1	Sondeos Eléctricos Verticales SEV's	79

**ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE
ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03**

8.2.2	Rastreo Geoeléctrico _____	80
8.2.3	Reinterpretación de la geoelectrica _____	81
9	HIDROGEOLOGÍA _____	90
9.1	INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA _____	90
9.2	CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA _____	91
9.2.1	Marco teórico _____	91
9.3	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLOGICA _____	131
9.4	ZONAS DE RECARGA _____	134
10	MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL _____	136
11	CONCLUSIONES _____	139
12	RECOMENDACIONES _____	142
13	BIBLIOGRAFÍA _____	143

**ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE
ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03**

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

FOTO 1: ANÁLISIS PETROGRÁFICO CON LUPA BINOCULAR.....	21
FOTO 2: MUESTRA DE SAL ROCA.....	21
FOTO 3: MUESTRA DE SAL ROCA.....	22
FOTO 4: FISURA EN LUTITA RELLENA DE HALITA Y HEMATITA.....	22
FOTO 5: MUESTRA DE HALITA CON CRISTAL DE PIRITA.....	23
FOTO 6: CRISTAL DE HALITA MANCHADO POR OLIGISTO.....	23
FOTO 7: INTERCALACIONES DE CAPAS DE ARENISCA CON LUTITAS DE LA FORMACIÓN CHIPAQUE.	26
FOTO 8: AFLORAMIENTO DE LA FORMACIÓN CHIPAQUE.....	26
FOTO 9: MUESTRA DE LA FORMACIÓN ARENISCA DURA, NÓTESE LA ESTRATIFICACIÓN ONDULADA - PLANA PARALELA CONTINUA Y LA PRESENCIA DE LÁMINAS DE HIERRO.	29
FOTO 10: AFLORAMIENTO DE LA FORMACIÓN ARENISCA DURA VÍA ZIPAQUIRÁ - VEREDA SAN JORGE.....	29
FOTO 11: BIOTURBACIÓN EN CAPAS DE ARENSCAS DE LA FORMACIÓN DURA.....	30
FOTO 12: AFLORAMIENTO DE LA FORMACIÓN PLAENERS VÍA ZIPAQUIRÁ - PACHO.	31
FOTO 13: FORMACIÓN LABOR-TIERNA SECTOR ARENAS DE NEMOCÓN.	33
FOTO 14: BIOTURBACIÓN EN MUESTRA NO IN SITU EN EL SECTOR ARENAS DE NEMOCÓN.....	33
FOTO 15: EN PRIMER PLANO LA TERRAZA FLUVIO - LACUSTRE, EN SEGUNDO PLANO ESCARPE EN ROCAS DEL GRUPO GUADALUPE. FOTO TOMADA EN EL SECTOR LA PAZ.	40
FOTO 16: LOMA SALINA VISTA DESDE LA CANTERA LA CASCADA.	41
FOTO 17: LOMAS CON PENDIENTES SUAVES. SECTOR CANTERA LA CASCADA.....	42
FOTO 18: ENSAYO DE SOLIDOS TOTALES DISUELTOS.....	53
FOTO 19: RECIPIENTES CON EL CONTENIDO DE SOLIDOS TOTALES.....	54
FOTO 20: REGLILLA FIJA, PARA CUANTIFICAR LOS DESCENSOS.....	119

**ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE
ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03**

FOTO 21: TOMA DE DATOS EN CAMPO (RESERVORIO 23).	119
FOTO 22: PILAR COLGADO POR DISOLUCIÓN DE LA BASE.	125
FOTO 23: FLUJO DE AGUA DESDE LA BASE DE UN PILAR (MACHÓN COLGADO).	125
FOTO 24: TOMA DE MUESTRAS PARA ENSAYOS DE PROPIEDADES FÍSICAS.	130
FOTO 25: ESTIMACIÓN DE VOLUMEN PARA ENSAYOS DE PROPIEDADES FÍSICAS.	130
FOTO 26: MARCAS DE DILUCIÓN INTERSECCIÓN DEL TÚNEL DE ACCESO VEHICULAR A LA CATEDRAL Y EL TÚNEL 260.	137

LISTA DE GRÁFICAS

GRÁFICA 1: CURVA HIPSOMÉTRICA Y FRECUENCIA DE ALTITUDES.	10
GRÁFICA 2: CURVA HIPSOMÉTRICA Y FRECUENCIA DE ALTITUDES QUEBRADA LA ARTESA.	11
GRÁFICA 3: CURVA HIPSOMÉTRICA Y FRECUENCIA DE ALTITUDES QUEBRADA LA SALINA.	12
GRÁFICA 4: TRIÁNGULO DE CATIONES.	48
GRÁFICA 5: TRIÁNGULO DE ANIONES PARA LAS MUESTRAS RECOLECTADAS.	49
GRÁFICA 6: DIAGRAMA DE PIPER.	50
GRÁFICA 7: DIAGRAMA DE SHOLLER - BERKALOFF.	51
GRÁFICA 8: REPRESENTACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DEL ELEMENTO LITIO.	56
GRÁFICA 9: COMPORTAMIENTO DE LA PRECIPITACIÓN.	61
GRÁFICA 10: GRADIENTE DE TEMPERATURA. NÓTESE QUE LA RELACIÓN DE TEMPERATURA Y ELEVACIÓN (R) ES CERCANA A UNO (1).	65
GRÁFICA 11: VALORES MEDIOS MENSUALES DE TEMPERATURA.	65
GRÁFICA 12: COMPARACIÓN DE LOS VALORES MEDIOS MENSUALES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL OBTENIDOS CON DIFERENTES METODOLOGÍAS.	72
GRÁFICA 13: BALANCE HIDROLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO.	75
GRÁFICA 14: MODELO GRAVIMÉTRICO POR EL ALGORITMO DE TALWANI.	78
GRÁFICA 14: DISTRIBUCIÓN DE LAS RESISTIVIDADES EN EL SEV 1.	82
GRÁFICA 15: DISTRIBUCIÓN DE LAS RESISTIVIDADES EN EL SEV 2.	83
GRÁFICA 16: DISTRIBUCIÓN DE LAS RESISTIVIDADES EN EL SEV 3.	84
GRÁFICA 17: DISTRIBUCIÓN DE LAS RESISTIVIDADES EN EL SEV 4.	86
GRÁFICA 18: DISTRIBUCIÓN DE LAS RESISTIVIDADES EN EL SEV 5.	87
GRÁFICA 19: DISTRIBUCIÓN DE LAS RESISTIVIDADES EN EL SEV 6.	88
GRÁFICA 15: ESQUEMA PARA LA DEDUCCIÓN DEL VALOR DEL DESCENSO RESIDUAL (DR) EN EL ANÁLISIS DE LA RECUPERACIÓN DE NIVELES POSTERIOR A LA PARADA.	98

**ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE
ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03**

GRÁFICA 16: REPRESENTACIÓN “DR VS LG (T+T'/T’)” MAR DEL SUR.....	121
GRÁFICA 17: “DESCENSO – TIEMPO” SAGRADO CORAZÓN.....	122
GRÁFICA 18: “RECUPERACIÓN – TIEMPO” SAGRADO CORAZÓN.....	122
GRÁFICA 19: REPRESENTACIÓN “DR VS LG (T+T'/T’)” SAGRADO CORAZÓN.....	123
GRÁFICA 20: “RECUPERACIÓN – TIEMPO” RESERVORIO 23.....	124
GRÁFICA 21: REPRESENTACIÓN DR VS LG (T+T'/T’) RESERVORIO 23.	124
GRÁFICA 22: REPRESENTACIÓN DR VS LG (T+T'/T’) C15 – T2.	126
GRÁFICA 23: “DESCENSO – TIEMPO” C15 – T2.	127
GRÁFICA 24: “RECUPERACIÓN – TIEMPO” C15 – T2.	127
GRÁFICA 25: “DESCENSO – TIEMPO” RESERVORIO 27.....	128

LISTA DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1: LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.	5
ILUSTRACIÓN 2: ESCALA DE TIEMPO GEOLÓGICO PARA LAS UNIDADES QUE AFLORAN EN LA CUENCA. LAS CIFRAS REPRESENTAN EL TIEMPO EN MILLONES DE AÑOS.	24
ILUSTRACIÓN 3: COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DE LA FORMACIÓN CHIPAQUE MUNICIPIO DE MANTA.....	27
ILUSTRACIÓN 4: PERFIL ESQUEMÁTICO DE LA ESTRUCTURA DEL DEPÓSITO DE SAL DE ZIPAQUIRÁ.	36
ILUSTRACIÓN 5: GEOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO.	37
ILUSTRACIÓN 6: GEOLOGÍA ESTRUCTURAL DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	38
ILUSTRACIÓN 7: DIAGRAMA DE PIPER.....	47
ILUSTRACIÓN 9: MODELO PROPUESTO EN 3D PARA EL DOMO DE ZIPAQUIRÁ.....	79
ILUSTRACIÓN 10: CORTE GEOLÓGICO PARA LOS SONDEOS 1, 2 Y 3.....	85
ILUSTRACIÓN 11: CORTE GEOLÓGICO A PARTIR DE LOS SONDEOS 2, 4, 5 Y 6.....	89
ILUSTRACIÓN 12: HIDROGEOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	133

LISTA DE MAPAS

MAPA 1: CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA, PRECIPITACIÓN Y ALTURA DE LA SUB CUENCA DEL RIO NEGRO.	6
MAPA 2: COBERTURAS VEGETALES METODOLOGÍA DE CORINA LAND COVER.	7
MAPA 3: RED DE DRENAJES EN EL ÁREA DE ESTUDIO.	8
MAPA 4: MICROCUENCAS INTERSECTADAS.	9
MAPA 5: PUNTOS DE MUESTREO DE AGUAS.	44
MAPA 6: ISOYETAS - PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL.	60
MAPA 7: ISOTERMAS DE LA ZONA DE ESTUDIO	64
MAPA 8: DURACIÓN MEDIA EN HORAS POR AÑO DE BRILLO SOLAR.	66
MAPA 9: HUMEDAD RELATIVA PROMEDIO EN PORCENTAJE.	67
MAPA 10: EVAPORACIÓN MEDIA MENSUAL.	68
MAPA 11: EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIA MENSUAL EN LA SUBCUENCA HIDROGRÁFICA RIO NEGRO.	73
MAPA 12: ANOMALÍA RESIDUAL, YACIMIENTO DE SAL DE ZIPAQUIRÁ.	77
MAPA 13: LOCALIZACIÓN DE LOS SEV'S.	79
MAPA 14: LOCALIZACIÓN DE LOS SEV'S Y DEL RASTREO GEOELÉCTRICO.	81
MAPA 15: INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA.	91
MAPA 16: LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS DE ENSAYOS DE BOMBEO EN LAS LABORES MINERAS.	120
MAPA 17: MUESTREO PARA PROPIEDADES FÍSICAS.	131
MAPA 18: ZONAS DE RECARGA.	135

LISTA DE TABLAS

TABLA 1: COORDENADAS DEL POLÍGONO DE CONCESIÓN.	4
TABLA 2: PORCENTAJE DE LAS ÁREAS.....	9
TABLA 3: PARÁMETROS MORFOMÉTRICAS MICROCUENCA EL GAVILÁN.	10
TABLA 4: PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS QUEBRADA LA ARTESA.	11
TABLA 5: PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS QUEBRADA LA SALINA.	12
TABLA 6: COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DEL RUTE A PARTIR DEL ANÁLISIS QUÍMICO (MINA ZIPAQUIRÁ).....	18
TABLA 7: ANÁLISIS QUÍMICO DE MUESTRAS.....	19
TABLA 8: COORDENADAS DE LOS PUNTOS DE MUESTREO.....	45
TABLA 9: CLASIFICACIÓN MERCK.....	52
TABLA 10: CLASIFICACIÓN DE LA DUREZA DE LAS MUESTRAS DE AGUAS.	52
TABLA 11: SOLIDOS TOTALES.....	53
TABLA 12: ANÁLISIS QUÍMICO A MUESTRA TOMADAS EN ZIPAQUIRÁ.	57
TABLA 13: MINERALES PRESENTES EN LA SAL GEMA.	57
TABLA 14: TABLA COMPARATIVA DE LOS VALORES OBTENIDOS DE PRECIPITACIÓN EN EL PRESENTE ESTUDIO CON LOS VALORES CALCULADOS EN OTROS ESTUDIOS, PARA EL POLÍGONO DE CONCESIÓN.....	61
TABLA 15: NUMERO DE CURVA DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	62
TABLA 16: VALORES DE ESCORRENTÍA.	63
TABLA 17: VALORES MENSUALES DE ETP MÉTODO COMBINADO DE PENMAN MONTEITH.	69
TABLA 18: MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE LA ETP Y LAS RESPECTIVAS VARIABLES EMPLEADAS.	69
TABLA 19: CÁLCULO DE LA ETP - MÉTODO DE THORNTHWAIT.....	70
TABLA 20: COEFICIENTES DE REGRESIÓN, EN FUNCIÓN DE LA LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.....	71
TABLA 21: CÁLCULO DE LA ETP - MÉTODO DE L. TURC.....	71

**ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE
ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03**

TABLA 22: VALORES MEDIOS MENSUALES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN MÉTODO DE HARGREAVES.	72
TABLA 23: EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL MEDIA MENSUAL DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	73
TABLA 24: EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIA ANUAL.....	74
TABLA 25: COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.	75
TABLA 26: DATOS DE SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES.....	80
TABLA 24: INTERPRETACIÓN DEL SEV 1.	82
TABLA 25: INTERPRETACIÓN DEL SEV 2.	83
TABLA 26: INTERPRETACIÓN DEL SEV 3.	84
TABLA 27: INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL SEV 4.	86
TABLA 28: INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL SEV 5.	87
TABLA 29: INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL SEV 6.	88
TABLA 28: RELACIÓN DE PUNTOS DE AGUA POR FORMACIÓN.	90
TABLA 29: VALORES DE POROSIDAD.	92
TABLA 30: CUADRO XXX: VALORES DE POROSIDADES PARA ALGUNAS ROCAS.....	92
TABLA 31: TIPO DE ROCAS SEGÚN LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.....	93
TABLA 32: VALORES DE PERMEABILIDAD.	93
TABLA 33: CLASIFICACIÓN DE TERRENOS POR PERMEABILIDAD.....	94
TABLA 34: VALORES DE TRANSMISIVIDAD.	94
TABLA 35: CLASIFICACIÓN DE LOS TERRENOS POR SU TRANSMISIVIDAD.	95
TABLA 36: RESULTADOS CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA.	120
TABLA 37: DATOS DE RECUPERACIÓN RESERVORIO 27.....	129
TABLA 38: CÁLCULO Q DE INFILTRACIÓN R-27.	129
TABLA 39: PROPIEDADES FÍSICAS DE LA ROCA SALINA.....	131

ANEXOS

- Anexo 01: Mapa geológico
- Anexo 02-Resultados-Hidroquímica
- Anexo-03-Gráficas-por-elementos-discriminados
- Anexo 04 - Estaciones Hidrometeorológicas
- Anexo 05 - Método de las Isoyetas
- Anexo 06 - Precipitación Anual
- Anexo 07 - Estaciones Temperatura
- Anexo 08 - Valores de N, número de horas de sol
- Anexo 09 - Radiación Extraterrestre-Ecuación Budyko
- Anexo 10 - Inventario-puntos-de-agua-Zipacuirá
- Anexo 11 - Pruebas-de-bombeo
- Anexo 12 - Ensayo propiedades físicas
- Anexo 13 - Muestreo-propiedades-físicas

INTRODUCCIÓN

La concesión salinífera de Zipaquirá es otro de los más tradicionales componentes del patrimonio del Estado colombiano, con un desarrollo que se remonta a épocas precolombinas y con una clara consolidación a partir de 1931, cuando el Gobierno nacional optó por el sistema de concesión minera, en sustitución de la administración nacional que funcionó entre 1916 y 1928, la cual, a su vez había reemplazado el arrendamiento vigente en la época de la independencia e inicios de la Republicana.

La evolución técnica que ha tenido el área salinífera ha estado segmentada en dos etapas mineras bien diferentes, tangibles a la vista. Ellas corresponden a la explotación subterránea hecha hasta 1976 y que desde 2004 da asiento a la explotación turística, y la explotación por el método de la disolución in situ, el cual con sobresalientes limitaciones técnicas, económicas y jurídicas permite una restringida producción minera que impide aprovechar la potencialidad del mínimo costo, pese a que reporta los beneficios ambientales inherentes al método.

La historia, el presente y el futuro de la concesión, en lo minero y en lo turístico, demandan la disponibilidad de información clara y fidedigna, en consonancia con las tecnologías informáticas disponibles, para monitorear, evaluar y planear lo relativo a los temas geológicos, hidráulicos y de desarrollo de la infraestructura y de la estructura. Para estos efectos, tal como se visualizó, estipuló y aprobó en el Plan de Trabajos y Obras – PTO, se avanza en la estructuración y consolidación de un modelo geológico que permita, hasta en tres dimensiones, observar e interpretar cada uno de esos componentes y los parámetros asociados.

La infiltración de aguas superficiales dentro de las labores de la mina de sal de Zipaquirá está generando no solo problemas de inundación en ciertos puntos de la mina, sino también problemas de inestabilidad en los machones a causa de la disolución a la que se ve sometida la sal mineral al entrar en contacto con el agua. El depósito salino presenta unas condiciones estructurales de alto fracturamiento y diaclasamiento, y además se encuentra limitado por un sistema de fallas que pone en manifiesto las características hidrogeológicas de tipo secundario del yacimiento salino, este hecho incrementa los valores de infiltración de las aguas de escorrentía. Para analizar esta problemática con enfoque más detallado COLSALMINAS LTDA se propuso realizar un modelo hidrogeológico conceptual del área de concesión HIQO-03. Se ha tomado como metodología guía el PROGRAMA DE EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRANEAS, propuesto por el Instituto Colombiano de Geología y Minería en el año 2004, INGEOMINAS, actualmente llamado Servicio Geológico Colombiano, SGC. El presente documento constituye un informe final del desarrollo de la metodología en cuestión para la consecución de los objetivos propuestos.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Elaborar el modelo hidrogeológico conceptual de la mina de sal de Zipaquirá, en el área correspondiente al título minero HIQO-03.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar y analizar la información existente que sea de pertinencia para el estudio de la zona.
- Realizar la cartografía geológica a escala 1:10000 en base a la información existente y visitas de campo.
- Hacer un reconocimiento hidrogeológico con el fin de generar un inventario de puntos de agua.
- Interpretar la información de estudios geofísicos existentes y de ser posible elaborar estudios complementarios.
- Establecer un modelo geológico-geofísico a partir de los datos e información disponible.
- Determinar las características hidrogeoquímicas del área de estudio
- Hacer un análisis hidrológico de la zona de estudio.
- Evaluar las características hidrogeológicas en el área de interés.
- Elaborar el modelo hidrogeológico conceptual de la mina de sal de Zipaquirá

2 GENERALIDADES

2.1 EVOLUCIÓN DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRÁ

En el periodo precolombino los indígenas Chicaquiches explotaban la sal mediante el aprovechamiento de manantiales salados que precipitaban por evaporación para luego comercializar la sal, estos manantiales fueron nombrados por los indígenas locales como GUASÁ, que significa agua de sal.

Durante la colonia la explotación se hacía a tajo abierto en superficie, la roca que se extraía la denominaban shigua, que traduce Sal en piedra negra.

Ya en el siglo XIX se inicia la explotación tecnificada mediante el método de cámara y pilares, desde entonces hasta hoy se ha explotado en tres niveles

El primer nivel se denomina Guasá, corresponde a la parte superior del domo salino, se localiza a 2730 msnmm, se explotó desde 1834, mediante el sistema de cámaras y pilares, el método consistía en hacer columnas de 10 x 10 m y 20 m de alturas, en este nivel se construyó la antigua catedral de sal como un homenaje por parte de los mineros a su patrona, la Virgen de Guasá.

En 1876, bajo el nivel Guasá, a una cota de 2710 msnmm, se inició la explotación del segundo nivel, este recibe el nombre de Potosí, usando el mismo sistema de cámaras y pilares, su explotación se prolongó cerca de un siglo extrayéndose aproximadamente 15 millones de toneladas.

El nivel Fabricalta constituye en nivel inferior de la mina, su explotación se inició en 1979 a una cota de 2670 msnmm, en este nivel se empleó el entonces nuevo sistema de cámaras largas, que consiste en hacer socavones de hasta 200m de largo por 10 de ancho y 16 de alto, dejando vacíos de 19200 m³, el proceso de explotación por cámara tardaba aproximadamente un año. En este nivel se localiza la actual catedral de sal.

En la actualidad el método empleado para el aprovechamiento del yacimiento es el de disolución in-situ, que consiste en la perforación de pozos, donde se bombea el agua disolviendo la sal sólida en el agua y posteriormente se bombea la salmuera a la superficie en donde se seca para cristalizar la sal.

Hoy día son cinco las fuentes donde se extrae la sal en Colombia, en el extremo norte del país se encuentran dos de tipo marino la del municipio de Manaure en el departamento de La Guajira y la de la Galerazamba en el Bolívar, en Zipaquirá y Nemocón (Cundinamarca) y en Upín (Meta), se encuentran las otras tres fuentes.

A partir de 1970 el IFI – Concesión Salinas administraba todos los yacimientos salinos, con excepción de las salinas de Manaure, anterior al IFI Banco de la Republica era quien administraba estas explotaciones, a inicios del presente siglo y como lo estipula el decreto 685 del 2001 las salinas pasarían a entidades privadas mediante un contrato de concesión, desde entonces Colsalminas Ltda. cuenta con los contratos de concesión los complejos saliníferos de Zipaquirá y Nemocón.

En búsqueda de la optimización de las actividades de explotación de este mineral, son muchos los estudios que a lo largo del tiempo se han realizado en ambas concesiones, por su estrecha relación con el presente estudio cabe mencionar: El Balance Hídrico de la Mina de Sal de Zipaquirá, Estudio Geofísico Gravimetría y Geoeléctrica entre otros varios que se tomaron como punto de partida para el desarrollo del presente trabajo.

2.2 LOCALIZACIÓN

La zona de la concesión se encuentra ubicado en el Departamento de Cundinamarca, en el municipio de Zipaquirá, a 49 kilómetros al norte de la ciudad de Bogotá, con una extensión de 337 Ha y 4.717 m², definido por las siguientes coordenadas:

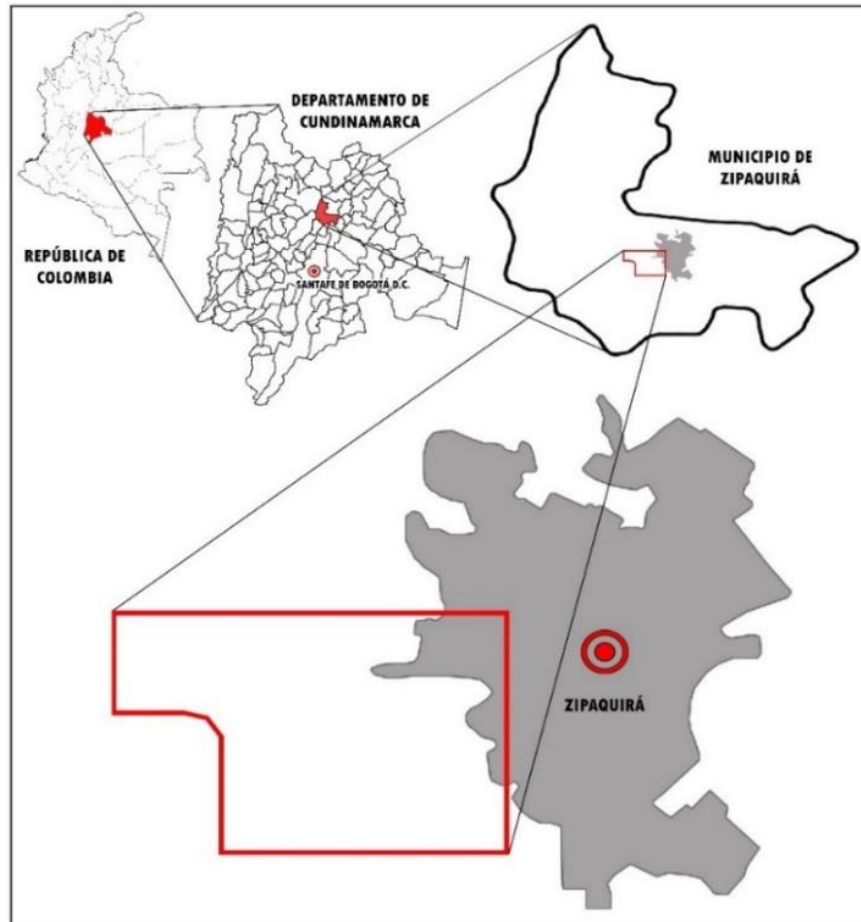
Tabla 1: Coordenadas del polígono de concesión.

LOCALIZACION Y DELIMITACION DEL AREA					
P. inicial	P. final	Rumbo	Distancia (m)	Norte	Este
PA	1	S00-00-00.00W	665,00	1047800,00	1005500,00
1	2	N90-00-00.00E	440,00	1047135,00	1005500,00
2	3	S76-51-57.51 E	154,03	1047135,00	1005940,00
3	4	S36-16-25.91 E	153,81	1047100,00	1006090,00
4	5	S00-00-00.00W	776,00	1046976,00	1006181,00
5	6	N90-00-00.02E	1819,00	1046200,00	1006181,00
6	7	N00-00-00.00E	1600,00	1046200,00	1008000,00
7	PA	S90-00-00.00W	2500,00	1047800,00	1008000,00

Fuente: Colsalminas Ltda.

La concesión incluye además 27 predios, denominados bienes afectos, en donde se incluye la Represa Pantano Redondo, que tiene un área de 330.88 ha, con un espejo de agua de 31 ha, ubicado a 3.160 m.s.n.m. y que cuenta con un volumen de agua superior a las 1,5 millones de m³. Dentro del polígono minero está el área minero industrial que mide 130.287 m² donde se encuentran ubicados el resto de bienes afectos que enumera el contrato de concesión y la planta de refinación de Convérsalo s.a., que actúa como centro de beneficio y transformación. Es válido aclarar que la extensión del presente trabajo está limitado únicamente a la parte minera de la concesión (polígono de concesión).

Ilustración 1: Localización del área de estudio.



Fuente: Autores.

2.3 VIAS DE COMUNICACIÓN

El municipio de Zipaquirá se encuentra localizado a 45 minutos de la ciudad de Bogotá en dirección Nor-oeste por vía pavimentada, a la vez limita con los municipios de Chía, Nemocón, Cajicá, Pacho, Sopó, Tausa, Cogua y Subachoque con los cuales también se comunica por carreteras pavimentadas. Por vía férrea se comunica con Bogotá, Chía, Cajicá y Nemocón.

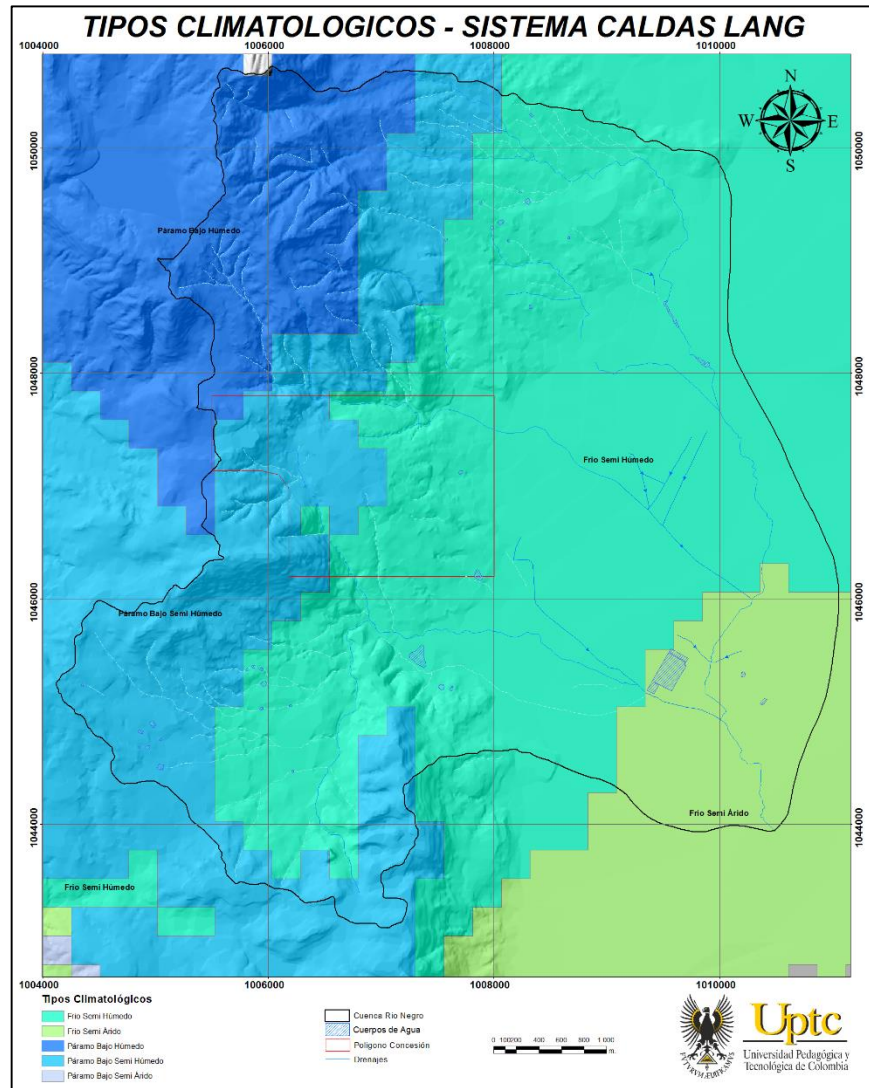
2.4 CLIMA

La temperatura promedio del área de estudio es de 12°C. La precipitación promedio mensual es de 83 mm, en los periodos de abril-mayo y octubre- noviembre se dan las mayores precipitaciones, anualmente el promedio de precipitación es de 1017 mm. La zona de estudio presenta una humedad relativa del 75 %. La clasificación climática se hizo en

ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03

base a la metodología de Caldas Lang que involucra las variables de temperatura, precipitación y altitud. De acuerdo a esta metodología los climas predominantes en la zona de estudio son Frio Semi Húmedo y Páramo Bajo Semi Húmedo tal como se muestra en el mapa 1 de tipos climatológicos generado con la ayuda de la extensión Map Algebra del programa ArcGis versión 10.3:

Mapa 1: Clasificación climática en función de la temperatura, precipitación y altura de la subcuenca del Rio Negro.

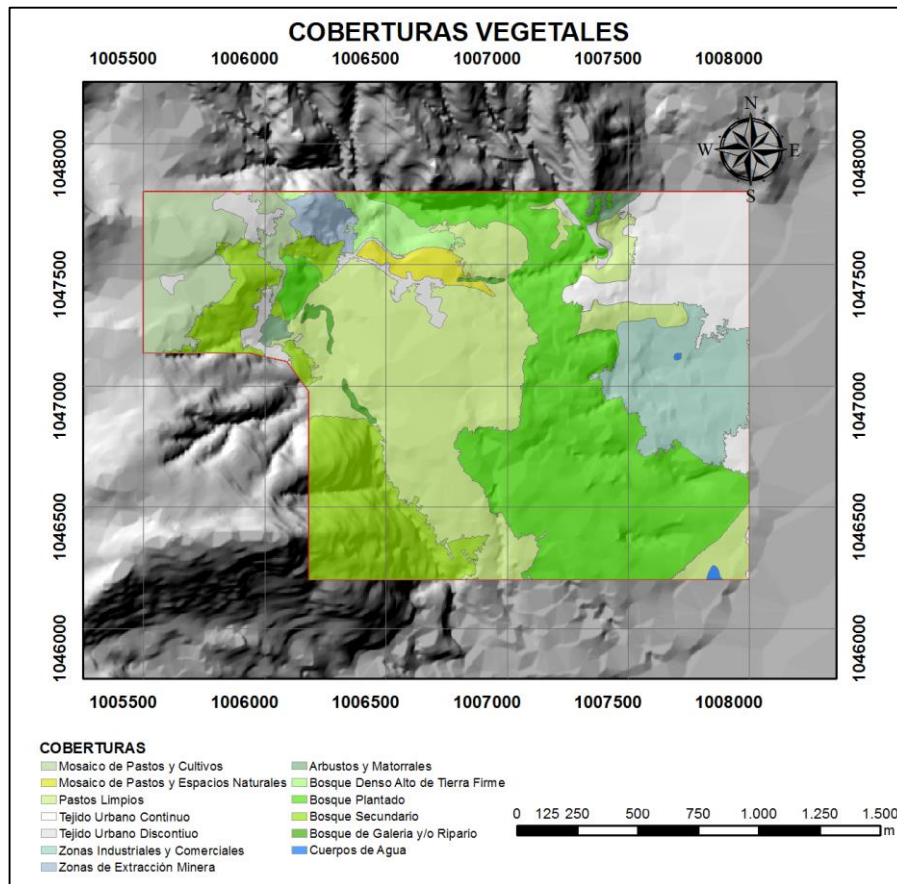


Fuente: Autores

2.5 VEGETACIÓN

Para la determinación de la cobertura vegetal se implementó la metodología de Corina Land Cover adaptada para Colombia (IDEAM, IGAC y CORMAGDALENA. 2008) y se tomó como base el mapa de coberturas del suelo del PMA de COLSALMINAS LTDA (2011) y el análisis multi temporal de las coberturas vegetales descrito en el estudio de la subcuenca del Rio Negro – CAR. La zona de estudio se caracteriza por el predominio de coberturas de tipo Pastos, Áreas Agrícolas Heterogéneas y Bosques.

Mapa 2: Coberturas Vegetales metodología de Corina Land Cover.



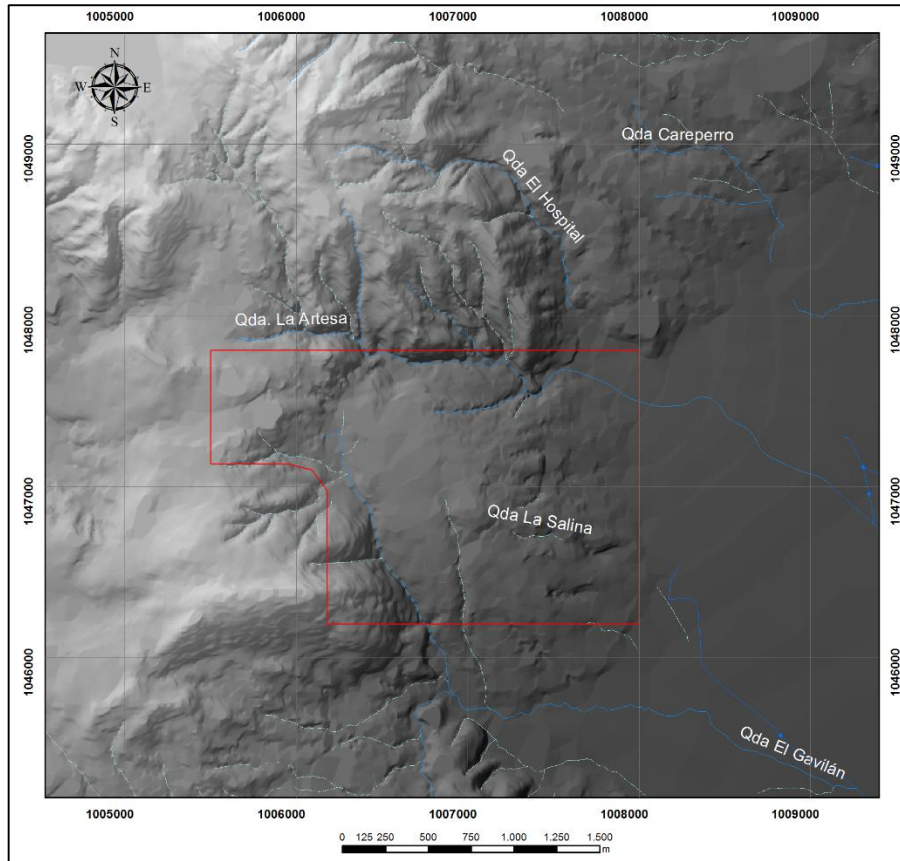
Fuente: Autores

2.6 HIDROGRAFÍA

El área de estudio se encuentra localizada en la sub cuenca del Rio Negro, la más pequeña de la cuenca del Rio Bogotá y tiene un área de 34.46 km² y está compuesta principalmente por las quebradas: El Gavilán, El Hospital, El Amolador y La Artesa. El polígono de concesión es intersectado por tres microcuencas a saber: El Gavilán, La Artesa y La Salina,

que se describen con más detalle en el apartado 2.7 Las aguas de estas tres quebradas no desembocan directamente en el Rio Negro puesto que han sido canalizadas para uso doméstico (PLANEACIÓN ECOLÓGICA & ECOFOREST, 2014)

Mapa 3: Red de drenajes en el área de estudio.



Fuente: Autores

2.7 FISIOGRAFÍA

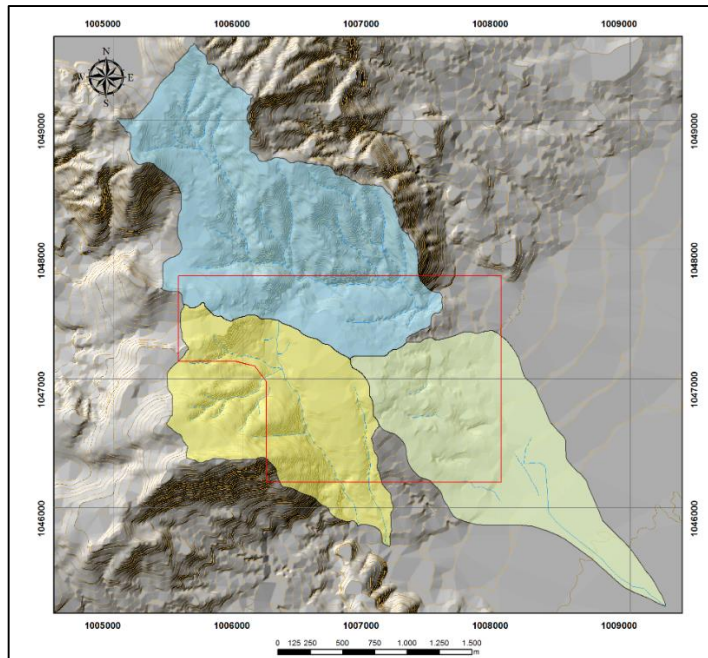
El domo salino se encuentra limitado en superficie por la quebrada La Artesa al norte, al occidente por la quebrada El Gavilán y al oriente por la terraza alta del Rio Bogotá. Como se mencionó anteriormente el polígono de concesión intersecta mayoritariamente tres de las microcuencas que componen la sub cuenca del Rio Negro, estas son El Gavilán, La Salina y La Artesa, el área de intersección total es de 3 km² y los 0.37 km² restantes corresponden a otras microcuencas, por esta razón el análisis morfométrico se realiza solo para las tres microcuencas citadas.

Tabla 2: Porcentaje de las áreas.

Quebrada	Área de Intersecto km ²	Porcentaje de área	Área Polígono de Concesión km ²
El Gavilán	1.13	33.53115727	3.37
La Salina	1	29.6735905	
La Artesa	0.86	25.51928783	
Σ	2.99	88.72403561	

Fuente: Autores.

Mapa 4: Microcuencas intersectadas.



Fuente: Autores.

2.8 DESCRIPCIÓN MORFOMÉTRICA DE LAS MICROCUENCAS

2.8.1 Microcuenca El Gavilán

La Microcuenca El Gavilán tiene un área de 1.86 km² y una longitud aproximada de 2.4 km. El cauce principal discurre sobre la falla de Zipaquirá y su longitud es de 1.76 km, nace a una altura de 2880 m.s.n.m. es un drenaje de tipo 3 (Clasificación de cauces- Horton, PLANEACIÓN ECOLÓGICA & ECOFOREST, 2014). La pendiente media de la Microcuenca es del 17%, según la clasificación de pendientes de la FAO, el relieve es

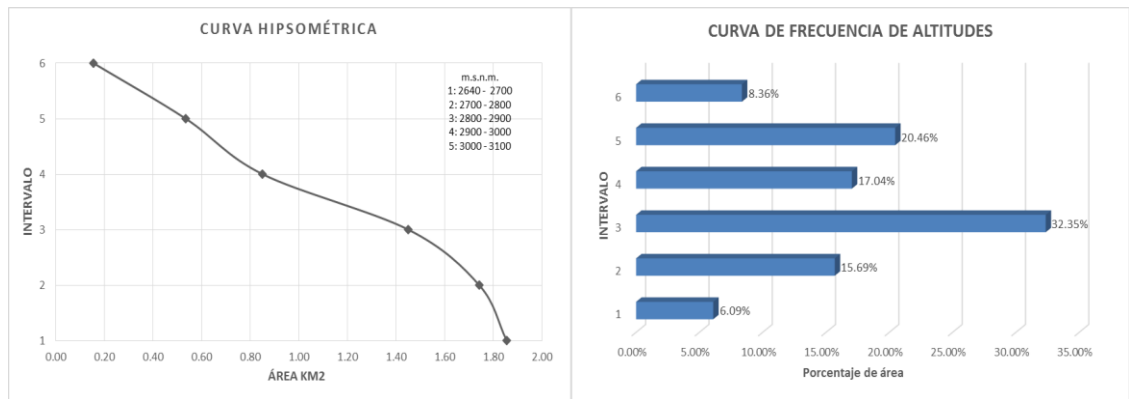
fuertemente ondulado – fuertemente inclinado. Según la curva hipsométrica es una cuenca en estado de madurez es decir con un mediano potencial erosivo.

Tabla 3: Parámetros morfométricas Microcuenca El Gavilán.

PARAMETROS	UNIDADES	Quebrada El Gavilán
Área de una cuenca	km ²	1.865
Perímetro de la cuenca	km	6.48
Longitud de la cuenca	km	2.4
Longitud del Cauce Principal	km	1.77
Cota Inicial Cauce Principal	m.s.n.m	2880
Cota Final Cauce Principal	m.s.n.m	2660
Longitud Total de Cauces	km	6.61
Ancho de la cuenca	km	0.78
Altitud media de la Cuenca	m.s.n.m	2904.3
Factor de Forma	-	0.32
Relación de Elongación	-	0.64
Relación de circularidad	-	0.56
Índice de Compacidad	-	1.33
Pendiente media de la cuenca	%	17.08
Pendiente media del cauce principal	%	12.46
Densidad de Drenaje	-	3.54

Fuente: Autores.

Gráfica 1: Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes.



Fuente: Autores.

2.8.2 Microcuenca La Artesa

Esta quebrada nace hacia el norte de la zona de estudio a una altura de 2999 m.s.n.m. y tiene una longitud de 2.2 km, discurre sobre la falla definida que hereda su nombre y tiene más afluentes que la quebrada El Gavilán entre tipos 1 y 2, esta es una quebrada de tipo 3 (Clasificación de cauces- Horton, PLANEACIÓN ECOLOGICA & ECOFOREST, 2014). La Microcuenca La Artesa tiene una pendiente media de 19 % es decir un relieve fuertemente ondulado a fuertemente inclinado. Aproximadamente solo el 30% del área de esta

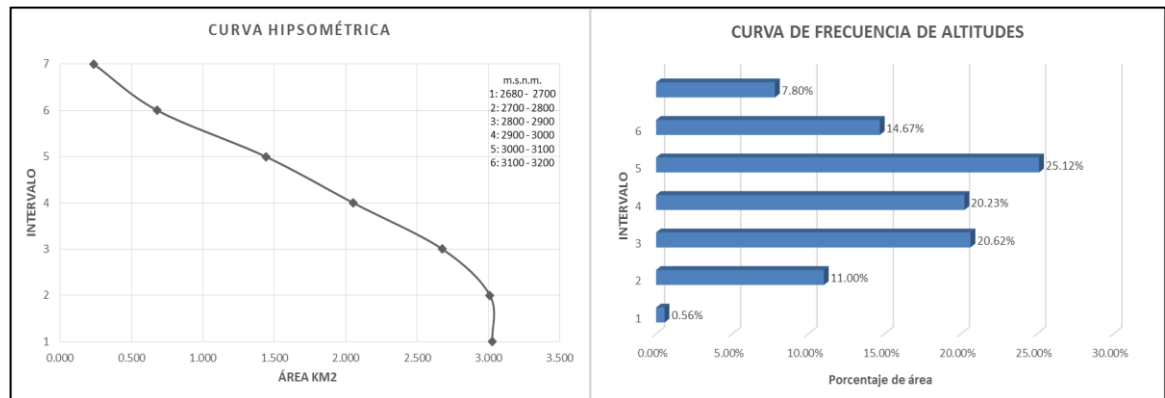
Microcuenca se ubica dentro del polígono de concesión. La curva hipsométrica indica un estado de madurez con un potencial de erosión medio.

Tabla 4: Parámetros morfométricos quebrada La Artesa.

PARAMETROS	UNIDADES	Quebrada La Artesa
Área de una cuenca	km ²	2.96
Perímetro de la cuenca	km	8.69
Longitud de la cuenca	km	2.7
Longitud del Cauce Principal	km	2.2
Cota Inicial Cauce Principal	m.s.n.m	2999.06
Cota Final Cauce Principal	m.s.n.m	2680
Longitud Total de Cauces	km	11.4
Ancho de la cuenca	km	1.1
Altitud media de la Cuenca	m.s.n.m	2982
Factor de Forma	-	0.41
Relación de Elongación	-	0.72
Relación de circularidad	-	0.49
Índice de Compacidad	-	1.41
Pendiente media de la cuenca	%	19.55
Pendiente media del cauce principal	%	14.5
Densidad de Drenaje	-	3.85

Fuente: Autores.

Gráfica 2: Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes quebrada La Artesa.



Fuente: Autores.

2.8.3 Microcuenca La Salina

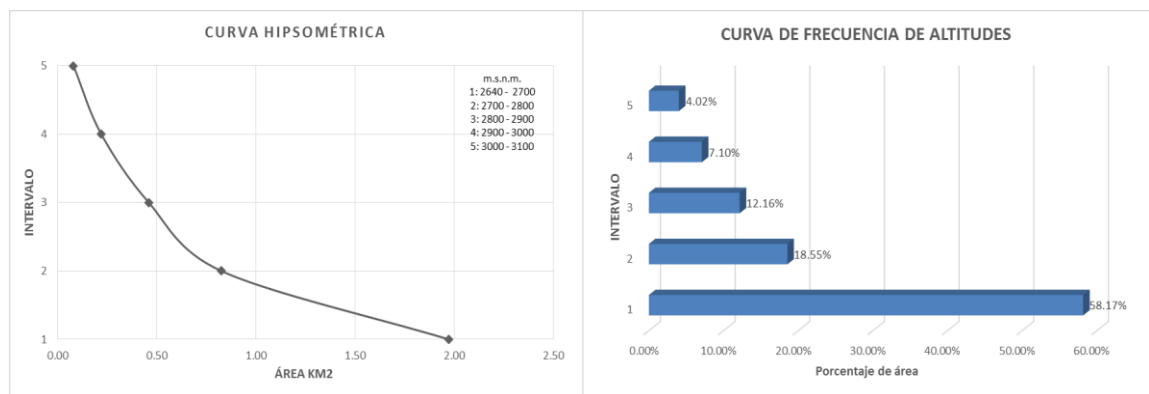
Esta quebrada no es un afluente directo del río Negro, es drenaje de tipo intermitente sus aguas son captadas y llevadas finalmente a la planta de tratamiento de agua de Zipaquirá. El área de la Microcuenca es de 1.97 km² y la longitud del cauce principal es de 1.13 km. Es una cuenca con bajo potencial erosivo como lo indica la curva hipsométrica.

Tabla 5: parámetros morfométricos quebrada La Salina.

PARAMETROS	UNIDADES	Quebrada La Salina
Área de una cuenca	km ²	1.97
Perímetro de la cuenca	km	7.16
Longitud de la cuenca	km	3.3
Longitud del Cauce Principal	km	1.13
Cota Inicial Cauce Principal	m.s.n.m	2750
Cota Final Cauce Principal	m.s.n.m	2594
Longitud Total de Cauces	km	4.72
Ancho de la cuenca	km	0.6
Altitud media de la Cuenca	m.s.n.m	2661
Factor de Forma	-	0.18
Relación de Elongación	-	0.48
Relación de circularidad	-	0.48
Índice de Compacidad	-	1.43
Pendiente media de la cuenca	%	12.04
Pendiente media del cauce principal	%	13.81
Densidad de Drenaje	-	2.39

Fuente: Autores.

Gráfica 3: curva hipsométrica y frecuencia de altitudes quebrada La Salina.



Fuente: Autores.

2.9 SUELOS

Los suelos presentan características variadas, no obstante se destacan por que presentan pH ligeramente ácidos, moderada a alta saturación de aluminio, moderada saturación de bases, moderados contenidos de carbón orgánico, bajos contenidos de fósforo, potasio y calcio. En general, los suelos son de fertilidad moderada a alta.

Desde el punto de vista físico, presentan texturas moderadamente finas, estructuras moderadas a fuertes, densidades aparentes medias en suelos originados a partir de rocas y bajas en aquellos que son producto de la evolución de cenizas volcánicas y una alta susceptibilidad a la erosión hídrica cuando son desprovistos de vegetación (PLANEACIÓN ECOLOGICA & ECOFOREST, 2014).

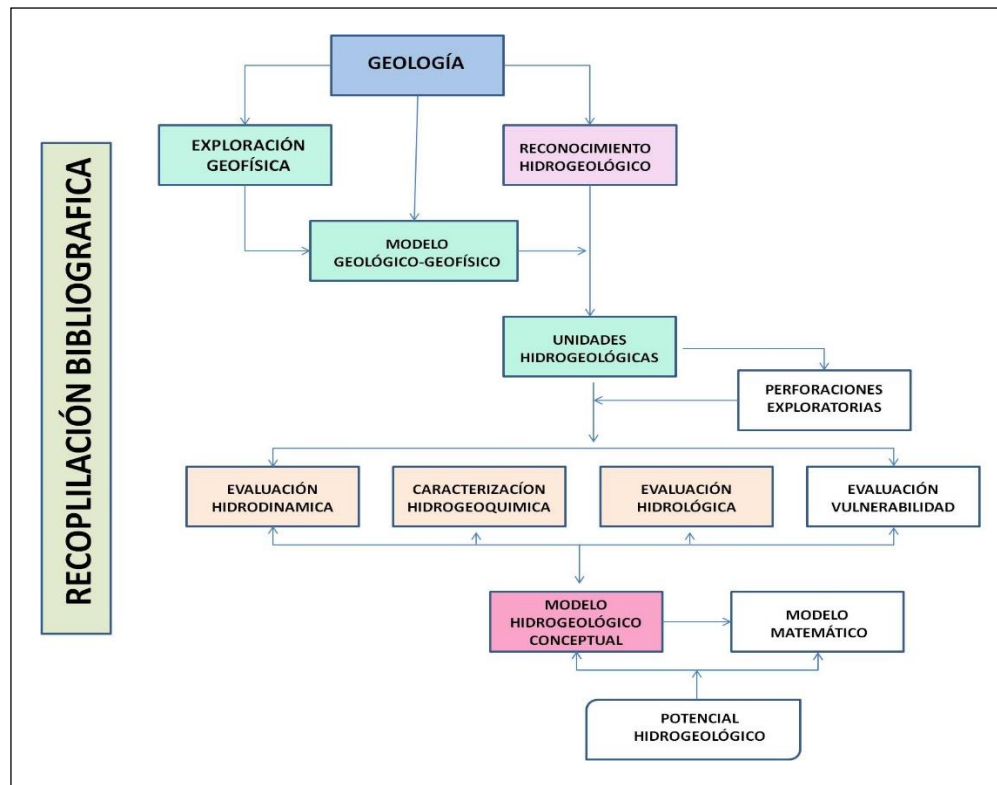
Los suelos que se encuentran en la zona de estudio están caracterizados por tener una textura gruesa, lo que indica un porcentaje menor del 18 %. Son suelos con absorción y

conducción rápida de agua y baja retención de humedad, por lo cual se desecan con facilidad. Presentan baja retención de nutrientes y son fáciles de manejar con maquinaria agrícola.

