

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL SUBSUELO EN EL PROYECTO DE TRANSPORTE MASIVO DE LA LÍNEA 5 ENTRE EL TRAMO ESTACIÓN ZONA RENTAL - ESTACIÓN BELLO MONTE, DE LA C.A. METRO DE CARACAS

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela.

Por la Bachiller:
Minguelis E, Yulisbet del C
Para optar al título de
Ingeniero Geólogo.

Caracas, Junio de 2013

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL SUBSUELO EN EL PROYECTO DE TRANSPORTE MASIVO DE LA LÍNEA 5 ENTRE EL TRAMO ESTACIÓN ZONA RENTAL - ESTACIÓN BELLO MONTE, DE LA C.A. METRO DE CARACAS.

Tutor Académico:

Prof. Armando Díaz Quintero

Tutor Industrial:

Prof. Sergio Rodríguez

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela.

Por la Bachiller:
Minguelis E, Yulisbet del C
Para optar al título de
Ingeniero Geólogo.

Caracas, Junio de 2013

Caracas, Junio de 2013

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Geológica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller: Yulisbet Del C. Minguelis E., Titulado:

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL SUBSUELO EN EL PROYECTO DE TRANSPORTE MASIVO DE LA LÍNEA 5 ENTRE EL TRAMO ESTACIÓN ZONA RENTAL - ESTACIÓN BELLO MONTE, DE LA C.A. METRO DE CARACAS.

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al título de Ingeniero Geólogo, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. Armando Díaz Quintero
Tutor

Prof. Omar Márquez
Jurado

Prof. Mauricio Bermúdez
Jurado

A DIOS....

Jorge Luis, mi Hijo

Rafael Campos, mi Esposo

Noris y Marcos, mis Padres

Nelson (El Nego) mi Segundo Padre

Yuleisbit, Alexander, Wladimir, Nacari mis Hermanos

Keiver, Yenalkis y Yanelkis (Mi Chiqui), Sneider Mis Sobrinos que los Quiero Mucho.

Especialmente a ti Hijo que me has dado la fuerza y la alegría para seguir adelante, te Amooooooooooooo...

AGRADECIMIENTOS

A mi DIOS TODOPODEROSO por darme la vida y muchas bendiciones.

A nuestra Universidad Central de Venezuela por permitirme vencer las sombras y hacer de mí una profesional digna.

Al tutor académico Profesor Armando Díaz Quintero por creer en mí y por su colaboración para la culminación exitosa de mi trabajo especial de grado.

Al tutor industrial Prof. Sergio Rodríguez por darme todo su apoyo, ayuda y asesoramiento técnico académico durante la elaboración de mi trabajo especial de grado, al Metro De Caracas por darme la oportunidad de participar en éste proyecto, especialmente a la Inspección del Proyecto Línea 5 y a todo el personal que integra el Campamento Zona Rental – Bello Monte. Especialmente a la Ing. Yanelis Luna, gracias por su gran ayuda, apoyo y colaboración.

A mis Padres y hermanos por creer en mí en todo momento y estar siempre a mi lado.

A mi Hijo bello y hermoso Jorge Luis quien ha tenido que acarrear el tiempo invertido en mis estudios.

A mi Esposo bello Rafael Campos por su Amor, apoyo incondicional y paciencia, mi amor TE AMOOOOOOO.....

Hago también mención especial de las personas que incondicionalmente colaboraron con el desarrollo de este trabajo: Prof. Mauricio Bermúdez mil gracias por toda su ayuda y asesoramiento en la realización de mi tesis muchas bendiciones para usted y su Papito, a mis amigas del departamento de la Dirección del Ciclo Básico de la Facultad en especial a mi Madre putativa Nacari Montilla, de verdad que estoy muy agradecida por todo su apoyo..., al Prof. Jesús Hernández por toda su ayuda y comprensión en toda la carrera mil gracias, a mis amigos del cafetín Gino y Libia por toda las cosas que me brindaron y me facilitaron.

A todos mis compañeros de clases de la UCV, por el apoyo en todo el trayecto de la carrera, en los buenos y malos momentos; en especial a mi Ami Marlys Revetty, Gabriela (Gaby Gaby), Matilde, Yismari (la flaquita), Maybelle, Kelly (La Negra), y a todas aquellas personas que han sido importantes para mí durante todo este tiempo.

Minguelis E., Yulisbet del C.

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL SUBSUELO EN EL PROYECTO DE TRANSPORTE MASIVO DE LA LÍNEA 5 ENTRE EL TRAMO ESTACIÓN ZONA RENTAL - ESTACIÓN BELLO MONTE, DE LA C.A. METRO DE CARACAS.

Tutor Académico: Prof. Armando Díaz Quintero. Tutor Industrial: Prof. Sergio Rodríguez. Tesis. Ciudad, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica año 2012

Palabras Claves: Acuíferos, Hidrogeología, Aguas subterráneas-Metro de Caracas, Hidrología, Metro de Caracas

Resumen: La zona de estudio se ubica en Caracas, sector Zona Rental – Bello Monte. Esta área no cuenta con un modelo hidrogeológico que permita mejorar los procesos actuales de abatimiento. El objetivo de esta investigación es caracterizar hidrogeológicamente el acuífero presente en la Estación Zona Rental- Bello Monte del proyecto de transporte masivo de la Línea 5 del Metro de Caracas, Venezuela. El trabajo está estructurado en tres (3) etapas: la primera corresponde a la revisión y recopilación de información técnica, bibliográfica y cartográfica, la segunda consistió en adquirir datos y tomar muestras, y la última correspondió al análisis de información, interpretación e integración de los resultados obtenidos y generación de los modelos hidrogeológicos conceptual del acuífero. También se elaboraron diversos modelos para establecer el balance hídrico, este último permite conocer la recarga promedio del acuífero siendo de 104.73 mm/añual. También se determinó la recarga subterránea, la cual es la más

favorable al acuífero proveniente de las principales principales zonas montañosas, como es el Parque Waraira Repano (Cerro El Ávila). Adicionalmente, se realizaron análisis fisicoquímicos de cinco muestras de agua para determinar su calidad, y se caracterizó el nivel freático del área tomando en cuenta la información de pozos existentes en el área. Todo esto condujo a la elaboración del modelo hidrogeológico conceptual en el cual se determinó un acuífero semiconfinado apto para el consumo humano, y con un alto factor de movilidad producto de importantes diferencias geológicas presentes en la zona de estudio.

Índice

CAPITULO I	1
GENERALIDADES	1
1.1 Planteamiento del Problema.....	1
1.2. Justificación	2
1.3 Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos Específicos.....	3
1.4 Localización y Extensión del Área de Estudio	4
1.5 Alcance y limitaciones	5
1.6 Antecedentes.....	6
CAPITULO II	9
MARCO REFERENCIAL	9
2.1 Aspectos Físicos del área de estudio	9
2.1.1 Relieve	9
2.1.2 Clima	9
2.1.3 Precipitación.....	10
2.1.4 Temperatura.....	11
2.1.5 Vientos	11
2.1.6 Hidrografía	12
2.2 Embalses en la cuenca del río Guaire	12
2.3 Vegetación.....	13
2.4 Geología Regional	14
2.4.1 Generalidades.....	14

2.5 Litología	16
2.5.1 Esquistos las Mercedes	16
2.6 Estratigrafía Regional	17
2.7 Metamorfismo	19
2.8 Estructuras	20
2.8.1 Pliegues.....	20
2.8.2 Fallas.....	23
2.9 Geomorfología Regional.....	25
2.10 Geología Local.....	27
2.10.1 Valle de Caracas	27
CAPITULO III	33
MARCO TEÓRICO	34
3.1 Formaciones geológicas y su comportamiento frente al agua	34
3.1.1 Aguas subterráneas	34
3.1.2 Acuíferos	35
3.1.3 Acuitardos	36
3.1.4 Acuicludos	37
3.1.5 Acuífugos	37
3.2 Tipos de acuíferos	37
3.2.1 Según su textura.....	37
3.2.1.1 Acuíferos porosos	37
3.2.1.2 Acuíferos cársticos y fisurados	38
3.2.1.3 Acuíferos cársticos y porosos	38
3.2.2 Según sus circunstancias hidráulicas y estructurales.....	39
3.2.2.1 Acuíferos libres	40

3.2.2.2	Acuíferos cautivos o confinados	41
3.2.2.3	Acuíferos semiconfinados	42
3.3	Piezómetro	43
3.4	Nivel freático	43
3.5	Movimiento del agua en los acuíferos	44
3.5.1	Movimiento del agua en el suelo	45
3.5.2	Movimiento del agua en la zona no saturada	46
3.5.3	Movimiento del agua en la franja capilar	46
3.5.4	Movimiento del agua en la zona saturada isopiezas	46
3.6	Nivel Piezométrico	47
3.7	Mapas piezométricos	47
3.8	Permeabilidad	47
3.9	Balance Hídrico	49
3.9.1	Precipitación	50
3.9.2	Infiltración	50
3.9.3	Escurrimiento	50
3.9.4	Evapotranspiración potencial (ETP)	50
3.10	Prospección geofísica	51
3.11	Sísmica de sondeo	51
3.11.1	Cross-Hole	52
3.11.2	<i>Down-Hole y Up-Hole</i>	53
3.11.3	Método de refracción de Microtremores (ReMi)	55
3.11.4	Vibraciones Naturales	56
3.12	Modelos hidrogeológicos	57
CAPITULO IV	59

METODOLOGÍA	59
4.1 Etapa de Pre-campo.....	59
4.1.1 Revisión y recopilación de información.....	59
4.2 Etapa de Campo.....	60
4.2.1 Inventario de pozos.....	60
4.3 Etapa Post-campo	65
4.3.1 Etapa de laboratorio	65
4.3.2 Etapa de oficina	65
4.3.2.1 Elaboración del Balance hídrico	66
4.3.2.1.1 Cálculo de la Escorrentía.....	68
4.3.2.1.2 Calculo de la Evapotranspiración Potencial (Etp).....	69
4.3.2.1.3 Calculo de la Evapotranspiración Real (ETR)	71
4.3.2.3 Recarga por flujo subterráneo	72
4.3.2.4 Recarga total	73
4.3.2.5 Construcción de mapas	73
4.3.2.5.1 Mapas Piezométricos.....	73
4.3.2.5.2 Mapa de total sólidos disueltos.....	73
4.3.2.5.3 Mapa de PH	75
4.3.2.5.4 Mapa de conductividad	75
4.3.2.5.5 Mapa de cloruros y sulfatos	75
4.3.4 Perfil del transecto a lo largo de la excavación Metro.....	76
4.3.5 Modelo de las dimensiones del acuífero y estratos circundantes	77
4.3.5.1 Blanqueo de mapas.	82
CAPITULO V.....	85
RESULTADOS Y ANÁLISIS	85

5.1 Información Piezométrica	85
5.2 Información geofísica.....	89
5.2.1 Sísmica Downhole (DH).....	90
5.2.1.2 Sísmica Refracción por Microtremores (ReMi)	91
5.3 Balance Hídrico	92
5.3.1 Cálculo de Escorrentía.....	92
5.3.2 Cálculo de Evapotranspiración Real.....	94
5.3.3 Recarga por flujo subterráneo	97
5.4 Recarga total del acuífero.....	98
5.5 Calidad Fisicoquímica del agua.....	99
5.5.1 Total de Sólidos Disueltos.....	99
5.5.2 Cloruros y sulfatos	102
5.5.3 PH	104
5.5.4 Conductividad eléctrica.....	106
5.6 Calidad de Agua para Consumo.....	109
5.7 Modelo hidrogeológico conceptual	109
5.7.1 Modelo 1.....	110
5.7.1.2 Modelo 2	112
5.7.1.3 Modelo 3	113
5.7.2 Resultados del Modelo 1: Condiciones de Borde de Nivel Constante	113
5.7.2.1 Resultados del Modelo 2: Condiciones de Borde tipo Neuman	116
5.7.2.2 Resultados del Modelo 3: Condiciones de Borde de Nivel Constante, tomando en cuenta la profundidad del nivel freático en cada pozo.....	118
5.8 Análisis de Resultados	121
Conclusiones	124
Recomendaciones	126

Bibliografía.....	127
-------------------	-----

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación de la zona de estudio, mapa de espesor de sedimentos y trazado de la línea 5 del Metro de Caracas (Tomado y modificado de google)	4
Figura 1.2 Ubicación de la Zona de estudio Tomado de Google Earth (2012).	5
Figura 2.1 Grafico de precipitación media mensual, periodo 1891- 2000.....	10
Figura 2.2 Grafico de Temperatura media mensual, periodo 1981-200.	11
Figura 2.3 Columna de la Cordillera de la Costa (Urbani, 1997).	18
Figura 2.4 Mapa Geológico de la región sur de Caracas DENGO (1951) modificado por WEHRMANN & SINGER (1977).	22
Figura 2.5 Pliegues y fallas en Caracas (Urbani, et al. 2004).....	24
Figura 2.6 Mapa de Unidades Deposicionales Pleistocenic y/o Holocenic del Valle de Caracas (Singer 1977).	29
Figura 2.7 Trazado de la Línea 5 del Metro de Caracas.	31
Figura 2.8 Avance de la obra, estación Bello Monte	32
Figura 3.1 Condiciones naturales del agua.	35
(Enciclopedia Nicaragüense de Cuencas Hidrográficas, 2010).....	35
Figura 3.2 Acuífero (Modificado de Gibson, 1974).	36
Figura 3.3 Tipos de acuíferos según su textura. Tomado de González de Vallejo 2004	39
Figura 3.4. Acuífero libre y confinado. Tomado de González de Vallejo, 2004.....	40
Figura 3.5 Acuífero Semiconfinado. Tomado de González de Vallejo 2004.....	42
Figura 3.6 Tipos de acuíferos (Libro Digital del Agua, 2010).....	43

Figura 3.7 Posición del nivel freático en el subsuelo. Tomado de: httpwww.google.co.veimgresimgurl=httpwww.miliarium.comproyectosnitratosdccionarioDistribsuelo.jpg&imgrefurl	44
Figura 3. 8 Movimiento del agua y orientación de los piezómetros en el suelo y subsuelo. Tomado de González de Vallejo, 2004	45
Figura 3.9 Ensayo Cross-Hole	53
Figura 3.10 Ensayo Down-Hole	54
Figura 3.11 Ensayo de Up-Hole.....	55
Figura 4.1 Muestras de Agua. Tomado por la autora.	64
Figura 4.2 Tanque donde descargan las bombas de Aguas. Tomado por la autora.64	
Figura 4.3 Creado del Grid de las capas.....	80
Figura 4.4 Creado de las capas en tres dimensiones.	80
Figura 4.5 Color de la litología de las capas por medio de la Opción Properties.....	81
Figura 4.6 Modelo Hidrogeológico Conceptual.	82
Figura 4.7 Mapa de contorno con sus puntos de interés.....	83
Figura 4.8 Modelo Conceptual.....	84
Figura 5.1 Mapa 1 de Niveles Piezométricos para los Primeros Cuatro Meses de Bombeo.	87
Figura 5.2 Mapa 2 de Niveles Piezometricos para el Quinto y Decimo Mes de Bombeo.	88
Figura 5.3 Mapa 3 de Niveles Piezometricos para el Decimo Primero y Decimo Quinto Mes de Bombeo	89
Figura 5.4. DH. Modelo sismoestratigráfico interpretado con valores promedio de velocidad para cada unidad sísmica.	91
Figura 5.5. DH. Modelo sismo-estratigráfico interpretado con valores de velocidad para cada unidad sísmica.	92
Figura 5.6 Mapa del Total de Sólidos Disueltos.	101
Figura 5.7 Mapa de Cloruros.	103

Figura 5.8 Mapa de Sulfatos	104
Figura 5.9 Mapa de PH.....	106
Figura 5.10 Mapa de Conductividad	108
Figura 5.11 Perfil en planta del transecto de la zona	111
Figura 5.12 Corte geológico y nivel freático inferido a partir de datos de pozos, en la parte central de la figura, el nivel freático fue colocado en función de pozos geofísicos existente en el metro. Esta figura puede ser observada a mayor detalle en la anexos (Suministrada por ODEBRECHT)	111
Figura 5.13 Condiciones iniciales y unidades usadas para el modelado del nivel freático en este trabajo mediante el programa MODFLOW 2.8.1.....	112
Figura 5.14 Líneas de flujo resultantes del modelo 1, asumiendo condiciones de borde constante.....	114
Figura 5.15 Líneas de flujo con la proyección del campo de velocidades y la magnitud de la velocidad para el modelo 1	115
Figura 5.16 Balance hídrico obtenido del modelo 1, solamente considerando dos pozos, uno a la entrada y otro a la salida. Es decir condición de borde de nivel constante. El valor de caudal es de 12516 m ³ /d (144861,1 l/s).....	116
Figura 5.17 Líneas de flujo resultantes del modelo 2, asumiendo condiciones de borde tipo Neuman	117
Figura 5.18 Líneas de flujo con la proyección del campo de velocidades y la magnitud de la velocidad para el modelo 2.....	117
Figura 5.19 Balance hídrico obtenido del modelo 2, solamente considerando el pozo derecho	118
Figura 5.20 Geometría utilizando el nivel freático dado para cada uno de los pozos mostrados en la Figura 5.2	119
Figura 5.21 Líneas de flujo y campo de velocidades para el modelo 3, en el cual se consideraron todos los pozos	120
Figura 5.22 Balance hídrico obtenido del modelo 3, considerando 10 pozos con posibles interacciones	121

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1.- Clasificación de Terrenos de acuerdo a su Conductividad Hidráulica. Tomado de: MEJÍAS& GUERRERO (2000).....	46
Tabla 4.1 Inventario de los pozos de bombeo.....	62
Tabla 4.2 Parámetros del Agua Medidos en Laboratorio.	65
Tabla 4.3. Valor de temperaturas para los años comprendidos 1981-2000. Tomado de la estación Meteorológica UCV.....	66
Tabla 4.4 Valor de Precipitación para los años comprendidos 1981-2000. Tomado de la Estación Meteorológica UCV.	67
Tabla 4.5 Valores del Coeficiente de Escorrentía (Ce). Tomado de Pérez, J. 1976. UCV. Citado por Frías, L. 2007.....	68
Tabla 4.6 Valor de Precipitación y temperatura para el año 2000 (estación La UCV). Tomado de la Estación Meteorológica UCV.....	69
Tabla 4.7 Valor de Precipitación efectiva para el año 2000 (Estación UCV) Tomado de la Estación Meteorológica UCV	72
Tabla 4.8 Rangos permitidos para los Parámetros Físicoquímicos.	74
Tabla 4.9 Rango de Cantidades en mg/l de Iones y otras Características de los Distintos Tipos de Agua. Tomado de Morrel, I (2008) citado por Sivira, D (2012)...	76
Tabla 4.10 Valores de los topes y las bases de las capas del acuífero para el modelo.....	78
Tabla 4.11 Valores de los topes para las cuatro capas del acuífero.	79
Tabla 5.1 Datos de Niveles Piezometricos, para los meses Enero- Abril del 2011 con bases de Datos del Metro C.A y ODEBRECHT.	82
Tabla 5.2 Datos de Niveles Piezometricos, para los meses Mayo-Octubre del 2011 con bases de Datos del Metro C.A y ODEBRECHT.....	83
Tabla 5.3 Datos de Niveles Piezometricos, para los meses noviembre 2011-Abril del 2012 con bases de Datos del Metro C.A y ODEBRECHT.....	83
Tabla 5.4 Valores de Escorrentía.....	¡Error! Marcador no definido.

Tabla 5.5 Valores de Evapotranspiración Real.	93
Tabla 5.6 Valores de Recarga por Precipitación para el año 2000.....	94
Tabla 5.7 Valores de Recarga por Precipitación.	96
Tabla 5.8 Valores del Total de Sólidos Disueltos.	99
Tabla 5.9 Valores de Cloruros.	101
Tabla 5.10 Valores de PH.....	104
Tabla 5.11 Valores de Conductividad Eléctrica.....	¡Error! Marcador no definido.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1 Planteamiento del Problema

Venezuela ha experimentado un sostenido crecimiento poblacional durante los últimos 30 años; En particular la ciudad de Caracas, ha experimentado un crecimiento demográfico exponencial a partir del año 1950, cuando se inicia la migración de los individuos desde el interior del país hacia dicha ciudad, en búsqueda de mejores condiciones de vida. Esto ha originado, un aumento en la demanda de transporte, que ha conllevado a la creación de nuevas vías, tanto superficiales como subterráneas. A partir de 1967 se inicio la construcción de líneas del transporte subterráneas del C.A Metro de Caracas. Actualmente, existen 4 tramos y se encuentra en construcción la línea 5, así como otros proyectos extraurbanos como el Proyecto Guarenas – Guatire, Cable Tren y Metro Cable. La Línea 5 tiene como misión el traslado de entre 227 a 300 mil pasajeros por día, lo cual permitirá una distribución más eficiente de los volúmenes de pasajeros y una mejor integración con el resto del transporte, descongestionando así la Línea 1 del Metro de Caracas, en especial el tramo comprendido entre las Estaciones Plaza Venezuela, Sabana Grande, Chacaíto y Altamira.

La Línea 5 atravesara prácticamente la ciudad de Caracas a lo largo de la cuenca hidrográfica del Río Guaire; adicionalmente corta las formaciones geológicas esquistasas como Las Mercedes, aunado a esto el incremento en la población ha hecho que aumente el número de viviendas cutos desagües amplía el flujo y hace que los niveles freáticos aproximen a la superficie a lo largo de la cuenca mencionada anteriormente, todo esto hace necesario que se determinen las características hidrogeológicas de la zona de influencia del

proyecto Línea 5 del Metro de Caracas. Estos estudios son vitales ya que el alineamiento del proyecto se encuentra en gran parte alineado el Río Guaire, y los niveles freáticos se encuentran cercanos a la superficie. Existen estudios previos los cuales serian complementados en este, dándole fortaleza a los diseños emprendidos en la Obra, y sus protecciones hidráulicas.

Los Procesos constructivos de la C.A Metro de Caracas han determinado la realización de una serie de estudios, que han permitido la caracterización geotécnica de los materiales que conforman el valle, sobre el cual se asienta la ciudad. Asimismo se han generado una base de datos útil para fines de microzonificación sísmica de la región y además, se han realizado caracterizaciones hidrogeológicas y geomecánicas que permiten optimizar el sistema de excavación a utilizar y recomendar los tipos de sostenimientos tanto en los túneles como en las estaciones durante su construcción.

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad elaborar un modelo de flujo de aguas subterráneas en la Línea 5, entre el Tramo Estación Zona Rental - Estación Bello Monte, de la C.A. Metro de Caracas.

1.2. Justificación

Surgió el interés de plantear un modelo hidrogeológico que explique cuáles son las direcciones y velocidades del flujo subterráneo, y así contribuir con el entendimiento de la sistemática del funcionamiento del acuífero en la zona de estudio y a la planificación de su uso; todo eso con la finalidad de analizar la interacción del acuífero con las estructuras presentes. Además, así garantizar tanto la operatividad de la obra y su vida útil, como también podrá la optimización de los recursos materiales, financieros y humanos, para la construcción de la Línea 5 de la C.A Metro de Caracas.

La importancia de la realización de esta investigación también radica en el aporte que pueda dar el estudio de la hidrogeología de la Línea 5 del Metro de Caracas, a fin de ser aplicado como fuente de información geológica para próximos proyectos de investigación que se realicen en la zona.

Los estudios del agua subterránea son importantes para la ejecución de obras de ingeniería subterráneas, como la que nos ocupa, y muy especialmente en el desarrollo de obras de captación de agua con fines de abastecimiento para satisfacer las necesidades de la comunidad, en otros escenarios del país.

1.3 Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Elaborar un modelo hidrogeológico conceptual del acuífero en el subsuelo para el Proyecto de Transporte Masivo de la Línea 5 de la C.A. Metro de Caracas, en el sector en referencia.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Recopilar la información de los piezómetros ubicados a lo largo del alineamiento del proyecto.
- Recolectar información geofísica para el conocimiento de la geología del subsuelo.
- Determinar las condiciones geoquímicas de muestras de agua subterráneas a través de ensayos fisicoquímicos.
- Representar los atributos de los acuíferos existentes en el sector, las direcciones de flujo subterráneo y sus velocidades por medio de mapas piezométricos y líneas de flujo.

- Realizar un modelo hidrogeológico conceptual de la zona.

1.4 Localización y Extensión del Área de Estudio

El tramo de este trabajo se ubica en la parte Centro sur de la Ciudad de Caracas, desde la Zona Rental UCV Avenida principal de Bello Monte al Sur, hasta el inicio de la Urbanización las Mercedes.

El área metropolitana de Caracas, geológicamente, se sitúa dentro de una depresión asimétrica de origen tectónico, a los pies del Parque del Ávila, drenada por el Río Guaire y está caracterizada por un paisaje mixto, donde predomina el paisaje suave en la cual se asienta la mayor parte de la ciudad y está rodeada de zonas de paisaje abrupto

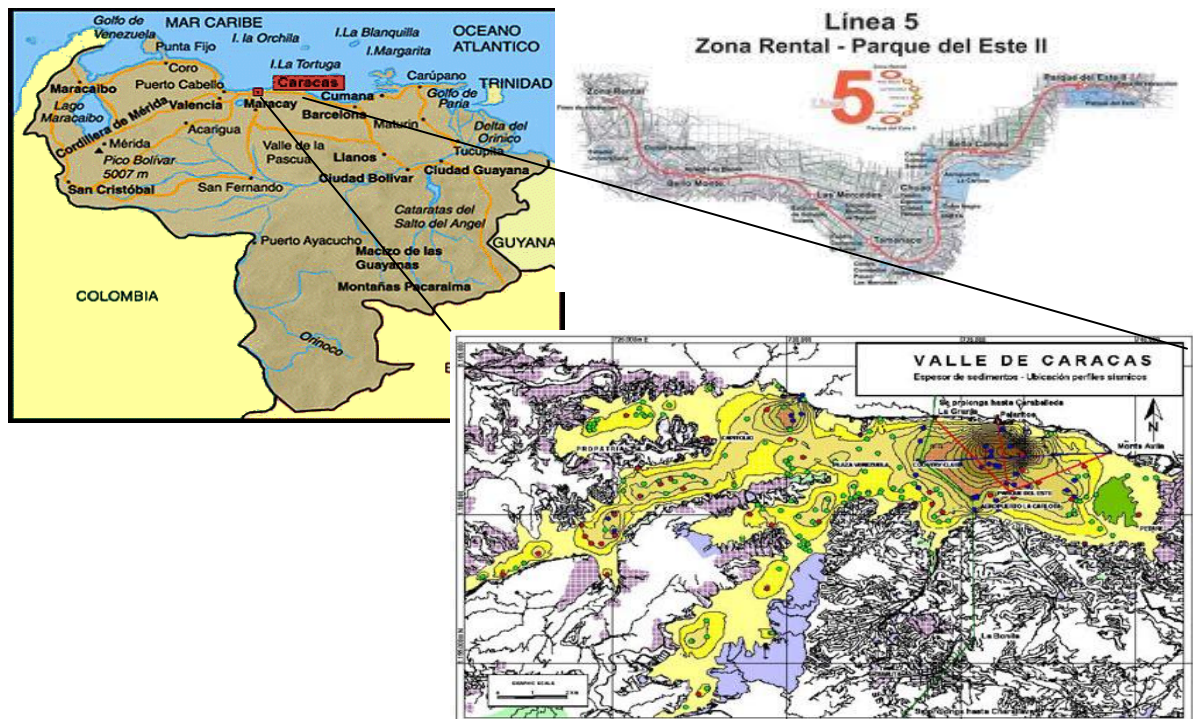


Figura 1.1 Ubicación de la zona de estudio, mapa de espesor de sedimentos y trazado de la línea 5 del Metro de Caracas.

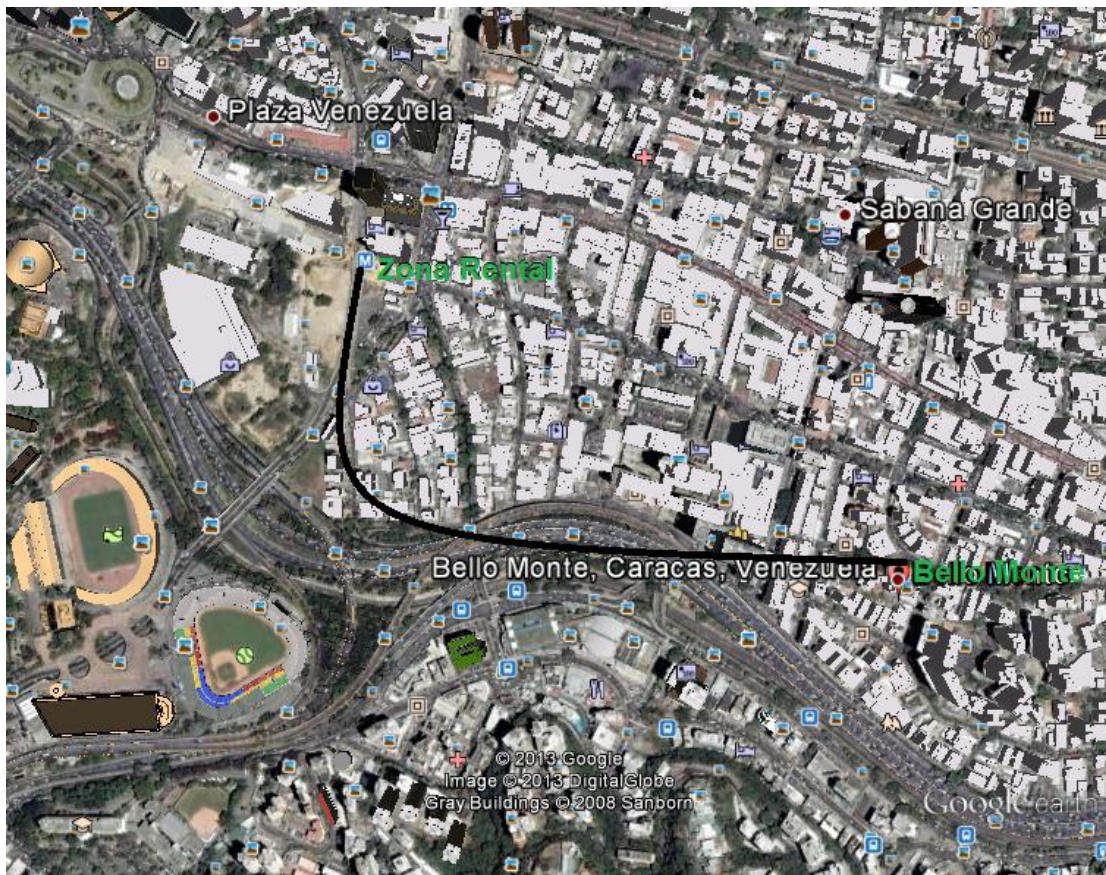


Figura 1.2 Ubicación de la Zona de estudio Tomado de Google Earth (2012).

1.5 Alcance y limitaciones

El proyecto se desarrollará en la Línea 5 del Metro de Caracas, Municipio Baruta comprendiendo la Estación Zona Rental – Bello Monte, con este trabajo se pretende integrar y relacionar los datos hidrológicos, geofísicos, geoquímicos, para elaborar el modelo conceptual del subsuelo que permita conocer la geometría y atributos de los acuíferos existentes en el sector. Con esto se pretende lograr la implementación o el establecimiento de un modelo hidrogeológico, para la obtención de la distribución de los sedimentos permeables del acuífero de la zona, mostrando las direcciones y velocidades de flujo subterráneo, para definir el funcionamiento completo del acuífero.

1.6 Antecedentes

- **Singer (1977):** partiendo de los datos de campo y vistas de las fotografías aéreas perteneciente a la misión 8 (1936-38), realizó la cartografía geológica de las unidades depositacionales cuaternarias de la parte oriental del Valle de Caracas. Esta información es útil en la recopilación y adquisición de información para conocer cartográficamente parte de la zona de estudio.
- **Sanseviero. (1996):** aplico métodos geotécnicos y geofísicos al desarrollo urbano Lomas de la Lameda en el área Metropolitana de Caracas, con el fin de minimizar los riesgos geológicos y geotécnicos asociados a las labores de construcción.
- **Díaz y Tovar (2005):** elaboraron un estudio geológico-geotécnico basado en la caracterización de suelos residuales y del perfil de meteorización en las zonas de influencia del área metropolitana de Caracas. En principio, se basaron en el perfil de meteorización para climas tropicales propuesto por Deere y Patton (1971), adaptándolo al perfil sometido a estudio. La exposición de las rocas en superficie a una meteorización intensa genera un manto continuo de roca muy alterada, variando el contenido de humedad según el clima, estos determinaron el contenido de humedad de los suelos y así las condiciones de inestabilidad, inferidas de acuerdo a la cohesión y los ángulos de fricción con respecto a los ángulos del talud, pudiendo observar mayor inestabilidad en épocas de lluvia, acentuado por la topofomas de la zona.

