

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS
EN UN SECTOR DEL CAMPO BARE, ESTADO ANZOÁTEGUI**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Bra. Barelli M., Esteralessandra
Para optar al Título
de Ingeniero Geólogo

Caracas, 2011

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN UN SECTOR DEL CAMPO BARE, ESTADO ANZOÁTEGUI

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Ricardo Alezones
TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Crisanto Silva

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Bra. Barelli M., Esteralessandra
Para optar al Título
de Ingeniero Geólogo

Caracas, 2011

Caracas, junio de 2011

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela del Departamento de Geología, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Esteralessandra Barelli, titulado:

**“Estudio hidrogeológico de aguas subterráneas en un sector del Campo Bare,
Estado Anzoátegui”**

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

Prof. Armando Díaz Q.
Jurado

Prof. Ramón Montero
Jurado

Prof. Ricardo Alezones U.
Jurado

Prof. Ricardo Alezones
Tutor Académico

Ing. Crisanto Silva
Tutor Industrial

DEDICATORIAS

Al único y verdadero Dios de mi vida, por darme la sabiduría y nuevas fuerzas para culminar satisfactoriamente mis estudios de pregrado con este trabajo, en el Departamento de Geología de la Escuela de Geología, Geofísica y Minas de la Facultad de Ingeniería de la Ilustre Universidad Central de Venezuela. “La luz en las tinieblas resplandece, y las tinieblas no prevalecieron contra ella (Juan 1:5)”.

A mi madre Dra. Olga Medina Hernández, por su amor y apoyo incondicional hacia mi persona, a lo largo de todos mis estudios universitarios de pregrado y mientras se realizó el presente trabajo. Es un ejemplo a seguir en el ámbito académico para mi persona, y espero llegar a lograr el grado de Doctora en el campo profesional de la Ingeniería, como lo es ella en el campo profesional de la Psicología Humana.

A mis abuelos Gerónimo Medina y Pastora Hernández de Medina por su amor y apoyo hacia mi persona, con los cuales pude contar a lo largo de todos mis estudios universitarios de pregrado. En especial por su impulso emocional y constante estímulo como estudiante.

A mi amigo y hermano Br. Diego Hernández, estudiante de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de ésta universidad, por los dos años y medio que compartimos juntos estudiando en el ciclo básico de la Facultad de Ingeniería, y por ayudarme en la decisión de estudiar la especialidad de Ingeniería Geológica.

A mi amigo y hermano Br. Wendel Josepht, estudiante de Ingeniería Geofísica de la Facultad de Ingeniería de ésta universidad. Pude contar con su apoyo durante el transcurso de todos mis estudios de pregrado.

A mis amigos y hermanos Yesenia Silva, Rosalba Mendoza, Jesús Prada, Geniver Campos, Josué Márquez, Maritza Álvarez, Elvis Alvarado, Zoila Moreno e Israel Balza, por todo el cariño y apoyo brindado hacia mi persona en el transcurso de mis estudios universitarios de pregrado.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Ilustre Universidad Central de Venezuela por toda la formación académica brindada durante seis años, lo cual formó un nivel cultural base para la realización de este trabajo, y así mismo a la Biblioteca Central y Biblioteca de la Facultad de Ingeniería por el préstamo de libros y otras fuentes bibliográficas.

También se agradece a la Escuela de Geología, Geofísica y Minas, específicamente a la Sra. Morella Mikaty de la Biblioteca Dr. Virgil Winkler del Departamento de Geología por el aporte de fuentes bibliográficas a fin de ser utilizadas en el presente trabajo.

Se agradece al Prof. Ricardo Alezones Urbani del Departamento de Geología, quien es el tutor académico del presente trabajo especial de grado, por el apoyo y la orientación brindada para definir el tema, asesoría para la realización del proyecto del presente trabajo, así como la orientación y asistencia científica para la realización y culminación del mismo.

Igualmente se agradece al Técnico Luis Herrera y al Ing. Iván Veloso, quienes aportaron asistencia técnica y científica para la realización de éste trabajo y para el empleo de la plataforma Visual Modflow 4.2 Pro[®], así como fuentes bibliográficas, tesis y datos de pozos, a fin de ser empleados para llevar a cabo el objetivo general y los objetivos específicos del presente trabajo de investigación.

Se agradece al Br. Carlos López por la asistencia técnica y científica para el empleo de la plataforma ArcGis 9.2[®], a fin de generar la base cartográfica de georeferencia digital de la zona de estudio de este trabajo.

Así mismo se agradece al Profesor Mauricio Hernández del Departamento de Geología por aportar conocimientos científicos para el análisis de la fisiografía de la zona de estudio y facilitar la imagen del Satélite Landsat a fin de servir como base para la interpretación de la fisiografía de la zona.

Por último y no menos importante, se agradece al Prof. Ramón Luis Montero del Departamento de Geoquímica de la Facultad de Ciencias, quien sirvió de

orientador y aportó conocimientos científicos para la puntualización y cumplimiento de los objetivos del presente trabajo.

Barelli M., Esteralessandra

**ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS EN UN
SECTOR DEL CAMPO BARE, ESTADO ANZOÁTEGUI**

Tutor Académico: Prof. Ricardo Alezones. Tutor Industrial: Ing. Crisanto Silva.

**Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Geofísica y
Minas, Departamento de Ingeniería Geológica. Año 2011, 87 p.**

Palabras Claves: Acuífero, Bare, Direcciones, Flujo, Modelo, Pozos, Subterráneo, Velocidades

Resumen. En la zona de Bare, estado Anzoátegui, área Ayacucho de la Faja Petrolífera del Orinoco, el agua subterránea es vital tanto para el consumo humano como para el uso agrícola y en las actividades petroleras ya que es la única fuente de agua en la región. Es importante señalar que si no existe un sistema hidrogeológico que suministre el agua para tales fines, esto constituiría un grave problema, es por ello que el presente trabajo, tiene como finalidad realizar un estudio detallado en torno a un modelo de flujo de aguas subterráneas en el sector noroccidental del área Ayacucho, en el campo Bare, con el propósito de identificar la distribución de permeabilidades, las direcciones y velocidades de flujo subterráneo en la zona del acuífero comprendida entre los pozos P₀, P₁ y P₂ del polígono enmarcado dentro del proyecto Piloto de Combustión en Sitio a Larga Distancia (CESLD); específicamente ubicado en el sector Noroccidental del área Ayacucho del Campo Bare de yacimientos extrapesados del Distrito San Tomé, de PDVSA Exploración y Producción, presentando un rumbo este-oeste, a unos 40 km aproximadamente al sur de la ciudad de El Tigre y a unos 70 km al norte del río Orinoco.

Para cumplir dicho objetivo inicialmente se realizó una recopilación bibliográfica de la geología regional de la zona de estudio correspondiente a la Formación Mesa, un levantamiento de la información de geología local y datos de los tres pozos que delimitan la zona de estudio en el acuífero; esto con la finalidad de caracterizar el comportamiento de las rocas que fungen de reservorios de aguas

subterráneas. Igualmente fue elaborado un perfil litológico que muestra las unidades litoestratigráficas, profundidades de perforación y distribución de rocas permeables entre los tres pozos. Así mismo se determinó en mapas topográficos, las zonas de recarga y descarga en los sedimentos permeables del acuífero. Dentro de los resultados obtenidos se generó una base cartográfica de georeferencia digital de la zona de estudio en la plataforma ArcGis 9.2[®], conteniendo información geológica tanto regional como local; igualmente se implementó recopilada de geología regional y geología local, y se implementó la plataforma de Visual Modflow 4.2 Pro[®], para producir un modelo hidrogeológico de aguas subterráneas digitalizado entre los tres pozos mencionados, cuyo fin fue el de obtener las direcciones y velocidades de flujo subterráneo de la zona en estudio.