3 METODOLOGÍA GENERAL PARA LA EXPLORACIÓN Y EVALUACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

INGEOMINAS, actualmente Servicio Geológico Colombiano – SGC, definió en el año 2004 pautas claras para la exploración y evaluación de aguas subterránea. Se deben tener en cuenta estudios como hidrogeológicos de reconocimiento, de escala regional y local con el fin de determinar y caracterizar las estructuras geológicas en el área de interés. Adicionalmente se debe tener en cuenta la información geológica como punto base para definir las propiedades de la roca y estructuras favorables para almacenar agua subterránea. Por lo tanto para poder realizar un estudio detallado se ejecutan actividades tales como la exploración geofísica e inventarios de puntos de agua entre otros (Díaz Zerrate C. & Oltávaro J.J.). Para elaborar el modelo hidrogeológico conceptual del polígono de concesión HIQO-03, se partirá de esta metodología exceptuando la evaluación de vulnerabilidad y el modelo matemático debido al enfoque del proyecto. Diagrama 1.

Diagrama 1: metodología de exploración hidrogeológica.



Fuente: INGEOMINAS 2004.

Las etapas de esta metodología se describen a continuación:

✓ **Geología**

La geología es la información base para los estudios hidrogeológicos ya que define las propiedades de las rocas y las estructuras geológicas favorables para el flujo de agua subterránea. La cartografía geológica debe realizarse haciendo énfasis en la litología, textura, cambios de facies, tipo de porosidad, ambientes de deposición, estructuras tectónicas y geomorfológicas, así como composición mineralógica de los sedimentos y rocas.

En el desarrollo del proyecto se utilizarán las siguientes herramientas y disciplinas: interpretación de fotografías aéreas, imágenes de radar y satélite, estratigrafía, sedimentología y geología estructural.

✓ **Exploración geofísica**

La geofísica estudia las propiedades físicas del subsuelo y permite correlacionarlas con la geología, lo cual en el caso de la exploración de aguas subterráneas contribuye a determinar la presencia y la geometría de los acuíferos o zonas acuíferas y la obtención de un modelo conceptual.

La exploración geofísica se utiliza también para la estimación del nivel de la profundidad del agua subterránea, definición del espesor de la zona no saturada, estimación de la porosidad de la roca, así como la contribución a la identificación de los ambientes de deposición y determinación del grado de mineralización de las aguas subterráneas, localización de fracturas, identificación de reservorios geotérmicos y aguas termales. En este estudio se hará uso de la resistividad y posiblemente como recomendación la sísmica.

✓ **Reconocimiento hidrogeológico**

El reconocimiento hidrogeológico es la fase esencial e inicial en exploración de aguas subterráneas y se hace mediante recolección de datos en el campo mediante el inventario de puntos de agua, discriminados en manantiales, aljibes, pozos y humedales, corrientes y cuerpos de agua.

Los datos obtenidos en esta fase son la base para clasificar y caracterizar las unidades geológicas y así determinar las características hidrogeológicas preliminares del área.

✓ **Evaluación hidrodinámica**

La evaluación hidrodinámica de las aguas subterráneas se refiere al estudio de su movimiento en las rocas y sedimentos, desde las zonas de recarga hacia las de descarga (dirección del flujo subterráneo). Los principales elementos hidrodinámicos son: la presión piezométrica, el gradiente y los parámetros hidráulicos del acuífero (conductividad

hidráulica, transmisividad y coeficiente de almacenamiento) que caracterizan el flujo y almacenamiento de agua en los diferentes acuíferos. Los parámetros hidráulicos se determinaran a partir de ensayos de acuífero (pruebas de bombeo).

✓ **Caracterización Hidrogeoquímica**

La Hidrogeoquímica trata sobre el origen, los procesos y la evolución de la composición del agua almacenada en las unidades hidrogeológicas (acuíferos). Esta es una herramienta básica que, aporta información al modelo hidrogeológico conceptual como identificación de zonas de recarga y descarga, dirección del flujo subterráneo, mezclas e interconexiones de agua de diferentes orígenes (aguas superficiales y subterráneas, entre acuíferos), identificación de ocurrencias de aguas termales y minerales.

✓ **Evaluación hidrológica**

Las aguas atmosféricas, superficiales y subterráneas hacen parte del mismo ciclo hidrológico y se encuentran constantemente en interacción. Además, la principal fuente de alimentación de las aguas subterráneas son las aguas meteóricas. Por lo anterior, es de gran importancia la evaluación de las condiciones meteorológicas e hidrológicas, para contribuir al modelo hidrogeológico e información de posibles fuentes y zonas de recarga y descarga de aguas subterráneas y disponibilidad del agua para la recarga (balance hídrico superficial).

✓ **Modelo hidrogeológico conceptual**

El conocimiento hidrogeológico del área se representa a través del modelo hidrogeológico conceptual, el cual es un esquema lógico, tanto a nivel cualitativo como cuantitativo, que describe las propiedades, condiciones, procesos y potencialidades de los acuíferos. Este modelo permite entender el funcionamiento de los acuíferos, incluyendo aguas termales y minerales, para predecir su comportamiento e interacción con yacimientos, en este caso, el domo salino.

4 GEOLOGÍA

4.1 GEOLOGÍA REGIONAL

El área de estudio se localiza en la subcuenca del Rio Negro, que corresponde a la cuenca alta de la sabana de Bogotá, en el municipio de Zipaquirá ubicado dentro de la Plancha Geológica 209, localizada en la parte central de la Cordillera Oriental y está conformada por rocas de origen marino y continental. Las unidades estratigráficas presentan edades que van desde el cretáceo, pasando por el paleógeno-neógeno, hasta llegar a depósitos cuaternarios de diferente origen, dispuestas en amplios sinclinales y estrechos anticlinales

Las estructuras de la Sabana de Bogotá fueron el resultado de una combinación de mecanismos de tectónica de zócalo, diapirismo, erosión (que produce discontinuidad de los estratos durante las últimas etapas de deformación) y fenómenos gravitatorios (Juliver, 1963). La acción de la gravedad permite la formación de estructuras por colapso especialmente en la Formación Plaeners; alguna de estas estructuras son: inversiones de determinados niveles, en los flancos de los pliegues originados por deslizamientos, formación de fallas por estiramiento y rotura en relación con el flanco inverso de las estructuras, inversión por gravedad de capas que han sido llevadas por otras causas hasta la vertical y replegamientos.

4.2 GEOLOGÍA HISTÓRICA

La secuencia sedimentaria cretácica de 3.200 m de espesor de la Plancha 209 se depositó en una cuenca con un mar somero; a partir del Albiano cesa la fase extensiva, comienza una inversión tectónica y se inicia una regresión con oscilaciones que terminan a comienzos del Paleógeno y da lugar a un ambiente continental en el cual se depositaron aproximadamente 2.400 m. En el Neógeno se dio un ambiente tectónico compresivo que deformó la pila sedimentaria que constituye la actual Cordillera Oriental.

Desde el límite entre el Jurásico y Cretácico inicia una transgresión marcada por algunas tendencias regresivas en el cretácico superior. Desde el Hauteriviano tardío en ambientes someros inicia la depositación del grupo Caqueza posteriormente en el Barremiano tardío se dan las condiciones para la sedimentación de fauna bentónica y fragmentos bioclásticos. A medida que el nivel del mar ascendía la acumulación de material más arcilloso era mayor y en los puntos de somerización de la sucesión aumentaba el contenido arenoso. En el cretáceo superior, Albiano – Cenomaniano, se presentaron dos caídas del nivel del mar separados por una etapa de transgresión, en las que se depositaron, predominantemente, arenas cuarzosas duras. Posterior a estos episodios se inicia la máxima profundización de la cuenca donde tuvo lugar la depositación de la Formación Chipaque (Coniaciano – Santoniano). El periodo Cretácico superior – Paleoceno, es considerado un sistema deposicional, en un ambiente de costa marina somera, tuvo lugar la depositación de la

Formación Guaduas. Durante el Paleógeno medio se generaron espacios de acomodación depositándose sedimentos de grano grueso de origen fluvial y ya en el Oligoceno Temprano - Mioceno se da el levantamiento de la Cordillera Oriental.

4.3 GEOLOGIA DEL YACIMIENTO

4.3.1 Edad del Depósito

La secuencia de Zipaquirá parece haberse depositado durante el Turoniano y comienzos del Coniaciano. Todas las evidencias, hasta el momento, sugieren que los depósitos de sal de la sabana de Bogotá están en la formación Chipaque; pero es difícil precisar su posición estratigráfica dentro del Chipaque por carencia de buenos afloramientos, complicaciones estructurales y variaciones de espesor de la formación. Por años ha existido una controversia entre los estudiosos acerca del origen estratigráfico (UJUETA, 1971) o diapírico (MACLAUGHLIN, 1971) del depósito de sal de Zipaquirá. Maclaughlin expone que la edad Jurásica se explica como una incursión marina, en el Liásico de carácter temporal en una cuenca continental con clima desértico; se afirma que la formación de la sal se llevó a cabo después de movimientos orgánicos del Triásico que causaron deformaciones tectónicas y una posterior incursión marina Liásica que dejó a su retiro depósitos de evaporitas.

Esta teoría contempla la posibilidad de formación del yacimiento salino con la Formación Girón, que se caracteriza por una facie continental marina y por un clima árido, siendo estos factores favorables para la acumulación de depósitos evaporíticos. A esta hipótesis de origen Jurásico de la sal se le anteponen la ausencia de depósitos Liásicos y Triásicos en el Departamento de Cundinamarca y la no presencia de testigos paleontológicos que denote la existencia de estos períodos. Ujueta propone una formación Cretácea de la sal, considerándola contemporánea con los sedimentos de la formación y enuncia que los bancos de sal están localizados en las pizarras negras del piso del Villeta en la Cordillera Oriental tales como las de Zipaquirá y Nemocón. La falta de remanentes liásicos dentro de la masa inyectada es un argumento fuerte en contra del origen jurásico de la sal y se supone que la sal inyectada está cerca de su posición estratigráfica original. Según un estudio de los geólogos de la Comisión de la Industria Minera (INGEOMINAS, 1971), se determinó que los yacimientos de sal de Zipaquirá están relacionados con doblamientos de anticlinales casi volcados denominados anticlinales isoclinicos.

El ambiente deposicional, explica que todas las ocurrencias de evaporitas parecen estar localizadas con aguas marinas ya sea como cuencas localmente aisladas de mar abierto, extensiones lagunares o apéndices del mar. La principal suposición que se hace es que los depósitos de sal deben ser de origen marino. Los requerimientos básicos para que se formen tales depósitos son principalmente el desarrollo de un umbral como restricción de

la cuenca marginal y el mar abierto, y un clima favorable durante períodos de tranquilidad tectónica.

4.3.2 Litología del Yacimiento

Rute: El término minero de uso local lo introdujo en la literatura geológica R. Scheibe (T933, P.51-59). El Rute es un residuo insoluble de estratos saliníferos, el cual permanece después de que se ha producido la lixiviación de la sal por aguas meteóricas. La mayor parte del rute es una arcilla maciza, negra, blanda y margosa que contiene fragmentos de arcillolita negra margosa laminar a maciza de varias dimensiones. La Pirita es común en el Rute y los fragmentos de arcillolitas o como granos diseminados. El Rute que ha sido completamente meteorizado es de color canela o gris, cuya calificación constituye un porcentaje muy bajo.

Tabla 6: Composición Mineralógica del rute a partir del análisis químico (Mina Zipaquirá).

Minerales Compuestos	%
Halita	17,5
Pirita	6,5
Anhidrita	11,9
Calcita	18,7
Magnesita	7,5
Minerales arcillosos	32,3
Materia Orgánica	5

Fuente: MCLAUGHLIN, Donald H, Compilación de estudios geológicos de Colombia: Recursos minerales de Cundinamarca y Boyacá. Bogotá: Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras, 1971.

Halita: En la mina de Zipaquirá se puede observar sal gema pseudo-estratificada. La sal es litológicamente similar al depósito de Nemocón y Upin. El tamaño de cristales de la halita va desde aproximadamente 2 mm hasta 5 mm; la Halita varía en color desde gris claro hasta gris oscuro dependiendo de la cantidad de impurezas carbonoso-arcillosas. También se observan localmente lentes y parches irregulares de sal blanca y afanítica pura.

Tabla 7: Análisis Químico de Muestras.

Nombre	Compuesto	Porcentaje Promedio
Cloruro de Sodio	NaCl	88%
Oxido de Potasio	k ₂ O	0,32%
Oxido de Calcio	CaO	1,86%
Oxido de Magnesio	MgO	0,50%
Sulfato	SO ₄	0,50%
Insolubles	-----	9%

Fuente: ESTUDIO IFI Concesión Salinas. Zipaquirá: Publicación IFI. 1975 - 1984. 10 P.

Arcillas y pequeñas partículas de arcillolitas abundan en la sal y comúnmente se distribuyen a lo largo de los planos de estratificación originales de la Halita. Capas de Halita más arcillosas alternan con otras menos arcillosas de colores más claros lo que da a la roca una apariencia bandeada característica, observable en las labores mineras. En Zipaquirá la sal contiene abundantes fragmentos pequeños a diminutos de arcillolita gris oscura. En muchos lugares la facies bandeada parece pasar lateralmente a la facie maciza en unos pocos metros.

Capas y Fragmentos de Arcillolita. Fragmentos de arcillolita se encuentran en abundancia. Van desde pequeñas escamas de menos de 1 mm hasta unos pocos cuerpos de cerca de 1 m de diámetro; la mayoría fluctúa en centímetros de diámetro. Los fragmentos están distribuidos erráticamente dentro del conjunto de la halita. El material arcilloso asociado con el depósito de sal se derivó por la erosión de la arcillolitas que bordeaban las cuencas evaporíticas. El material fue transportado periódicamente a la cuenca y floculado por las salmueras. La abundancia de este material sugiere que el proceso continuó esencialmente ininterrumpido durante la depositación de la sal.

4.3.2.1 Características petrográficas de la sal de Zipaquirá

La descripción petrográfica de la sal de roca de la mina de Zipaquirá, fue detallada en el informe elaborado el 18 de junio de 1975 por el Dr. Wolfgang Dreyer, para la Concesión de Salinas IFI - Colombia. El muestreo de la sal de roca se limitó a tres prototipos representativos de muestra.

- **Prototipo 1** Muestras de la sal de roca sin estratificación reconocible.
- **Prototipo 2** Muestras de la sal de roca con estructura estratificada. Esta roca tiene un porcentaje de insolubles un poco mayor que el prototipo anterior, además la

estratificación es una característica representativa la cual determina sus condiciones de resistencia. Es el prototipo predominante en la mina de Zipaquirá.

- **Prototipo 3** Muestras de la sal con inclusiones de material arcilloso en nudos y de otros compuestos minerales insolubles.

4.3.2.1.1 Descripción Petrográfica del Primer Prototipo de Muestra.

Los granos de sal bien ligados entre si presentan en diámetro medio granular de unos 3 mm. Los componentes insolubles constituidos de minerales arcillosos, anhidrita y polihalita se encuentran en mayor parte intercalados entre granos de cristales de sal. En promedio asciende el contenido de impurezas de las muestras a 7%. La roca de sal posee la mayor resistencia sin anisotropía resistencial.

4.3.2.1.2 Descripción Petrográfica del Segundo Prototipo de Muestra.

La roca claramente estratificada muestra en la dirección de los planos de estratificación cristales de sal ligeramente alargados. Se alternan sustancias arcillosas asociadas de anhidrita y polihalita con capas laminares de sal de roca en espesores muy variables. El contenido total de insolubles arrojó en promedio 12%.

4.3.2.1.3 Descripción Petrográfica del Tercer Prototipo de Muestra.

La roca muy poco homogénea posee la menor resistencia. Las inclusiones de tipo de nudos cuyo diámetro asciende en promedio a 9 mm forman puntos débiles en el conjunto de la matriz de sal. Las impurezas varían alrededor del 20 %.

4.3.2.1.4 Descripción petrográfica reciente.

Se hizo una descripción petrográfica general en el laboratorio de petrografía de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia con ayuda de una lupa binocular, la determinación de los colores se hizo en base a la carta de Colores de MUNSSELL, 1975, los resultados se muestran a continuación:

El color de las muestras varía de gris muy claro 8N8 a negro grisáceo 2N2, pasando por las tonalidades intermedias.

Foto 1: Análisis petrográfico con lupa binocular.



Fuente: Autores

La halita constituyente de las muestras en su mayoría posee cristales bien formados en colores que van de gris muy claro 8N8 a blanco 9N9, estos cristales presentan una fractura desigual, con un brillo vítreo, de transparente a traslucido, con una exfoliación perfecta, además de un comportamiento frágil, un hábito cristalino cubico, una raya blanca y una dureza de 2 a 2,5 según la escala de Mohs; en algunos casos la Halita presenta friabilidad.

Foto 2: Muestra de Sal roca.



Fuente: Autores.

Foto 3: Muestra de Sal Roca.



Fuente: Autores.

Las muestras estaban constituidas entre un 7 y 20% de lutitas, de las cuales el 90% son de color gris oscuro 3N3 y en algunos casos es posible identificar algún tipo de estratificación en estas inclusiones arcillosas, estas arcillas tienen una reacción de pobre a alta ante el ataque con HCl, en ocasiones estos fragmentos líticos arcillosos se encuentran rodeados de Hematita y cristales de Pirita. Además, en estos fragmentos se encontraron fisuras y diaclasa que pueden o no estar rellenas de Hematita y/o Halita, estas arcillas son frágiles, friables, tiznan el dedo y con raya gris medio 5N5.

Foto 4: Fisura en lutita rellena de Halita y Hematita.



Fuente: Autores.

Foto 5: Muestra de Halita con cristal de pirita.



Fuente: Autores.

El 10% restante de los fragmentos arcillosos presentan color gris oliva claro 5Y 6/1 y no presentan reacción alguna al ataque con HCl, a estos fragmentos puede observarseles interstratificación con pirita y Halita; Tienen raya blanca 9N9, son frágiles y friables. Como minerales accesorios se identificaron: pirita, y Hematita.

Foto 6: Cristal de Halita manchado por Oligisto.



Fuente: Autores.

4.4 ESTRATIGRAFÍA

En la subcuenca de río Negro de base a techo afloran unidades litológicas con edades entre el Cretácico y el Cuaternario correspondiendo a la Formación Chipaque, el Grupo Guadalupe, y las Formaciones Guaduas, Cacho, Bogotá y depósitos aluviales. La cartografía geológica se elaboró con una base topográfica 1:10.000 del IGAC, visitas de campo y correlación de mapas geológicos ya existentes pero diferentes escalas.

Ilustración 2: Escala de tiempo geológico para las unidades que afloran en la cuenca. Las cifras representan el tiempo en millones de años.

Unidades de tiempo		Región Oriental	
Cuaternario	Holoceno 0.01	Depósitos Cuaternarios	
	Pleistoceno 1.6		
Terciario	Plioceno 5.3	Formación. Tilatá	
	Mioceno 23.7		
	Oligoceno 36.6		
	Eoceno 57.8	Formación. Regadera Formación. Bogotá Formación. Cacho	
	Paleoceno 66.4	Formación. Guaduas	
Cretácico (144)	Maastrichtiano	Grupo Guadalupe	Formación. Labor - Tierna
	Campaniano		Formación. Plaeners
			Formación. Arenisca Dura
	Santoniano	Grupo Villeta	Formación. Chipaque
	Coniaciano		
	Turoniano		Formación. Une
	Cenomaniano		
	Albiano		
	Aptiano		Formación. Fómeque
	Barremiano		
	Hauteriviano	Grupo .Cáqueza	
	Valanginiano		
	Berriasiano		
	Jurasico (208)		
TRIASICO (245)			

Fuente: PLANEACIÓN ECOLOGICA & ECOFOREST.

4.4.1 Formación Chipaque (K₂CP)

Descrita por Hubach en 1931 inicialmente y Renzoni en 1962 le dio el rango de Formación. Genera una morfología deprimida, hecho que se acrecienta al ser infra y suprayacida por unidades arenosas. Está constituida por lutitas negras con esporádicas intercalaciones de calizas principalmente hacia la parte inferior alta, en la parte superior se presentan intercalaciones de areniscas cuarzosas, grises claras a oscuras, de grano fino y capas de carbón.

4.4.1.1 Litología:

La zona de estudio carece de buenos afloramientos de la Formación Chipaque que permitieran levantar una columna estratigráfica, sin embargo en las visitas de campo se describieron en la vía que comunica al municipio de Zipaquirá con el municipio de Pacho unas intercalaciones de capas de arenisca de hasta 10 m de espesor de grano fino a medio, con buena selección y con cemento silíceo, patinas de hierro con capas de lutitas negras fisibles altamente expuestas a la meteorización, esta sección puede correlacionarse con la parte alta de la formación Chipaque, segmento D. En este sector las se marca un complejo estructural que llega a verticalizar las capas de lutitas. En la memoria explicativa de la plancha 209 la Formación Chipaque se describe como una secuencia de grano fino, los materiales en posición estratigráfica ascendente son arcillas, material silíceo y arenas medidos en 4 segmentos A, B, C Y D en el municipio de Manta, al oriente de la Plancha, que suman un espesor de 1027 m.

Segmento A: 80 m de arcillolitas gris oscuras con gran cantidad de micas y presencia de restos de troncos y carbón. Presenta estructuras internas como laminación discontinua y ondulosa dada por areniscas de grano muy fino y hacia la parte superior se observan concreciones ferruginosas.

Segmento B: Horizonte silíceo de 15 m que forma relieve; hacia la base se presentan intercalaciones de limolitas silíceas (7 m) de color gris oscuro, dispuestas en capas delgadas planas, paralelas y continuas en donde es común encontrar amonitas, sobre estas afloran arcillolitas silíceas con presencia de amonitas y hacia el techo (3 m) limolitas silíceas.

Segmento C: Con un espesor de 540 m, se encuentra cubierto en un 80%, pero la morfología revela la presencia de material arcilloso y arenoso, el cual, se intercala en paquetes arcillosos entre 200 y 250 m con bancos arenosos con espesores máximos de 20 m, los cuales se encuentran en la parte media y superior del segmento, estas intercalaciones favorecen la formación de pendientes estructurales.

Segmento D: Con un espesor de 392 m; aunque predominan los niveles arcillosos es el segmento más arenoso, se presentan intercalaciones limolíticas y arenosas con intervalos arcillosos.

Las arcillolitas están dispuestas en bancos de varios metros con laminación interna plana paralela. En los bancos arenosos se presentan areniscas dispuestas en capas medias y gruesas con contactos ondulados y continuos, intercaladas con capas de limolitas y arcillolitas. En general las areniscas presentan laminación flaser o son macizas y en las intercalaciones limolíticas, predomina la laminación lenticular, en ocasiones son afectadas por bioturbación. En la subcuenca de río Negro, la Formación Chipaque aflora en un área de 392.63 ha en las veredas Venta Larga, San Antonio y Portachuelo.

Foto 7: Intercalaciones de capas de arenisca con lutitas de la Formación Chipaque.



Fuente: Autores.

Foto 8: Afloramiento de la Formación Chipaque.



Fuente: Autores.

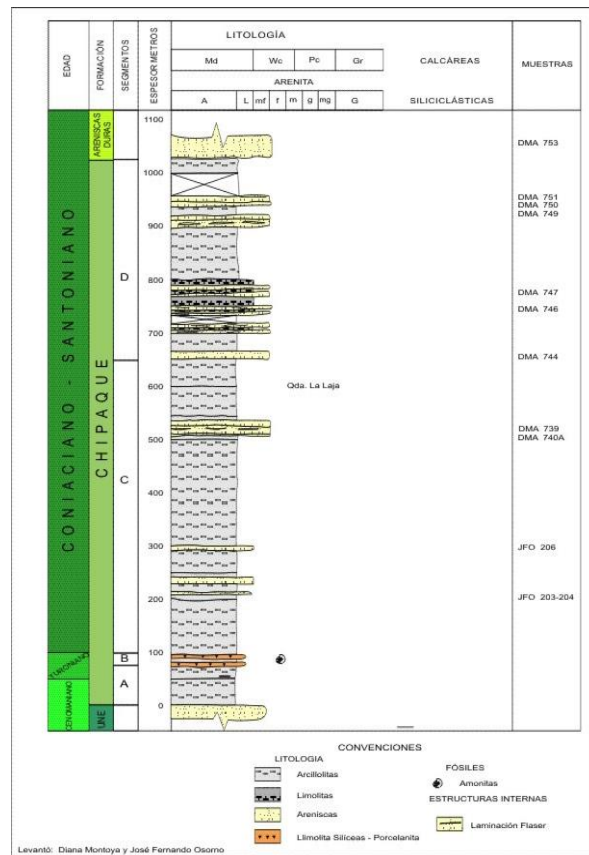
4.4.1.2 Posición Estratigráfica y Edad:

Hubach (1957), Etayo (1964) y McLaughlin sugieren un rango de edad que va desde el Cenomaniano tardío hasta el Coniaciano para la formación Chipaque; Guerrero & Sarmiento, (1996), confirman la presencia del Turoniano temprano en la parte inferior de la formación en el Piedemonte llanero y Tchegliakova y Sarmiento, confirma que el límite entre la Formación Chipaque y el Grupo Guadalupe se sitúa en el Santoniano - Campaniano. Hubach (1957b), en Julivert, (1968), estima un espesor de 800 a 900 m. Guerrero y Sarmiento (1996), le asignan un espesor de 565 m en la quebrada San Antonio en el Piedemonte llanero.

4.4.1.3 Correlaciones

La formación Chipaque se correlaciona con las Formaciones Simijaca, La Frontera y La Formación Conejo. Los segmentos A y B corresponden a la Formación Simijaca y La Frontera respectivamente y los segmentos C y D se correlacionan con la Formación Conejo (MONTROYA & REYES, 2005).

Ilustración 3: Columna estratigráfica de la Formación Chipaque municipio de Manta



Fuente: SGC.

4.4.2 Grupo Guadalupe

El Grupo Guadalupe definido al oriente de Bogotá está conformado por las formaciones Arenisca Dura, Plaeners, Labor y Tierna (PÉREZ & SALAZAR, 1978). El nombre Guadalupe fue utilizado por primera vez por Hettner (1892), pero es Hubach (1957), quien le asigna el rango de Piso de Guadalupe a las areniscas de la parte alta del Cretácico, que se encuentran en los Cerros Orientales del área de Bogotá. Hubach (1957) fija el límite Guadalupe - Villeta, ubicándolo por encima de un nivel de caliza fosilífera, llamado Nivel de Exogyra mermeti.

4.4.2.1 Formación Arenisca Dura (K_{2d})

Aunque originalmente el autor fue Hubach el nombre propuesto por Pérez & Salazar (1978), según se describe en la memoria explicativa de la plancha 209, para la unidad litológica que reposa concordantemente y transicionalmente sobre una sucesión monótona de lutitas físciles y grises de la Formación Chipaque y que es suprayacida por una secuencia de arcillolitas, arcillolitas silíceas y liditas de la Formación Plaeners. En el Anticlinal de Zipaquirá aflora un área de 416.93 ha en la parte occidental de la subcuenca del Rio Negro y en las veredas San Antonio, el Centro, Alto del Águila y Portachuelo.

4.4.2.1.1 Litología

Se describió esta Formación a partir de diferentes afloramientos como una secuencia de areniscas blancas a amarillas de grano fino a medio subangulosas muy bien seleccionada de tipo cuarcítico intercaladas con capas gruesas a medias de arcillas, muy alteradas en ciertos sectores de color violáceo, con esporádicas patinas de óxido de hierro. El contacto con la formación Chipaque resalta su presencia en campo debido a los cambios litológicos de una formación a otra.

En el municipio de Nemocón en el sector de la Cucariana se describieron para la parte superior de esta Formación unas capas gruesas de arenisca altamente bioturbadas intercaladas con láminas de limolitas, presentando una estratificación plano paralela a ondulosa moderadamente compactas, se evidencia la presencia de posibles capas delgadas de hierro. El contacto con la Formación Chipaque en las afueras del casco urbano del municipio de Zipaquirá, en la vía que conduce hacia el municipio de Pacho, viene dado por un contacto transicional rápido a neto pasando de areniscas blancas de grano fino a medio de buena selección a unas capas delgadas de material arcilloso violáceas.

El área de estudio carece de buenos afloramientos que permitan hacer una descripción estratigráfica completa y medición de espesores de las Formaciones presentes; sin embargo otros autores establecen espesores para esta Formación en otras áreas como por ejemplo en la memoria explicativa se definen para la Formación Arenisca Dura un espesor

226 m en el sector de Suesca y se aclara que desde la sección tipo el espesor de la formación es variable.

Foto 9: Muestra de la formación arenisca dura, nótese la estratificación ondulada - plana paralela continua y la presencia de láminas de hierro.



Fuente: Autores.

Foto 10: Afloramiento de la Formación Arenisca Dura vía Zipaquirá - Vereda San Jorge.



Fuente: Autores.

Foto 11: Bioturbación en capas de areniscas de la Formación Dura.



Fuente: Autores.

4.4.2.1.2 Posición Estratigráfica y Edad

La Formación Arenisca Dura está suprayacida por la Formación Plaeners; pero su límite inferior varía, en el sector oriental es infrayacida por la Formación Chipaque en contacto concordante y transicional rápido. La edad de la Formación Arenisca Dura es Coniaciano-Santoniano según Cáceres y Etayo (1969), aunque Hubach, Pérez y Salazar (1971), le asignan edad Campaniano.

4.4.2.1.3 Correlaciones

La formación Arenisca Dura se puede correlacionar en la parte central de la Plancha 209 con la Formación Lidita Superior.

4.4.2.2 Formación Plaeners (K2p)

Nombre formalizado por Pérez & Salazar (1978), para la unidad litológica que reposa concordantemente sobre la Formación Arenisca Dura y es suprayacida por la Formación Arenisca de Labor; está representada por arcillolitas, liditas, limolitas y en menor proporción por areniscas de grano muy fino. Aflora en el anticlinal de Zipaquirá y en los anticlinales de Nemocón, Sopó – Sesquilé y San José. En la subcuenca de río Negro esta unidad aflora en un área de 141.33 ha a lo largo de la cuchilla de San Jorge y en las veredas La Chapa,

San Antonio, El Centro y Portachuelo. La expresión morfológica de esta unidad es suave y genera una hondonada, debido a su litología arcillosa (REYES, 2003).

4.4.2.2.1 Litología

En la cantera la Cascada, municipio de Zipaquirá, se describió una secuencia de material silíceo de color gris oscuro con intercalaciones de material arcilloso y areniscas de grano fino de color gris claro a beige en capas medias a gruesas con estratificación plana paralela continua, hacia la parte superior del afloramiento aparecen unas capas de areniscas muy resistentes de grano fino a medio con alto contenido de feldespatos intercaladas con pequeñas capas de liditas oscuras de considerable potencia le precede un banco grueso de arenisca de grano fino a medio.

Subiendo por la carretera que conduce al municipio de Pacho en el punto con coordenadas N: 1005999 y E: 1047410 afloran unas arcillas caolinitas intercaladas con arcillas de color gris claro altamente diaclasadas con presencia de pequeños fósiles como bivalvos y foraminíferos bentónicos. Las areniscas presentes en los afloramientos son micáceas feldespáticas de grano fino con láminas de óxido hierro.

Foto 12: Afloramiento de la Formación Plaeners Vía Zipaquirá - Pacho.



Fuente: Autores.

4.4.2.2 Posición Estratigráfica y Edad

Se sugiere para esta formación la edad de Campaniano – Maastrichtiano, por la ocurrencia de amonitas *Nostoceras liratum*, *exiteloceras jenneyi* y *Libycoceras sp.*, y el dinoflagelado *Andalusiella polymorpha*, Föllmi et al.1992 (MARTINEZ & VERGARA, 1999).

4.4.2.3 Correlaciones

La Formación Plaeners se correlaciona con la Formación Los Pinos, intervalo de lodolitas, calizas y areniscas de grano fino de edad campaniano tardío (FABRE 1985) y con la Formación Las Lodolitas de Aguascalientes en el piedemonte oriental de la cordillera oriental (GUERRERO & SARMIENTO, 1996).

4.4.2.3 Formación Labor y Tierna (K_{2t})

La formación Labor – Tierna corresponde a la parte superior del grupo Guadalupe, es infrayacida por la formación Plaeners y suprayacida por la Formación Guaduas. En el área de estudio esta Formación se caracteriza por una morfología escarpada, características de las formaciones arenosas compactas. Hacia el occidente del municipio es fácilmente identificable por el contraste de los escarpes que forma con la zona de baja pendiente que representa la Formación Chipaque.

4.4.2.3.1 Litología

En el municipio de Zipaquirá en el punto N: 1047717 y E: 1007384 afloran unas areniscas competentes de grano fino de color blanco a beige con bioturbación esporádica, estratificación ondulada no paralela, intercaladas con delgadas capas de arcillas violáceas. En el municipio de Nemocón en la cantera Arenas de Nemocón se describieron unas arenas muy limpias grano-soportadas, friables de grano medio con muy buena porosidad y muy buena selección dentro de la clasificación de rocas sedimentarias las rocas de este afloramiento corresponden a rocas cuarcíticas, puesto que están constituidas por un 99 % de cuarzo. Las capas de areniscas son potentes y en muestras no in situ se encontró bioturbación.

En la memoria explicativa de la Plancha 209 se define para La Formación Labor y Tierna un espesor aproximado de 147 m. En la zona de estudio aflora en un área de 132.89 ha en las veredas San Antonio, La Chapa y Portachuelo donde da lugar a pequeños anticlinales y sinclinales y está afectada por fallas que la limitan por el oriente y occidente.

Foto 13: Formación Labor-Tierna sector Arenas de Nemocón.



Fuente: Autores.

Foto 14: Bioturbación en muestra no in situ en el sector Arenas de Nemocón.



Fuente: Autores.

4.4.2.3.2 Correlaciones

4.4.2.3.3 Edad y Posición Estratigráfica

La Formación Arenisca de Labor se ha asignado al Maastrichtiano temprano con base en la ocurrencia de la amonita *Sphenodiscus* sp., y los bivalvos *Cyprimeria* cf. *coonensis* y *Tellina* *equilateralis* (PÉREZ & SALAZAR, 1978). Por su posición estratigráfica se le asigna

una edad Maastrichtiana a la Arenisca Tierna según Etayo et al (1985) (MARTINEZ & VERGARA, 1999).

4.4.3 Formación Guaduas (K2E1g)

Definida por Hettner en 1892 (DE PORTA, 1974) y fue redefinida por Hubach en 1933, quien restringe el término a la Sabana de Bogotá. Consta de arcillolitas grises compactas, bioestratificada, arcillolitas, carbonácea, bancos de arenisca, arcillolitas abigarradas y numerosos bancos de carbón situados hacia la parte inferior y media de la formación. En el sector occidental y parte central de la plancha 209 en el Sinclinal de Checua se diferencian los cinco niveles de la Formación Guaduas, en donde Sarmiento (1994 a) midió 1050 m; mientras al oriente la diferenciación de los segmentos no es clara, tal como se observa en el sinclinal de Sueva (flanco oriental), en donde Mejía y Pulido (1985) y Sarmiento, (1994 b) reportan para la Formación Guaduas un espesor de 450 m. En la subcuenca río Negro, aflora en un área de 546.25 ha al occidente de la subcuenca en las veredas San Antonio, La Chapa, Barro Blanco, Centro y San Jorge haciendo parte del sinclinal de Neusa, donde se ve afectada por fallas inversas.

4.4.3.1 Litología

En el sector Rio Frio aflora una secuencia de areniscas de grano grueso a medio en la parte superior, moderadamente seleccionada de color blanco amarillento, hacia la parte media se definieron unas areniscas de muy buena selección de grano medio con cristales subredondeados intercaladas con arcillas abigarradas y hacia la parte inferior se encuentran unas capas delgadas de areniscas de grano fino a medio, subangulosas con estratificación cruzada intercaladas con arcillas violáceas. En el área de estudio no se encontraron más afloramientos de esta Formación y se definió a este afloramiento como parte de la Formación Guaduas a partir de las concordancias litológicas con algunos de los segmentos definidos para esta Formación y por su posición cartográfica en el mapa geológico regional y local. La morfología definida por la Formación Guaduas permite también establecer su presencia en diferentes puntos de la zona en estudio.

4.4.3.2 Posición Estratigráfica y Edad

El contacto inferior de la Formación Guaduas está definido como un contacto neto y concordante con la Formación Arenisca Labor Tierna, y el contacto superior está definido como un contacto neto pasando de un nivel arcilloso de la Formación Guaduas hasta las capas medias y gruesas de la Formación Cacho. Su edad se definió a partir de palinología como Maastrichtiano superior – Paleoceno inferior (SARMIENTO, 1992).

4.4.4 Formación Bogotá

Hubach define a la Formación Bogotá como una Formación sin fósiles que se encuentra por encima de Guaduas y Julivert la describe como un conjunto de arcillas abigarradas, predominantemente rojas, de hasta 2000 m de espesor con intercalaciones de arenitas. Su límite inferior es la Arenisca de Cacho y su límite superior es la arenisca de La Regadera. Van der Hammen le asigna indirectamente la edad Eoceno por estudios palinológicos. Hubach (1957) le asigna al Bogotá una edad de Paleoceno tardío y posiblemente Eoceno. En la subcuenca del río Negro esta unidad aflora en un área de 497.51 ha al norte del municipio de Zipaquirá en la vereda La Chapa.

4.4.4.1 Litología

En la plancha 209 Zipaquirá se describe como una secuencia de lodolitas con intercalaciones de intervalos arenosos esporádicos que en ocasiones dejan de ser continuos y anotan un espesor de 575 m aflorantes en el sector del sinclinal de Checua ya que la parte superior se encuentra cubierta en un 80 %, en el documento explicativo de la subcuenca del Rio Negro de la CAR se da una descripción más generalizada definiendo que la composición de la Formación Bogotá es casi exclusivamente de arcillas bien estratificada con la presencia de algunos bancos de arenisca micácea gris de grano fino y su parte superior presenta esporádicos mantos de carbón, anotan un espesor de 800 y 2000 m.

4.4.4.2 Posición Estratigráfica y Edad

La formación Bogotá suprayace a la Formación Cacho y el contacto es transicional rápido, el límite superior está definido por el contacto con la Formación Regadera. Hubach (1957) le asigna a la Formación Bogotá una edad de Paleoceno tardío y posiblemente Eoceno y Van de Hammen a partir de Fauna la considera de edad Paleoceno.

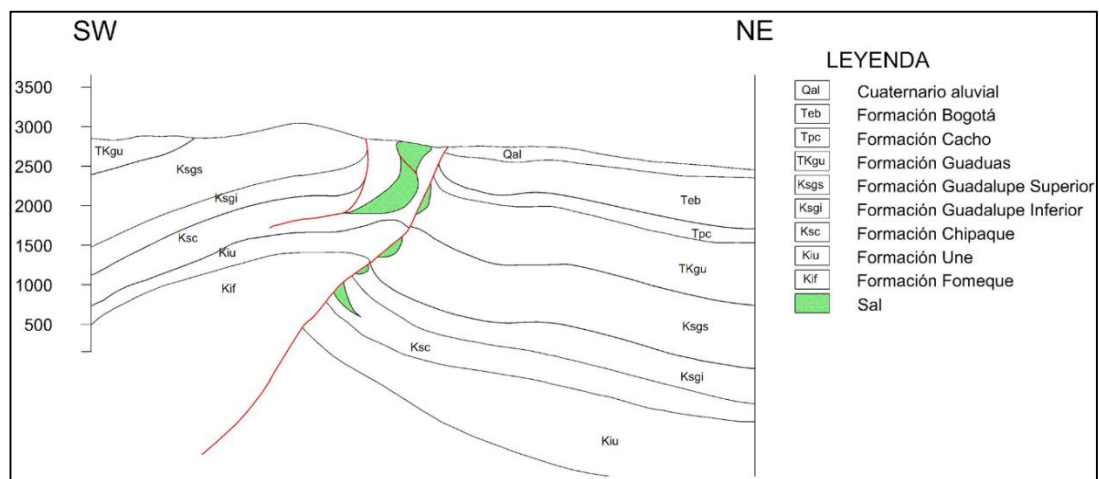
4.4.5 Depósitos de Terraza Alta (Qta)

Litológicamente se componen de arenas de grano grueso a fino, arcillas y limos. Constituyen el principal relleno de la Sabana de Bogotá. Afloran en un área de 1126.08 ha distribuidos en las veredas Paso Ancho, Susagua y San Antonio.

4.5 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El depósito de sal de Zipaquirá se encuentra en una tendencia anticlinal que tiene asignada una extensión de aproximadamente 129 kilómetros. En Zipaquirá la facie Salina de la Formación Chipaque aparentemente se encuentra en una cuña en las regiones de cresta del anticlinal. Esta zona de la cresta y el flanco occidental se han movido sobre el flanco oriental del anticlinal lo largo de una falla inversa de ángulo pronunciado, la traza de los cuales se encuentra justo al este del depósito (ilustración 4). La sección transversal sugiere también que las arcillas de Chipaque han fluido plásticamente en la parte axial del anticlinal. El límite norte del depósito de Zipaquirá está formado por una falla desgarro lateral izquierdo que es probablemente un ensanchamiento de la principal falla inversa al este del depósito. El límite sur no se sabe con certeza, en ausencia de datos de perforación y/o geofísica (McLAUGHLIN & ARCE, 1970). Los yacimientos de sal de Zipaquirá así como los de Nemocón y Sesquilé se relacionan con doblamientos anticlinales isoclinicos y en superficie presenta un estilo de anticlinal isoclinico abanicado con buzamiento general en sentido opuesto a la sabana (GONZALEZ, M., 1989).

Ilustración 4: Perfil esquemático de la estructura del depósito de sal de Zipaquirá.



Fuente: McLaughlin, Donald H. & Arce, M. 1970.

4.5.1 Estructuras Presentes

4.5.1.1 Fallas

Las fallas presentes en la subcuenca del Río Negro no son de carácter regional y son de tipo inverso con direcciones N-S, NW-SE y O-W poniendo en contacto las Formaciones Plaeners, Labor- Tierna y Guaduas. Fallas de rumbo de poco desplazamiento, definidas por fotointerpretación, se encuentran afectando a las rocas de la Formación Labor – Tierna.

4.5.1.1.1 Falla de Zipaquirá

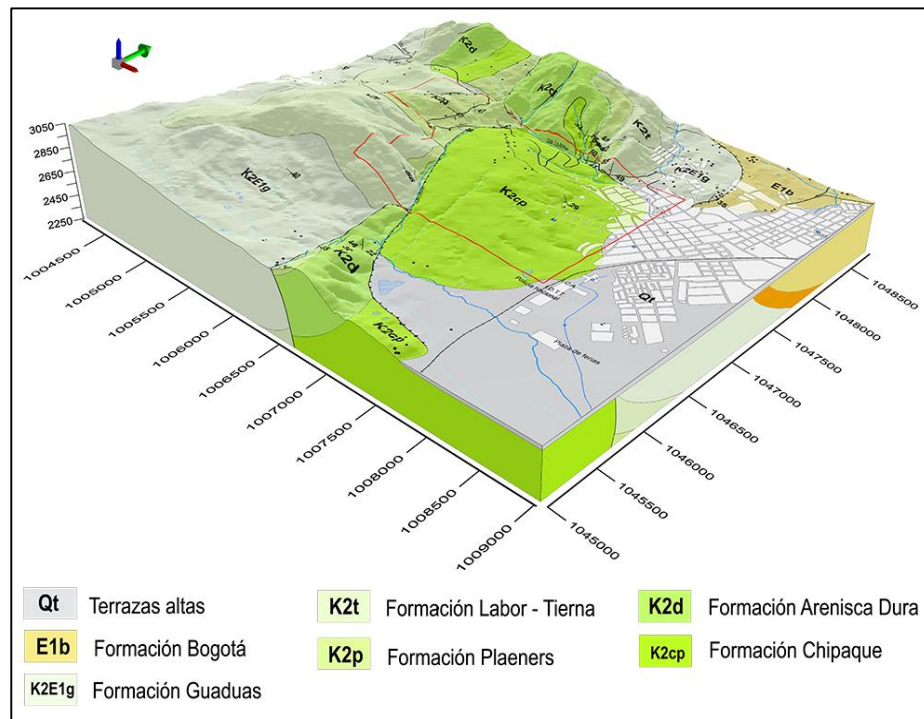
Localizada en la parte occidental del área de concesión, se ha definido como una falla inversa en base a estudios preliminares, pone en contacto la Formación Chipaque con las Formaciones Labor – Tierna y Plaeners. Hacia el sur del área de estudio esta falla marca el contacto de la Formación Chipaque con la Formación Arenisca Dura. El plano de falla tiene una dirección ligeramente hacia el N-W.

4.5.1.1.2 Fallas Definidas

En el área de estudio existen fallas definidas las cuales no aparecen nombradas en la bibliografía consultada. En la parte superior del polígono de concesión se cartografió una falla (La Artesa) que presenta una alineación O-W con más de 4 km de longitud (fotointerpretación) se presume que define un desplazamiento del eje del Anticlinal de Zipaquirá y por encima de la cual hay un complejo estructural bastante marcado por de fallas de tipo inverso. En el extremo nororiental se encuentran fallas de rumbo que desplazan las rocas de la Formación Labor-Tierna en sentido NE-SW.

- Modelo Geológico Local

Ilustración 5: Geología de la zona de estudio.



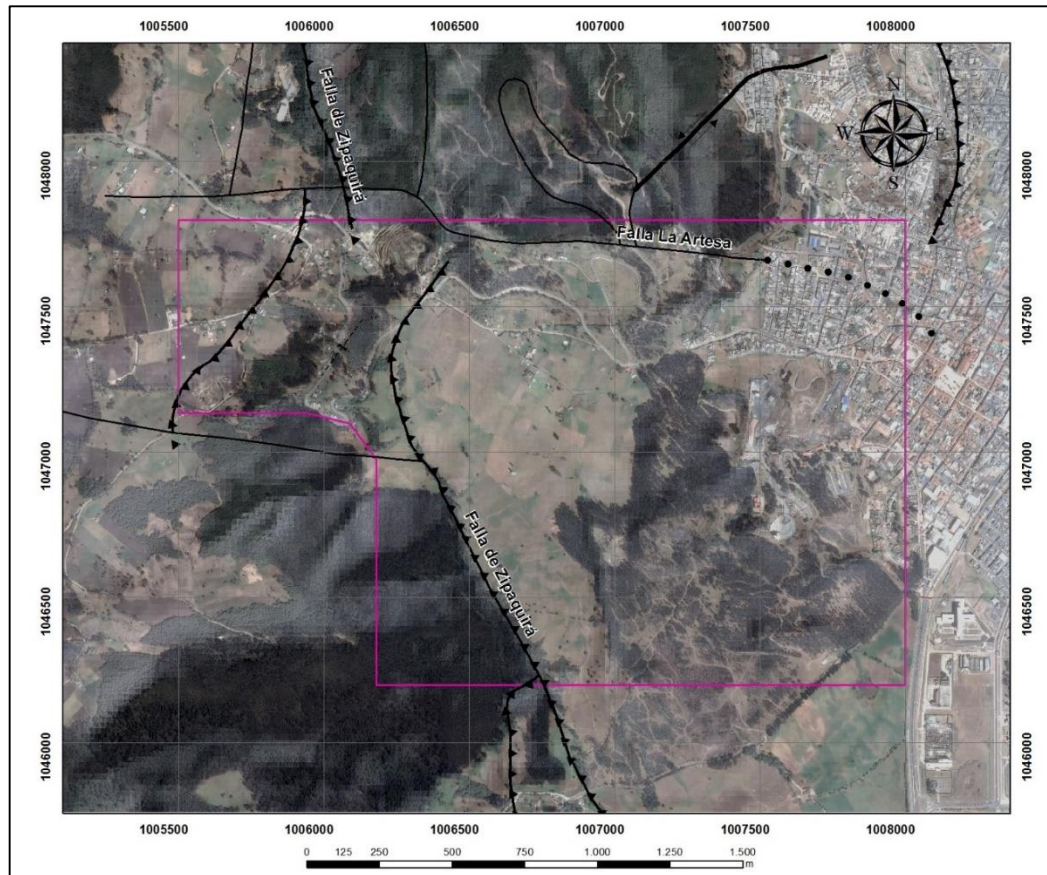
Fuente: Autores.

4.5.1.2 Pliegues

4.5.1.2.1 Anticlinal de Zipaquirá

El Anticlinal de Zipaquirá, localizado en la zona central de la cordillera oriental, presenta curvatura y variación en el rumbo de su eje axial, está limitado en diversos sectores por fallas inversas de alto ángulo consideradas probablemente como fallas normales reactivadas (CAMARGO, 1995) y cuyo núcleo está constituido por cuerpos salinos del Cretácico Inferior (GARCÍA & JIMENEZ, 2016). El anticlinal de Zipaquirá termina en este municipio siendo desplazado por una falla de rumbo sinextral.

Ilustración 6: Geología estructural del área de estudio.



Fuente: Autores.

5 GEOMORFOLOGIA

La compresión y el estudio del relieve de una región, su génesis y el desarrollo actual por el que atraviesan estos relieves se describe como Geomorfología y los procesos externos como el viento, los glaciares, la erosión pluvial y fluvial e incluso las actividades antrópicas, entre otros, constituyen lo que se denomina Morfodinámica, estos procesos externos establecen los ambientes geomorfológicos de un área determinada. El polígono de concesión de HIQO-03 se encuentra localizado en una zona tectónicamente muy marcada, bordeado por pequeñas quebradas que discurren sobre formaciones sedimentarias de tipo arcilloso y arenoso principalmente, estas características mencionadas constituyen los ambientes geomorfológicos:

5.1 AMBIENTES GEOMORFOLÓGICOS:

5.1.1 Ambiente Estructural

Dentro de esta categoría se agrupan las geoformas que son el resultado de los procesos de plegamiento y fallamiento de las rocas sedimentarias y los complejos ígneo – metamórficos, el grado de plegamiento y la naturaleza misma de las rocas definen el tipo de geoforma resultante. La zona de estudio abarca un área relativamente pequeña con solo 3,4 km² cabe aclarar que las geoformas descritas para esta área son pocas.

- **Escarpes en rocas areniscas:** estas estructuras corresponden a escarpes con pendientes fuertes y estratos buzando en sentido contrario a la ladera sobre las formaciones Labor y Tierna, se encuentran limitados por una falla de tipo inverso y en contacto con rocas arcillosas y de poca pendiente de la formación Chipaque lo que permite que estas estructuras resalten aún más. Son apreciables en el extremo sur-occidental del polígono de concesión que corresponde aproximadamente con la parte final de las labores mineras proyectadas hacia la superficie. Hacia el extremo noroccidental se aprecian otros escarpes no tan marcados como el anteriormente citado afectados también por la misma falla inversa.

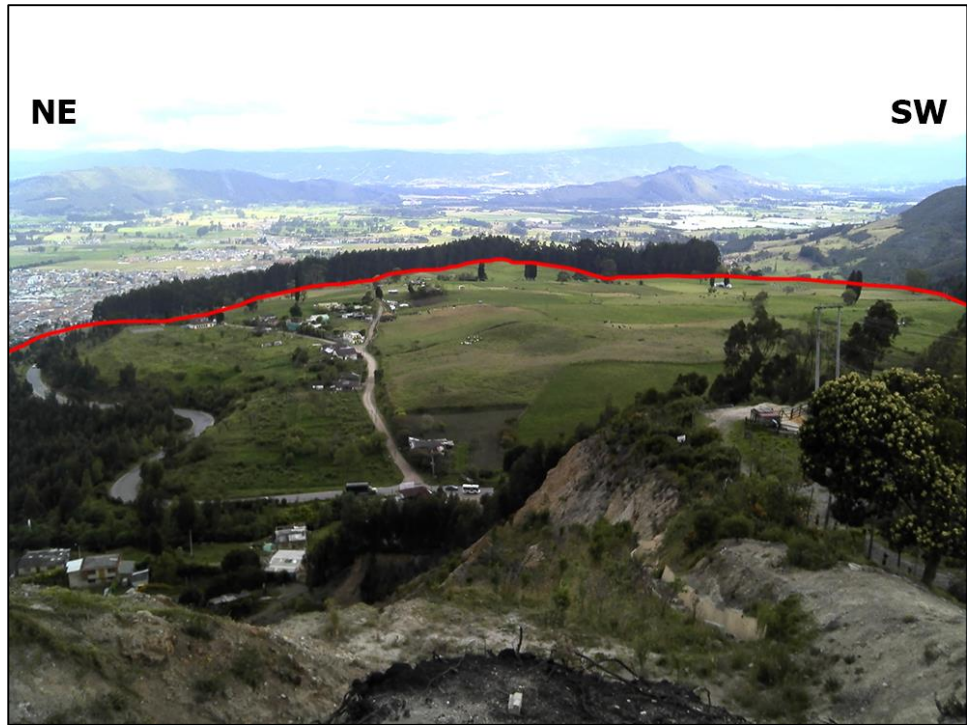
Foto 15: En primer plano la terraza Fluvio - Lacustre, en segundo plano escarpe en rocas del grupo Guadalupe. Foto tomada en el sector La Paz.