- **Odebrecht S.A (2006):** desarrolla la ingeniería básica y de detalle de las obras civiles y de las instalaciones relativas al Tramo Zona Rental-Miranda II de la extensión de la Línea 4 del Metro de Caracas.
- **Núñez y Velásquez (2006):** realizaron una evaluación hidrogeológica en el Valle de Caracas en el tramo Las Adjuntas- El Paraíso, cuyo resultado fue un modelo hidrogeológico conceptual que sirvió para el estudio y cartografía de las propiedades de cada una de las facies que conforman el acuífero.
- **Delavaud (2007)** realizó una simulación numérica de la propagación de ondas en medios geológicos complejos a lo largo del valle de Caracas.
- **Oropeza y Zambrano (2007):** elaboraron una base de datos de geología urbana para fines de microzonificación sísmica para la ciudad de Caracas, que surgió de la necesidad de disponer de una base geológica del asiento aluvial de la ciudad de Caracas.
- **Proconsult C.A (2008):** efectuaron un estudio de impacto ambiental y sociocultural en la construcción de la Línea 5 del sistema Metro de Caracas, Tramo Plaza Venezuela Miranda II. El estudio permitió evaluar los impactos potenciales positivos y negativos que trae consigo la ejecución de las actividades en la etapa de construcción y operación sobre el área, y la formulación de las medidas preventivas, correctivas y de control, pertinentes, para minimizar los posibles efectos negativos sobre el ambiente y optimizar aquellos de índole positiva.

- **Farfan y Marconi. (2008):** Desarrollaron un trabajo de caracterización geomecánica que conforman el subsuelo donde se formaron túneles gemelos en el tramo que abarca desde Bello Monte hasta Chuao de la Línea 5 del Metro de Caracas, con la finalidad de diseñar un modelo de sostenimientos primarios a lo largo del trazado, mediante el método de sólidos de carga de Terzaghi así como la estimación de cargas actuantes en coberturas superficial e intermedia.
- **Rodríguez (2009):** realizó un estudio integrado y una caracterización hidrogeológica del subsuelo de la Línea 5 del Metro de Caracas, en la Estación Bello Campo, lo cual permitió un mejor entendimiento de la geometría y atributos de los acuíferos en el sector, con la finalidad de mejorar los procesos actuales de abatimiento, asegurar la eficiencia y estabilidad de las excavaciones de la Línea 5 del Metro de Caracas. Con este estudio se definió un acuífero superficial libre ubicado entre los 9 a 20 metros de profundidad y otro más profundo semiconfinado que abarca desde los 22 a 63 metros de profundidad

CAPITULO II

MARCO REFERENCIAL

2.1 Aspectos Físicos del área de estudio

2.1.1 Relieve

Singer (1977) plantea los elementos del paisaje correspondientes a valles alvéolos, cerros convexos parientes de las “medias naranjas” brasileras, así como las espesas formaciones residuales que acompañan a tales modelados. Estas últimas podrían constituir una herencia morfoclimática atribuida generalmente a climas tropicales húmedos del Plioceno.

Urbani y Rodríguez (2004), plantean que la cartografía de esta Serranía queda totalmente subdividida en tres (3) napas: Costera, Ávila y Caracas, desde Cabo Codera al este hasta el estado Yaracuy.

2.1.2 Clima

El clima del Área Metropolitana de Caracas, donde se localiza la zona de estudio es de tipo intertropical de montaña, oscilando entre cálido y templado, distinguiéndose dos (2) periodos predominantes:

- Un periodo de sequía entre los meses de Diciembre y Abril
- Un periodo lluvioso que va desde Mayo a Noviembre.

En Caracas pueden presentarse, aunque en raras ocasiones, tormentas de granizo, mientras que las eléctricas son mucho más frecuentes, especialmente entre junio y octubre, por su condición de valle cerrado y por la acción orográfica del Ávila. El factor climático es el que rige el proceso de alteración y disgregación mecánica de las rocas, ya que la naturaleza de

dichos procesos cambia considerablemente con el clima, el cual es un componente de agentes atmosféricos que al transgredir el material rocoso trae consigo la formación de la capa superficial del suelo.

2.1.3 Precipitación

Esta caracterización en Caracas se puede obtener a través de la carta de precipitación media anual en milímetros, observándose allí variaciones entre los 900 y 1300 mm anuales, en el valle de Caracas (Área Metropolitana), y hasta los 2000 mm en algunas partes de la Cordillera

Basándose en los datos mensuales registrados, se evidencia la existencia de una temporada lluviosa, entre los meses de mayo y noviembre, cuando ocurre la mayor precipitación anual, lo contrario ocurre en la temporada de los meses de enero a marzo.

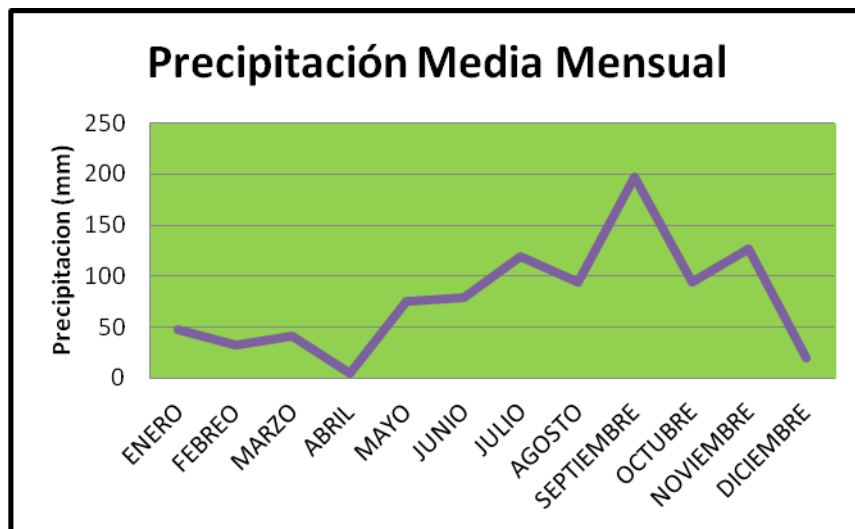


Figura 2.1 Grafico de precipitación media mensual, periodo 1891- 2000.

2.1.4 Temperatura

La información suministrada por la carta de temperatura promedio anual (1973-2004) muestra un valor medio anual de 23°C, alcanzando una mínima media de 14° en diciembre y una máxima media de 27° en agosto.

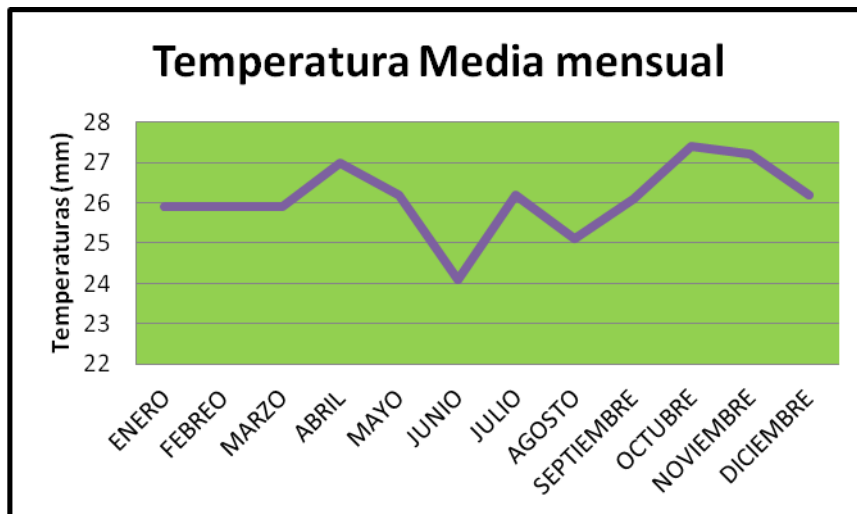


Figura 2.2 Grafico de Temperatura media mensual, periodo 1981-200.

2.1.5 Vientos

Los vientos dominantes son los de SSE, con una media durante el año de 1,7 m/s, con las máximas velocidades en los meses de enero hasta junio, correlativamente con la temporada de sequía, cuando aumenta el porcentaje de ventisca y a principio de junio donde este porcentaje decrece, a causa del comienzo de la temporada lluviosa.

2.1.6 Hidrografía

Los drenajes principales están conformados por el Rio Guaire y el Rio Valle. El Rio Guaire es uno de los tributarios del Rio Tuy; nace con la confluencia de los Ríos San Pedro y Macarao en las Adjuntas, posee un cauce fundamentalmente sinuoso cuyas divisorias de aguas presentan una elevación máxima de 2750 msnm en el Pico Naiguatá, el cual, discurre en dirección Oeste- Este a lo largo del Valle de Caracas, captando las aguas provenientes de numerosas quebradas intermitentes que nacen en la vertiente Sur del Ávila: Caroata, Catuche, Anaco, Quebrada Honda, Canoa, Maripérez, Chacaíto, Seca, Sebuacán, Agua de Maíz, Tocomé y Caurimare, cuyo potencial de arrastre de sedimento es elevado.

El segundo drenaje de importancia es el Rio Valle, que confluye con el Rio Guaire a la altura del Distribuidor El Pulpo. La forma del cauce es sinuosa, drenando de suroeste a noreste, así como de importantes ríos y quebradas que nacen al sur del Valle.

2.2 Embalses en la cuenca del río Guaire

Con el propósito de abastecer de agua a la ciudad de Caracas, se han construido dos embalses para el almacenamiento del agua de la ciudad entre ellos el Embalse La Mariposa sobre el Río Valle, con un área tributaria de 46 kilómetros cuadrados y una capacidad de 8.700.000 metros cúbicos y localizada a una altura 981 m.s.n.m. Esta represa a partir de 1957 inicio un proceso de alimentación por las aguas bombeadas del Sistema Tuy I desde el Río Tuy.

El segundo embalse corresponde a la represa de Macarao iniciando su actividad hacia el año 1874 durante el gobierno de Antonio Guzmán Blanco y con el correr de los tiempos se ha modificado hasta llegar a la actual presa.

La presa tuvo una capacidad de 186.000 metros cúbicos hasta la cresta del aliviadero, cuando se construyó en el año 1948. Al presente, debido al agotamiento del almacenaje causado por la sedimentación, la capacidad ha disminuido a 90.000 metros cúbicos. En la actualidad su área de drenaje es de 109 kilómetros cuadrados y está alimentada través de un trasvase de cuenca en conducto de gravedad por aguas del embalse de Agua Fría, sobre la Quebrada del mismo nombre, situado en la Cuenca del Río Tuy, a unos 14 kilómetros al Este del embalse de Macarao.

2.3 Vegetación

La vegetación era de bosque de montaña, pero en la actualidad ha sido víctima principal del urbanismo con distintas variaciones que se distribuye en función de la altura. Entre el nivel del mar y los 200 o 300 msnm (e incluso a mayor altura según la orientación del relieve) se encuentra el bosque xerófilo, donde prevalecen especies como el cují (*Prosopisjuliflora*). Entre los 800 - 1.500 msnm se localiza el bosque ombrófilo siempreverde que se caracteriza por presentar 2 a 3 estratos arbóreos y sotobosque relativamente denso. Entre los 1.200 - 2.200 msnm se sitúa el bosque ombrófilo siempreverde con 2 - 3 estratos arbóreos y bosque bien desarrollado. En estos bosques abundan especies de las familias de las orquídeas, helechos, bromeliáceas, aráceas, y se han reportado especies endémicas de las familias *Sapindaceae*, *Melastomataceae*, *Rubiaceae* y *Myrtaceae*, así como helechos arborescentes y palmeras (*Ceroxylonceriferum*). Presenta sabanas de origen antrópico en donde predominan especies como el capín melao (*Melinis minutiflora*) y el bambusillo (*Arthrostyidium venezuelae*), la tara amarilla (*Oyedaeverbesinoides*) y el incienso (*Espeletianeriifolia*). En las regiones superiores de la Silla de Caracas y el Pico Naiguatá se encuentra una vegetación característica de subpáramo arbustivo costero, constituido por arbustales abiertos de 1 - 3 m de alto con un estrato herbáceo

relativamente bien desarrollado, siendo las especies más características el incienso o frailejón arbolito (*Libanothamnusnerufolius*) bandera española (*Castillejafissifolia*) falso frailejón (*Liabummegacephalum*).

El área de estudio se encuentra ubicada a una de las principales depresiones de la cordillera de la costa, en su parte central, perteneciente al sistema montañoso del caribe. Esta cordillera es bastante compleja, debido a los diferentes tipos litológicos presentes así como los procesos de deformación y metamorfismos sufridos.

2.4 Geología Regional

2.4.1 Generalidades

La zona de estudio se encuentra ubicada en uno de las principales depresiones de la cordillera de la costa, en su parte Central, pertenecientes al Sistema Montañoso del Caribe.

La zona de estudio se localiza en la Napa Caracas, que comprende al Grupo Caracas según Urbani & Rodríguez (2004) el cual está conformado por las unidades:

- Esquistos de Chuspita: esquisto/filita grafitoso y metarenisca de probable origen turbidítico. Edad: cretácico temprano.
- Esquistos de las Mercedes: esquisto grafitoso y mármol. filita negra formada en una cuenca sedimentaria con ambiente anóxico y/o de alta productividad. Edad: Jurásico Tardío a Cretácico Temprano.
- Esquisto de las Brisas: esquistos cuarzo moscovítico, metarenisca, metaconglomerado, y cuerpos de mármol hasta de dimensiones hectométricas. Edad: Jurásico Tardío (kimmeridgiense) a Cretácico Temprano. Sedimentos metamorfizados a la facies de Esquistos

Verdes (Clorita), corresponden a un margen continental pasivo.

La unidad litodémica presente en la zona de estudio es el Esquisto de las Mercedes, además del Sedimentos de Cuaternario.

Los sedimentos que afloran presentan dos facies diferentes:

- Una facies de depositación terminal correspondiente a limos arenosos y arcillosos de derrame de varios metros de espesor y de color beige.
- Una facies de materiales más gruesos con gravas desordenadas subangulosas y guijarros en una matriz arenosa, de color gris oscuro y correspondiente a bancos aluviales de descarga.
- Una unidad de depósitos lacustres con facies rítmica de varvas limoarcillosas litocromas alternadamente marrón claro y anaranjado-rosado, con espesores superiores a 4 m. Esta unidad se encuentra acuñada en las 3 secciones observadas contra la loma rocosa del Esquisto Las Mercedes, donde se asentaba la antigua Hacienda Noria y hacia la cual, la secuencia lacustre se encuentra interestratificadas lateralmente, con plumas coluviales Q1 de color rojizo-anaranjado, generadas a partir de la remoción superficial de un perfil de laterita roja aún "in situ", que resulta de la alteración de los referidos esquistos en la loma rocosa. El desarrollo evolutivo de esta laterita roja, probablemente pleistocena y policrónica, se encuentra truncada al ser sepultada la misma bajo los depósitos lacustres discordantes Q1 y convertida por lo tanto en paleosuelo de edad relativa ante-Q1 (Meyer, 1987).

2.5 Litología

2.5.1 Esquistos las Mercedes

Consideraciones históricas: Originalmente fue referida por Aguerrevere y Zuloaga (1937) citado en González de Juana (1980), la denominan esquistos de Las Mercedes. Su mejor representación se encuentra en la Antigua hacienda las Mercedes al este de Caracas (Hoja esc. 1:100.000, Cartografía Nacional) hoy Urbanización Las Mercedes. Debido al crecimiento del urbanismo con la consecuente desaparición de los afloramientos de la localidad tipo, Wehrmann (1972) citado en González de Juana (1980), propone trasladar la sección de referencia a la carretera Petare-Santa Lucía, donde se expone la sección completa de la Formación hasta su transición con la Formación Chuspita. Aguerrevere y Zuloaga (1937) citado en González de Juana (1980), definen su litología como esquistos principalmente calcáreos, con zonas grafitosas y localmente zonas micáceas, de un tinte rosado, gris, con zonas blancas cuando es fresca. Según Wehrmann (1972) y la revisión de González de Juana *et al.* (1980) la litología predominante consiste en esquisto cuarzo - muscovítico - calcítico - grafitoso con intercalaciones de mármol grafitoso en forma de lentes, que cuando alcanza gruesos espesores se ha denominado "Caliza de Los Colorados". Aguerrevere y Zuloaga (1937) citado en González de Juana (1980), incluyen en la Formación una zona constituida por calizas oscuras y densas, en capas delgadas, interestratificadas con capas de esquistos micáceos y arcillosos, todo intensamente plegado, que denominan Fase Los Colorados, y que constituyen excelentes estratos guía.

2.6 Estratigrafía Regional

A continuación se resume la litología y las características principales de las formaciones de la Asociación Metasedimentaria Caracas, que reúnen litologías de aquellas unidades que circundan el Valle de Caracas.

La Asociación Metasedimentaria Caracas, es una secuencia de rocas metasedimentarias depositadas durante el Jurásico superior y Cretácico inferior, en discordancia sobre un complejo ígneo/metamórfico, de edad Paleozoico inferior (Figura 2.3). La sedimentación de las rocas de la Asociación metasedimentaria Caracas, es típicamente de plataforma, excepto en su fase final, cuando se depositan sedimentos gradados que indican un ambiente de surco, fenómeno atribuido a desajustes locales en los bordes de la cuenca (Seiders, 1965 citado en González de Juana 1980.).

A fines del Cretáceo inferior, se producen eventos volcánicos que señalan el comienzo de las facies eugeosinclinal del Grupo post-Caracas. En contraste con el grupo anterior, las rocas de éste se depositan en un ambiente de surco, de aguas profundas y sedimentación rápida, caracterizadas por el abundante suministro de material volcánico.

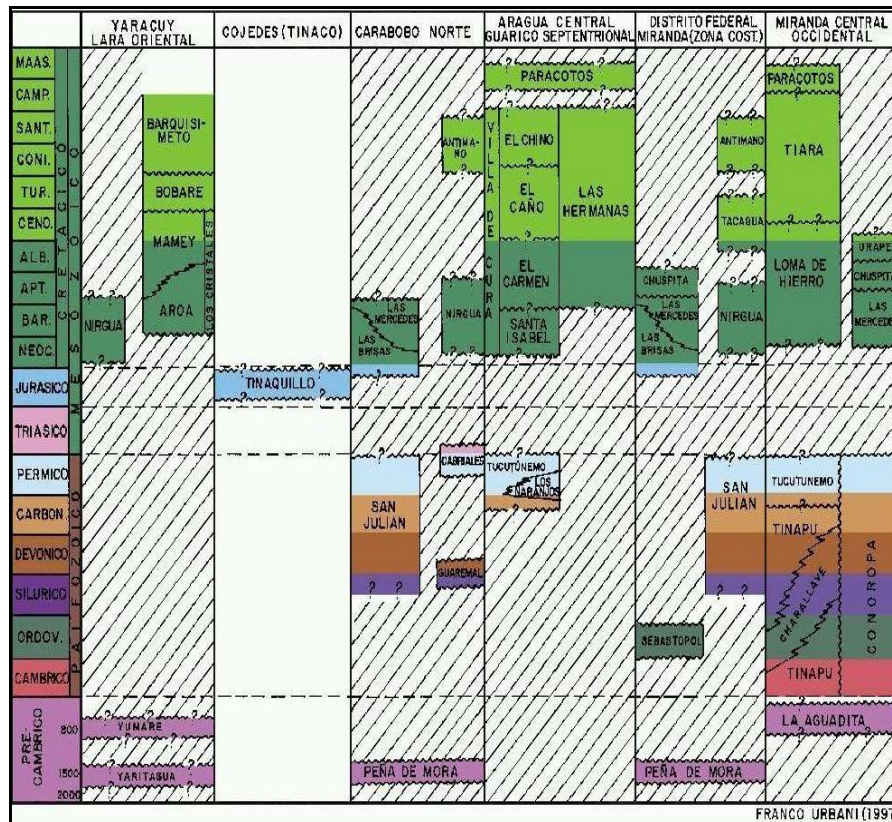


Figura 2.3 Columna de la Cordillera de la Costa (Urbani, 1997).

Frecuentes son las fajas angostas de anfibolitas y eclogitas, las cuales se consideran que representan flujos de composición basáltica, que luego fueron metamorizadas conjuntamente con los sedimentos, bajo condiciones un tanto particulares, ya que la composición mineralógica de las mismas sugiere la ausencia de vapor de agua y de óxido de carbono.

El núcleo de la Cordillera se vio afectada en toda su extensión por apófisis granítica, la mayor de ellas ubicada entre Valencia y Puerto Cabello, las cuales constituyeron un agente importante en el proceso de metamorfismo de los sedimentos de la Asociación metasedimentaria Caracas.

Una de las rocas intrusivas abundantes en la Cordillera, la constituyen las ultrabásicas, en sus formas más generalizadas: serpentinitas, peridotitas serpentinizadas, dunitas y piroxenitas, a las cuales se asocian yacimientos

minerales de importancia económica según Bellizzia, (1967) en González de Juana 1980.

2.7 Metamorfismo

A continuación se exponen los diversos criterios establecidos por los diferentes autores acerca del grado de metamorfismo que afectó al Complejo Basal de Sebastopol y al Grupo Caracas, ya que la mayoría lo consideran correspondiente a la facies de los esquistos verdes.

La mineralogía del Esquisto las Mercedes (Grupo Caracas) según Bell (1968) explica que la Faja de la Cordillera de la Costa, para el momento de su metamorfismo, se encontraba enterrada a una profundidad de unos 30 km., lo que representa una evidencia de combamiento considerable hacia la parte inferior de la zona, asimismo, existen evidencias de que el grado metamórfico disminuye hacia el sur de esta faja.

Maresch (1974) describe una distribución de las facies en el sistema Montañoso del Caribe, manifestando una clara zonación de facies metamórficas, que va de sur a norte, desde rocas no metamorfizadas de edad Cretácica hasta rocas metamorfizadas en la facies de epidoto-anfibolita en Faja Tectónica de la Cordillera de la Costa, aislando la Faja de Villa de Cura, interpretada por el autor como un *klippe*, pasando por la Faja de Paracotos en las facies de zeolita a prehnita- pumpellita y por la Faja de Caucagua-El Tinaco en las facies de los esquistos verdes.

González de Juana (1980) Dengo (1951) en su trabajo sobre la región de Caracas considera que las rocas de la Formación Tacagua, las calizas de Antímano, los esquistos de Las Mercedes, la parte superior de la Fase Zenda y parte del Complejo Basal de Sebastopol pertenecen a la facies de los

esquistos verdes ya que presentan asociaciones mineralógicas típicas de la zona de la biotita y la clorita. Dengo señala además que posiblemente una porción de la Formación Las Brisas pertenecen a las Facies de la anfibolita epidóticas; por otra parte señala que la Formación Las Brisas en la parte norte de la región de Caracas sufrió metamorfismo de la facies de la anfibolita; además considera que los mármoles que se encuentran en la parte superior del Gneis de Peña de Mora pertenece también a la facies de la anfibolita epidótica.

González de Juana (1980) Dengo (1951) sostiene que en la región de Caracas, la foliación de las rocas metamórficas es paralela, o esencialmente paralela a los planos de estratificación original. Werhmann (1972) citado en González de Juana (1980) señala que si bien en muchos casos la opinión de Dengo (1951) es correcta, se ha llegado a la conclusión de que no siempre es así y señala que ha encontrado ejemplos claros donde la foliación es oblicua a la estratificación con un ángulo de 25°. Por otra parte señala que, donde hay capas competentes tales como calizas, cuarcitas y conglomerados, la foliación de los esquistos siempre es paralela a ella.

2.8 Estructuras

2.8.1 Pliegues

Dengo (1951) citado en González de Juana (1980) describe regionalmente tres grandes pliegues, el anticlinal de El Junquito, el sinclinal de El Cementerio y el anticlinal de Baruta, señalando que son estructuras simétricas amplias, cuyos ejes tienen una dirección general N60° a 70°, los cuales se muestran en la figura 2.4

Werhmann (1972) en su trabajo sobre la región de Guatire – Colonia Tovar menciona el anticlinal del Ávila, estructura dominante, la cual se extiende con

rumbo este-oeste a lo largo del macizo del mismo. En orden de importancia siguen los anticlinales de Baruta y El Junquito y el sinclinal de El Cementerio dispuestos entre ambos, y con rumbo aproximado N70°E. Esta discordancia estructural indica un origen evidentemente distinto del macizo del Ávila, y refleja su comportamiento en forma de una cuña empotrada. El movimiento de esta cuña limitada por fallas longitudinales normales, es esencialmente epirogenético, posiblemente como resultado del empuje de un magma profundo cuya apófisis asoman en el núcleo del macizo. En cuanto a pliegues menores Werhmann señala pliegues tipo flexural originados a gran profundidad bajo presiones confinantes y temperaturas altas. Por otro lado señala que en las rocas esquistosas es común el pliegue producido por escurrimiento entre capas y por flujo pasivo en las más dúctiles.

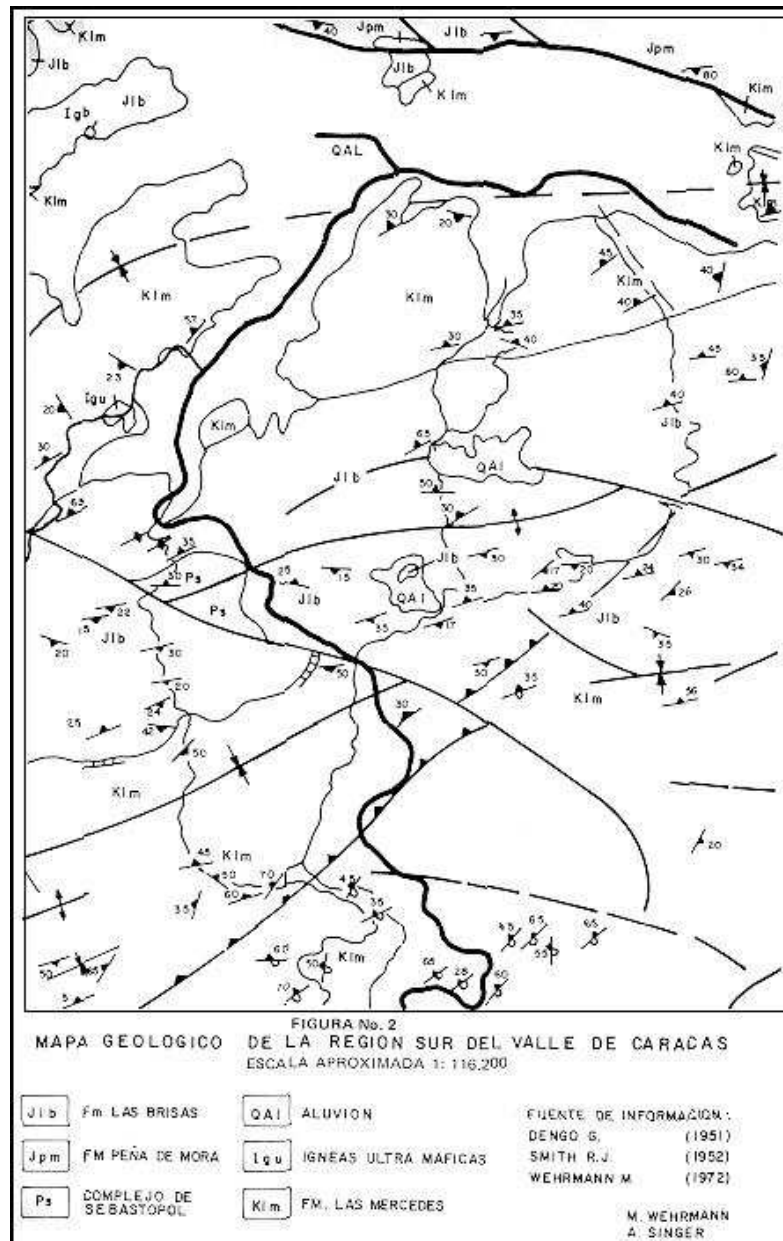


Figura 2.4 Mapa Geológico de la región sur de Caracas DENGO (1951) modificado por WEHRMANN & SINGER (1977).

2.8.2 Fallas

Según Wehrmann (1972) a escala regional, la Serranía del Litoral de la Cordillera de la Costa es parte integrante del sistema de fallas longitudinales que se extienden en sentido este-oeste desde la depresión de San Felipe hasta la isla de Trinidad. Por su parte la falla de Tacagua-El Ávila (Figura 2.5), que cruza y se extiende al Sur del macizo de El Ávila, y el Sistema de fallas de San Sebastián al norte, definen una importante unidad fisiográfica, estructural y estratigráfica conocida como el anticlinorio del Ávila.

Se reconocen tres tipos de fallas, dos longitudinales y la última transversal:

- Fallas oblicuas con rumbos $N50^{\circ}-80^{\circ}E$ (fallas de gravedad y corrimiento) que se originaron por esfuerzos de compresión dirigidos en sentido NNW-SSE que plegaron los sedimentos del Grupo Caracas durante la Orogénesis Andina.
- Fallas longitudinales con rumbo este-oeste (fallas de gravedad y de buzamiento con movimiento posterior a lo largo del rumbo) representadas por el sistema de fallas del Ávila, que se extienden en ambos flancos del macizo del Ávila con una configuración escalonada en el flanco norte y buzamientos, por lo general entre 40° y 60° , en el mismo sentido. En la zona de fallas se puede observar un intenso fracturamiento de las rocas. El origen de estas fallas se atribuye al empuje vertical producido por el magma granítico que intrusionó la Cordillera de la Costa a fines del Cretáceo Superior y durante el paroxismo de la Orogénesis Andina en el Eoceno. Los últimos movimientos de este sistema señalan la existencia de una componente horizontal dextral en dirección del rumbo. Estos últimos movimientos pueden estar asociados con los esfuerzos que originaron el tercer tipo de fallas.

- El más joven de los tres sistemas es definido por las fallas transversales con rumbo N60°W (fallas de rasgadura con movimientos verticales) y con persistente paralelismo entre sí. En origen fueron fracturas de tensión como consecuencia de esfuerzos cortantes con posterior desplazamiento lateral. Por tratarse de fracturas abiertas los cursos de agua han erosionado con cierta facilidad el sustrato rocoso en los planos de fallas borrando a la vez todo vestigio de los mismos.

La interpretación de los patrones geo-estructurales dominantes en el área, es de gran importancia ya que no solamente definen la red hidrográfica sino que también permiten entender los mecanismos de ruptura que pueden haber actuado a lo largo y ancho del litoral metropolitano.

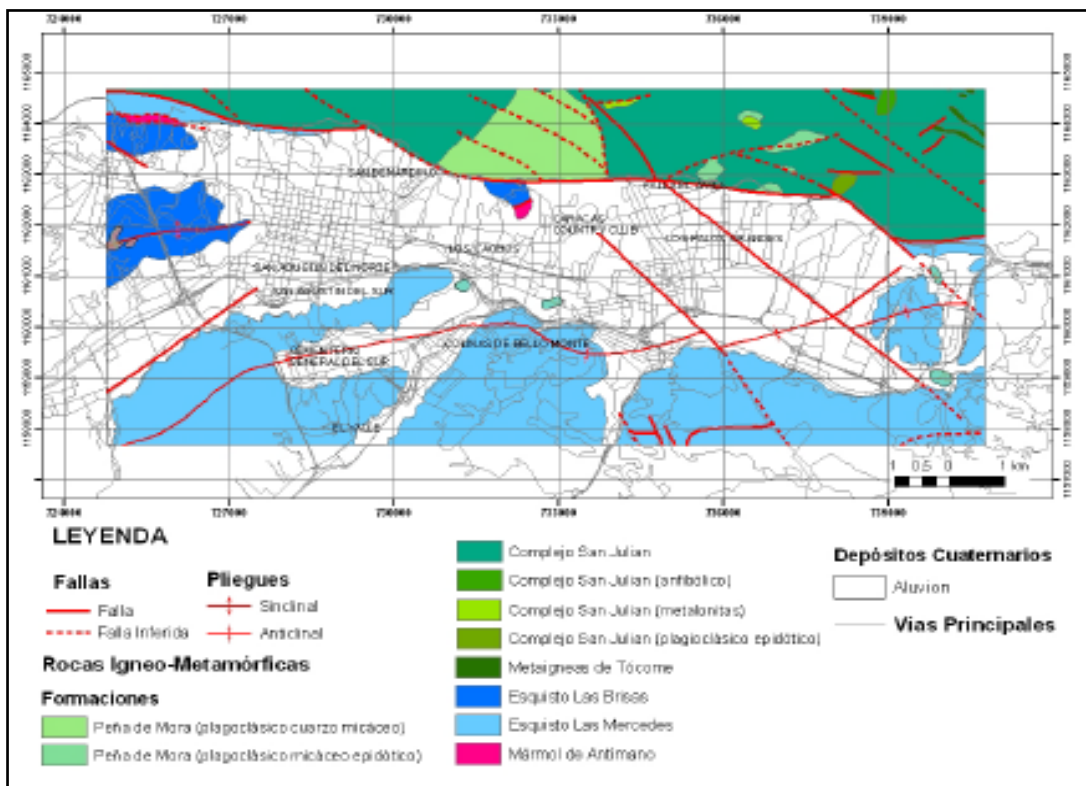


Figura 2.5 Pliegues y fallas en Caracas (Urbani, et al. 2004).