INDICE GENERAL

	Pág.
CAPÍTULO I.....	1
1.-INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.-PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.2.-JUSTIFICACIÓN.....	4
1.3.-ALCANCE.....	5
1.4.-LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	5
1.5.-ANTECEDENTES.....	7
1.5.1.-Trabajos geológicos.....	7
1.5.2.-Trabajos hidrogeológicos.....	7
1.6.-OBJETIVOS.....	9
1.6.1.-Objetivo General	9
1.6.2.-Objetivos Específicos.....	9
CAPÍTULO II.....	10
2.-MARCO TEÓRICO.....	10
2.1.-Geología Regional	10
2.1.1.- Formación Mesa.....	10
2.1.1.a.- Extensión.....	11
2.1.1.b.- Litologías y su distribución.....	11

2.1.1.c.- Paleontología.....	12
2.1.1.d.- Gradación de los Sedimentos.....	12
2.1.1.e.- Mineralogía.....	12
2.1.1.f.- Sección Tipo.....	13
2.1.1.g.- Espesor.....	13
2.1.1.h.- Edad.....	13
2.1.1.i.- Paleoambientes.....	13
2.1.1.j.- Relieve y fisiografía.....	14
2.1.1.k- Vegetación.....	14
2.1.1.1 - Historia Geológica.....	15
2.1.1.m-Deformaciones.....	16
2.1.1.n- Aluvión Cuaternario.....	16
2.1.1.ñ.-Drenajes.....	17
2.1.1.o.-Ubicación del área de estudio dentro de las Provincias Hidrogeológicas de Venezuela.....	17
2.1.1.p.-Recarga, flujo y descarga de las aguas subterráneas en la Provincia del Orinoco..	19
2.1.1.q.-Drenajes y relieves de la zona de estudio en el mapa topográfico de Atapirire, hoja 7341, escala original 1:100.000.....	20
2.2.-Fundamentos Teóricos de la Investigación.....	23
2.2.1.-Aguas subterráneas.....	23
2.2.2.-Acuífero.....	23
2.2.3.-Características hidrogeológicas de un acuífero.....	23

2.2.3.a.-Porosidad total.....	24
2.2.3.b.-Porosidad eficaz.....	24
2.2.3.c.-Permeabilidad.....	24
2.2.3.d.-Coeficiente de Permeabilidad de Darcy.....	25
2.2.3.e.-Coeficiente de transmisibilidad.....	25
2.2.3.f.-Coeficiente de almacenamiento.....	26
2.2.4.-Tipos de acuíferos.....	26
2.2.4.a.-Acuíferos libres, freáticos o no confinados...	26
2.2.4.b.-Acuíferos confinados o artesianos.....	26
2.2.4.c.-Acuíferos semiconfinados.....	26
2.2.4.d.- Acuíferos emperchados.....	27
2.2.4.e.- Acuíferos semilibres.....	27
2.2.5- Tipos de pozos.....	27
2.2.5.a- Pozo surgente.....	27
2.2.5.b.-Pozo artesiano.....	27
2.2.5.c.-Pozo de control.....	28
2.2.5.d.-Pozo de observación.....	28
2.2.6.-Recarga natural.....	28
2.2.7.-Descarga natural.....	28
2.2.8.-Balance hídrico.....	28
2.2.9.-Balance de aguas.....	29
2.2.10.-Nivel piezométrico.....	29
2.2.11.-Morfología de la superficie.....	29

2.2.12.-Potencial hidráulico.....	30
2.2.13.-Gradiente Hidráulico.....	30
2.2.14.-Flujo subterráneo.....	30
2.2.15.-Líneas equipotenciales.....	31
2.2.16.-Líneas de flujo.....	31
2.2.17.-Redes de flujo.....	31
2.2.18.-Conductividad hidráulica.....	31
2.2.19.- Cono de depresión.....	31
2.2.20.- Nivel freático.....	32
2.2.21.- Nivel dinámico.....	32
2.2.22.-Superficie equipotencial.....	32
2.3.-MODELOS DE SIMULACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA.....	33
2.3.1.-Visualización del modelo con el programa Visual Modflow 4.2 Pro®.....	33
2.3.2.-Las capacidades de simulación del programa Visual Modflow 4.2 Pro®.....	33
CAPÍTULO III.....	35
3.-MARCO METODOLÓGICO.....	35
3.1.- Diseño de la investigación.....	35
3.1.1.-Trabajo de oficina y laboratorio.....	36
3.1.2.-Trabajo de campo.....	36
3.1.3.-Objetivos por etapas.....	36
3.1.4.-Instrumentos.....	37

3.1.5.-Análisis de datos.....	38
CAPÍTULO IV.....	39
4.1.-RESULTADOS.....	39
4.1.1.-GEOLOGÍA LOCAL DE BARE, ESTADO ANZOÁTEGUI.....	39
4.1.1.a.-Fisiografía de la Zona de Estudio Entre los Pozos P ₀ , P ₁ y P ₂	39
4.1.1.b.-Perforaciones de los Pozos P ₀ , P ₁ y P ₂	42
4.1.1.c.-Descripción de las Perforaciones de los Pozos P ₀ , P ₁ y P ₂	45
4.1.1.d.- Profundidades y Distancias Entre los Pozos P ₀ , P ₁ y P ₂	48
4.1.1.e.-Unidades Litoestratigráficas Observadas en la Correlación de los Registros de los Pozos P ₀ , P ₁ y P ₂	48
4.1.1.f.-Ambientes de Depositación de las Unidades Litoestratigráficas Observadas Entre los Pozos P ₀ , P ₁ y P ₂	50
4.1.2.-HIDROGEOLOGIA LOCAL DE BARE, ESTADO ANZOÁTEGUI.....	51
4.1.2.a.-Origen y Clasificación de las Aguas Subterráneas, y del Acuífero de Bare, Estado Anzoátegui.....	51
4.1.2.b.-Zonas de Recarga y de Descarga en la Base Cartográfica de Georeferencia Digital de Bare, Estado Anzoátegui en la Plataforma de ArcGis 9.2®	51
4.1.3.- PERMEABILIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO EN EL MAPA HIDOGEOLÓGICO DE VENEZUELA.....	54

4.1.4.-MODELO HIDROGEOLÓGICO DE AGUAS SUBTERRÁNEO QUE MUESTRA LAS DIRECCIONES Y VELOCIDADES DEL FLUJO SUBTERRÁNEO EN EL ACUÍFERO DE BARE, ESTADO ANZOÁTEGUI ANZOÁTEGUI.....	55
4.1.5.-DIRECCIONES Y VELOCIDADES DEL FLUJO SUBTERRÁNEO EN LOS SEDIMENTOS PERMEABLES DEL ACUÍFERO DE BARE, ESTADO ANZOÁTEGUI.....	57
4.1.5.a.-Direcciones de Flujo Subterráneo en los Sedimentos Permeables del Acuífero de Bare, Estado Anzoátegui.....	57
4.1.5.b.-Velocidades de Flujo Subterráneo en los Sedimentos Permeables del Acuífero de Bare, Estado Anzoátegui.....	60
4.2.-DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	60
CAPÍTULO V.....	65
5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	65
5.1- CONCLUSIONES.....	65
5.2- RECOMENDACIONES.....	69
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70
ANEXOS.....	74
GLOSARIO.....	80

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla N°1. Subprovincias y cuencas de la “Provincia Hidrogeológica del Orinoco”	18

LISTA DE GRÁFICOS

	Pág.
Imagen N°1. Mapa de ubicación de la zona de estudio desde el área Ayacucho de la Faja Petrolífera del Orinoco hasta la localización de los pozos P ₀ , P ₁ y P ₂ en el polígono del proyecto CESLD. Tomado y modificado de (LNH, 2009).....	6
Imagen N°2. Extensión de la zona de estudio en la región de Atapirire, dentro de la Formación Mesa, ubicada en el sector noroccidental del área Ayacucho de la Faja Petrolífera del Orinoco en el estado Anzoátegui. Tomado y modificado de (Cartografía Nacional, 1966).....	10
Imagen N°3. Estratos conglomeráticos de la Formación Mesa. Tomado y modificado de (Chacín, E, 2001)	12
Imagen N°4. Patrones de drenaje y su relación con los relieves de la zona en base al mapa topográfico de Atapirire, Hoja 7341, escala original 1:100.000. Tomado y modificado de (Cartografía Nacional, 1966).....	22
Imagen N°5. Fisiografía de la zona de estudio desde lo regional a lo local, en una imagen orbital tomada desde el Satélite Landsat, Tomado y modificado de (Landsat, 2000).....	39
Imagen N°6. Descripción de la perforación del pozo P ₀ . Tomado y modificado de (LNH, 2009).....	42
Imagen N°7. Descripción de la perforación del pozo P ₁ . Tomado y modificado de (LNH, 2009).....	43
Imagen N°8. Descripción de la perforación del Pozo P ₂ . Tomado y modificado de (LNH, 2009)	44
Imagen N°9. Correlación de los registros de Pozos P ₀ , P ₁ y P ₂ . Tomado y modificado de (LNH, 2009).....	50
Imagen N°10. Zonas de recarga y descarga en la base cartográfica de Georeferencia digital en la plataforma ArcGis 9.2 [®] , desde la región de Atapirire hoja 7341 escala original 1:100.000 hasta la localización de los pozos P ₀ , P ₁ y P ₂ de Bare, estado Anzoátegui, en la hoja 7341 I-SO de Atapirire, escala original 1:25.000. Tomado y modificado de (Cartografía Nacional, 1966).....	53