Fuente: Autores.

- **Domo:** la ascensión de un material poco denso y plástico como lo es la sal a través de rocas más recientes y más densas tiene como consecuencia el empuje de estas rocas supra yacientes deformándolas y levantándolas modificando así el relieve preexistente, la geoforma resultante tiene el aspecto de un domo. Los yacimientos de sal de Zipaquirá se encuentran sobre rocas de la formación Chipaque rocas de tipo arcilloso que fueron levantadas por efecto del empuje tectónico en el proceso de la ascensión de la sal. Esta estructura de domo abarca la mayor parte de la zona de estudio razón por la cual es la geoforma dominante en el polígono de concesión. Tal vez los procesos tectónicos de plegamiento y fallamiento que han afectado la región han originado deformaciones a este tipo de estructuras por un lado el yacimiento de sal se encuentra limitado hacia el occidente y hacia el norte por fallas de tipo inverso, hacia el costado occidental es donde se encuentran las partes altas y de donde nacen las quebradas que discurren sobre este sector erosionando y trasportando material hacia las partes bajas y planas, costado oriental, donde se ubica la zona urbana del municipio.

Foto 16: Loma salina vista desde la cantera la Cascada.



Fuente: Autores.

5.1.2 Ambiente Denudacional

Los agentes externos que afectan a las rocas de diferente naturaleza que se encuentran en superficie producto del plegamiento, desde el intemperismo pasando luego por el transporte o erosión y por último la depositación incluyendo los procesos gravitatorios modifican el relieve para dar origen a nuevas geoformas con texturas más suavizadas, estas geoformas constituyen el ambiente Denudacional. De acuerdo al factor determinante para la formación de las geoformas se definen los subambientes Denudacionales es así como se tienen los sistemas Fluvio-erosionales, los de remoción en masa, los de disolución y los sistemas Denudativo – glacial.

- **Lomeríos poco disectados:** se aplica este término a las ondulaciones de poca altura que se han formado en la cima del domo salino como consecuencia del drenaje superficial. Estas geoformas en su mayoría presentan laderas cortas con pendientes suaves con cimas anchas debido a la poca disección que generan los cauces intermitentes o los que aparecen en periodos de fuertes lluvias, la vegetación característica es de tipo pastizal. Se ubican en el centro del polígono de concesión y son apreciables en el

sector donde se encuentra la cantera La Cascada hacia el lado derecho de la vía que conduce de Zipaquirá a Pacho.

Foto 17: Lomas con pendientes suaves. Sector Cantera la cascada.



Fuente: Autores.

5.1.3 Ambiente Coluvial

Está definido por los agentes de desplazamiento tales como el agua, el viento, la gravedad y otros que a partir de la acumulación de material crean nuevos relieves sobre el terreno. Las geoformas correspondientes se clasifican de acuerdo al ambiente de depositación y del agente transportador.

- **Derrubios de pendiente:** están constituidos por bloques de rocas, grava, gravillas y embebidos en una matriz areno-limosa y parcialmente arcillosa (PLANEACIÓN ECOLOGICA & ECOFOREST, 2014). Estos depósitos se han formado a partir de la caída de material que componen los escarpes rocosos y se localizan al pie de estos. Aunque se definen bajo esta denominación, estos derrubios incluyen en su composición otros materiales más finos de origen coluvio-aluvial no diferenciables. La pendiente del depósito, más suave en relación con los escarpes que les dieron origen, además de una matriz más fina de mejor compactación, los hace más estables frente a la construcción urbana.

5.1.4 Ambiente Fluvio-Lacustre

Luego del descenso del Lago que bordeaba a Zipaquirá, hace 40.000 años - Pleistoceno medio a tardío (VAN DER HAMMEN, 1995) el sistema de drenaje inició el trabajo de disección formando así valles o terrazas. El nivel lacustre de los 2.600 msnm constituye hoy el nivel alto de la terraza (sector de Zipaquirá) y lo componen materiales de tipo arcillosos, arcillas orgánicas y arcillas turbosas hacia las partes laterales (PLANEACIÓN ECOLOGICA & ECOFOREST, 2014).

- **Terraza Fluvio lacustre:** parte de la terraza Fluvio Lacustre aparece en el extremo superior derecho del polígono de concesión, donde se da el contacto entre el valle y los cerros occidentales es por ello que en este punto la terraza presenta una superficie no plana como un valle sino más bien cóncava a plana, sobre estos terrenos se encuentran los barrios marginales de Zipaquirá.

5.1.5 Factores Antrópicos

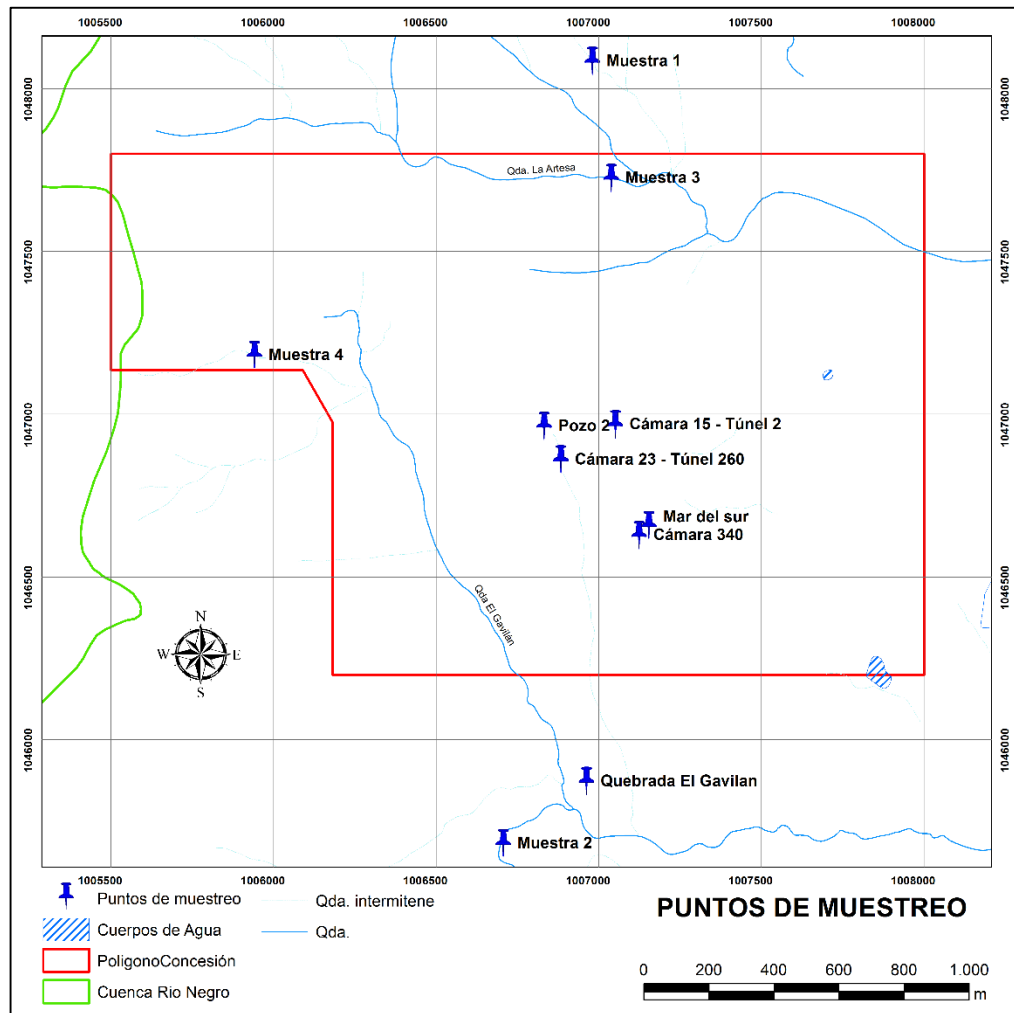
Las actividades mineras tienen impactos ambientales perdurables en el tiempo. Si bien las labores de extracción de la sal en el yacimiento de Zipaquirá no han sido causante de modificaciones muy acentuadas del relieve local es válido mencionar que en superficie, sobre las labores mineras, se registran hundimientos locales a los cuales se les realiza un monitoreo topográfico periódicamente para determinar su evolución. Sobre el nivel Potosí se registra un hundimiento que no ha sido relacionado con las labores de explotación.

6 HIDROQUIMICA

6.1 PRUEBAS HIDROQUÍMICAS

Se llevó acabo la toma de muestras de aguas en superficie y dentro de la mina para realizar las pruebas hidroquímicas con el fin de conocer características tanto físicas como químicas de cada una de ellas y poder establecer alguna relación de aguas. En total se recolectaron 10 muestras 5 de las cuales se tomaron en diferentes labores mineras y las otras 5 en fuentes hídricas en superficie alrededor del polígono de concesión.

Mapa 5: Puntos de muestreo de aguas.



Fuente: Autores.

Tabla 8: Coordenadas de los puntos de muestreo.

Nombre	Lugar	COORDENADAS		ELEVACIÓN (m.s.n.m)
		(X)	(Y)	
Muestra 1	Manantial	1006980	1048085	2,830.00
Muestra 3	Quebrada La Artesa	1007038	1047726	2,744.89
Muestra 4	Drenaje	1005941	1047182	2,910.00
Muestra 2	Drenaje	1006706	1045682	2,684.77
Quebrada Gavilan	Drenaje	1006962	1045873	2,664.95
Pozo 2	Labores Mineras	1006832	1046964	2,670.00
Camara 23 -Tunel 260	Labores Mineras	1006883	1046861	2,670.00
Cámara 340	Labores Mineras	1007124	1046629	2,670.00
Mar del Sur SUR	Labores Mineras	1007104	1046782	2,710.00
Cámara 15 -Tunel 2	Labores Mineras	1007051	1046969	2,670.00

Fuente: Autores.

6.1.1 Análisis Químicos

A las muestras de aguas tomadas se le realizaron en el laboratorio de aguas de la UPTC Seccional Sogamoso las pruebas de análisis de cationes y de aniones, Ph, dureza total, contenido de bicarbonato y carbonato, solidos totales y solidos suspendidos. (Anexo 02).

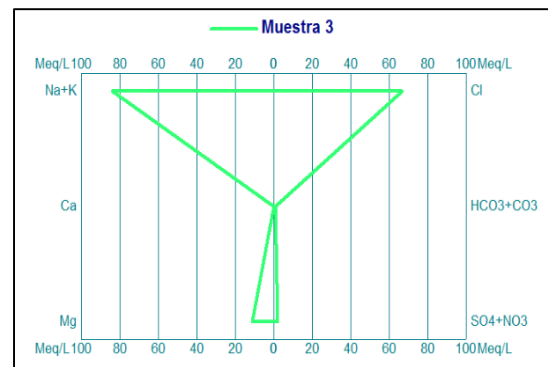
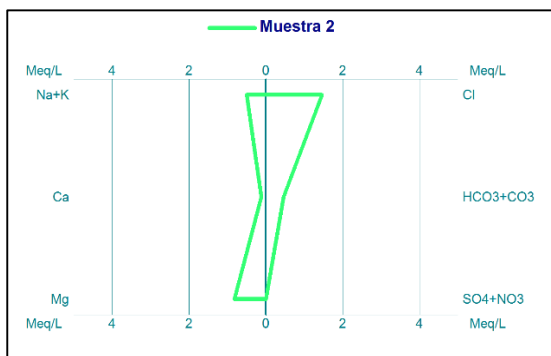
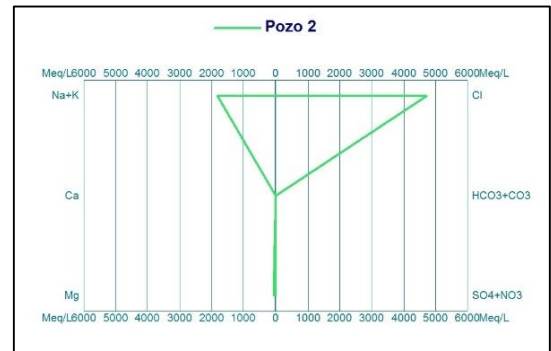
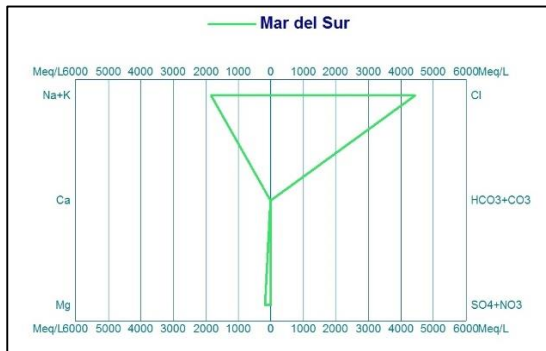
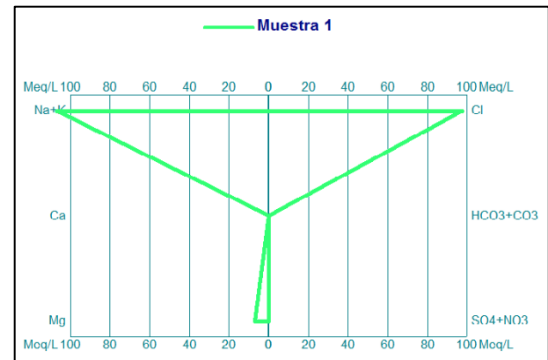
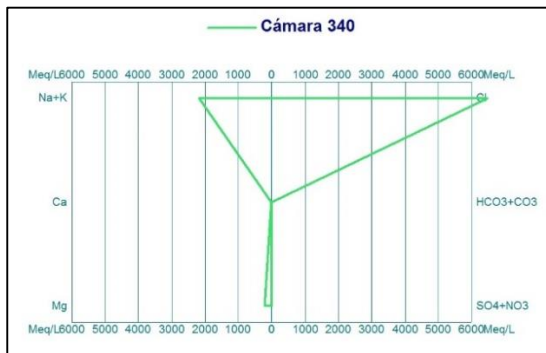
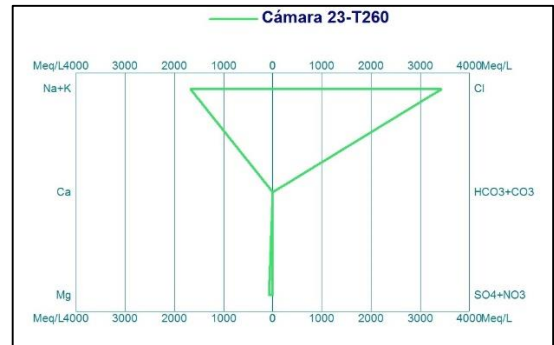
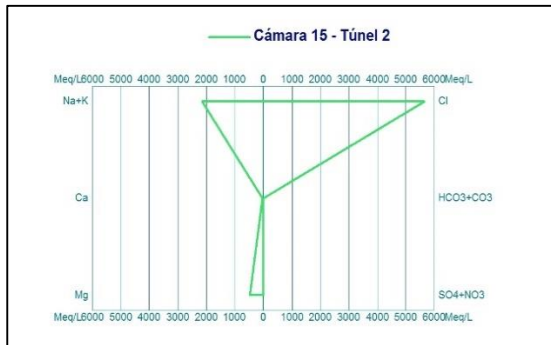
Mediante el uso de programas como el Rock Works, AquaChem y el Diagrammes se procesaron los datos obtenidos en laboratorio para así generar los diagramas de clasificación de aguas cómo lo son el diagrama de Stiff, diagrama de Pippet y de Shoeller Berkaloff.

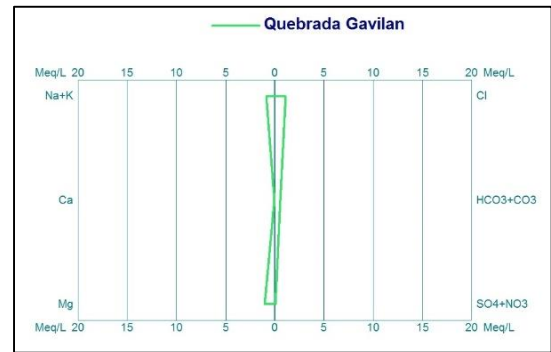
6.1.1.1 Diagramas de Stiff

Los diagramas de Stiff se forman, generalmente, con tres líneas horizontales paralelas. En cada eje se representa el porcentaje de cada uno de los cationes dominantes (Ca, Mg y Na + K), en el costado derecho y en el costado izquierdo se representan los valores de los aniones (Cl-, SO₄ Y HCO₃-), la posición, superior, medio o inferior, de cada uno de estos ejes no está definida es por eso que en ocasiones el orden de estos pueda variar según el autor. Los ejes horizontales están cortados por un eje vertical que marca el valor de cero meq/L y uniendo los puntos de cada catión y anión se construye un polígono para cada muestra. La escala empleada en la separación los ejes verticales para la representación de la muestra de agua varían en función de su naturaleza misma.

ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03

Gráfica 4: Diagramas de Stiff de 10 muestras de aguas recolectadas, nótese las diferentes escales empleadas para cada diagrama.





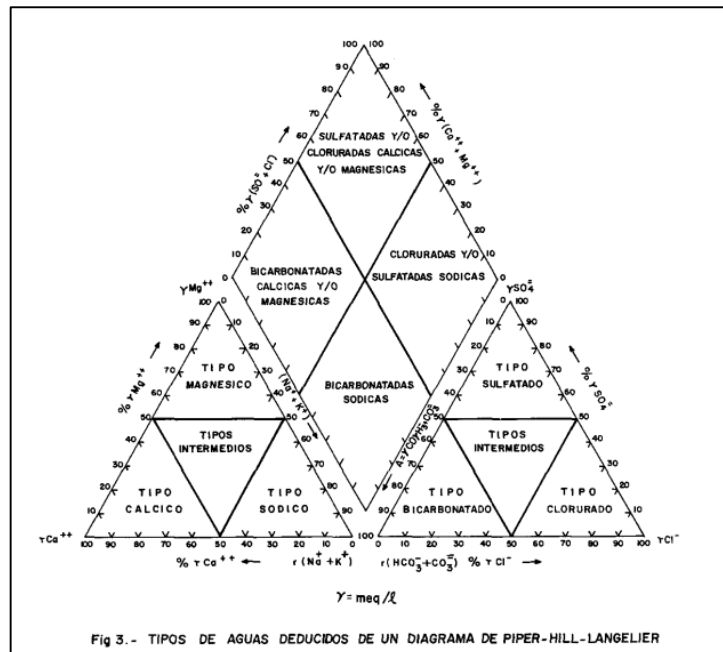
Fuente: Autores.

6.1.1.2 Diagramas de Piper:

Los diagramas de Piper consisten en dos triángulos uno al lado izquierdo (cationes) y otro a lado derecho (aniones), cada vértice corresponde al 100 % de un catión o a un anión dado, una muestra de agua de acuerdo a su composición se ubica mediante un puntos en cada triángulo, por encima de estos dos triángulos se haya un rombo en donde las proyecciones de estos puntos se intersectan generando así un nuevo punto que permite clasificar la muestra de agua en sulfatadas y/o cloruradas

cálcicas y/o magnésicas, bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas, cloruradas y/o sulfatadas sódicas o en bicarbonatadas sódicas según como se muestra en la imagen:

Ilustración 7: Diagrama de Piper.

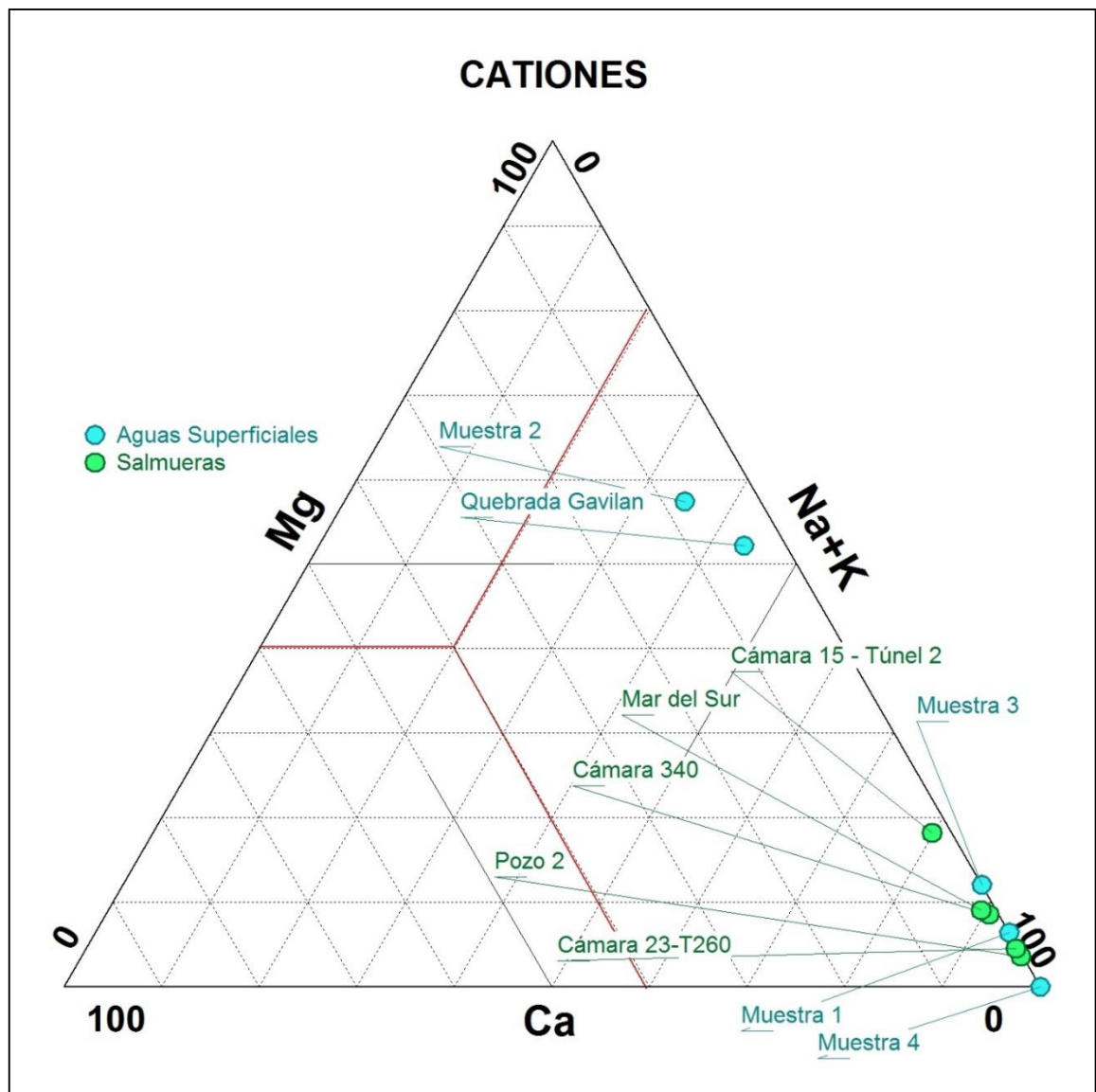


Fuente: IMGE- EPTISA 1985.

6.1.1.2.1 Cationes:

Las muestras en su mayoría son de tipo sódico solo dos muestras tomadas en quebradas dieron tipo magnésico. Se observa claramente como las muestras 1 y 3 se van enriqueciendo en sodio y se empobrecen en calcio respecto a la muestra 2 y la muestra de la quebrada El Gavilán. Se propone que la muestra 1, tomada en un manantial, corresponde aguas que están en contacto con algún cuerpo salino aislado y la muestra número 3 se enriquece en sodio producto del contacto de algunos afluentes de la quebrada La Artesa con algún relicto salino.

Gráfica 5: Triángulo de cationes.

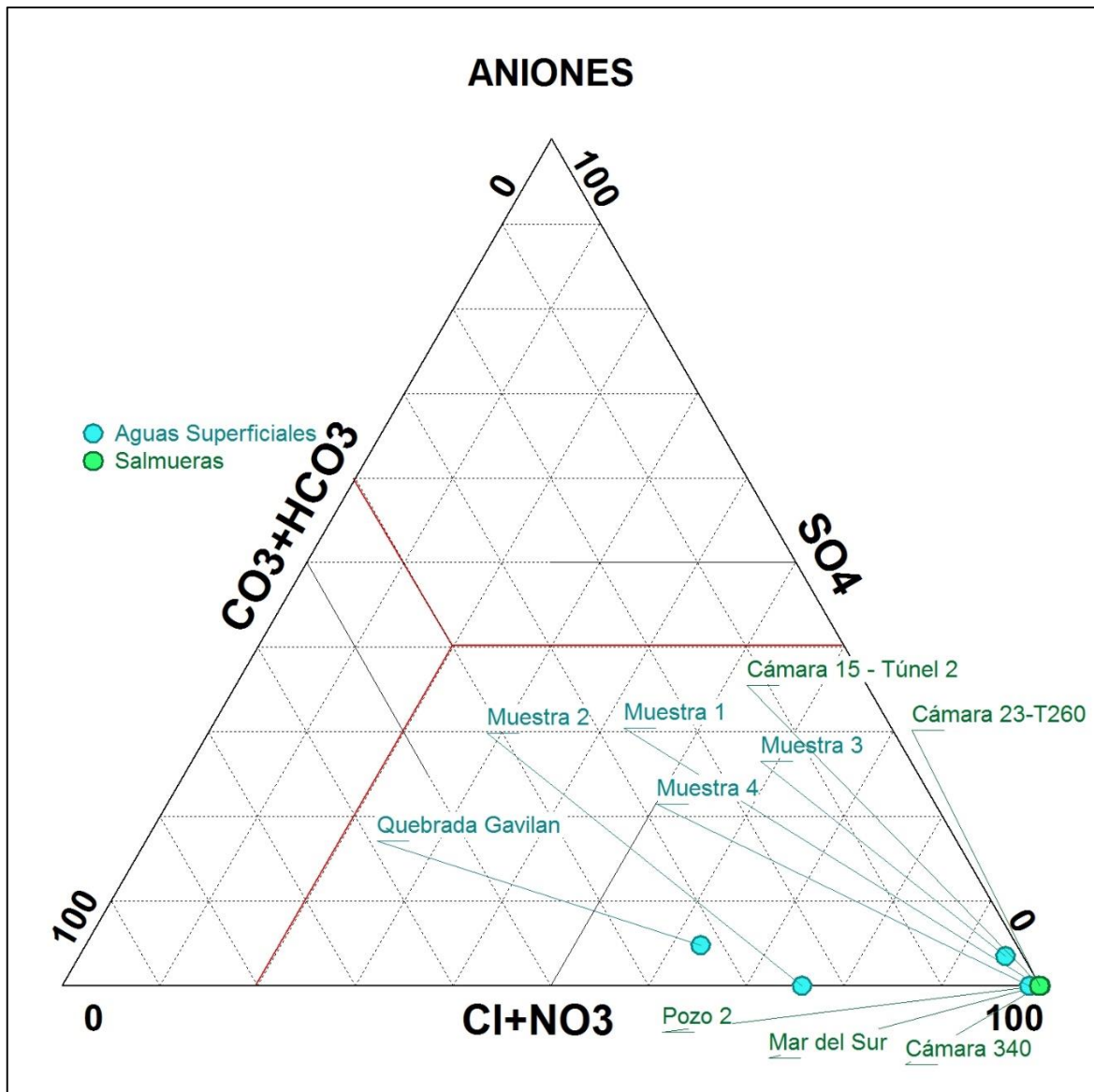


Fuente: Autores.

6.1.1.2.2 Aniones

De acuerdo al porcentaje de aniones de las muestras todas se ubican en la zona de tipo cloruradas. Son muestras pobres en contenido de sulfatos.

Gráfica 6: Triángulo de aniones para las muestras recolectadas.

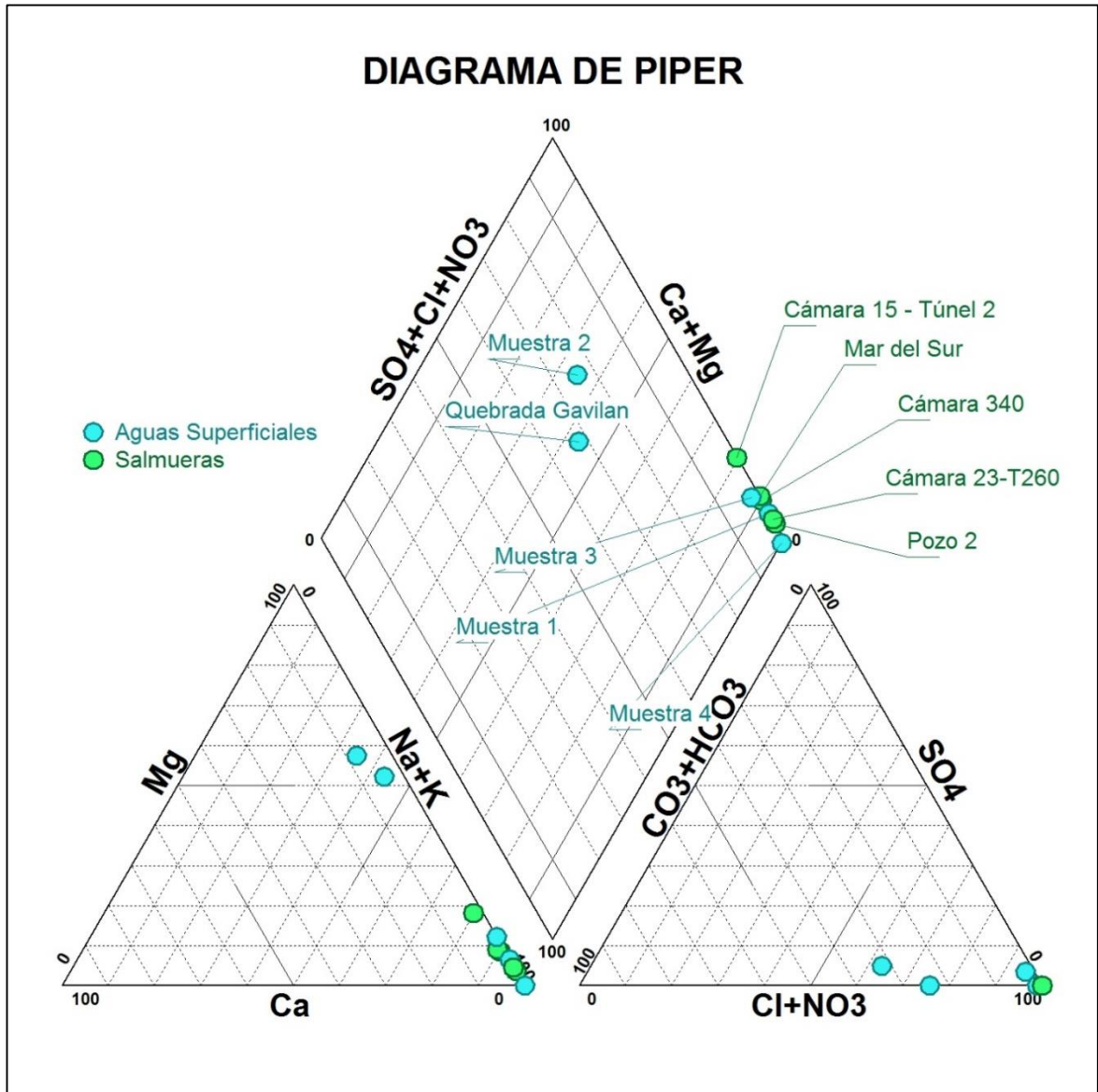


Fuente: Autores

6.1.1.2.3 Diagrama global:

La muestra número 2 y la muestra de la Quebrada El Gavilán se clasifican según los resultados como sulfatadas y/o cloruradas cálcicas y/o magnésicas mientras que el resto de muestras logran ubicarse en la zona que corresponde a cloruradas y/o sulfatadas sódicas.

Gráfica 7: Diagrama de Piper.

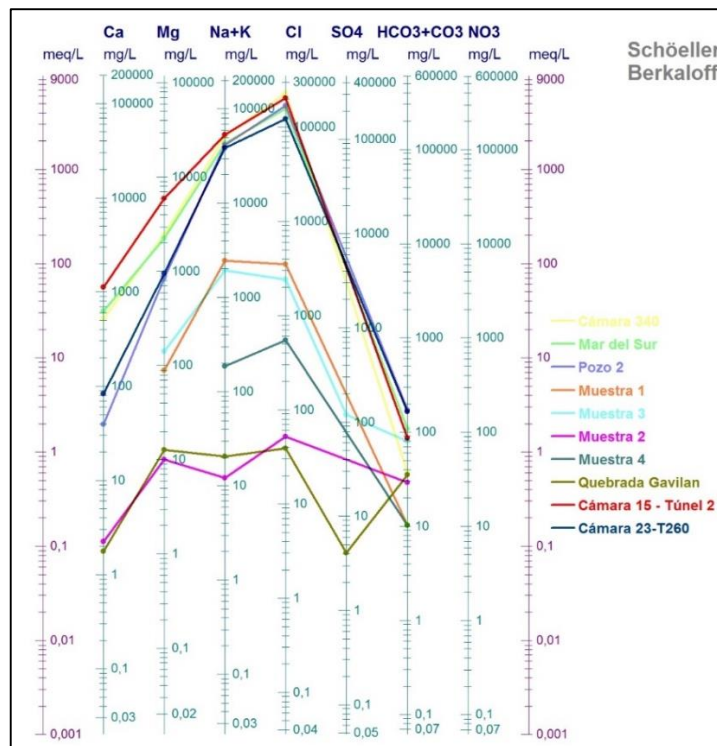


Fuente: Autores.

6.1.1.3 Diagrama de Schoeller - Berkaloff

El diagrama de Schoeller – Berkaloff es un diagrama en el que se muestran mediante ejes verticales y con una escala logarítmica la cantidad en mg/L o meq/L de los aniones y cationes mayoritarios de una muestra de agua. Las ventajas que ofrece este diagrama es que permite visualizar en un mismo diagrama diferentes tipos de aguas, así como también si ocurre algún intercambio iónico entre las muestras. En el diagrama de Shoeller - Berkaloff se puede apreciar una posible relación de las aguas de tipo Salmueras con las muestras 1 y 3 mientras que las muestras 2 y Quebrada El Gavilán tienen un comportamiento independiente al de resto de las muestras. Las muestras # 3 y # 1 tiene un contenido elevado de Na 1936.423 ppm y 2463 ppm respectivamente (ver anexo 02) siendo que la cantidad promedio de Na en aguas subterráneas es de 150 ppm (CAR – CUNDINAMARCA, 2008) y además los valores de magnesio también se encuentran por encima del promedio +- 40 ppm, de manera similar la muestra # 4 sobrepasa el límite en su contenido de sodio con 185 ppm. El contenido de Sulfatos (SO₄) es de cero excepto la muestra # 3 con 119 ppm y Quebrada Gavilán con 4,06 ppm.

Gráfica 8: Diagrama de Sholler - Berkaloff.



Fuente: autores

6.1.2 Análisis Físicos

6.1.2.1 Dureza

La dureza del agua se define como la capacidad que tiene el agua para producir espuma o en otras palabras la capacidad de consumir jabón, propiedad que se debe a la presencia de los elementos como el Calcio (Ca+) y Magnesio (Mg++), principalmente, es por eso que hoy en día se habla de dureza del agua en términos de la cantidad de Calcio (dureza calcio) y de Magnesio (dureza magnesio) y a la suma de ambas como dureza total. La dureza se puede expresar en términos de ppm de CaCO₃, en grados Francés °f, en grado Alemán °d, grado Americano o en grado Inglés.

Tabla 9: Clasificación Merck.

Ppm CaCO ₃	°f	Dureza
0 – 79	<8	Muy blanda
79 – 149	8 – 15	Blanda
150 – 330	15 – 33	Dureza intermedia
330 – 550	33 – 55	Dura
>550	>55	Muy dura

Fuente: Merck & Co., Inc. Global Headquarters.

Tabla 10: Clasificación de la dureza de las muestras de aguas.

LUGAR	DUREZA TOTAL	DUREZA EN ° f	CLASIFICACIÓN
Muestra 4	0.00	0.00	Muy blanda
Muestra 2	40.30	4.03	Muy blanda
Quebrada Gavilán	49.05	4.91	Muy blanda
Muestra 1	310.85	31.09	Semi Dura
Muestra 3	486.40	48.64	Dura
Pozo 2	3,026.74	302.67	Muy dura
Cámara 23 -Túnel 260	3,539.94	353.99	Muy dura
Mar del Sur	9,411.90	941.19	Muy dura
Cámara 340	9,939.35	993.94	Muy dura
Cámara 15 -Túnel 2	23,507.98	2,350.80	Muy dura

Fuente: Autores.

6.1.2.2 Sólidos Totales

Cuando se hace referencia a los sólidos totales se habla de la cantidad de materia disuelta y suspendida en el agua. Los sólidos influyen directamente en la calidad del agua al punto de considerarse de mala calidad para el consumo humano aguas con alto contenido de materia sólida. El valor admisible de sólidos totales para aguas potables es de 500 ppm (Decreto 475 de 1998). Los sólidos totales disueltos (TDS por sus siglas en inglés) se relacionan con la conductividad eléctrica del agua, a mayor cantidad de sólidos disueltos mayor será la CE, sin embargo, esta relación no se presenta en ambientes hipersalinos, como en el caso de la zona de estudio. De los análisis que se realizaron en el laboratorio de aguas de la UPTC se determinó la cantidad en mgr/L de sólidos totales, utilizando el método de diferencia de peso luego de secar un recipiente de porcelana con 50 ml de agua a una temperatura cercana a los 120°C, previamente pesado, los resultados obtenidos corresponden a cantidades elevadas de residuos totales por lo cual es recomendable realizar nuevamente este ensayo.

Tabla 11: Sólidos totales.

MUESTRA	RESIDUO EN ppm (mgr/litro)	PESO CAPSULA	CAPSULA + AGUA	CAPSULA + RESIDUO	AGUA	RESIDUO	% RESIDUO
M#1	43288	45.6454	95.5835	47.8098	49.938	2.1644	4.3341657
M#2	15340	46.1148	95.9399	46.8818	49.825	0.767	1.53938477
M#3	20730	45.0748	95.1558	46.1113	50.081	1.0365	2.06964717
M#4	53904	47.7219	97.6344	50.4171	49.913	2.6952	5.39984974
Q GAVILAN	26548	45.4139	95.2047	46.7413	49.791	1.3274	2.66595435
C15-T2	295962	47.9215	108.1049	62.7196	60.183	14.7981	24.5883416
C23-T260	228902	44.4536	101.5985	55.8987	57.145	11.4451	20.028209
C 340	181086	47.4495	107.6498	56.5038	60.2	9.0543	15.0402905
M SUR	204882	47.8071	108.0876	58.0512	60.281	10.2441	16.9940528
PZ-2	322636	43.794	103.903	59.9258	60.109	16.1318	26.8375784

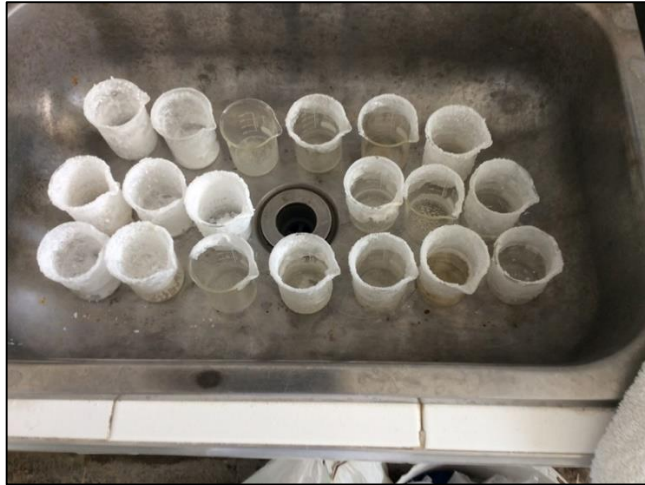
Fuente: Autores.

Foto 18: Ensayo de Sólidos Totales Disueltos.



Fuente: Laboratorio de Aguas, UPTC.

Foto 19: Recipientes con el contenido de solidos totales.

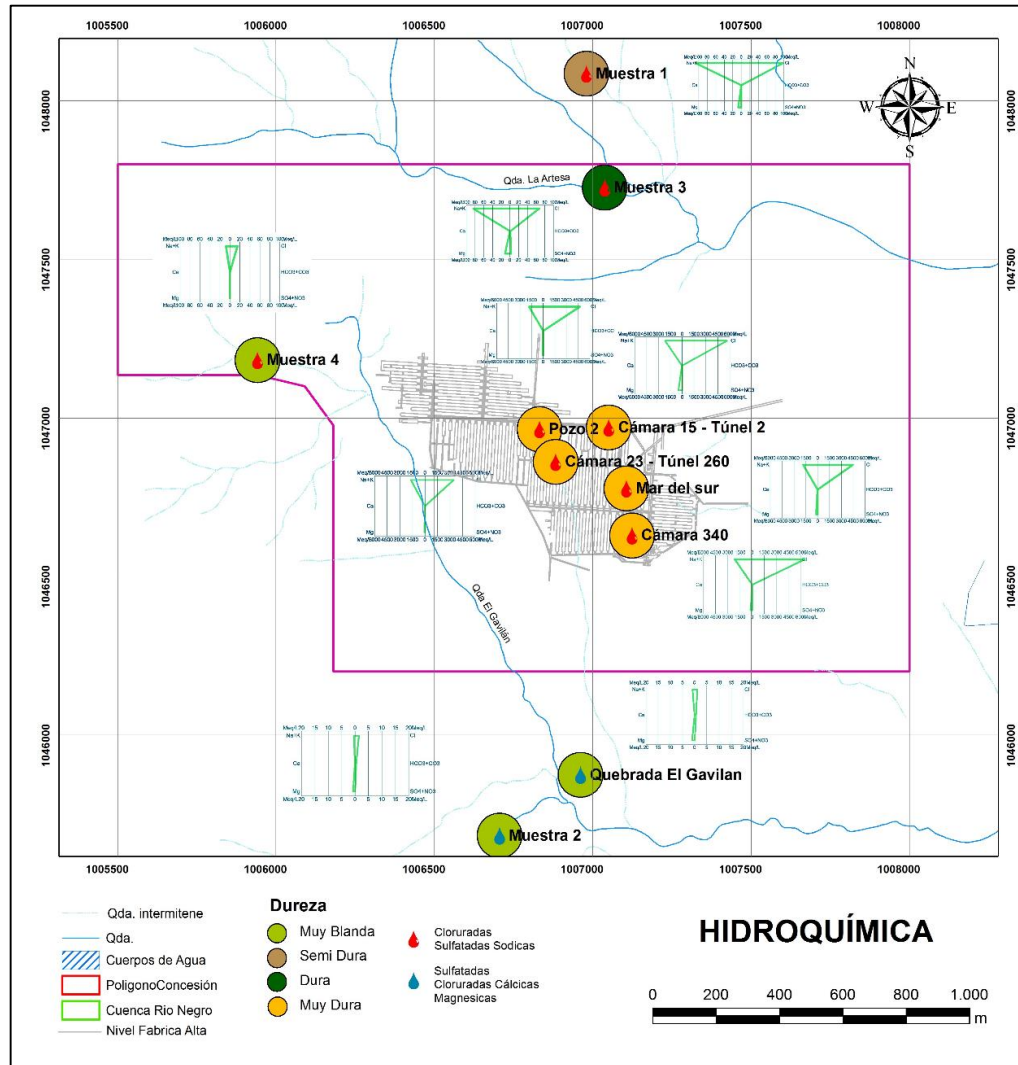


Fuente: Laboratorio de Aguas, UPTC.

6.2 MAPA DE DISTRIBUCIÓN HIDROQUÍMICA

Después de procesar todos los datos obtenidos en laboratorio se elaboró un mapa de distribución Hidroquímica, en donde se aprecia geográficamente las características físicas y químicas de las aguas en diferentes puntos de la zona de estudio.

Mapa 6: Parámetros físicos y químicos de las muestras tomadas.



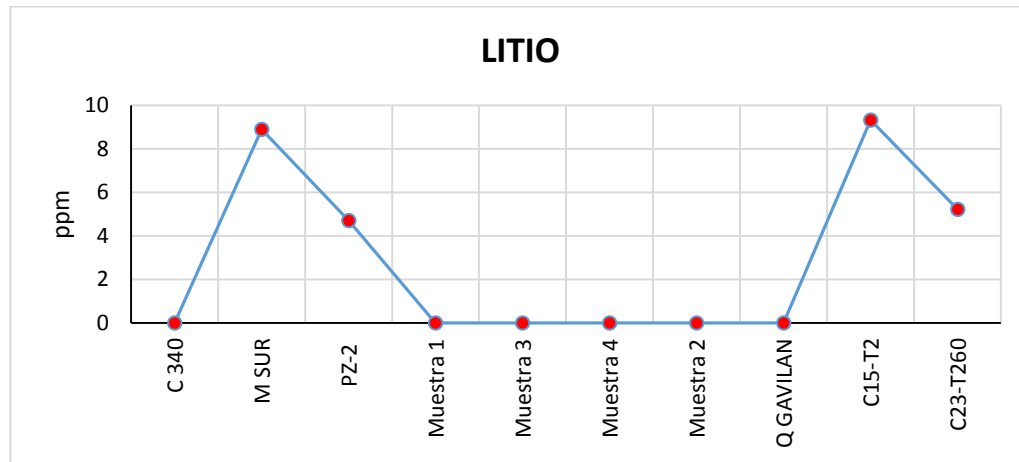
Fuente: Autores.

6.3 ANÁLISIS DE GRAFICAS POR ELEMENTOS DISCRIMINADOS

La siguiente grafica muestra los resultados obtenidos en los análisis hidroquímicos discriminados por elementos, en la mayoría puede hacerse una diferenciación a simple vista de las aguas del interior de la mina y las de superficie (ver anexo 03).

Estas graficas no reemplazan otras que se especializan en representación de resultados de análisis hidroquímicos, solo pretenden ser un complemento a las mismas.

Gráfica 9: Representación de las concentraciones del elemento Litio.



Fuente: Autores.

Los contenidos de Hierro, Magnesio, Potasio, Calcio y Estroncio, muestran que al punto identificado como Cámara 15 con Túnel 2, donde se tomó la muestra codificada como C15-T2, llegan aguas enriquecidas en dichos elementos. Al analizar las gráficas en cuestión es fácil deducir que las aguas superficiales presentan valores de concentración muy bajo para estos elementos (la mayoría está en cero), mientras que los valores para las aguas en las labores tiene alguna concentración de ellos, pero lo que es notable es la gran concentración que poseen las aguas de la cámara 15 con túnel 2 ; este fenómeno nos lleva a proponer que a este punto de infiltración están llegando aguas que se han infiltrado en niveles superiores de la mina y que han hecho un recorrido considerablemente largo en un tiempo igualmente considerable como para permitir el enriquecimiento en dichos elementos considerando además la composición química de la sal gema (tablas12 y 13).

La cámara 15 con túnel 2 está separada 180 m en la horizontal y 24 m en la vertical con Mar del Sur y 280 m en la horizontal y 24 m con Mar del Norte, que se constituyen como los puntos de infiltración de mayor importancia en el nivel inmediatamente superior, es decir, el nivel Potosí. Estas aguas podrían venir del Mar del sur, del Mar del norte o de ambos; sin embargo, las concentraciones de Litio muestran una posible relación entre las aguas del Mar del Sur y las de la muestra C15-T2; es difícil con la información disponible hasta el momento determinar su origen a ciencia cierta, considerando además el efecto que puede llegar a producir la losa que separa los dos niveles, sobre todo cuando muchas zonas del nivel superior son inaccesibles para verificar el comportamiento del agua.

Tabla 12: Composición química de la roca salina en Zipaquirá.

Nombre	Compuesto	Porcentaje Promedio
Cloruro de Sodio	NaCl	88%
Oxido de Potasio	K ₂ O	0,32%
Oxido de Calcio	CaO	1,86%
Oxido de Magnesio	MgO	0,50%
Sulfato	SO ₄	0,50%
Insolubles	-----	9%

Fuente: Estudio IFI Concesión Salinas. Zipaquirá: Publicación IFI. 1975 – 1984. 10 P.

Tabla 13: Minerales presentes en la Sal Gema.

Compuesto	Fórmula
Anhidrita	CaSO ₄
Dolomita	CaMg (CO ₃) ₂
-Cuarzo	SiO ₂
Pirita	FeS ₂
Azufre	S
Caolín	Al ₂ O ₃ 2SiO ₂ . H ₂ O
Hematita	Fe ₂ O ₃
Sales de Potasio y Magnesio	
Materiales carbonosos	

Fuente: Estudio IFI Concesión Salinas. Zipaquirá: Publicación IFI. 1975 – 1984. 10 P.

Cabe aclarar que para la muestra del Pozo #2, codificada como Pz-2, las concentraciones de estos elementos son bajas debido a que estas aguas son inyectadas desde superficie, por lo que es lógico llegar a pensar que deben conservar algunas de sus características químicas iniciales, máxime cuando su tiempo de permanencia en contacto con la roca salina es corto, solo lo suficiente para diluir la sal hasta alcanzar una saturación óptima.

Para la muestra del Reservorio 23 (Cámara 23 con Túnel 260), los análisis muestran variaciones en las concentraciones en comparación con las otras muestras tomadas en el interior de la mina (Mar del sur y Cámara 340), exceptuando las aguas correspondientes a la muestra Pz-2 por las razones ya mencionadas, estas variaciones no son de magnitudes similares a las de la muestra C15 – T2, pero sí es evidente la diferencia con las demás, tal es el caso del contenido de Estroncio, Magnesio, Cloruro, Calcio y hierro entre otros.

Este comportamiento anómalo nos lleva a reconfirmar lo que es observable en campo, y es el hecho de que a este punto llegan aguas de baja saturación, que son las causantes de la disolución de la base de los machones de este sector. Las bajas densidades de las aguas que aquí confluyen nos llevan a suponer una infiltración directa desde superficie, con un flujo relativamente rápido, tal que no permite que estas aguas se saturen lo suficiente como para no causar dilución antes de llegar al reservorio 23.

7 HIDROLOGIA

7.1 COMPONENTES HIDROMETEREOLÓGICAS

Se describen a continuación las variables climáticas de la zona de estudio. Se utilizaron los datos de estaciones hidrometeorológicas de la CAR y del IDEAM. En el estudio BALANCE HÍDRICO MINA DE SAL ZIPAQUIRA COLSALMINAS LTDA del año 2011, este estudio es fundamental al momento de comparar los resultados obtenidos en este capítulo en donde se emplearon nuevas metodologías y en donde se complementó el estudio climático como es el caso de la generación de los mapas temáticos, el cálculo de la ETP mediante varias metodologías entre otros aspectos.