2.9 Geomorfología Regional

El valle de Caracas se caracteriza por ser un semigraben asimétrico por el cual el río Guaire transcurre de oeste a este, insertado en la Cordillera de la Costa en la cual tres superficies erosivas son fácilmente diferenciables, a saber: a 1.250 m.s.n.m. están las áreas más deprimidas del Valle de Caracas a lo largo de los drenajes principales (Guaire y Valle); a 1.500 m.s.n.m., colinas hacia el sur y oeste de Caracas y 2.000 m.s.n.m en Macizo Ávila; siendo superficies de aplanamiento que han sido desplazadas a raíz de dislocaciones del sistema de fallas Tacagua- el Ávila que se encuentra a lo largo de la falda sur de la misma sierra. (Singer, 1977).

Singer (1977) señala que las variaciones en el nivel de base local, son producto de la tectónica Cuaternaria que dio lugar a una desorganización de la red de drenaje, lo que genera un paroxismo erosivo y un entallamiento diferencial del río Guaire, a través del fenómeno de captura y antecendencia de tributarios ubicados hacia El Hatillo, de tal manera, que grandes volúmenes de sedimentos pasan a ser depositados en los valles alvéolos.

Profundas huellas de esta morfogénesis Plio-Pleistocena se observan en modelado de la región de Caracas, debajo de 1.000 y 1.200 m., como consecuencia de la vigorosa disección de la meseta de Los Teques, en particular hacia el sur en razón del carácter más temprano de la erosión regresiva procedente del graben más deprimido del Tuy. Desde el lindero Norte de la "Zona Protectora" de Caracas por ejemplo, ubicado en la orilla de la meseta, es espectacular el contraste que se presenta entre el modelado de disección áspero excavado en la vertiente del Tuy y el paisaje de laderas suaves de los mantos de descomposición de la superficie poligénica

pliocena. Este mismo contraste, de origen litológico, se observa en la vertiente de Caracas, aunque de manera más discreta debido al menor desarrollo de los esquistos de la Formación Las Mercedes, relativamente impermeable en el estado alterado, a la diferencia de los materiales acuíferos originados por la descomposición de las metareniscas y esquistos cuarzo-micáceos de la Formación Las Brisas. Tal diferencia de potencial morfogénico constituye una explicación general de la ubicación de los relieves residuales más importantes de la región en los volúmenes globales resistentes constituidos por los afloramientos de la Formación Las Brisas, y de la excavación más energética de los volúmenes blandos constituidos por los de la Formación Las Mercedes.

En los litotipos de meteorización inferiores a 1.000-1.200 m. los perfiles de suelos residuales, descabezados por la escorrentía difusa, muestran espesores menores de material descompuesto. En la Formación Las Mercedes, estas se distribuyen de acuerdo a secuencias irregulares, que parecen controladas por las condiciones estructurales y el patrón de disección. Se observa efectivamente, que los perfiles transversales se tornan más espesos en dirección del fondo de las quebradas y más delgados hacia los estribos como consecuencia de una eficacia más grande la escorrentía encima de estos últimos. Los suelos ferruginos impermeables de la parte superficial de los perfiles explican la torrencialidad elevada que se observa en las colinas disecadas de la Formación Las Mercedes. En las facies calcáreas y en las exposiciones secas (E, SE) éstas se encuentran todavía incrementadas por suelos de caliche subsuperficiales producidas por encontramientos laminares en la base de la zona 1 B y que epigenizan de manera difusa el horizonte de saprolito infrayacente cuando éste está conservado. Tal torrencialidad se aprecia también en la presencia general de complejos coluvio-torrenciales edafizados cuaternarios formando mantos

espesos al pie de las colinas. (El Pinar, Las Mercedes). Se confirma por lo tanto la existencia de un potencial morfogenético más elevado en la Formación Las Mercedes, asociado de manera correlativa con la existencia de condiciones geotécnicas globalmente más favorables que en los litotipos de meteorización superiores a 1.200m.

2.10 Geología Local

2.10.1 Valle de Caracas

La geometría de las formaciones del Pleistoceno y/o Holoceno, en el Valle de Caracas (Figura 2.6), está afectada por condiciones morfoclimáticas y además por las deformaciones tectónicas contemporáneas y posteriores a su depósito (según Singer (1977) citado en González de Juana (1980)).

Esta influencia se ve marcada en mayor medida debido a la intensa deformación Pleistocénica y/o Holocénica sufrida al norte de Venezuela. En diversos sectores subsidentes durante el Pleistoceno y/o Holoceno la tendencia de hundimiento es tal que se ha invertido el proceso actual de encajamiento de los ríos en sus aluviones (según Singer (1977) citado en González de Juana (1980)).

En la parte oriental del valle de Caracas existen evidencias de una gran subsidencia dado que los estudios geofísicos realizados por *Weston Geophysical Engineer* (1969) muestran una profundización del basamento en el sector de Sebucán en Los Palos Grandes.

El mapa del tope de roca (basamento) señala dicha depresión de perfil transversal disimétrico, el relleno sedimentario alcanza un espesor de unos

300 m, sin embargo, esta característica de los sedimentos detríticos recientes del Valle de Caracas conduce a pensar que la subsidencia acelerada de la parte oriental del valle no explica por sí sólo la extensión excepcional de las formaciones holocenas (según Singer 1977 citado en González de Juana (1980)).

Por lo tanto se propone una serie de eventos extraordinarios de naturaleza hidrometeorológica que contribuyan con el relleno de la depresión.

Singer (1977) citado en González de Juana (1980) realiza diversas observaciones en las riberas del Río Guaire y halla que las terrazas que dominan las vegas del río presentan varios metros de espesores de “limo arenosos de desborde y capas de lodo holoceno que sepultan un paleosuelo del Pleistoceno perteneciendo a aluviones infrayacentes”.

Se señala que en el Holoceno reciente han ocurrido mecanismos de “sobrealuvionamiento anormales” (según Singer (1977) citado en González de Juana (1980)), que posiblemente están asociados a inundaciones de gran escala generados por el represamiento del cauce del Río Guaire.

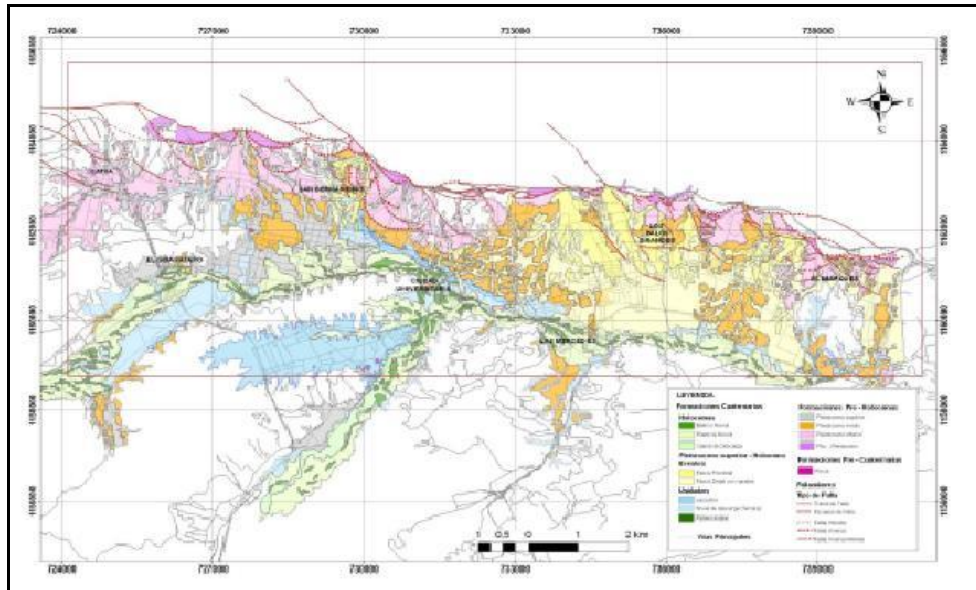


Figura 2.6 Mapa de Unidades Deposicionales Pleistocénicas y/o Holocénicas del Valle de Caracas (Singer 1977).

Es posible que un aporte de grandes volúmenes de sedimentos detríticos acarreados por las quebradas afluentes del Río Guaire efectúe un bloqueo del mismo, creando un represamiento de las aguas. Estas condiciones de baja energía permiten la depositación de sedimentos lacustres del tipo limo arenoso, denominados varvas lacustres.

Tales volúmenes de material transportado desde el macizo del Ávila se interestratifican en sus extremidades distales (facies distal de los abanicos aluviales) con los depósitos lacustrinos; es decir, dichos eventos son contemporáneos. Este fenómeno catastrófico está datado por yacimientos arqueológicos pre-colombinos descubiertos al oeste del Valle de Caracas con edades comprendidas entre años 1100 y 1500 D.C. (Holoceno reciente) (según Singer (1977) citado en González de Juana (1980)).

El complejo aluvial del Valle de Caracas corresponde a la ocurrencia de dos eventos consecutivos y relacionados entre sí. Estos fenómenos acontecen en un tiempo geológicamente corto y según Singer (1977) son:

Dos fases mayores de acumulación: donde la primera es muy violenta y conduce al abandono y desorganización de los sistemas de drenaje afluentes del Río Guaire (obturación del Río Guaire y la quebrada. Tócome). La segunda fase corresponde a los efectos de represamiento aluvial, entre otros.

De varias olas de erosión torrencial: corresponde al socavamiento lateral de los depósitos lacustres (depósitos de obturación anteriormente señalados). Estas terrazas son generadas rítmicamente al romperse los obstáculos creados por los aludes torrenciales.

Como menciona Singer (1977) en González de Juana (1980), estos eventos acontecen en un tiempo relativamente corto, por lo tanto es una aceleración de la morfogénesis en el conjunto aluvial del valle de Caracas. Este tipo de fenómenos se observan de forma similar en el piedemonte de cordillera de la Costa, desde el valle de Guarenas-Guatire hasta Valencia.

También cabe señalar que los primeros metros de sedimentos del Holoceno en el este de Caracas manifiestan facies de material grosero similares a escombros producto de aludes torrenciales (según Singer 1977 citado en González de Juana (1980)).

El trazado de la Línea 5 del Metro de Caracas (Figura 2.7) se extiende desde Zona Rental, pasando por la Estación Bello Monte, ubicado en las cercanías del Edificio de la Alcaldía del municipio Baruta, siguiendo por la Avenida Principal de Las Mercedes a través de las Estaciones Las Mercedes y

Tamanaco, para después de una curva hacia el norte encontrarse con los Fosos UNEFA ubicados en Chuao y luego pasar por Bello Campo y terminar finalmente en la Estación Miranda. La estación está emplazada parcialmente en un depósito aluvial de edad pleistocénica y/o Holocénica que corresponde a los antiguos sedimentos de la Quebrada de Baruta, comprendiendo depósitos de canal y de llanura de inundación, en una zona cercana a su afluencia con el Río Guaire. Estos depósitos sedimentarios se encuentran reposando directamente sobre los Esquistos Las Mercedes, en los cuales se pueden reconocer algunos esquistos grafitosos calcáreos, con planos de foliación que forman 45° con el eje de las perforaciones.



Figura 2.7 Trazado de la Línea 5 del Metro de Caracas.



Figura 2.8 Avance de la obra, estación Bello Monte



Figura 2.9 Avance de la obra, estación Bello Monte

CAPITULO III

MARCO TEÓRICO

3.1 Formaciones geológicas y su comportamiento frente al agua

González de Vallejo (2004) “Los acuíferos deben ser entendidos como formaciones geológicas subterráneas porosas y permeables, susceptible de almacenar y transmitir el agua. Así, cabe indicar que existe en la naturaleza una amplia gama de formaciones con capacidades muy diversas para almacenar y transmitir el agua. Desde el punto de vista hidrogeológico, estas formaciones suelen dividirse en cuatro grupos principales”.

3.1.1 Aguas subterráneas

Las aguas subterráneas son uno de los recursos más importantes y ampliamente distribuidos de la Tierra. Existen lugares donde las aguas penetran bajo la superficie y los suelos y las rocas son lo suficientemente porosas y permeables como para permitir su movimiento. Se pueden almacenar en los poros, las fisuras, fracturas o cavernas. El volumen de agua que infiltra debe ser suficiente para saturar un espesor de suelos y rocas apreciables, y pasar a ser un recurso aprovechable. (González de Vallejo 2004)



Figura 3.1 Condiciones naturales del agua.
(Enciclopedia Nicaragüense de Cuencas Hidrográficas, 2010)

3.1.2 Acuíferos

Intervalos litológicos capaces de almacenar y transmitir el agua (gravas, arenas, rocas calcáreas, entre otros); son formaciones con capacidad de drenaje alta en las que se pueden perforar pozos y otros tipos de obras, con el fin de satisfacer las necesidades humanas de abastecimiento, agricultura, industria, ganadería entre otros. (González de Vallejo, 2004)

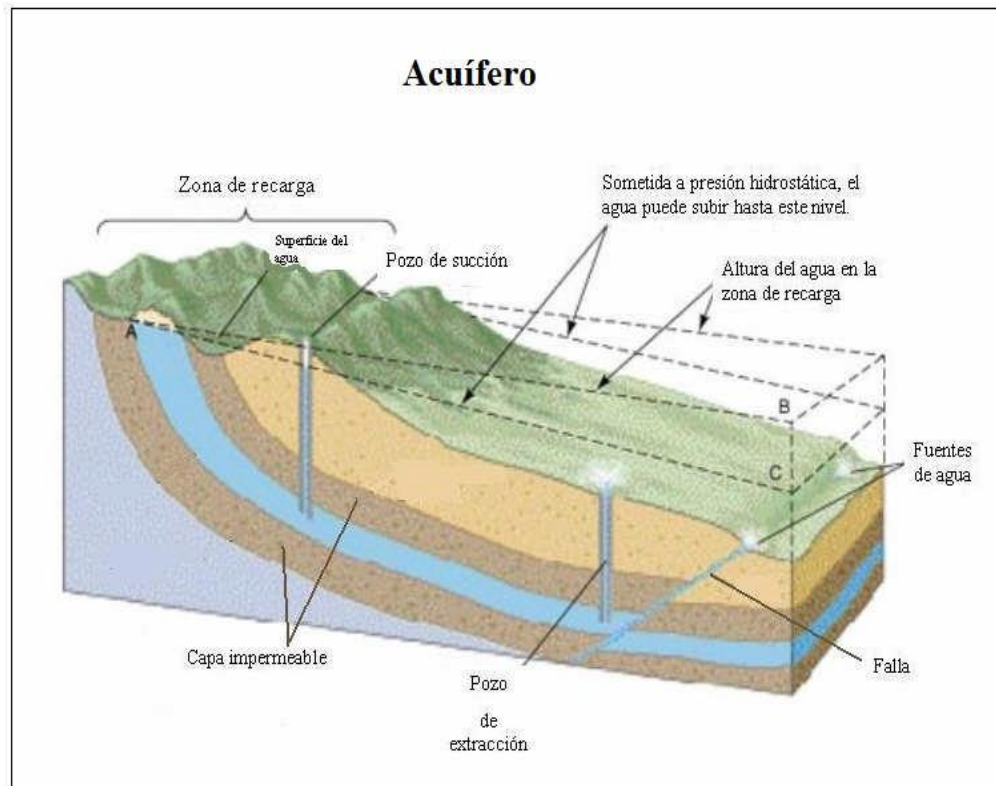


Figura 3.2 Acuífero (Modificado de Gibson, 1974).

3.1.3 Acuitardos

González de Vallejo (2004) “Son intervalos litológicos capaces de almacenar el agua en cantidades muy importantes, pero la transmiten con dificultad; se suelen denominar con frecuencia formaciones semipermeables (limos, arenas limosas, arenas arcillosas, entre otros), y su capacidad de drenaje es media a baja; no son de interés para la obtención de caudales que puedan satisfacer alguna necesidad hídrica, pero en la naturaleza son importantes como elementos transmisores del agua en recargas verticales a través de grandes superficies”.

3.1.4 Acuicludos

González de Vallejo (2004) “Son intervalos litológicos que pueden almacenar el agua en grandes cantidades, pero no tienen la posibilidad de transmitirla y se drenan con mucha dificultad; el agua se encuentra encerrada en los poros de las formaciones y no puede ser liberada (arcillas, arcillas plásticas, limos arcillosos, entre otros)”.

3.1.5 Acuifugos

Son formaciones incapaces de almacenar y transmitir agua; están representados por las rocas compactas, como granitos y gneises, y a veces incluso calizas muy compactas sin carstificar; se muestran como impermeables salvo que existan fracturas que pueden permitir flujos. (González de Vallejo, 2004)

3.2 Tipos de acuíferos

3.2.1 Según su textura

Desde el punto de vista de su textura existen fundamentalmente tres (3) tipos de materiales acuíferos, que se representan para su mejor comprensión en la figura 3.3.

3.2.1.1 Acuíferos porosos

Son intervalos litológicos cuya permeabilidad es debida a su porosidad intergranular; entre los cuales se encuentran las gravas, las arenas y, en general, todos los materiales detríticos con tamaño de grano equivalente al de la arena como mínimo. La textura del medio está constituida por granos

que permiten que el agua se almacene y circule por los huecos intergranulares; esos huecos pueden estar rellenos de material granular más fino, disminuyendo así las características del medio para el almacenamiento y transporte del agua, o incluso pueden estar rellenos de materiales arcillosos, dejando prácticamente anuladas estas características. (González de Vallejo, 2004).

3.2.1.2 Acuíferos cársticos y fisurados

Son aquellos cuya permeabilidad es debida a grietas y fisuras, tanto de origen mecánico como por disolución, y se encuentran entre ellos las calizas, dolomías, granitos, basaltos, entre otros. Los acuíferos cársticos son poco homogéneos a pequeña escala, pero pueden presentarse más homogéneos si la escala de trabajo es lo suficientemente amplia. (González de Vallejo, 2004).

3.2.1.3 Acuíferos cársticos y porosos

González de Vallejo (2004) Son aquellos cuya permeabilidad es debida al conjunto de causas de los acuíferos cársticos y fisurados, son típicas las calcarenitas.

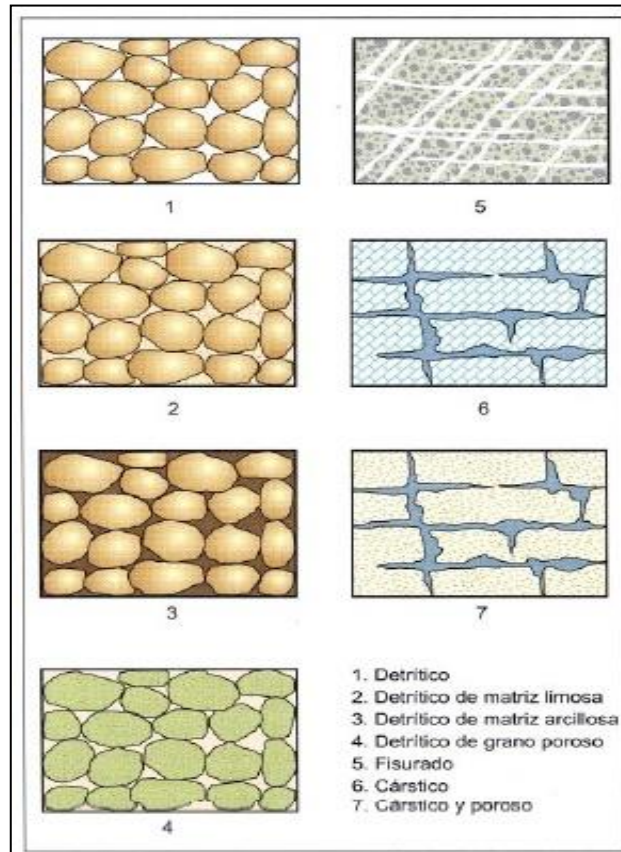


Figura 3.3 Tipos de acuíferos según su textura. Tomado de González de Vallejo 2004

3.2.2 Según sus circunstancias hidráulicas y estructurales

Los acuíferos según sus circunstancias hidráulicas y estructurales pueden funcionar en tres (3) distintas formas, las cuales se visualizan en las figuras 3.4, 3.5 y 3.6

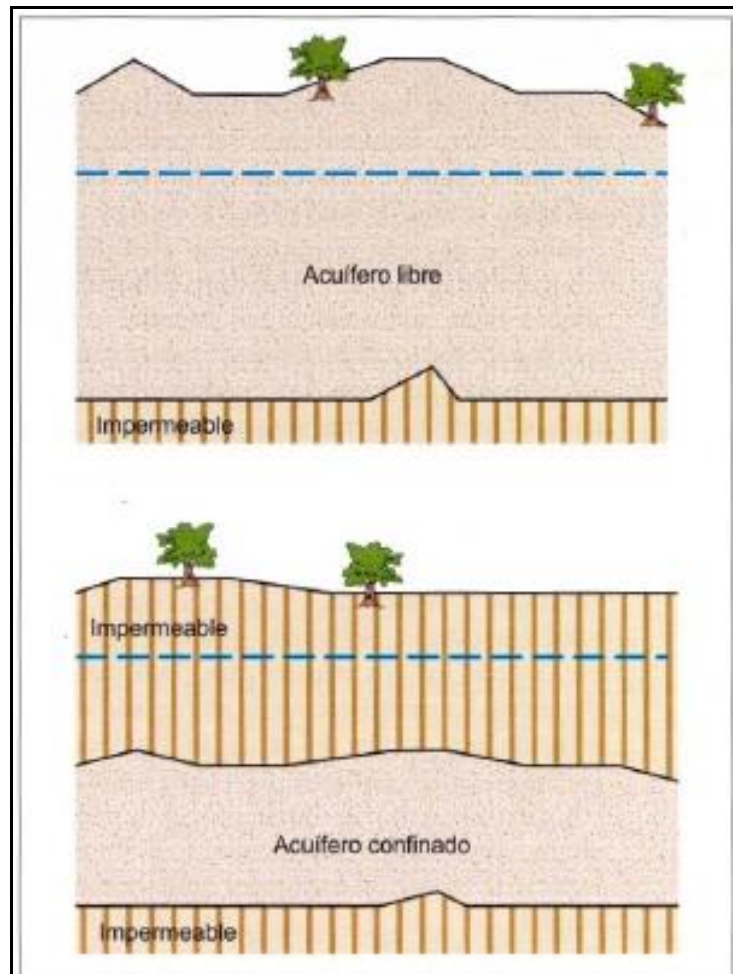


Figura 3.4. Acuífero libre y confinado. Tomado de González de Vallejo, 2004

3.2.2.1 Acuíferos libres

Es aquel acuífero que se encuentra en directo contacto con la zona subsaturada del suelo. En este acuífero la presión de agua en la zona superior es igual a la presión atmosférica, aumentando en profundidad a medida que aumenta el espesor saturado.

3.2.2.2 Acuíferos cautivos o confinados

Son aquellas formaciones en las que el agua subterránea se encuentra encerrada entre dos capas impermeables y es sometida a una presión distinta a la atmosférica (superior). Sólo recibe el agua de lluvia por una zona en la que existen materiales permeables, recarga alóctona donde el área de recarga se encuentra alejada del punto de medición, y puede ser directa o indirecta dependiendo de si es agua de lluvia que entra en contacto directo con un afloramiento del agua subterránea, o las precipitaciones deben atravesar las diferentes capas de suelo antes de ser integrada al agua subterránea. A las zonas de recarga se les puede llamar *zonas de alimentación*. Debido a las capas impermeables que encierran al acuífero, nunca se evidenciarán recargas autóctonas (situación en la que el agua proviene de un área de recarga situada sobre el acuífero), caso típico de los acuíferos semiconfinados y los no confinados o libres (freáticos).

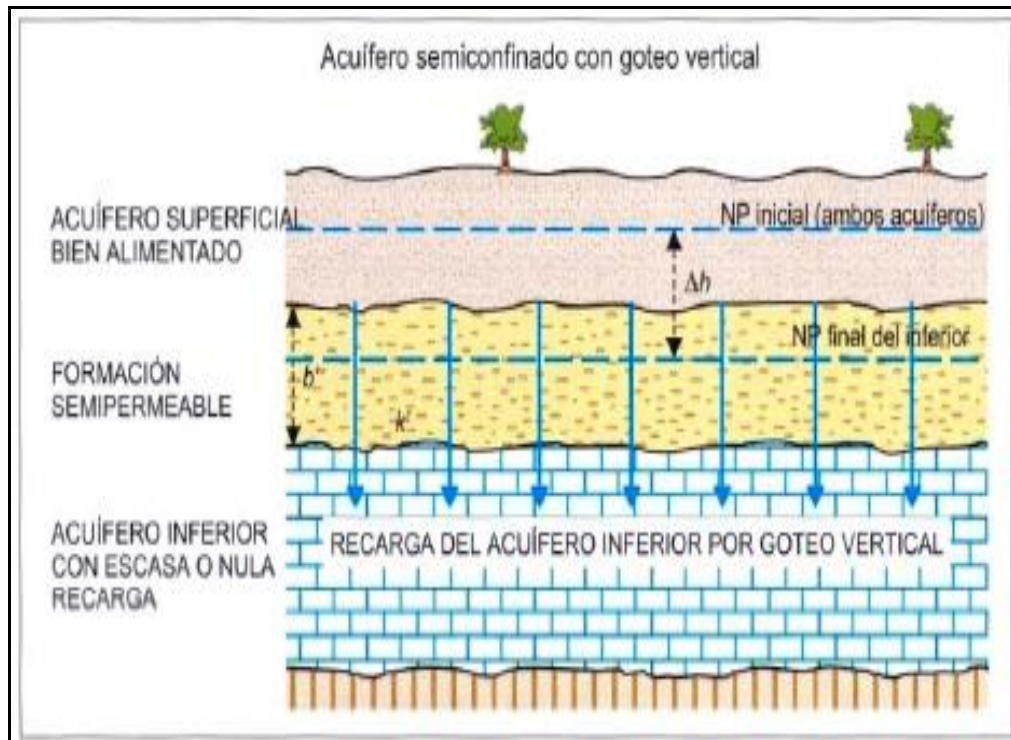


Figura 3.5 Acuífero Semiconfinado. Tomado de González de Vallejo 2004

3.2.2.3 Acuíferos semiconfinados

En estos casos, los materiales que los rodean no son todos impermeables; así, el paquete superior o semiconfinante lo constituye una formación semipermeable que permite el paso del agua de otros acuíferos superiores al inferior semiconfinado. La velocidad del movimiento del agua en estos acuíferos ante un bombeo es más moderada que en los cautivos y los radios de influencia tienen valores medios entre los libres y los cautivos. Un acuífero semiconfinado es un sistema físico integrado por un acuífero superior bien alimentado, un paquete semipermeable o acuitardo y un acuífero inferior semiconfinado; la diferencia de niveles entre el acuífero superior e inferior acarrea una transferencia de agua verticalmente que alimenta al acuífero inferior. (González de Vallejo, 2004).

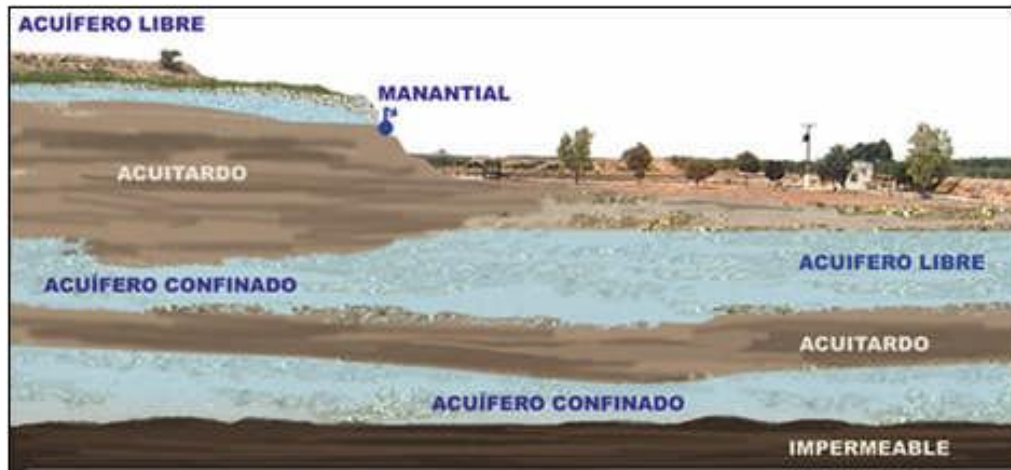


Figura 3.6 Tipos de acuíferos (Libro Digital del Agua, 2010)

3.3 Piezómetro

Es un pozo de pequeño diámetro que se utiliza para medir la presión de poros o nivel del agua en acuíferos, terraplenes, cañerías y estanques a presión y son empleados comúnmente en las obras de ingeniería, en las cuales se requiera mantener el control sobre el movimiento de las aguas en el área de influencia de la obra en cuestión.

3.4 Nivel freático

El nivel freático corresponde (en un acuífero libre) a la profundidad a la cual se encuentra el agua subterránea. En éste caso, la presión de agua del acuífero es igual a la presión atmosférica.

También se conoce como capa freática, manto freático, napa freática, napa subterránea, tabla de agua o simplemente freático.

Al perforar un pozo en un acuífero libre, el nivel freático es la profundidad a la que se encuentra el agua, medida desde la superficie del terreno. En el caso de un acuífero confinado, el nivel de agua que se observa en el pozo,

corresponde al nivel piezométrico, el cual es equivalente a la presión hidrostática a la cual está sometido el acuífero, en ese punto la imagen idealizada se muestra en la figura 3.7

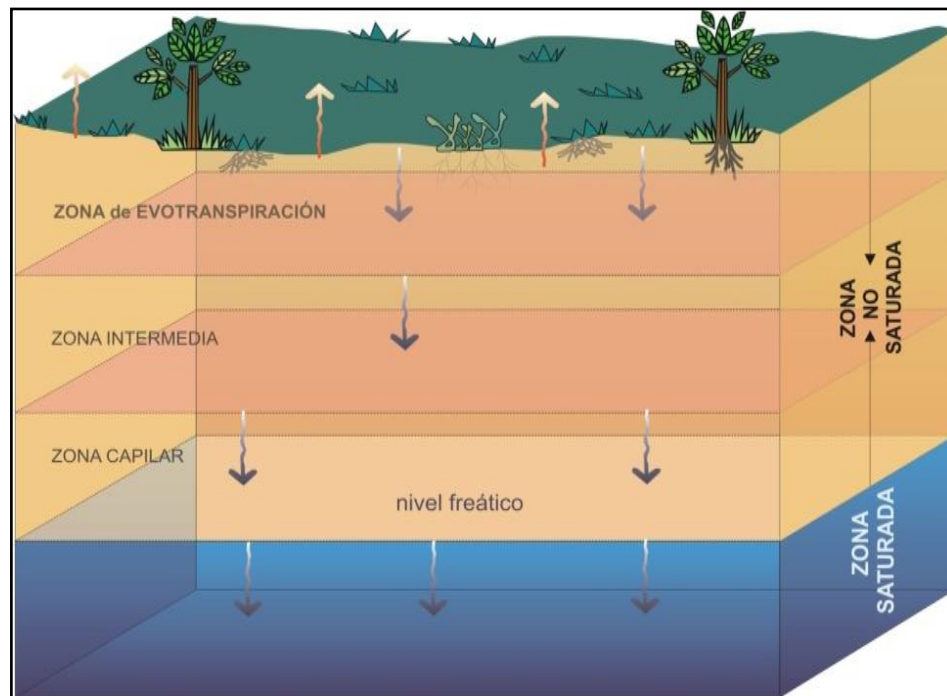


Figura 3.7 Posición del nivel freático en el subsuelo. Tomado de: <httpwww.google.co.veimgresimgurl=httpwww.miliarium.comproyectosnitratosdiccionarioDistribsuelo.jpg&imgrefurl>

3.5 Movimiento del agua en los acuíferos

González de Vallejo (2004) En el suelo y el subsuelo existen varias zonas donde el movimiento del agua tiene características propias y leyes particulares. Se pueden distinguir cuatro zonas: suelo, zona no saturada, zona capilar y zona saturada. En la figura 3.8 se representan dichas zonas y una orientación de los niveles piezométricos relativos en cada una de ellos.