Imagen N°11. Clasificación de las permeabilidades de la zona de estudio en el Mapa Hidrogeológico de Venezuela, a escala regional 1:740.700 y a escala local 1:270.300. Tomado y modificado de (Ministerio de Minas e Hidrocarburos, 1972).....	54
Imagen N°12. Modelo hidrogeológico de direcciones y velocidades del flujo subterráneo en planta (X, Y) del acuífero de Bare, estado Anzoátegui en la plataforma de Visual Modflow 4.2 Pro®	56
Imagen N°13. Modelo hidrogeológico de direcciones y velocidades del flujo subterráneo en corte transversal (Z, Y) del acuífero de Bare, estado Anzoátegui en la plataforma de Visual Modflow 4.2 Pro®	56
Imagen N°14. Gráfico del nivel freático calculado vs nivel freático observado en el modelo hidrogeológico del acuífero de Bare, estado Anzoátegui en la plataforma de Visual Modflow 4.2 Pro®	57

LISTA DE ANEXOS

	Pág
Anexo N°1. Vista de los afloramientos de los clásticos característicos de la Formación Mesa en la carretera hacia la población de Urica, Distrito Freites, estado Anzoátegui. Tomado y modificado de (Macsoy, 2001).....	74
Anexo N°2. Concepto de potencial hidráulico. Tomado y modificado de (Freeze & Cherry, 1979).....	74
Anexo N°3. Concepto de gradiente hidráulico. Tomado y modificado de (Freeze & Cherry, 1979).....	75
Anexo N°4. Ejemplo de registro del Pozo P ₀ . Tomado y modificado de (LNH, 2009).....	76
Anexo N°5. Mapa Geológico que muestra al sureste la zona de estudio. Tomado y modificado de (Creole Petroleum Corporation, 1961).....	77
Anexo N°6. Mapa Geológico que muestra al noreste la zona de estudio. Tomado y modificado de (Creole Petroleum Corporation, 1961).....	77
Anexo N°7. Diferencia entre nivel piezométrico y nivel freático. Tomado y modificado de (Angelone, 2006).....	78
Anexo N°8. Esquema representativo del bombeo de un pozo en un acuífero libre. Tomado y modificado de (Donado, 1998).....	78
Anexo N°9. Superficies Equipotenciales en un acuífero libre. Tomado y modificado de (Sánchez, 2010).....	79
Anexo N°10. Ejemplo de superficies equipotenciales y perforaciones de pozos en áreas de recarga, áreas de descarga del flujo subterráneo debajo de una ladera, suponiendo que la permeabilidad del medio es isótropa y homogénea. Tomado y modificado de (Sánchez, 2010).....	79

CAPÍTULO I

1.- INTRODUCCIÓN

En la zona de Bare el agua subterránea es vital para el consumo humano, tanto para el uso doméstico y agrícola como las actividades petroleras, ya que es la única fuente de agua. La no existencia de un sistema de aprovechamiento que suministre el agua para tales fines, se constituye en un grave problema para el aporte de agua para el consumo de la población, agrícolas y petroleras del Sector del Campo Bare, objeto de este estudio. Por esto existe la necesidad de implementar un estudio detallado, en torno a un modelo de flujo de aguas subterráneas en la zona, lo cual constituye el objetivo principal de ésta investigación.

Para ello, el presente trabajo se desarrolló con una estructura de cinco capítulos. El primero de ellos es la presente introducción, que incluye planteamiento del problema, justificación de la investigación, alcance, localización de la zona de estudio, antecedentes en cuanto a trabajos previos geológicos e hidrogeológicos, objetivo general y los objetivos específicos.

El segundo capítulo lo constituye el Marco Teórico, en el cual se enmarca la geología regional de la zona de estudio como lo es la Formación Mesa, destacando su extensión, litologías y distribución, paleontología, gradación de los sedimentos, mineralogía, sección tipo, espesor, edad, paleoambientes, relieve y fisiografía; así como también su vegetación, historia geológica, deformaciones, la descripción del aluvión Cuaternario presente, los drenajes, y la ubicación del área de estudio dentro de las Provincias Hidrogeológicas de Venezuela. También se destacan la recarga, flujo y descarga de las aguas subterráneas en la Provincia del Orinoco, los drenajes y relieves de la zona de estudio en el mapa topográfico de Atapirire, hoja 7341, con escala original 1:100.000. También se desarrollaran los términos teóricos asociados con las aguas subterráneas, acuífero, y sus características del acuífero, porosidad total, porosidad eficaz, permeabilidad, coeficiente de permeabilidad de Darcy,

coeficiente de trasmisibilidad, coeficiente de almacenamiento, tipos de acuíferos (libres, freáticos o no confinados, confinados o artesianos, semiconfinados, emperchados y semilibres), tipos de pozos (pozo surgente y pozo artesiano), balance hídrico, balance de aguas, nivel piezométrico, morfología de la superficie, potencial hidrogeológico, gradiente hidráulico, flujo subterráneo, líneas equipotenciales, redes de flujo, conductividad hidráulica, cono de depresión, nivel freático, nivel dinámico y superficie equipotencial. Así mismo en éste capítulo se presenta como se visualiza el modelo con el programa Visual Modflow 4.2 Pro® y las capacidades de simulación de dicho programa.

El tercer capítulo corresponde al Marco Metodológico, el cual explica el diseño de la investigación, trabajo de oficina y de laboratorio, trabajo de campo, objetivos por etapas, instrumentos y análisis de datos.

El cuarto capítulo está conformado por los resultados y discusión de resultados. Estos a su vez se componen de la geología local de Bare, el perfil litológico asociado, profundidades de perforación, unidades litoestratigráficas y ambiente de depositación. Así también la hidrogeología local de Bare, las direcciones de flujo subterráneo en los sedimentos del acuífero de Bare y el modelo hidrogeológico de la distribución de permeabilidades de los sedimentos del acuífero, que se encuentran entre los pozos P₀, P₁ y P₂ del polígono del Proyecto Pilote de Combustión en Sitio (CESLD).

Finalmente el quinto capítulo se establecieron las conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos de investigación relacionados con el presente estudio.

1.1-PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua subterránea en el acuífero de la zona de estudio es de origen meteórico, proveniente de precipitaciones que se infiltran hasta alcanzar el subsuelo, precipitaciones han sido estimadas en 1043,40 mm anual. Dichas aguas se extraen a través de pozos perforados o excavados localizados en las fincas del sector del

Campo Bare.

La determinación de los sitios de perforación, de las direcciones del flujo y sus velocidades, así como la hidrogeología local de la zona de estudio, se realizó a partir de la información aportada por el Laboratorio Nacional de Hidráulica, donde se tomaron en consideración los niveles freáticos, niveles piezométricos, la geomorfología de la zona, descripciones litológicas de las perforaciones de los pozos, ubicación y descripción litológicas de los pozos del sector noroccidental del área Ayacucho, éstos últimos para generar un modelo hidrogeológico con direcciones de flujo más precisas.

El agua subterránea en el acuífero en consideración es de origen meteórico, proveniente de precipitaciones que se infiltran hasta alcanzar el subsuelo, cuantificadas en 1043,40 mm anual, las cuales se extraen a través de pozos perforados o excavados, localizados en las fincas del sector del Campo Bare.

El entendimiento del funcionamiento del sistema hidrogeológico del acuífero en estudio, es de importancia para planificar un seguro manejo y aprovechamiento del recurso subterráneo.

En ese sentido, existen variables necesarias que contribuyen a entender el funcionamiento del sistema hidrogeológico, entre las que destacan: la transmisibilidad, el coeficiente de almacenamiento, la porosidad, la permeabilidad, las direcciones y las velocidades de flujo subterráneo, entre otras.

1.2.- JUSTIFICACIÓN

La industria petrolera venezolana encargada del Proyecto de Combustión en Sitio a Larga Distancia (CESDL), Campo Bare, del distrito San Tomé, en el estado Anzoátegui, tiene como objetivo diseñar e implantar una prueba piloto de interés nacional para la extracción de crudo pesado y extrapesado en dicho campo, la cual depende del recurso agua para la operación de sus refinerías como elemento refrigerante y como elemento vital para uno de los métodos de recuperación secundaria, que se efectúa mediante la inyección de grandes volúmenes de vapor de

agua. Es así como en el oriente de nuestro país, al menos en la Faja Petrolífera del Orinoco, se han definido las aguas subterráneas como principal fuente de agua.

Lo anteriormente expuesto pone en evidencia que el estudio propuesto permitirá un mejoramiento del conocimiento del funcionamiento del acuífero local de Bar, localizado en la Formación Mesa, realizando una investigación de las direcciones de flujo subterráneo y velocidades del mismo, así como de la hidrogeología de la zona donde se encuentra ubicado el acuífero, a fin de aprovechar esta información como aporte para el Proyecto de Combustión en Sitio a Larga Distancia (CESDL).