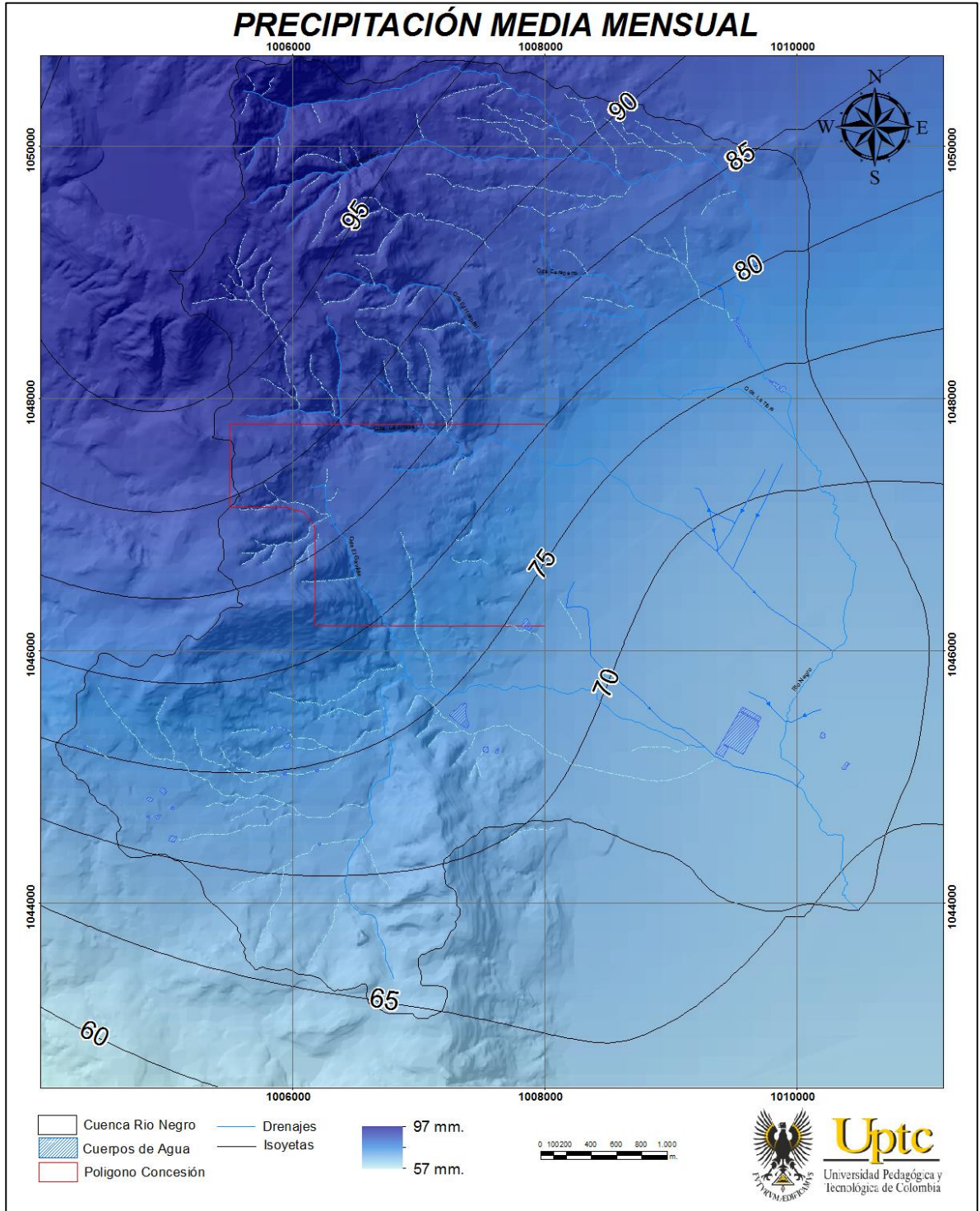
7.1.1 Precipitación

En el anexo 04 se encuentran las estaciones empleadas para la estimación espacial y temporal de la precipitación en la zona de estudio. Se interpolaron los valores medios de la precipitación de cada estación generando los mapas de precipitación media y anual de la zona de estudio, utilizando la herramienta Spline de ArcGis. Los valores faltantes de precipitaciones mensuales en cada una de las estaciones se reemplazaron por el valor ponderado del respectivo mes considerado para todos los años de cada una de las estaciones, siempre y cuando la cantidad de datos faltantes en un año dado no fuesen superiores a ocho (8), este parámetro de referencia fue tenido en cuenta en base a el estudio Elaboración del Diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca del río Bogotá Subcuenca del río Negro – 2120-14, Cuenca Hidrográfica.

7.1.1.1 Distribución Espacial:

La distribución espacial de la precipitación se determinó mediante el método de las Isoyetas (anexo 05) Los valores promedios anuales de precipitación para la subcuenca del Río Negro fluctúan desde un valor mínimo de 775 mm en la parte inferior de la Cuenca y hacia la parte superior alcanzan los 1172 mm en promedio la precipitación anual es de **935 mm** y para la zona de estudio el valor mínimo es de 907 mm/año y el valor máximo es de 1128.9 mm/año en el extremo Nor-Occidental, la precipitación promedio anual es de **1017 mm** (anexo 06) Los valores Promedios Mensuales Multianuales son de **78,6 mm** para la cuenca del **Río Negro** y de **84.8 mm** (ver mapa 5) para el **Polígono de Concesión**.

Mapa 7: Isoyetas - Precipitación media mensual.



Fuente: autores.

Tabla 14: Tabla comparativa de los valores obtenidos de precipitación en el presente estudio con los valores calculados en otros estudios, para el Polígono de Concesión.

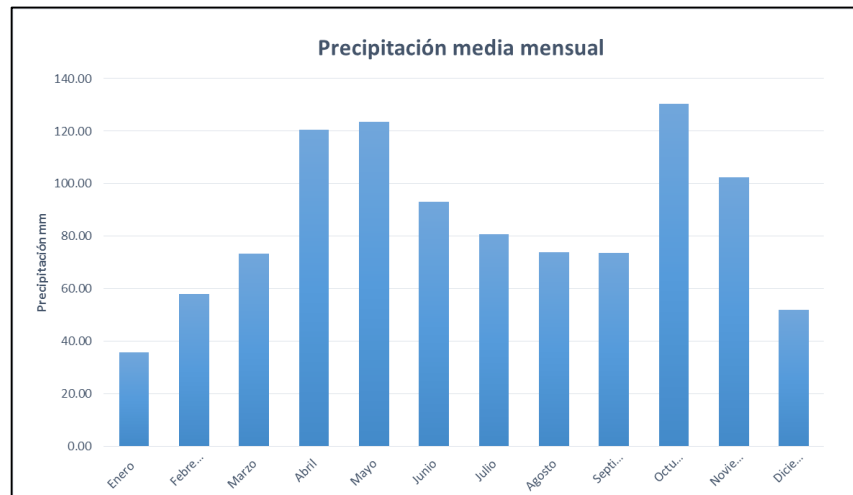
Datos existentes v.s. Datos Obtenidos		
ESTUDIO	PMA	PMM
BALANCE HÍDRICO MINA DE SAL ZIPAQUIRA COLSALMINAS LTDA	1024.34	x
ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRÁ	1017.920271	82.80103897
Valor Promedio	1021.130136	82.80103897

Fuente: autores.

7.1.1.2 Distribución Temporal:

La distribución temporal de la precipitación en el area de estudio es de tipo Bimodal, presentandose los valores maximos en los periodos de Abril-Mayo y Octubre-Noviembre en consecuencia existen dos periodos de bajas precipitaciones el primero inicia en el mes de Diciembre extendiendose hasta el mes de marzo y el segundo inicia desde Junio hasta el mes de semptiembre. En la estación de Zipaquira se tienen registrados hasta el año 2014 una precipitación maxima mensual de 287 mm y una precipitación mínima mensual de 0,10 mm.

Gráfica 10: Comportamiento de la precipitación.



Fuente: autores.

7.1.1.3 Estimación de los valores de Escorrentía

La estación Paso Ancho de la CAR ubicada en la coordenadas N: 1045112 Y E: 1009608 en el municipio de Zipaquirá mide los caudales medios de la corriente del Rio Negro pero teniendo en cuenta que las quebradas que discurren por la zona de estudio no drenan sus aguas directamente al Rio Negro, se hace necesario implementar una metodología que permita calcular estos valores en cuencas no aforadas. Es así como se recurre a la modelo del número de curva propuesto por el Servicio de Conservación de Suelos (Soil Conservation Service SCS). El parámetro del número de curva define la capacidad de un suelo de producir escorrentía de acuerdo a varias características del suelo: usos, tipo, humedad previa, capacidad de infiltración, es así que un número de curva alto indica una alta capacidad de escurrimiento y por el contrario un alto porcentaje de retención del suelo equivale a un número de curva menor. El número de curva es un valor que oscila entre 0 y 100. Este modelo es altamente sensible a las condiciones de humedad del suelo (Rubén Fernández, 2010) variable que de no ser calculada acertadamente implica errores importantes en la estimación de los valores de escorrentía sin embargo este método es ampliamente utilizado actualmente aún con las limitantes que pueda presentar.

El modelo del número de curva define la escorrentía superficial en unidades del sistema internacional como:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad \text{Siendo } S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Donde:

- Q= Escorrentía superficial
- S= Máxima infiltración Potencial
- P= Precipitación media
- CN= Número de curva

En la siguiente tabla se determina el número de curva para el polígono de concesión:

Tabla 15: Numero de curva de la zona de estudio.

CATEGORIA	Perimetro m	Area m2	Area Ha	Porcentaje	Tipo de Suelo	Número de Curva
Arbustos y Matorrales	1902.73	24010.03	2.40	0.01	77.00	0.55
Bosque de Galería y/o Ripario	1672.32	16918.11	1.69	0.01	54.00	0.27
Bosque Denso Alto de Tierra Firme	2775.49	67415.87	6.74	0.02	63.00	1.26
Bosque Plantado	11877.46	947004.92	94.70	0.28	63.00	17.68
Bosque Secundario	9840.21	432184.99	43.22	0.13	63.00	8.07
Cuerpos de Agua	311.49	3268.12	0.33	0.00	100.00	0.10
Mosaico de Pastos y Espacios Naturales	1993.13	46062.36	4.61	0.01	75.00	1.02
Mosaico de Pastos y Cultivos	5653.16	235115.14	23.51	0.07	84.00	5.85
Pastos Limpios	16734.82	895340.52	89.53	0.27	75.00	19.90
Tejido Urbano Continuo	5806.66	295940.44	29.59	0.09	79.00	6.93
Tejido Urbano Discontinuo	7110.72	92870.73	9.29	0.03	82.00	2.26
Zonas de Extracción Minera	1627.83	46739.93	4.67	0.01	91.00	1.26
Zonas Industriales y Comerciales	4830.42	271906.85	27.19	0.08	86.00	6.93
Σ	72136.45	3374778.02	337.48	1.00		72.07

Fuente: Autores.

Tabla 16: valores de escorrentía.

	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	Total
Precipitación	35.85	58.19	73.38	120.46	123.59	93.20	80.74	73.84	73.77	130.37	102.36	52.00	1017.75
S	98.45	98.45	98.45	98.45	98.45	98.45	98.45	98.45	98.45	98.45	98.45	98.45	1181.36
Q	2.28	10.82	18.95	50.97	53.35	31.43	23.37	19.22	19.17	58.58	37.73	7.98	333.85

Fuente: autores.

Se estimó un valor de escorrentía de 333.85 mm/año este valor representa casi el 33% de la precipitación media anual, los volúmenes de escorrentía para la zona de estudio sería entonces de 1125087.982 m³/año.

7.1.2 Temperatura

Para la determinación de la distribución espacial y temporal de la temperatura se consideraron 20 estaciones climatológicas. Los datos mensuales faltantes en cada estación fueron calculados de igual forma que en las estaciones de Precipitación. Las estaciones empleadas se describen en el anexo 07

7.1.2.1 Distribución espacial:

Para la generación del mapa de isotermas de la zona de estudio inicialmente se corrigieron los valores de temperatura media mensual, dada en cada estación, considerando el Gradiente altitudinal y posteriormente se calculó la temperatura media en cualquier punto a partir de la temperatura corregida (T_{det}) y el Modelo Digital de Elevación. Estos cálculos se hicieron en base a las siguientes ecuaciones (RUTGER, FRIES, NAUB, & PETERS, 2011):

$$T_{det} = T_{mensual} + (r (Z_{det} - Z_{estación}))$$

$$T(x, y) = T_{det} + (r (Z^{DEM} - Z_{det}))$$

Donde:

T_{det} = Temperatura corregida

$T_{mensual}$ = Temperatura media mensual

r = Gradiente térmico

Z_{det} = Altura de referencia, por encima de la cual se encuentran todas las estaciones

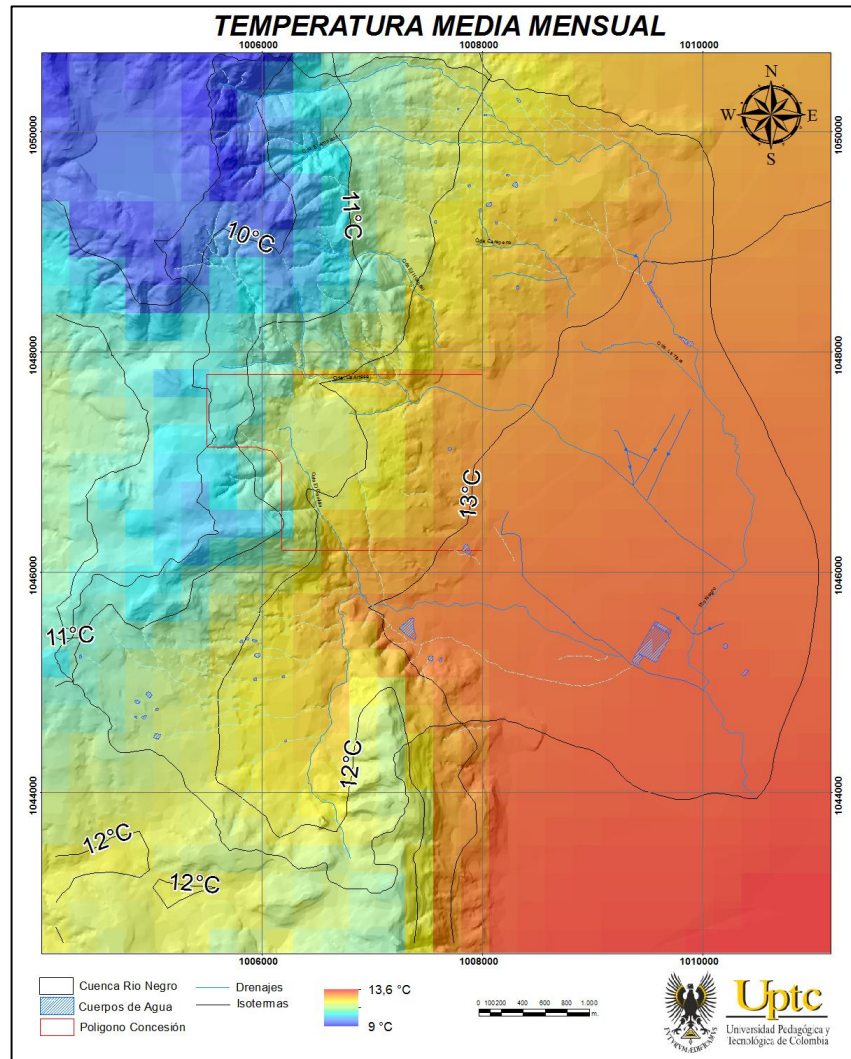
$Z_{estación}$ = Altura real de las estaciones

$T(x, y)$ = Temperatura calculada para cualquier punto sobre la zona de estudio

Z^{DEM} = Altura de cualquier punto a partir del modelo digital de elevación

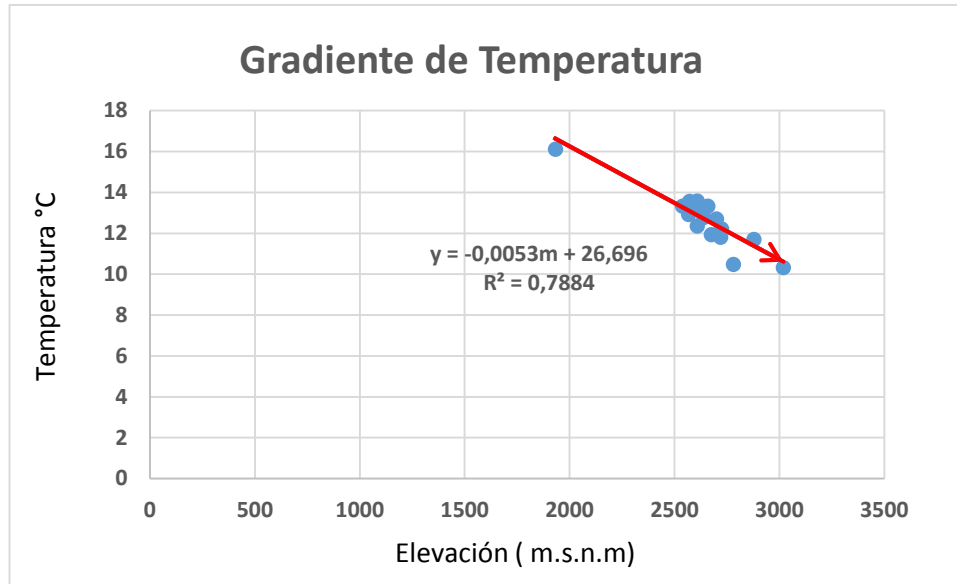
Considerando la elevación de cada una de las estaciones se pudo definir el gradiente altitudinal de temperatura para la zona, como resultado se tiene que el gradiente es de 0,0053°C cada 1 m. En base a la temperatura media calculada (Tdet) y a partir de este gradiente se obtuvieron las isólinas de Temperatura o Isothermas (ver mapa 6).

Mapa 8: Isothermas de la zona de estudio



Fuente: Autores.

Gráfica 11: Gradiente de temperatura. Nótese que la relación de Temperatura y elevación (R) es cercana a uno (1).

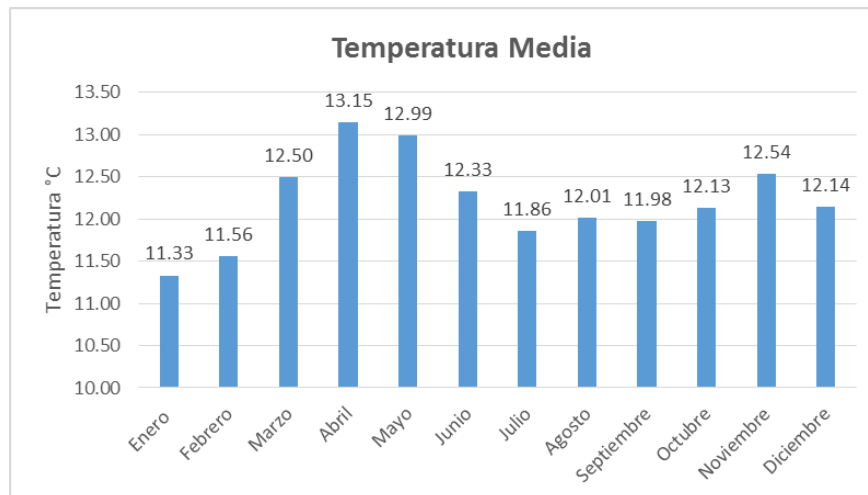


Fuente: Autores.

7.1.2.2 Distribución temporal

La temperatura promedio de la zona de estudio es de 12.2 °C y los valores medios mensuales se muestran a continuación:

Gráfica 12: Valores medios mensuales de temperatura.

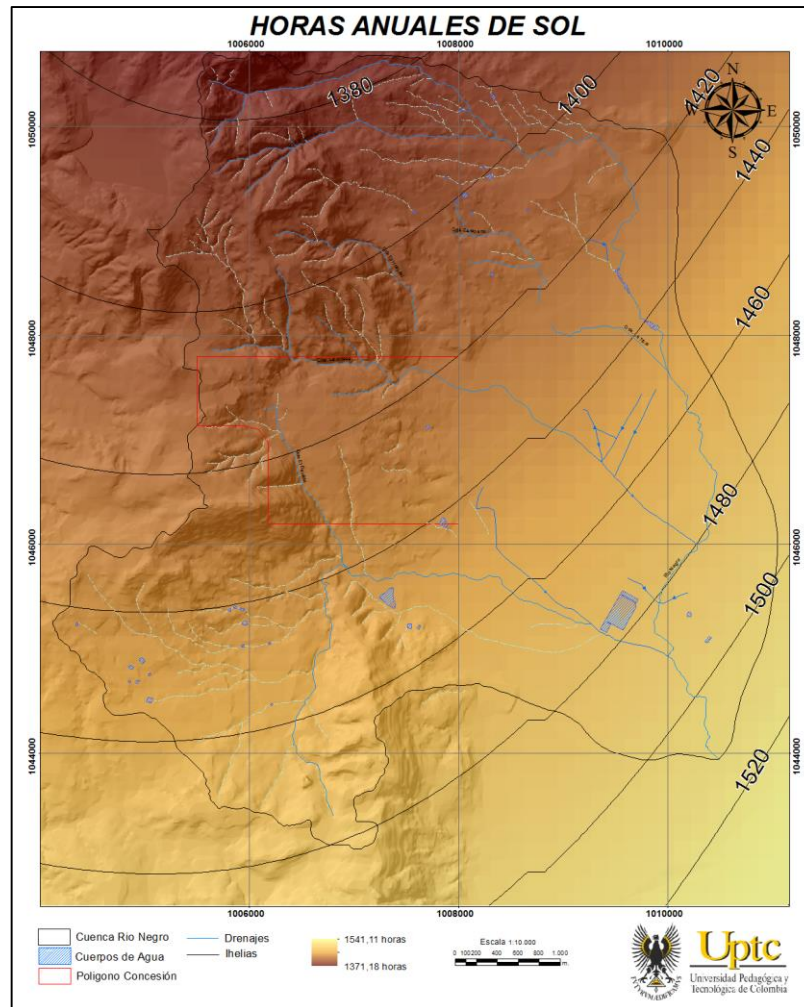


Fuente: Autores.

7.1.3 Brillo Solar

Hacia la parte norte de la zona de estudio se presentan los valores promedios anuales más bajos de horas solares: 1371 horas aproximadamente y hacia la parte sur del área los valores son de 1541 horas aproximadamente. En cuanto a la distribución temporal los meses con mayor intensidad de horas de sol son los meses de enero y diciembre con aproximadamente 174 y 154 horas respectivamente.

Mapa 9: Duración media en horas por año de brillo Solar.

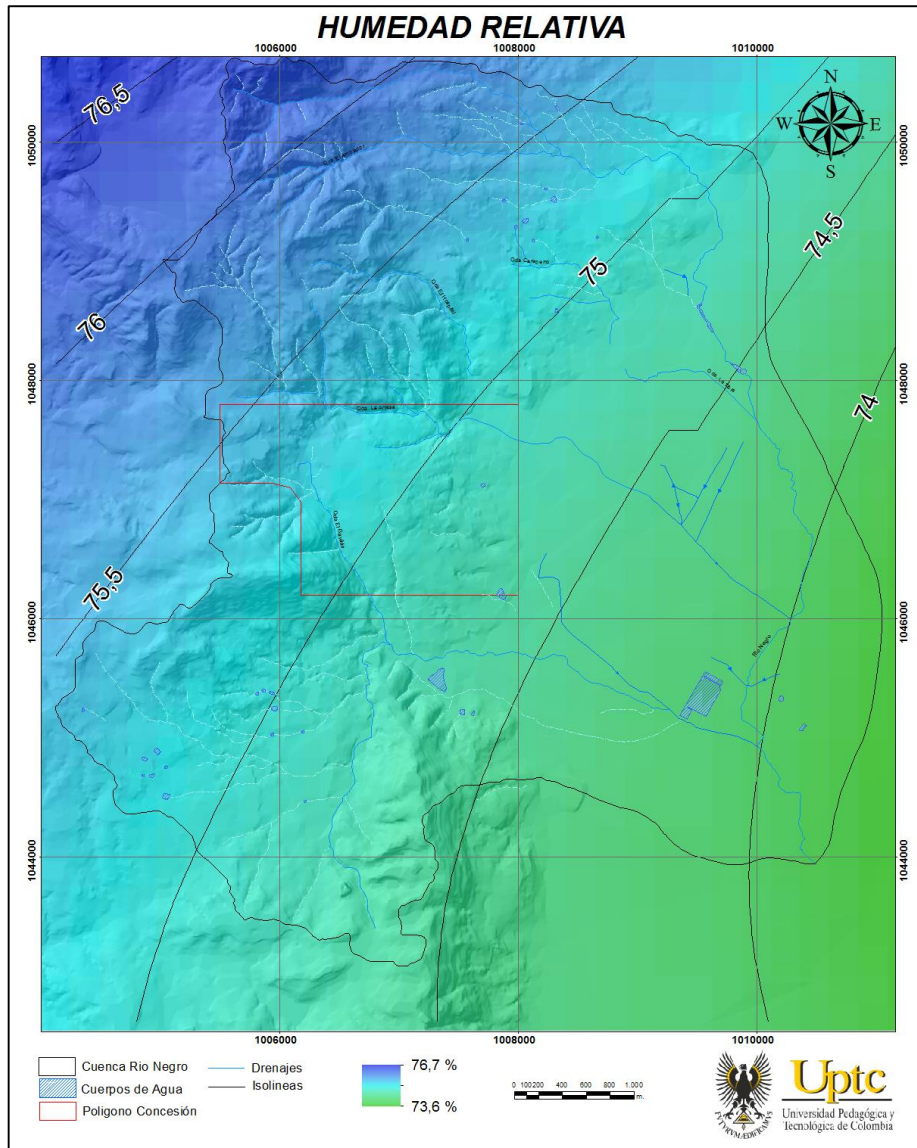


Fuente: Autores.

7.1.4 Humedad Relativa

Los mayores porcentajes de humedad se presentan en los meses donde hay mayor precipitación, abril – mayo y octubre – noviembre son los periodos más húmedos. El valor medio de Humedad Relativa para la zona de estudio es del 75 %

Mapa 10: Humedad relativa promedio en porcentaje.

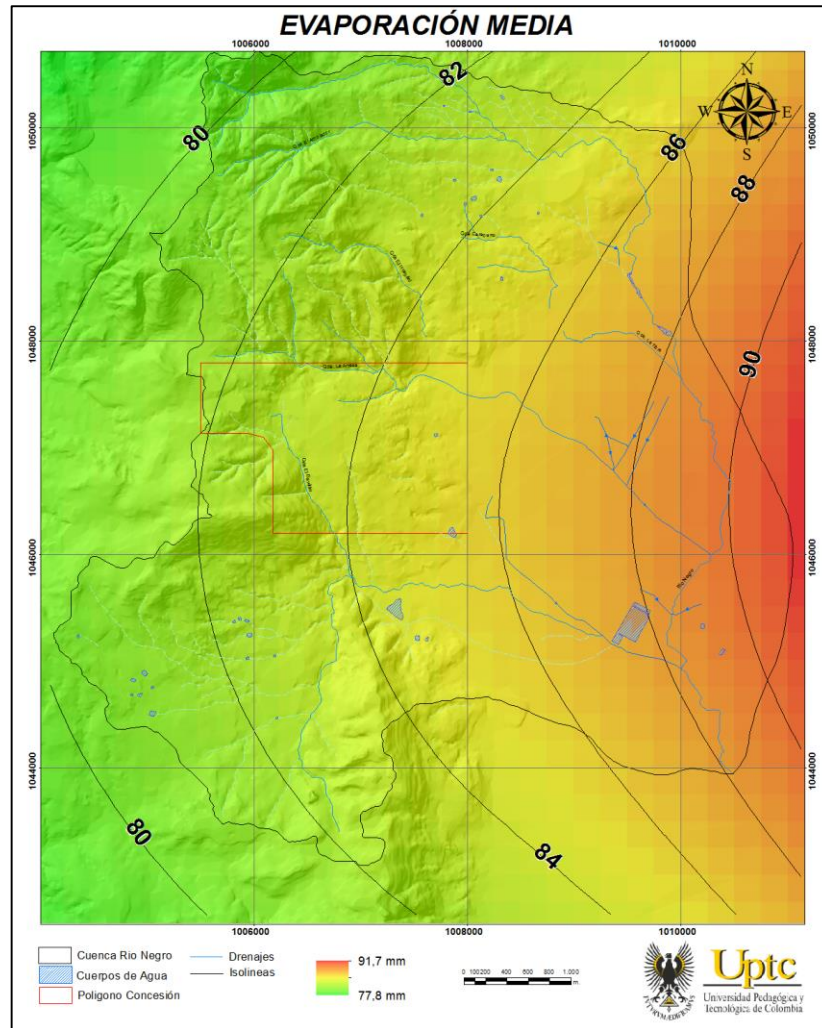


Fuente: Autores.

7.1.5 Evaporación

El valor de evaporación en promedio para el polígono de concesión está entre 82 y 85 mm por mes según la interpolación de los datos registrados en las estaciones empleadas (ver anexo). Esta variable es fundamental, junto con la transpiración de las plantas, para determinar la Evapotranspiración dada en una zona cualquiera.

Mapa 11: Evaporación media mensual.



Fuente: Autores.

7.2 EVAPOTRANSPIRACIÓN

7.2.1 Evapotranspiración Potencial

Thornthwaite define la evapotranspiración potencial como “la cantidad de agua que perderá una superficie completamente cubierta de vegetación en crecimiento activo si en todo momento existe en el suelo humedad suficiente para su uso máximo por las plantas”.

Los valores de la Evapotranspiración Potencial se calcularon mediante tres metodologías: Thornthwaite, L. Turc y Hargreaves. Tal como se indica en un estudio comparativo de las

metodologías para el cálculo de la evapotranspiración de los departamentos de Cundinamarca y Valle (Marín, 2010) el método combinado de Penman – Monteith se considera como que estimaría mejor los valores de la evapotranspiración puesto que entre otros aspectos es el método recomendado por la FAO, por otra parte si no se cuenta con todas la variables necesarias para implementar esta metodología el método de Hargreaves se presenta como la mejor opción para el cálculo de la ETP en el departamento de Cundinamarca.

Los resultados obtenidos se compararon con los valores mensuales de ETP hallados con la metodología de Penman – Monteith realizada por el IDEAM para las estaciones climatológicas La Cosecha y Ventalarga en el municipio de Zipaquirá y que se muestran en el Balance Hídrico de COLSALMINAS 2011.

Tabla 17: Valores mensuales de ETP método combinado de Penman Monteith.

Meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiem	Octubre	Noviem	Diciem
ETP mm	69.40	64.65	71.00	66.05	66.05	66.05	66.10	68.10	66.00	65.20	61.65	65.35

Fuente: Balance Hídrico de la Mina de sal de Zipaquirá.

Tabla 18: Métodos para el cálculo de la ETP y las respectivas variables empleadas.

Método	Variables					
	Temperatura	Radiación Solar	Velocidad de Viento	Humedad Relativa	Precipitación	Altitud
Thornthwaite						
Penman-Monteith						
Turc						
García - López						
Blanney-Criddle						

Fuente: autores.

7.2.1.1 Metodología de Thornthwaite:

Se describe a continuación de manera resumida el método de Thornthwaite:

1- Índice de calor mensual.

$$i = \left(\frac{t}{5} \right) 1,514$$

2- Índice de calor anual

$$I = \sum i$$

3- Evapotranspiración Mensual sin corregir en mm/mes para meses de 30 días y 12 horas de sol. (Teóricas)

$$ETP_{sc} = 16 \left(\frac{10 \cdot t}{l} \right) a$$

t = Temperatura media mensual °C

l = índice de calor anual

$$a = (675 \cdot 10^{-9} \cdot l^3) - (771 \cdot 10^{-7} \cdot l^2) + (1792 \cdot 10^{-5} \cdot l) + (0,49239)$$

4- Evapotranspiración potencial corregida

$$ETP_c = ETP_{sc} \left(\frac{N}{12} \right) \left(\frac{d}{30} \right)$$

N = número máximo de horas de sol en h/días en función de la latitud de la zona de estudio. (ver anexo 08)

d = número de días del mes.

Tabla 19: Cálculo de la ETP - método de Thornthwaite.

ETP - Método Thornthwaite												
Meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Número de días	31	28.25	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
Temperatura °C	11.33	11.56	12.50	13.15	12.99	12.33	11.86	12.01	11.98	12.13	12.54	12.14
Índice de calor mensual	3.45	3.56	4.00	4.32	4.24	3.92	3.70	3.77	3.75	3.83	4.02	3.83
Índice de calor anual	46.40											
Coefficiente a	1.23											
N (h/días)	11.80	11.90	12.00	12.10	12.20	12.20	12.20	12.10	12.00	11.90	11.80	11.80
N/12	0.98	0.99	1.00	1.01	1.02	1.02	1.02	1.01	1.00	0.99	0.98	0.98
L	1.02	0.93	1.03	1.01	1.05	1.02	1.05	1.04	1.00	1.02	0.98	1.02
ETP _{sc}	47.79	48.98	53.88	57.32	56.47	52.97	50.53	51.32	51.15	51.96	54.08	51.99
ETP _c Thornthwaite	48.56	45.74	55.68	57.80	59.33	53.85	53.09	53.48	51.15	53.25	53.18	52.83

Fuente: Autores.

7.2.1.2 Metodología de L. Turc

$$ETP = (R_g + 50) \times \left(\frac{T_m}{T_m + 15} \right) \times K$$

ETP: Evapotranspiración potencial en el mes dada en mm

K: 0.40 para los meses de 30 y 31 días

K: 0.37 para el mes de 28 días

T: Temperatura media mensual en °C

R_G: Radiación global en Cal/cm²/día

$$R_G = R_A \left((a + b \left(\frac{n}{N} \right)) \right)$$

R_G: Radiación global en Cal/cm²/día

R_A: Radiación solar recibida en el límite superior de la atmósfera (Ver anexo 09)

n: Número real de horas de brillo solar, en horas y décimas por día.

N: Duración del brillo solar posible desde el punto de vista astronómico en horas. (Ver anexo 08)

a y b: Coeficientes de regresión, en función de la localización geográfica:

Tabla 20: Coeficientes de regresión, en función de la localización geográfica.

	a	b
Para zonas frías y templadas	0.18	0.55
Para zonas tropicales secas	0.25	0.45
Para zonas tropicales húmedas	0.29	0.42

Fuente: Metodología L. Turc.

Tabla 21: Cálculo de la ETP - método de L. Turc.

ETP - L. Turc												
Meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Número de días	31.00	28.25	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00
Brillo Solar	176.10	142.10	119.47	98.57	90.77	97.86	106.34	104.26	107.81	114.18	117.00	157.81
RA (MJul/m2 día)	34.60	36.40	37.60	37.40	36.00	35.00	35.30	36.50	37.30	36.60	34.90	33.90
RA (Cal/cm2 día)	823.48	866.32	894.88	890.12	856.80	833.00	840.14	868.70	887.74	871.08	830.62	806.82
a	0.18											
b	0.55											
n (h/día)	5.68	5.03	3.85	3.29	2.93	3.26	3.43	3.36	3.59	3.68	3.90	5.09
N	11.80	11.90	12.00	12.10	12.20	12.20	12.20	12.10	12.00	11.90	11.80	11.80
RG	366.27	357.34	319.15	293.16	267.33	272.44	281.15	289.17	306.02	305.08	300.51	336.67
K	0.40	0.37	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
ETP L. Turc	71.66	65.60	67.11	64.11	58.90	58.18	58.49	60.33	63.23	63.52	63.83	69.18

Fuente: Autores.

7.2.1.3 Metodología de Hargreaves

La ecuación de Hargreaves calcula la ETP en función de la temperatura, la humedad relativa, los valores medios de horas de brillo solar, la velocidad del viento entre otras variables. La ecuación general es:

$$ETP = C_1 D T F_H C_W C_i C_A$$

Donde:

C₁= Coeficiente en función del brillo solar (tabulado)

D= 0.12P donde P es el porcentaje teórico de horas de brillo solar respecto al año

T= Temperatura media en °C

F_H= Coeficiente de humedad relativa

C_W= Coeficiente del viento

C_i= Coeficiente del brillo solar

C_A= Coeficiente de elevación

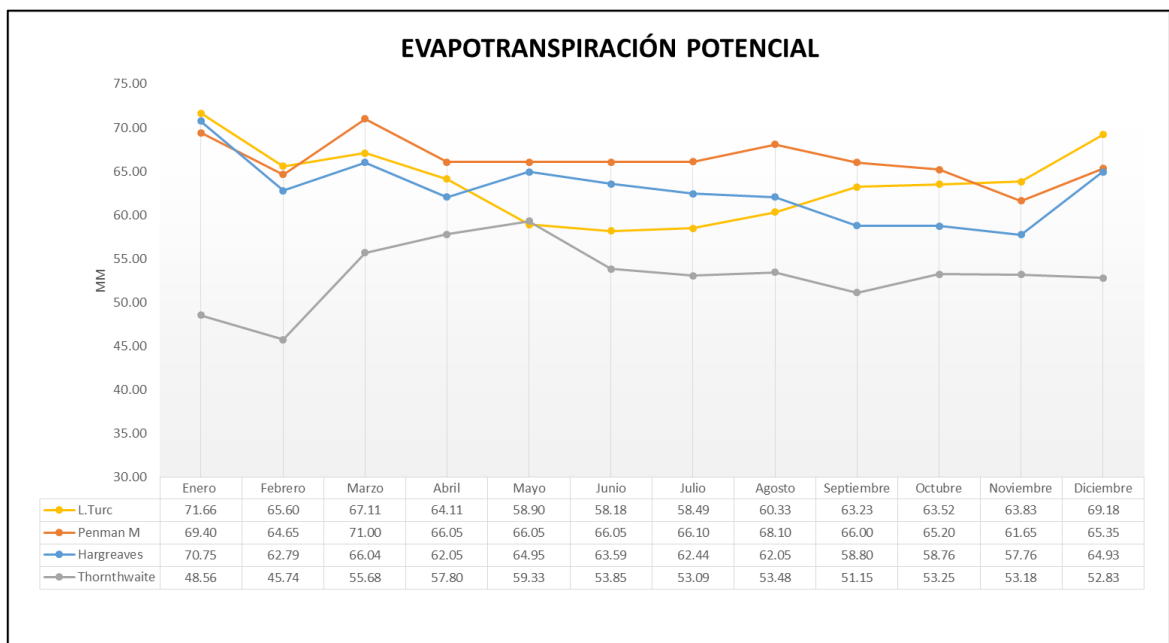
ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03

Tabla 22: Valores medios mensuales de evapotranspiración método de Hargreaves.

ETP - Hargreaves												
meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
C1	12.50	12.50	12.50	12.50	12.50	12.50	12.50	12.50	12.50	12.50	12.50	12.50
P	8.30	7.60	8.50	8.30	8.70	8.40	8.70	8.60	8.20	8.40	8.10	8.30
D	1.00	0.91	1.02	1.00	1.04	1.01	1.04	1.03	0.98	1.01	0.97	1.00
Hrm	71.78	72.17	74.53	76.34	74.56	73.39	74.95	74.93	75.53	77.23	78.17	76.76
Hn	50.32	50.70	53.03	54.85	53.06	51.90	53.45	53.43	54.03	55.75	56.71	55.27
Fh	0.50	0.49	0.47	0.45	0.47	0.48	0.47	0.47	0.46	0.44	0.43	0.45
W2 km/día	171.52	174.26	167.50	161.73	163.06	181.23	187.45	181.81	170.81	161.55	151.23	159.97
Cw	1.08	1.09	1.08	1.07	1.08	1.09	1.10	1.09	1.08	1.07	1.06	1.07
S	0.48	0.42	0.32	0.27	0.24	0.27	0.28	0.28	0.30	0.31	0.33	0.43
Cl	0.76	0.72	0.66	0.64	0.62	0.63	0.64	0.64	0.65	0.66	0.67	0.73
CA	1.23											
T °C	11.33	11.56	12.50	13.15	12.99	12.33	11.86	12.01	11.98	12.13	12.54	12.14
ETP mm	70.75	62.79	66.04	62.05	64.95	63.59	62.44	62.05	58.80	58.76	57.76	64.93

Fuente: Autores.

Gráfica 13: Comparación de los valores medios mensuales de evapotranspiración potencial obtenidos con diferentes metodologías.



Fuente: Autores.

Como se puede apreciar en la gráfica las metodologías de L. Turc y Thornthwaite proporcionaron valores aceptables de evapotranspiración para la zona de estudio sin embargo los valores de ETP calculados con la metodología de Penman – Monteith y Hargreaves son los que mejor se relacionan, tal como se esperaba, por esta razón y para efectos del cálculo de la evapotranspiración real, necesaria para la resolver la ecuación del balance hídrico, se promediaron los valores de estas dos metodologías.

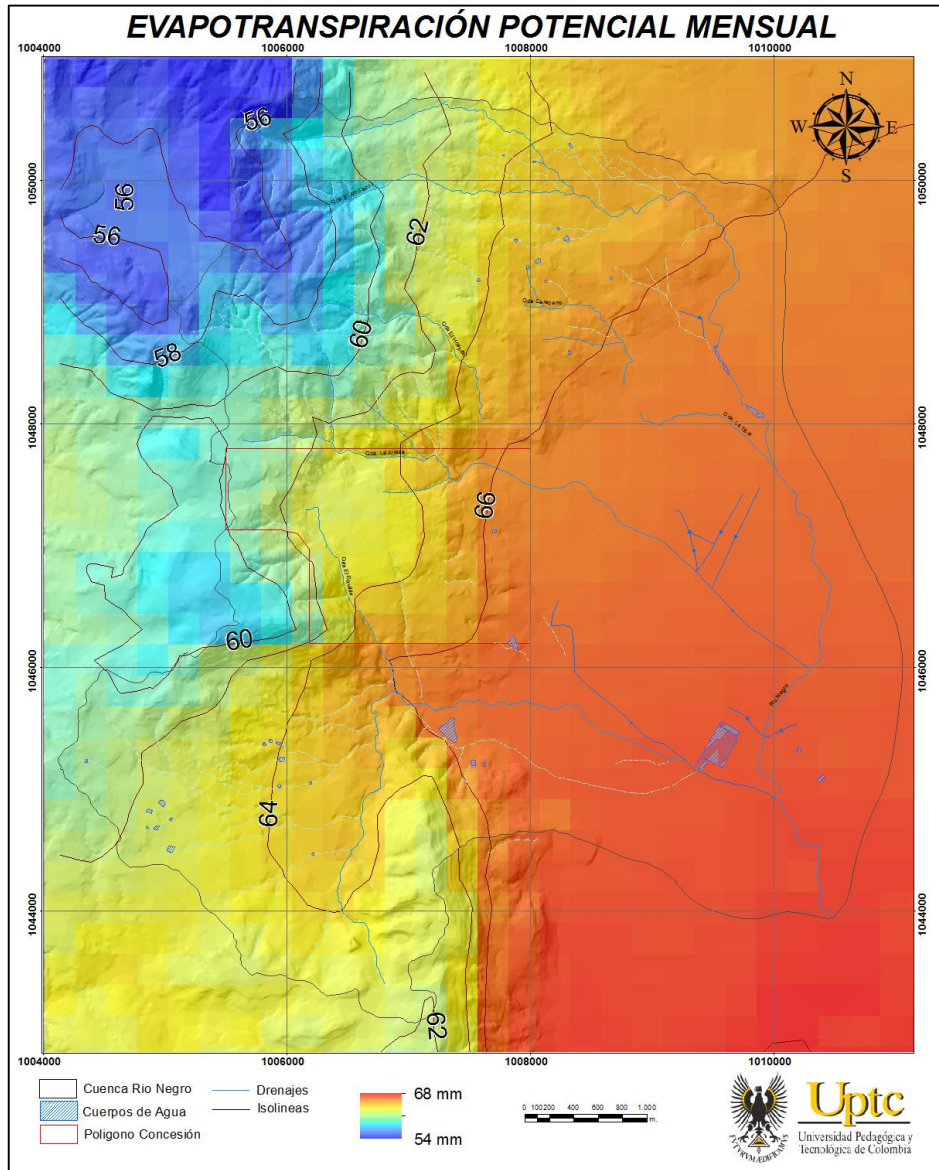
ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03

Tabla 23: Evapotranspiración potencial media mensual de la zona de estudio.

ETP Promedio Penman -Monteith y Hargreaves												
Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
70.08	63.72	68.52	64.05	65.50	64.82	64.27	65.08	62.40	61.98	59.70	65.14	775.25

Fuente: Autores.

Mapa 12: Evapotranspiración media mensual en la subcuenca hidrográfica Rio Negro.



Fuente: Autores.

7.2.2 Evapotranspiración Real

La evapotranspiración real se define como aquella evapotranspiración que ocurre bajo condiciones reales del terreno y del cultivo. En general la ETR es siempre menor que la ETP, y su determinación es más compleja es por esto que se realizó su determinación e base a dos metodologías una de ellas es la de Hargreaves y la otra la Budyko, esta última ecuación es empleada como metodología base para el cálculo de la ETR en el estudio del Balance Hidrológico de la mina de sal de Zipaquirá. Hargreaves propone que para corregir la ETP esta debe multiplicarse por un factor de cultivo K (este factor puede consultarse en las guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos de la FAO Food and Agriculture Organization por sus siglas en Inglés), en el presente estudio se toma este valor como 0.7, por otra parte Budyko propone una ecuación que en función de la ETP y la precipitación calcula la evapotranspiración real (ver anexo 09).

- Hargreaves

$$ETR = Kc * ETP$$

- Budyko

$$ETR = \sqrt{ETP * P * \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right) \left[1 - \cosh\left(\frac{ETP}{P}\right) + \sinh\left(\frac{ETP}{P}\right)\right]}$$

Se tiene entonces empleando estas dos fórmulas los valores promedios de la ETR para la zona de estudio:

Tabla 24: Evapotranspiración media anual.

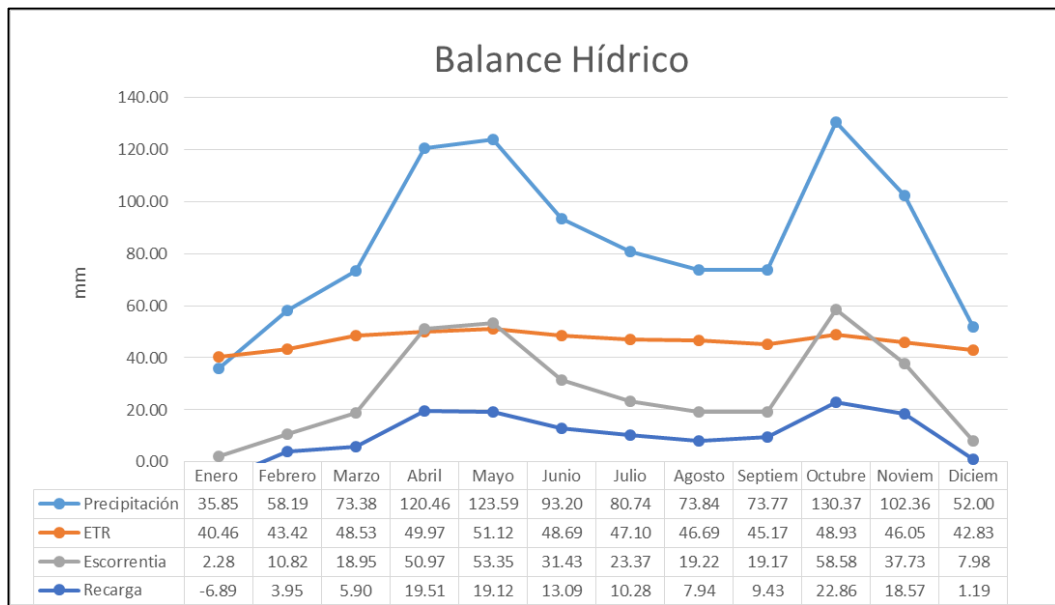
ETR (mm)	
Budyko	575.23
Hargreaves	542.68
Promedio	558.95

Fuente: Autores

7.3 BALANCE HIDRICO

Considerando cada una de las variables hidroclimáticas se calculó el balance hídrico de la zona de estudio. El balance hídrico de una cuenca hidrográfica se establece sobre la base de la ecuación de continuidad (VELEZ, 2011) en donde las entradas deben ser igual a las salidas \pm la variación en el almacenamiento. Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado se determinaron los valores promedios mensuales de la recarga hídrica en el polígono de concesión se obtuvo un valor de la recarga anual de 131.84 mm que corresponde a un volumen de 444,285.2561 m³/año.

Gráfica 14: Balance hidrológico de la zona de estudio.



Fuente: Autores

Los volúmenes de agua precipitados, evapotranspirados y de escorrentía se compararon con los valores citados en el Balance hídrico de la Mina de Sal de Zipaquirá del año 2011 y se observó una notable diferencia en el valor de la recarga anual esto puede deberse a que en ese estudio se sobreestima el valor de la recarga tomándose como el 30% de la precipitación media anual (MOTAVITA, 2011).

Tabla 25: Comparación de los resultados obtenidos.

Volumen m ³ /año	Modelo Hidrogeológico Conceptual	Porcentaje %	Balance Hídrico de la Mina de Sal de Zipaquirá	Porcentaje %
Precipitación	3429810.76	100.00	3852544.70	100.00
ETR-ETP	1883667.92	54.92	1853465.18	48.11
Escorrentia	1125087.98	32.80	1999079.52	51.89
Infiltración	444285.26	12.95	1271339.75	33.00
Recarga	116330.83	3.39	332885.24	8.64
Recarga m ³ /s	0.00368630	0.0000001	0.010548497	0.0000003

Fuente: autores.

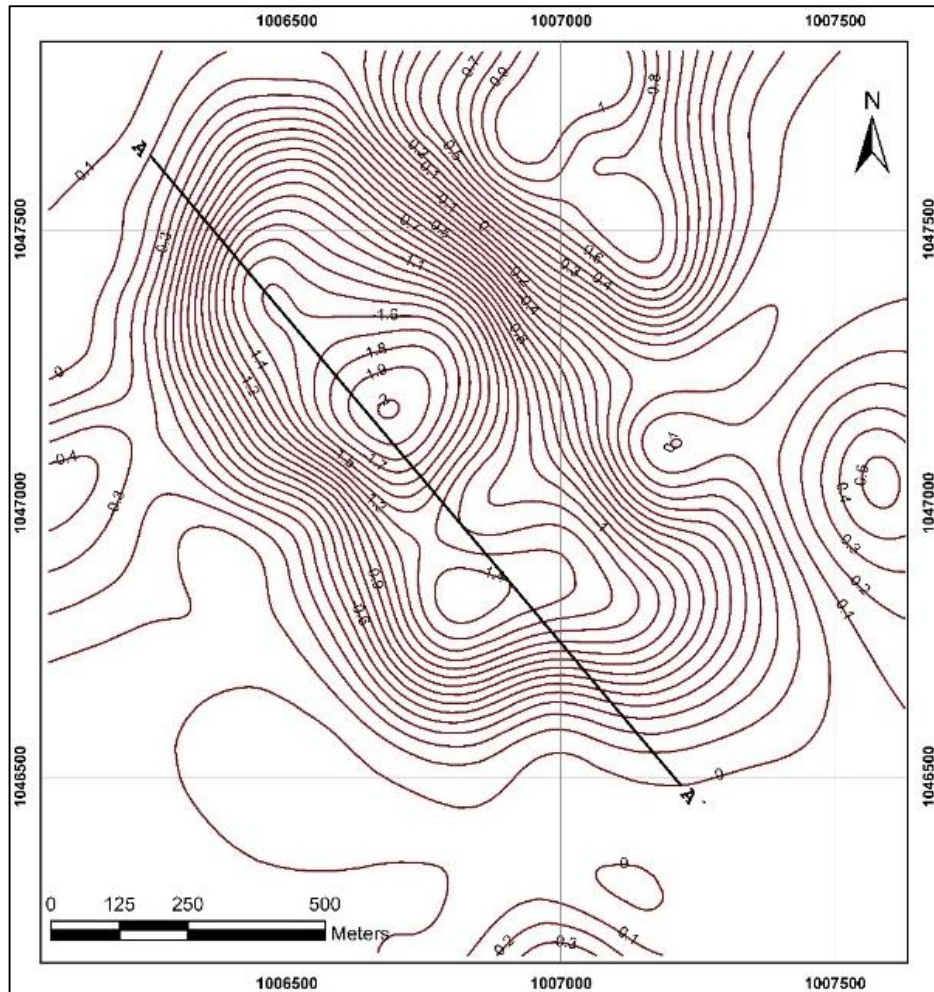
8 GEOFÍSICA

Para la concesión minera de Zipaquirá se encontró un informe de estudio geofísico de gravimetría y geoelectrica que data del 10 de octubre de 2001 y fue realizado por la empresa GEOINTERPRETACIÓN LTDA. El trabajo pretendió hacer mediciones desde superficie, para dar la forma aproximada del depósito de sal, localizar su centro y la geometría del yacimiento, con la intención de aumentar de manera importante las reservas de sal, principalmente en la zona donde no existen perforaciones ni antecedentes. Este estudio se compuso de dos actividades principales, la primera con 6 sondeos eléctricos verticales y la segunda con la realización de 120 estaciones gravimétricas. El proyecto estuvo constituido por las etapas de levantamiento geológico y cartográfico, una segunda etapa de adquisición de información geofísica (gravimétrica y geoelectrica); una tercera etapa de procesamiento de la información y una cuarta etapa de interpretación de datos.

8.1 GRAVIMETRÍA

La reinterpretación gravimétrica de los datos obtenidos por el informe en mención arroja el siguiente mapa de anomalía residual, ver Mapa 11. El levantamiento gravimétrico fue desarrollado utilizando un gravímetro SCINTREX CG3, con precisión de 0,01 mgal; y tomando como punto de partida la estación gravimétrica de la red gravimétrica nacional llamada 1-T-2, localizada en la catedral de municipio de Zipaquirá. Con la información de la estación IGAC, Bases temporales y estaciones gravimétricas, se realizaron amarres estación IGAC a Bases temporales y amarres bases temporales a estaciones gravimétricas, para finalmente tener todo el sistema amarrado a la red gravimétrica nacional. El presente trabajo se apoya en los resultados del estudio en mención para, en conjugación con los datos de perforaciones y lo conocido desde las labores mineras, proponer una primera aproximación a la geometría en 3D del domo salino, si llegar a pretender que esta propuesta sea un modelo definitivo.