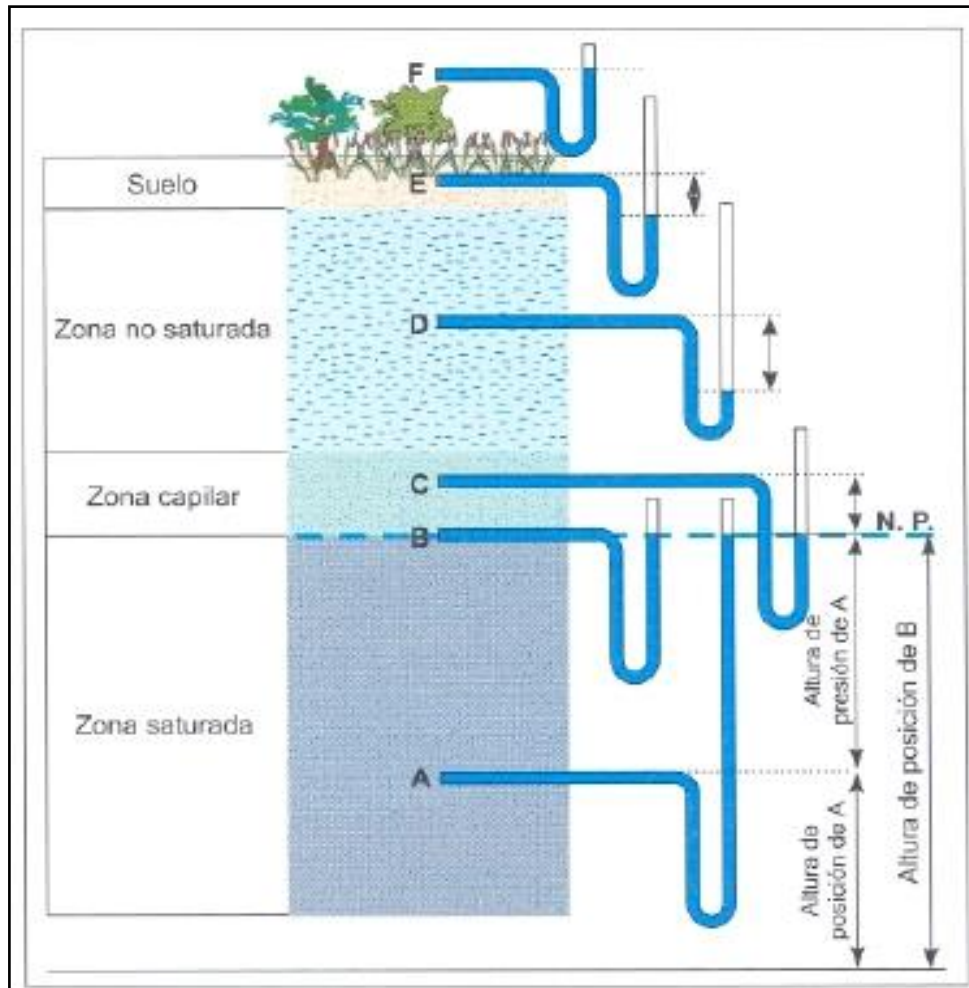


Figura 3. 8 Movimiento del agua y orientación de los piezómetros en el suelo y subsuelo.
Tomado de González de Vallejo, 2004

3.5.1 Movimiento del agua en el suelo

El suelo no es una materia compacta, si no todo lo contrario, está llena de huecos o cavidades por donde se mueve el agua. El suelo está compuesto por minerales, microorganismos y espacios por donde se mueve el agua o están ocupados por aire, elementos también esenciales para el crecimiento

de las plantas. Estas partículas minerales se pueden diferenciar fácilmente por su tamaño. Las partículas de arena y los espacios entre las mismas son las más grandes; seguidos del tamaño de las partículas de limo y finalmente, la arcilla contiene los espacios y partículas más pequeñas.

3.5.2 Movimiento del agua en la zona no saturada

El movimiento del agua en esta zona es gravitacional, y por tanto vertical descendente. En realidad, aunque su componente vertical es muy importante dependiendo de su posición dentro de esta zona y de circunstancias locales, puede ser alterado y tener otras componentes pero, a grandes rasgos, debe ser asumido el movimiento del agua como vertical descendente. También en esta zona existe absorción, y debido a las presiones negativas el nivel piezométrico es inferior a la altura. (González de Vallejo, 2004).

3.5.3 Movimiento del agua en la franja capilar

Es una zona de transición entre la zona no saturada y saturada debida a la absorción de la parte de formación acuífera situada inmediatamente encima de la zona saturada. En la parte superior de la franja capilar las bolsas de aire pueden constituir un freno al movimiento del agua es muy similar al movimiento del agua en la zona saturada. Debido a la absorción, el nivel piezométrico es inferior a la altura de posición. (González de Vallejo, 2004).

3.5.4 Movimiento del agua en la zona saturada isopiezas

El agua en la zona saturada se mueve de puntos de mayor a menor nivel piezométrico, es decir, de zonas de mayor a menor energía. En consecuencia el agua en la zona saturada puede moverse en sentido

horizontal y vertical ascendente o descendente, independientemente de la situación en cota de las formaciones, atendiendo únicamente a la energía que tenga en cada punto del espacio.

3.6 Nivel Piezométrico

Es la altura de la superficie libre de agua sobre el nivel del mar, en los acuíferos libres. En los confinados, es la altura que alcanzaría el agua en el interior de un sondeo hasta equilibrarse con la presión atmosférica (Bosch, 2007).

3.7 Mapas piezométricos

Son la representación cartográfica de la superficie piezométrica de un acuífero, contruidos por la interpolación de medidas puntuales de la carga hidráulica en diferentes puntos (Bosch, 2007).

3.8 Permeabilidad

(González de Vallejo, 2004) La permeabilidad es el parámetro que permite evaluar la capacidad de transmitir agua de una formación en función de la textura de la misma, sin relacionarla con su estructura o forma geométrica.

La Permeabilidad *efectiva* o conductividad hidráulica está representada por el coeficiente de permeabilidad k , está ligada tanto a las características texturales del medio físico como del fluido que transmite.

La permeabilidad *efectiva* k se define como el caudal que es capaz de atravesar una sección unitaria del acuífero, normal al flujo, bajo un gradiente piezométrico unitario. Depende, en consecuencia, tanto de las características del medio físico (acuífero), como de las del fluido que lo atraviesa (agua).

Técnicamente, el coeficiente de permeabilidad de Darcy, K , es el volumen de agua libre que percola durante la unidad de tiempo a través de la unidad de superficie de una sección total del acuífero bajo un gradiente hidráulico igual a la unidad, a la temperatura de 20°C. Evidentemente, la permeabilidad K depende de las condiciones del suelo y de las características del fluido tales como: forma, tamaño disposición de los granos, viscosidad y densidad del fluido. (Castany, 1975 en González de Vallejo 2004).

Según la fórmula de Darcy, la permeabilidad viene dada por:

$$K = Q / (I \times A) \dots\dots\dots Ec (1)$$

Donde:

K = Permeabilidad (m/día)

Q = Caudal (m³/día)

I = Gradiente Hidráulico (adimensional)

A = Superficie de la sección flujo (m²)

Permeabilidad (m/día)	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	1	10	10 ²	10 ³
Clasificación	Impermeable		Poco Permeable	Algo Permeable		Permeable		Muy Permeable		
Clasificación del Acuífero	Acuífero		Acuífero	Acuífero Pobre		Acuífero Regular a Bueno		Acuífero Excelente		
Tipo de Material	Arcilla Compacta		Limo Arenoso	Arena Fina		Arena Limpia				
	Pizarra		Limo	Arena Limosa		Grava y Arena		Grava Limpia		
	Granito		Arcilla Limosa	Caliza Fracturada		Arena Fina				

Tabla 3.1.- Clasificación de Terrenos de acuerdo a su Conductividad Hidráulica. Tomado de: Mejias & Guerrero (2000).

3.9 Balance Hídrico

Con el balance hídrico se establece en base a la información suministrada por las estaciones climatológicas ubicadas en la zona de interés, permitiendo conocer los meses en donde el agua, a través de la precipitación la recarga del acuífero por efectos de la infiltración vertical, (Castany (1969).

Para realizar un balance hídrico superficial es necesario conocer no solo los procesos o caminos que sigue el agua en el suelo, sino también las características fisiográficas, edafológicas y biológicas del lugar en los cuales ellos se desarrollan.

Este concepto de balance hídrico está siempre relacionado con el ciclo hidrológico, en donde se tiene en cuenta la distribución y el movimiento del agua, bajo y sobre la superficie del suelo (Camacho, 2009).

La formula básica del balance hídrico superficial es:

$$P = ETR + Esc + I \quad Ec (2)$$

Donde:

P = Precipitación media anual (mm) (Volumen agua precipitada)

ETR = Evapotranspiración real media anual (mm) (Volumen evaporado + Volumen transpirado por los seres vivos).

Esc = Escorrentía superficial media anual (mm) (Volumen de agua que escurre superficialmente).

I = Infiltración eficaz al manto acuífero (mm).

3.9.1 Precipitación

La precipitación, es agua liberada desde las nubes en forma de lluvia, aguanieve, nieve o granizo. Es el principal proceso por el cual el agua retorna a la Tierra. La mayor parte de la precipitación cae como lluvia (Molina, 2006).

3.9.2 Infiltración

Es el movimiento descendente del agua desde la superficie de la Tierra hacia el suelo o las rocas porosas. El agua subterránea comienza como precipitación, una porción del agua que cae como precipitación y nieve se infiltra hacia el suelo subsuperficial y hacia las rocas. La cantidad infiltrada depende de un gran número de factores. Parte del agua que se infiltra, permanece en las capas más superficiales del suelo y puede volver a entrar a un curso de agua debido a que se filtra hacia el mismo.

3.9.3 Escurrimiento

El escurrimiento es la parte del agua precipitada que conforma las corrientes fluviales superficiales, perennes, intermitentes o efímeras, y que regresa al mar o a los cuerpos de agua interiores. Indicado de otra manera, es el movimiento natural del agua, que no ha sido afectada por obras artificiales hechas por el ser humano (Molina, 2006).

3.9.4 Evapotranspiración potencial (ETP)

Existe acuerdo entre los diversos autores al definir la ETP, concepto introducido por Thornthwaite (1948), como la máxima cantidad de agua que puede evaporarse desde un suelo completamente cubierto de vegetación,

que se desarrolla en óptimas condiciones, y en el supuesto caso de no existir limitaciones en la disponibilidad de agua. Según esta definición, la magnitud de la ETP está regulada solamente por las condiciones meteorológicas o climáticas, según el caso, del momento o período para el cual se realiza la estimación.

3.10 Prospección geofísica

Según Ing. Guzmán R. (2009). “La prospección Geofísica consiste en inferir la estructura geológica del subsuelo a través de la medición de algunas de sus propiedades físicas. Dentro de la susceptibilidad de medición de las propiedades desde la superficie y su distribución espacial, se pueden mencionar la resistividad eléctrica del subsuelo, velocidad de propagación de ondas, densidad y susceptibilidad magnética entre las más importantes”.

La expresión exploración geofísica es usada de forma intercambiable con las expresiones: métodos de prospección geofísica, geofísica aplicada e incluso, aunque de forma muy poco frecuente, ingeniería geofísica”

3.11 Sísmica de sondeo

González de Vallejo, (2004) La sísmica de sondeo se realiza dentro de pozo revestido, de una sonda triaxial que registra los tiempos de llegada de las ondas P y S, a partir de los cuales se calculan las velocidades de transmisión y los módulos de deformación dinámicos del terreno. Estas constantes dependen de la velocidad de las ondas elásticas longitudinales, V_p , y transversales, V_s , y de la densidad del material, ρ .

El cálculo de la velocidad de las ondas P a partir de la sísmica de refracción desde superficie es una práctica habitual, utilizando para ello las

dromocronicas de los perfiles sísmicos. Las dificultades aparecen en la localización de la llegada de las ondas S en los sismogramas; para mejorar la recepción e identificación se utilizan básicamente dos (2) técnicas que se aplican en el interior de sondeos y que se denominan *down-hole* y *cross-hole*. Tanto los sensores como los instrumentos y la propia inducción de la señal para generar la onda exigen una cierta experticia para trabajar en el interior del sondeo y recoger de forma adecuada las ondas transversales o de cizalla. A continuación se describen las técnicas de investigación empleadas habitualmente”.

3.11.1 Cross-Hole

Se realiza entre dos (2) o tres (3) sondeos próximos. En dos (2) de ellos se introduce la sonda triaxial a distintas profundidades y en el otro se introduce la fuente emisora también a profundidad variable (fig.3.9). El resultado es una sección de las diferentes velocidades del terreno entre los sondeos. (González de Vallejo, 2004).

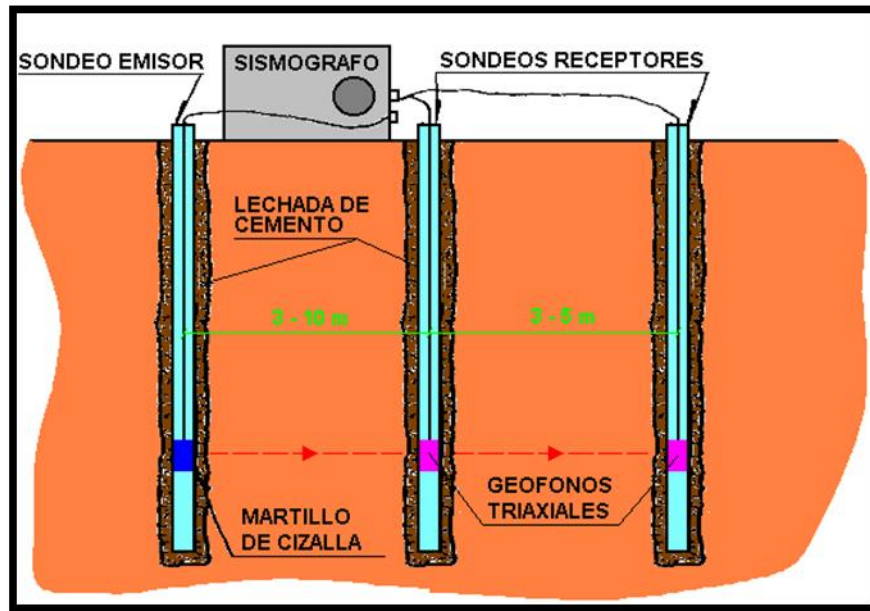


Figura 3.9 Ensayo Cross-Hole

3.11.2 Down-Hole y Up-Hole

Se lleva a cabo en un único sondeo en el que la sonda triaxial se dispone a distintas cotas, generalmente con un espaciado regular entre ellas, procediendo a realizar las ondas emisoras desde la superficie del sondeo (*down-hole*) o desde el fondo (*up-hole*). Los impulsos en superficie se realizan por emisión de onda lateral sobre un cuerpo fijado al suelo con un peso que lo inmoviliza. Se obtiene un perfil de velocidades del terreno.

El geófono que se emplea tiene tres (3) componentes, dos (2) dispuestas horizontalmente y ortogonales entre sí, y una tercera vertical. Esta configuración permite identificar la llegada de las ondas S, por comparación de los sismogramas recibidos en la misma componente, pero procedente de emisión de señal en direcciones contrarias. Identificado el tiempo de llegada de las ondas P y S, la representación de curvas tiempo-distancia

(dromocronicas), permite calcular las velocidades V_p y V_s , y, a partir de ellas, el modulo de Young y el coeficiente de Poisson. (González de Vallejo, 2004).

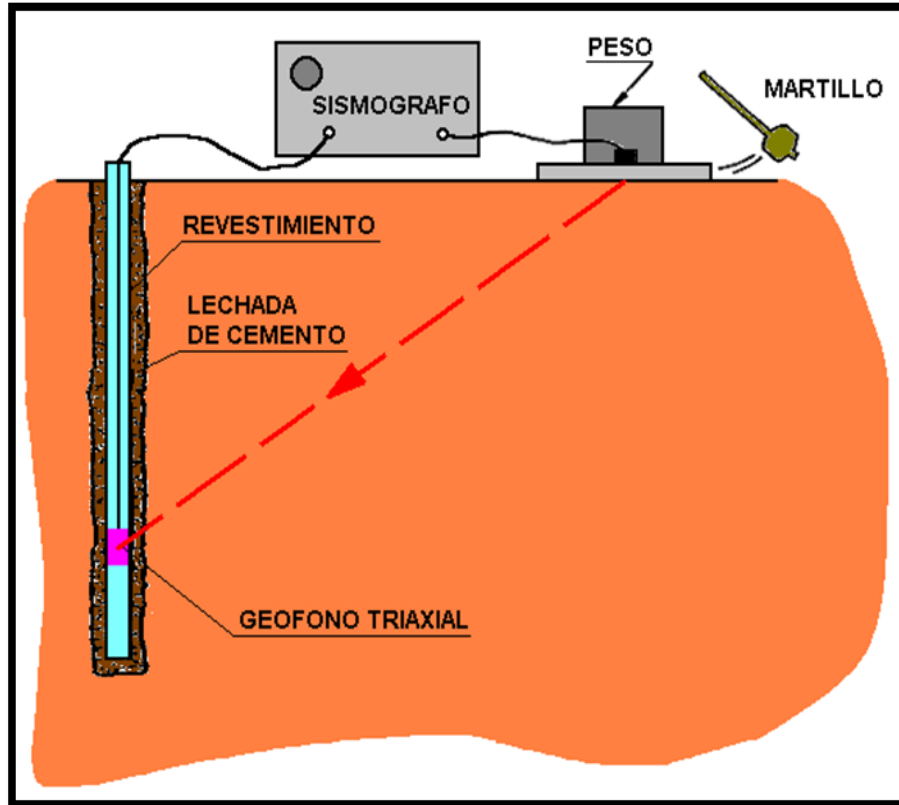


Figura 3.10 Ensayo Down-Hole

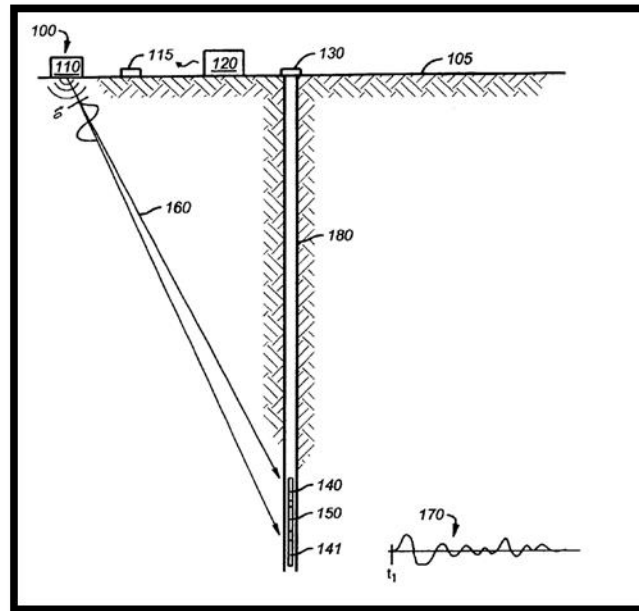


Figura 3.11 Ensayo de Up-Hole

3.11.3 Método de refracción de Microtremores (ReMi)

Este método desarrollado por Louie (2001) de la Universidad de Nevada, se basa en el análisis e inversión de la curva de dispersión de las ondas Rayleigh, obtenida a partir de los registros del ruido ambiental. Esto permite obtener un modelo unidimensional de las velocidades de onda “S” de la zona de estudio.

Utilizando un arreglo típico para ensayos de refracción puede, efectivamente, grabar ondas superficiales de frecuencias tan bajas como 2Hz y tan altas como 26Hz. Con este rango de frecuencias, se pueden conseguir perfiles de velocidad a distintas profundidades. Luego aplicando una simple transformación del registro puede separar ondas *Rayleigh* de otras llegadas sísmicas, y permitir identificar la velocidad de fase entre otras velocidades aparentes (Louie, 2001).

Esta herramienta es muy útil para la caracterización de sitios y evaluación de terrenos, ya que permite obtener la velocidad de onda “S” (V_s) en ambientes urbanos con mucho ruido ambiental. Esto permite realizar estudios en lugares en los cuales hubiese sido imposible realizar mediciones con métodos como la sísmica de refracción. El ReMi tiene entre otras ventajas que es económico, es de fácil aplicación (se requieren los mismos implementos que para un tendido de refracción) y no es necesaria una fuente artificial aunque se puede agregar ruido corriendo a lo largo del tendido o utilizando una mandarina u otra fuente para obtener mejores resultados. (Tomado de Jorge Alejandro Skrainka Fabbiani 2009).

3.11.4 Vibraciones Naturales

Según TRX *consulting*, (2009), las vibraciones naturales o movimientos de las partículas del subsuelo son ocasionadas por ondas que se propagan en ese medio. Estas ondas son producidas por cualquier fuente que introduzca una perturbación en el medio, por lo que pueden ser someras, profundas o incluso ruido ambiental. Ésta última es considerada como ruido sísmico desde el punto de vista prospectivo, sin embargo la respuesta del medio ante tal perturbación permite inferir algunas características importantes del mismo. El estudio de las vibraciones ocasionadas por ruido sísmico de corto periodo revela direcciones preferenciales de movimientos, lo cual permite determinar las características del suelo en cuanto a frecuencias de resonancia y amplificación del movimiento. Esto permite establecer métodos más eficientes y económicos de micro zonificación conocidos como el Método de Nakamura y H/V.

El parámetro de interés para evaluar la respuesta del sitio, es el periodo natural (fundamental) del sitio (o su frecuencia natural). Éste se determina a través de las mediciones naturales en el sitio y estas mediciones corresponden a la variación de la velocidad de las partículas, la cual se vincula directamente con el tiempo de viaje de la onda y la composición litológica presente. El periodo fundamental permite aportar informaciones relativas a la microzonificación en término del comportamiento dinámico de los suelos. Con la finalidad de obtener una evaluación del sitio y un análisis espacial de la vibración del parámetro de interés, se realizan mediciones en lugares diferentes del terreno a investigar. (TRX consulting, 2009).

3.12 Modelos hidrogeológicos

La modelación consiste en encontrar la descripción matemática más coherente de un medio (un acuífero). El modelo hidrogeológico es la herramienta básica de la modelación. Se trata de un ente matemático que reproduce algún aspecto del funcionamiento del sistema acuífero, por ejemplo, la entrada/salida de agua subterránea o los niveles de agua subterránea. En general, podemos distinguir tres componentes básicos de un modelo hidrogeológico:

Parámetros, condiciones de contorno e iniciales, y ecuaciones básicas.

Los parámetros son propiedades cuantificables del medio que caracterizan su comportamiento hidrogeológico.

Las condiciones de contorno describen el comportamiento de la variable del sistema (niveles piezométricos o flujos de agua) en el contorno del dominio mientras que las condiciones iniciales indican el estado del sistema en el instante en que empieza la “contabilidad”.

Los modelos se pueden clasificar en dos tipos: los analíticos y los numéricos.

Los modelos analíticos son soluciones explícitas del problema matemático.

Los modelos analíticos proporcionan la solución directa a las ecuaciones básicas del modelo hidrogeológico.

En términos generales, el modelo conceptual sintetiza las condiciones básicas del estado y dinámica de las aguas subterránea en el subsuelo y sus relaciones con los cuerpos de agua superficial y los aportes atmosféricos. Se realiza con base en el análisis e interpretación de información geológica, hidrológica, hidráulica, hidroquímica e isotópica, que permite tener una visión del comportamiento de los acuíferos o sistemas acuíferos de un área dada a la escala deseada (Ideam, 2010)

CAPITULO IV

METODOLOGÍA

El procedimiento metodológico usado para efectuar la caracterización hidrogeológica del sector que nos ocupa del Proyecto de Transporte masivo de la Línea 5 del Metro de Caracas en la Estación Zona Rental- Bello Monte, Venezuela, fue dividido en tres etapas, partiendo con la etapa de pre-campo, campo y finalmente post-campo, las cuales a continuación se presenta de forma detallada su metodología aplicada.

4.1 Etapa de Pre-campo

Se fundamenta en la recolección, procesamiento y reinterpretación de la información bibliográfica y cartográfica de interés, referente al área de estudio, manejándose así aspectos referentes a la ubicación, topografía, geología y vías de acceso de la zona, etc.

4.1.1 Revisión y recopilación de información

Se procedió a efectuar una recopilación de información, técnica, bibliográfica, cartográfica y hemerográfica relevante y de todas las fuentes de datos posibles, que sirviesen de soporte y fuente de información geográfica, geológica, y social de la zona.

La revisión bibliográfica se basó fundamentalmente en tesis, trabajos finales de grados, informes inéditos o trabajos realizados por empresas como *ODEBRECHT*, *TRX consulting*, *C.A Metro De Caraca* e información climática suministrada por la Estación Hidrometeorológica de la UCV.

En cuanto a la información cartográfica se emplearon:

Mapa topográfico. Hoja número 6847 III NE El Cafetal, 6847 III NO El Valle, 6847 IV SE Los Chorros, 6847 IV SO 23 de Enero, a escala 1:25.000 (misión 030198, 1975), suministrado por el IGVSB.

Mapa topográfico. Hoja número G 45 (1975) a escala 1:5.000 (misión 030198, 1975), suministradas por el IGVSB, así como mapas geológicos incluidos en publicaciones geológicas o tesis de grado del área de estudio.

4.2 Etapa de Campo

Para el buen desempeño de esta etapa se contó con un equipo de materiales, tales como la libreta de campo para registrar todas las actividades realizadas, así como también mapas, brújula, casco de seguridad, martillo geológico, recipientes plásticos, hojas, lápices, cámara, botas de seguridad y cinta plástica, con el propósito de explorar el área de estudio, ubicar, delimitar, muestrear, describir y comparar rasgos geológicos, hidrogeológicos y geofísicos.

4.2.1 Inventario de pozos

Para realizar esta actividad, fue necesario proceder al reconocimiento preliminar del área para la ubicación geográfica y descripción de cada uno de los pozos encontrados, en los cuales se tomaron como datos las coordenadas U.T.M (norte y este) y altitud en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m), para esto se utilizó un GPS, la brújula y como referencia los mapas topográficos y geológicos, además se contó con información suministrada por la empresa *ODEBRECHT*, tal como profundidad (m), diámetro (pulg), estado actual y identificación de cada uno de los pozos.

Toda esta información sirvió como base para realizar el inventario de 17 pozos (tabla 4.1).

INVENTARIO DE POZOS							
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA							
		Coordenadas U.T.M			CARACTERISTICA DEL POZO		Inf. Complementaria
POZO	NORTE (m)	ESTE(m)	m.s.n.m	Prof. (m)	Diam. (pulg)	ESTADO DEL POZO	Análisis Físicoquímico
BEL-1	-1.819.504	6.612.732	853.113	16	13	Activo	X
BEL-2	-1.821.342	6.665.369	851.942	16	13	No Activo	
PB-01	-1.784.757	6.643.280	851.537	16	13	No Activo	
PB-02	-1.789.333	6.653.459	851.575	16	13	No Activo	
PB-03	-1.792.497	6.658.041	851.602	16	13	No Activo	
PB-04	-1.797.251	6.663.541	851.648	16	13	No Activo	
PB-05	-1.798.412	6.673.156	851.674	16	13	No Activo	
PB-06	-1.821.896	6.675.489	851.930	16	13	No Activo	
PB-07	-1.828.823	6.653.622	851.942	16	13	Activo	X
PB-08	-1.832.705	6.645.732	853.103	16	13	Activo	
PB-09	-1.835.292	6.634.061	853.291	16	13	No Activo	
PB-10	-1.827.959	6.629.009	853.187	16	13	Activo	X
PB-11	-1.823.671	6.623.543	853.077	16	13	Activo	X
PB-12	-1.819.739	6.618.244	852.739	16	13	Activo	X
PB-13	-1.795.416	6.616.246	852.816	16	13	No Activo	
PB-14	-1.795.833	6.629.699	853.113	16	13	No Activo	
PB-15	-1.791.612	6.637.264	85.176.813	16	13	No Activo	

Tabla 4.1 Inventario de los pozos de bombeo.

De los 17 pozos ubicados en el área de estudio se tomaron muestras de agua a 5 de ellos, para realizarles los respectivos análisis fisicoquímicos, de acuerdo a las siguientes pautas:

Se utilizaron envases plásticos para las pruebas fisicoquímicas, como se muestra en la (Figura 4.1)

Para tomar las muestras se abrió totalmente la llave de distribución del pozo durante dos (2) minutos, para expulsar el agua acumulada en las tuberías. (Figura 4.2)

Se reguló el flujo de agua procediendo al llenado de los envases, los cuales debieron permanecer cerrados hasta el momento de la captación.

Para tomar las muestras de análisis fisicoquímicos, la botella a utilizar se enjuagó tres (3) veces con el agua del pozo que estaba siendo muestreado, con el fin de curar o eliminar residuos que puedan alterar los resultados finales.

Se identificó cada una de las muestras destacando, el sector, el pozo, las coordenadas, la fecha y hora en que se tomó la muestra.

Las muestras, para análisis fisicoquímicos fueron llevadas al Laboratorio del Metro de Caracas Patios y Talleres de la Línea 1 ubicada en Propatria Caracas. Municipio Libertador Distrito Capital, donde fueron analizadas las siguientes propiedades: conductividad eléctrica, PH, total de sólidos disueltos, cloruros y sulfatos.



Figura 4.1 Muestras de Agua. Tomado por la autora.



Figura 4.2 Tanque donde descargan las bombas de Aguas. Tomado por la autora.

4.3 Etapa Post-campo

Ahora bien, con los datos recabados en la etapa previa se procedió al análisis correspondiente de los mismos y posteriormente se integró con la información obtenida en la etapa de pre-campo y la generada en la fase de post-campo, para elaborar el modelo hidrogeológico conceptual del acuífero. Para llevar a cabo esta etapa se subdividió de la siguiente manera:

4.3.1 Etapa de laboratorio

Esta se inició con el envío de las muestras de agua tomadas al laboratorio de C.A Metro de Caracas Propatria, para la determinación de sus características fisicoquímicas, en base a las cuales tratar de conocer la trayectoria que han tenido esas aguas y adicionalmente, establecer su aptitud para el consumo humano. Con tales fines se tomaron en cuenta los siguientes parámetros: cloruros, sulfatos, total de sólidos disueltos (TSD), PH, y conductividad eléctrica (Tabla 4.2).

Pozo	Norte	Este	TSD (mg/l)	PH	Cloruros Ppm	Sulfatos Ppm	Conductividad ms/cm
BEL-01	-1819.504	6612.732	352	6.75	37.22	32.60	0.719
PB-07	-1828.823	6653.622	331	8.28	22.27	3.33	0.645
PB-10	-1827.959	6629.009	328	7.07	40.77	30.94	0.670
PB-11	-1823.671	6623.543	345	7.21	38.99	31.74	0.706
PB-12	-1819.739	6618.244	355	7.11	40.54	32.38	0.725

Tabla 4.2 Parámetros del Agua Medidos en Laboratorio.

4.3.2 Etapa de oficina

Se refiere al procesamiento e interpretación integrada de los datos y resultados obtenidos. Para ello fue necesario subdividirla en:

4.3.2.1 Elaboración del Balance hídrico

Para realizar esta fase se contó con datos hidrometeorológicos (Precipitación en mm y temperatura en °C) de la zona de estudio, que para este caso son provenientes de la Estación Meteorológica de La UCV indicativo NAC: 0539, Latitud 10°29'41" N, Longitud 66°53' W y Elevación de 884,69m.s.n.m, con un período de registro de 20 años (1981-2000), los cuales se muestran en la tablas 4.3 y 4.4.

TEMPERATURA MEDIA MENSUAL °C												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1981	25.9	26.9	27.3	27.0	26.5	26.0	25.8	26.1	26.5	27.2	27.4	26.9
1982	26.4	26.6	27.2	28.1	28.6	26.7	25.3	24.6	25.5	25.9	25.8	25.8
1983	25.4	26.0	27.5	28.5	28.0	27.4	27.1	27.6	28.1	27.8	27.4	27.6
1984	27.1	27.4	28.0	27.8	27.3	26.7	25.9	25.8	25.8	26.0	25.4	24.8
1985	23.0	22.9	23.7	23.7	27.3	25.7	24.5	24.7	25.0	25.0	24.8	23.6
1986	24.4	25.9	26.7	26.8	27.0	26.0	25.5	26.4	26.2	26.2	25.7	24.8
1987	24.0	25.4	26.8	27.8	28.0	27.8	29.5	28.8	27.7	27.9	28.4	28.3
1988	27.2	27.4	28.1	29.3	29.0	28.4	27.3	27.6	28.8	28.3	26.6	25.6
1989	25.0	24.4	24.5	24.7	25.0	28.8	29.3	30.5	31.1	31.9	29.5	26.3
1990	26.4	26.6	27.3	28.2	28.1	27.2	26.5	26.2	26.7	27.5	27.2	26.5
1991	26.1	26.3	26.8	27.5	28.0	27.0	27.0	26.3	26.8	26.5	26.8	26.0
1992	25.8	26.4	27.0	28.1	29.0	27.4	26.1	26.3	26.7	27.2	26.9	26.4
1993	26.1	26.5	27.2	28.5	28.7	27.5	26.6	26.3	26.2	26.3	25.8	24.9
1994	24.7	25.1	26.0	26.7	27.3	26.5	26.1	26.1	26.6	26.9	26.5	25.6
1995	25.5	25.0	26.2	28.5	28.6	27.7	26.6	26.9	27.5	26.8	26.7	26.8
1996	25.7	26.7	27.4	28.0	28.1	27.1	26.4	26.5	27.5	27.2	26.9	26.7
1997	26.5	26.1	26.4	27.7	28.5	27.7	26.9	26.6	28.2	28.1	27.2	26.6
1998	26.6	27.6	27.3	29.3	28.9	28.2	26.8	27.7	27.7	27.5	27.4	27.1
1999	26.4	26.5	27.2	27.8	28.5	27.7	26.8	26.6	27.1	26.7	27.1	26.3
2000	25.9	25.9	25.9	27.0	26.2	24.1	26.2	25.1	26.1	27.4	27.2	26.2

Tabla 4.3. Valor de temperaturas para los años comprendidos 1981-2000. Tomado de la estación Meteorológica UCV.