De igual forma, gracias al análisis realizado por Díaz (2005), el estudio de aguas subterráneas de éste tipo puede conducir a un aumento de los recursos hidráulicos disponibles en la zona rural donde se realizará el estudio, puesto que conlleva a la explotación de las mismas y al mejoramiento de ésta, ya que se pueden regular las oscilaciones de la escorrentía subterránea de los drenajes presentes, y se puede disminuir la evapotranspiración, al hacer descender la profundidad de la zona saturada.

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

1.3.-ALCANCE

Se pretende con el presente trabajo, establecer las direcciones de flujo subterráneo y sus velocidades, en el acuífero del área de estudio, ya que en la actualidad no existe un trabajo que represente un modelo compuesto que abarque éstos parámetros y aporten información para definir el funcionamiento completo del acuífero en estudio.

1.4.-LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

En base a un análisis realizado por Cuevas (2008), del Proyecto Piloto de Combustión en Sitio a Larga Distancia (CESLD), la zona de estudio se encuentra ubicada, de manera general, en el sector Noroccidental del área Ayacucho del Campo Bare, de yacimientos extrapesados del Distrito San Tomé, de PDVSA Exploración y Producción, presentando un rumbo este-oeste, aproximadamente a unos 40 km al sur de la ciudad de El Tigre y a unos 70 km al norte del río Orinoco.

A nivel político-administrativo, está localizado en el Municipio Francisco de Miranda en el estado Anzoátegui, que corresponde a la Faja Petrolífera del Orinoco, parte Sur de la Cuenca Oriental de Venezuela al Norte del Río Orinoco.

De forma más específica, la zona en estudio está delimitada por los pozos P₀, P₁ y P₂ abarca 722,4 m². Dichos pozos tienen coordenadas dentro del polígono del proyecto CESLD de P₀ (374410 E, 943016 N), P₁ (374412 E, 943004 N) y P₂ (374454 E, 942951 N), (imagen N°1).

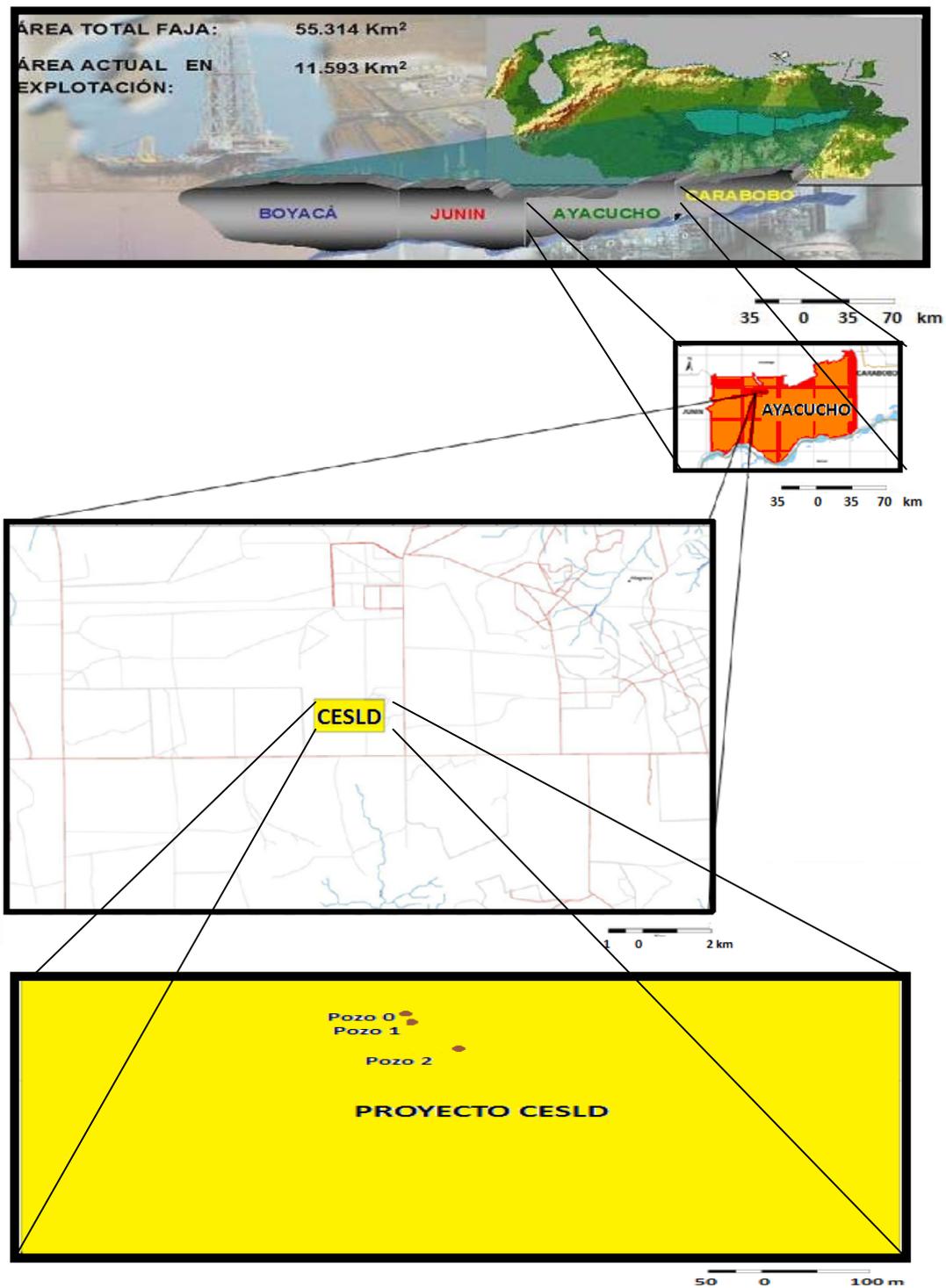


Imagen 1. Mapas de ubicación de la zona de estudio desde el área Ayacucho de la Faja Petrolífera del Orinoco hasta la localización de los pozos P0, P1 y P2 en el polígono del proyecto CESLD. Tomado y modificado de (LNH, 2009)

1.5.- ANTECEDENTES

1.5.1.-Trabajos geológicos

En cuanto a la geología regional de la zona, Hedberg & Pyre (1944), designaron como Formación Mesa a los sedimentos jóvenes que cubren gran parte de la región de la Faja Petrolífera del Orinoco, abarcando de esa manera el territorio del sur y del centro del estado Anzoátegui, hasta prácticamente la mitad del este del estado Monagas, introduciendo éste nombre para designar, en términos generales, a la formación que corona la extensa mesa, fisiográficamente característica en la cuenca de Venezuela oriental.

Un estudio de suelos realizado en la zona por Coplanarh (1974), titulado *Mapa de Suelo, Asociaciones de Grandes Grupos (Escala 1:250.000)* estado Anzoátegui, distingue tres grupos básicos, entre los cuales el grupo de la Altiplanicie de la Mesa es el que coincide a la Formación Mesa.

El relieve en el sur de Anzoátegui se define por la presencia de mesas, entre las cuales destacan Hamaca y Guanipa, que conforman a la formación en estudio.

De acuerdo al estudio de Clemente González de Juana *et al.* (1980), la Formación Mesa es producto de una sedimentación fluvio-deltáica y resultado de un extenso delta que avanzaba hacia el este en la misma forma que avanza hoy el delta del río Orinoco. El mayor relieve de las cordilleras septentrionales desarrolló abanicos aluviales que aportaban a la sedimentación clásticos de grano más grueso, mientras que desde el sur, el aporte principal era de arenas.

1.5.2.-Trabajos hidrogeológicos

La División de Hidrogeología del Ministerio de Minas e Hidrocarburos MMH (1970), actualmente perteneciente al Ministerio del Poder Popular Para el Ambiente (MINAM), mediante la interpretación cualitativa de registros eléctricos de pozos estructurales y exploratorios, perforados por las compañías petroleras, realizó el primer estudio del medio poroso de algunas regiones del país en escala 1:250.000, en el cual estaba incluida la Formación Mesa.

Esa División en cooperación con la empresa Geocin (1973), intensificó las exploraciones hidrogeológicas en la Formación Mesa que incluyó la perforación de 16 pozos de observación profunda, 11 pozos de observación somera y 4 pozos de prueba de bombeo.