Mapa 13: Anomalía residual, yacimiento de sal de Zipaquirá.

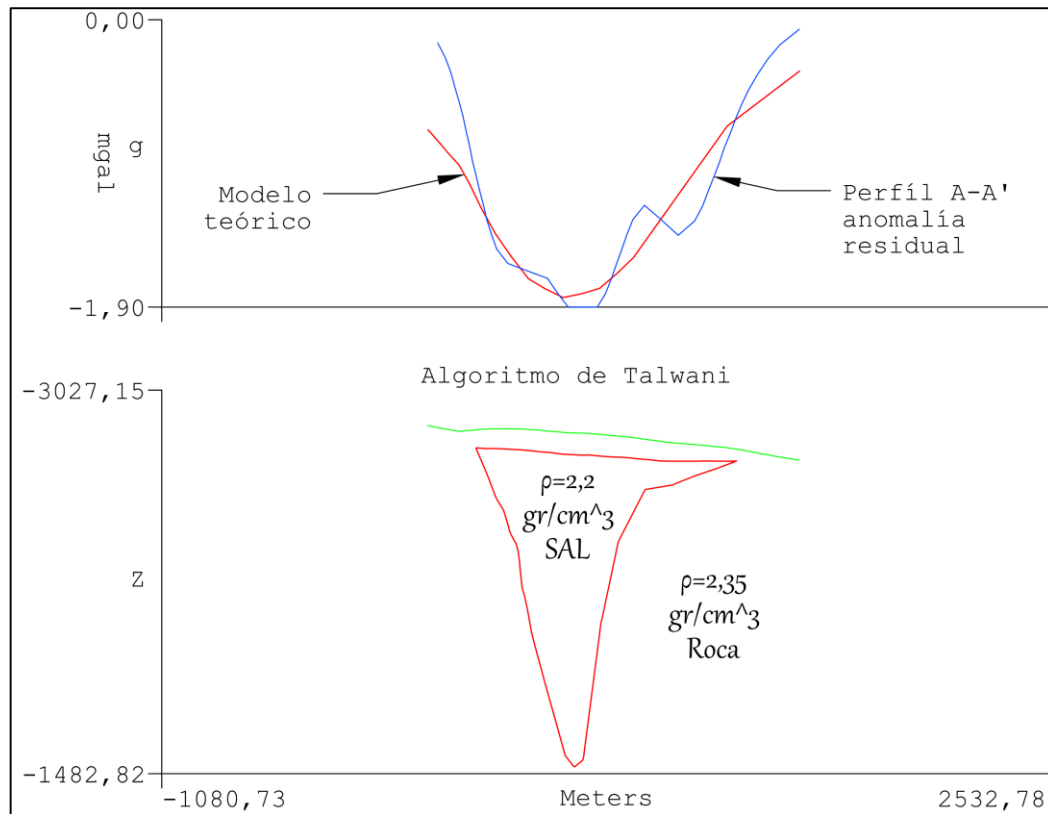


Fuente: Geo interpretación LTDA (2001).

8.1.1 Modelo gravimétrico

Geointerpretación LTDA (2001) realizó un perfil transversal del mapa de anomalía residual y complementando con la topografía del terreno halló la curva gravimétrica teórica, con la cual proponen un modelo gravimétrico en profundidad del yacimiento (ver grafica 13). El modelo propuesto por Geointerpretación LTDA, contempla una posible profundidad máxima de la sal de hasta 1350 m, medidos desde superficie.

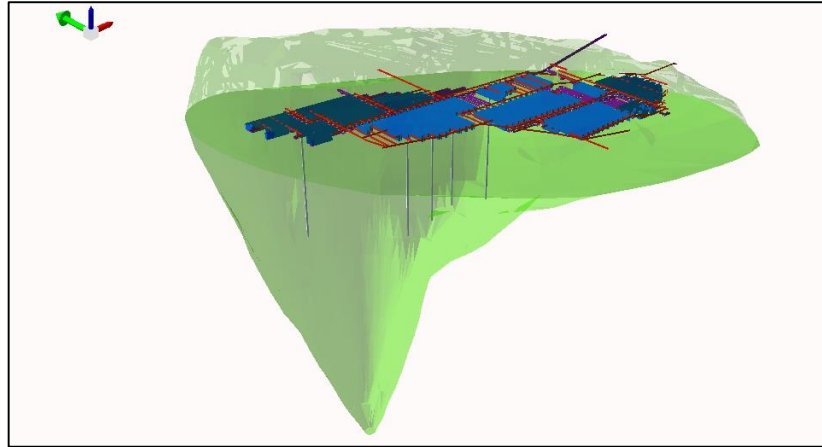
Gráfica 15: Modelo gravimétrico por el algoritmo de Talwani.



Fuente: Geointerpretación LTDA (2001).

Es de anotar que la gravimetría fue realizada en el área de interés con fines de determinar la geometría del cuerpo salino, lo que implica que se realizó sobre la formación Chipaque y es limitado para la determinación de otras estructuras y contactos con otras formaciones. El modelo propuesto por quienes escriben estas líneas se fundamenta, como ya se dijo, en el modelo gravimétrico propuesto por Geointerpretación LTDA (2001), las perforaciones existentes y la existencia de las labores mineras. Para establecer una propuesta de la geometría inferior del depósito salino, nos apoyamos en el modelo propuesto por el estudio gravimétrico en mención, las perforaciones fueron usadas para determinar la posición del techo del domo en la mayoría de los lugares donde se tiene información por perforaciones, mientras que las labores mineras fueron útiles a la hora de corroborar la validez del modelo que acá se propone, al menos hasta donde la existencia de dichas labores lo permiten (ver ilustración 8).

Ilustración 8: Modelo propuesto en 3D para el domo de Zipaquirá.



Fuente: Autores.

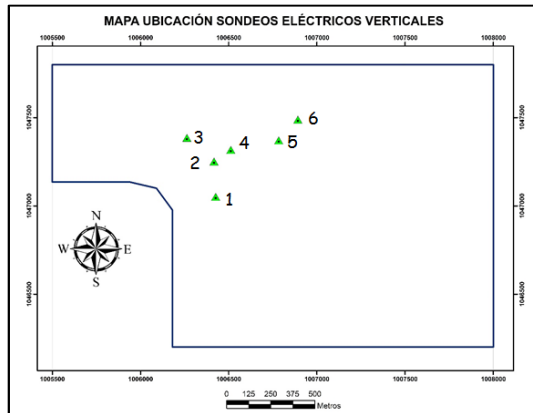
Esta información es útil para determinar las dimensiones del yacimiento salino y podrá llegar a ser útil para la posterior modelación numérica de la hidrogeología.

8.2 GEOELÉCTRICA

8.2.1 Sondeos Eléctricos Verticales SEV's

La empresa GEOINTERPRETACIÓN LTDA. Realizó 6 sondeos eléctricos verticales para complementar la información geofísica, para definir las características geológicas de la Mina de Sal de Zipaquirá. La localización de estos SEV's se muestra a continuación.

Mapa 14: Localización de los SEV's.



Fuente: Informe final estudio geofísico de gravimetría mina de sal de Zipaquirá, GEOINTERPRETACIÓN LTDA.

8.2.1.1 Datos de sondeos eléctricos verticales

Tabla 26: Datos de sondeos eléctricos verticales.

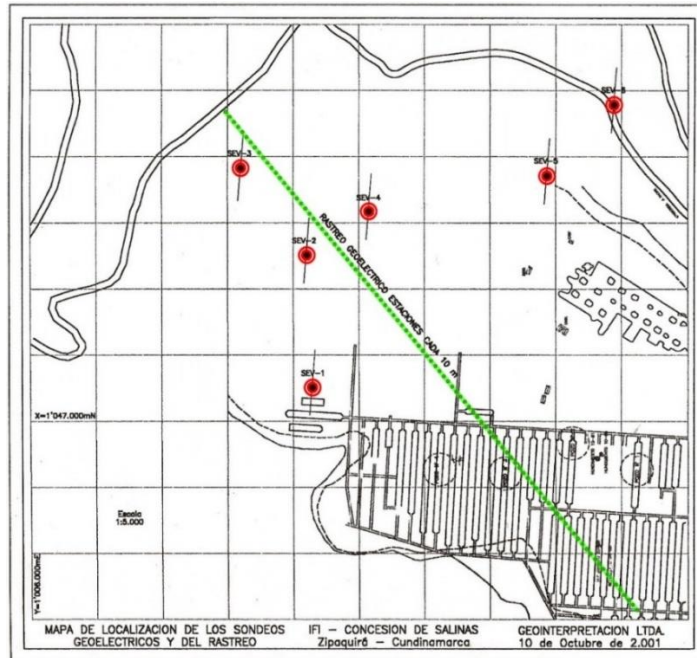
SEV-1				SEV-4			
X (mN)	Y (mE)	Z (m)	Azimut	X (mN)	Y (mE)	Z (m)	Azimut
1047051.3	1006425.9	2822.5	15° NE	1047317.2	1006511.7	2835.3	EW
Sondeo ubicado a 28 m del poste doble de luz, y a 100 m de la finca Las Tapias.				Sondeo localizado sobre la estaca 82, finca Las Tapias.			
SEV-2				SEV-5			
X (mN)	Y (mE)	Z (m)	Azimut	X (mN)	Y (mE)	Z (m)	Azimut
1047251	1006416.7	2831.1	45° NE	1047370.8	1006783.2	2813.4	[NP]
Parte arriba de la finca Las Tapias, vía entre la finca y el barrio Santiago Pérez.				Parte baja del barrio Santiago Pérez, entre estacas 75, 76 y 79.			
SEV-3				SEV-6			
X (mN)	Y (mE)	Z (m)	Azimut	X (mN)	Y (mE)	Z (m)	Azimut
1047385	1006263	2831.1	45° NE	1047488.5	1006891.9	2782.1	[NP]
Sondeo ubicado entre las estacas 71 y 83, es decir la 84A, finca Las Tapias.				Sondeo ubicado en la entrada arriba del acueducto Planta Galán, Sobre estaca 66-6, vía Pacho Km 2.			

Fuente: Informe final estudio geofísico de gravimetría mina de sal de Zipaquirá, GEOINTERPRETACIÓN LTDA.

8.2.2 Rastreo Geoeléctrico

Fue realizado un rastreo geoeléctrico con el fin de determinar la resistividad de la *Formación Rute*, el rastreo fue realizado utilizando el dispositivo Wenner - Schlumberger, utilizando simultáneamente 100 electrodos y profundidad de penetración de 20 m bajo la superficie.

Mapa 15: Localización de los SEV's y del rastreo geoelectrico.



Fuente: Informe final estudio geofísico de gravimetría mina de sal de Zipaquirá, GEOINTERPRETACIÓN LTDA.

El rastreo geoelectrico mostró que la resistividad de las primeras capas de suelo y de la *Formación Rute*, bajo la zona de estudio es del orden de 30 Ohm*m a 60 Ohm*m. La resistividad de la sal se encontró en el rango entre **10 Ohm*m** y **20 Ohm*m**, aunque en las capas profundas puede llegar a tener valores de hasta 60 Ohm*m según el estudio realizado.

8.2.3 Reinterpretación de la geoelectrica

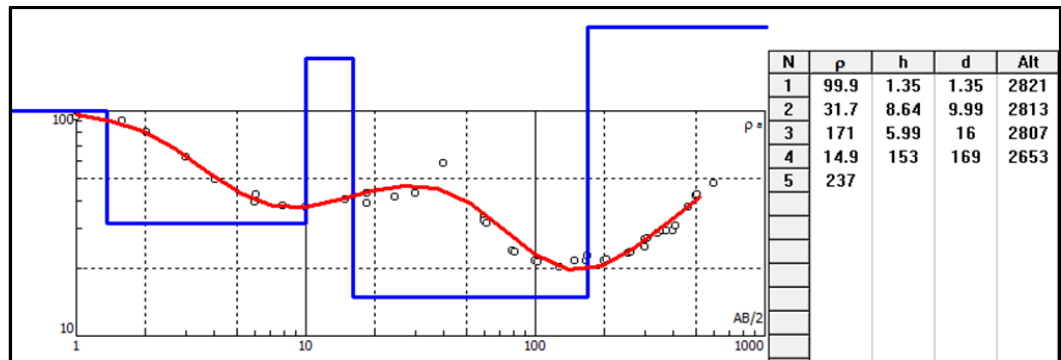
Se realizó una nueva interpretación de los estudios geoelectricos. En el programa ipi2win se representaron los datos existentes obteniéndose para cada sondeo las resistividades de cada capa, se relacionaron los valores de resistividades de las capas obtenidas con el registro litológico de perforaciones cercanas que se encuentran en la base de datos de la empresa COLSALMINAS y en base a la rastreo geoelectrico anteriormente citado. Posteriormente se trazaron dos perfiles Geológico – Geofísico de los SEV'S 1, 2 Y 3 (ilustración 11) y de los SEV'S 2, 4, 5 y 6 (ilustración 12).

- **SEV 1**

Con un AB/2 máximo de 600 m aproximadamente la interpretación de este sondeo arrojó como resultado 5 capas, una primera capa con una resistividad de 100

Ohm*m hasta una profundidad (p) de 1.3 m le sigue una capa de 8.64 m de espesor (h) con una resistividad mucho menor, 31.7 Ohm*m, relacionada con material arcilloso (Rute) saturado, posteriormente una capa de 171 Ohm*m, arenas saturadas, y a una profundidad de 14.9 m. se identifica una capa de 16 Ohm*m de espesor 153 m esta capa se relaciona con material de tipo salino.

Gráfica 16: Distribución de las resistividades en el SEV 1.



Fuente: Autores.

Tabla 27: Interpretación del SEV 1.

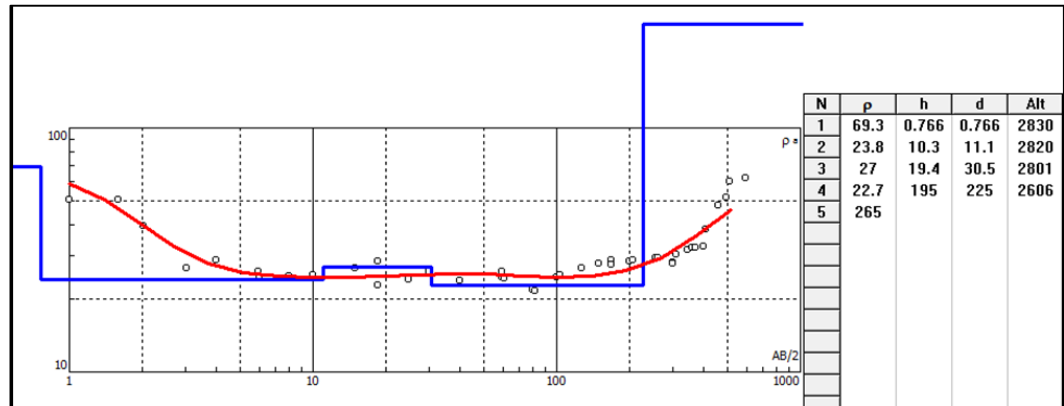
SEV 1			
Profundidad (m)	Resistividad Ω *m	Litología	
0	1.35	99.9	Suelo
1.35	9.99	31.7	Rute
9.99	16	171	Arenas Saturadas
16	169	14.9	Sal
169	-	237	Caliza

Fuente: Autores.

- **SEV 2**

La interpretación del SEV 2 mostró 5 capas, en primera instancia una capa de 0.7 m de espesor y de resistividad de 69 Ohm*m por debajo de esta las resistividad disminuye hasta 23 Ohm*m para una capa de 10m de espesor, este valor de resistividad correspondería a material salino, le sigue una capa de 19 m con una resistividad de 27 Ohm*m esta capa se relaciona con material de tipo Rute saturado, más a profundidad viene una capa de sal de 195 m con una resistividad de 22.7 Ohm*m.

Gráfica 17: Distribución de las resistividades en el SEV 2.



Fuente: Autores.

Tabla 28: Interpretación del SEV 2.

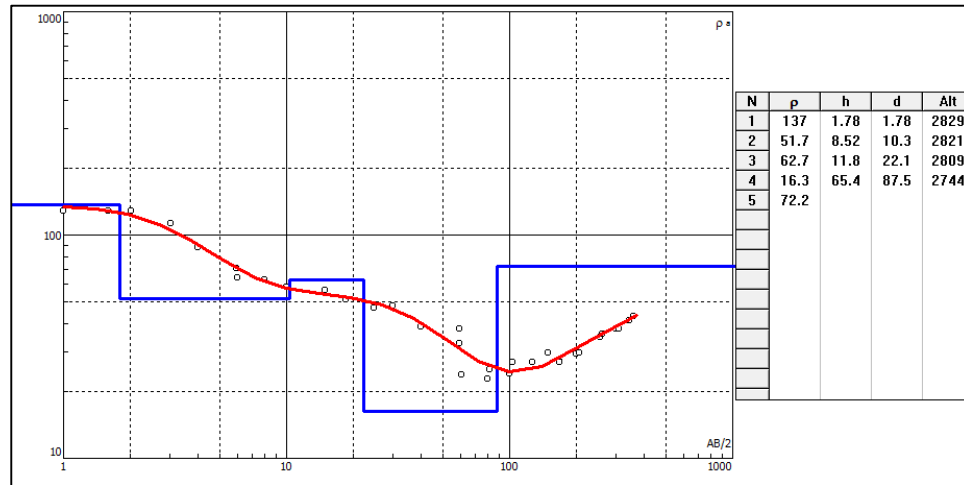
SEV 2			
Profundidad (m)		Resistividad Ω*m	Litología
0	0.766	69.3	Suelo
0.766	11.1	23.8	Sal
11.1	30.5	27	Rute
30.5	225	22.7	Sal
225	-	265	Caliza

Fuente: Autores

- **SEV 3**

Los resultados del SEV 3 arrojaron como resultado 5 capas hasta una profundidad de 87.5 m. la primera capa presenta una resistividad de 137 Ohm*m con espesor de 1.78 m la segunda capa presenta una resistividad 51.7 Ohm*m con espesor de 8.5 m que se designa como Rute, a los 10.3 m y hasta los 22.1 m se encuentran una capa de arenas saturadas con una resistividad de 62.7 Ohm*m, por debajo de esta le sigue una capa de sal con una resistividad de 16.3 Ohm*m con un espesor 65 m.

Gráfica 18: Distribución de las resistividades en el SEV 3.



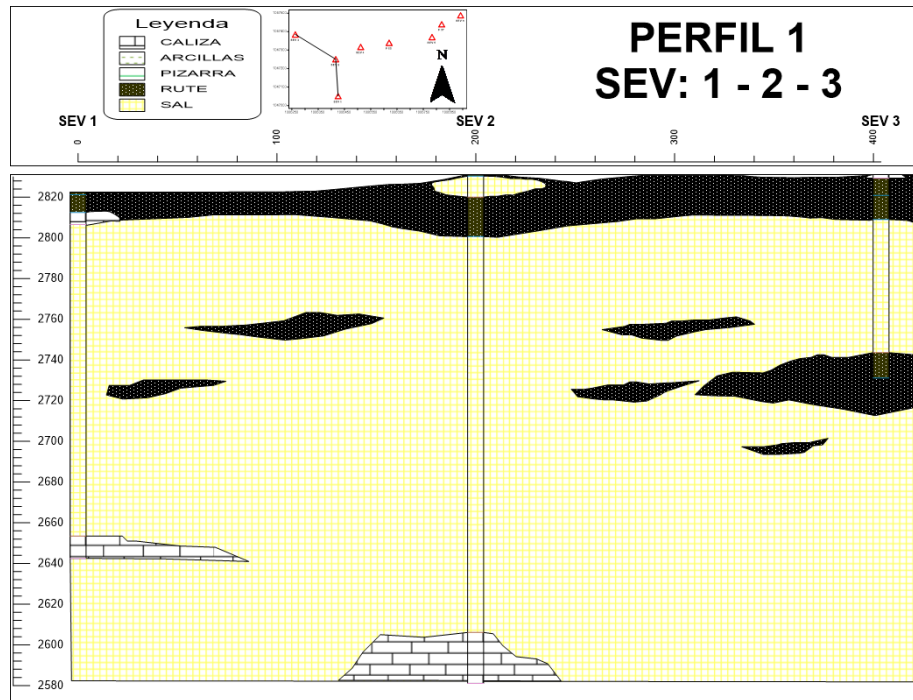
Fuente: Autores.

Tabla 29: Interpretación del SEV 3.

SEV 3			
Profundidad (m)		Resistividad $\Omega \cdot m$	Litología
0	1.78	137	Suelo
1.78	10.3	51.7	Rute
10.3	22.1	62.7	Arenas Saturadas
22.1	87.5	16.3	Sal
87.5	-	72.2	Rute

Fuente: Autores.

Ilustración 9: Corte geológico para los sondeos 1, 2 y 3.

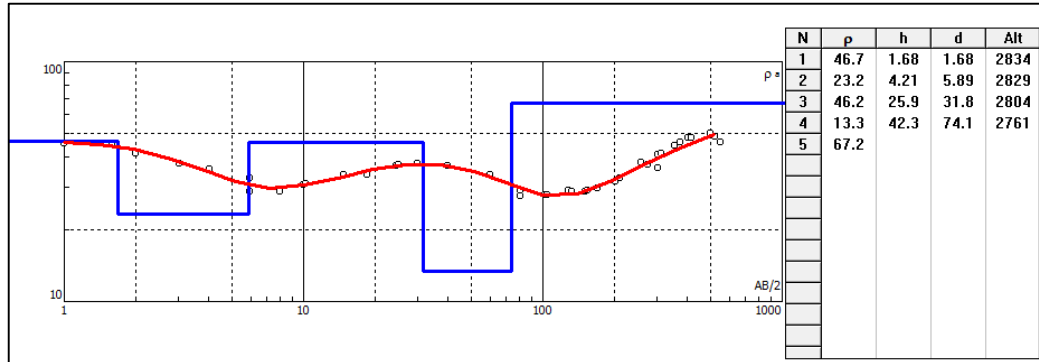


Fuente: Autores.

- **SEV 4**

Se identifican 5 capas hasta una profundidad de 74 m la primera capa tiene una resistividad de 47 Ohm*m con espesor de 1.68 m por debajo se encuentra una pequeña capa de sal de 4.21 m de espesor de resistividad de 23 Ohm*m posteriormente le sigue una capa de Rute y nuevamente aparece una capa de sal de 42 m.

Gráfica 19: Distribución de las resistividades en el SEV 4.



Fuente: autores.

Tabla 30: Interpretación de los resultados obtenidos para el SEV 4.

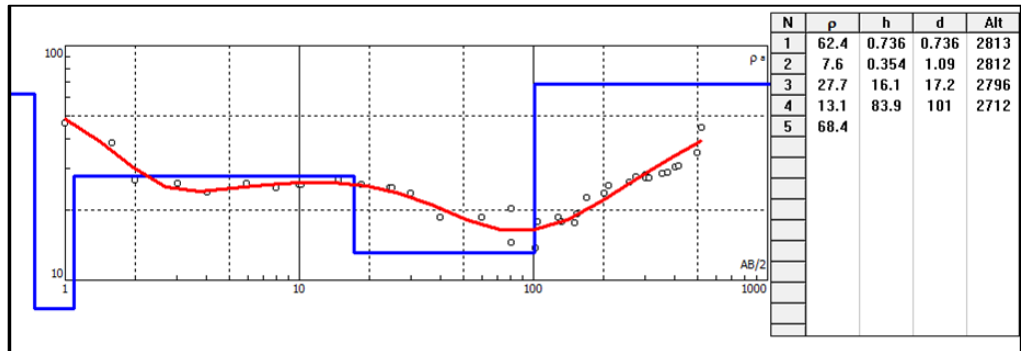
SEV 4			
Profundidad (m)		Resistividad $\Omega \cdot m$	Litología
0	1.68	46.7	Rute
1.68	5.99	23.2	Sal
5.99	31.8	46.2	Rute
31.8	74.1	13.3	Sal
74.1	-	67.2	Rute

Fuente: Autores.

- **SEV 5**

En el SEV 5 también de 5 capas, la primera de ellas tiene un espesor de 0.73 m y la resistividad es de 62 $\Omega \cdot m$, luego aparece una pequeña capa, espesor de 30 cm, de arcillas con una resistividad de 7.6 $\Omega \cdot m$ le sigue una capa de Rute de 16 m de espesor y posteriormente aparece una capa de sal de 83.9m de espesor con una resistividad de 13 $\Omega \cdot m$.

Gráfica 20: Distribución de las resistividades en el SEV 5.



Fuente: Autores.

Tabla 31: Interpretación de los resultados obtenidos para el SEV 5.

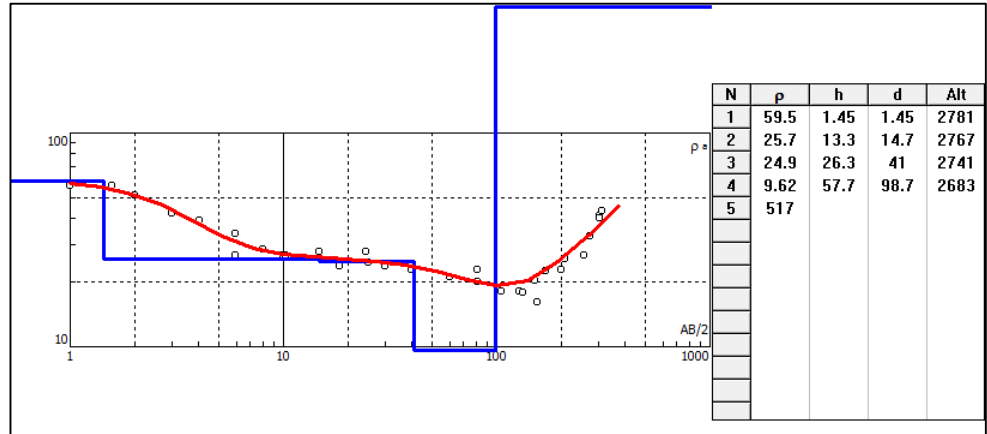
SEV 5			
Profundidad (m)		Resistividad Ω*m	Litología
0	0.73	62.4	Suelo
0.73	1.09	7.6	Arcillas
1.09	17.2	27.7	Rute
17.2	101	13.1	Sal
101	-	68.4	Rute

Fuente: Autores.

- **SEV 6**

En este último de SEV, topográficamente el de menor cota, se identificaron 5 capas inicialmente se encuentra una capa con resistividad de 59.5 Ohm*m de 1.45 m de espesor le sigue capas de Rute de resistividad baja, 25 Ohm*m, que corresponde a material saturado por el agua subterránea. Posteriormente sigue una capa de sal de 98.7 m con una resistividad de 9.62 Ohm*m.

Gráfica 21: Distribución de las resistividades en el SEV 6.



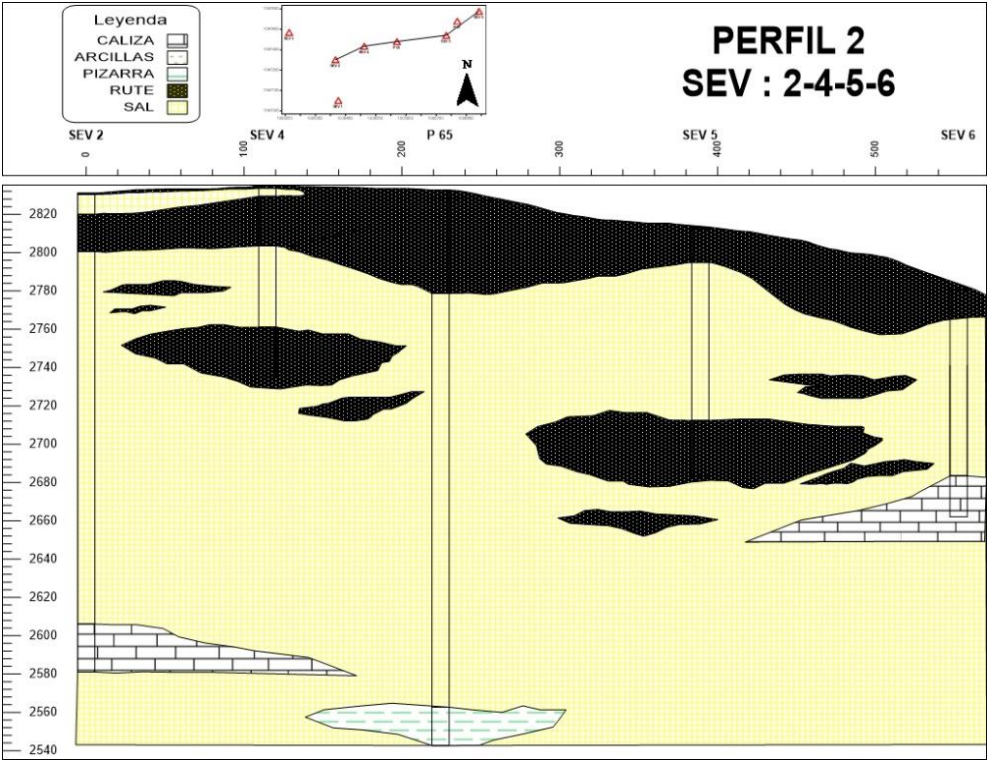
Fuente: Autores.

Tabla 32: Interpretación de los resultados obtenidos para el SEV 6.

SEV 6			
Profundidad (m)		Resistividad Ω*m	Litología
0	1.45	59.5	Suelo
1.45	14.7	25.7	Rute
14.7	41	24.9	Rute
41	98.7	9.62	Sal
98.7	-	517	Caliza

Fuente: Autores

Ilustración 10: Corte geológico a partir de los sondeos 2, 4, 5 y 6.



Fuente: Autores.

9 HIDROGEOLOGÍA

9.1 INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

El inventario de puntos de agua se hizo durante las jornadas de campo, tanto en superficie como en las labores mineras, se levantaron 11 puntos de agua en superficie; la mayoría manantiales en la formación Plaeners, que se complementaron con 20 puntos más obtenidos en la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca mediante la figura de derecho de petición; Muchos son de estos puntos utilizados para uso doméstico como y en menor proporción son utilizados para usos agrícolas En la mina se hizo inventario de 14 puntos de agua. No se encontraron pozos de extracción de agua en la zona de estudio ni en las cercanías. El mapa 11 muestra la distribución de los puntos de agua en inventario.

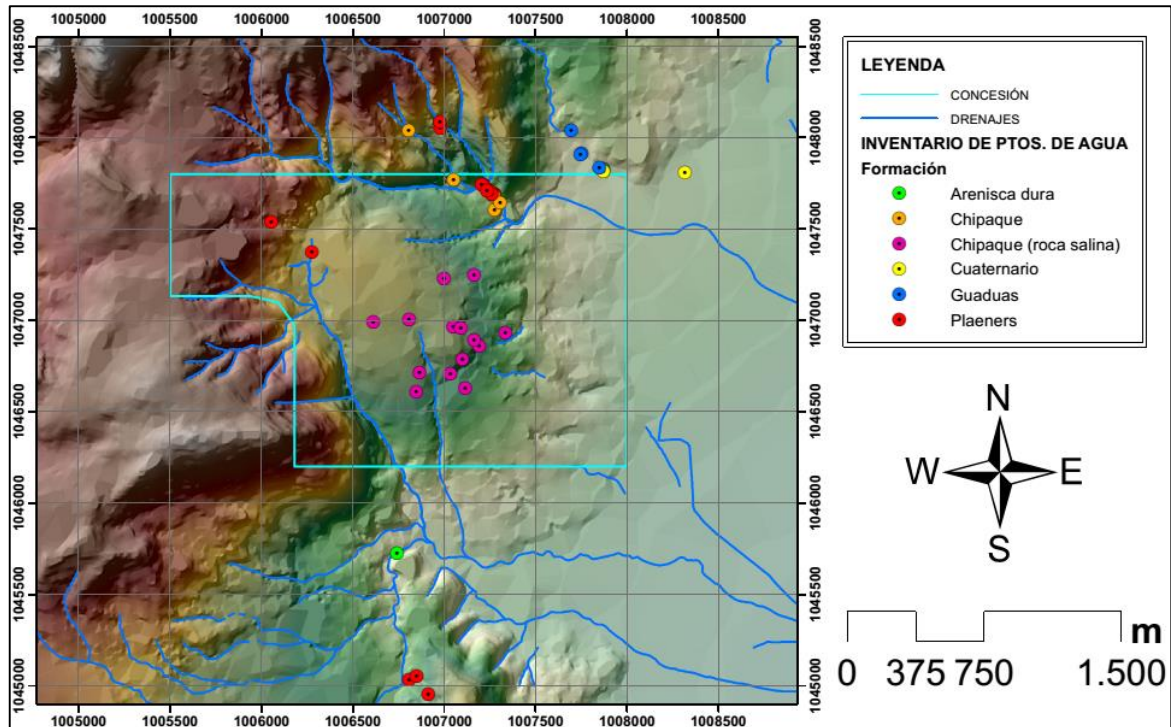
En la tabla 23 se relacionan el número de puntos de agua por formación, es notable como la formación Plaeners posee un número importante de nacimientos de agua en la zona, constituyéndose tal vez en la formación hidrogeológicamente más importante del sector por su porosidad y permeabilidad secundaria genera en cercanías a las zonas de falla.

Tabla 33: Relación de puntos de agua por formación.

No. Ptos. De Agua	Formación
15	Plaeners
6	Chipaque
5	Guaduas
1	Arenisca dura
4	Cuaternario
14	Chipaque (roca salina)

Fuente: Autores.

Mapa 16: Inventario de puntos de agua.



Fuente: Autores.

9.2 CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA

9.2.1 Marco teórico

9.2.1.1 Propiedades hidráulicas

Las propiedades hidráulicas de las rocas y depósitos no consolidados determinan de manera importante la cantidad de agua que pueden almacenar, transmitir y ceder (CONAGUA 2007). Estas propiedades dependen de factores geológicos como granulometría, composición mineralógica entre otras. El punto de partida para la caracterización hidráulica lo constituyen las pruebas de bombeo, estas nos permiten calcular las propiedades hidrogeológicas de las rocas. Estas propiedades son:

- **Porosidad(n):** Es la relación entre el volumen de su parte vacía u ocupada por aire o agua y su volumen total.

Tabla 34: Valores de porosidad.

Materiales	n (%)
Depósitos no consolidados	
Gravas	25 - 40
Arenas	25 - 50
Limos	35 - 50
Arcillas	40 - 70
Rocas	
Basalto fracturado	5 - 50
Calizas kársticas	5 - 50
Areniscas	5 - 30
Caliza, dolomía	0 - 20
Pizarra	0 -10
Rocas cristalinas fracturadas	0 -10
Rocas cristalinas compactas	0 -5

Fuente: Freeze and Cherry, 1979.

Tabla 35: Valores de porosidades para algunas rocas.

Tipo	Material Descripción	Porosidad total % m						Porosidad eficaz me			Observaciones
		Media	Normal		Extraordinaria		Media	Max.	Min.		
			Max.	Min.	Max.	Min.					
Rocas masivas	Granito	0.30	4	0.20	9	0.05	<0.2	0.5	0.00	A	
	Caliza masiva	8.00	15	0.50	20		<0.5	1	0.00	B	
	Dolomía	5	10	2			<0.5	1	0.00	B	
Rocas metamórficas		0.50	5	0.20			<0.5	2	0.00	A	
Rocas volcánicas	Piroclastos y tobas	30	50	10	60	5	<5	20	0.00	C, E	
	Escorias	25	80	10			20.00	50	1	C, E	
	Pumitas	85	90	50			<5	20	0.00	D	
	Basaltos densos, fonolitas	2	5	0.10			<1	2	0.10	A	
	Basaltos vacuolates	12	30	5			5	10	1	C	
Rocas sedimentarias Consolidadas (ver rocas masivas)	Pizarras sedimentarias	5	15	2	30	0.50	<2	5	0.00	E	
	Areniscas	15	25	3	30	0.50	10.00	20	0.00	F	
	Creta blanda	20	50	10			1	5	0.20	B	
	Caliza detrítica	10	30	1.50			3	20	0.50		
Rocas Sedimentarias sueltas	Aluviones	25	40	20	45	15	15	35	5	E	
	Dunas	35	40	30			20	30	10		
	Gravas	30	40	25	40	20	25	35	15		
	Coes	45	55	40			<5	10	0.10	E	
	Arenas	35	45	20			25	35	10		
	Depósitos glaciares	25	35	15			15	30	5		
	Limos	40	50	35			10	20	2	E	
	Arcillas sin compactar	45	60	40	85	30	2	10	0.00	E	
	Suelos superiores	50	60	30			10	20	1	E	

A = Aumenta m y m_e por meteorización.
 B = Aumenta y m_e por fenómenos de disolución.
 C = Disminuye m y m_e con la edad.
 D = disminuye m y puede aumentar m_e con la edad.
 E = m_e muy variable según circunstancias y tiempo.
 F = variable según el grado de cementación y su solubilidad.

Fuente: Johnson (1967), Davis (1969), Schoeller (1962), Muskat (1937), Meinzer (1923 b), Ward (1967). Algunos datos, en especial los referentes a me, deben tomarse con precauciones, según las circunstancias locales.

- **Conductividad (K):** Es la cantidad de agua que circula a través de una sección de área unitaria normal al sentido de flujo, depende de las características del fluido y

de la permeabilidad del medio poroso a través del cual circula y de la fuerza de gravedad.

Tabla 36: Tipo de rocas según la conductividad hidráulica.

Tipo de roca	Conductividad(m/día)
Arcilla	10^{-5} a 10^{-7}
Limo(Silt)	10^{-1}
Arena Fina	10^{-1} a 1
Arena Gruesa	1a 2×10^2
Grava	$>10^3$

Fuente. Kruseman, G.P., 1970.

- **Permeabilidad (K):** La permeabilidad es el flujo de agua que atraviesa una sección unitaria de acuífero, bajo la influencia de un gradiente unitario, a temperatura de campo. sus dimensiones son

$$K = L/T$$

Donde:

T = dimensión tiempo

L = dimensión longitud

La permeabilidad es una medida muy característica de la textura de las rocas; pero no representa como la transmisividad las posibilidades de ceder agua. Un acuífero muy permeable, pero de poco espesor, puede ser poco transmisivo.

Tabla 37: Valores de permeabilidad.

K (m/día)	Calificación estimativa
$K < 10^{-2}$	Muy baja
$10^{-2} < K < 1$	Baja
$1 < K < 10$	Media
$10 < K < 100$	Alta
$K > 100$	Muy alta

Fuente. Tomado de Villanueva e Iglesias, 1984.

Tabla 38: Clasificación de terrenos por permeabilidad.

Permeabilidad (m/día)	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	
Tipo de terreno	Grava limpia		Arena limpia; mezcla de grava y arena		Arena fina; arena arcillosa; mezcla de arena, limo y arcilla; arcillas estratificadas			Arcillas no meteorizadas				
Calificación	Buenos acuíferos				Acuíferos pobres				Impermeables			
Capacidad de drenaje	Drenan bien				Drenan mal				No drenan			

Fuente: Custodio & Llamas, 1996.

- **Transmisividad (T):** La transmisividad es el volumen de agua que atraviesa una banda de acuífero de ancho unitario en la unidad de tiempo y bajo la carga de un metro. Es representativa de la capacidad que tiene el acuífero para ceder agua. Partiendo de la definición, sus dimensiones son las siguientes:

$$T = (L^3/T)/L = L^2 T^{-1}$$

Donde:

T = dimensión tiempo

L = dimensión longitud

Lo más común es que la transmisividad se mida en m²/día, m²/hora o m²/segundo. Sin embargo, la unidad que da cifras más manejables es el m²/día, por lo que se aconseja sea usada en todos los ensayos.

Tabla 39: Valores de transmisividad.

T (m ² /día)	Calificación estimativa	Posibilidades de acuífero
T < 10	Muy baja	Pozos de menos de 1 l/s con 10 m de depresión teórica.
10 < T < 100	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s con 10 m de depresión teórica.
100 < T < 500	Media a alta	Pozos entre 10 y 50 l/s con 10 m de depresión teórica.
500 < T < 1000	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s con 10 m de depresión teórica.
T > 1000	Muy alta	Pozos superiores a 100 l/s con 10 m de depresión teórica.

Fuente. Tomado de Villanueva e Iglesias, 1984.

Tabla 40: Clasificación de los terrenos por su transmisividad.

T	1	10	10 ⁻²	10 ⁻³	
Calificación	Impermeables	Poco permeable	Algo permeable	Permeable	Muy permeable
Calificación del acuífero	Sin acuífero	Acuífero muy pobre	Acuífero pobre	Acuífero de regular a bueno	Acuífero excelente
Tipo de materiales	Arcilla compacta. Pizarra. Granito.	Limo arenoso. Limo. Arcilla limosa.	Arena fina. Arena limosa. Caliza poco fracturada. Basaltos.	Arena limpia. Grava y arena. Arena fina. Caliza fracturada	Grava limpia Dolomías, calizas muy fracturadas.

Fuente: Adaptado de Custodio y Llamas, 1983.

- **Coficiente de almacenamiento (S):** el coeficiente de almacenamiento S puede definirse como la cantidad de agua que cede un prisma de acuífero de base cuadrada unitaria cuando se le deprime la unidad. Consecuentemente, no tiene dimensiones.

9.2.1.2 Pruebas de Bombeo

Las leyes fundamentales del flujo de fluidos en medios poros son el fundamento de la teoría de los ensayos de bombeo.

Al aplicar la ley de Darcy de los medios porosos al teorema de la continuidad da como resultado dichas leyes.

La ecuación fundamental es:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + \frac{F}{K} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

Donde:

h = potencial hidráulico (nivel piezométrico)

F = recargas exteriores (verticales, lluvias, etc.).

K = permeabilidad del acuífero

S = coeficiente de almacenamiento

T = transmisividad del acuífero

t = tiempo

Dicha ecuación, es resultado de una larga y compleja deducción matemática, sin embargo, sus términos tienen una interpretación física sencilla.

En efecto:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \quad \text{ó} \quad \Delta h$$

Representa la suma de entrada y salidas de agua de un cubo poroso elemental (un diferencial del medio poroso) por razones de diferencia del nivel piezométrico entre el cubo y las zonas del medio poroso inmediatas.

$$\frac{F}{K}$$

Representa las recargas de aguas, exteriores al sistema.

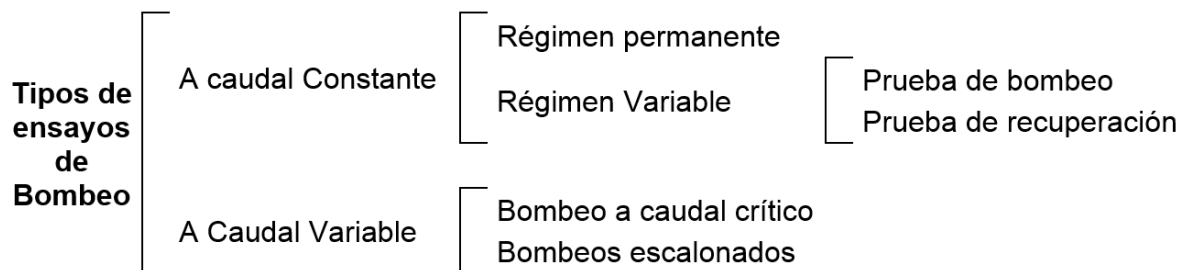
$$\frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

Representa la variación del almacenamiento de agua en dicho cubo poroso elemental.

Por tanto, la conclusión lógica sería:

La diferencia entre la cantidad de agua que entra y sale por las caras de un cubo ideal (por razones de diferencias en el nivel piezométrico entre este cubo y el medio poroso inmediato), más las entradas de agua exteriores al sistema, tiene que ser igual a la variación del almacenamiento, es decir, a lo que se llena o vacía dicho cubo.

En el caso concreto de los ensayos de bombeo se estudia el movimiento de agua en medios porosos, como consecuencia de una depresión del nivel piezométrico en un pozo, motivada por un bombeo situado en dicho punto.



Cuando se realiza el ensayo a caudal constante es preciso mantenerlo sin variación a lo largo de toda la prueba.

Se denomina régimen permanente a aquel en el cual los niveles no varían con el tiempo, mientras que en el régimen variable sí se produce esta variación.

Desde el punto de vista práctico: Antes de empezar el ensayo se mide la profundidad del nivel del agua en el lugar de bombeo y en los puntos de observación, si los hubiere. Como consecuencia de un bombeo a caudal constante Q , los niveles descenderán durante un cierto tiempo. Si se interpretan los resultados de la variación de niveles en función del tiempo de bombeo, se estaría en un caso de régimen variable.

Transcurrido un tiempo, los niveles se estabilizan o varían tan poco, que pueden considerarse estabilizados. Interpretando los descensos totales habidos, con niveles estabilizados en el pozo de bombeo y en los piezómetros de observación, se estaría en un caso de régimen permanente.

Cuando se para el bombeo, los niveles comienzan a ascender, tratando de alcanzar la cota inicial en reposo. Si se interpreta la evolución de éstos niveles después de la parada, se está en el caso de régimen variable en recuperación.

Por último, en el caso de bombeos a caudal variable pueden existir dos modalidades.

La primera consiste en mantener la depresión fija al nivel de la bomba y medir cómo va variando el caudal con el tiempo. Se la denomina prueba a caudal crítico y se utiliza exclusivamente para ensayos en acuíferos colgados que reúnan determinadas características.

La segunda modalidad es la de caudales escalonados. En ésta se fijan a voluntad distintos caudales, midiéndose la depresión producida por cada uno de ellos. Se utilizan para calcular las pérdidas de carga en el pozo, como consecuencia de una construcción defectuosa.

- **Método de recuperación, régimen variable.**

Teniendo en cuenta las consideraciones antes mencionadas, los ensayos realizados fueron interpretados con el método de recuperación, régimen variable.

Este método analiza la evolución de los niveles después de la parada de la bomba mediante una simulación matemática de esta parada. Para ello puede procederse razonando, que el efecto de parar el bombeo a caudal constante Q después de un tiempo t es el mismo que simular que la bomba no se para y que a partir del instante t se le inyecta un caudal constante Q .

El método se basa en la aplicación de la relación de Jacob (RT , AC , $u < 0.1$) para simular la evolución de la recuperación de los niveles en el tiempo

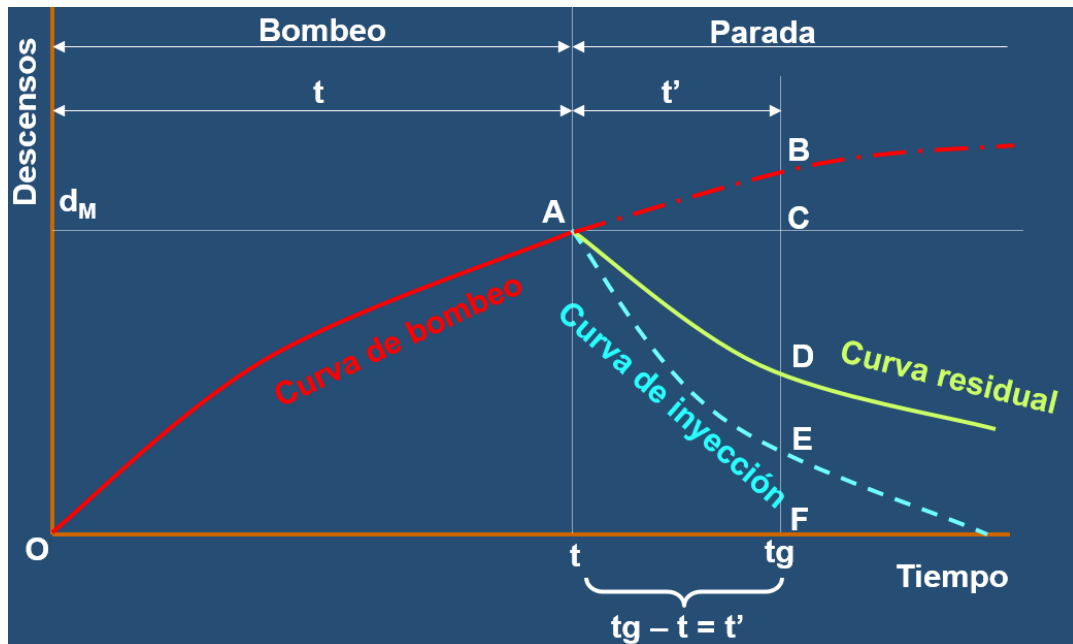
$$d = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25 T t}{r^2 S}$$

El cambio de nivel que simulamos lo llamamos *descenso residual*, y se calcula como la suma del descenso producido por el bombeo y el ascenso producido por la inyección. En el campo se mide como la diferencia entre el nivel estático inicial y el nivel dinámico en ascenso en cada momento

La prueba se realiza midiendo en el mismo pozo de bombeo, y se determina solo la transmisividad

La deducción matemática de este método se resuelve con ayuda de la gráfica 15, de donde se obtienen las siguientes ecuaciones:

Gráfica 22: Esquema para la deducción del valor del descenso residual (d_r) en el análisis de la recuperación de niveles posterior a la parada.



Fuente: Villanueva e Iglesias, 1984.

En el tiempo transcurrido desde que se inició el bombeo ($t_g = t + t'$), el descenso d_b debido al bombeo será:

$$d_b = \overline{FB} = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25 T(t + t')}{r_p^2 S}$$

Siendo:

Q = caudal de bombeo constante

T= transmisividad

t= tiempo que duró el bombeo real

Rp= radio del pozo

t'= tiempo que duró el bombeo real

S= coeficiente de almacenamiento

A partir del tiempo **t** se inicia la simulación de la inyección a caudal constante **Q**, esta se representará como un descenso negativo **di**, sin serlo matemáticamente, y viene dado por:

$$d_i = CE = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{2,25 T t'}{r^2 S}$$

El descenso residual, que es el que se observa en el pozo en un tiempo **tg** viene dado por:

$$d_R = 0,183 \frac{Q}{T} \lg \frac{t + t'}{t'}$$

$$d_R = d_B = d_i$$

Como ya se dijo, este método está basado en la expresión de Jacob, esta a su vez en una escala semi-logaritmica representa una línea recta, siempre que $u < 0,1$ en la práctica, por tanto, si se toma **dr** como función y $\lg((t + t') / t')$ como variable tendremos la representación de una recta de la forma:

$$y = mx + b$$

En donde:

$$Y = dr$$

$$m = 0.183 Q / T$$

$$x = \lg ((t + t')/t')$$

La **T** puede ser calculada directamente con la ecuación de la pendiente de la recta, sabiendo que la pendiente en un gráfico semi - logarítmico, coincide con la caída por ciclo logarítmico Δd , tenemos que:

$$T = 0,183 (Q / \Delta d)$$

Además de los motivos ya expresados, este método se implementó por algunas ventajas que lo caracterizan, por ejemplo:

- a. No es demasiado sensible a las variaciones de caudal de bombeo
- b. El ensayo de recuperación es más corto.

- **Método Slug Test**

Hemos visto que los bombeos de ensayo nos permiten calcular la transmisividad (T) y el coeficiente de almacenamiento (S) de un acuífero, bombeando en un sondeo y midiendo descensos en otro sondeo próximo. Pero esto es costoso y laborioso, y en ocasiones no es posible, porque no existen dos sondeos próximos en el mismo nivel acuífero o por otros motivos.

La alternativa más sencilla son las *medidas puntuales de la permeabilidad*. No sustituyen a los bombeos de ensayo, porque, además de otras diferencias, éstos pueden realizarse en acuíferos profundos, mientras que las medidas puntuales de permeabilidad normalmente se realizan en perforaciones de pocos metros. Son muy aplicadas en Geotecnia.

Existen dos tipos:

a) Nivel constante: Introducimos (o extraemos) un caudal conocido para mantener constante el nivel dentro de la perforación. Estabilizado el proceso, a partir de dicho caudal y de la longitud y diámetro de la perforación, calculamos la permeabilidad

b) Nivel variable: Se introduce (o se extrae) súbitamente un volumen de agua en un sondeo (normalmente de pequeño diámetro, 5 a 10 cm), lo que provoca un ascenso (o descenso) instantáneo del nivel del agua dentro de la perforación. Se miden los descensos-tiempos a medida que se recupera el nivel inicial.

Cuanto mayor sea la permeabilidad del terreno, más deprisa se recuperará el nivel. Si se trata de arenas gruesas o gravas, en unos pocos segundos se habrá recuperado el nivel inicial. Si son arcillas o limos puede demorarse horas o días. En el primer caso será necesario un sensor con registro automático, sería imposible medir y anotar manualmente una docena de niveles en un minuto o menos. En cambio, en formaciones poco permeables las medidas pueden realizarse con un hidronivel normal, y anotarlas manualmente.