PRECIPITACION TOTAL MENSUAL mm												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1981	20.1	129.5	5.3	319.3	142.7	106.7	125.6	172.6	129.2	45.6	4.4	15.6
1982	37.8	14.2	7.8	39.5	105.7	136.4	61.5	33.8	120.4	48.7	1.7	10.5
1983	42.6	2.5	0	55.4	101	108.8	60.1	91.1	84.9	97.9	17.4	0.3
1984	34.6	28.9	0	48.3	43.3	29.9	185.4	51.4	173.3	171.5	84.1	5.2
1985	2.0	8.4	45.3	73.9	71.6	70.7	111.5	103.5	104.6	89	150.7	125.6
1986	2.6	2	1.8	64.8	85	103	20.5	114	87	106.8	79.8	21.5
1987	36.8	0.3	0	0.5	285.4	48	101.3	197.8	120.8	162.5	130.8	39.6
1988	8.8	11	3.5	18	37.5	247	61.8	134	150	319.1	124.6	50.5
1989	5.6	2.5	5.5	15	176	82	123.5	125	190.1	15.8	140.8	3.5
1990	10.1	26	0	48.5	134.6	154	126.5	143.8	190.9	185.5	82.5	28.5
1991	11.5	1	59	47.8	6	72.5	54	176.9	129	22.5	234.2	22.8
1992	5	2	0	66	103	144.6	112.5	83.7	87.8	21.9	120.6	56.5
1993	29.4	5	5.2	88.8	136.1	130.9	120.7	240.2	77.5	41.2	140.5	40.4
1994	0	4	0	17.9	47	69.6	109.6	79.6	68.6	308.5	83.4	37
1995	2.5	0	129.2	72.9	24.7	109.9	111.6	114.1	89.4	218.5	76.6	5
1996	37.3	0	0.2	0	54.5	143.1	322.9	140.5	116.8	237.5	193.2	156.9
1997	41	30.8	0.2	18.6	38.3	118.3	131.2	53.1	80.3	168.5	36.1	8.5
1998	0.4	0	58.7	44.3	163.2	187.9	83.6	108	60.1	81.5	101	50.1
1999	12.4	25.6	9.5	133.6	20	70.6	125.9	152.3	122.8	203.5	60.2	189.4
2000	47.8	32.1	40.4	4.1	75.4	79.3	119.1	93.7	197.1	94	127.2	19.4

Tabla 4.4 Valor de Precipitación para los años comprendidos 1981-2000. Tomado de la Estación Meteorológica UCV.

Aunque el balance hídrico se puede realizar por varios métodos, en esta ocasión se aplicó el método establecido por Custodio y Llamas (2001).

$$\text{Recarga por precipitación} = P - (\text{ETR} + \text{Esc}) \dots \dots \dots \mathbf{Ec (4.1)}$$

Donde:

P = Precipitación.

ETR = Evapotranspiración Real.

Esc = Escorrentía.

4.3.2.1.1 Cálculo de la Escorrentía

La escorrentía se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Esc} = P \times C_e \dots\dots\dots \text{Ec (4.2)}$$

Donde

Esc = Escorrentía.

P = Precipitación.

Ce = Coeficiente de Escorrentía.

La escorrentía depende de tres parámetros: Cobertura vegetal, tipo de suelo y pendiente del terreno, los cuales se pueden apreciar en la tabla 4.5.

La cobertura vegetal y tipo de suelo es determinado directamente por observaciones en campo; éstas varían dependiendo de la época del año.

Cobertura	Tipo de suelo	Pronunciada	Pendiente del Terreno		Suave	Pronunciada
			Alta	Media		
		50%	20%	5%		1%
Sin	Impermeable	0	0.75	0.7	0.65	0.6
vegetación	Semipermeable	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
	Permeable	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3
	Impermeable	0.7	0.65	0.6	0.55	0.5
Cultivos	Semipermeable	0.6	0.55	0.5	0.45	0.4
	Permeable	0.4	0.35	0.3	0.25	0.2
Pastos-	Impermeable	0.65	0.6	0.55	0.5	0.45
Vegetación	Semipermeable	0.55	0.5	0.45	0.4	0.35
Ligera	Permeable	0.35	0.3	0.25	0.2	0.15
	Impermeable	0.6	0.55	0.5	0.45	0.4
Hierba-	Semipermeable	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3
Gramas	Permeable	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1
Bosques y	Impermeable	0.55	0.5	0.45	0.4	0.35
densa	Semipermeable	0.45	0.4	0.35	0.3	0.25
vegetación	Permeable	0.25	0.2	0.15	0.1	0.05

Tabla 4.5 Valores del Coeficiente de Escorrentía (Ce). Tomado de Pérez, J. 1976. UCV. Citado por Frías, L. 2007.

4.3.2.1.2 Calculo de la Evapotranspiración Potencial (Etp)

Para determinar el valor de la Evapotranspiración Potencial (Etp) se aplica la formula de *Thornthwaite* que se muestra a continuación:

$$Etp = C \cdot t^a \dots \dots \dots \mathbf{Ec (4.3)}$$

Donde:

(Etp)= evapotranspiración potencial media mensual, en cm.

t= temperatura media del mes, en °C

C y a= funciones del índice térmico anual.

Para determinar estos valores fue necesario realizar los cálculos de C, a, i, I; los cuales se muestran a continuación con un ejemplo para el año 2000.

PRECIPITACION TOTAL MENSUAL mm												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2000	47.8	32.1	40.4	4.1	75.4	79.3	119.1	93.7	197.1	94	127.2	19.4
TEMPERATURA °C												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2000	25.9	25.9	25.9	27.0	26.2	24.1	26.2	25.1	26.1	27.4	27.2	26.2

Tabla 4.6 Valor de Precipitación y temperatura para el año 2000 (estación La UCV). Tomado de la Estación Meteorológica UCV.

$$i = (t/5)^{1.514} \dots \dots \dots \mathbf{Ec (4.4)}$$

i= índice de calor mensual de temperatura, que viene dado por:

t= temperatura media mensual °C.

$$i = (25.9/5)^{1.514}$$

$$\mathbf{i = 12.06}$$

Una vez determinado el índice de calor mensual se procede a determinar el índice de calor anual, por medio de la sumatoria del índice de calor mensual.

$$I = \text{índice anual} = \sum_{i=1}^{12} \dots \text{Ec (4.5)}$$

$$I = 146.46$$

Se procede a calcular los valores C y a que son funciones del índice térmico anual, en la cual el valor de a se puede determinar por dos (2) formulas:

$$a = 6,75 \times 10^{-7} \times I^3 - 7,71 \times 10^{-5} \times I^2 + 1,79 \times 10^{-2} \times I + 0,498. \dots \text{Ec (4.6)}$$

ó

$$a = [(1,6/100) \times I] + 0,5. \dots \text{Ec (4.7)}$$

En esta ocasión se uso la ecuación número 4.7

$$a = [(1.6/100) \times 146.46] + 0.5$$

$$a = 2.843.$$

$$C = 1,6 [10/I]^a \dots \text{Ec (4.8)}$$

$$C = 1,6 (10/146.46)^{2.843}$$

$$C = 7.76E^{-4}$$

Ya teniendo todos los parámetros necesarios para la determinación de la evapotranspiración potencial, se procede a su cálculo por medio de la formula ya establecida en la ecuación 4.3.

$$E_{tp} = C \cdot t^a$$

$$E_{tp} = 7.76E^{-4} \times (25.9)^{2.843}$$

$$E_{tp} = 8.09 \text{ cm} = 80.9 \text{ mm.}$$

Una vez calculado el valor de evapotranspiración potencial media mensual en mm se procede a determinar el valor de evapotranspiración real (ETR).

4.3.2.1.3 Calculo de la Evapotranspiración Real (ETR)

Para ello se utiliza la ecuación de *Thornthwaite*, que se expresa de la siguiente manera:

$$ETR = Pe + \text{Almacenamiento (Si } ETP > Pe) \dots \dots \dots \mathbf{Ec (4.9)}$$

$$ETR = ETP \text{ (Si } ETP < Pe) \dots \dots \dots \mathbf{Ec (4.10)}$$

Donde Pe es la precipitación efectiva y se obtiene al sustraer la escorrentía de la precipitación.

PRECIPITACIÓN EFECTIVA mm												
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2000	11.5	15	17.5	3.2	25	15.7	27	37	58	38.7	20.2	5.5

Tabla 4.7 Valor de Precipitación efectiva para el año 2000 (Estación UCV) Tomado de la Estación Meteorológica UCV

4.3.2.3 Recarga por flujo subterráneo

Para el cálculo del caudal se aplica la ecuación de Darcy:

$$Q = K \cdot i \cdot A \dots \dots \dots \text{Ec. (4.11)}$$

Donde:

K= Permeabilidad.

A= L*B (L= longitud de divisoria de recarga subterránea del acuífero, B= espesor del acuífero).....**Ec (4.12)**

i= dh/dl. Gradiente hidráulico..... **Ec (4.13)**

Donde:

dh= diferencia de cotas entre las curvas piezométricas.

dl= distancia en planta entre las curvas piezométricas.

Los valores de L, dh y dl se obtuvieron mediante los mapas de isopiécicos, mientras que el valor de la permeabilidad se obtuvo mediante tablas, haciendo referencia a las litologías presentes en el área.

4.3.2.4 Recarga total

Finalmente, se obtiene el valor de la recarga total que está recibiendo el acuífero la cual se expresa de siguiente manera: Recarga total= Recarga por precipitación+ Recarga por flujo subterráneo.

4.3.2.5 Construcción de mapas

4.3.2.5.1 Mapas Piezométricos

Se recopilaron los datos referentes a los niveles piezométricos correspondientes a un tiempo aproximado de diez (10) meses, iniciados el 15/04/2011 hasta el 07/03/2012. Se eligió este periodo de tiempo porque para esa fecha se inició el proceso de bombeo de los pozos; aunque en estos momentos algunos pozos se encuentran todavía en operación, es decir; cinco (5) pozos de diecisiete (17) están funcionando. La construcción de los mapas piezométrico se inició con la elaboración de una base de datos en *Excel* contentiva de las coordenadas de cada pozo (este y norte), al igual que la data de los niveles piezométricos de cada uno de ellos, agrupándola en un Sistema de Información Geográfico (SIG), en base a todo lo cual se elaboró el mapa.

4.3.2.5.2 Mapa de total sólidos disueltos

La concentración total de sólidos disueltos (TSD) en el agua, es un índice general que permite discernir sobre el aprovechamiento del agua para diversos usos, es por esto que a partir de las 5 muestras tomadas, se elaboró un mapa de TSD de manera tal de observar su variación a lo largo de la zona de estudio y se compararon los valores obtenidos con los rangos permitidos para los parámetros fisicoquímicos que aparecen en la tabla 4.9 aprobada

por el entonces Ministerio de Sanidad y Asistencia Social (1998), ahora Ministerio del Poder Popular para la Salud.

Parámetros	Características	Unidad	Valor Deseable menor a	Valor máximo aceptable
Físico	Color	UCV	5	15
Químico	Dureza Total	Mg/l=Ppm	250	500
Químico	PH		6.5	8.56
Químico	TDS	Mg/l=Ppm	600	1000
Químico	Cloruro	Mg/l=Ppm	250	300
Químico	Sulfato	Mg/l=Ppm		500
Químico	Nitrito	Mg/l=Ppm		0.03
Químico	Nitrato	Mg/l=Ppm		45
Químico	Hierro	Mg/l=Ppm	0.1	0.3
Químico	Manganeso	Mg/l=Ppm	0.1	0.5
Químico	Sodio	Mg/l=Ppm		200

Tabla 4.8 Rangos permitidos para los Parámetros Fisicoquímicos.

La construcción del mapa de total de sólidos disueltos, consistió en vaciar sobre un Sistema de Información Geográfica (SIG) la información arriba citada, tomando en cuenta las respectivas coordenadas de cada pozo.

4.3.2.5.3 Mapa de PH

Este mapa se construyó en base a la observación de la distribución de este parámetro, que permite conocer si esas aguas son acidas, básicas o neutras. Para la construcción de este mapa se contó con los datos de pH provenientes de los 5 pozos, antes citados, los cuales se agruparon de acuerdo a sus respectivas coordenadas y vaciados en el Sistema de Información Geográfica (SIG) antes referido.

4.3.2.5.4 Mapa de conductividad

Una vez realizado los análisis de conductividad de las 5 muestras de agua, sus resultados se vaciaron sobre la respectiva base de datos, que contenía las coordenadas norte, este y los valores de conductividad se llevaron a un Sistema de Información Geográfica (SIG) que permitió la construcción del mapa.

4.3.2.5.5 Mapa de cloruros y sulfatos

Al igual que en los casos precedentes, se llevaron los valores determinados sobre las concentraciones de cloruros y sulfatos, al mismo Sistema de Información Geográfica (SIG), y se compararon los valores obtenidos con los mostrados en la tabla 4.9.

Aniones	Agua de Lluvia	Agua de Mar	Agua Subterránea
Cloruro	0 – 20 mg/l	20000 mg/l	10 – 250 mg/l
Sulfato	0 – 10 mg/l	3000 mg/l	10 – 300 mg/l
Bicarbonato	0 – 20 mg/l	120 mg/l	50 – 350 mg/l
Nitrato	0 – 5 mg/l	1 mg/l	0 – 300 mg/l (contam)
Bromuro	0 mg/l	65 mg/l	0 – 2 mg/l
Cationes			
Sodio		10000 mg/l	5 – 150 mg/l
Calcio		400 mg/l	10 – 250 mg/l
Magnesio		1200 mg/l	1 – 75 mg/l
Potasio		400 mg/l	1 – 10 mg/l
Estroncio		13 mg/l	0 – 1 mg/l
Otras Características			
Conductividad		45000 μ S/cm	100 – 2000 μ S/cm

Tabla 4.9 Rango de Cantidades en mg/l de Iones y otras Características de los Distintos Tipos de Agua. Tomado de Morrel, I (2008) citado por Sivira, D (2012).

4.3.4 Perfil del transecto a lo largo de la excavación Metro.

Se utilizó el perfil geológico de la zona de estudio (suministrado por Odebrecht), el cual se digitalizó y con los registros de pozos de índice de humedad, que se obtuvieron con muestras procedentes de las perforaciones, se correlacionaron entre pozos para así obtener el nivel freático en todo el alineamiento (Ver Anexo 1).

4.3.5 Modelo de las dimensiones del acuífero y estratos circundantes

El modelo de las dimensiones del acuífero consiste en la idealización y/o simplificación de la geometría de los elementos que componen un acuífero, para facilitar una comprensión práctica de su funcionamiento. Está estructurado en base a los siguientes elementos:

- Número de capas, unidades estratigráficas o facies del acuífero.
- Número de capas, unidades estratigráficas o facies del acuífero.
- Condiciones de la superficie Piezométricas.
- Límites horizontales y verticales.
- Zonas de recarga y descarga.

Para la elaboración del citado modelo se utilizaron datos de pozos y perforaciones ejecutadas en los alrededores de la zona. Estos datos fueron suministrados por entidades cuyas actividades están relacionadas con la obra, entre ellos, Metro de Caracas C.A, Estación Hidrometeorológica UCV y *ODEBRECHT*. Para el foso se realizó un modelo hidrogeológico empleando el *software surfer* 10, que consiste en la conjugación de los datos geográficos, topográficos, geofísicos, piezométricos, geológicos y litológicos.

Pozo	Coordenadas		Capa I		Capa II		Capa III		Capa IV	
	Norte	Este	Tope	Base	Tope	Base	Tope	Base	Tope	Base
PE-2	1159257	73430	863.247	860.247	860.247	859.247	859.247	854.247	854.247	848.247
PE-3	1159233	73433	861.766	859.766	859.766	857.766	857.766	855.766	855.766	854.766
PE-5	1159191	73437	856.773	855.773	855.773	849.773	849.773	845.773	845.773	844.773
PE-6	1159262	73433	854.704	853.704	853.704	849.704	804.704	845.704	845.704	843.704
PE-7	1159233	73433	854.258	850.258	850.258	847.258	847.258	844.258	844.258	842.258
PE-8	1159191	73437	855.696	853.696	853.696	847.696	847.969	846.969	846.969	845.969
PE-9	1159190	73431	854.709	852.709	852.709	851.709	851.709	844.709	844.709	841.709
PE-14	1159233	73433	853.465	852.465	852.465	850.465	850.465	849.465	849.465	848.465
PE-17	1159308	73425	852.05	850.05	850.05	849.05	849.05	848.05	848.05	845.05
PE-18	1159257	73430	851.71	849.71	849.71	840.71	840.71	836.71	0	0
PE-19	1159233	73433	852.131	849.131	849.131	844.131	844.131	842.131	842.131	841.131

Tabla 4.10 Valores de los topes y las bases de las capas del acuífero para el modelo.

Es importante acotar que para la elaboración del modelo se tomaron solamente los topes de las capas que se observan en la tabla IV.11

Pozo	Coordenadas		Tope I	Tope II	Tope III	Tope IV
	Norte	Este				
PE-1	1159308	73425	863.969	861.969	859.969	854.969
PE-2	1159257	73430	863.247	860.247	859.247	854.247
PE-3	1159233	73433	861.766	859.766	857.766	855.766
PE-5	1159191	73437	856.773	855.773	849.773	845.773
PE-6	1159262	73433	854.704	853.704	804.704	845.704
PE-7	1159233	73433	854.258	850.258	847.258	844.258
PE-8	1159191	73437	855.696	853.696	847.969	846.969
PE-9	1159190	73431	854.709	852.709	851.709	844.709
PE-14	1159233	73433	853.465	852.465	850.465	849.465
PE-17	1159308	73425	852.05	850.05	849.05	848.05
PE-18	1159257	73430	851.71	849.71	840.71	0
PE-19	1159233	73433	852.131	849.131	844.131	842.131

Tabla 4.11 Valores de los topes para las cuatro capas del acuífero.

Una vez obtenida la tabla que contiene los topes de cada capa, se creó un archivo tipo *Grid* por medio de la herramienta *Grid data* del software *surfer* 8.0, para cada una de las capas (Figura IV.3), en la cual se tiene que verificar que en la columna A se encuentre la coordenada este representada como X, en la columna B la coordenada norte representada como Y y en la columna C el tope de la respectiva capa representada como Z; además se escogió en el apartado de *Griding Method*, el método en el que se desea realizar el *Grid*, que para este caso es *Minimum Curvature*; igualmente se escogió en el apartado *Grid line Geometry* el valor máximo y mínimo de X e Y; finalmente se presionó *OK*.

Ya creado el *Grid* se procedió a elaborar las capas en tres dimensiones a través de la herramienta *Map*, de la cual se despliega la opción *surface* y se elige el archivo *Grid* anteriormente creado (Figura 4.4)

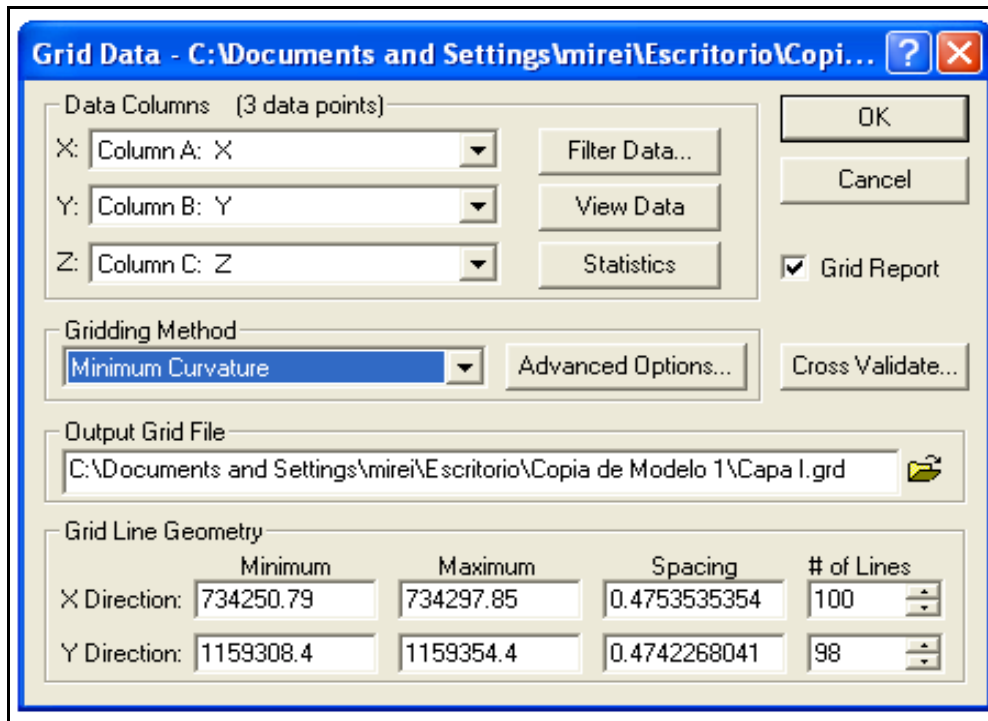


Figura 4.3 Creado del Grid de las capas.

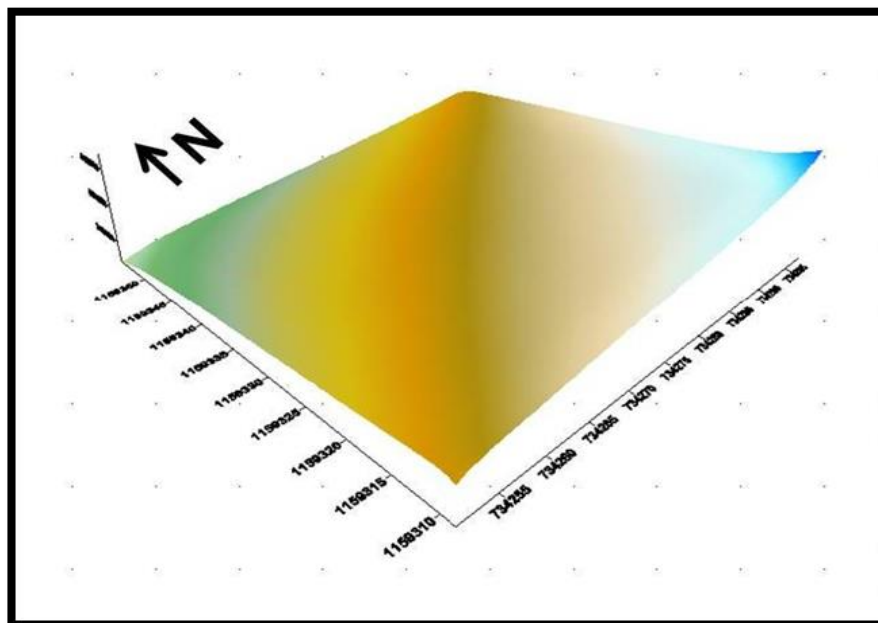


Figura 4.4 Creado de las capas en tres dimensiones.

Después de creado las capas en tres dimensiones se dio *click* derecho sobre la imagen, se marcó la opción *properties* para modificar el color así como el tramado representativo de las litologías (Figura 4.5)

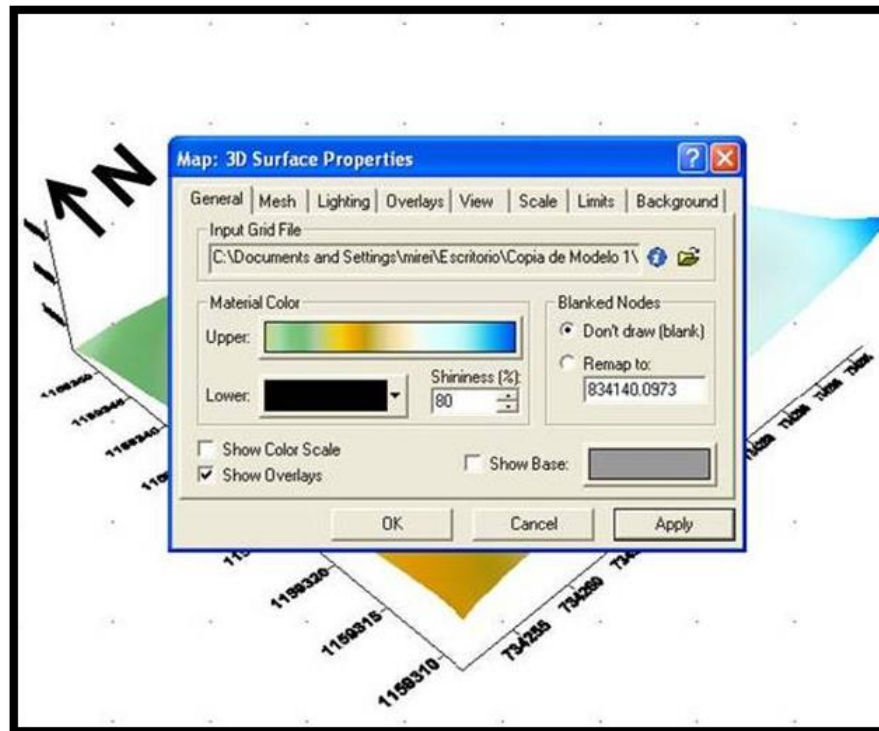


Figura 4.5 Color de la litología de las capas por medio de la Opción Properties.

Cuando ya se tenían todas las capas con su respectivo color de acuerdo a su litología, se procedió a realizar la superposición de las mismas, en función a la posición relativa de cada una de ellas, esto se llevó a cabo seleccionando todas las capas, luego se desplegó de la herramienta *Map* la opción *Overlay Maps*. Finalmente se obtuvo el modelo hidrogeológico en tres dimensiones (Figura 4.6).

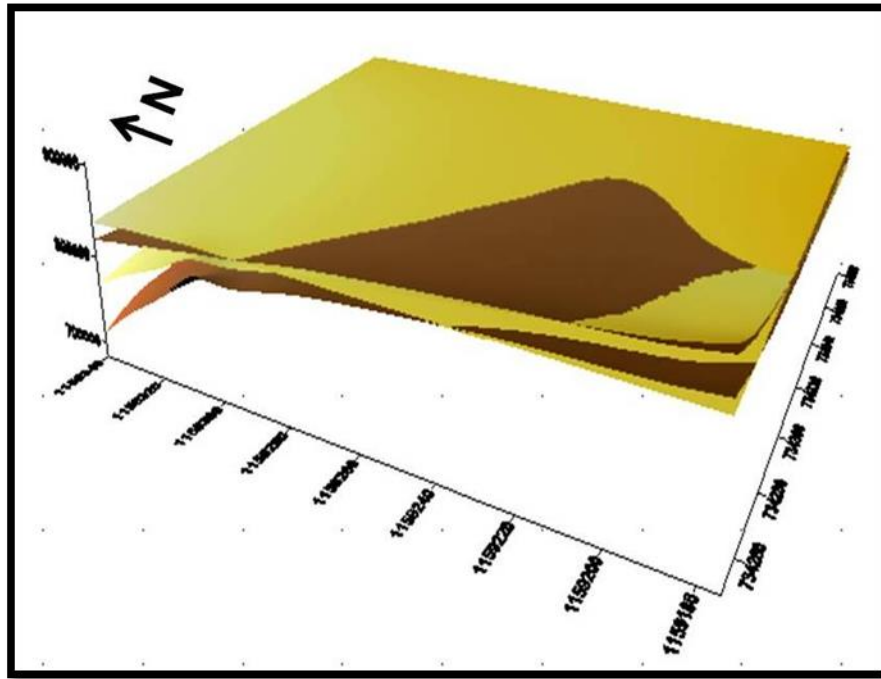


Figura 4.6 Modelo Hidrogeológico Conceptual.

4.3.5.1 Blanqueo de mapas.

Debido a que en el modelo se tienen zonas que no presentan información de interés, se realizó el blanqueo en dichas áreas para delimitar mejor el acuífero; esto se llevó a cabo sobre el mapa de contornos de cada una de las capas, el cual se creó mediante la herramienta *Map* de esta se desplegó la opción *Contour Map* y luego se seleccionó *New Contour Map*, en este apartado aparecen los archivos *Grid* previamente creados, en el que se escoge la capa que se desea blanquear; al igual que esto fue necesario llamar sobre el mapa de contornos los puntos de interés (coordenadas), a través de la herramienta *Map* se seleccionó *Post Map* y se marcó la opción *New Post Map*, luego se eligió la capa de interés y en pantalla aparecieron los puntos, pero estos se necesitan que se adapten al mapa de contornos, que se logró seleccionando a ambos archivo y haciendo

uso de la herramienta *Map-Overlay Map* aparecen como se muestra en la figura 4.7

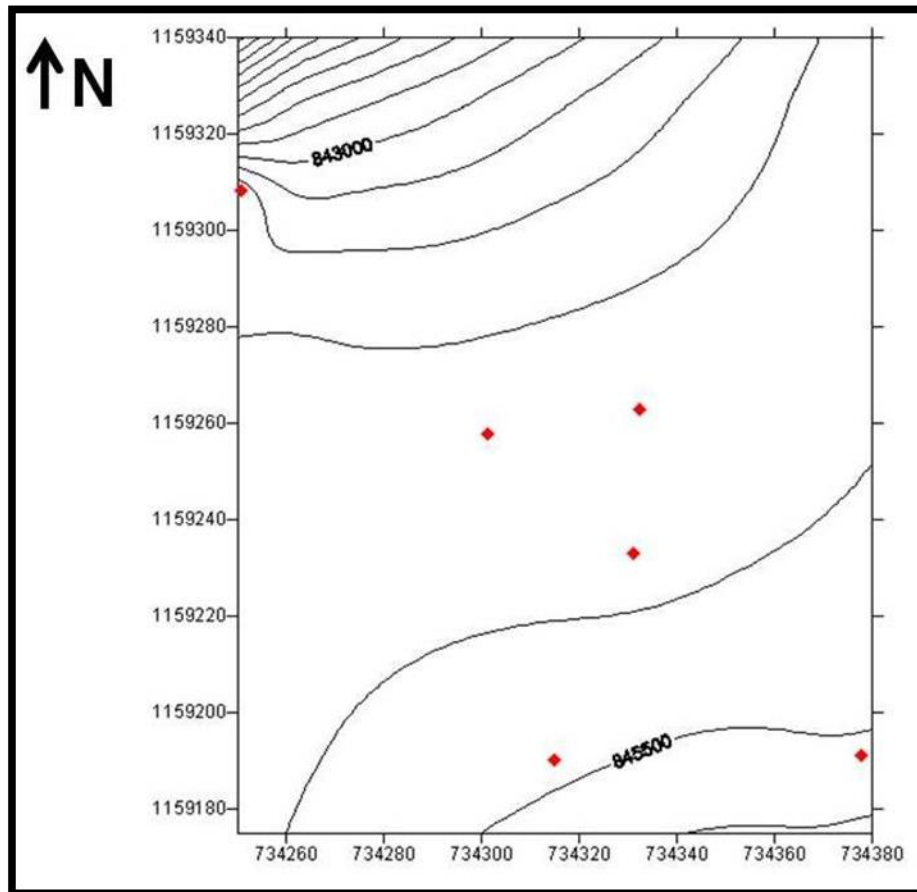


Figura 4.7 Mapa de contorno con sus puntos de interés.

Para el blanqueo fue necesario crear un archivo de tipo *Boundary File (*.bln)* a través de la opción *Map / Digitize*; creando un polígono de la zona que se va a blanquear; ya creado este archivo se hizo uso de la herramienta *Grid / Blank* y se seleccionó la capa *Grid* de interés, luego se eligió el archivo de tipo *Boundary File (*.bln)* anteriormente creado y se guardó el nuevo archivo *Grid (*.grd)*. Finalmente por la herramienta de *Map / New Contour Map* se

escogió el último *Grid* creado y se obtuvo así la capa sin la zona no deseada (Figura 4.8)

Cabe destacar que este proceso se realizó para todas las capas de los modelos.