Así mismo esa dependencia, evaluó los potenciales de desarrollo del recurso de aguas subterráneas en la Formación Mesa, en un estudio titulado “Estudio Preliminar de Ampliación de la Región de Explotación de Aguas Subterráneas, Mesa de Guanipa”, indicando que la División de Hidrogeología del Ministerio de Minas e Hidrocarburos (1978), completa otra simulación del sistema de aguas subterráneas, incluyendo una ampliación de unos 430 km² en la Mesa Morichal Largo, que forma parte de la Formación La Mesa, descrita en el informe “Modelo Matemático Preliminar de las Posibilidades de Explotación de Aguas Subterráneas, Región Mesa de Guanipa”. Dicho modelo se basó en conclusiones sobre recargas directas por precipitaciones del Estudio de Infiltración de las Precipitaciones. En el modelo se alcanzó el máximo potencial de desarrollo alertando al mismo tiempo que los niveles de agua en los pozos bombeados pueden descender excesivamente si el desarrollo no es controlado.

Por otro lado la mencionada División de Hidrogeología del Ministerio de Minas e Hidrocarburos (1980), realizó una versión mejorada donde consideró la reducción del espesor saturado del acuífero; es decir, la reducción de la transmisibilidad en función del descenso de la mesa de agua, en un estudio titulado “Modelo Matemático Avanzado de Aguas Subterráneas-Región Mesa de Guanipa”. En este modelo se calculó el abatimiento adicional, así mismo sumó al valor determinado en los caudales de bombeo.

Por su parte Mosquera & Parravano (2005), señalan que los primeros trabajos realizados de evaluación hidrogeológica en algunas áreas de la Formación Mesa, datan de los años setenta, destacando que la mayor cantidad fueron desarrollados por la División de Hidrogeología del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (MARNR).

1.6.- OBJETIVOS

1.6.1.- Objetivo general

Elaborar un modelo de aguas subterráneas en el que se identifique la distribución de permeabilidades, las direcciones y velocidades de flujo subterráneo del acuífero de un Sector del Campo Bare, estado Anzoátegui.

1.6.2.- Objetivos específicos

1.6.2.a.-Realizar una recopilación bibliográfica de la geología regional de la zona de estudio.

1.6.2.b.-Realizar un levantamiento de la información de geología local y una actualización de la base de datos de pozos perforados, para caracterizar el comportamiento de las rocas que fungen de reservorios de aguas subterráneas.

1.6.2.c.-Confeccionar un perfil litológico que muestre las unidades litoestratigráficas y profundidades de perforación.

1.6.2.d.-Generar una base cartográfica de georeferencia digital de la zona de estudio en la plataforma de ArcGis 9.2[®], con la información geológica recopilada de geología regional y geología local.

1.6.2.e.-Implementar un modelo hidrogeológico digitalizado a través del programa Visual Modflow 4.2 Pro[®], para la obtención de la distribución en dos dimensiones de los sedimentos permeables del acuífero de la zona, mostrando las direcciones y velocidades de flujo subterráneo.

CAPÍTULO II

2.- MARCO TEÓRICO

En éste capítulo se tratará la geología regional de la zona de estudio, la cual se constituye en la Formación Mesa, que será descrita a continuación en cuanto a su extensión, litologías y su distribución, paleontología, gradación de los sedimentos, mineralogía, sección tipo, espesor, edad, paleoambientes, relieve y fisiografía, vegetación, historia geológica, deformaciones, aluvión Cuaternario, drenajes, ubicación del área de estudio dentro de las Provincias Hidrogeológicas de Venezuela, recarga, flujo y descarga de las aguas subterráneas en la Provincia del Orinoco, drenajes y relieves de la zona de estudio en el mapa topográfico de Atapirire, hoja 7341 con escala original de 1:100.000.

2.1.- Geología regional

2.1.1.- Formación Mesa

2.1.1.a.- Extensión

Según González de Juana (1946), la Formación Mesa se extiende por los llanos centro-orientales y orientales en los estados Guárico, Anzoátegui y Monagas. También se encuentran algunos afloramientos en los estados Sucre y Bolívar inmediatamente al sur del río Orinoco.

De manera más específica, la Formación Mesa en la zona de estudio, se extiende en la región de Atapirire de 1701,71 km², ubicada en el sector noroccidental del área Ayacucho de la Faja Petrolífera del Orinoco, (imagen N°2).

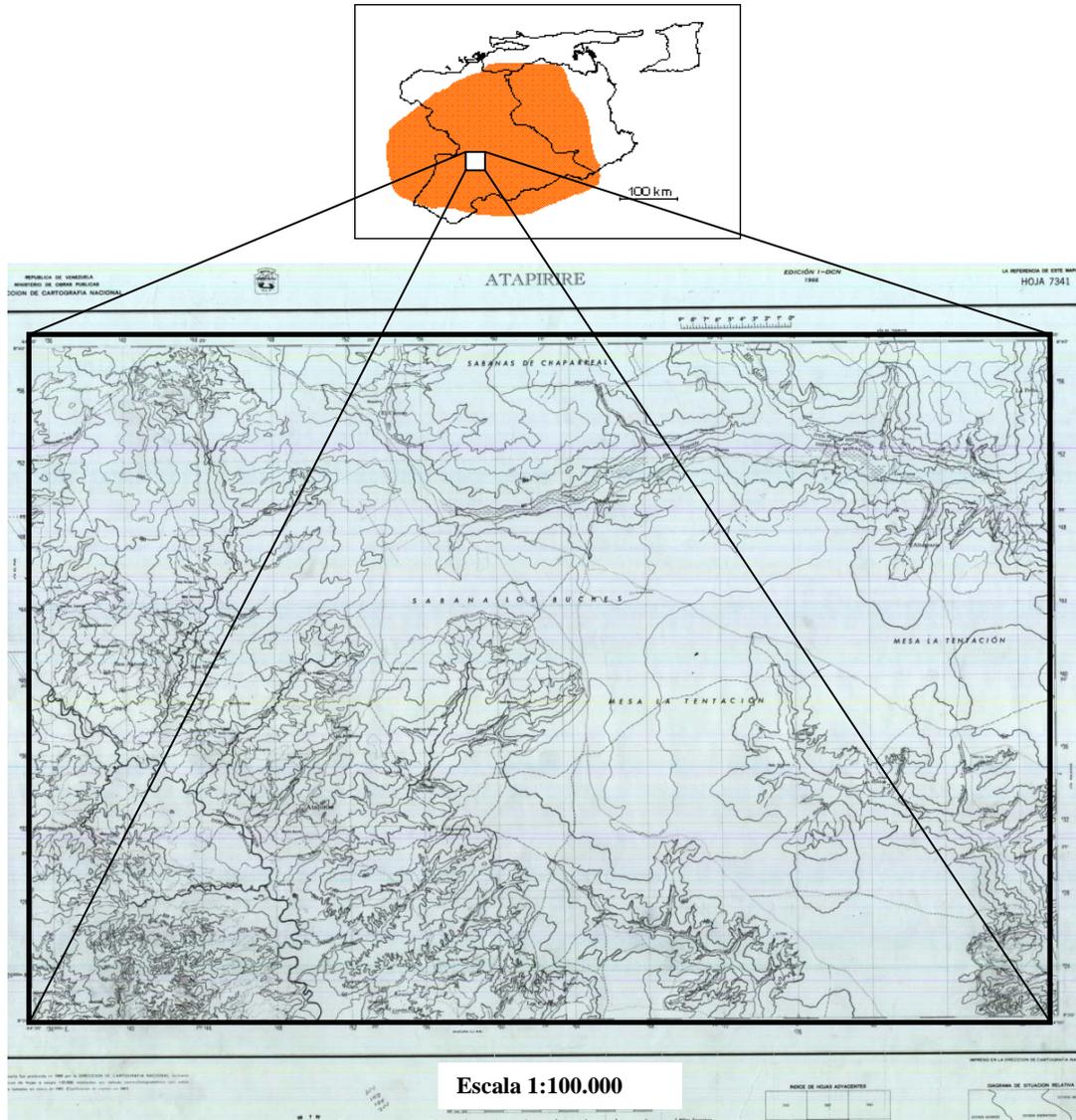


Imagen N°2. Extensión de la zona de estudio en la región de Atapirire, dentro de la Formación Mesa, ubicada en el sector noroccidental del área Ayacucho de la Faja Petrolífera del Orinoco en el estado Anzoátegui. Tomado y modificado de (Cartografía Nacional, 1966)

2.1.1.b.- Litologías y su distribución

En un análisis litológico de la Formación Mesa realizado por González de Juana (1946), determinó que ésta consiste fundamentalmente de areniscas de grano grueso y gravas cementadas, muy duras con presencia de cemento ferruginoso, conglomerado de color meterorizado rojo a casi negro, areniscas de color

meteorizado blanco amarillentas, rojo y púrpura (imagen N°3), con estratificación cruzada, así mismo presenta lentes discontinuos de arcilla fina arenosa y lentes de limolita.