Los métodos citados por la mayoría de los manuales de Hidrogeología son los de nivel variable de Hvorslev (1951) para acuíferos libres, de Cooper et al. (1967) para acuíferos confinados y el de Bower y Rice (1976) para acuíferos libres. En Geotecnia e Ingeniería Geológica en general se utilizan los ensayos Lefranc y Lugeon; menos conocido es el de GilgGavard. Los ensayos Lugeon se utilizan en rocas duras introduciendo agua a presiones elevadas y su ejecución no es sencilla. Describiremos aquí el método de Gilg-Gavard con nivel variable.

Estos métodos pueden ser aplicados para analizar la recuperación en pozos de gran diámetro.

Mace (1999) midió la conductividad hidráulica en ensayos de recuperación practicados en pozos de gran diámetro con procedimientos específicos para estos pozos y con diversos métodos 'slug test' (Hvorslev, Cooper et al. y Bower-Rice), concluyendo que los resultados eran similares, y que, por tanto, estos métodos pueden ser utilizados para medir K en

ensayos de recuperación en pozos excavados de gran diámetro. Ya indicamos en la introducción que los “slug tests” de nivel variable pueden realizarse con un ascenso o con un descenso inicial; este sería el caso de un descenso inicial para medir después los niveles durante la recuperación.

El principal inconveniente es que en un pozo de varios metros de diámetro la extracción de agua no puede ser instantánea, como exigen todos los procedimientos ‘slug test’. No obstante, en formaciones de baja permeabilidad, aunque la extracción se prolongue varias horas, el agua bombeada procede principalmente de la almacenada en el pozo, y en muy pequeña proporción es agua procedente del acuífero. Esto puede comprobarse aproximadamente si el gráfico “descensos–tiempo” es lineal, lo que indicaría que el bombeo simplemente está vaciando el agua contenida en el pozo (Mace, op. cit).

Metodología (método Gilg-Gavard)

Se introduce un volumen de agua en el instante inicial, y posteriormente se mide la evolución de la recuperación. La permeabilidad (o conductividad hidráulica) K se obtiene por la expresión:

$$K = \frac{1,308 d^2}{A \times h_m} \frac{\Delta h}{\Delta t}$$

Donde:

K = permeabilidad (cm/seg)

Δh = bajada (o subida) del nivel (metros) en un tiempo Δt

Δt = intervalo de tiempo (minutos) en el que hemos medido el descenso Δh

d = diámetro de la entubación (metros)

A = factor de forma, según Custodio, 1983, p. 971:

$$A = (1,032L + 30d) \text{ (Si } L > 6 \text{ m)}$$

$$A = (1,032L + 30d) \cdot (-0,014L^2 + 0,178L + 0,481) \text{ (Si } L < 6 \text{ m)}$$

h_m = altura del agua por encima (o por debajo) del nivel inicial (metros), en este caso, el nivel medio en el intervalo Δt .

• Aplicación en campo

Las “pruebas de bombeo” se realizaron en zonas inundadas de la mina a las que se podía tener un acceso seguro o relativamente seguro. Ni en el área de estudio, ni en cercanías se identificaron pozos de explotación de agua donde se pudieran aplicar estos ensayos.

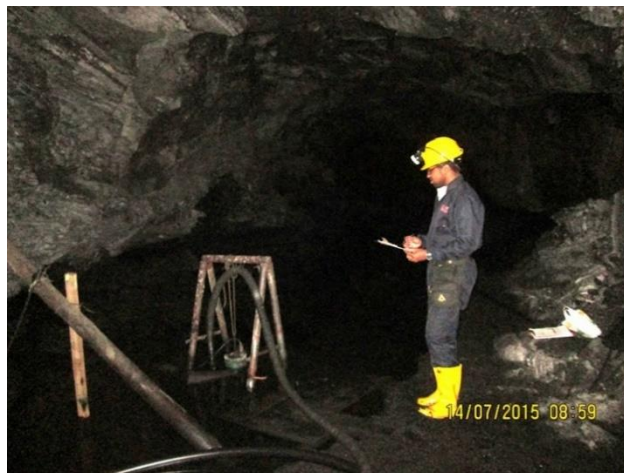
Los ensayos realizados tienen duraciones cortas, basándose justamente en lo que sustenta la elaboración de este estudio, y es el hecho de que el agua en si representa una amenaza a las estructuras de sostenimiento natural (PILARES O MACHONES) de la mina (ver fotografías 22 y 23), y por tanto a las personas dentro de ella.

Foto 20: Reglilla fija, para cuantificar los descensos.



Fuente: Autores.

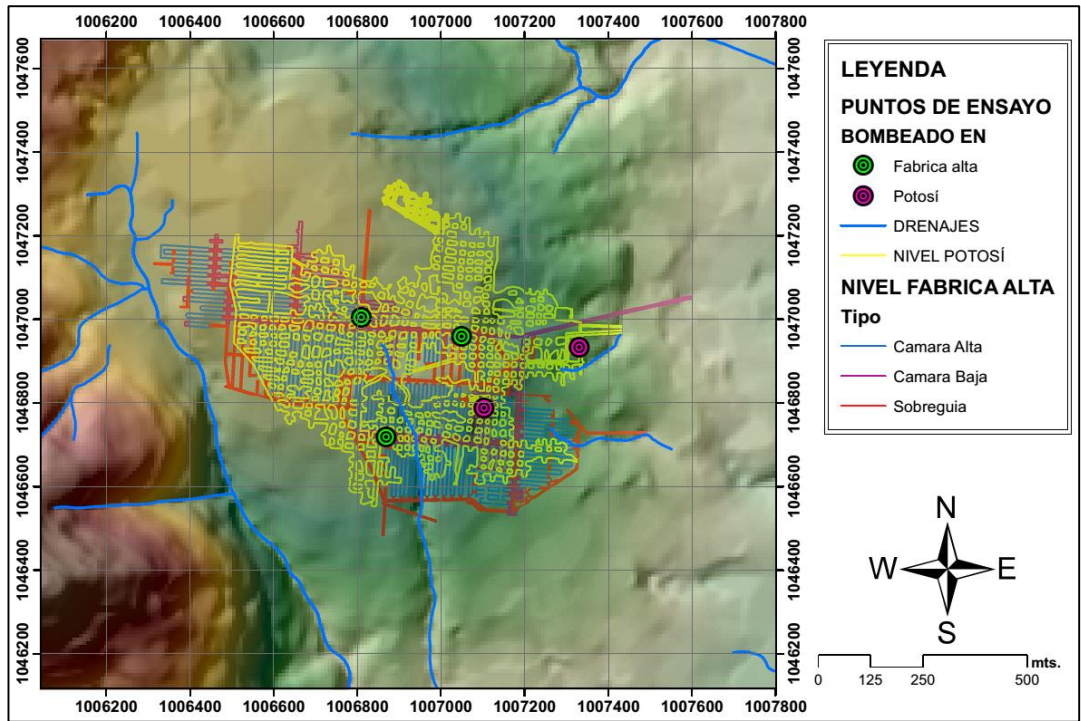
Foto 21: Toma de datos en campo (Reservorio 23).



Fuente: Autores

ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03

Mapa 17: Localización de los puntos de ensayos de bombeo en las labores mineras.



Fuente: Autores.

La siguiente tabla presenta los resultados obtenidos con la aplicación de los métodos en cuestión.

Tabla 41: Resultados caracterización Hidráulica.

Ubicación	Transmisividad (m ² /día) Método de recuperación	Q infiltración (m ³ /h) Cálculo directo	Permeabilidad (m/día) Método Gilg-Gavard
Mar del sur	905.85		
Sagrado corazón	141.1714		
Reservorio 23	798.5455		
C15-T2	74.7187	0.032536	0.335097202
Reservorio 27		3.0555	

Fuente: Autores

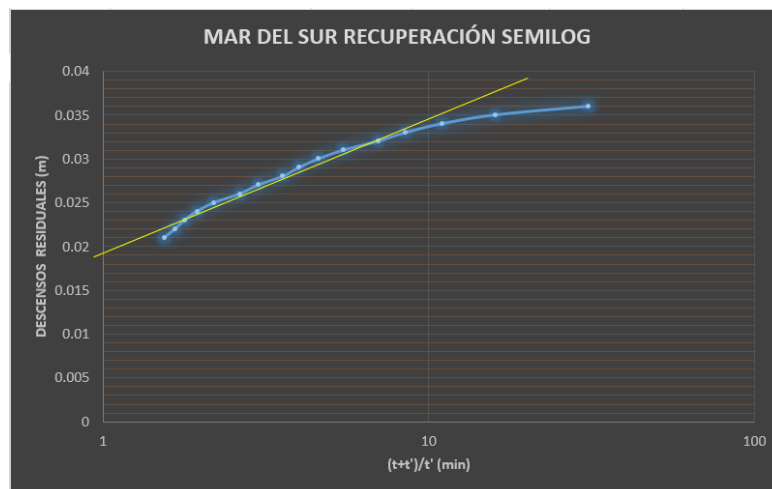
Este cuadro muestra datos concordantes con la realidad en campo, si se analiza vemos como los puntos de infiltración más importantes de la mina presenta transmisividades muy altas, mientras que los de menor importancia, tiene transmisividades relativamente bajas.

- **Caso mar del sur**

El mar del sur es uno de los puntos de bombeo de aguas de infiltración más importantes de la mina, este resultado de transmisividad alta demuestra el porqué de ello, este es un punto de especial atención y el uno de los dos a los que se les hizo ensayos en el nivel Potosí, la frecuencia con que se bombea en este punto es considerablemente alta comparada con otros puntos de control de aguas dentro de la mina.

Es de resaltar que en este nivel de la mina también se encuentra el mar del norte, que es un punto de infiltración de aguas bastante importante y donde por razones de seguridad no se pudo hacer ningún ensayo.

Gráfica 23: Representación “dr Vs lg (t+t’/t’)” Mar del Sur.

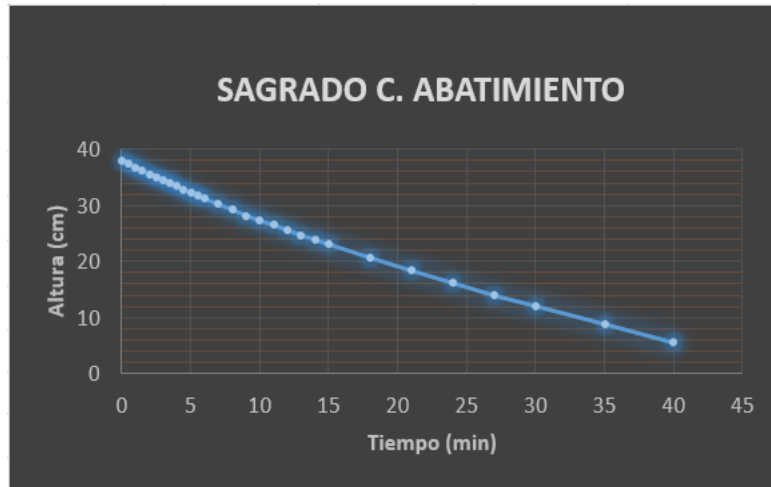


Fuente. Autores.

- c. **Caso sagrado corazón**

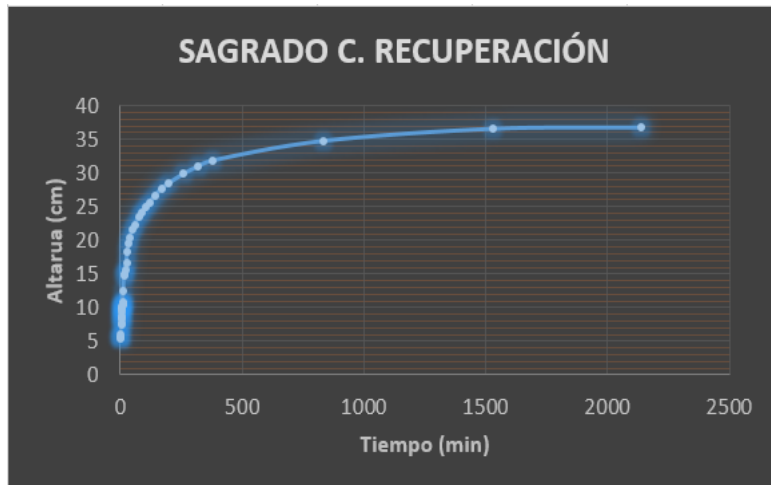
El punto de bombeo del Sagrado Corazón también se encuentra en el nivel Potosí, pero este es de menor importancia comparado con los otros dos de este nivel, este punto se bombea con mucha menos frecuencia que los demás de este nivel y esto se ve claramente reflejado en sus bajos valores de transmisividad.

Gráfica 24: “descenso – tiempo” Sagrado Corazón.



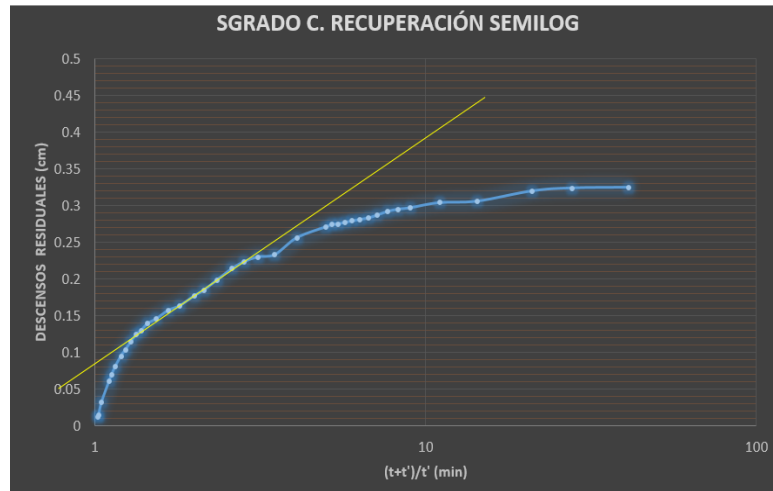
Fuente: Autores.

Gráfica 25: “recuperación – tiempo” Sagrado Corazón.



Fuente: Autores.

Gráfica 26: Representación “dr Vs lg (t+t'/t)” Sagrado Corazón.



Fuente: Autores.

Para este punto debido a su forma (básicamente un orificio de difícil acceso para poder medir la variación de niveles), fue necesario construir una regla flotante móvil que nos permitiera cuantificar los datos de abatimiento y recuperación, esto se hizo utilizando un pedazo de poliestireno expandido como boya, fijo a un extremo de un tubo de PVC que contaba con una reglilla adherida y que además se sostuvo con dos guía fijas fuera del orificio de bombeo para controlar su verticalidad y su movimiento axial; de esta manera pudimos tomar los datos de este punto que si bien es de pequeña importancia comparándolo con los otros del nivel potosí tiene su relevancia por su cercanía a la bocamina y por consiguiente al contacto rute-sal.

d. Caso reservorio 23 (R-23)

El reservorio 23 es un punto de vital importancia, tal vez el de mayor importancia, ya en este punto existe un alto caudal de infiltración, pero que realmente preocupa es que son aguas de bajas densidades que han llevado a una disolución intensiva de los machones es en esta zona, a tal punto que existen machones colgantes bajo los cuales se ve fluir el agua cuando se hacen descender los niveles de este reservorio, a esto atribuimos el hecho de que mientras se hacía el ensayo y se medían los datos de recuperación se escuchaban burbujeos en este punto, hecho que inicialmente nos llevó a tomar la precaución de portar un multidetector de gases certificado, por seguridad y para descartar que se tratara de alguna bolsa de gas.

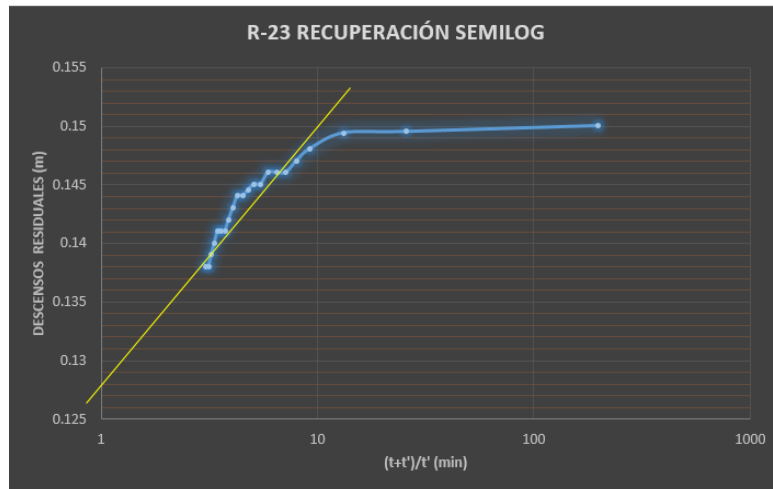
Es de aclarar en este punto se bombeo todo el día anterior (22 de julio) y toda la noche, se detuvo el bombeo a la hora indicada el día 23 de julio. No se tomaron datos de abatimiento, solo el tiempo de bombeo y la altura de inicio y final para poder calcular el descenso total.

Gráfica 27: “recuperación – tiempo” Reservorio 23.



Fuente: Autores.

Gráfica 28: Representación dr Vs lg (t+t'/t') Reservorio 23.



Fuente: Autores.

Foto 22: Pilar colgado por disolución de la base.



Fuente: Autores.

Foto 23: Flujo de agua desde la base de un pilar (Machón colgado).



Fuente: Autores.

El reservorio 23 se encuentra en el nivel Fabricalta y preocupa su relativa cercanía con zona turística (Catedral de Sal), hoy en día el acceso al reservorio 23 es limitado

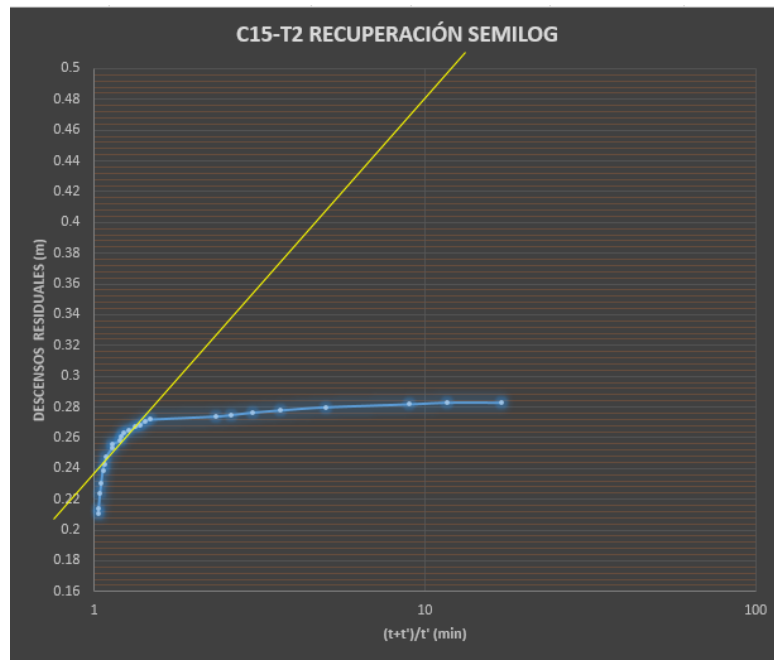
solo para el personal de control de bombeo y personal autorizado por la dirección de la mina, esto debido a los riesgos que se presentan en la zona en cuestión.

e. Caso cámara 15 con túnel 2 (C15 – T2)

Para el caso del punto de infiltración de la Cámara 15 con túnel 2 fue algo sencillo determinar su volumen, puesto que se trata de un pequeño orificio con dimensiones de 1.4 x 1.4 x 0.5 m de profundidad, que fue hecho con el fin de coleccionar en este punto las aguas infiltradas a unos pocos pasos de él, este es tal vez el punto de menor frecuencia de bombeo y esto se vio reflejado en los valores de transmisividad calculados.

Se hizo el ejercicio de calcular el caudal de infiltración en este punto considerando que podíamos conocer el volumen del lugar, los resultados se muestran en la tabla 31.

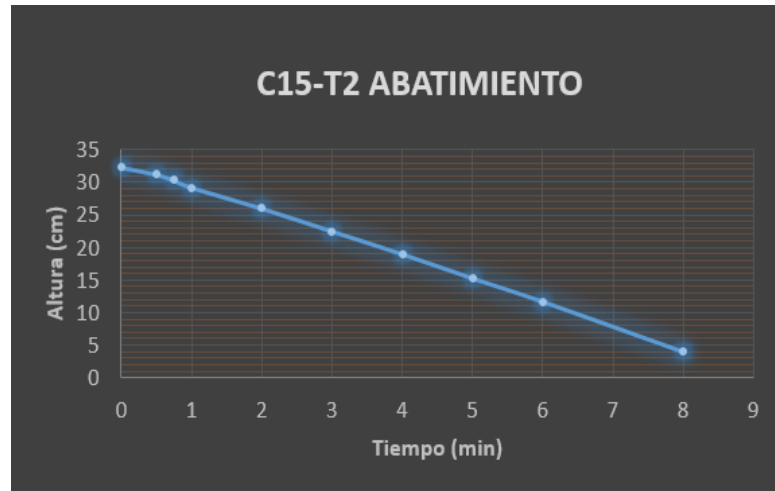
Gráfica 29: Representación dr Vs lg (t+t'/t') C15 – T2.



Fuente: Autores.

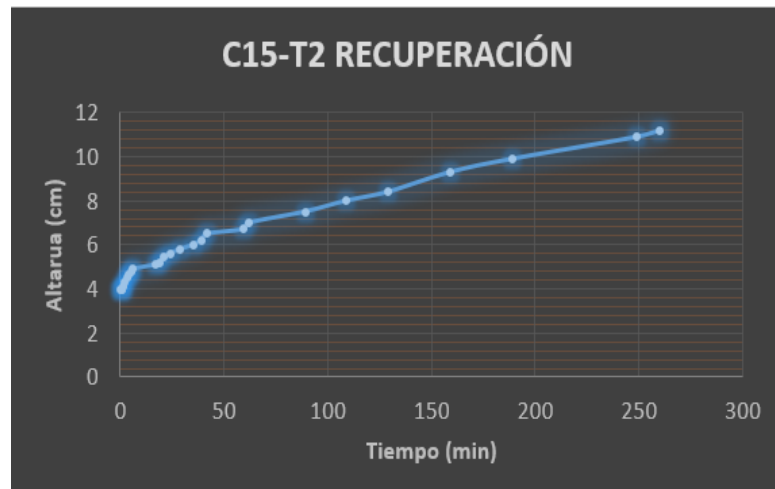
Gracias a que se conocen las medidas de este punto de bombeo fue posible aplicar el método de Gilg - Gavard con nivel variable para el cálculo de la permeabilidad puntual, dándonos un resultado de 0.335 m/día, que la clasifica como baja (Villanueva 1984)

Gráfica 30: “descenso – tiempo” C15 – T2.



Fuente: Autores.

Gráfica 31: “recuperación – tiempo” C15 – T2.



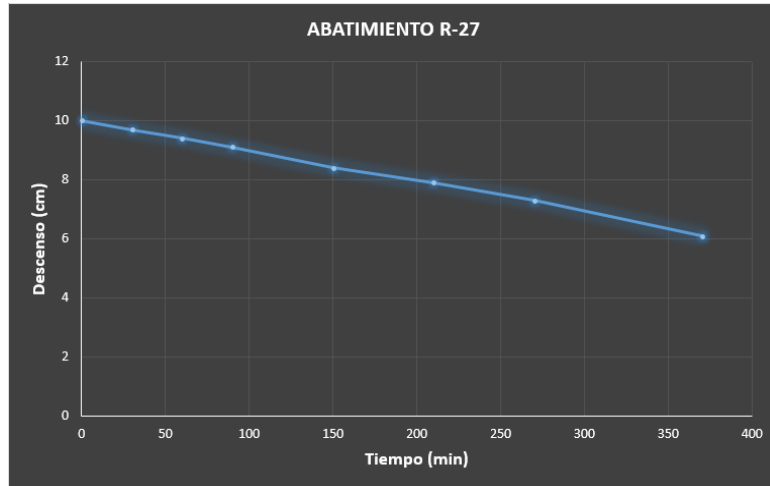
Fuente: Autores.

f. **Caso reservorio 27 (R-27)**

El ensayo realizado en el reservorio 27 se convirtió en un caso especial, ya el abatimiento presentaba un comportamiento lineal en la gráfica tiempo-abatimiento (ver gráfica 23), dándonos resultados promedios de 0.6 cm de abatimiento cada hora (ver tabla 32); Vale la pena recalcar que el ensayo tuvo una duración de sólo 6 hora y 10 minutos (se recomendaría un ensayo de mayor duración), esto nos pareció algo bien interesante, y gracias a su particularidad considerando que cada hora el nivel baja 0.6 cm y que el caudal de bombeo es de 21 m³/h, es claro que

cada 6 mm de la reglilla de medición representa 21 m³ de agua, en estos rangos de medidas en la reglilla .

Gráfica 32: “descenso – tiempo” Reservorio 27.



Fuente: Autores.

El paso siguiente fue hacer observaciones a la recuperación del nivel del agua, estas mediciones se hacían con el fin de determinar un caudal de recarga basados en la información del comportamiento del abatimiento. Las observaciones se hacían tomando lecturas de los contadores al final del turno (fin del bombeo) y al inicio del turno (antes de iniciar el bombeo diario) (ver tabla 32); se realizó así porque el agua presente en el lugar de la prueba también constituye salmuera de producción por sus concentraciones y se bombea a diario, además en ocasiones se almacenan en ese lugar aguas de otros lugares de mucho menor grado de infiltración.

En base a los niveles medidos y el tiempo de recuperación transcurrido se logró determinar que el promedio de recuperación del reservorio 27 (durante la noche, cuando no se bombea) es de 0.088 cm/h y conociendo que 0.6 cm en la reglilla de medición equivalen a 21m³ se pudo establecer que el caudal de infiltración para este importante punto de agua de la mina es de 3.0555 m³/h.

Tabla 42: Datos de recuperación Reservoirio 27.

Fecha	Hora	Tiempo de recarga (h)	Altura (cm)	Delta (cm)	Vel. Subida (cm/h)	Observaciones
14 de Julio 2015	13:55	18.95	6.1	1.8	0.095	Fin turno
15 de Julio 2015	08:52		7.9			Inicio turno
15 de Julio 2015	16:02	16	1.2	1.3	0.0813	Fin turno
16 de Julio 2015	08:02		2.5			Inicio turno
16 de Julio 2015	09:04	47.68	1.9	4.2	0.0881	Se bombeo solo 1 h
18 de Julio 2015	08:45		6.1			Inicio turno
18 de Julio 2015	15:45	16.5	1.9	1.4	0.0848	Fin turno
19 de Julio 2015	08:15		3.3			Inicio turno

Fuente: Autores.

Tabla 43: Cálculo Q de infiltración R-27.

Abatimiento promedio (cm/h)	Q de evacuación (m ³ /h)	Vel. recarga promedio (cm/h)	Q. de Infiltración (m ³ /h)	$Q_i = \frac{VRP \times Q_e}{AP}$
0.6	21	0.0873	3.0555	Qi = Q de infiltración VRP = Vel. recarga promedio Qe = Q de evacuación AP = Abatimiento promedio

Fuente: Autores.

Es prudente aclarar que las transmisividades medidas no representa la totalidad del material salino, estas se limitan solo a las zonas adyacentes a los puntos donde se realizaron las mediciones.

Como complemento a los datos obtenidos de transmisividad se tomaron datos de propiedades físicas de 10 ensayos realizados con fines geotécnicos (Ver anexo 11), pero que sin embargo son de utilidad para el presente trabajo. El muestreo se hizo tratando que fueran lo más representativo de la mina, una vez más por razones de seguridad se muestreo solo el nivel Fabricalta (Ver anexo 12). La tabla 34 es un resumen de los valores promedio, máximos y mínimos de las propiedades determinadas por ensayos de laboratorio. Para poder calcular el volumen de las muestras en laboratorio por medio del principio de Arquímedes, y además llevar a cabo la saturación de las mismas, fue necesario reciclar las muestras de agua de alta densidad tomadas dentro de la mina para su análisis hidroquímico, en algunos casos hacer mezclas y calcular sus densidades por medio de un picnómetro; esto con el fin de prevenir la dilución de la roca salina. Además, debió tomarse la precaución de no dejar saturando las muestras por más de 24 horas, para evitar que la salmuera empezara a precipitar y sesgase los resultados por aumento en masa de las muestras.

Foto 24: Toma de muestras para ensayos de Propiedades físicas.



Fuente: Autores.

Foto 25: Estimación de volumen para ensayos de Propiedades físicas.



Fuente: Autores.

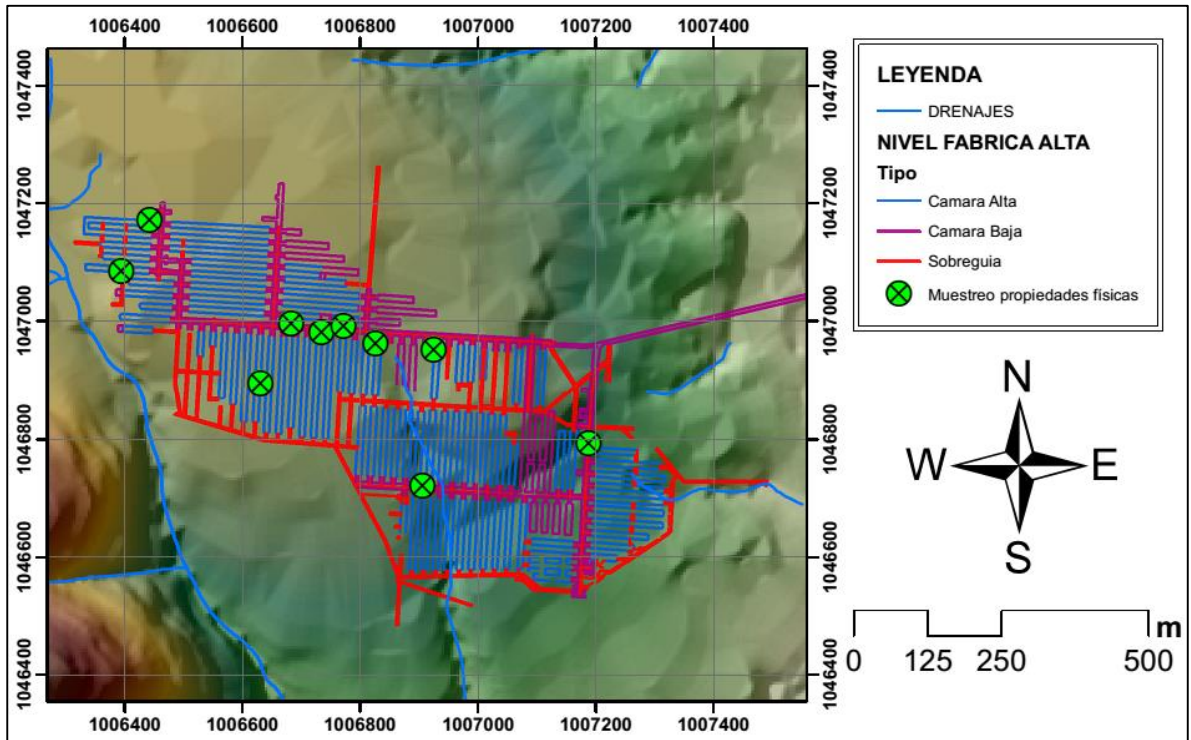
Tabla 44: Propiedades físicas de la roca salina.

	W (%)	S (%)	n (%)	e	y (KN/m3)	yd (KN/m3)	ysat (KN/m3)
PROM	0.089	1.618	11.884	0.119	21343.248	21324.535	22490.356
MINI	0.042	0.725	9.307	0.093	19507.694	19481.558	20663.382
MAX	0.175	3.284	15.244	0.152	23185.390	23174.490	24669.970

Fuente: Autores.

Estos resultados ubican la roca salina, según la tabla 25, con unas características tales que la porosidad total y efectiva aumenta con la disolución, tal como en realidad sucede con la roca salina.

Mapa 18: Muestreo para propiedades físicas.



Fuente: Autores.

9.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

La caracterización se realizó apoyándonos en el proyecto ejecutado por Ecoforest (1998) para la CAR denominado Inventario y Diagnóstico de los Recursos Naturales Renovables

del Área Jurisdiccional de la CAR, considerando el comportamiento local de las formaciones aflorantes, puesto que formaciones como Plaeners, que de manera general se le cataloga como un acuitardo, en la zona presentan un comportamiento de acuífero debido al fracturamiento presente, como puede evidenciarse en el inventario de puntos de agua donde 13 de los 31 puntos inventariados en superficie son nacimientos localizados en la formación Plaeners. La roca salina también fue incluida dentro de esta caracterización, toda vez su existencia e interacción con el flujo subterráneo representa la justificación misma del presente trabajo. Además, el sistema hidrogeológico del área de estudio se subdividió en 3 grupos según el tipo de flujo que presentan, a saber:

a) Sedimentos y Rocas con Flujo Esencialmente Intergranular.

Depósitos de Terraza Alta (Acuífero)

Se componen de arenas de grano grueso a fino, arcillas y limos. Su origen y composición le permiten tener una porosidad y permeabilidad considerable, a tal punto que la CAR ha identificado en el área algunos nacimientos en estos depósitos que además son aprovechados para uso doméstico.

b) Rocas con Flujo Esencialmente a Través de Fracturas

Labor y tierna (Acuífero)

Su litología se compone de cuarzoarenitas de grano fino a conglomerática, friables a consolidadas, intercaladas con arcillolitas y limolitas. Aunque no se encontraron puntos de agua en esta formación en cercanía al área de estudio, existen antecedentes de su explotación hidráulica en zonas fracturadas.

Plaeners (Acuífero)

Conformado por arcillolitas, limolitas silíceas y liditas, intercaladas con areniscas de grano fino, consolidado, se presenta con mucha frecuencia muy fracturado. Su fracturamiento y proximidad a zonas de falla le otorgan una porosidad y permeabilidad secundarias, permitiéndole constituirse en una formación hidrogeológicamente importante en la zona.

Arenisca dura (Acuífero)

Está conformada por arenisca cuarzosa de grano fino a medio, masiva, intercalada con arcillolitas y limolitas silíceas. Es un acuífero discontinuo de extensión regional, restringido a zonas fracturadas.

Chipaqué (Acuitardo)

Su litología se constituye de Shales ricos en hierro, fisiles, intercalados con arcillolitas, limolitas silíceas y areniscas cuarzosas de grano fino. Aunque de manera general se le considera un acuífero, el estar en una zona muy afectada por la actividad tectónica le ha dotado de alguna porosidad y permeabilidad secundaria.

Roca salina (De acuitardo a acuífero de mediana productividad puntual)

Constituida principalmente por sal gema (88%), capas y fragmentos de arcillolita que van desde pequeñas escamas de menos de 1 mm hasta unos pocos cuerpos de cerca de 1 m de diámetro. Los fragmentos están distribuidos erráticamente dentro del conjunto de la halita. En el área de estudio (la mina) la roca salina suele comportarse como un acuitardo, pero considerando factores como la acción de las labores mineras como áreas de menor presión hidráulica, la acción de disolución que genera el agua en busca de esa menor presión, la cercanía de fallas geológicas y hundimientos producidos en superficie por la actividad minera la roca salina llega a comportarse puntualmente como acuífero de mediana productividad.

c) Sedimentos y Rocas con Limitados Recursos de Agua Subterránea

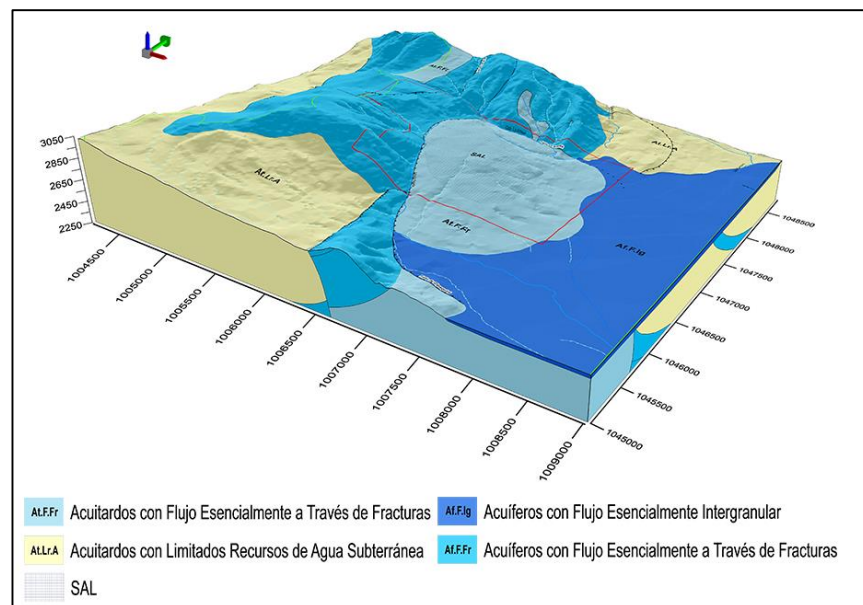
Guaduas (Acuitardo)

Litológicamente se conforma por arcillolitas intercaladas con bancos de areniscas de grano fino y matriz arcillosa, presenta mantos de carbón. Pueden considerarse con capacidad de transmisión y almacenamiento sus niveles arenosos, pero con baja productividad.

Bogotá (Acuitardo)

Se compone casi exclusivamente de arcillas bien estratificadas con la presencia de algunos bancos de arenisca micácea gris de grano fino y su parte superior presenta esporádicos mantos de carbón. Posee porosidad y permeabilidad primarias que permiten la interconexión hidráulica y flujo de agua.

Ilustración 11: Hidrogeología de la zona de estudio.



Fuente: Autores.

9.4 ZONAS DE RECARGA

En términos generales, se denomina recarga al proceso por el cual se incorpora a rocas con porosidad y permeabilidad el agua procedente de fuera del contorno que lo limita. Son varias las procedencias de esa recarga, desde la infiltración de la lluvia (en general, la más importante) y de las aguas superficiales (importantes en climas poco lluviosos), hasta la transferencia de agua desde rocas adyacentes (CUSTODIO 1998). El área o zona donde ocurre la recarga se llama zona de recarga.

Las rocas con porosidad y permeabilidad se recargan principalmente a través de la precipitación en “suelos de alta capacidad de infiltración” o rocas superficialmente permeables. Las áreas de recarga de los acuíferos pueden o no estar a grandes distancias de donde son utilizados (LOSILLA 1986).

La recarga hídrica depende del régimen de precipitación, de la escorrentía superficial y del caudal de los ríos, así como de la permeabilidad de los suelos, de su contenido de humedad, de la duración e intensidad de las lluvias y del patrón de drenaje de la cuenca. También la pendiente de la superficie constituye un factor importante, puesto que los terrenos muy inclinados favorecen la escorrentía superficial; por el contrario, los terrenos con poca pendiente retienen por más tiempo el agua, lo que favorece la infiltración (INAB 2003).

Para Freeze y Cherry (1979) la única ley inmutable es que las tierras altas son áreas de recarga y las tierras bajas son áreas de descarga. Sin embargo, Scanlon *et al.* (2002) expresa que esto es cierto en regiones húmedas, pero que en valles aluviales áridos la recarga ocurre usualmente en topografías bajas como canales o arroyos efímeros.

Para el caso del área de estudio tanto la quebrada El Gavilán, al occidente, como la quebrada La Artesa, al norte y las zonas de hundimiento constituyen las condicionantes más importantes para la dinámica hídrica subterránea en la mina.

Las quebradas antes mencionadas se comportan ambas como drenantes hacia el lado de las rocas clasificadas como acuíferos con flujo esencialmente a través de fracturas (margen izquierda para la quebrada La Artesa y Margen derecha para El Gavilán), y como zonas de recarga hacia la otra margen, que corresponde a la zona donde se encuentra el depósito salino.

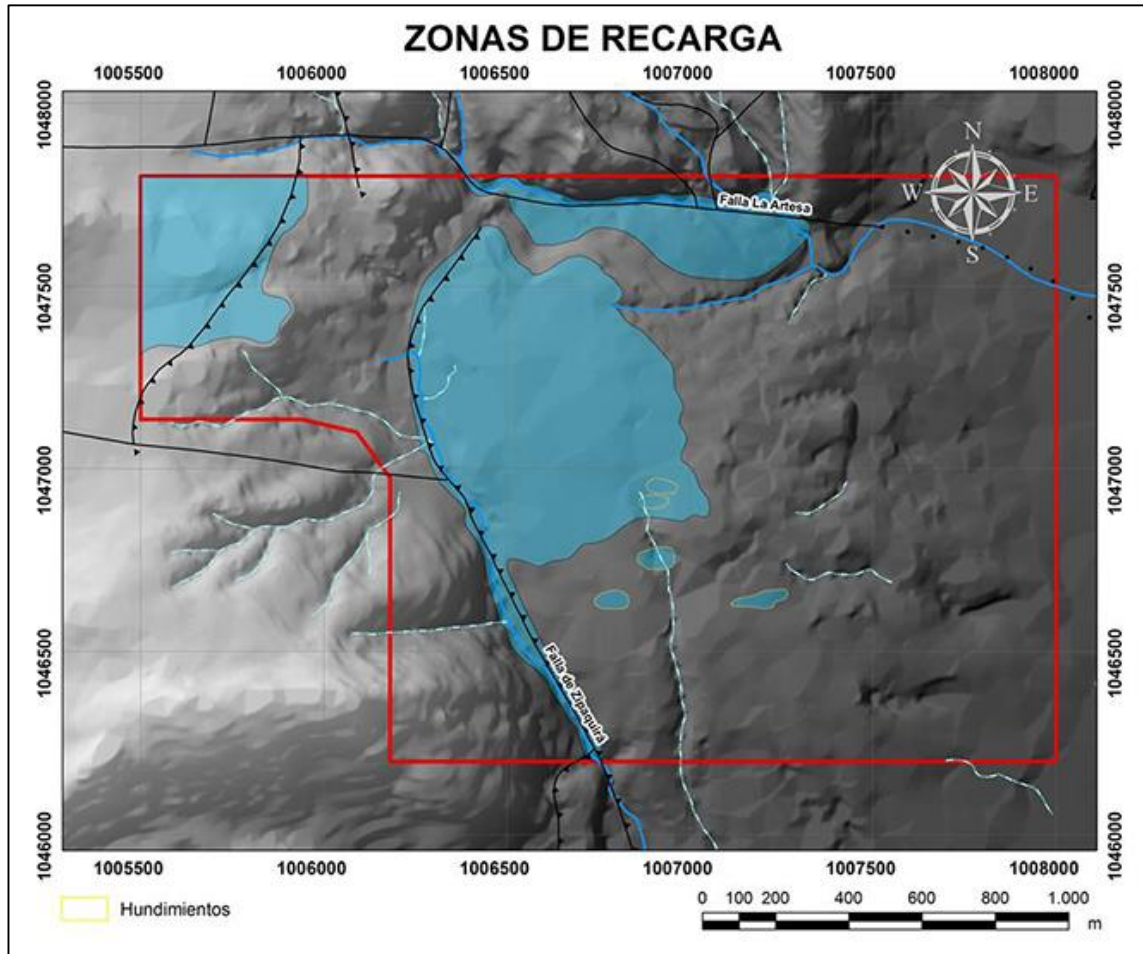
Visto de este modo las zonas de estas quebradas pueden ser consideradas como zonas de descarga para un modelo de mayor envergadura, por ejemplo, para toda la cuenca del río negro, sin embargo, los intereses de este estudio se limitan a la zona del yacimiento, por tanto, estas zonas serán consideradas como zonas de recarga hacia las labores mineras.

Adicional a lo anterior se tuvo en consideración las pendientes de la superficie en el área de estudio, identificando como zona potencial de recarga la cima de la loma salina por tener pendientes bajas, entre 0 y 25% lo que le atribuye una posibilidad de recarga de moderada a muy alta, según la clasificación propuesta por Matus *et al.* (2009).

ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03

Resumiendo, para efectos de la elaboración del modelo hidrogeológico de la mina de sal de Zipaquirá, serán consideradas zonas de recarga principalmente las zonas correspondientes a las quebradas El Gavilán al occidente, como la quebrada La Artesa al norte, las zonas de hundimiento y las zonas con pendientes entre 0 y 25%, que en el área de estudio tienen un uso agropecuario (PMA Colsalminas LTDA.).

Mapa 19: Zonas de Recarga.



Fuente Autores.

10 MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL

Como se ha dicho en el capítulo de hidroquímica, en la Cámara 15 con Túnel 2 existe un punto de infiltración que, por sus altos contenidos en muchos de los elementos determinados por ensayos de química de aguas, se ha concluido que son aguas de permanencia y recorrido considerable como para alcanzar dicho enriquecimiento, además, el gráfico de concentración de Litio (ver gráfico 9) puede mostrarnos una conexión posible con las aguas del Mar del sur.

Para el caso del mar del sur, el origen de sus aguas no quedó identificado por los ensayos hidroquímicos, sin embargo, se propone que estas aguas provienen de los Hundimientos 10-81, 10-85 y 03-85, así como de recarga por infiltración desde la zona de poca pendiente en la cima de la loma salina.

Las aguas del Reservorio 27 no se muestrearon porque en este lugar, además de la infiltración natural, se depositan aguas de otros puntos donde la infiltración es menor, hecho este que causaría un resultado sesgado de los análisis de laboratorio que se hicieren; sin embargo, la experiencia nos dice que las aguas que en este punto confluyen son de altas densidades, tal que, al contrario del Reservorio 23, no se genera una dilución de los machones. Los autores proponen que estas aguas pueden tener su origen en el Mar del norte y por recarga vertical desde superficie.

Valores comparables de Hierro, Potasio, Magnesio, Calcio y Bicarbonatos, podrían llevarnos a pensar en una posible conexión entre las aguas del pozo #2(muestra Pz-2) y del Reservorio 23 (C23-T260), sin embargo, las aguas que llegan al Reservorio 23 son aguas de bajas densidades (inferiores a $1,2 \text{ gr/cm}^3$), además, debe recordarse que las aguas del Pozo #2 son inyectadas desde superficie y por tanto tiene unas características químicas algo diferentes a las demás muestras tomadas en el interior de la mina; esto nos lleva a pensar que la única relación que pueden llegar a tener es que ambas aguas vienen desde superficie y tiene un tiempo de permanencia bastante cortos; es decir que las aguas del Reservorio 23 vienen desde superficie posiblemente a través del hundimiento 04-88 y/o el hundimiento 03-85, este último se encuentra casi al cenit del Reservorio 23. Este postulado debería ser comprobado en el nivel inmediatamente superior (Potosí), pero por su estado estructural, tiene un acceso restringido.

En el Mar del norte y en la Laguna de Panamá no se tomaron muestras para análisis hidroquímico, sin embargo, sería válido llegar a pensar que existe una conexión entre ambos puntos debido a la cercanía entre ellos; el flujo probable sería desde la laguna de Panamá hacia el Mar del norte.

Considerando las zonas de recarga definidas, los orígenes más probables de las aguas de la Laguna de Panamá son de recarga superficial por infiltración vertical y la quebrada La Artesa. Los autores recomiendan el uso de trazadores isotópicos para determinar a ciencia cierta el origen de estas aguas.

Al punto identificado en el inventario de puntos de agua como Cámara 15 con Túnel 260 (C15 – T260) confluyen aguas que la experiencia de los mineros antiguos ha permitido

identificar como provenientes del Reservorio 23, evidencia de hasta donde han llegado en algún momento las aguas del Reservorio 23 se observan en la intersección del Túnel de acceso vehicular a la catedral y el Túnel 260 (ver foto 29). La Cámara 15 con Túnel 260 se localiza en un lugar intermedio entre esta intersección y el Reservorio 23, lo que valida la información suministrada por los mineros.

Foto 26: Marcas de dilución intersección del túnel de acceso vehicular a la catedral y el túnel 260.



Fuente: Autores.

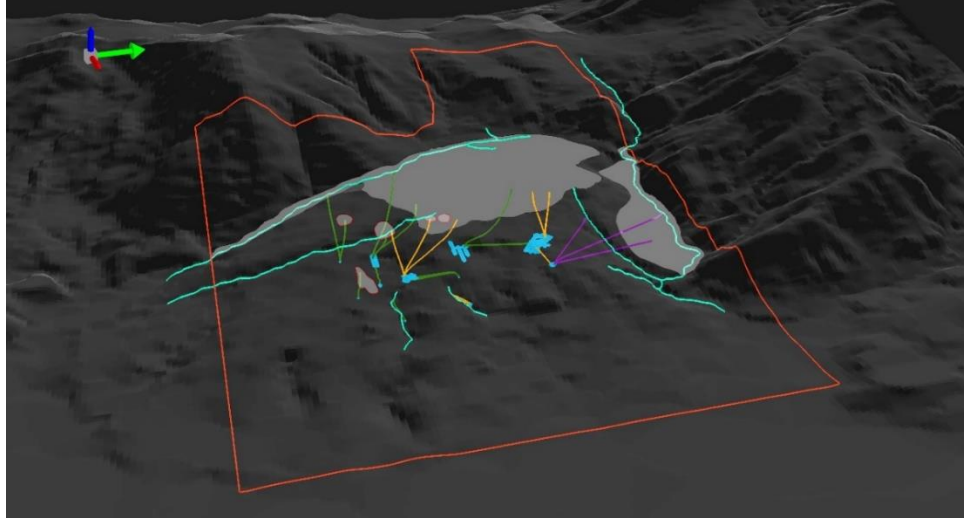
Las aguas que se infiltran en la Cámara 340 (C-340) tienen unas concentraciones particulares; su contenido de Litio es cero, presentan los valores más elevados de concentración en Cloruros y Sodio y los más bajos en Bicarbonatos. Estas características no llevan a concluir que estas aguas han tenido un recorrido totalmente diferente que cualquiera de las otras aguas muestreadas en el interior de la mina y descarta de tajo cualquier conexión con alguna de ellas. La presencia de la zona de hundimientos (11-89, 07-90 y 12-98) en la superficie, al cenit de este punto de infiltración lleva a pensar en este origen para las aguas que se infiltran a la Cámara 340, sin embargo, debe considerarse el efecto que puede llegar a producir la losa entre el nivel Potosí y el Nivel Fabricalta (donde se encuentra la Cámara 340), ya que esta puede llegar a comportarse como impermeable en algunas zonas y como permeable en otras.

El punto de infiltración de la sobreguía exterior no fue muestreado para análisis hidroquímico, no obstante, su cercanía con la quebrada El Gavilán hacen considerar a está

ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03

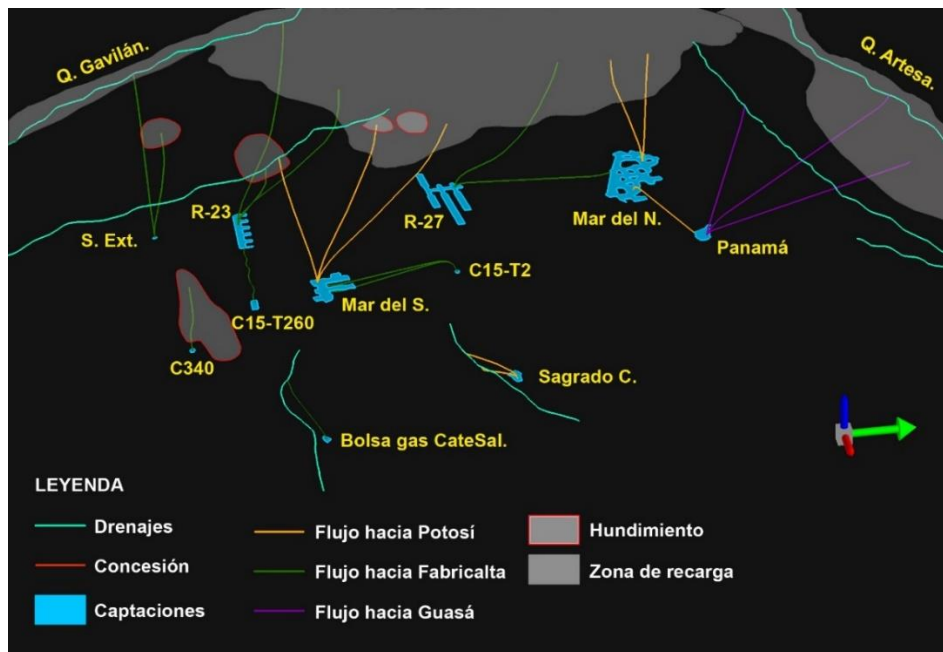
como un origen lógico para las aguas que a este punto llegan, sumado a las que posían llegar a infiltrarse desde el hundimiento 04-88.

Ilustración 12: Modelo Hidrogeológico Conceptual de la mina de sal de Zipaquirá.



Fuente: Autores.