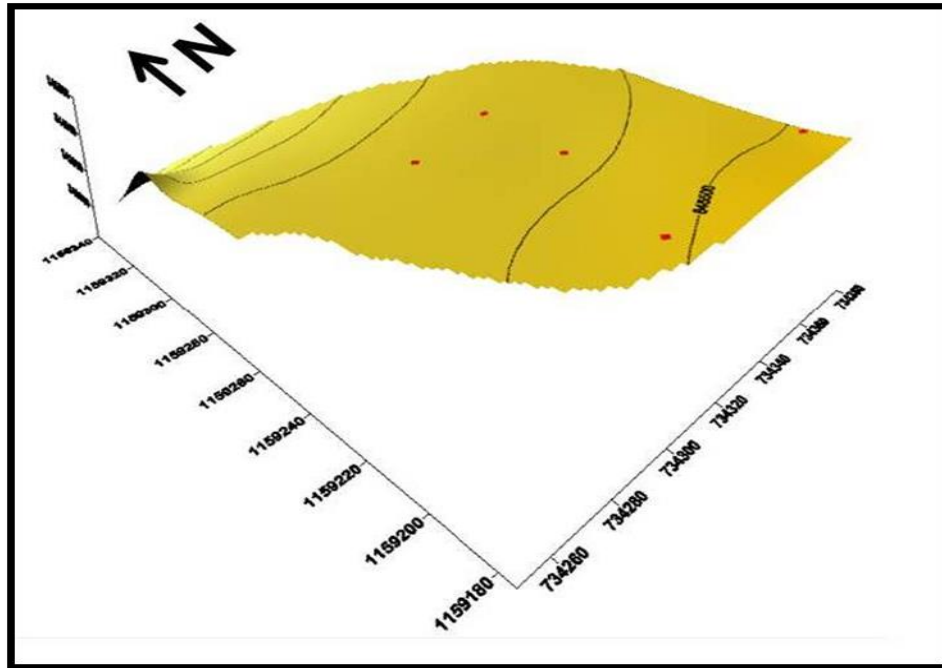


Figura 4.8 Modelo Conceptual

CAPITULO V

RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Información Piezométrica

La información recopilada se presenta en tres (3) tablas; (Tabla 5.1, Tabla 5.2 y Tabla 5.3), en base a las cuales se elaboraron los respectivos mapas piezométricos y se trazaron las líneas de flujo (Figuras 5.1, 5.2 y 5.3)

PUNTOS	NORTE	ESTE	COTAS m.s.n.m	Nivel Dinámico	Nivel Piezométrico
PZ-01	-1.789.025	6.621.743	853.021	5.25	847.77
PZ-02	-1.795.670	6.667.544	851.78	6.19	845.59
PZ-04	-1.821.566	6.615.945	853.109	8.83	844.28
PZ-05	-1.835.162	6.632.510	853.206	5.83	844.37
PZ-06	-1.833.150	6.648.102	853.76	7.58	846.18
PZ-08	-1.785.217	6.646.451	851.740	6.48	845.26

Tabla 5.1 Datos de Niveles Piezometricos, para los meses Enero- Abril del 2011 con bases de Datos del Metro C.A y ODEBRECHT.

PUNTOS	NORTE	ESTE	COTAS m.s.n.m	Nivel Dinamico	Nivel Piezométrico
PZ-01	-1.789.025	6.621.743	853.021	5.39	847.63
PZ-02	-1.795.670	6.667.544	851.78	13.84	837.94
PZ-04	-1.821.566	6.615.945	853.109	14.44	838.67
PZ-05	-1.835.162	6.632.510	853.206	11	8842.2
PZ-06	-1.833.150	6.648.102	853.76	11.84	841.92
PZ-08	-1.785.217	6.646.451	851.740	6.21	845.53

Tabla 5.2 Datos de Niveles Piezometricos, para los meses Mayo-Octubre del 2011 con bases de Datos del Metro C.A y ODEBRECHT.

PUNTOS	NORTE	ESTE	COTAS m.s.n.m	Nivel Dinámico	Nivel Piezométrico
PZ-01	-1.789.025	6.621.743	853.021	3.35	849.67
PZ-02	-1.795.670	6.667.544	8851.78	13.87	837.91
PZ-04	-1.821.566	6.615.945	853.109	14.3	838.8
PZ-05	-1.835.162	6.632.510	8.853.206	15.66	837.54
PZ-06	-1.833.150	6.648.102	853.76	13.52	840.24

Tabla 5.3 Datos de Niveles Piezometricos, para los meses noviembre 2011-Abril del 2012 con bases de Datos del Metro C.A y ODEBRECHT.

En la Figura 5.1 se observa la variación de los niveles piezométricos para los cuatros primeros meses de bombeos, los cuales a través de sus líneas de flujo indican que la mayor concentración del agua va dirigida a la parte externa del foso con dirección Suroeste. Esto se debe a que los pozos en procesos de bombeos se encuentran alrededor del foso. Los niveles piezométricos tiene mayor variedad hacia el Sur del foso donde las curvas de isopiezas se encuentran más cercanas entre sí, lo que indica que existe un mayor gradiente hidráulico en comparación con el resto de la zona.

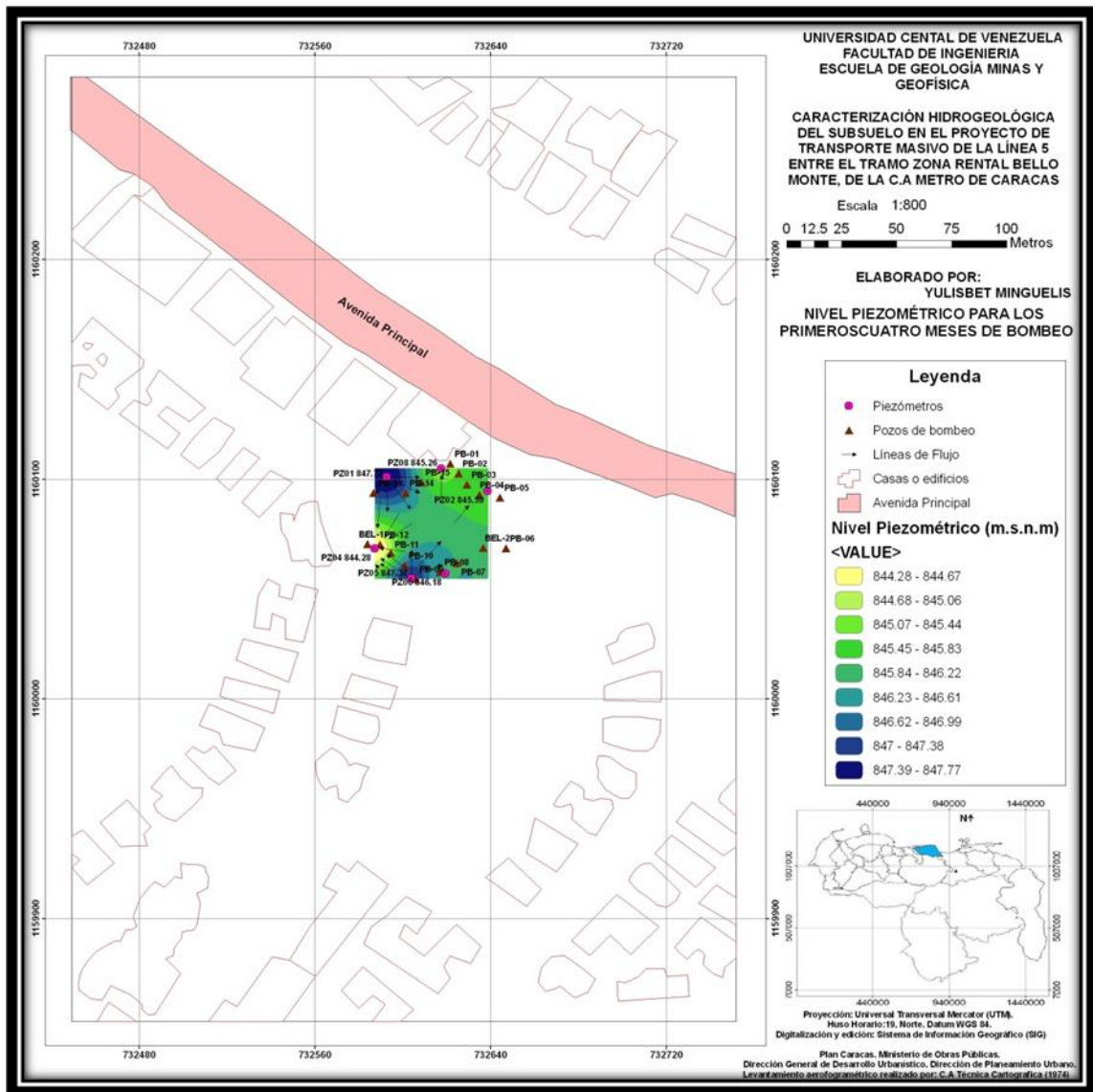


Figura 5.1 Mapa 1 de Niveles Piezométricos para los Primeros Cuatro Meses de Bombeo.

En la figura 5.2 los niveles piezométricos se encuentran más someros al lado Este del foso con unos 10 metros de profundidad, mientras que las líneas de flujo presentan una dirección suroeste, debido a que la mayor descarga del agua se encuentra en esa dirección.

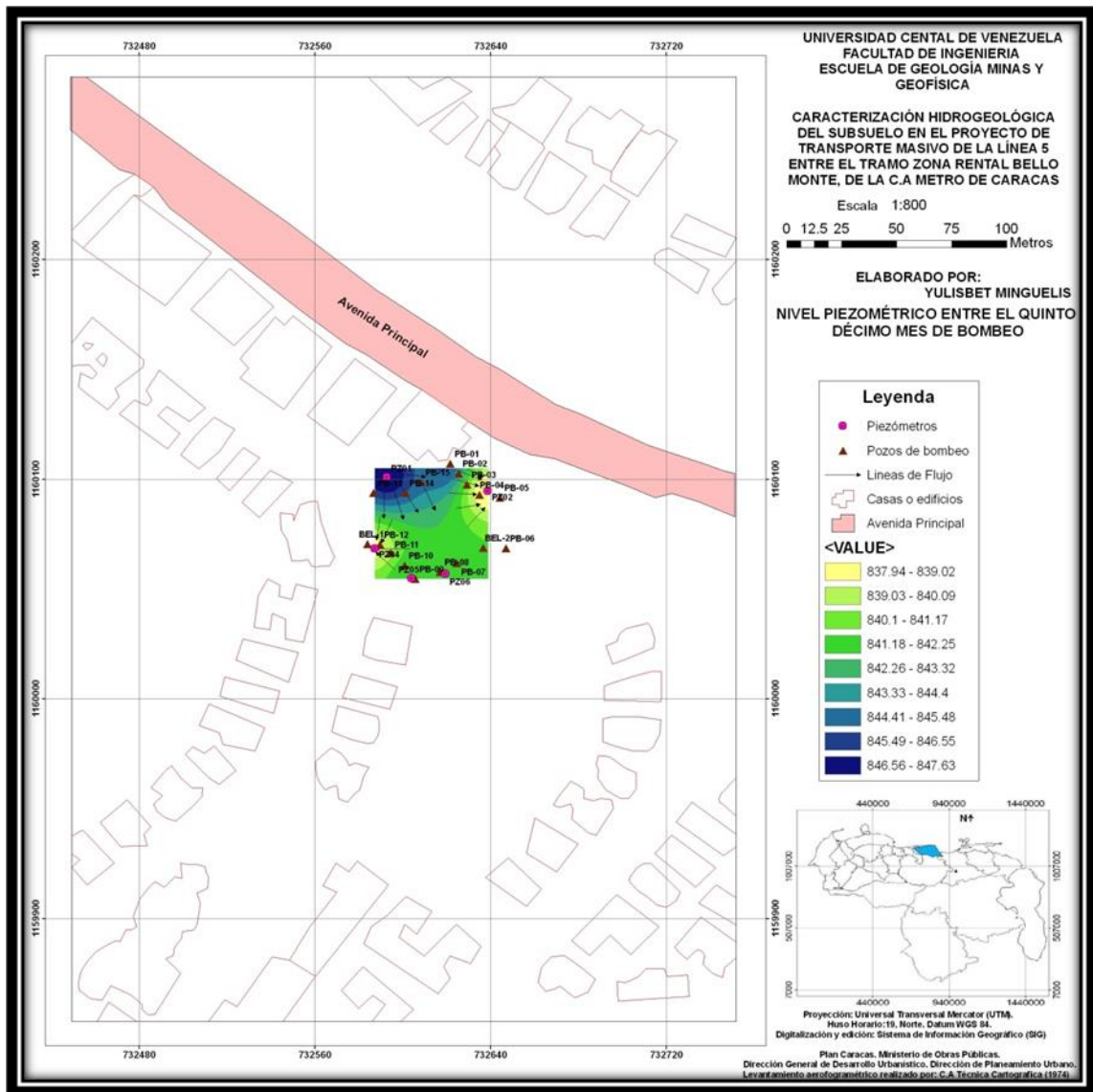


Figura 5.2 Mapa 2 de Niveles Piezometricos para el Quinto y Decimo Mes de Bombeo.

Finalmente en la Figura 5.3 se muestra que los niveles piezométricos, en este caso, se observan más someros hacia el este del foso y las líneas de flujo presentan dirección suroeste, lo que quiere decir que la mayor cantidad de pozos de bombeo se encuentra activo en la parte sur del foso.

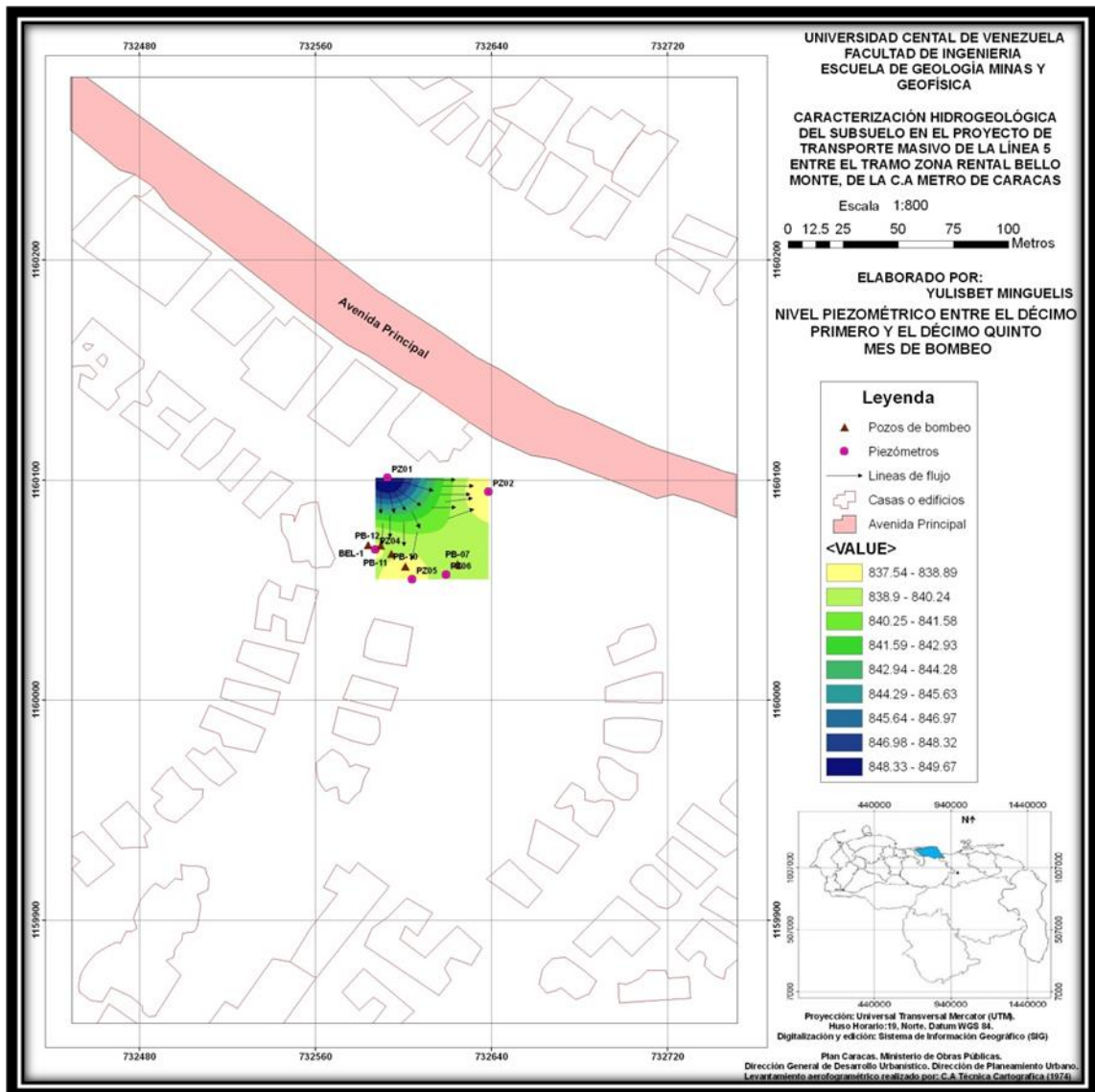


Figura 5.3 Mapa 3 de Niveles Piezometricos para el Decimo Primero y Decimo Quinto Mes de Bombeo

5.2 Información geofísica

Con base a la información geofísica, se logró recopilar dos (2) tipos de registros de los cuales se pudo analizar lo siguiente:

5.2.1 Sísmica Downhole (DH)

Este tipo de registro consiste en la construcción de dromocromas, en el cual se representa el gráfico de profundidad desde la fuente receptor vs tiempos de llegada de las ondas lo cual determina, a través de la identificación de cambios de pendiente, la interpretación directa de la estratigrafía sísmica. En la figura 5.4 se muestra el registro de sísmica *Downhole (DH)* aplicado a la zona de estudio, en la cual se identifican modelos de tres (3) unidades sismo-estratigráficas con su valor promedio de velocidad de onda P, velocidad de onda S y espesor. La unidad más superficial se interpreta como material de relleno y/o coluvión con Vs promedio de 273.4 m/s, Vp promedio 624.1 m/s y espesor aproximado de 6 m. La capa siguiente corresponde a un material aluvional mas compacto (coluvión), con un espesor aproximado de 5 m y con velocidades promedio de 375.5 m/s y 770.7 m/s para la Vs y Vp respectivamente. En la parte final de la secuencia se encuentra un sustrato, con velocidades promedios de 1068.6m/s y 1968.7 m/s para Vs y Vp, interpretado como una roca parcialmente alterada, que constituye una transición hacia una roca menos alterada.

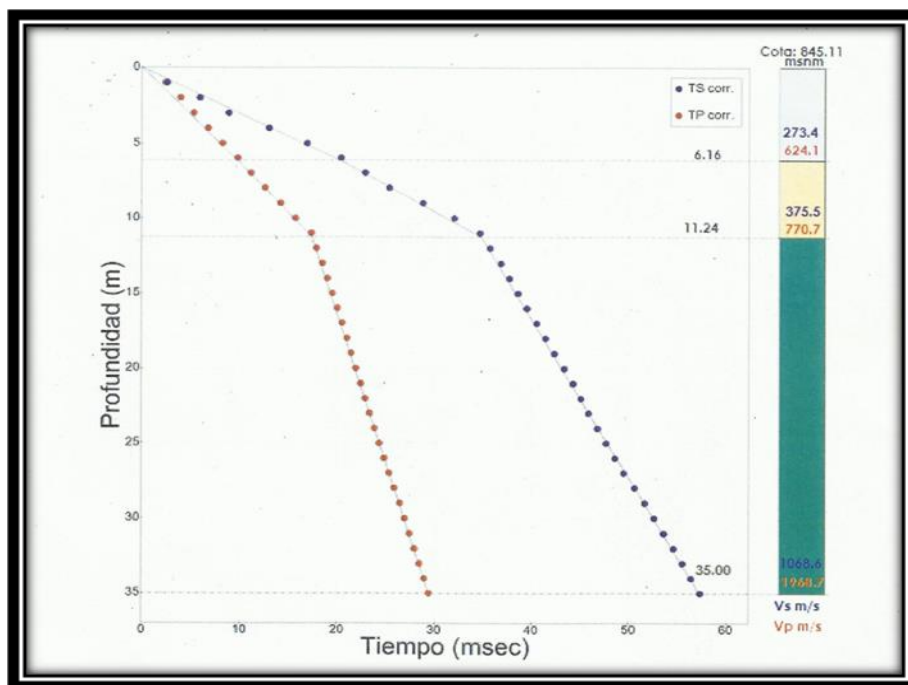


Figura 5.4. DH. Modelo sismoestratigráfico interpretado con valores promedio de velocidad para cada unidad sísmica.

5.2.1.2 Sísmica Refracción por Microtremores (ReMi)

Este registro permitió complementar y comprobar la información de la prueba de *downhole* (DH). La sección sísmica superficial ReMi está representada en la figura 5.5, en la cual se pudo determinar un modelo sismoestratigráfico, que al igual que el *downhole* detalla tres estratos: el primero presenta un espesor aproximado de 6 m con velocidades de ondas S (V_s) 254.979 m/s y velocidades de ondas P (V_p) 581.328 m/s y densidad aproximada de 2.1 g/cc; la siguiente capa cuenta con un espesor de 5.25 m, una V_s de 327.801 m/s, V_p 671.697 m/s y un valor de densidad de 1.99 g/cc; y finalmente se aprecia una capa que hace referencia a un material con un espesor de 23.75 m, y con valores de V_s 1067.635 m/s, V_p 1965.403 m/s y densidad de 2.54 g/cc. Con base en la similitud de los valores de velocidades de ondas V_s , V_p

y de espesores, que existe en la sísmica de microtremores y la sísmica de downhole se puede inferir que los tres (3) estratos son iguales a los materiales ya descritos en la sísmica *downhole*.

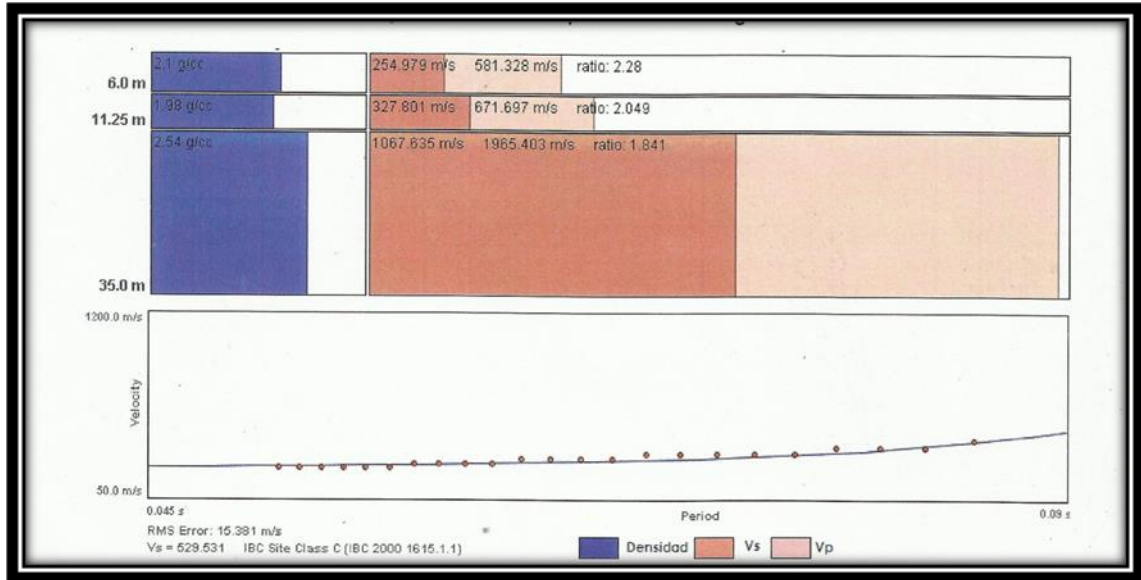


Figura 5.5. DH. Modelo sismo-estratigráfico interpretado con valores de velocidad para cada unidad sísmica.

5.3 Balance Hídrico

El balance hídrico se establece con base en la información suministrada por la estación climatológica cercana a la zona de interés, permitiendo estimar los meses en donde el agua producto de la precipitación recarga el acuífero por efectos de infiltración vertical.

5.3.1 Cálculo de Escorrentía

La escorrentía se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$Esc = P \times Ce \dots\dots\dots Ec \text{ (V.1).}$$

Dónde:

Esc = Escorrentía.

P = Precipitación.

Ce = Coeficiente de Escorrentía.

La escorrentía depende de tres parámetros: Cobertura vegetal, tipo de suelo y pendiente del terreno. La cobertura vegetal y tipo de suelo son determinados directamente por observaciones en campo; en definitiva se clasificó como un suelo sin vegetación semipermeable de pendiente suave, lo que origino un coeficiente de escorrentía de 0.55 (Tabla IV.6).

Una vez determinado el valor del coeficiente de escorrentía se cálculo la escorrentía. En la tabla 5.7 se muestra un ejemplo para el año 2000.

Año	Precipitación	Ce	Escorrentía
Enero	0.45	0.6	0.247
Febrero	0.9	0.6	0.495
Marzo	4.95	0.6	2.722
Abril	31.5	0.6	17.32
Mayo	56.7	0.6	31.18
Junio	48.15	0.6	26.48
Julio	20.7	0.6	11.38
Agosto	67.95	0.6	37.37
Septiembre	55.35	0.6	30.44
Octubre	53.1	0.6	29.2
Noviembre	27.45	0.6	15.09
Diciembre	13.5	0.6	7.42
Anual (2000)	380.7	0.6	209.09

Tabla 5.4 Valores de Escorrentía.

5.3.2 Cálculo de Evapotranspiración Real

Para determinar la evapotranspiración real (Tabla 4.8) se llevó a cabo el procedimiento descrito en el capítulo 4.

Año	Temperatura	i	l	a	C	Pe	ETR
Enero	25.9	12.06	146.5	2.843	7.76E ⁻⁴	47.8	47.8
Febrero	25.9	12.06	146.5	2.843	7.76E ⁻⁴	32.1	32.1
Marzo	25.9	12.06	146.5	2.843	7.76E ⁻⁴	40.4	40.4
Abril	27	12.84	146.5	2.843	7.76E ⁻⁴	4.1	4.1
Mayo	26.2	12.27	146.5	2.843	7.76E ⁻⁴	75.4	75.4
Junio	24.1	10.81	146.5	2.843	7.76E ⁻⁴	79.3	79.3
Julio	26.2	12.27	146.5	2.843	7.76E ⁻⁴	119.1	119
Agosto	25.1	11.5	146.5	2.843	7.76E ⁻⁴	93.7	93.7
Septiembre	26.1	12.2	146.5	2.843	7.76E ⁻⁴	197.1	197
Octubre	27.4	13.13	146.5	2.843	7.76E ⁻⁴	94	94
Noviembre	27.2	12.99	146.5	2.843	7.76E ⁻⁴	127.2	127
Diciembre	26.2	12.27	146.5	2.843	7.76E ⁻⁴	19.4	19.4
Anual (2000)	313.2	146.5	146.5	2.843	7.76E⁻⁴	929.6	930

Tabla 5.5 Valores de Evapotranspiración Real.

Una vez que se obtienen todos los parámetros necesarios para determinar la recarga del acuífero por precipitación, se procede a realizar los cálculos para conocer dicho valor (tabla 5.6).

Año	Precipitación (mm)	ETR (mm)	Escorrentía (mm)	Recarga (mm)
Enero	0.45	11.5	0.247	36.053
Febrero	0.9	15	0.495	16.050
Marzo	4.95	17.5	2.722	20.17
Abril	31.5	3.2	17.32	0.9
Mayo	56.7	25	31.18	19.22
Junio	48.15	15.7	26.48	37.12
Julio	20.7	27	11.38	80.72
Agosto	67.95	37	37.37	19.33
Septiembre	55.35	58	30.44	108.66
Octubre	53.1	38.7	29.2	26.1
Noviembre	27.45	20.2	15.09	91.91
Diciembre	13.5	5.5	7.42	6.48

Tabla 5.6 Valores de Recarga por Precipitación para el año 2000.

Para el año 2000 existe una recarga por precipitación hacia el acuífero, debido a que los valores de evapotranspiración potencial son muchos menores que los de precipitación y por ende, se tiene como evapotranspiración real a la precipitación efectiva más el almacenamiento, que trae como consecuencia que existe recarga alguna para el acuífero en ese año.

Este procedimiento se aplicó para todo el periodo de tiempo considerado, desde 1981 hasta 2000, los cuales se muestran en la tabla 5.10 donde se agrupan los balances de 20 años, hasta generar el balance general, que indica que existe una recarga por lluvias con un promedio de 104.73 mm/anual aproximadamente. Debido a que sobre el acuífero existe una capa permeable continua, la recarga por precipitación tiende a ser alta porque el agua de lluvia se concentra en esta capa, de esta manera se estima que la recarga del acuífero es por flujo subterráneo proveniente de zonas adyacente al área de estudio

MES	PRECIPITACION (mm)	ETR (mm)	Escorrentía (mm)	Recarga (mm)
Anual(1981)	1216.6	525.4	669.13	22.7
Anual(1982)	618	367	339.9	88.9
Anual(1983)	662	309.2	364.1	11.25
Anual(1984)	855.9	415.1	470.7	29.85
Anual(1985)	956.8	435.1	526.24	4.54
Anual(1986)	688.8	380.7	378.84	70.74
Anual(1987)	1123.8	488.4	618.09	17.31
Anual(1988)	1165.8	456.9	641.19	67.71
Anual(1989)	885.3	281.3	486.91	117.14
Anual(1990)	130.9	403.8	71.99	444.89
Anual(1991)	837.2	370.1	460.46	113.6
Anual(1992)	803.6	415.9	441.98	54.28
Anual(1993)	1055.9	375.7	580.75	99.5
Anual(1994)	825.2	351	453.86	20.34
Anual(1995)	701	369	385.55	53.55
Anual(1996)	1403.2	456.3	771.76	175.19
Anual(1997)	724.9	266	398.69	90.26
Anual(1998)	938.9	338.4	516.39	84.11
Anual(1999)	1125.8	471.1	619.19	35.65
Anual(2000)	929.6	385.2	51.28	493.12
Promedio Anual (mm)	882.46	393.1	462.35	104.73

Tabla 5.7 Valores de Recarga por Precipitación.

Ya obtenido el valor de la recarga del acuífero en mm/añual, se procedió a determinar su valor en unidades de m³/día.

$$\text{Recarga} = (104.73 \text{ mm/añual}) * (1 \text{ año} / 365 \text{ días}) * (1 \text{ m} / 1000 \text{ mm}) * \text{área.}$$

Área= 9798.36m² y se obtuvo por medio de un Sistema de Información Geográfico (SIG).

$$\text{Recarga} = (104.73\text{mm/año}) * (1\text{año}/365\text{días}) * (1\text{m}/1000\text{mm}) * 9798.36\text{m}^2.$$

$$\text{Recarga} = 2.8114 \text{ m}^3/\text{día}$$

5.3.3 Recarga por flujo subterráneo

Para el cálculo del caudal se aplicó la ecuación de *Darcy*:

$$Q = K * i * A \dots \dots \dots \text{Ec. (V.2).}$$

Donde K= Permeabilidad (K= 0.25025 m/d).

$$i = dh/dl. \text{ Gradiente hidráulico.} \dots \dots \dots \text{Ec. (V.3).}$$

$$A = L * B \text{ (L= 154 m, B= espesor del acuífero 10.125 m)} \dots \dots \dots \text{Ec (V.4).}$$

Los valores de dh representa el intervalo en el que fueron trazadas las líneas isopiezas y dl la distancia horizontal entre cada isopieza.

$$i = dh/dl$$

$$i = 1.3\text{m}/6.20\text{m} \quad \longrightarrow \quad i = 0.209.$$

El área de recarga del acuífero fue establecida a través de la longitud que origina la divisoria entre las zonas de elevada y baja topografía multiplicada por el espesor del acuífero.

$$A = 154\text{m} \times 2.5\text{m} \longrightarrow A = 385 \text{ m}^2$$

Finalmente, aplicando la ley de *Darcy* se obtuvo el valor del caudal de recarga por flujo subterráneo.

$$Q = 0.25025\text{m/d} \times 0.209 \times 385 \text{ m}^2$$

$$Q = 20.13 \text{ m}^3/\text{d}.$$

Este caudal representa el flujo subterráneo que ocurre en el acuífero a través del agua que fluye desde las zonas montañosas cercanas, como lo es el Waraira Repano (Cerro El Ávila).

5.4 Recarga total del acuífero

Finalmente se obtiene la recarga total a la que está recibiendo el acuífero la cual se expresa de siguiente manera:

Recarga total = Recarga por precipitación + Recarga por flujo subterráneo.

$$\text{Recarga total} = 2.8114 \text{ m}^3/\text{día} + 20.13 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$\text{Recarga total promedio} = 22.95 \text{ m}^3/\text{día}.$$

Este valor representa la recarga total que recibe el acuífero, tomando en cuenta el promedio anual de las precipitaciones. Si se considera el valor acumulado durante los últimos 20 años, se obtendría una recarga de 76.35 m³/día.