De forma más específica, hacia el interior de los Llanos Orientales el grano de las litologías decrece en tamaño, e incluye gravas removidas de ríos, depósitos eólicos y residuales; mientras que su relación con el Grupo Sacacual, infrayacente, varía localmente desde clara discordancia de erosión hasta aparente transición

La mayor parte es producto de una sedimentación deltáica y palustre, resultado de un extenso delta que avanzaba hacia el este en la misma forma en que hoy avanza al delta del Orinoco, con la diferencia que el delta antiguo se encontraba encajonado entre las montañas del norte de Monagas y las tierras de la Guayana, que de esta forma, aportaban a la sedimentación clásticos de grano más grueso.



**Imagen N°3. Estratos conglomeráticos de la Formación Mesa.
Tomado y modificado de (Chacín, E, 2001)**

2.1.1.c.- Paleontología

En un estudio de la paleontología de la zona, Hedberg & Pyre (1944) identificaron fósiles de agua dulce asociados con arcillas ligníticas y restos de madera

silicificada.

2.1.1.d.- Gradación de los sedimentos

En cuanto a la gradación de los sedimentos, Royo & Gómez (1956), realizaron un estudio en el que se determinó que éstos gradan de norte a sur, de más gruesos a más finos al alejarse de las cadenas montañosas del norte. Haciendo una correlación de la Formación Mesa con otras aledañas, se encontró que ésta grada hacia el este con la Formación Paria, (anexo N°1).

2.1.1.e.- Mineralogía

De acuerdo con Royo & Gómez (1956) la Formación Mesa se caracteriza por la abundancia de minerales de Fe, especialmente magnetita, y circonio. Con frecuencia se encuentra muscovita, estaurolita, turmalina, circonio bandeado, andalucita, sienita y sillimanita; menos abundantes están el rutilo y el circonio rojo, y más raros son la biotita, brookita, corindón, monzonita, espinela, tremolita, clorita, epidota, glaucofana, titanita, granates e hiperestena.

2.1.1.f.- Sección tipo

González de Juana (1946), señaló que no se pudo designar una sección tipo de la Formación Mesa, debido a que ésta aflora en las mesas de Guanipa, Tonoro, Santa Bárbara y en los escarpados de Santa Rosa con secciones representativas distintas.

2.1.1.g.- Espesor

Hedberg & Pyre (1944), indican que en referencia al espesor de la Formación Mesa, esta tiene un máximo de 275 m, mientras que en el estado Bolívar al sur, alcanza un espesor mínimo de 20 m. En base a esto, en la literatura se señala que el espesor disminuye de norte a sur como consecuencia del cambio en la sedimentación fluvio-deltáica y aumenta de oeste a este por causa del avance de los sedimentos

deltáicos.

2.1.1.h.- Edad

Según Zinck & Urriola (1970) basados en la relación transicional con la Formación Las Piedras, han postulado una edad Pleistoceno para la Formación Mesa. La inclusión total del Plioceno es dudosa, no se han indicado fósiles que la definan y las maderas petrificadas (xilópalo y silex xiloideo) presentan una fosilización tan avanzada que bien pudiera indicar una edad más antigua que aquélla.

2.1.1.i.- Paleoambientes

Desde el punto de vista paleoambiental, González de Juana (1946) indica que la Formación Mesa es producto de una sedimentación fluvio-deltáica y paludal, está asociado a un extenso delta que avanzó hacia el este en la misma forma que avanza hoy el delta del río Orinoco. Este avance, en particular hacia las zonas de las cordilleras septentrionales, conllevaron al desarrollo de abanicos aluviales que aportaron a la sedimentación, clásticos de grano más grueso; mientras que desde el sur, el aporte principal fue de arenas. En la zona central se postuló la existencia de ciénagas; en correspondencia Coplanarh (1974) consideró que los sedimentos de la formación, representan depósitos torrenciales y aluviales contemporáneos con el levantamiento de la Serranía del Interior.

2.1.1.j.- Relieve y fisiografía

Un análisis realizado por Royo & Gómez (1956), señalan que las formas topográficas típicas son de planicies limitadas por vertientes abruptas, que se extienden y repiten en toda la Formación Mesa. Por su parte González de Juana *et al.* (1980), aportan que dicho nombre se debe a su característica fisiográfica, resaltante de topografía de extensas mesas coincidente con las planicies estudiadas por Royo y Gómez (1956).

Mosquera & Parravano (2005), en un estudio reciente, indican que las características fisiográficas más importantes de esta formación, son los escarpados de pendientes abruptas que las circundan, que alcanzan diferencias de elevación de más de 40 m y de formas ramificadas muy complejas, y que constituyen los límites entre las mesas y el cauce mayor de los ríos y morichales que representan los principales elementos del drenaje.

La constitución de las mesas es generalmente arenosa con granos variables. El relieve de las mesas ha sido preservado de la erosión, gracias a una cobertura de gravas y arenas ferruginosas cementadas muy resistentes.

2.1.1.k.- Vegetación

De acuerdo con un estudio reciente de Mosquera & Parravano (2005), la cobertura vegetal que se desarrolla en el área, está representada por cuatro tipos de vegetación; a saber: sabanas, matorral, bosque de galería y plantaciones forestales.

Sabanas: los atributos de esta formación dependen de la variabilidad ambiental sobre la cual se desarrolla, lo que condiciona sus características estructurales y funcionales, tales como: marcada estacionalidad de la precipitación, suelos predominantemente arenosos, de drenaje excesivo, baja fertilidad natural y poca disponibilidad de almacenamiento hídrico e incendios forestales. Sus características fisonómicas permiten diferenciarlas en sabanas sin componente leñoso (abiertas) y sabanas con elemento leñoso, de carácter pirófilo y altura variable, de 1 a 8 m, y ocasionalmente mayores de 10 m (sabanas arboladas). En algunos casos conforman verdaderos arbustales (Chaparrales), según Mosquera & Parravano (2005).

Matorral: tipo de vegetación que interrumpe la continuidad de la sabana, originada por perturbaciones naturales y antrópicas; específicamente, por la presión que ejercen los centros poblados sobre las comunidades vegetales para desarrollar actividades pecuarias y agrícolas, las cuales una vez abandonadas permiten la formación de comunidades vegetales secundarias. Estas comunidades se encuentran

en diferentes estadios sucesionales, donde las especies arbustivas son las dominantes, acompañadas por especies arbóreas y herbáceas, con alturas entre 2 a 8 m, y cobertura del dosel de media a densa, de acuerdo con Mosquera & Parravano (2005).

Bosque de galería: tipo de vegetación predominante del paisaje de valle que ocupa la franja paralela a lo largo de los diferentes ríos, donde se presenta un hábitat con un régimen hídrico especial. Fisionómicamente, el bosque de galerías se caracteriza por presentar alturas entre 15 y 20 m, con cobertura de media a densa. En los relieves de terraza, sobre suelos de origen coluvial, predominantemente arenosos y bien drenados, se desarrolla un bosque de galería de 10 a 18 m de altura, según Mosquera & Parravano (2005).

Plantaciones forestales: las plantaciones forestales establecidas están constituidas por la especie *Pinus caribaea* var. *Hondurensis*, especie muy adaptable a las condiciones ecológicas presentes en el área, ya que son poco exigentes en cuanto a fertilidad del suelo y resistentes a condiciones climáticas muy variadas, según Mosquera & Parravano (2005).

2.1.1.1.- Historia geológica

Según Coplanarh (1974), durante el Cuaternario, se desarrolló una sedimentación fluvio-deltáica en la parte oriental de la región de los llanos, encajonada entre el Escudo de Guayana por el sur y la Serranía del Interior por el norte, que dieron origen a la Formación Mesa. Esta se debe al avance de un complejo delta que recibía aportes laterales de abanicos aluviales con clastos gruesos del norte y arenas desde el sur, con zonas pantanosas hacia el centro. A grandes rasgos, se debe a la intercalación coalescente de abanicos aluviales, sedimentos fluviales, deltáicos y pantanosos.

También se considera a la Formación Mesa como un depósito torrencial contemporáneo con un levantamiento de la Serranía del Interior a principios del Pleistoceno.

Está frecuentemente recubierta por una costra de grava ferruginosa

endurecida, de aspecto masivo y pequeño espesor, el cual se considera como un paleosuelo probablemente formado durante el Pleistoceno superior.

2.1.1.m.- Deformaciones

En base a un estudio hecho por Royo & Gómez (1956), la Formación Mesa es más antigua que el último levantamiento más fuerte de las montañas al norte, por lo que muestra suave inclinación, arqueamiento y está localmente fallada. Producto de dichas deformaciones, quedan cerros testigos como el de Corozal, en las regiones al pie de las colinas, los cuales son definitivamente más antiguos que los aluviones de los ríos actuales, que han cortado cientos de pies por debajo de la base de las capas de la Formación Mesa.