Ilustración 13: Detalle del modelo Hidrogeológico conceptual de la Mina de sal de Zipaquirá.



Fuente: Autores.

11 CONCLUSIONES

La zona de estudio se caracteriza por el contraste de pendientes fuertemente inclinadas, que limitan el domo salino en superficie, con pendientes ligeramente inclinadas como producto del potencial erosivo medio de las quebradas La Artesa y El Gavilán.

El área estudio se ubica en una zona climatológicamente de altas precipitaciones y un porcentaje de humedad considerable del 75%, bajo estas y otras condiciones se estima un valor de recarga en las zonas de infiltración de 91962.26 m³/s es decir 0.0029 m³/s, sin embargo, es difícil establecer a ciencia cierta que este volumen de agua el que esté generando los problemas de disolución de la roca salina en las labores mineras.

Las condiciones climáticas del área en estudio constituyen un aspecto fundamental al considerar los volúmenes de agua que están generando los problemas de disolución de la roca salina ya que desde el punto de vista meteorológico las precipitaciones que se presentan

Es posible que hacia sub-superficie existan más cuerpos salinos, aislados y de menor tamaño puesto que muestras de agua tomadas en drenajes que no discurren sobre la superficie del domo salino son aguas con características químicas típicas de salmueras.

Los análisis de graficas de los resultados de la hidroquímica por elementos discriminados arroja resultados interesantes para la muestra C15-T2, mostrando un enriquecimiento de estas aguas en Hierro, Magnesio, Potasio, Calcio y Estroncio en comparación con las demás muestras del interior de la mina. Una alta concentración en Litio comparable con las del Mar del Sur permite pensar en este último como la fuente más probable de las aguas que llegan a la Cámara 15 con Túnel 2.

Los resultados de la hidroquímicos de la muestra Pz-2 muestran que estas aguas al ser inyectadas desde superficie y por su corto tiempo de permanencia, aún conserva algunas características químicas de las aguas superficiales como el bajo contenido de Calcio, Magnesio, Potasio y Hierro.

Los análisis hidroquímicos del Reservorio 23 (muestra C23-T260) muestran variaciones en las concentraciones en comparación con las otras muestras tomadas en el interior de la mina (Mar del Sur y Cámara 340), exceptuando las aguas del pozo #2 por las razones ya mencionadas, estas variaciones no son de las magnitudes de las de la muestra C15-T2, pero sí es evidente la diferencia con las demás, tal es el caso del contenido de Estroncio, Magnesio, Cloruro, Calcio y hierro entre otros. Esto confirma el hecho de que al este punto confluyen aguas de bajas densidades, causantes del despatamineto por dilución de los machones; además, nos llevan a proponer una infiltración directa desde superficie, con un flujo relativamente rápido, tal que no permite que estas aguas se saturen lo suficiente antes de llegar al Reservorio 23, como para no causar dilución.

Con el apoyo de los resultados del estudio geofísico realizado por Geointerpretación LTDA., el inventario de perforaciones de la base de datos de Colsalminas LTDA. en este trabajo se propone una primera aproximación a la geometría en 3D del domo salino, si llegar a pretender que esta propuesta sea un modelo definitivo.

Es notable como la formación Plaeners posee un número importante de nacimientos de agua en la zona, constituyéndose tal vez en la formación hidrogeológicamente más importante del sector por su porosidad y permeabilidad secundaria genera en cercanías a las zonas de falla.

Los ensayos de bombeo realizados en zonas inundadas de la mina a las que se podía tener un acceso, permitieron conocer algunas características hidrogeológicas puntuales del yacimiento.

Con la implementación del método de recuperación a régimen variable se pudo determinar los siguientes valores de transmisividad:

- a. Mar del sur = 905.85 m²/día
- b. Sagrado corazón = 141.1714 m²/día
- c. Reservorio 23 = 798.5455 m²/día
- d. C15-T2 = 74.7187 m²/día

Aplicando el método Slug Test (ecuación de Gilg-Gavard para nivel variable) se pudo estimar la permeabilidad puntual para la C15-T260 en un valor de 0.335 m/día

Para la Cámara 15 con Túnel 2 se logró calcular un caudal de infiltración gracias a que las medidas del lugar eran de fácil determinación, este caudal de infiltración es de 0.0325 m³/h.

El comportamiento lineal del abatimiento en la prueba de bombeo realizada en el Reservorio 27 permitió establecer un descenso de 0,6 cm/h, bombeándose a un caudal de 21 m³/h; tomando medidas de ascenso pudimos estimar un caudal de infiltración para este punto de 3.0841 m³/h.

Ensayos realizados en el laboratorio de rocas y suelos y agregados de la UPTC, permitieron determinar que la porosidad de la roca salina oscila entre 9.307% y 15.244%, con un promedio de 11,884%.

Aunque la formación Plaeners fue catalogado como acuitardo por Ecoforest (1998), en la zona presenta un comportamiento de acuífero debido al fracturamiento presente, como puede evidenciarse en el inventario de puntos de agua donde 13 de los 31 puntos inventariados en superficie son nacimientos localizados en la formación Plaeners.

La formación Chipaque identificada como acuífugo por Ecoforest (1998), en la zona de estudio se considera como un acuitardo, esto debido a que a través de esta formación el agua se infiltra hacia las labores mineras.

Para el área de estudio se consideraron zonas de recarga la zona de la quebrada El Gavilán que discurre sobre la falla de Zipaquirá, la zona de la quebrada La Artesa que discurre sobre la falla que le hereda su nombre, las zonas de hundimientos y la zona de bajas pendiente que constituye principalmente la cima de la loma salina, esto no da un área de recarga potencial de 697553,67 m².

Las quebradas La artesa, al norte del polígono; y El Gavilán, al occidente, se comportan ambas como drenantes hacia el lado de las rocas clasificadas como acuíferos con flujo esencialmente a través de fracturas (margen izquierda para la quebrada La Artesa y Margen derecha para El Gavilán), y como zonas de recarga hacia la otra margen, que corresponde a la zona donde se encuentran las labores mineras.

Resultados de hidroquímica con algunas concentraciones similares entre las muestras tomadas en Pozo 2 y el Reservorio 23 podrían llevarnos a pensar en una posible conexión entre sus aguas, pero las bajas densidades de las aguas que llegan al Reservorio 23, esto nos lleva a concluir que la única relación que pueden llegar a tener es que ambas aguas vienen desde superficie y tiene un tiempo de permanencia bastante cortos; es decir que las aguas del Reservorio 23 vienen desde superficie posiblemente a través del hundimiento 04-88 y/o el hundimiento 03-85, este último se encuentra casi al cenit del Reservorio 23. Este postulado debería ser comprobado en el nivel inmediatamente superior (Potosí), pero por su estado estructural, tiene un acceso restringido.

Se determinó que las agua que llega hasta la Cámara 15 con Túnel 2, provienen de una infiltración lateral lenta desde el Reservorio 27, esto fue posible gracias al conocimiento histórico de los mineros y a las evidencias dilución encontradas en la intersección del Túnel de acceso vehicular a la catedral y el Túnel 260.

Todas las muestras tomadas al interior de la mina, a diferencia de las de superficie, poseen algún contenido de Litio, excepto la muestra tomada en la Cámara 340; los análisis hidroquímicos mostraron que su contenido de Litio es cero, presentan los valores más elevados de concentración en Cloruros y Sodio y los más bajos en Bicarbonatos. Esto permite inferir una fuente totalmente diferente a las aguas muestreadas en otros puntos de la mina; en este trabajo se propone la zona de hundimientos (11-89, 07-90 y 12-98) en la superficie.

El punto de infiltración de la sobreguía exterior no fue muestreado para análisis hidroquímico, no obstante, su cercanía con la quebrada El Gavilán hacen considerar a está como un origen lógico para las aguas que a este punto llegan, sumado a las que se infiltraren desde el hundimiento 04-88.

12 RECOMENDACIONES

Los autores recomiendan que, para mejor conocimiento de la estructura del domo y estructuras geológicas que lo pudieren estar afectando se realicen más estudios de geofísica, de preferencia con el método de sísmica.

Para reducir la incertidumbre e ir afinando una posible modelación numérica a futuro, se recomienda el uso de trazadores isotópicos para confirmar la conexión de las quebradas El Gavilán y La Artesa con las aguas que se infiltran a las labores mineras, esto debería hacerse en dos tiempos distintos para cada quebrada o con dos trazadores distintos, esto con el fin de llegar a conocer posibles mezclas de aguas.

Sería útil llevar un control de los niveles de agua con reglillas numeradas en las captaciones más importantes, así como un registro de las mismas, este registro debería, además incluir información como el tipo de bomba, caudal de bombeo y tiempo de bombeo; lo anterior podría facilitar estimaciones de caudal de infiltración.

13 BIBLIOGRAFÍA

- ALARCON, A. (1998). *EL AGUA EN LA CUENCA ALTA DEL RIO BOGOTÁ, disertación en los Mates del Planetario, "Metropolización, Planeación y Ordenamiento Territorial".* BOGOTÁ.
- ALLEN, R., & AL., E. (2006). *Evapotranspiración del Cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.* Roma.
- ALVARES, J., & GUIO, G. (1987). *Desarrollo de un modelo para la explotación por lixiviación In Situ en el yacimiento de sal gema Zipaquirá. IFI CONCESIÓN SALINAS. Tesis de grado. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.* Sogamoso.
- CALAFORA, J., & PULIDO, A. (2002). *SÍNTESIS HIDROGEOLOGICA SOBRE LOS YESOS KARSTIFICADOS DE SORBAS Y SU ENTORNO, Departamento de Geodinámica e IAGM, Universidad de Granada y CSIC.* Almeira, España.
- CAR; INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA - INGEOMINAS;. (1989). *Estudio Hidrogeológico Cuantitativo de la Sabana de Bogotá.* Bogotá.
- CARRERA, J., & NEUMAN, S. (1986). EL PROBLEMA INVERSO DE LA HIDROLOGIA SUBTERRANEA: ESTADO DEL ARTE Y METODO DE SOLUCION. Universitat Politcnica de Catalunya, ISSN 0213-1315. *Revista internacional de métodos numéricos para el cálculo y diseño en ingeniería, Vol. 2, 1, 3-25.*
- CASTRO, J. (2011). *Informe visita técnica de emergencia municipio de Nemocón-Cundinamarca. SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO - SGC.* Bogotá.
- COLSALMINAS Ltda. (2010). *Plan de Manejo Ambiental para la Explotación, Beneficio, Transformación y Comercialización de la mina de Sal de Zipaquirá.* Zipaquirá.
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CONAGUA), Manual de Agua Potable, Alcantarillado y saneamiento, Pruebas de bombeo, Coyoacán, México D.F.2007.
- CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA - CAR. (2008). *Plan De Manejo Ambiental de aguas subterráneas en la sabana de Bogotá y Zona Critica.* Bogotá.
- CUSTODIO, E., LLAMAS, M., & SAMPER, J. (1997). La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. TEXTOS DEL SEMINARIO CELEBRADO EN LAS PALMAS DE GRAN CANARIA., (pág. 455). Madrid,. España.
- CUSTODIO, G. 1998. Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evolución y la incertidumbre. Boletín Geológico y Minero (109-4):13-29.
- ECOFORREST LTDA., 1998. Inventario y Diagnóstico de los Recursos Naturales Renovables del Área Jurisdiccional de la CAR. Escala 1:100.000. Elaborado para la CAR, Bogotá. ECOFORREST LTDA., 1998. Inventario y Diagnóstico de los

Recursos Naturales Renovables del Área Jurisdiccional de la CAR. Escala 1:100.000. Elaborado para la CAR, Bogotá.

- ESTRADA, L. (2008). *Apuntes de PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA. cátedra de geofísica, facultad de ciencias exactas y tecnología, departamento de geodesia y topografía, universidad nacional de Tucumán.* Tucumán, Argentina.
- FREEZE, R., & CHERRY, J. (1979). *Groundwater.* New Jersey: Prentice Hall.
- GARCIA, H., & JIMENEZ, G. (2016). Structural analysis of the Zipaquira Anticline (Eastern Cordillera, Colombia). En *BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA* (págs. 21-32). Medellín.
- GEOINTERPRETACION Ltda. (2001). *Estudio Geofísico, Gravimetría Geoeléctrica, En las minas de Sal ubicadas en el Municipio de Zipaquirá, Contrato No. 042.* Zipaquirá.
- GOMEZ, J. (2009). *eología, geofísica, hidrogeoquímica e isótopos, como herramientas para definir un modelo conceptual hidrogeológico, caso de aplicación: acuífero costero del municipio de Turbo. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia.* . Medellín.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA - INGEOMINAS. (2004). *Programas De Exploración de Aguas Subterráneas.* Bogotá.
- INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM, INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTIN CODAZI - IGAC Y CORPORACION AUTONOMA REGIONAL DEL RIO GRANDE DE LA MAGDALENA - CORMAGDALENA. (2008). *Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, escala 1:100.000.* Bogota.
- JULIVERT, M. (1961). *Observaciones sobre el cuaternario de la Sabana de Bogotá, Boletín de Geología Número 7, Publicación oficial del Departamento de Geología de la Facultad de Ingeniería de Petróleos, Universidad Industrial de Santander.* Bucaramanga.
- LOSILLA, M. 1986. Protección de las zonas de recarga de los acuíferos. In Curso Curso de Postgrado "Bases hidrológicas para el manejo de cuencas". Turrialba, CR, CATIE. 8 p.
- LOZANO, H. (1998). *Explotaciones de sal en Colombia. PROYECTO MUSEO DE SAL.* Ibagué.
- MARÍN, V. (2010). *Evaluación de La Relación Entre la Evapotranspiración Potencial Teórica y La Evaporación Registrada en los Departamentos de Cundinamarca y Valle del Cauca, Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil.* Bogotá.
- MATUS, O., & et. al. (2009). Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica, Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza,

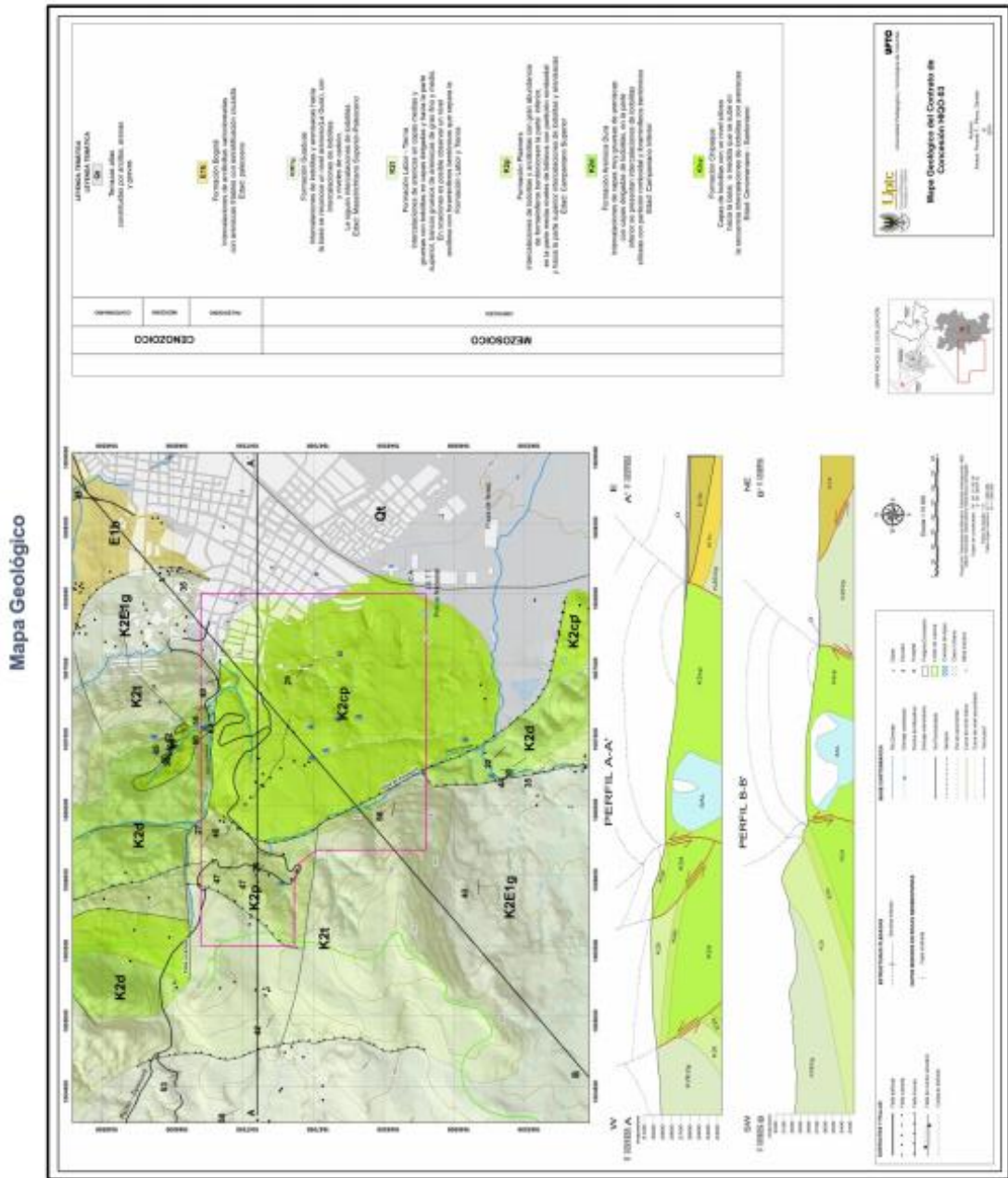
- División de Investigación y Desarrollo, Serie técnica. . *Boletín técnico No. 38.* Turrialba, Costa Rica.
- McLAUNGHLIN, D. (1971). *Compilación de estudios geológicos de Colombia: Recursos minerales de Cundinamarca y Boyacá. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras, 1971. Vxxix, N°1.* Bogotá.
- McLAUNGHLIN, D., & ARCE, M. (1970). *ECONOMIC GEOLOGY OF THE ZIPAQUIRA QUADRANGLE AND ADJOINING AREA, DEPARTMENT OF CUNDINAMARCA, COLOMBIA, U. S. Geological Survey and Instituto Nacional de Investigaciones Geologico-Mineras.*
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL, DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS DE CHILE. (2012). *GUÍA PARA EL USO DE MODELOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN EL SEIA, Servicio de Evaluación Ambiental, SEA.; ISBN: 978-956-9076-12-1; 2012.* Chile.
- MONTOYA , D., & REYES, G. (2003). *Memoria Explicativa Geología de la Plancha 209 Zipaquirá.* Bogotá.
- MONTOYA, D., & REYES, G. (2003). *Geología de la Plancha 209 de Zipaquirá, Ministerio de Minas y Energía, Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS.* Bogotá.
- MONTOYA, D., & REYES, G. (2005). *Geología de la Sabana de Bogotá.* Bogotá.
- MOTAVITA, F. (2011). *Balance Hídrico de la Mina de Sal de Zipaquirá COLSALMINAS LTDA.* Zipaquirá.
- PÉREZ, G., & SALAZAR, A. (1973). *Estratigrafía y facies del Grupo Guadalupe. Universidad Nacional de Colombia.* Bogotá.
- PLANEACIÓN ECOLOGICA Ltda; ECOFOREST Ltda;. (2014). *Elaboración de Diagnostico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del rio Bogotá, Subcuenca del rio Negro – 2120.* Bogotá.
- RUTGER, R., FRIES, A., NAUB, T., & PETERS, T. (2011). NEAR SURFACE AIR HUMIDITY IN A MEGADIVERSE ANDEAN MOUNTAIN ECOSYSTEM OF SOUTHERN ECUADOR AND ITS REGIONALIZATION. *AGRICULTURAL AND FOREST METEOROLOGY*, 17 - 30.
- SANCHEZ, F. (2011). *Medidas puntuales de permeabilidad (“slug tests”); Departamento de Geología, Universidad de Salamanca.* Salamanca, España.
- SCANLON, B., & HEALY, P. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. En: *Hydrogeology Journal*, No. 10.
- SIÑERIZ, J. (1928). *Métodos de prospección geofísica y su aplicación a la resolución de varios problemas Geológico-Tectónicos, TIP. y LIT. COULLAT.* Madrid, España.

- UJUETA, G. (1971). *Compilación de estudios geológicos de Colombia: sal en la cordillera Oriental de Colombia*. v xix. Bogotá.
- VELANDIA, F., & BERMOUDES, O. (2010). *HIDROGEOLOGIA REGIONAL DE LA SABANA DE BOGOTA*, Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS . Bogotá.
- VELEZ, M. (2010). *Métodos para determinar la recarga en acuíferos, Posgrado en Aprovechamiento de recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Medellín*. Medellín.
- VELEZ, M., & et. al. (2011). *Las Aguas Subterráneas, Un Enfoque Práctico, Colección GUÍAS Y MANUALES, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA INGEOMINAS*. Bogotá.
- VELOZA, J. (2012). *SISTEMA DE MODELAMIENTO HIDROGEOLOGICO DEL DISTRITO CAPITAL BOGOTÁ*, Secretaría distrital de ambiente, Subdirección del recurso hídrico y del suelo, OPS 723 DE 2012. Bogotá.
- VILLANUEVA, M., & IGLESIAS, A. (1984). *POZOS Y ACUIFEROS, TÉCNICAS DE EVALUACIÓN MEDIANTE ENSAYOS DE BOMBEO*, Instituto Geológico y Minero de España, ISBN 84-7474-258-7, Depósito legal: M-37996-1984. Madrid, España.
- VILLARÁN, R. (2010). *Mejora de los Parámetros de Cálculo del Modelo del Número de Curva y su Validación Mediante un Modelo Hidrológico Distribuido, Memoria para optar al grado de Doctor, Departamento de Ciencias Agroforestales, Universidad de Huelva*. Huelva, España.

ANEXOS

ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03

Anexo 1. Mapa Geológico.



ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03

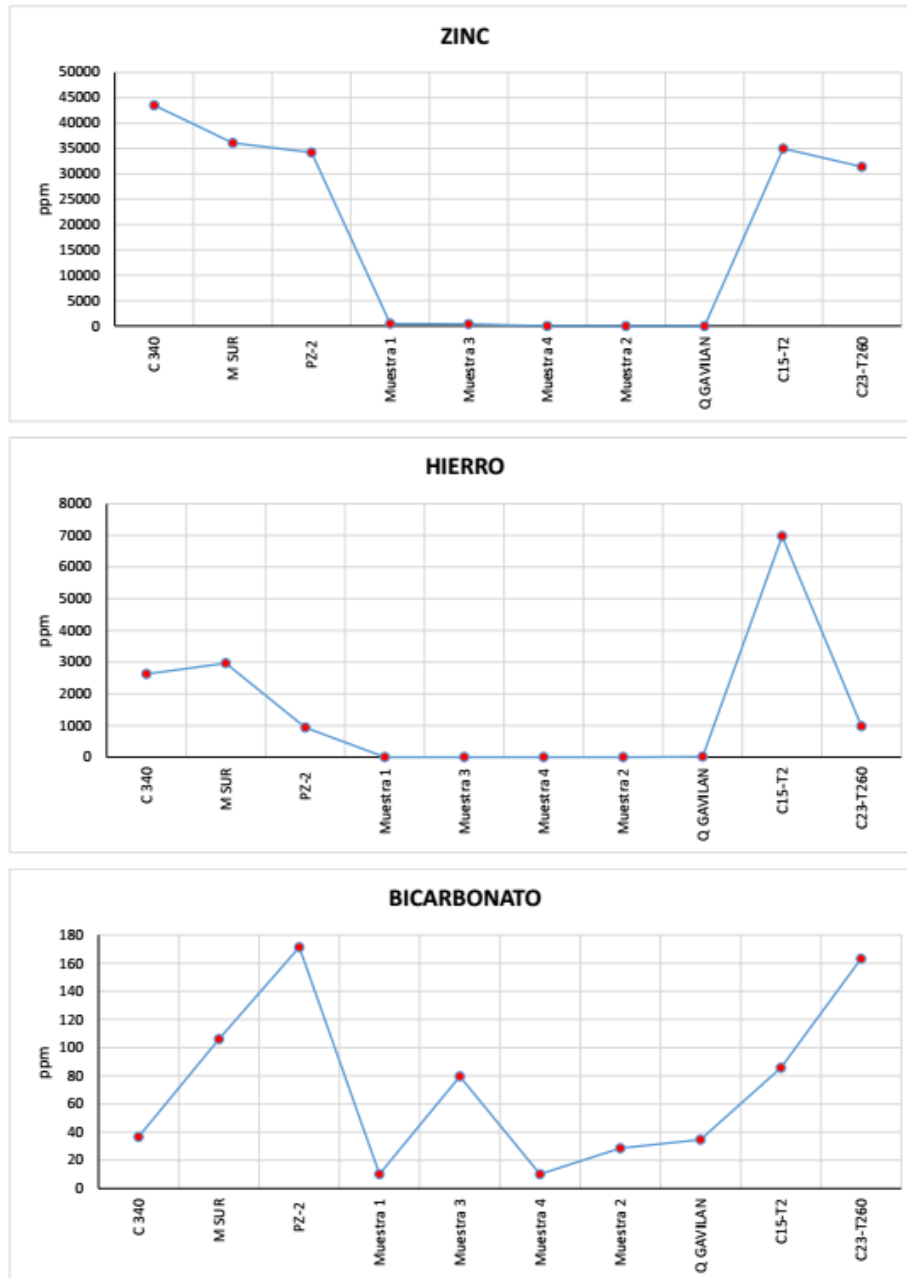
Anexo 02 – Resultados Hidroquímica.

RESULTADOS ENSAYOS DE HIDROQUIMICA											
C 340	M. SUR	PZ-2	MUESTRA 1	MUESTRA 3	MUESTRA 4	MUESTRA 2	Q GAVILAN	C15-T2	C23-T260	AGUA ACUEDUCTO MILLIPORE	AGUA
NIQUEL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ZINC	43521,547	36106,280	34227,50	469,881	368,27	0	14,209	34981,148	31423,266	10,001	0
COBALTO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HIERRO	2625,286	2963,06	637,071	0	0	0	13,568	6074,63	979,221	14,313	0
TOTAL	46146,833	39072,260	35164,661	469,881	368,27	0	27,855	41955,776	32402,487	24,314	0
HIDROXIDO ppm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CARBONA- TOS ppm	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BICARBONATOS ppm	36,72	106,06	171,36	10,2	79,56	10,2	28,56	85,68	163,2	44,88	4,08
DUREZA CALCIO	1256,53464	1577,68255	96,0804022	0	0	5,570763	4,3916508	2780,56552	208,284084	6,3077025	0
DUREZA MAGNESIO	6643,81831	7834,21615	2028,66815	310,850152	486,3046907	0	34,734638	20718,0197	3331,65188	51,5316905	2,7002689
DUREZA TOTAL	8030,35295	9411,8987	3028,73856	310,850152	486,3046907	0	40,302391	23507,0752	3539,303507	57,8396975	2,7002689
pH	6,57	6,38	6,21	5,25	7,49	5,85	5,6	6,27	4,51	6,8	6,35
T °C	19,4	12,3	14,6	9,8	9,9	17,4	18,4	19,1	19,3	19,1	19,5
LITRO	0	6,0	4,704	0	0	0	0	9,329	5,228	0	0
SODIO	48757,191	41030,188	42037,077	2483,012	1036,423	185,734	20,066	44536,844	38176,746	3,412	0,183
AMONIO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
POTASIO	2596,251	2060,796	0	0	0	0	0	6590,172	479,673	2,69	0
MAGNESIO	2491,732	2258,35	844,237	80,608	140,213	0	12,874	5972,332	960,407	14,855	0,781
CALCIO	518,608	631,553	39,262	0	2,23	0	1,758	1116,831	83,377	2,525	0
ESTRONCIO	156,237	122,135	0	0	0	0	0	506,841	0	0	0
TOTAL	54520,019	46111,922	42926,18	2562,62	2076,636	185,734	35,362	60820,349	84,6616	23,462	0,944
FLUORURO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CLORURO	220324,094	157112,188	167699,641	3454,842	2378,238	543,706	30,314	201183,688	122004,008	5,107	0
NITRITOS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BROMUROS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NITRATOS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FOSFATOS	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SULFATO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	220324,094	157112,188	167699,641	3454,842	2497,541	543,706	43,378	201183,688	122004,008	11,684	0

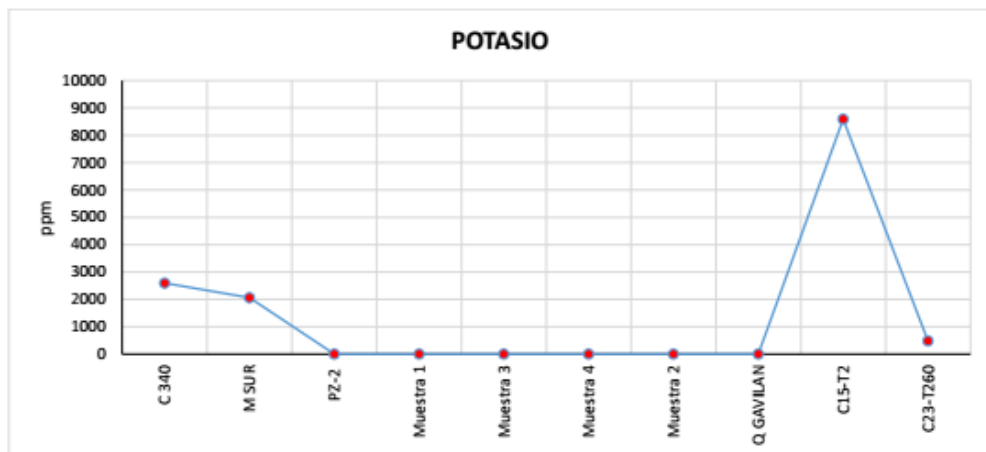
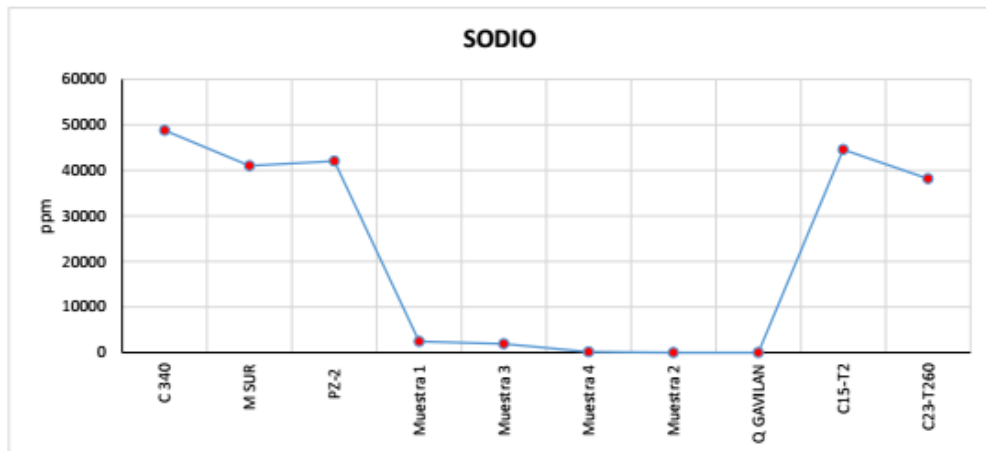
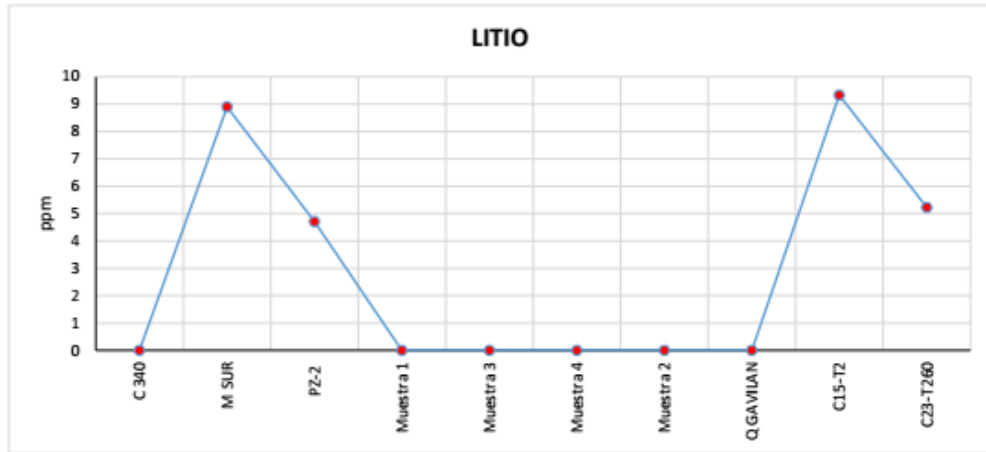
SÓLIDOS TOTALES										
C 340	M. SUR	PZ-2	MUESTRA 1	MUESTRA 3	MUESTRA 4	MUESTRA 2	Q GAVILAN	C15-T2	C23-T260	
RESIDUO EN ppm (mg/litro)	9054300	16131800	2164400	10085600	2695300	767000	1327400	14798100	11445100	
RESIDUO CAPSULA	474465	43794	45,8454	45,0748	47,7279	46,1148	45,4139	47,0215	44,4538	
CAPSULA + AGUA	1072468	1050876	1033003	95,5835	97,8344	95,9399	95,2047	108,1049	101,5165	
CAPSULA + RESIDUO	565038	580512	47,8098	46,1113	50,4171	46,2818	46,7413	62,7196	55,6787	
AGUA	60,2003	60,2805	60,100	40,9381	50,081	40,251	40,708	60,1834	57,1449	
RESIDUO	90543	102441	2,1844	1,6085	2,6952	0,767	1,3274	14,7981	11,4451	
% RESIDUO	15,0402965	16,9940528	26,8375784	4,3341657	2,069647172	5,396849737	1,530384768	2,685954353	24,5883416	20,026200

ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03

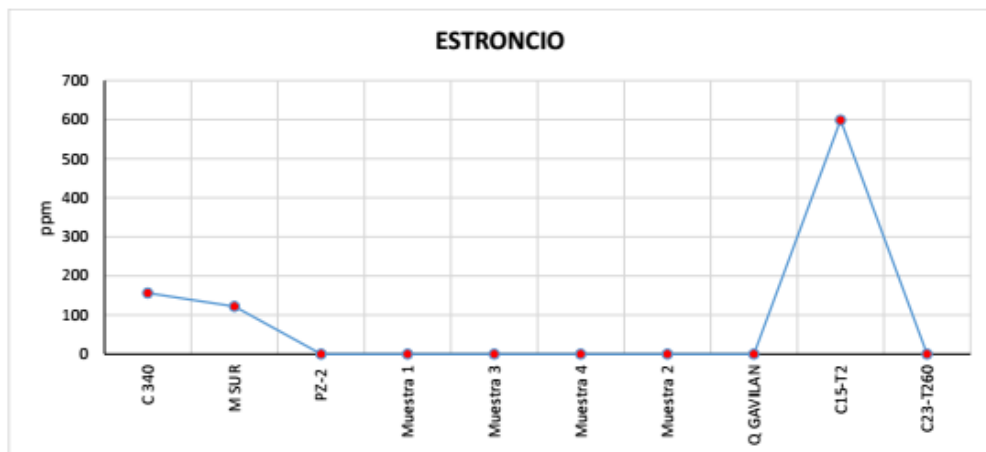
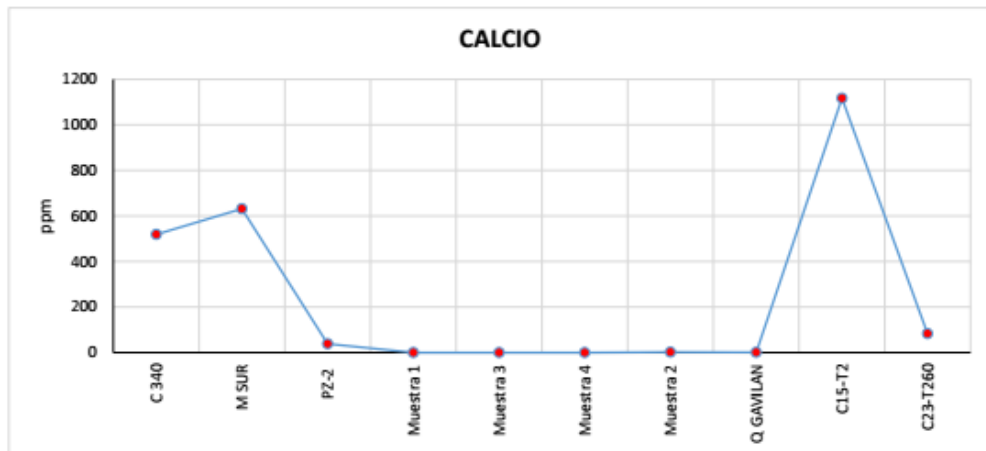
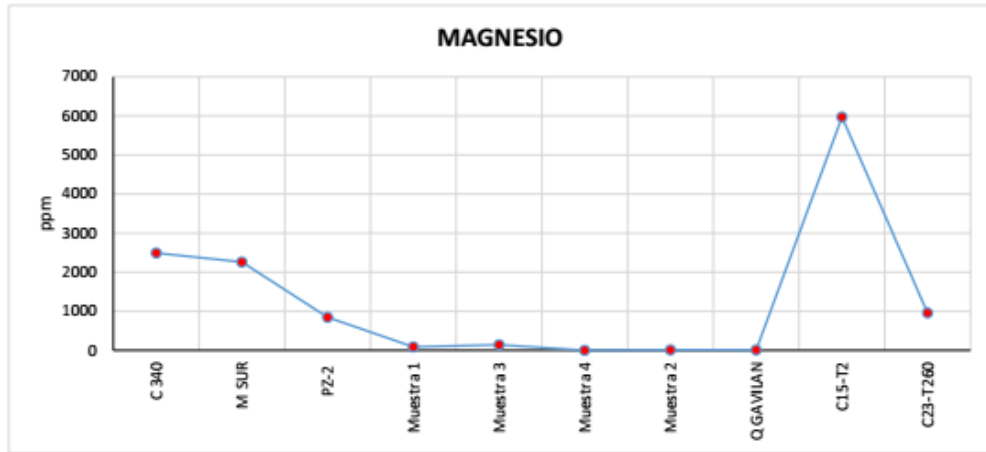
Anexo 03 – Gráficas por elementos discriminados.



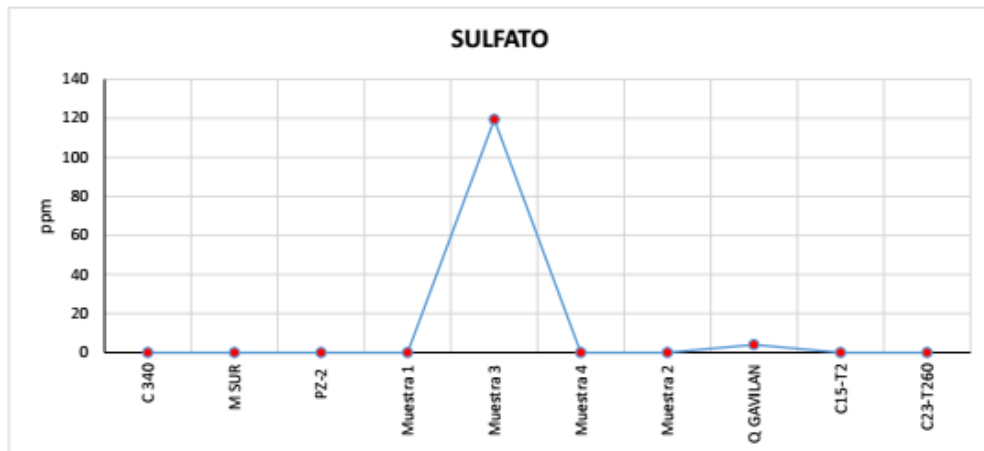
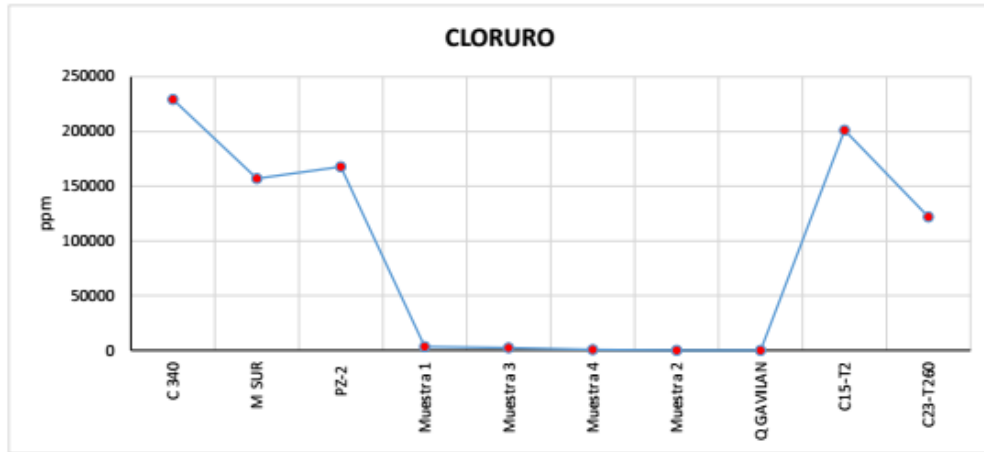
ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03



ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03



ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03



ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03

Anexo 04 - Estaciones Hidrometeorológicas

ESTACIONES HIDROMETEOROLOGICAS									
CÓDIGO	ESTADO	TIPO	CATEGORIA	ESTACIÓN	CUENCA	MUNICIPIO	ELEVACIÓN	COORDENADAS NORTE	ESTE
2120074	ACTIVA	CONV	PG	ZIPAQUIRÁ	R. NEGRO	ZIPAQUIRÁ	2625	1047025	1009078
2120188	ACTIVA	CONV	PG	VILLA PAULA	R. CHICÚ	TABIO	2750	1035289	996981
2120026	ACTIVA	CONV	PG	VENTA LARGA	R. FRIO	ZIPAQUIRÁ	3038	1052361	1002997
2120565	ACTIVA	CONV	CP	TABIO	R. CHICÚ	TABIO	2608	1035621	1005419
2120176	ACTIVA	CONV	PM	SANTA ISABEL	R. FRIO	TABIO	2730	1042864	1001346
2120027	ACTIVA	CONV	PG	SAUOJO	R. BOGOTÁ	CHOCONTÁ	2640	1056390	1041550
2120088	ACTIVA	CONV	PG	SALTRE EL	EMB. NEUSA	TAUSA	3155	1064193	1008546
2120659	ACTIVA	CONV	CO	REPRESA SISGA	EMB. SISGA	CHOCONTÁ	2680	1053673	1038905
2401537	ACTIVA	CONV	CO	REPRESA DEL NEUSA	R. NEUSA	TAUSA	3019	1059626	1012190
2120541	ACTIVA	AUT	AU	REPRESA DEL NEUSA	EMB. NEUSA	TAUSA	3019	1059626	1012190
2120044	ACTIVA	CONV	PG	PRADERA LA	R. SUBACHOQUE	SUBACHOQUE	2785	1045361	993879
2120691	ACTIVA	CONV	CP	PLANADAS	R. SUBACHOQUE	SUBACHOQUE	3365	1050936	996821
2312019	ACTIVA	CONV	PM	PINOS LOS	R. NEGRO	TAUSA	3477	1070146	1005284
2120134	ACTIVA	CONV	PG	PARQUE SOPÓ	R. TEUSACÁ	SOPÓ	2576	1037335	1010971
2306308	ACTIVA	CONV	PM	NEGRETE	R. NEGRO	PACHO	2318	1055059	991884
2120195	ACTIVA	CONV	PG	MONTECILLOS	R. AVES	GUATAVITA	2793	1034846	1028484
2120133	ACTIVA	CONV	PG	OMAL EL	EMB. SISGA	SESQUILÉ	2853	1044158	1038923
2120170	ACTIVA	CONV	PG	LLANO EL	R. CHÉCUIA	SUESCA	2824	1063427	1028056
2120169	ACTIVA	CONV	PG	LADERA GRANDE	R. CHÉCUIA	TAUSA	2583	1063445	1025414
2120548	ACTIVA	CONV	CP	IBERIA LA	EMB. SISGA	CHOCONTÁ	2724	1048442	1039555
2120167	ACTIVA	CONV	PG	HOYO ARRIBA EL	R. CHÉCUIA	SUESCA	2899	1060266	1028239
2401090	ACTIVA	CONV	PM	HATILLO EL	LAG. SUESCA	SUESCA	2923	1062151	1032113
2120214	ACTIVA	CONV	PM	PARAMO DE GUERRERO	R. FRIO	ZIPAQUIRÁ	3250	1057070	1003992
2120562	ACTIVA	CONV	CP	GUATAVITA	EMB. TOMINÉ	GUATAVITA	2659	1034230	1023933
2120193	ACTIVA	CONV	PM	GUANQUICA	EMB. NEUSA	TAUSA	3000	1065427	1017187
2306507	ACTIVA	CONV	CP	INST. AGRÍC. ESC. VOCACIONAL	R. NEGRO	PACHO	1932	1061887	994683
2120138	ACTIVA	CONV	PG	ENCANTO EL	R. SUTA	TAUSA	3173	1063984	1020991
2120096	ACTIVA	CONV	PM	CONSUELO EL	EMB. TOMINÉ	SESQUILÉ	2934	1043329	1033265
2120540	ACTIVA	CONV	CP	CHÉCUIA	R. CHÉCUIA	NEMOCÓN	2610	1057279	1024347
2120213	ACTIVA	CONV	PM	GEDRAL EL	R. NEUSA	COGUA	2562	1050367	1009589
2120187	ACTIVA	CONV	PG	BOMBAS SESQUILÉ	EMB. TOMINÉ	SESQUILÉ	2600	1050803	1030082
2120095	ACTIVA	CONV	PM	BARRANCAS	R. CHÉCUIA	SUESCA	2903	1062896	1029609
2120159	ACTIVA	CONV	PG	ALCO	R. BOGOTÁ	CAIICÁ	2593	1040782	1008112
2120141	ACTIVA	CONV	PM	ACANDY	R. CHÉCUIA	NEMOCÓN	2594	1051362	1020074
21201060	ACTIVA	CONV	PG	PANTANO REDONDO	R. FRIO	ZIPAQUIRÁ	3160	1048339	1004898
21205910			ME	LA COSECHA	R. FRIO	ZIPAQUIRÁ	2600	1042811	1008595
21205850			ME	COLOMBIANO EL		SESQUILÉ	2567	1048030	1027456

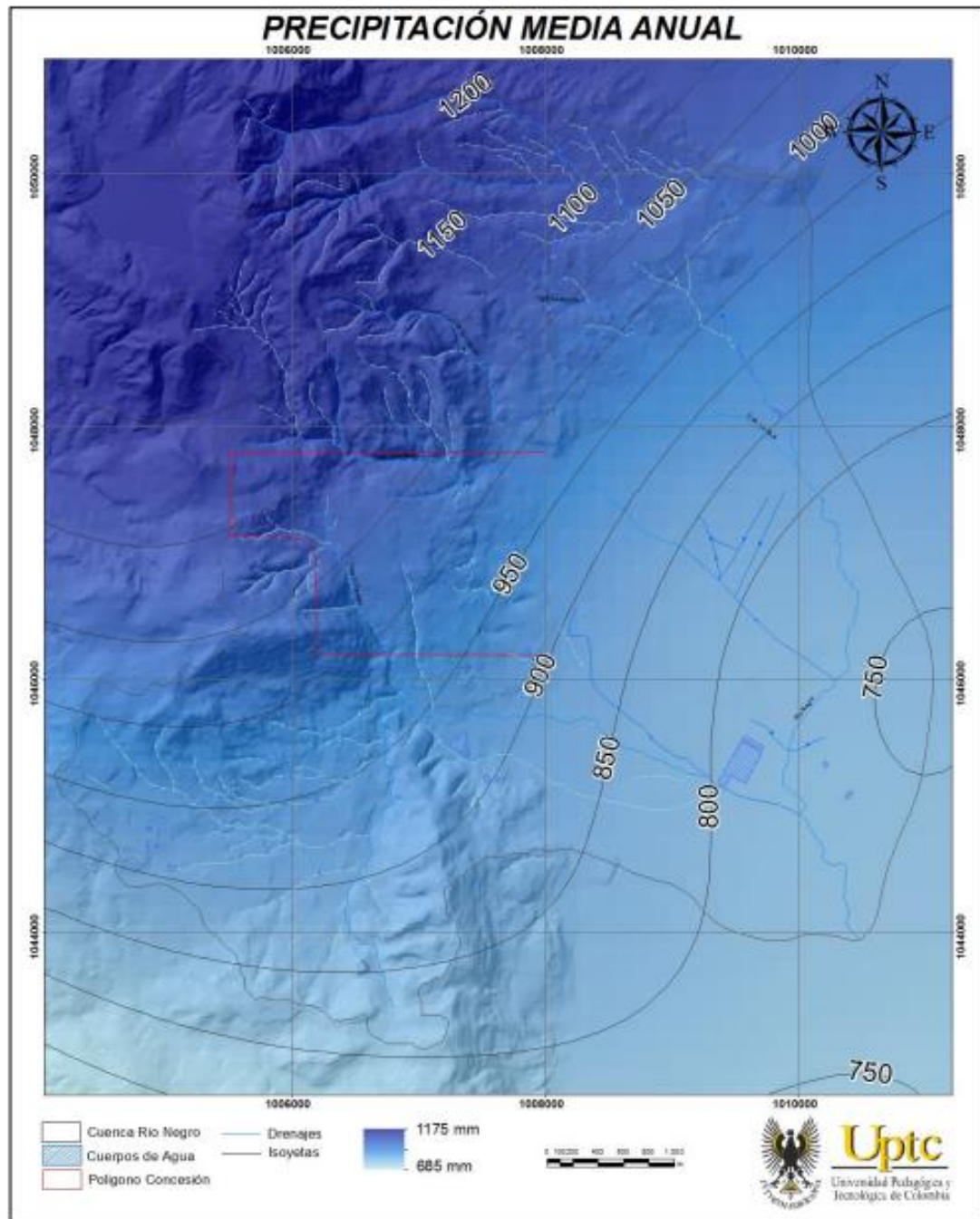
**ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE
ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03**

Anexo 05 - Método de las Isoyetas.

PMA Método de las Isoyetas						
Número	Intervalo (mm)		Isoyeta Promedio(mm)	Área (Km ²)	Ponderador de área	Precipitación Ponderada (mm)
1	907.92	950	928.96	0.4050000	0.115404	107.206018
2	950	1000	975	0.9837	0.280304	273.296717
3	1000	1050	1025	1.099	0.313159	320.987918
4	1050	1100	1075	0.7137	0.203368	218.620704
5	1100	1128.9	1114.45	0.308	0.087764	97.8089132
	Σ			3.509400	1	1017.92027

PMM Método de las Isoyetas						
Número	Intervalo (mm)		Isoyeta Promedio(mm)	Área (Km ²)	Ponderador de área	Precipitación Ponderada (mm)
1	73.6	75	74.3	0.070992	0.02106275	1.56496235
2	75	80	77.5	0.940208	0.278952084	21.61878653
3	80	85	82.5	1.323085	0.392548583	32.38525812
4	85	90	87.5	0.773450	0.229476339	20.07917965
5	90	93.5	91.75	0.262765	0.077960243	7.152852322
	Σ			3.370500	1	82.80103897

Anexo 06 - Precipitación Anual.



ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03

Anexo 07 - Estaciones Temperatura.