5.5 Calidad Fisicoquímica del agua

El movimiento relativamente lento del agua que fluye a través del subsuelo, le permite a éstas mantener un contacto prolongado y estrecho con los minerales que constituyen los materiales presentes, los cuales son solubles en mayor o menor grado, de tal modo que el agua aumenta su contenido de minerales disueltos, conforme se desplaza, hasta que se alcanza un equilibrio combinado de las sustancias en solución. La posibilidad de utilizar el agua para variados fines depende de su contenido de minerales disueltos. Si uno o más minerales exceden de la cantidad que puede tolerarse para un uso determinado, debe aplicarse al agua algún tipo de tratamiento que elimine el mineral indeseable y torne al agua apta para el propósito al que se le va a destinar (Johnson, 1975).

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los análisis fisicoquímicos:

5.5.1 Total de Sólidos Disueltos

En la tabla 5.8 y en la figura 5.6 se puede observar que existe una baja concentración de sólidos disueltos en el foso de la futura estación, específicamente en los pozos PB-07, y PB-10, mientras que los mayores valores se encuentran en el foso correspondiendo a los pozos BEL 01, PB-11, PB-12.

Según Johnson (1975), el agua que contiene sólidos disueltos no es satisfactoria para muchos usos; estableciendo que si ésta contiene menos de 500 p.p.m, es por lo general adecuada para uso doméstico y para varios propósitos industriales. Por lo tanto, el total de sólidos disueltos en las

muestras de agua en la zona de estudio permiten establecer que dicha agua se encuentra apta para muchos usos.

Pozo	Norte	Este	TDS (mg/l)
BEL-01	-1819.504	6612.732	352
PB-07	-1828.823	6653.622	331
PB-10	-1827.959	6629.009	328
PB-11	-1823.671	6623.543	345
PB-12	-1819.739	6618.244	355

Tabla 5.8 Valores del Total de Sólidos Disueltos.

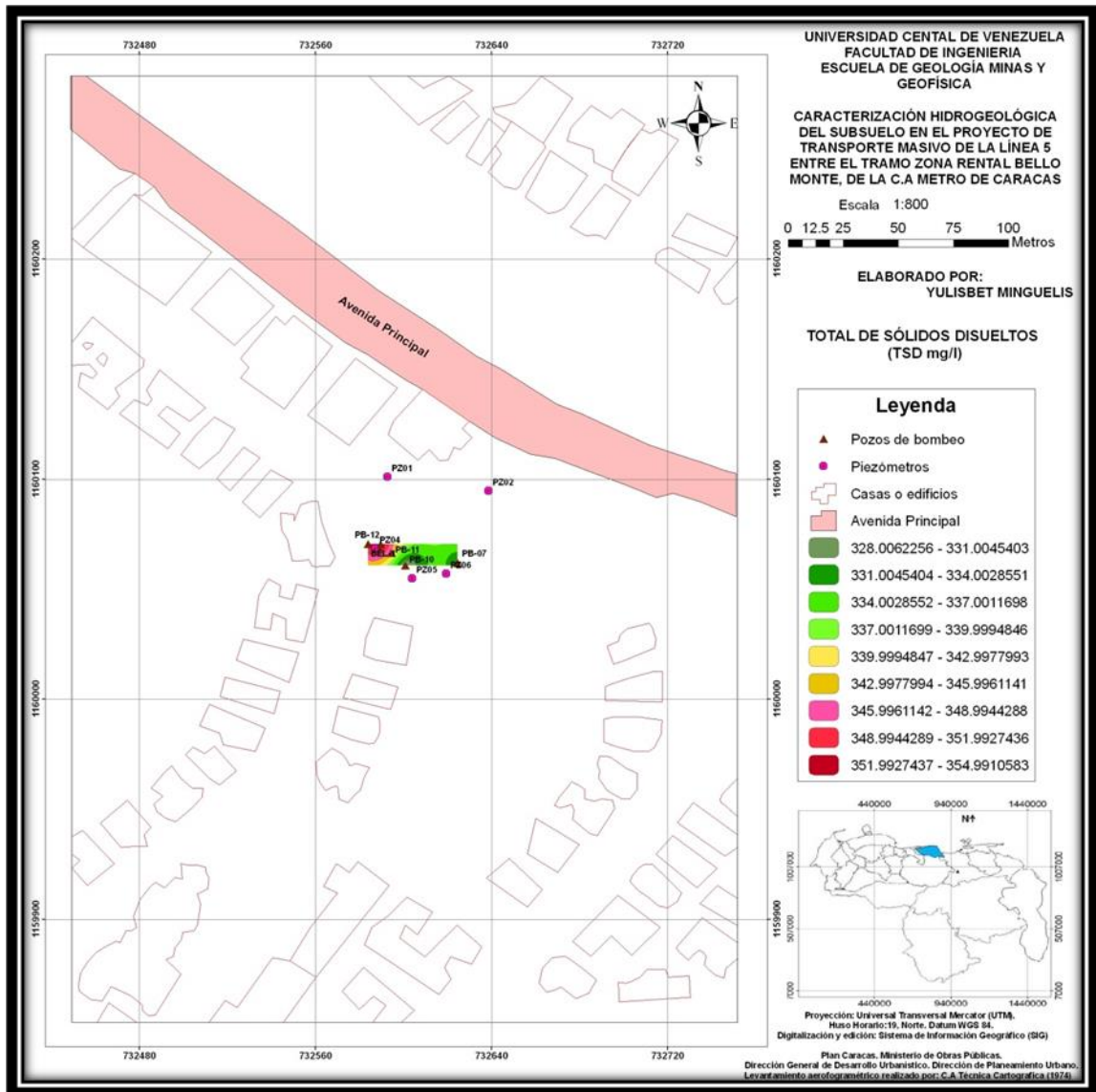


Figura 5.6 Mapa del Total de Sólidos Disueltos.

5.5.2 Cloruros y sulfatos

En la tabla 5.9 y en las figuras 5.7 y 5.8 se observa que existe una baja concentración de cloruros y sulfatos en el foso de la futura estación, específicamente en los pozos BEL-1 y PB-07, para los cloruros y en el PB-07 y PB-10 para los sulfatos; mientras que los mayores valores se encuentran en los pozos PB-10, PB-11 y PB-12, tanto para los cloruros como para los sulfatos.

Pozo	Norte	Este	Cloruros (Ppm)	Sulfatos (Ppm)
BEL-01	-1819.504	6612.732	37.22	32.60
PB-07	-1828.823	6653.622	22.27	3.33
PB-10	-1827.959	6629.009	40.77	30.94
PB-11	-1823.671	6623.543	38.99	31.74
PB-12	-1819.739	6618.244	40.54	32.38

Tabla 5.9 Valores de Cloruros.

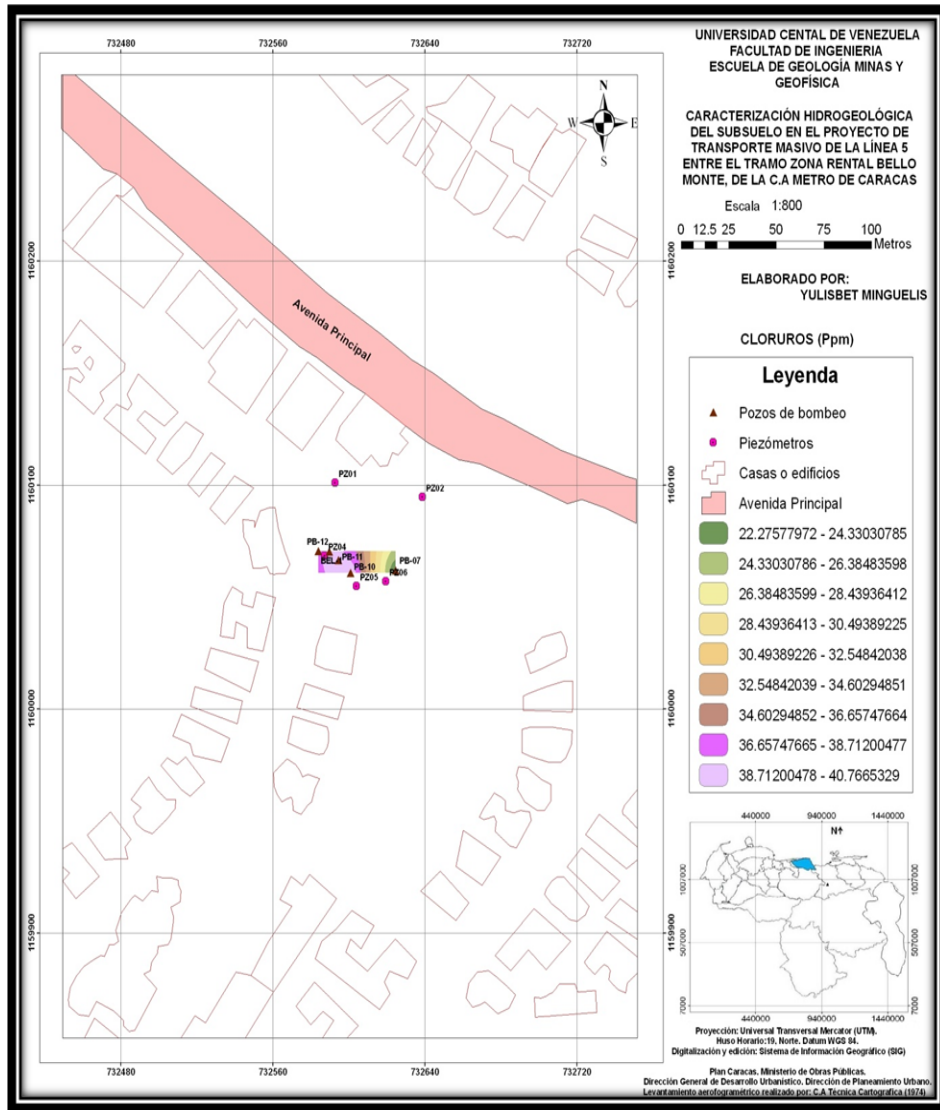


Figura 5.7 Mapa de Cloruros.

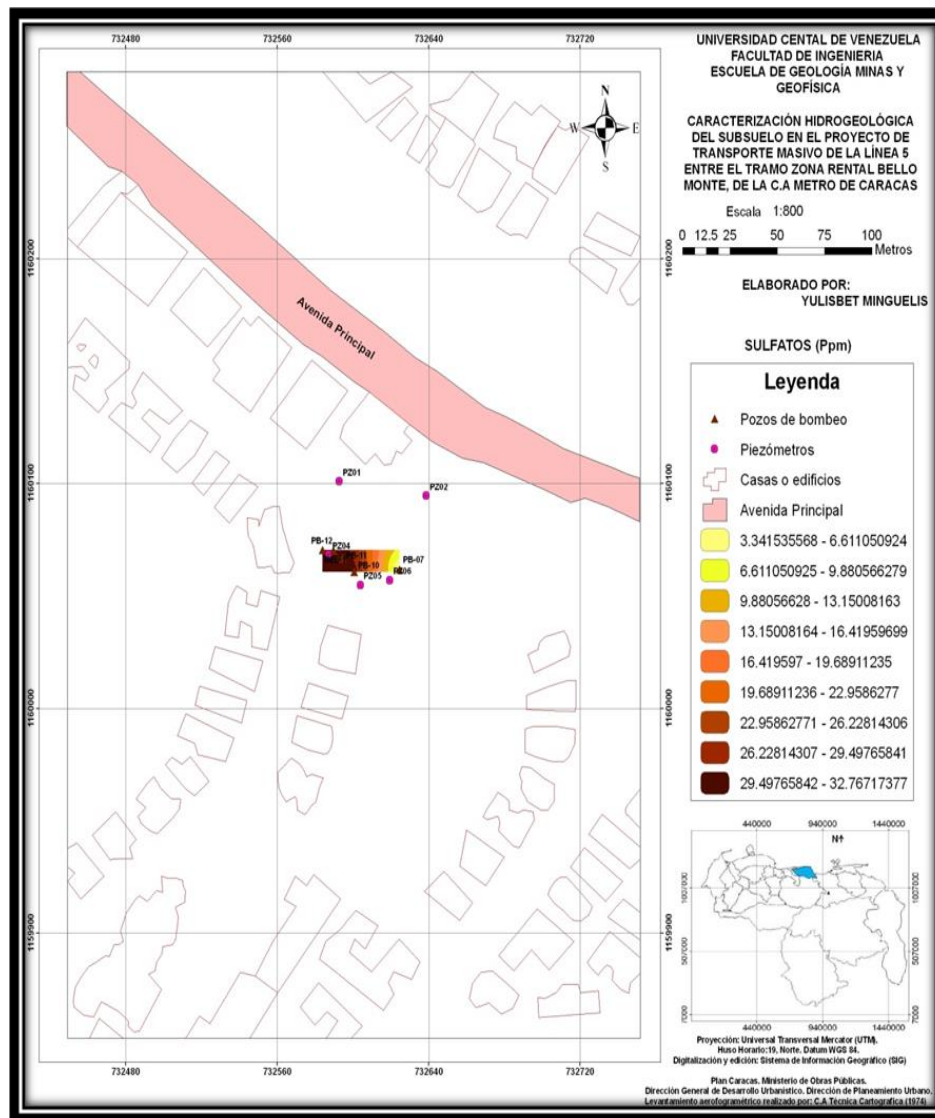


Figura 5.8 Mapa de Sulfatos

5.5.3 PH

El mapa de distribución de PH (Figura 5.9) tiene como finalidad observar las zonas donde las aguas tienen un comportamiento ácido, básico y/o neutral. En la tabla 5.10 se muestran los valores de PH para cada pozo y tales valores varían entre 6.75 y 8.28. Los mayores valores están ubicados hacia

el sur de la zona, donde el Esquisto Las Mercedes está más próximo a la superficie, que permite inferir la presencia de minerales en la composición de las aguas, ya que es ahí; donde se mantienen los valores entre 7.21 a 8.28, siendo posiblemente el resultado de la disolución de minerales calcáreos, calificando al agua como ligeramente básica para el consumo humano. En forma general los valores del PH entran en el rango aceptable para el consumo humano, según las norma COVENIN: 2187-84 que establece valores entre 6.5 y 8.5 para este propósito.

Pozo	Norte	Este	PH
BEL-01	-1819.504	6612.732	6.75
PB-07	-1828.823	6653.622	8.28
PB-10	-1827.959	6629.009	7.07
PB-11	-1823.671	6623.543	7.21
PB-12	-1819.739	6618.244	7.11

Tabla 5.10 Valores de PH.

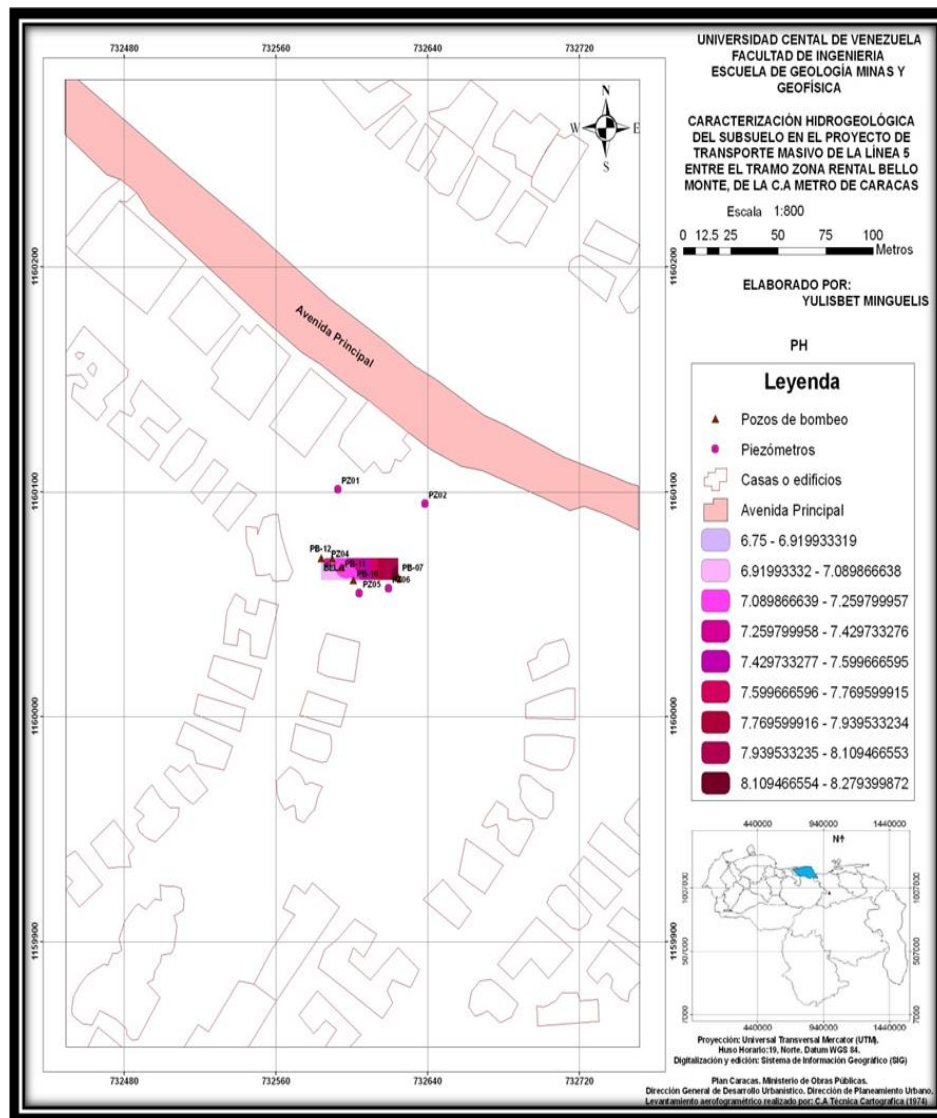


Figura 5.9 Mapa de PH.

5.5.4 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica se debe a la cantidad de sales minerales disueltas en el agua, cuando se tiene alta conductividad eléctrica es debido a una alta concentración de minerales disueltos. En la tabla 5.11 se muestran los valores de conductividad eléctrica para 5 pozos, los cuales están

representados en la figura 5.10, donde los valores más altos se encuentran al norte de la zona con valores comprendidos entre 0.645 mS/cm (miliSiemens/cm) y 0.725 mS/cm, En general se puede decir que los valores de conductividad son bajos en todo el área lo que indica una buena calidad de agua.

Pozo	Norte	Este	Conductividad ms/cm
BEL-01	-1819.504	6612.732	0.719
PB-07	-1828.823	6653.622	0.645
PB-10	-1827.959	6629.009	0.670
PB-11	-1823.671	6623.543	0.706
PB-12	-1819.739	6618.244	0.725

Tabla 5.11 Valores de Conductividad Eléctrica.

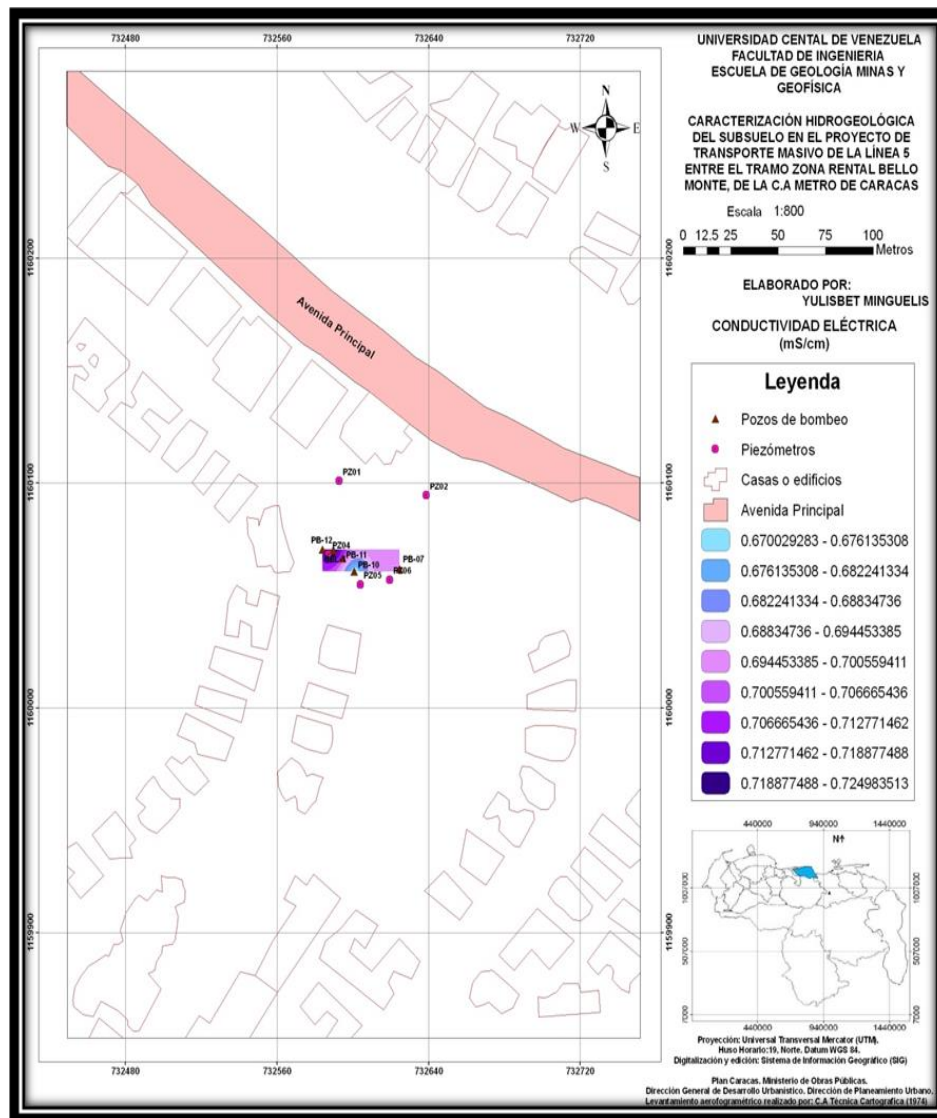


Figura 5.10 Mapa de Conductividad

5.6 Calidad de Agua para Consumo

De acuerdo con el total de pozos ubicados en la zona de estudio, se tiene que el 53,57% de estos pozos se encuentran activos, es decir, están actualmente en proceso de bombeo.

Al comparar los resultados de las muestras de agua descritas en la tabla 4.2 (pág. 63) con los valores de las tablas 4.9 y 4.10 (págs.75, 77 respectivamente) se puede notar que todos los parámetros fisicoquímicos se encuentran por debajo de los valores máximos permisibles, indicando que el agua extraída es apta para consumo humano.

5.7 Modelo hidrogeológico conceptual

Para la elaboración del modelo hidrogeológico conceptual se utilizaron datos de pozos y perforaciones, ya que son las principales fuentes de información sobre el intervalo litológico donde se ubica reservorio de agua subterránea y la superficie del terreno.

Se elaboraron tres modelos sencillos, que no incluyen ni el tipo de litología, ni estructuras presentes en la zona de estudio. El primero esta basado en el uso de condiciones de borde constante, es decir, que los valores de entrada y salida de agua eran invariantes en los extremos del modelo, y se trata de predecir la cantidad de fluido acumulado en los diferentes sectores. El segundo modelo, incluye el caudal pasante y los parámetros de descarga calculados en las secciones previas. El objetivo de estos modelos es tratar de establecer la cantidad de fluido presente en la zona de estudio.

La metodología a seguir y los resultados obtenidos para cada uno de los modelos son los siguientes:

5.7.1 Modelo 1

- 1) Se definió la geometría del modelo utilizando para ello la Figura 5.11 y la Figura 5.12, Columns(j): número de columnas, Xmin: representa la posición del extremo izquierdo del corte mostrado en la Figura 5.12, antes del pozo PE-1, en este caso Xmin=0; Xmax: representa la posición del extremo derecho del corte geológico antes mencionado. La distancia horizontal entre ambos extremos es de aproximadamente 10 kilómetros, que representan los 10000 metros colocados en la Figura 5.3.
- 2) Layers (K) número de capas consideradas en el model, en el caso particular de este trabajo se consideró sólo una capa ya que el objetivo es tratar de modelar el nivel freático; Zmin: representa la distancia en metros de las capas presentes en el perfil, Zmax: es la distancia total de las capas. Así la diferencia entre Zmin y Zmax, representa el espesor de la única capa considerada, la cual equivale a 80 metros, que es el doble del nivel freático encontrado a lo largo de la zona de estudio por la C.A Metro de Caracas.
- 3) Filas (i) filas, Ymin: 815 metros, Ymax: 895 metros (Ver Figura 5.12). En la Figura 5.13 se multiplicó el valor de Ymax por un factor de 8.9 con la finalidad de asegurar una mayor visibilidad del nivel freático a modelar.

Las condiciones anteriormente mencionadas se introducen en el programa utilizando la ventana mostrada en la Figura 5.13.

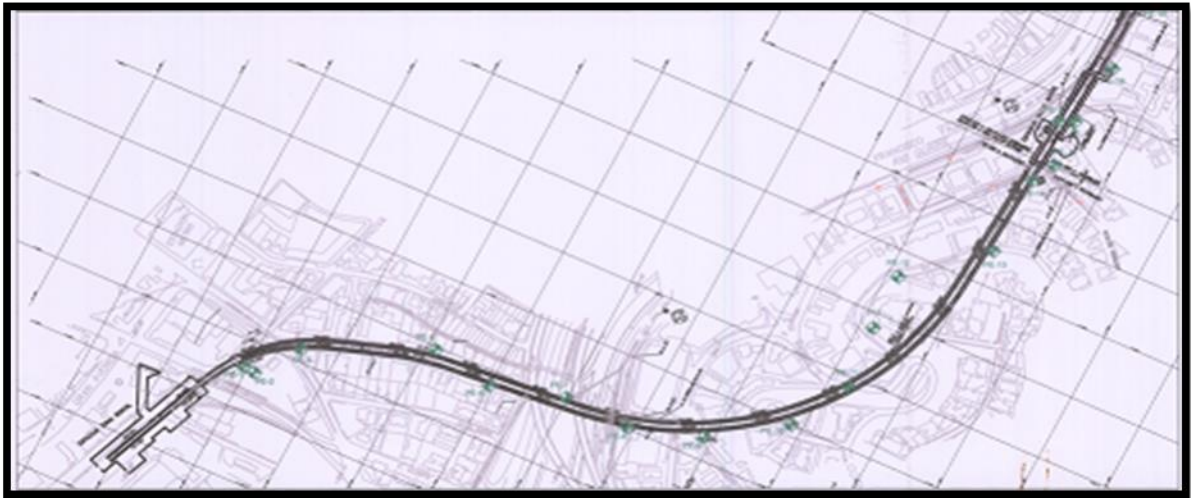


Figura 5.11 Perfil en planta del transecto de la zona

En la figura 5.12 se observan los pozos utilizados en el estudio, el nivel freático y un corte geológico del área de estudio establecido por el Metro de Caracas.

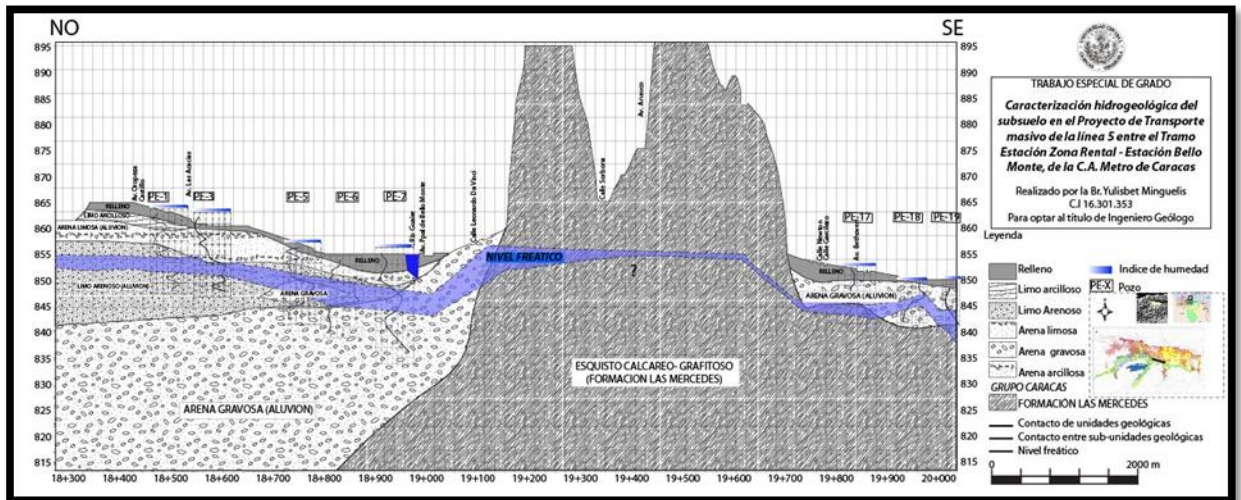


Figura 5.12 Corte geológico y nivel freático inferido a partir de datos de pozos, en la parte central de la figura, el nivel freático fue colocado en funcion de pozos geofisicos existente en el metro. Esta figura puede ser observada a mayor detalle en la anexos (Suministrada por ODEBRECHT)

En la Figura 5.13 se presentan los parámetros y las unidades consideradas en el programa ModFlow 2.8.1. Nótese en esta figura que el valor de Ymax es de 8950 metros ya que fue multiplicada por un factor de 10, como se mencionó anteriormente, con la finalidad de garantizar una mejor visualización de la capa a modelar. Esta multiplicación no ejerce ningún efecto sobre los resultados del modelo, ya que durante el desarrollo de este trabajo se realizaron numerosas pruebas de sensibilidad con diferentes factores de amplificación y los resultados fueron exactamente los mismos, salvo variaciones ópticas que dificultaban la lectura de los resultados.

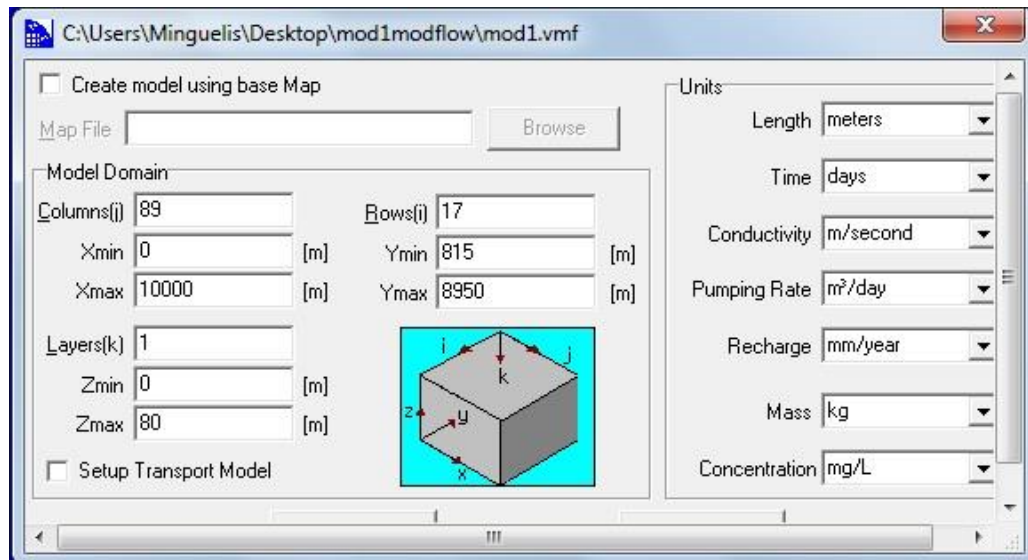


Figura 5.13 Condiciones iniciales y unidades usadas para el modelado del nivel freático en este trabajo mediante el programa MODFLOW 2.8.1.

5.7.1.2 Modelo 2

En este modelo se eliminará la condición de borde izquierda de manera de poder utilizar una condición de borde del tipo Neuman o de flujo conocido, igual a la condición de caudal pasante en el modelo anterior, es decir, un caudal de 12516 m³/día (144861,1 l/s).

Se consideraron además, los mismos parámetros en cuanto al número de filas, número de columnas, $X_{\text{mín}}$, $X_{\text{máx}}$, $Y_{\text{mín}}$, $Y_{\text{máx}}$, $Z_{\text{mín}}$, $Z_{\text{máx}}$, y número de capas o layers. La diferencia con el modelo 1, es que este nuevo modelo incorpora la condición caudal pasante, es decir, los valores obtenidos anteriormente en el balance hídrico del modelo 1.

Para este modelo se debe ingresar en el programa el día de inicio y fin de la recarga, así como la tasa anual en milímetros. Para calcular la recarga se debe repartir el valor del caudal acumulado durante los últimos veinte años, y obtenido por el programa MODFLOW el cual es equivalente a $12516 \text{ m}^3/\text{día}$ ($144861,1 \text{ l/s}$). La recarga se calcula como la distribución del caudal antes mencionado en un área igual a $10000 \text{ m} \times 80 \text{ m}$ (Ancho del modelo \times Ancho de la celda)

5.7.1.3 Modelo 3

En este modelo se consideraron todos los pozos a lo largo de la sección transversal mostrada en la Figura 5.12. Las condiciones de borde empleadas tipo Dirichlet o constante para cada uno de los pozos, los valores usados fueron la profundidad del nivel freático obtenida para cada pozo.