2.1.1.n.- Aluvión Cuaternario

De acuerdo con González de Juana (1946), los sedimentos aluvionales se encuentran en los valles que forman los principales ríos que drenan la región. Están compuestos predominantemente de gravas y arenas, con espesores que no superan los 10 m.

2.1.1.ñ.- Drenajes

Mosquera & Parravano (2005) definen la red hidrográfica del área en estudio condicionada por sus características litológicas, geomorfológicas, edáficas y climáticas. Pertenece a la cuenca occidental del Delta del Orinoco, conformada por largos cursos paralelos, casi-rectilíneos. El drenaje está constituido principalmente por los ríos Areo, Morichal Largo, Caris, Tigre, Chive, Oritupano, Nato, Guanipa, Chupururo, Guaraguara, Pao, Hamaca, Aisme Peña y La Canoa y sus afluentes, teniendo una dirección general preferentemente hacia el Sureste. Los ríos principales poseen un régimen permanente, cuyo cauce cortan la Formación Mesa.

Sobre “las mesas”, así denominadas por su morfología, cae una precipitación

media anual de 1025,73 mm, se produce una evaporación potencial de 2585,60 mm, y la temperatura promedio anual varía de 24° a 28°C con una oscilación térmica anual menor de 5°C.

El clima de la región es característico de sabanas tropicales, con dos estaciones, una seca que va de enero a abril, y una estación lluviosa que va de mayo a principios de diciembre. Las mayores precipitaciones ocurren durante el mes de agosto.

Los patrones primitivos de cauces activos y meandros son amplios e indican un período de mayor precipitación que el actual, pero está cortado por cursos de agua más estrechos con meandros activos recientes. Coplanarh (1974), define en la zona suelos medios y livianos de bien drenados a excesivamente drenados.

2.1.1.o.-Ubicación del área de estudio dentro de las Provincias Hidrogeológicas de Venezuela

De acuerdo a Mosquera & Parravano (2005), una provincia hidrogeológica puede ser definida como una región de características generales similares en cuanto a las condiciones de ocurrencia de las aguas subterráneas. Entre los factores que contribuyen para la definición de una provincia hidrogeológica, destacan la conformación geológica y las características fisiográficas. El factor geológico es uno de los más importantes puesto que las características litológicas, estructurales y tectónicas, controlan las condiciones de ocurrencia, el movimiento y la calidad de las aguas subterráneas. Las características fisiográficas, litológicas junto con las climatológicas condicionan la infiltración y recarga de los acuíferos.

En éste sentido la Provincia del Orinoco la integra de manera generalizada la Provincia Fisiográfica de Los Llanos, incluido el Macizo de El Baúl. Esta es una de las provincias menos complejas en cuanto a sus características fisiográficas y su constitución geológica. Se diferencian tres subprovincias y doce cuencas, agrupadas éstas en la tabla N°1. Considerando factores fisiográficos, tectónicos y litológicos la Formación Mesa, pertenece a la Provincia de Orinoco, sub-provincia de los Llanos

Orientales, específicamente en la Cuenca Hidrogeológica de los Llanos bajos.

Tabla N°1. Subprovincias y cuencas de la Provincia Hidrogeológica del Orinoco

PROVINCIA	SUBPROVINCIA	CUENCA
Orinoco	Llanos Occidentales y de Apure C1	Llanos Altos de Apure
		Llanos Altos de Barinas
		Llanos Altos de Portuguesa y Cojedes
		Llanos Bajos de Apure
		Llanos Bajos de Barinas
		Llanos Bajos de Portuguesa y Cojedes
	Llanos Centrales C2	Llanos Altos de Guárico
		Llanos Bajos de Guárico
	Llanos Orientales C3	Llanos Altos de Anzoátegui
		Llanos Bajos de Anzoátegui
		Llanos Altos de Monagas
		Llanos Bajos de Monagas

La Provincia del Orinoco por sus propiedades físicas y comportamiento hidrogeológico como reservorio de aguas subterráneas, comprende unidades litológicas que pueden clasificarse en: Unidades litológicas poco o no consolidadas, con porosidad intergranular y permeabilidad variable de alta a baja.

En los llanos orientales los acuíferos de permeabilidad alta abarcan unidades con predominio de areniscas, arenas, conglomerados y gravas, acompañados por cantidades variables de lutitas, limolitas y arcillas. Dicha región comprende formaciones del Pleistoceno y del Terciario Tardío. La Formación Mesa de edad Pleistoceno, como consecuencia de sus características se constituye en uno de los acuíferos más importantes y de mayor extensión en los llanos Orientales, consiste en capas de arena, grava, peñas y peñones de origen continental.

La Formación Mesa presenta generalmente varios acuíferos superpuestos,

separados por capas impermeables, pero muy probablemente intercomunicadas entre si, formando un solo sistema hidráulico. La parte superior de las formaciones del Terciario Superior, contienen acuíferos importantes, los cuales en la zona de Maturín-Jusepín están confinados por una capa de arcilla de 40 a 50 m de espesor. La permeabilidad y transmisibilidad en la Mesa de Guanipa son elevadas, y varían de 10 a 80 m/d y de 1000 a 4500 m²/d respectivamente, hasta 200 m de profundidad. El coeficiente de almacenamiento fluctúa de $0,75 \times 10^{-3}$ al 3×10^{-3} y la capacidad específica de los pozos tiene valores de 1,00 a 121 s/m.

2.1.1.p.-Recarga, flujo y descarga de las aguas subterráneas en la Provincia del Orinoco

Mosquera & Parravano (2005) explican que los acuíferos la Provincia del Orinoco han sido estudiados de manera sistemática solo en determinadas áreas, entre las que destacan: la región de Masparro-Bocono-Tucupido, en los Llanos Occidentales; el sistema de riego del río Guárico, en los llanos centrales; y en la Formación Mesa, el sur de Monagas y Maturín-Santa Bárbara, El Tejero, en los llanos orientales.

En los Llanos orientales los sedimentos del Cuaternario tienen una alta permeabilidad, por lo cual gran parte del agua que precipita se infiltra, representando de un 10% a un 20% de la precipitación, las reservas renovables varían de acuerdo a la zona entre 17×10^5 y 4×10^5 m³/año/km².

Las reservas hidrogeológicas estimadas para una superficie de 25000 km², hasta una profundidad de 200 m, alcanzan un volumen de 347247×10^6 m³.

La descarga se efectúa principalmente por la explotación de las aguas subterráneas a través de pozos y por la descarga natural hacia los ríos. La dirección de flujo subterráneo, localmente es hacia los ríos y regionalmente es hacia el sur (río Orinoco) y hacia el sureste (Delta del Orinoco).

2.1.1.q.-Drenajes y relieves de la zona de estudio en el mapa topográfico de Atapirire, hoja 7341, escala original 1:100.000

En un análisis del drenaje en base a la topografía del mapa de Atapirire, hoja 7341, escala original 1:100.000, correspondiente a la zona donde se encuentra el acuífero de estudio, se observan patrones meandriformes en los cauces principales, cuyos cauces secundarios presentan patrones dendríticos individuales y radiales generalizados los cuales inician poco drenados hacia el norte en Sabanas de Chaparral, noroeste, noreste y la zona nor-central en Sabana Los Buches y Mesa La Tentación, correspondientes a los relieves más altos de cotas entre 200 y 300 m, identificados con color verde en la imagen N°3. Estos representan porciones de las zonas más elevadas de las planicies topográficas, características de la geomorfología de la Formación Mesa.

Los cauces secundarios están excesivamente drenados en el oeste del mapa, alrededor de los cauces de río Hamaca y río Maquete al noroeste; río Pao, Quebrada Santa Anita, Quebrada Madre Vieja, río Hamaca, río Chipó y río Atapirire al suroeste; e irregularmente drenados al este, alrededor de los cauces principales de río Caris al noreste, de río Cicapro y río Limo al sureste. En río Limo se observa sinuosidad más marcada que en río Cicapro. Todos estos cauces secundarios poseen patrones dendríticos y meandriformes individualmente, y radiales generalizados. Pertenecen a los relieves medios de cotas entre 100 y 200 m, identificados con color rojo en la imagen antes citada.

Estos cauces secundarios culminan en los cauces principales hacia el suroeste en río Pao y hacia el sureste en río Limo. Se encuentran con menor densidad que los anteriores, y se localizan en los relieves más bajos de cotas menores a 100 m, identificados con color morado en la imagen N°3. Todos los cauces presentan patrones dendríticos individuales y también meandriformes, y se percibe parecida sinuosidad en los cauces principales de río Pao y río Limo.