CÓDIGO	CATEGORIA	ESTACIÓN	CUENCA	CORRIENTE	ELEVACIÓN m.s.n.m.	MUNICIPIO	COORDENADAS	
							NORTE	ESTE
2120631	AU	TISQUESUSA	R. SUBACHOQUE	R. SUBACHOQUE	2570	FACATATIVA	1021564.58	976702.76
2120565	CP	TABIO	R. CHICU	R. CHICU	2608	TABIO	1035620.80	1005419.49
2401521	CO	SUTATAUSA	R. SUTA	R. SUTA	2700	SUTATAUSA	1072193.86	1024641.13
2120539	CO	REPRESA SISGA	EMB. SISGA	EMB. SISGA	2675	CHOCOYÁ	1054314.00	1038120.50
2120541	AU	REPRESA DEL NEUSA	EMB. NEUSA	R. NEUSA	3019	TAUSA	1059626.14	1012190.10
2120516	CP	RAMADA LA	R. BOGOTÁ	R. BOGOTÁ	2538	FUNZA	1011511.44	989318.16
2120557	CP	PRIMAVERA LA	R. SUBACHOQUE	R. SUBACHOQUE	2609	SUBACHOQUE	1028621.60	985472.12
2401519	CP	NOVILLEROS	R. UBATE	R. UBATE	2567	UBATE	1081486.94	1032753.59
2120548	CP	IBERIA LA	EMB. SISGA	EMB. SISGA	2659	CHOCOYÁ	1049442.29	1039654.91
2120562	CP	GUATAVITA	EMB. TOMINÉ	EMB. TOMINÉ	2780	GUATAVITA	1034229.83	1023933.34
2120653	CP	GUAMAL	O. ANGOSTURAS	O. ANGOSTURAS	1932	SUBACHOQUE	1047118.67	992027.76
2306507	CP	INST. AGRIC. ESC. VOCACIONAL	R. NEGRO	R. PATASIA	2610	PACHO	1061887.26	994683.18
2120540	CP	CHECUEA	R. NEGRO	R. CHECUEA	2641	NEMOCÓN	1057279.30	1024347.18
2401515	CP	CARRIZAL	LAG. SUESCA	LAG. SUESCA	2720	SUESCA	1066907.51	1034746.74
2120661	CP	BOJUEMONTE	R. BOGOTÁ	R. BOGOTÁ	2573	SOACHA	1000735.76	975991.66
2120633	CO	BARRANCAS	R. BOGOTÁ	R. CHECUEA	2572	TAUSA	1062513.97	1025361.05
2120559	CP	APTO GUAIMARAL - USTA	R. BOGOTÁ	R. BOGOTÁ	2600	BOGOTÁ	1021226.56	1003044.65
2120570	ME	HDA STA ANA	R. BOGOTÁ	R. BOGOTÁ	2572	NEMOCÓN	1053872.34	1021378.52
21205910	ME	LA COBECUA	R. FRIO	R. FRIO	2600	ZIPAQUIRÁ	1042810.64	1008595.20
21205850	ME	COLONBIANO EL	R. FRIO	BOGOTÁ	2567	SFQUILE	1048030.00	1027456.00

Estaciones Empleadas para el análisis de la Temperatura

ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03

Anexo 08 - Valores de N, números de horas de sol.

N	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1
5	15.0	15.1	15.1	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.1	15.1	15.0	15.0
10	14.9	15.0	15.1	15.2	15.3	15.4	15.3	15.3	15.1	15.0	14.9	14.8
15	14.8	14.9	15.1	15.2	15.4	15.2	15.4	15.2	15.2	15.0	14.9	14.8
20	14.7	14.9	15.1	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.0	14.9	14.7
25	14.6	14.8	15.1	15.2	15.4	15.2	15.4	15.2	15.2	15.0	14.9	14.8
30	14.5	14.7	15.0	15.1	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.0	14.9	14.7
35	14.4	14.6	14.9	15.0	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.0	14.9	14.7
40	14.3	14.5	14.8	14.9	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0	14.9	14.8	14.6
45	14.2	14.4	14.7	14.8	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.8	14.7	14.5
50	14.1	14.3	14.6	14.7	14.8	14.8	14.8	14.8	14.8	14.7	14.6	14.4
55	14.0	14.2	14.5	14.6	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.6	14.5	14.3
60	13.9	14.1	14.4	14.5	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.5	14.4	14.2
65	13.8	14.0	14.3	14.4	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.4	14.3	14.1
70	13.7	13.9	14.2	14.3	14.4	14.4	14.4	14.4	14.4	14.3	14.2	14.0
75	13.6	13.8	14.1	14.2	14.3	14.3	14.3	14.3	14.3	14.2	14.1	13.9
80	13.5	13.7	14.0	14.1	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.1	14.0	13.8
85	13.4	13.6	13.9	14.0	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	14.0	13.9	13.7
90	13.3	13.5	13.8	13.9	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	13.9	13.8	13.6
95	13.2	13.4	13.7	13.8	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.8	13.7	13.5
100	13.1	13.3	13.6	13.7	13.8	13.8	13.8	13.8	13.8	13.7	13.6	13.4
105	13.0	13.2	13.5	13.6	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	13.6	13.5	13.3
110	12.9	13.1	13.4	13.5	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6	13.5	13.4	13.2
115	12.8	13.0	13.3	13.4	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5	13.4	13.3	13.1
120	12.7	12.9	13.2	13.3	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.3	13.2	13.0
125	12.6	12.8	13.1	13.2	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3	13.2	13.1	12.9
130	12.5	12.7	13.0	13.1	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.1	13.0	12.8
135	12.4	12.6	12.9	13.0	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1	13.0	12.9	12.7
140	12.3	12.5	12.8	12.9	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	12.9	12.8	12.6
145	12.2	12.4	12.7	12.8	12.9	12.9	12.9	12.9	12.9	12.8	12.7	12.5
150	12.1	12.3	12.6	12.7	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.7	12.6	12.4
155	12.0	12.2	12.5	12.6	12.7	12.7	12.7	12.7	12.7	12.6	12.5	12.3
160	11.9	12.1	12.4	12.5	12.6	12.6	12.6	12.6	12.6	12.5	12.4	12.2
165	11.8	12.0	12.3	12.4	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.4	12.3	12.1
170	11.7	11.9	12.2	12.3	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.3	12.2	12.0
175	11.6	11.8	12.1	12.2	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.2	12.1	11.9
180	11.5	11.7	12.0	12.1	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2	12.1	12.0	11.8
185	11.4	11.6	11.9	12.0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.0	11.9	11.7
190	11.3	11.5	11.8	11.9	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	11.9	11.8	11.6
195	11.2	11.4	11.7	11.8	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.8	11.7	11.5
200	11.1	11.3	11.6	11.7	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	11.7	11.6	11.4
205	11.0	11.2	11.5	11.6	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.6	11.5	11.3
210	10.9	11.1	11.4	11.5	11.6	11.6	11.6	11.6	11.6	11.5	11.4	11.2
215	10.8	11.0	11.3	11.4	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	11.4	11.3	11.1
220	10.7	10.9	11.2	11.3	11.4	11.4	11.4	11.4	11.4	11.3	11.2	11.0
225	10.6	10.8	11.1	11.2	11.3	11.3	11.3	11.3	11.3	11.2	11.1	10.9
230	10.5	10.7	11.0	11.1	11.2	11.2	11.2	11.2	11.2	11.1	11.0	10.8
235	10.4	10.6	10.9	11.0	11.1	11.1	11.1	11.1	11.1	11.0	10.9	10.7
240	10.3	10.5	10.8	10.9	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	10.9	10.8	10.6
245	10.2	10.4	10.7	10.8	10.9	10.9	10.9	10.9	10.9	10.8	10.7	10.5
250	10.1	10.3	10.6	10.7	10.8	10.8	10.8	10.8	10.8	10.7	10.6	10.4
255	10.0	10.2	10.5	10.6	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	10.6	10.5	10.3
260	9.9	10.1	10.4	10.5	10.6	10.6	10.6	10.6	10.6	10.5	10.4	10.2
265	9.8	10.0	10.3	10.4	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.4	10.3	10.1
270	9.7	9.9	10.2	10.3	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.3	10.2	10.0
275	9.6	9.8	10.1	10.2	10.3	10.3	10.3	10.3	10.3	10.2	10.1	9.9
280	9.5	9.7	10.0	10.1	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2	10.1	10.0	9.8
285	9.4	9.6	9.9	10.0	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.0	9.9	9.7
290	9.3	9.5	9.8	9.9	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	9.9	9.8	9.6
295	9.2	9.4	9.7	9.8	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.8	9.7	9.5
300	9.1	9.3	9.6	9.7	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8	9.7	9.6	9.4
305	9.0	9.2	9.5	9.6	9.7	9.7	9.7	9.7	9.7	9.6	9.5	9.3
310	8.9	9.1	9.4	9.5	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.5	9.4	9.2
315	8.8	9.0	9.3	9.4	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5	9.4	9.3	9.1
320	8.7	8.9	9.2	9.3	9.4	9.4	9.4	9.4	9.4	9.3	9.2	9.0
325	8.6	8.8	9.1	9.2	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	9.2	9.1	8.9
330	8.5	8.7	9.0	9.1	9.2	9.2	9.2	9.2	9.2	9.1	9.0	8.8
335	8.4	8.6	8.9	9.0	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.0	8.9	8.7
340	8.3	8.5	8.8	8.9	9.0	9.0	9.0	9.0	9.0	8.9	8.8	8.6
345	8.2	8.4	8.7	8.8	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9	8.8	8.7	8.5
350	8.1	8.3	8.6	8.7	8.8	8.8	8.8	8.8	8.8	8.7	8.6	8.4
355	8.0	8.2	8.5	8.6	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.6	8.5	8.3
360	7.9	8.1	8.4	8.5	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.5	8.4	8.2
365	7.8	8.0	8.3	8.4	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.4	8.3	8.1
370	7.7	7.9	8.2	8.3	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.3	8.2	8.0
375	7.6	7.8	8.1	8.2	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.2	8.1	7.9
380	7.5	7.7	8.0	8.1	8.2	8.2	8.2	8.2	8.2	8.1	8.0	7.8
385	7.4	7.6	7.9	8.0	8.1	8.1	8.1	8.1	8.1	8.0	7.9	7.7
390	7.3	7.5	7.8	7.9	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	7.9	7.8	7.6
395	7.2	7.4	7.7	7.8	7.9	7.9	7.9	7.9	7.9	7.8	7.7	7.5
400	7.1	7.3	7.6	7.7	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.7	7.6	7.4
405	7.0	7.2	7.5	7.6	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.6	7.5	7.3
410	6.9	7.1	7.4	7.5	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.5	7.4	7.2
415	6.8	7.0	7.3	7.4	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.4	7.3	7.1
420	6.7	6.9	7.2	7.3	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.3	7.2	7.0
425	6.6	6.8	7.1	7.2	7.3	7.3	7.3	7.3	7.3	7.2	7.1	6.9
430	6.5	6.7	7.0	7.1	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.1	7.0	6.8
435	6.4	6.6	6.9	7.0	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1	7.0	6.9	6.7
440	6.3	6.5	6.8	6.9	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	6.9	6.8	6.6
445	6.2	6.4	6.7	6.8	6.9	6.9	6.9	6.9	6.9	6.8	6.7	6.5
450	6.1	6.3	6.6	6.7	6.8	6.8	6.8	6.8	6.8	6.7	6.6	6.4
455	6.0	6.2	6.5	6.6	6.7	6.7	6.7	6.7	6.7	6.6	6.5	6.3
460	5.9	6.1	6.4	6.5	6.6	6.6	6.6	6.6	6.6	6.5	6.4	6.2
465	5.8	6.0	6.3	6.4	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.4	6.3	6.1
470	5.7	5.9	6.2	6.3	6.4	6.4	6.4	6.4	6.4	6.3	6.2	6.0
475	5.6	5.8	6.1	6.2	6.3	6.3	6.3	6.3	6.3	6.2	6.1	5.9
480	5.5	5.7	6.0	6.1	6.2	6.2	6.2	6.2	6.2	6.1	6.0	5.8
485	5.4	5.6	5.9	6.0	6.1	6.1	6.1	6.1	6.1	6.0	5.9	5.7
490	5.3	5.5	5.8	5.9	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	5.9	5.8	5.6
495	5.2	5.4	5.7	5.8	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.8	5.7	5.5
500	5.1	5.3	5.6	5.7	5.8	5.8	5.8	5.8	5.8	5.7	5.6	5.4
505	5.0	5.2	5.5	5.6	5.7	5.7	5.7	5.7	5.7	5.6	5.5	5.3
510	4.9	5.1	5.4	5.5	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.5	5.4	5.2
515	4.8	5.0	5.3	5.4	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5	5.4	5.3	5.1
520	4.7	4.9	5.2	5.3	5.4	5.4	5.4	5.4	5.4	5.3	5.2	

ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03

Anexo 09 - Radiación Extraterrestre-Ecuación Budyko.

- Radiación extraterrestre en Mj/m² día.

Latitud N	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DECIEMBRE
0	36.2	37.5	37.9	36.8	34.8	33.4	33.9	35.7	37.2	37.4	36.3	35.6
2	35.4	37	37.8	37.1	35.4	34.2	34.6	36.1	37.3	37	35.6	34.8
4	34.6	36.4	37.6	37.4	36	35	35.3	36.5	37.3	36	34.9	33.9
6	33.7	35.8	37.4	37.6	36.6	35.7	35.9	36.9	37.3	36.1	34.1	32.9
8	32.8	35.2	37.2	37.8	37.1	36.3	36.5	37.2	37.2	35.6	33.3	32
10	31.9	34.5	36.9	37.9	37.6	37	37.1	37.5	37.1	35.1	32.4	31

Fuente: tomada de <http://www.fao.org/docrep/X0490E/s0490e0.htm#anex>

- Ecuación de Budyko

$$ETR = \sqrt{ETP * P * \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right) \left[1 - \cosh\left(\frac{ETP}{P}\right) + \sinh\left(\frac{ETP}{P}\right)\right]}$$

MESES	ETP	P	P/ETP	ETP/P	cosh	sinh	tanh	ETR
ENERO	70.076	35.850	0.512	1.955	1.134	3.602	0.534	31.876
FEBRERO	63.722	58.190	0.913	1.095	1.447	1.662	1.327	42.228
MARZO	68.520	73.380	1.071	0.934	1.630	1.469	1.288	49.094
ABRIL	64.048	120.459	1.881	0.532	3.355	1.145	3.203	55.110
MAYO	65.498	123.590	1.887	0.530	3.375	1.144	3.224	56.396
JUNIO	64.818	93.200	1.438	0.695	2.225	1.252	1.987	52.004
JULIO	64.269	80.740	1.256	0.796	1.899	1.334	1.614	49.204
AGOSTO	65.075	73.840	1.135	0.881	1.736	1.414	1.394	47.825
SEPTIEMBRE	62.402	73.769	1.182	0.846	1.784	1.380	1.477	46.649
OCTUBRE	61.980	130.370	2.103	0.475	4.158	1.115	4.036	54.476
NOVIEMBRE	59.704	102.360	1.714	0.583	2.867	1.175	2.687	50.310
DECIEMBRE	65.142	52.000	0.798	1.253	1.336	1.893	0.886	40.054
Σ	775.254	1017.748						575.226

ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03

Anexo 10 – Inventario puntos de agua Zipaquirá.

INVENTARIO DE PUNNTOS DE AGUA								
ID	ESTE	NORTE	COTA	TIPO	UBICACIÓN	FORMACIÓN	OBSERVACION	FUENTE
1	1006055	1047541	2940,93	Corriente de Agua	Superficie	Plaeners	Quebrada	Autores
2	1006275	1047376	2868,95	Corriente de Agua	Superficie	Plaeners	Quebrada Gavilán	Autores
3	1006810	1045032	2740	Nacimiento	Superficie	Plaeners	Encerrado (tanque de cemento)	Autores
4	1006850	1045053	2750	Nacimiento	Superficie	Plaeners	Pozo artesanal	Autores
5	1006914	1044951	2790,43	Nacimiento	Superficie	Plaeners	Construccion de cemento (tanque)	Autores
6	1006808	1048036	2846,44	Nacimiento	Superficie	Chipaque	Quebrada	Autores
7	1007054	1047768	2750	Corriente de Agua	Superficie	Chipaque	Quebrada El Águila	Autores
8	1006982	1048055	2830,79	Nacimiento	Superficie	Plaeners	Cubierto por Tablas	Autores
9	1006976	1048083	2831,8	Nacimiento	Superficie	Plaeners	Presenta óxidos de hierro	Autores
10	1007696	1048036	2692,07	Nacimiento	Superficie	Guaduas	Aproximado, sobre una colina	Autores
11	1006742	1045723	2680	Corriente de Agua	Superficie	Arenisca dura	Quebrada Sector San Jorge	Autores
12	1007276,643	1047686,237	2721,6	Nacimiento	Superficie	Plaeners	KM 1 VIA PACHO	CAR
13	1007275,643	1047676,237	2720	Nacimiento	Superficie	Chipaque	KM 2 VIA PACHO	CAR
14	1007276,644	1047606,236	2727,3	Nacimiento	Superficie	Chipaque	KM 2 VIA PACHO	CAR
15	1007276,643	1047688,237	2721,6	Nacimiento	Superficie	Plaeners	KM 1 VIA PACHO	CAR
16	1007271,643	1047684,237	2720	Nacimiento	Superficie	Chipaque	KM 1 VIA PACHO	CAR
17	1007258,643	1047702,236	2723	Nacimiento	Superficie	Plaeners	KM 1 VIA PACHO	CAR
18	1007307,644	1047646,237	2715	Nacimiento	Superficie	Chipaque	KM 2 VIA PACHO	CAR
19	1007261,643	1047691,236	2720	Nacimiento	Superficie	Plaeners	KM 2 VIA PACHO	CAR
20	1007215,642	1047742,236	2730	Nacimiento	Superficie	Plaeners	KM 2 VIA PACHO	CAR
21	1007219,642	1047738,236	2730	Nacimiento	Superficie	Plaeners	KM 2 VIA PACHO	CAR
22	1007204,642	1047740,236	2730	Nacimiento	Superficie	Plaeners	KM 2 VIA PACHO	CAR
23	1007234,643	1047709,236	2727	Nacimiento	Superficie	Plaeners	KM 1 VIA PACHO	CAR
24	1008317,644	1047812,247	2644,4	Nacimiento	Superficie	Cuaternario	CRA 6 No 8-49	CAR
25	1007872,643	1047826,243	2665,6	Nacimiento	Superficie	Guaduas	CLL 9 No 2-67	CAR
26	1007872,643	1047820,243	2664	Nacimiento	Superficie	Cuaternario	CLL 9 No 26-9	CAR
27	1007874,643	1047813,243	2663,4	Nacimiento	Superficie	Cuaternario	CLL 9 No 2-69	CAR
28	1007871,643	1047818,243	2664	Nacimiento	Superficie	Cuaternario	CLL 9 No 2-69	CAR
29	1007848,643	1047837,243	2666,4	Nacimiento	Superficie	Guaduas	CLL 9 No 2-27	CAR
30	1007754,642	1047910,242	2672	Nacimiento	Superficie	Guaduas	CRA 2 No 8-00	CAR
31	1007748,642	1047909,242	2672,3	Nacimiento	Superficie	Guaduas	CRA 2 No 8-00	CAR
32	1007101,41	1046786,2	2710	Punto de infiltración	Mina (Potosí)	Chipaque (roca salina)	Mar del Sur	Autores
33	1006999,83	1047225,56	2710	Punto de infiltración	Mina (Potosí)	Chipaque (roca salina)	Mar del Norte	Autores
34	1007165,73	1047251,32	2710	Punto de infiltración	Mina (Guasá)	Chipaque (roca salina)	Panamá	Autores
35	1007336,66	1046933,52	2730	Punto de infiltración	Mina (Potosí)	Chipaque (roca salina)	Sagrado corazón	Autores
36	1006848,65	1046611,73	2683	Punto de infiltración	Mina (Fabrica alta SG)	Chipaque (roca salina)	Sobregula exterior	Autores
37	1007050,16	1046967,41	2670	Punto de infiltración	Mina (Fabrica alta)	Chipaque (roca salina)	C15 - T2	Autores
38	1006611,65	1046992,56	2670	Punto de infiltración	Mina (Fabrica alta)	Chipaque (roca salina)	C37 - T2	Autores
39	1007117,2	1046629,69	2670	Punto de infiltración	Mina (Fabrica alta)	Chipaque (roca salina)	C 340	Autores
40	1007090,83	1046959,31	2670	Punto de infiltración	Mina (Fabrica alta)	Chipaque (roca salina)	C13 - T2	Autores
41	1006865,82	1046717,84	2670	Punto de infiltración y captación	Mina (Fabrica alta)	Chipaque (roca salina)	Reservorio 23	Autores
42	1006810,6	1047003,86	2670	Punto de infiltración y captación	Mina (Fabrica alta)	Chipaque (roca salina)	Reservorio 27	Autores
43	1007034,67	1046707,27	2670	Punto de infiltración	Mina (Fabrica alta)	Chipaque (roca salina)	C15 - T260	Autores
44	1007192,77	1046859,5	2683	Punto de infiltración	Mina (Fabrica alta SG)	Chipaque (roca salina)	Sg central con 140	Autores
45	1007164,69	1046891,65	2683	Punto de infiltración	Mina (Fabrica alta SG)	Chipaque (roca salina)	Sg Transversal	Autores

ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03

Anexo 11 - Pruebas-de-bombeo

ENSAYO BOMBEO											
Localización	SAGRADO CORAZÓN		Mina	Zipaquira	Fecha	30 DE JULIO de 2015		Encargado	Ricardo Fabio Araya		
ABATIMIENTO					RECUPERACIÓN						
Altura inicial (cm)	38				Hora inicial	9:19		Hora final	15:39		
Hora de inicio de Bombeo	08:39				Altura inicial (cm)	5,6		Altura final (cm)	31,9		
Q. de evacuación (m ³ /h)	9				Tiempo Total	Tiempo (min)	T. Parciales (min)	Altura (cm)	Ascenso (cm)	dr	(H+1)/V
Hora finalización de Bombeo	9:19				0 min	0	0	5,6	0	0,324	∞
Altura final (cm)	5,6				1 min	1	1	5,5	-0,1	0,325	41
Información de la Bomba	Bomba autocebante, 3Hp, 220 V, salida a 2 Pulg.				1,5 min	1,5	0,5	5,6	0	0,324	27,86666667
					2 min	2	0,5	6	0,4	0,32	21
Tiempo Bombeo	Tiempo (min)	T. Parciales (min)	Altura (cm)	Descenso (cm)	3 min	3	1	7,4	1,8	0,306	14,33333333
0 min	0	0	38	0	4 min	4	1	7,6	2	0,304	11
0,5 min	0,5	0,5	37,5	0,5	5 min	5	1	8,3	2,7	0,297	9
1 min	1	0,5	36,8	1,2	5,5 min	5,5	0,5	8,5	2,9	0,295	8,272727273
1,5 min	1,5	0,5	36,2	1,8	6 min	6	0,5	8,8	3,2	0,292	7,866666667
2 min	2	0,5	35,6	2,4	6,5 min	6,5	0,5	9,3	3,7	0,287	7,358461538
2,5 min	2,5	0,5	35,1	2,9	7 min	7	0,5	9,7	4,1	0,283	6,754285714
3 min	3	0,5	34,6	3,4	7,5 min	7,5	0,5	9,9	4,3	0,281	6,333333333
3,5 min	3,5	0,5	33,9	4,1	8 min	8	0,5	10,1	4,5	0,279	6
4 min	4	0,5	33,4	4,6	8,5 min	8,5	0,5	10,3	4,7	0,277	5,705882353
4,5 min	4,5	0,5	32,8	5,2	9 min	9	0,5	10,5	4,9	0,275	5,444444444
5 min	5	0,5	32,2	5,8	9,5 min	9,5	0,5	10,6	5	0,274	5,20526316
5,5 min	5,5	0,5	31,7	6,3	10 min	10	0,5	10,9	5,3	0,271	5
6 min	6	0,5	31,2	6,8	10 min	10	0,5	10,9	5,3	0,271	5
6 min	6	0,5	31,2	6,8	11 min	11	1	11,4	6,8	0,256	4,076023077
7 min	7	1	30,2	7,8	11 min	11	1	11,4	6,8	0,256	4,076023077
7 min	7	1	30,2	7,8	12 min	12	2	14,7	9,1	0,233	3,5
8 min	8	1	29,25	8,75	12 min	12	2	14,7	9,1	0,233	3,5
8 min	8	1	29,25	8,75	13 min	13	3	15	9,4	0,23	3,305263158
9 min	9	1	28,2	9,8	13 min	13	3	15,7	10,1	0,223	2,818181818
9 min	9	1	28,2	9,8	14 min	14	4	16,3	10,8	0,217	2,5
10 min	10	1	27,3	10,7	14 min	14	4	16,3	10,8	0,217	2,5
10 min	10	1	27,3	10,7	15 min	15	5	16,6	11	0,214	2,6
11 min	11	1	26,5	11,5	15 min	15	5	16,6	11	0,214	2,6
11 min	11	1	26,5	11,5	16 min	16	6	18,2	12,6	0,198	2,333333333
12 min	12	1	25,6	12,4	16 min	16	6	18,2	12,6	0,198	2,333333333
12 min	12	1	25,6	12,4	17 min	17	7	19,5	13,9	0,185	2,142857143
13 min	13	1	24,7	13,3	17 min	17	7	19,5	13,9	0,185	2,142857143
13 min	13	1	24,7	13,3	18 min	18	8	20,3	14,7	0,177	2
14 min	14	1	23,9	14,1	18 min	18	8	20,3	14,7	0,177	2
14 min	14	1	23,9	14,1	19 min	19	9	21,7	16,1	0,163	1,8
15 min	15	1	23,1	14,9	19 min	19	9	21,7	16,1	0,163	1,8
15 min	15	1	23,1	14,9	20 min	20	10	22,3	16,7	0,157	1,666666667
16 min	16	1	20,7	17,3	20 min	20	10	22,3	16,7	0,157	1,666666667
16 min	16	1	20,7	17,3	21 15min	21	15	23,45	17,85	0,1455	1,535353535
21 min	21	3	18,4	19,6	21 30min	21	30	24,1	18,5	0,139	1,444444444
24 min	24	3	16,2	21,8	21 45min	21	45	25	19,4	0,13	1,380952381
27 min	27	3	14	24	2 h	120	15	25,6	20	0,124	1,333333333
30 min	30	3	12,1	25,9	2h 20min	140	20	26,55	20,95	0,1145	1,285714286
35 min	35	5	8,9	29,1	2h 30min	170	30	27,7	22,1	0,103	1,235294118
40 min	40	5	5,6	32,4	3h 20min	200	30	28,5	22,9	0,095	1,2
					4h 20min	260	60	29,9	24,3	0,081	1,153846154
Observaciones:											
					5h 20min	320	60	31	25,4	0,07	1,125
					6h 20min	380	60	31,9	26,3	0,061	1,052631579
					13,9 h	634	454	34,8	29,2	0,032	1,049616431
					27h 29min	1529	695	36,6	31	0,014	1,03160889
					35h 38min	2138	609	36,8	31,2	0,012	1,028709074

ENSAYO BOMBEO											
Localización	MAR DEL SUR		Mina	Zipaquira	Fecha	16 DE JULIO de 2015		Encargado	Ricardo Fabio Araya		
ABATIMIENTO					RECUPERACIÓN						
Altura inicial (cm)	55,5				Hora inicial	11:35		Hora final	14:20		
Hora de inicio de Bombeo	09:55				Altura inicial (cm)	51,6		Altura final (cm)	55,4		
Q. de evacuación (m ³ /h)	3,3				Tiempo Total	Tiempo (min)	T. Parciales (min)	Altura (cm)	Ascenso (cm)	dr	(H+1)/V
Hora finalización de Bombeo	11:35				0 min	0	0	51,6	0	0,039	∞
Altura final (cm)	51,6				5 min	5	3	51,9	0,3	0,036	31
Información de la Bomba	Bomba sumergible, 3Hp, 220 V, salida a 2 Pulg.				6 min	6	3	52	0,4	0,035	16
					9 min	9	3	52,1	0,5	0,034	11
Tiempo Bombeo	Tiempo (min)	T. Parciales (min)	Altura (cm)	Descenso (cm)	12 min	12	3	52,2	0,6	0,033	8,5
0 min	0	0	55,5	0	15 min	15	3	52,3	0,7	0,032	7
15 min	15	15	54,5	1	20 min	20	5	52,4	0,8	0,031	5,5
30 min	30	15	53,5	2	25 min	25	5	52,5	0,9	0,03	4,5
45 min	45	15	53	2,5	30 min	30	5	52,6	1	0,029	4
1 h	60	15	52,5	3	35 min	35	5	52,7	1,1	0,028	3,571428571
1h 15min	75	15	52,2	3,3	40 min	40	10	52,8	1,2	0,027	3
1h 30min	90	15	51,6	3,9	45 min	45	10	52,9	1,3	0,026	2,636363636
					55 min	55	20	52,9	1,3	0,026	2,636363636
Observaciones:											
					1h 15min	75	20	53	1,4	0,025	2,2
					1h 35min	95	20	53,1	1,5	0,024	1,947368421
					1h 55min	115	20	53,2	1,6	0,023	1,782608696
					2h 15min	135	20	53,3	1,7	0,022	1,666666667
					2h 45min	165	30	53,4	1,8	0,021	1,545454545

ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03





ENSAYO BOMBEO											
Localización	C15-T2	Mina	Zipaquirá	Fecha	24 DE JULIO DE 2015			Encargado	Damián Pérez		
ABATIMIENTO				RECUPERACIÓN							
Altura inicial (cm)	8,00			Hora inicial	08:08			Hora final	12:28		
hora de inicio de Bombeo	08:29			Altura inicial (cm)	28,3			Altura final (cm)	11,2		
Q ₁ de evacuación (m ³ /h)	4,1			Tiempo Total	Tiempo (min)	T. Parciales (min)	Altura (cm)	Acceso (cm)	gr	(t+1)/t	
hora finalización de Bombeo	08:08			0 min	0	0	4	0	0,283	∞	
Altura final (cm)	28,3			0,5 min	0,5	0,5	4	0	0,283	17	
Información de la Bomba				0,75 min	0,75	0,25	4	0	0,283	11,96666667	
Bomba autocebante, 3Hp, 220 V, salida a 2 Pulg				1 min	1	0,25	4,1	0,1	0,282	9	
Tiempo Bombeo	Tiempo (min)	T. Parciales (min)	Altura (cm)	Decenso (cm)	2 min	2	1	4,3	0,3	0,28	5
0 min	0	0	32,5	0	3 min	3	1	4,5	0,5	0,278	3,96666667
0,5 min	0,5	0,5	31,2	1,3	4 min	4	1	4,65	0,65	0,2765	3
0,75 min	0,75	0,25	30,5	2	5 min	5	1	4,8	0,8	0,275	2,6
1 min	1	0,25	29,2	3,3	6 min	6	1	4,9	0,9	0,274	2,33333333
2 min	2	0	28	6,5	7 min	7	11	5,1	1,1	0,272	1,470588235
3 min	3	0	27,5	9,8	8 min	8	2	5,2	1,2	0,271	1,421052632
4 min	4	0	27	13,5	9 min	9	2	5,45	1,45	0,2685	1,380952381
5 min	5	0	26,5	17	10 min	10	3	5,6	1,6	0,267	1,333333333
6 min	6	0	25,7	20,6	11 min	11	5	5,8	1,8	0,265	1,275862069
8 min	8	2	24	28,5	12 min	12	6	6	2	0,263	1,22873429
Observaciones:				13 min	13	4	6,2	2,2	0,261	1,205128205	
				14 min	14	5	6,5	2,5	0,258	1,19047619	
				15 min	15	17	6,7	2,7	0,256	1,175933322	
				16 min	16	3	7	3	0,253	1,159032258	
				17 min	17	27	7,5	3,5	0,248	1,0908764	
				18 min	18	20	8	4	0,243	1,073394495	
				19 min	19	20	8,4	4,4	0,239	1,052015504	
				20 min	20	30	9,3	5,3	0,23	1,050334405	
				21 min	21	30	9,9	5,9	0,224	1,042328042	
				22 min	22	60	10,9	6,9	0,214	1,032128514	
				23 min	23	11	11,2	7,2	0,211	1,030789231	
				24 min	24						
				25 min	25						
				26 min	26						
				27 min	27						





ENSAYO BOMBEO											
Localización	RESERVOIRIO 23	Mina	Zipaquirá	Fecha	23 DE JULIO DE 2015			Encargado	Ricardo Fabio Araya		
ABATIMIENTO				RECUPERACIÓN							
Altura inicial (cm)	55,51			Hora inicial	08:19			Hora final	16:19		
hora de inicio de Bombeo	08:39			Altura inicial (cm)	40,4			Altura final (cm)	43,7		
Q ₁ de evacuación (m ³ /h)	4			Tiempo Total	Tiempo (min)	T. Parciales (min)	Altura (cm)	Acceso (cm)	gr	(t+1)/t	
hora finalización de Bombeo	08:19			0min	0	0	40,4	0	0,1511	∞	
Altura final (cm)	40,4			5min	5	5	40,5	0,1	0,1501	196,8	
Información de la Bomba				10min	10	35	40,55	0,15	0,1496	25,475	
Bomba electrica sumergible, 3Hp, 600 V, salida a 2 Pulg. Q = aflojo en superficie				1h 20min	80	40	40,56	0,16	0,1495	13,2375	
Tiempo Bombeo	Tiempo (min)	T. Parciales (min)	Altura (cm)	Decenso (cm)	2h	120	40	40,7	0,3	0,1481	9,158333333
0min	0	0	55,51	0	2h 20min	140	20	40,8	0,4	0,1471	7,963857143
2h 37min	1417	1417	40,4	15,11	2h 40min	160	20	40,9	0,5	0,1461	7,11875
Observaciones: Se bombeo todo el día anterior (22 de julio) y toda la noche, de detuvo el bombeo a la hora indicada el día 23 de julio. No se tomaron datos de abatimiento, solo el tiempo de bombeo y las alturas de inicio y final.				3h	180	20	40,9	0,5	0,1461	6,438888889	
				3h 20min	200	20	40,9	0,5	0,1461	5,865	
				3h 40min	220	20	41	0,6	0,1451	5,45	
				4h	240	20	41	0,6	0,1451	5,079166667	
				4h 20min	260	20	41,05	0,65	0,1446	4,765384615	
				4h 40min	280	20	41,3	0,7	0,1441	4,466428571	
				5h	300	20	41,1	0,7	0,1441	4,263333333	
				5h 20min	320	20	41,2	0,8	0,1431	4,059375	
				5h 40min	340	20	41,3	0,9	0,1421	3,879411765	
				6h	360	20	41,4	1	0,1411	3,719444444	
				6h 20min	380	20	41,4	1	0,1411	3,576315789	
				6h 40min	400	20	41,4	1	0,1411	3,4475	
				7h	420	20	41,5	1,1	0,1401	3,330952381	
				7h 20min	440	20	41,6	1,2	0,1391	3,225	
				7h 40min	460	20	41,7	1,3	0,1381	3,1282097	
				8h	480	20	41,7	1,3	0,1381	3,036833333	

ENSAYO BOMBEO											
Localización	RESERVOIRIO 27	Mina	Zipaquirá	Fecha	14 DE JULIO DE 2015			Encargado	Ricardo Fabio Araya		
ABATIMIENTO				RECUPERACIÓN							
Altura inicial (cm)	30			Fecha	Hora	Tiempo de recarga (h)	Altura (cm)	Delta (cm)	Vel. Salida (cm/h)	Observaciones	
hora de inicio de Bombeo	07:45			14 de Julio 2015	13:55		6,1			Fin turno	
Q ₁ de evacuación (m ³ /h)	31			15 de Julio 2015	08:52	18,96	7,9	1,8	0,095	Inicio turno	
hora finalización de Bombeo	13:55			15 de Julio 2015	16:02		1,2			Fin turno	
Altura final (cm)	6,1			16 de Julio 2015	08:02		2,5	1,3	0,0613	Inicio turno	
Información de la Bomba				16 de Julio 2015	09:04		1,9			Se bombeo solo 1 h	
50 HP, 440 V, 3700 rpm, 4"				18 de Julio 2015	08:45	47,88	6,1			Inicio turno	
Tiempo Bombeo	Tiempo (min)	T. Parciales (min)	Altura (cm)	Decenso (cm)	18 de Julio 2015	15:45	1,9	1,4	0,0648	Fin turno	
0 min	0	0	30	0	19 de Julio 2015	08:15	3,3			Inicio turno	
30 min	30	30	9,7	0,3							
1h	60	30	9,4	0,6							
1h 30min	90	30	9,1	0,9							
2h 30min	150	60	8,4	1,6							
3h 30min	210	60	7,9	2,1							
4h 30min	270	60	7,3	2,7							
5h 15min	370	100	6,1	3,8							
Observaciones:				El area del reservorio es bastante grande (involucra varias canchales). A este punto se bombeo agua de otros puntos de la mina. Los puntos de control estan en C39-T2 y C15-T2 (bastante lejos). No hubo variación en la altura.							




ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03

Anexo 12 – Ensayo propiedades físicas.

																	
MACROPROCESO: ADMINISTRATIVO PROCESO: GESTIÓN DE LABORATORIOS PROCEDIMIENTO: EMISIÓN DE RESULTADOS INFORME DE EMISIÓN DE RESULTADOS SERVICIOS DE EXTENSIÓN																	
Código: A-GL-E01-F03	Versión: 03	Página 1 de 1															
INSTITUTO DE RECURSOS MINEROS Y ENERGÉTICOS FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO LABORATORIO DE SUELOS Y ROCAS ENSAYO PROPIEDADES FÍSICAS - PARA ROCAS (ASTM D 2166-91)																	
Descripción	Muestra	Pw (g/cc)	M (g)	Ms (g)	Msat (g)	V (cc)	P (g/cc)	Pd (g/cc)	Psat (g/cc)	W (%)	S (%)	n (%)	e	y (KN/m3)	yd (KN/m3)	ysat (KN/m3)	
1-Z-3	1	1,212	83,900	83,600	87,100	38,000	2,208	2,208	2,292	0,000	0,000	8,421	0,084	21659,447	21659,447	22485,553	
2-Z-3	2	1,212	92,600	92,600	97,200	40,000	2,315	2,315	2,430	0,000	0,000	11,500	0,115	22710,150	22710,150	23838,300	
3-Z-3	3	1,208	124,900	124,700	129,100	55,000	2,271	2,267	2,347	0,160	4,545	8,000	0,080	22277,616	22241,945	23026,745	
	4																
Promedio								2,265	2,263	2,356	0,053	1,515	9,307	0,093	22215,739	22203,848	23116,866
Pw = Densidad del Agua M = Peso natural de la muestra Ms = Peso seco de la muestra Msat = Peso saturado de la muestra V = Volumen de la muestra P = Densidad total de la muestra Pd = Densidad seca de la muestra Psat = Densidad saturada de la muestra				W % = Porcentaje de humedad S % = Porcentaje de saturación n % = Porosidad e = Relación de vacíos y (KN/m3) = Densidad total yd (KN/m3) = Densidad seca ysat (KN/m3) = Densidad saturada				OBSERVACIONES									
 Vo. Bó. Director IRME Ing. Luis Angel Lara																	
Calle 4 sur No. 15 - 134, Tel.: 7723617/ 7705490 – 7707721 Exts: 2634 - 2635, Email: irme@uptc.edu.co																	

																	
MACROPROCESO: ADMINISTRATIVO PROCESO: GESTIÓN DE LABORATORIOS PROCEDIMIENTO: EMISIÓN DE RESULTADOS INFORME DE EMISIÓN DE RESULTADOS SERVICIOS DE EXTENSIÓN																	
Código: A-GL-E01-F03	Versión: 03	Página 1 de 1															
INSTITUTO DE RECURSOS MINEROS Y ENERGÉTICOS FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO LABORATORIO DE SUELOS Y ROCAS ENSAYO PROPIEDADES FÍSICAS - PARA ROCAS (ASTM D 2166-91)																	
Descripción	Muestra	Pw (g/cc)	M (g)	Ms (g)	Msat (g)	V (cc)	P (g/cc)	Pd (g/cc)	Psat (g/cc)	W (%)	S (%)	n (%)	e	y (KN/m3)	yd (KN/m3)	ysat (KN/m3)	
1-Z-16	1	1,208	79,500	79,400	83,900	38,000	2,092	2,089	2,208	0,126	2,222	11,842	0,118	20523,653	20497,737	21659,447	
2-Z-16	2	1,208	76,600	76,600	80,900	30,000	2,553	2,553	2,697	0,000	0,000	14,333	0,143	25048,200	25048,200	26454,300	
3-Z-16	3	1,212	77,400	77,300	81,200	37,000	2,092	2,089	2,195	0,129	2,564	10,541	0,105	20521,459	20494,946	21528,973	
	4																
Promedio								2,246	2,244	2,366	0,085	1,595	12,239	0,122	22031,071	22013,628	23214,240
Pw = Densidad del Agua M = Peso natural de la muestra Ms = Peso seco de la muestra Msat = Peso saturado de la muestra V = Volumen de la muestra P = Densidad total de la muestra Pd = Densidad seca de la muestra Psat = Densidad saturada de la muestra				W % = Porcentaje de humedad S % = Porcentaje de saturación n % = Porosidad e = Relación de vacíos y (KN/m3) = Densidad total yd (KN/m3) = Densidad seca ysat (KN/m3) = Densidad saturada				OBSERVACIONES									
 Vo. Bó. Director IRME Ing. Luis Angel Lara																	
Calle 4 sur No. 15 - 134, Tel.: 7723617/ 7705490 – 7707721 Exts: 2634 - 2635, Email: irme@uptc.edu.co																	

ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03

MACROPROCESO: ADMINISTRATIVO
PROCESO: GESTIÓN DE LABORATORIOS
PROCEDIMIENTO: EMISIÓN DE RESULTADOS
INFORME DE EMISIÓN DE RESULTADOS SERVICIOS DE EXTENSIÓN

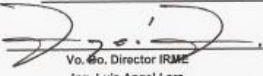
Código: A-GL-E01-F03	Versión: 03	Página 1 de 1
INSTITUTO DE RECURSOS MINEROS Y ENERGÉTICOS FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO LABORATORIO DE SUELOS Y ROCAS ENSAYO PROPIEDADES FÍSICAS - PARA ROCAS (ASTM D 2166-91)		

Descripción	Muestra	Pw (g/cc)	M (g)	Ms (g)	Msat (g)	V (cc)	P (g/cc)	Pd (g/cc)	Psat (g/cc)	W (%)	S (%)	n (%)	e	y (KN/m3)	yd (KN/m3)	ysat (KN/m3)
1-Z-10	1	1,208	98,000	97,900	103,100	40,000	2,450	2,448	2,578	0,102	1,923	13,000	0,130	24034,500	24009,975	25285,275
2-Z-10	2	1,208	80,100	80,000	86,000	40,000	2,003	2,000	2,150	0,125	1,667	16,000	0,150	19644,525	18620,000	21091,500
3-Z-10	3	1,208	69,900	69,800	73,300	40,000	1,748	1,745	1,833	0,143	2,857	8,750	0,088	17142,975	17118,450	17976,825
	4															
Promedio							2,057	2,064	2,187	0,123	2,149	12,250	0,123	20274,000	20249,475	21451,200




Pw = Densidad del Agua
 M = Peso natural de la muestra
 Ms = Peso seco de la muestra
 Msat = Peso saturado de la muestra
 V = Volumen de la muestra
 P = Densidad total de la muestra
 Pd = Densidad seca de la muestra
 Psat = Densidad saturada de la muestra

W % = Porcentaje de humedad
 S % = Porcentaje de saturación
 n % = Porosidad
 e = Relación de vacíos
 y (KN/m3) = Densidad total
 yd (KN/m3) = Densidad seca
 ysat (KN/m3) = Densidad saturada

OBSERVACIONES


 Vo. Bo. Director IRME
 Ing. Luis Angel Lara

Calle 4 sur No. 15 - 134, Tel.: 7723517/ 7705450 - 7707721 Estd: 2634 - 2635, Email: irme@uptc.edu.co

MACROPROCESO: ADMINISTRATIVO
PROCESO: GESTIÓN DE LABORATORIOS
PROCEDIMIENTO: EMISIÓN DE RESULTADOS
INFORME DE EMISIÓN DE RESULTADOS SERVICIOS DE EXTENSIÓN

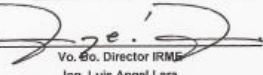
Código: A-GL-E01-F03	Versión: 03	Página 1 de 1
INSTITUTO DE RECURSOS MINEROS Y ENERGÉTICOS FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO LABORATORIO DE SUELOS Y ROCAS ENSAYO PROPIEDADES FÍSICAS - PARA ROCAS (ASTM D 2166-91)		

Descripción	Muestra	Pw (g/cc)	M (g)	Ms (g)	Msat (g)	V (cc)	P (g/cc)	Pd (g/cc)	Psat (g/cc)	W (%)	S (%)	n (%)	e	y (KN/m3)	yd (KN/m3)	ysat (KN/m3)
1-Z-19	1	1,208	98,600	98,600	103,300	50,000	1,972	1,972	2,066	0,000	0,000	9,400	0,094	19345,320	19345,320	20267,460
2-Z-19	2	1,208	49,700	49,700	53,900	20,000	2,485	2,485	2,695	0,000	0,000	21,000	0,210	24377,850	24377,850	26437,950
3-Z-19	3	1,212	79,000	78,900	83,500	30,000	2,633	2,630	2,783	0,127	2,174	15,333	0,153	25633,000	25600,300	27304,500
	4															
Promedio							2,383	2,362	2,515	0,042	0,725	15,244	0,152	23185,390	23174,490	24689,970

Pw = Densidad del Agua
 M = Peso natural de la muestra
 Ms = Peso seco de la muestra
 Msat = Peso saturado de la muestra
 V = Volumen de la muestra
 P = Densidad total de la muestra
 Pd = Densidad seca de la muestra
 Psat = Densidad saturada de la muestra




W % = Porcentaje de humedad
 S % = Porcentaje de saturación
 n % = Porosidad
 e = Relación de vacíos
 y (KN/m3) = Densidad total
 yd (KN/m3) = Densidad seca
 ysat (KN/m3) = Densidad saturada

OBSERVACIONES


 Vo. Bo. Director IRME
 Ing. Luis Angel Lara

Calle 4 sur No. 15 - 134, Tel.: 7723517/ 7705450 - 7707721 Estd: 2634 - 2635, Email: irme@uptc.edu.co

ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03

MACROPROCESO: ADMINISTRATIVO
PROCESO: GESTIÓN DE LABORATORIOS
PROCEDIMIENTO: EMISIÓN DE RESULTADOS
INFORME DE EMISIÓN DE RESULTADOS SERVICIOS DE EXTENSIÓN

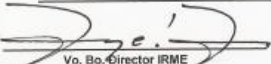
Código: A-GL-E01-F03	Versión: 03	Página 1 de 1
INSTITUTO DE RECURSOS MINEROS Y ENERGÉTICOS FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO LABORATORIO DE SUELOS Y ROCAS ENSAYO PROPIEDADES FÍSICAS - PARA ROCAS (ASTM D 2166-91)		

Descripción	Muestra	Pw (g/cc)	M (g)	Ms (g)	Msat (g)	V (cc)	P (g/cc)	Pd (g/cc)	Psat (g/cc)	W (%)	S (%)	n (%)	e	y (KN/m3)	yd (KN/m3)	ysat (KN/m3)
1-Z-13	1	1,212	82,600	82,600	86,600	33,000	2,503	2,503	2,624	0,000	0,000	12,121	0,121	24554,727	24554,727	25743,818
2-Z-13	2	1,208	70,000	69,900	74,000	34,000	2,059	2,056	2,176	0,143	2,439	12,069	0,121	20197,059	20168,206	21351,176
3-Z-13	3	1,208	126,200	126,200	130,800	60,000	2,103	2,103	2,180	0,000	0,000	7,667	0,077	20633,700	20633,700	21385,800
	4															
Promedio							2,222	2,221	2,327	0,048	0,813	10,616	0,105	21795,162	21785,544	22826,932




Pw = Densidad del Agua
 M = Peso natural de la muestra
 Ms = Peso seco de la muestra
 Msat = Peso saturado de la muestra
 V = Volumen de la muestra
 P = Densidad total de la muestra
 Pd = Densidad seca de la muestra
 Psat = Densidad saturada de la muestra

W % = Porcentaje de humedad
 S % = Porcentaje de saturación
 n % = Porosidad
 e = Relación de vacíos
 y (KN/m3) = Densidad total
 yd (KN/m3) = Densidad seca
 ysat (KN/m3) = Densidad saturada

OBSERVACIONES _____


 Vo. Bo. Director IRIME
 Ing. Luis Angel Lara

Calle 4 sur No. 15 - 134, Tel.: 7723517/ 7705450 - 7707721 Exts: 2634 - 2635, Email: irime@uptc.edu.co

MACROPROCESO: ADMINISTRATIVO
PROCESO: GESTIÓN DE LABORATORIOS
PROCEDIMIENTO: EMISIÓN DE RESULTADOS
INFORME DE EMISIÓN DE RESULTADOS SERVICIOS DE EXTENSIÓN


Código: A-GL-E01-F03	Versión: 03	Página 1 de 1
INSTITUTO DE RECURSOS MINEROS Y ENERGÉTICOS FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO LABORATORIO DE SUELOS Y ROCAS ENSAYO PROPIEDADES FÍSICAS - PARA ROCAS (ASTM D 2166-91)		

Descripción	Muestra	Pw (g/cc)	M (g)	Ms (g)	Msat (g)	V (cc)	P (g/cc)	Pd (g/cc)	Psat (g/cc)	W (%)	S (%)	n (%)	e	y (KN/m3)	yd (KN/m3)	ysat (KN/m3)
1-Z-21	1	1,212	99,800	99,700	104,000	45,000	2,218	2,216	2,311	0,100	2,328	9,556	0,096	21756,400	21734,600	22672,000
2-Z-21	2	1,212	75,500	75,400	80,600	35,000	2,157	2,154	2,303	0,133	1,923	14,857	0,149	21161,571	21133,543	22591,029
3-Z-21	3	1,208	86,600	86,600	91,500	40,000	2,165	2,165	2,288	0,000	0,000	12,250	0,123	21238,650	21238,650	22440,375
	4															
Promedio							2,180	2,176	2,300	0,078	1,416	12,221	0,122	21385,540	21368,931	22567,801

Pw = Densidad del Agua
 M = Peso natural de la muestra
 Ms = Peso seco de la muestra
 Msat = Peso saturado de la muestra
 V = Volumen de la muestra
 P = Densidad total de la muestra
 Pd = Densidad seca de la muestra
 Psat = Densidad saturada de la muestra

W % = Porcentaje de humedad
 S % = Porcentaje de saturación
 n % = Porosidad
 e = Relación de vacíos
 y (KN/m3) = Densidad total
 yd (KN/m3) = Densidad seca
 ysat (KN/m3) = Densidad saturada

OBSERVACIONES _____


 Vo. Bo. Director IRIME
 Ing. Luis Angel Lara

Calle 4 sur No. 15 - 134, Tel.: 7723517/ 7705450 - 7707721 Exts: 2634 - 2635, Email: irime@uptc.edu.co

**ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE
ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03**

Anexo 13 - Muestreo Propiedades Físicas.

LOCALIZACIÓN DE TOMA DE MUESTRAS PARA PROPIEDADES FÍSICAS		
ID	Localización	Observaciones
Z-1	C6 - T3	Se tomó a 15 mts de la entrada a la cámara 6 con tunel 3, en la pared del costado derecho, a 2 mts. De altura, medidos desde el nivel del piso
Z-3	C2 - T3 (pozo 5)	Tomada a 60 mts de la entrada, sobre la cara sur de la cámara 2, donde se encuentra localizado el pozo #5, a una altura de 2 metros desde el piso de la cámara.
Z-7	C36 - T2 (pozo 4)	Se tomó a 90 mts. de la entrada, sobre la cara este de la cámara 36, donde se encuentra localizado el pozo #4 (fue necesario hacer desabombe), a una altura de 2 metros desde el piso de la cámara.
Z-10	T260 - (C22 Y 21)	Tomada de un desabombe sobre la cara norte del tunel 260, entre las cámaras 21 y 22 a 3 mts. medidos desde el nivel del piso.
Z-12	Acceso vehicular - (C140 y C180)	Se tomó de la cara este del tunel de acceso vehicular a la catedral de sal, entre las cámaras 140 y 180 a 1 m del nivel del piso
Z-13	C21 - T2 (pozo 1)	Muestreo realizado a 20 mts de la entrada, sobre la cara occidental de la cámara 21, donde se encuentra localizado el pozo #1, a una altura de 2 metros desde el piso de la cámara.
Z-16	C26 - T2 (pozo 2)	Se tomó a 15 mts de la entrada, sobre la cara occidental de la cámara 26, donde se encuentra localizado el pozo #2, a una altura de 1 metro desde el piso de la cámara.
Z-18	T2 - (C33 y C34)	Se muestreo de un desabombe ubicado sobre la cara norte del tunel 2, entre las cámaras 33 y 34, a 1 metro de altura medido desde el nivel del piso.
Z-19	C31 - T2 (pozo 3)	Se tomó a 5 mt de la entrada, sobre la cara este de la cámara 31, donde se encuentra localizado el pozo #3 (fue necesario hacer desabombe), a una altura de 1.5 metros desde el piso de la cámara.
Z-21	T2 - C29	Fue tomada sobre la pared norte del tunel 2, justo frente a la cámara 29, a la altura de 1m.

ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE ZIPAQUIRA, CORRESPONDIENTE AL TITULO MINERO HIQO-03

Anexo 14 - Mapa Hidrogeológico.