5.7.2 Resultados del Modelo 1: Condiciones de Borde de Nivel Constante

La Figura 5.14 resume los resultados obtenidos para el primer modelo, esta figura representa las líneas de flujo equipotenciales, los valores o cota de cada curva representa el valor de un caudal registrado en el modelo dentro de un período de 20 años.

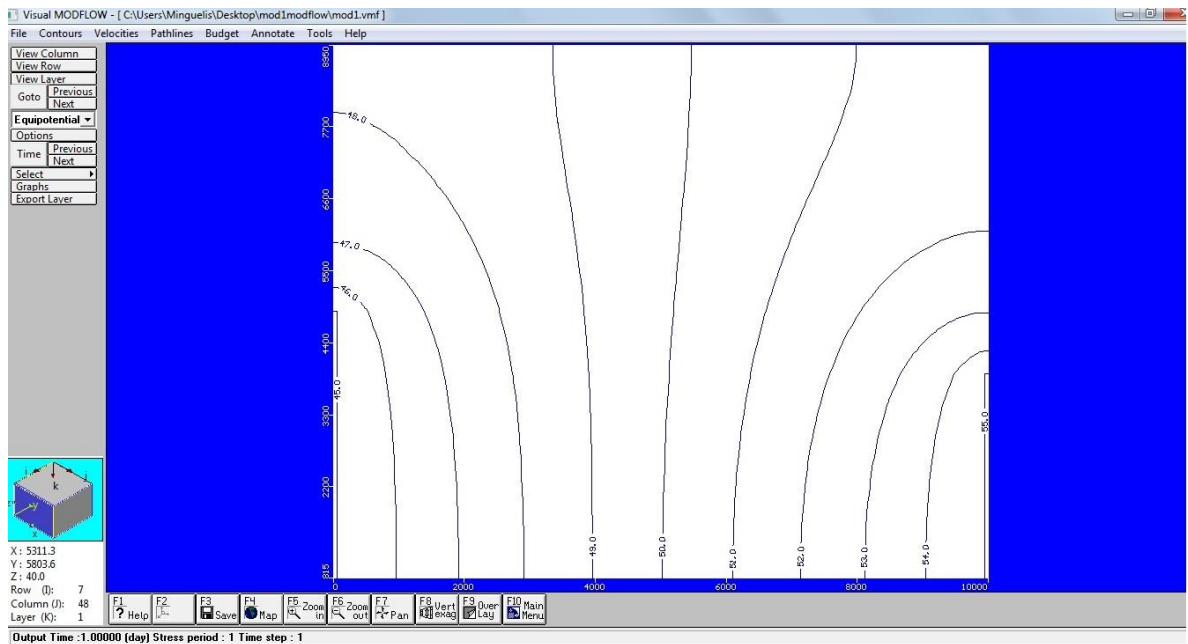


Figura 5.14 Líneas de flujo resultantes del modelo 1, asumiendo condiciones de borde constante

En la Figura 5.15 se muestra el campo de velocidades superpuesto estos sobre las líneas de flujo para el modelo 1.

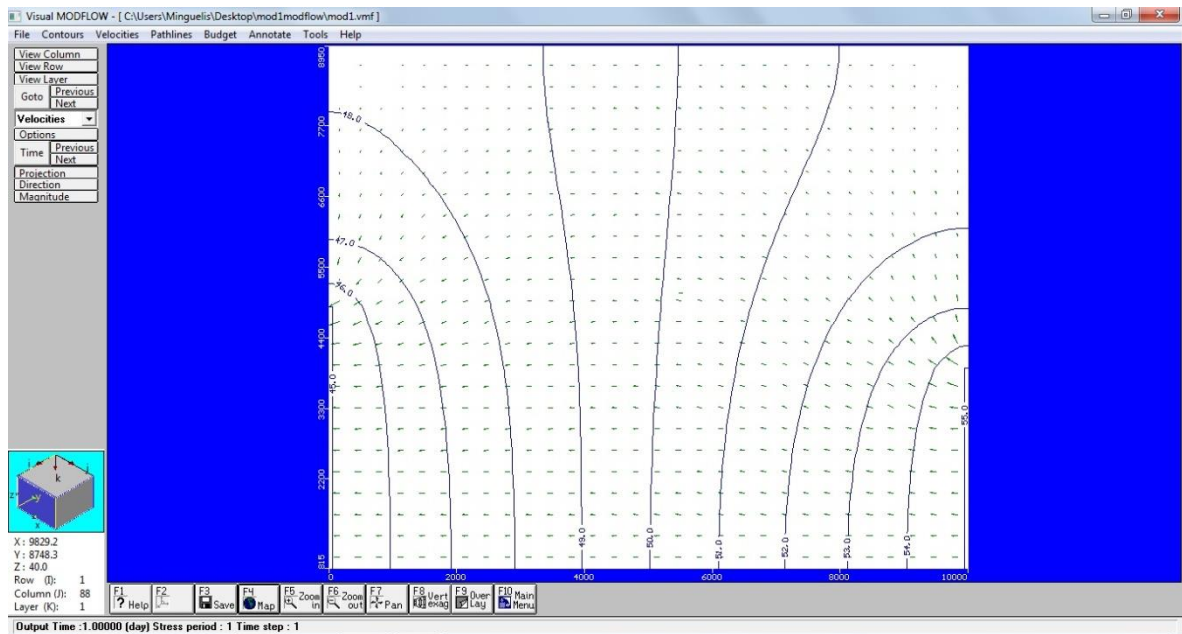


Figura 5.15 Líneas de flujo con la proyección del campo de velocidades y la magnitud de la velocidad para el modelo 1

La Figura 5.16 representa los valores obtenidos del balance hídrico calculado por el programa ModFlow. Prácticamente no existe diferencia entre la entrada y la salida del modelo ya que se supone, es constante.

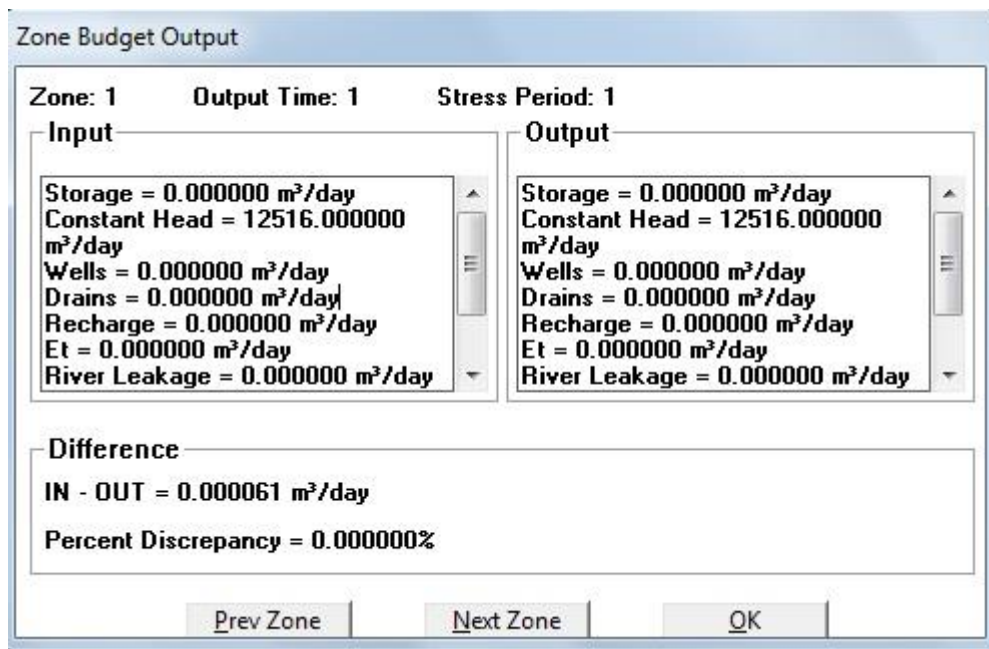


Figura 5.16 Balance hídrico obtenido del modelo 1, solamente considerando dos pozos, uno a la entrada y otro a la salida. Es decir condición de borde de nivel constante. El valor de caudal es de 12516 m³/d (144861,1 l/s)

5.7.2.1 Resultados del Modelo 2: Condiciones de Borde tipo Neuman

La Figura 5.17 resume los resultados obtenidos para el modelo 2. Note en esta figura que la geometría de las curvas de flujo equipotenciales cambia, como consecuencia de las nuevas condiciones de borde impuestas al modelo.

En la Figura 5.18 se presenta las líneas de flujo y el campo de velocidades para el modelo 2. La magnitud del campo de velocidades es mucho mayor en el borde derecho, producto del movimiento de fluidos.

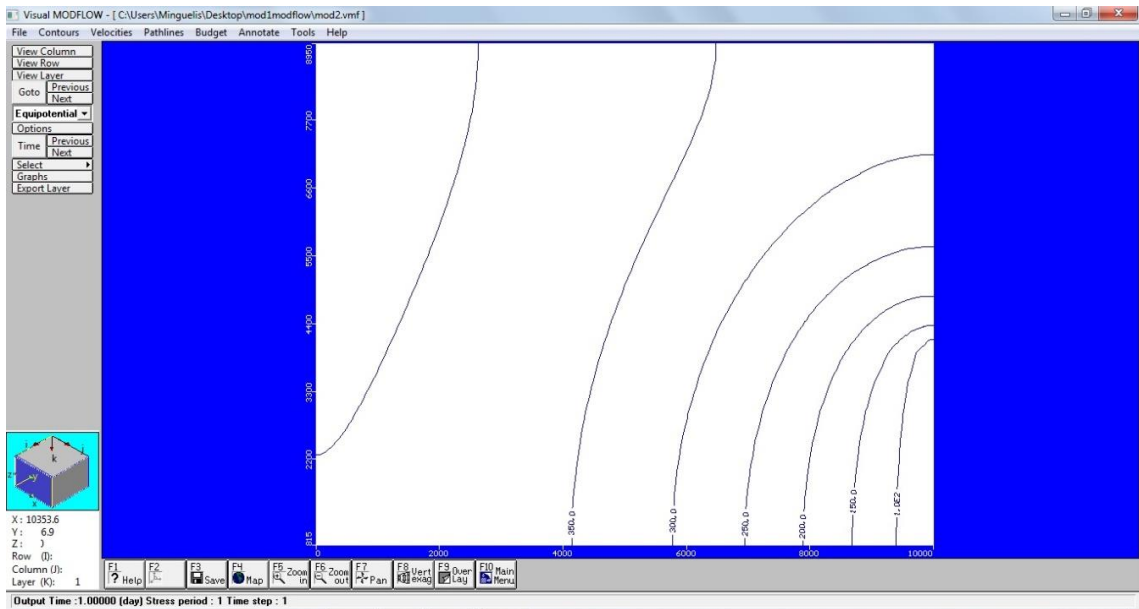


Figura 5.17 Líneas de flujo resultantes del modelo 2, asumiendo condiciones de borde tipo Neuman

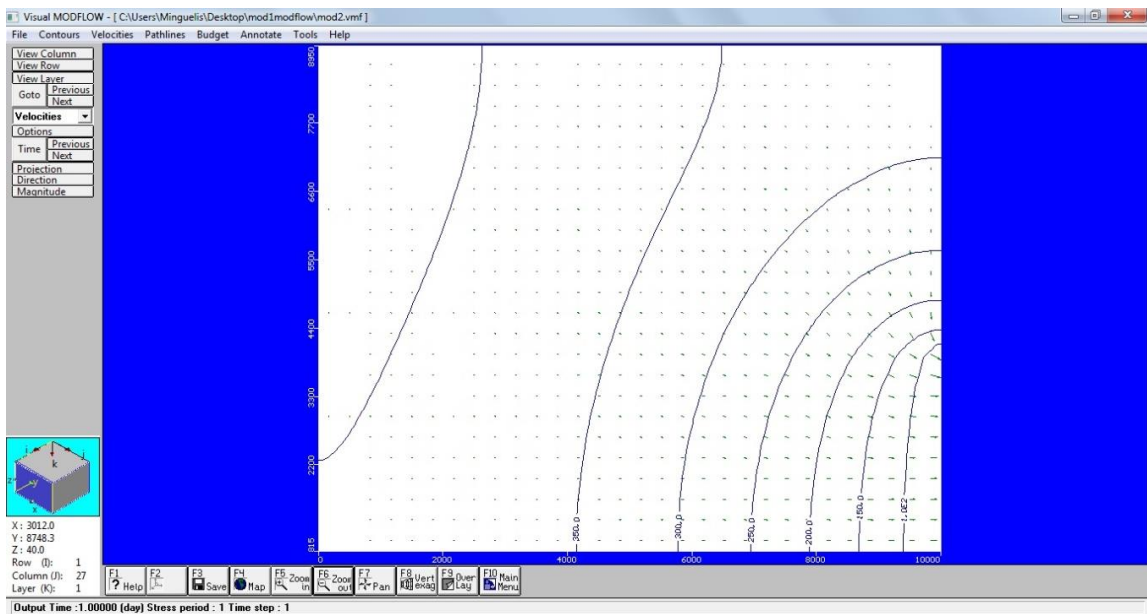


Figura 5.18 Líneas de flujo con la proyección del campo de velocidades y la magnitud de la velocidad para el modelo 2

El balance hídrico mostrado en la Figura 5.19 para el modelo 2 indica que a pesar de las condiciones de borde diferentes entre los modelos 1 y 2, los niveles de entrada y salida de fluido son constantes, pero los niveles de fluidos y velocidades en cada curva son diferentes.

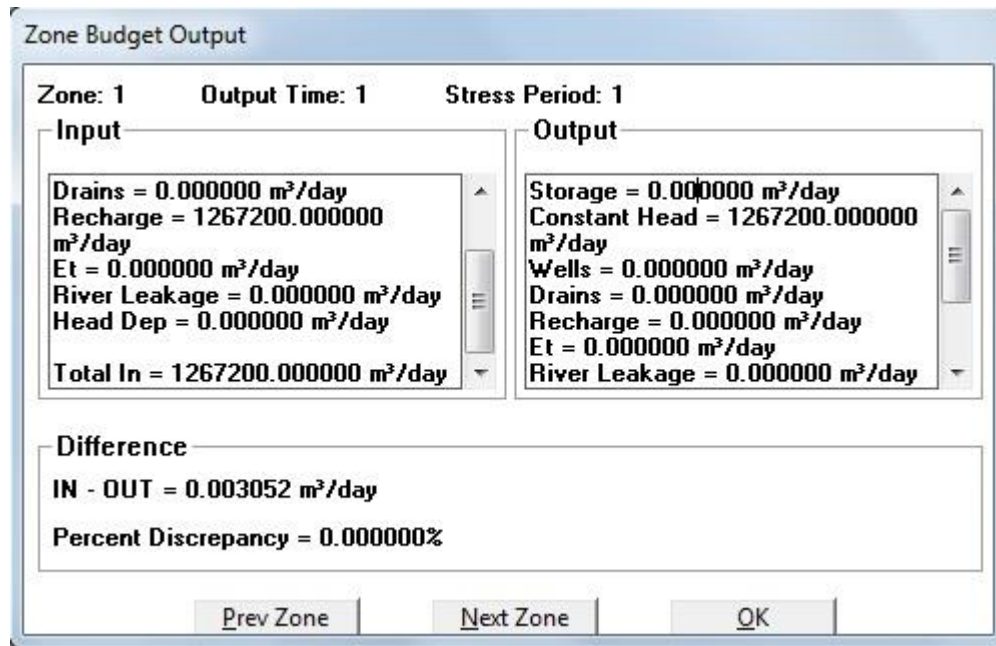


Figura 5.19 Balance hídrico obtenido del modelo 2, solamente considerando el pozo derecho

5.7.2.2 Resultados del Modelo 3: Condiciones de Borde de Nivel Constante, tomando en cuenta la profundidad del nivel freático en cada pozo.

La Figura 5.20 muestra la geometría utilizada para el modelo 3. Aquí se empleó la información de diez pozos existentes en la zona de estudio.

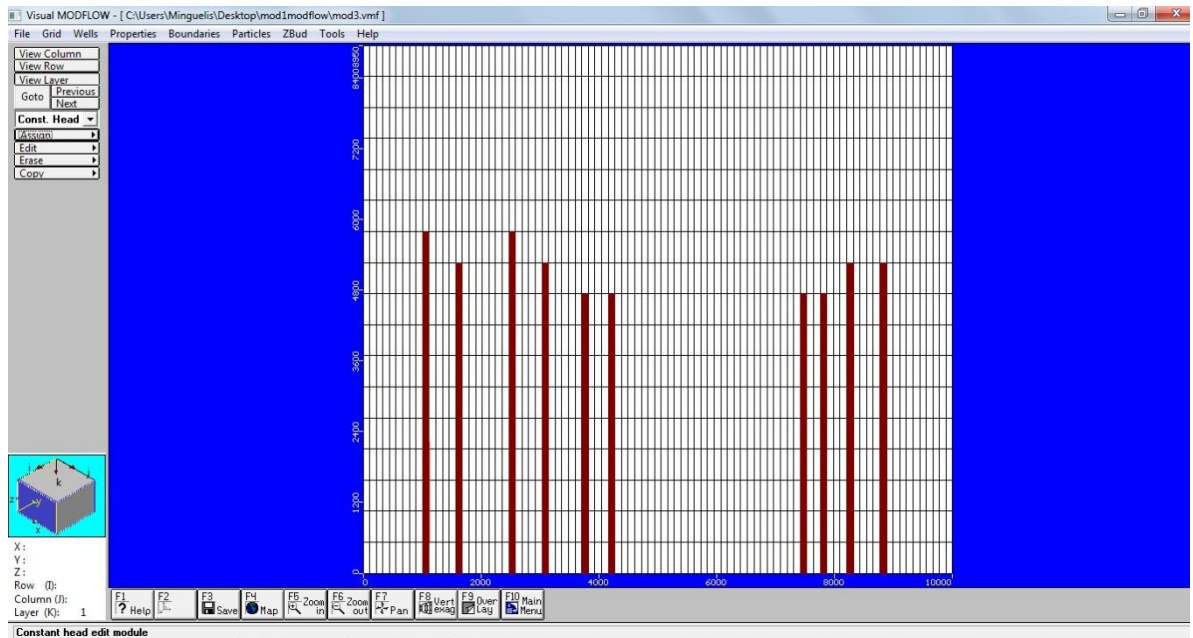


Figura 5.20 Geometría utilizando el nivel freático dado para cada uno de los pozos mostrados en la Figura 5.2

La Figura 5.21 muestra las líneas de flujo y campo de velocidades considerando 10 pozos, aquí la profundidad del nivel freático en cada pozo representa una condición de borde para el pozo vecino, este modelo tiene la limitación de que asume interacción entre cada uno de los pozos. La ventaja es que permite obtener los valores de flujo en aquellos sitios en donde no existe información, tal como la zona cercana al Esquisto de la Formación Las Mercedes.

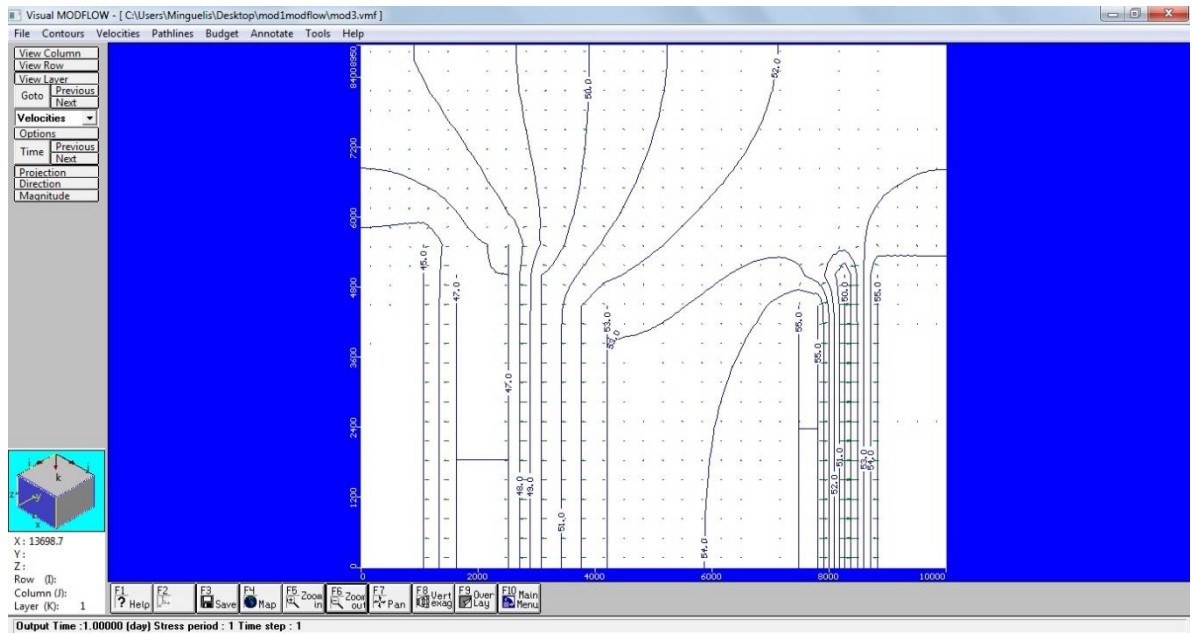


Figura 5.21 Líneas de flujo y campo de velocidades para el modelo 3, en el cual se consideraron todos los pozos

Los resultados del balance hídrico para el modelo 3, son resumidos en la figura 5.22

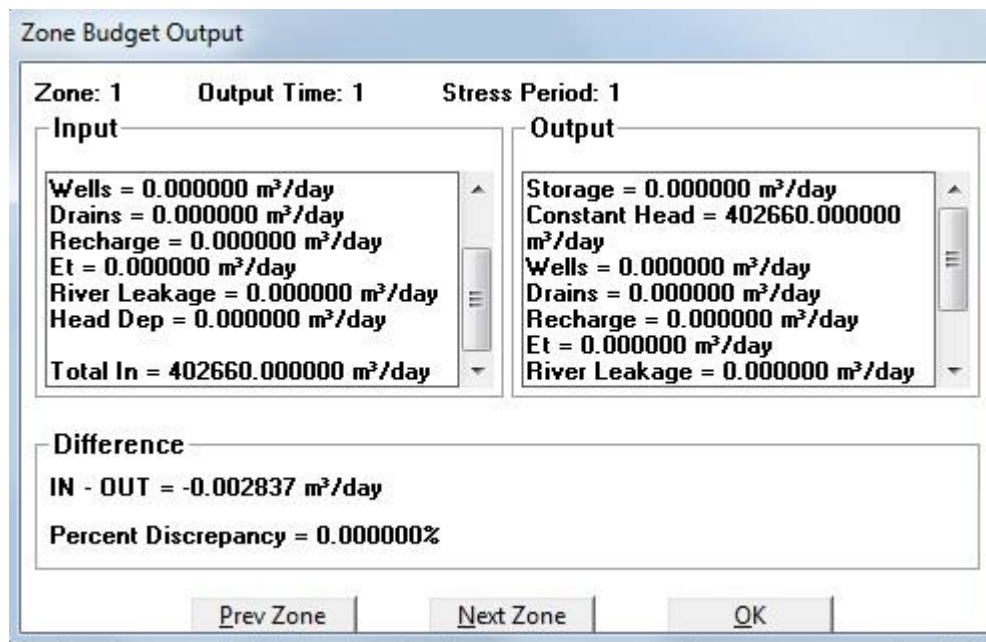


Figura 5.22 Balance hídrico obtenido del modelo 3, considerando 10 pozos con posibles interacciones

5.8 Análisis de Resultados

Las figuras 4.6 y 4.8 del capítulo anterior muestran la distribución del acuífero presente en la parte superior del túnel principal del Metro de Caracas estación Bello Monte, los modelos presentados en la sección 5.10 no toman en cuenta la información geológica presente en la zona de estudio, simplemente representan valores estimados de la profundidad del nivel freático, movimiento de la corriente y cantidad de fluido presente.

La sección transversal de la Figura 5.12 (Ver anexos) indica que en el esquisto de La Formación Las Mercedes el nivel freático se ubica a unos 33 metros de profundidad, basándose en los datos del pozo PE-9 situado en el aluvión, y se mantiene al mismo nivel durante todo el esquisto hasta llegar a 45 metros en el aluvión del pozo PE-14. Los resultados sugeridos en este trabajo indican en el caso del modelo 1, con condiciones de borde constante

indican que en esa área la profundidad del nivel freático debería situarse entre 49 y 52 metros. Más aún, cuando se emplean condiciones de borde tipo Neuman y se toma en cuenta la recarga del acuífero, el modelo sugiere que la profundidad del nivel freático oscila entre 100 a 350 metros lo cual pareciera una sobreestimación del nivel freático tomando en cuenta el efecto de roca sello que pudiera ejercer el esquisto. El modelo 3, sugiere que el nivel freático debería estar entre 51 a 54 metros de profundidad. Aunque este último modelo, físicamente es mucho más complicado ya que toma en cuenta posibles interacciones con pozos vecinos y recirculación por conexión dentro del acuífero, indicaría que efectivamente el nivel freático mostrado en la Figura 5.12 debería ser mucho más profundo que el presentado en esta figura.

Los valores de balance hídrico predichos por el modelo y los calculados en el capítulo 4 difieren principalmente porque en estos últimos se tomaron en cuenta los datos de precipitación en el cálculo de la recarga. En el caso del programa no se incorporaron los datos de precipitación, evapotranspiración, ni la influencia que puede tener el río Guaire sobre el acuífero, esto hace que el caudal predicho por el modelo tenga diferencias con respecto a los valores observados, pero no influye en las estimaciones de las profundidades de la ubicación del nivel freático.

Los balances hídricos calculados y mostrados en las Figuras 5.16, 5.19 y 5.22 respectivamente para cada uno de los modelos (modelo 1 = 0.000061, modelo 2 = 0.003052 y modelo 3 = -0.002837) indican que las diferencias a nivel de profundidad del nivel freático entre la entrada y la salida no son mayores al 1%, sin embargo, el nivel freático sugerido en el perfil mostrado en la Figura 5.12, ubicado a una profundidad de 37 metros para la zona cercana al esquisto de la Formación Las Mercedes representa un 73% de variación, lo cual, representa un gran margen de error.

Tomando en cuenta las dimensiones del acuífero, el efecto de las precipitaciones sobre el patrón de recarga, la cercanía del río Guaire y la influencia de los niveles y cambios en el acuífero del río, además de las propiedades propias de los fluidos para migrar hacia zonas de menor elevación, en donde la roca sello en este caso los esquistos, ocasionan que la ubicación del nivel freático en la parte central del perfil de la Figura 5.3 sea mucho mayor que la presentada ante el Metro de Caracas, así, esto pudiera explicar la alta tasa de humedad y producción de agua a este nivel de la estructura.

Conclusiones

La recopilación de la data de los niveles piezométricos permitió elaborar mapas, que muestran la variación de los niveles piezométricos que se encuentran del lado este de la estación Bello Monte, correspondiente a la zona derecha de la Figura 5.3, y que la dirección del flujo subterráneo va dirigida hacia el suroeste de la zona. Posiblemente como una consecuencia de la localización de los pozos de bombeo activos en esta misma zona.

La información geofísica disponible permitió identificar tres (3) capas en el subsuelo, que se corroboraron con las perforaciones geotécnicas realizadas en la zona de estudio y se identificó el material constituyente del acuífero. Este material está conformado por aluviones hacia ambos extremos de la zona de estudio.

Las precipitaciones y temperaturas promedio en la cuenca indican que los meses propicios para una mayor recarga del acuífero van de junio a octubre, donde se superan los déficit producidos por la evapotranspiración llegando a almacenar un promedio mensual de 104.73 mm/año durante los últimos 20 años.

La recarga del acuífero durante los últimos 20 años arrojó un valor promedio de 22.95 m³/d, y un acumulado de 76.35 m³/d, lo cual sugiere que la misma proviene de las zonas montañosas al norte, como es el Waraira Repano (Cerro El Ávila), asumiendo que todo el fluido proviene de la esorrentía del agua sobre laderas cercanas a la zona de estudio.

En cuanto a los análisis fisicoquímicos de las muestras de agua indican que los valores de pH oscilan entre 6.75 y 8.28, la conductividad eléctrica está entre 0.670 y 0.725 mS/cm, y el total de sólidos disueltos 328 y

352mg/L, los cuales indican que el agua presenta características que la hacen aceptable para el consumo humano.

En los alrededores del foso se generó un modelo hidrogeológico usando el programa ModFlow 2.8.1 el cual permitió definir la presencia de un acuífero semiconfinado y alto factor de movilidad del fluido, con un espesor promedio de 2.5 m este valor sólo corresponde a la zona del aluvión y las rocas sedimentarias, para la Formación Las Mercedes se requiere un análisis más detallado, ubicado a una profundidad aproximada de 50.5 m desde el tope máximo del perfil mostrado en la Figura 5.12, la cual tiende a incrementarse en zonas cercanas al esquisto de la Formación Las Mercedes, y situándose a sólo 10 metros del borde del túnel de la Estación Bello Monte. Todos los resultados del modelado numérico permiten concluir que la estimación inicial de la profundidad del nivel freático fue subestimada, colocándola a unos 23 metros por encima del borde del túnel.

Recomendaciones

El río Guaire se encuentra muy cerca de la zona de estudio, esto trae como consecuencia que numerosos factores como la influencia del caudal del mismo, la presencia de contaminantes bacterianos y su flujo hacia la obra del metro, generándose efectos negativos que inducen a recomendar:

- 1) Efectuar pruebas de bombeo para determinar los parámetros hidrogeológicos del acuífero y poder prever el comportamiento del mismo bajo las condiciones de trabajo que se prevé.
- 2) Tomar muestras de agua para practicarles análisis isotópicos a fin de determinar a ciencia cierta el origen de las aguas presentes en el acuífero y analizar la influencia de la cercanía del río Guaire.
- 3) Construir un sistema de drenajes en la estación, ya que la mayor cantidad de agua se encuentra en esta zona y canalizarla en dirección suroeste para seguir la dirección natural de la misma.
- 4) Generar un modelo matemático del foso, que permita mostrar la evolución en el tiempo de los niveles del acuífero.
- 5) Utilizar software o programas computacionales que permitan incorporar la evapotranspiración, la precipitación, el tipo de litología y la influencia de redes hídricas subterráneas sobre el sistema de túneles del Metro de Caracas.

Bibliografía

Anónimo. (2009). “Aplicación métodos geofísicos en caracterización de sitio”. TRX Consulting, Caracas.

Astier, J. (1975). Geofísica aplicada a la hidrogeología. Editorial Paraninfo. Madrid España.

Díaz y Tovar, M. (2005). Estudio geológico-geotécnico basado en la caracterización de suelos residuales y del perfil de meteorización en las zonas de influencia del área metropolitana de Caracas. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

Farfán, M y Marconi, M. (2008). Caracterización geomecánica para el proyecto del túnel del sistema subterráneo Metro de Caracas línea 5, tramo Bello Monte-Chuao (UNEFA). Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

Frías, L. (2007). Modelo hidrogeológico del acuífero ubicado en los sectores La Fuente – Paraguachí, municipio Antolín del Campo, Isla de Margarita Venezuela. Trabajo Especial de Grado. Universidad de los Andes. Mérida.

Garrity, C; Hackley, P; Karlsen, A y Urbani, F. (2005) Mapa geológico de Venezuela. FUNVISIS, UCV y USGS. Caracas.

González de, Iturralde, A & Picard, X. 1980. *Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas*. Editorial. Foninves. Caracas-Venezuela.

González de V, y Ferrer, L. (2002) *Ingeniería Geológica*. Editorial Pearson Prentice Hall. Madrid España.

Johnson, E. (1975). *El Agua Subterránea y los Pozos*. Johnson División, U:O:P: Inc. Minnesota.

Ministerio de Obras Públicas (1974). *Mapa Topográfico Plan Caracas*. Escala: 1:1.000. Dirección General de Desarrollo Urbanístico.

Odebrecht S.A. (2006). *Extensión Línea 4 Tramo Zona Rental-Parque del Este*.

Oropeza, J, y Zambrano, A. (2007). *Elaboración de una base de datos de geología urbana para fines de microzonificación sísmica para la ciudad de Caracas*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas. Ostos, M. y Urbani, F. (1999). *El Complejo Ávila, Cordillera de La Costa, Venezuela*. Revista GEOS, UCV, Caracas, (29): 205-217.

Rodríguez, S. (2009). *Estudio integrado y caracterización hidrogeológica del subsuelo de la Línea 5 del Metro de Caracas, Estación Bello Campo*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas.

Skrainka, J. 2009. *“Estudio comparativo de Vs utilizando métodos geofísicos y geotécnicos en la zona Guarenas-Guatire.”*. Trabajo de grado, Universidad Simón Bolívar. Caracas.

Urbani, F. y Rodríguez, J. (2004). *Atlas Geológico de la Cordillera de la Costa, Venezuela*. Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas FUNVISIS. Caracas.

Anexo