Se puede definir una subcuenca hidrográfica abarcando relieves entre 300 y 100 m, al norte, nor-noreste y noroeste, definida por el cauce principal del río Caris y por los ríos secundarios que desembocan en éstos. Ésta subcuenca abarca un área

aproximada de unos 600 km², enmarcada en relieves de taludes que bordean la Sabana de Chaparral más al norte y Mesa La Tentación más al sur.

Otra subcuenca al este y al sureste definida por el cauce principal de río Limo y los cauces secundarios que desembocan en éste, y se encuentra abarcando un área de 354 km², conformada por relieves de taludes que bordean Mesa La Tentación.

Al sur-sureste se define otra subcuenca en la que dentro se encuentra el cauce principal de río Cicapro y sus cauces secundarios. Ésta subcuenca abarca un área de 123 km², enmarcada en relieves de taludes de mesa, ya que se encuentra enmarcada en taludes que rodean Mesa La Tentación.

Finalmente, fue identificada otra subcuenca al noreste, al este y al sureste, en la que se encuentra el cauce principal de río Pao y río Hamaca y sus cauces secundarios, abarcando un área de más de 735 km², enmarcada en taludes que bordean Sabana el Bucho y Mesa La Tentación al noreste de la subcuenca, y en un talud que bordea algún alto topográfico al suroeste que no se identifica en el mapa.



Imagen N°4. Patrones de drenaje y su relación con los relieves de la zona en base al mapa topográfico de Atapirire, hoja 7341, escala original 1:100.000. Tomado y modificado de (Cartografía Nacional, 1966)

2.2.-Fundamentos teóricos de la investigación

A continuación se definirán una serie de conceptos que funcionarán como base teórica para producir los resultados de ésta investigación y discusión de los mismos.

2.2.1.-Aguas subterráneas

De acuerdo con Stanley (1971) las aguas subterráneas son flujos de aguas que circulan por los poros de los acuíferos y alcanzan a tener superficies libres en las cercanías del pozo del cual son bombeadas.

En la mismo orden de ideas Stanley (1971) las define como aquellas que se acumulan como resultados de la infiltración del agua, generalmente meteórica, a través de una formación geológica con características físicas favorables, tales como: porosidad y permeabilidad, lo que permite su transporte, almacenamiento y extracción si se requiere. Así mismo, este autor define las características más importantes del movimiento del agua subterránea de la siguiente manera: (a) cuando las moléculas de un fluido siguen trayectorias paralelas sin mezclarse entre sí, se dice que existe un “régimen laminar”, y lo que tiende a la existencia del mismo es la viscosidad del fluido, la cual resiste a la inercia de las moléculas. (b) cuando las trayectorias de las moléculas se entrecruzan avanzando en la dirección de la corriente, se dice que el régimen es “turbulento”, y éste es establecido por la inercia de las moléculas.

2.2.2-Acuífero

Castany (1972) define al acuífero como un estrato o formación geológica que es lo suficientemente porosa y permeable como para permitir la acumulación y circulación del agua de tal forma que el hombre pueda aprovecharla en cantidades económicamente apreciables, para satisfacer sus necesidades, y dado que el espacio poroso que presentan las formaciones geológicas pueden ser vacíos intergranulares que comúnmente se observan en los depósitos aluviales de grano grueso (gravas y

arenas) como es el caso, se refiere a un acuífero por porosidad.

2.2.3.-Características hidrogeológicas de un acuífero

De acuerdo a un estudio reciente de Mosquera & Parravano (2005), un acuífero es un sistema físico, cuyo funcionamiento está regulado por extracciones, bombeo y recarga. Su productividad es función además de sus características geológicas, de sus características hidrogeológicas y de los factores de flujo de las aguas subterráneas.

Las características hidrogeológicas de un acuífero están ligadas esencialmente a las propiedades físicas de la roca-almacén, las cuales son:

2.2.3.a.-Porosidad total (Φ_T)

Según Stanley (1971) la porosidad es una de las propiedades fundamentales de los acuíferos, tratándose de la particularidad que tienen las rocas y los suelos de contener espacios vacíos. Este se expresa cuantitativamente por la relación del volumen de poros al volumen total de la roca, en forma de porcentaje.

De acuerdo con Stanley (1971) la ecuación que describe este comportamiento es la siguiente:

$\Phi_T = (VP/VT) \times 100$, donde “VP” es el volumen poroso y “VT” es el volumen total de la roca.

2.2.3.b.-Porosidad eficaz (Φ_{efg})

Stanley (1971), señalan que la porosidad eficaz se diferencia de la porosidad total en que su valor expresa en términos porcentuales, el volumen de agua capaz de ser drenable o movable a través de los espacios que se encuentran interconectados en la roca-almacén. De este modo, la ecuación de porosidad eficaz es la siguiente:

$\Phi_{efg}(\%) = (V_G/VT) \times 100$, donde “ V_G ” es el volumen ocupado por el agua gravitatoria y “VT” es el volumen total de la roca.

2.2.3.c.-Permeabilidad (K)

Stanley (1971), indica que la permeabilidad es una de las propiedades fundamentales de los acuíferos, definida como la propiedad que tienen las rocas y los suelos para permitir que los fluidos se muevan a través de sus poros interconectados.

Según Stanley (1971), la permeabilidad es más exactamente definida como el volumen de fluidos que en un tiempo dado puede atravesar un área o sección determinada de roca o suelo, bajo una presión dada.

2.2.3.d.-Coeficiente de Permeabilidad de Darcy (K)

La Ley de Darcy propuesta por el físico francés D'Arcy (1856), demostró que el volumen de fluidos que atraviesa un medio es proporcional a la presión y que puede expresarse como: $Q=AKh_L/L$, donde "Q" es el gasto, "A" es el área de la sección transversal del cilindro de arena (utilizado en el experimento que realizó D'Arcy), "K" es el coeficiente de proporcionalidad característico de la arena y h_L/L es la pendiente hidráulica. "K" tiene las dimensiones de la velocidad y en el laboratorio se mide en cm/seg mientras que en el campo se mide en m/día.

Ésta ley es válida para regímenes laminares, ya que existe una relación lineal entre la velocidad y la pendiente hidráulica, al igual que la pérdida de carga para una tubería con el mismo régimen.

2.2.3.e.-Coeficiente de transmisibilidad (T)

Stanley (1971) lo define como la tasa de flujo de agua en metros cúbicos por día a través de una franja vertical del acuífero de un metro de ancho y que se extiende por todo el espesor saturado bajo la pendiente hidráulica de 100% a la temperatura de 20°C (la unidad es $m^3/d/m$). La transmisibilidad es igual a la permeabilidad promedio multiplicada por su espesor.

2.2.3.f.-Coeficiente de almacenamiento (S)

Stanley (1971) define al coeficiente de almacenamiento (S) de un acuífero, como el volumen desplazado por una columna de agua del acuífero, de superficie unitaria (1 cm^2) cuando la superficie freática desciende un valor unitario (1 cm). Para acuíferos libres “S” es igual a la producción específica del material desaguado durante el bombeo.

2.2.4.-Tipos de acuíferos

Los acuíferos son definidos como acuíferos libres, acuíferos freáticos o no confinados, acuíferos confinados o artesianos, acuíferos semiconfinados, acuíferos emperchados y semilibres, los cuales se definen a continuación;

2.2.4.a.-Acuíferos libres, freáticos o no confinados

Stanley (1971) apunta que los acuíferos a parte de las connotaciones litológicas, pueden ser catalogados de acuerdo a la presión hidrostática del agua encerrada en los mismos, la cual se refleja en consecuencias prácticas de gran trascendencia. Se denominan acuíferos libres, no confinados o freáticos aquellos en los cuales existe una superficie libre del agua encerrada en ellos, que está en contacto directo con el aire y por lo tanto, a la presión atmosférica. Esa superficie tiene una profundidad que puede oscilar libremente de acuerdo al ciclo climático; es decir, de acuerdo a las lluvias y a la recarga asociada a estas.

2.2.4.b.-Acuíferos confinados o artesianos

Stanley (1971) señala que en contraposición con el acuífero libre, en el acuífero confinado el agua está sometida a una cierta presión, superior a la atmosférica y ocupa totalmente los poros de la formación. Por ello, durante la perforación de los pozos en acuíferos de este tipo, al atravesar el techo del mismo se observa un ascenso rápido del nivel del agua, hasta estabilizarse a una altura

determinada.

2.2.4.c.-Acuíferos semiconfinados

Stanley (1971) indica que una variante de los acuíferos lo constituyen los acuíferos semiconfinados o semicautivos, que se presentan cuando una de las barreras, el techo o el piso, que encierra al acuífero no es totalmente impermeable, sino un acuitardo; es decir, un material que permite la filtración vertical del agua, de manera muy lenta, de tal forma que alimente a otro acuífero principal.

2.2.4.d.- Acuíferos emperchados

Por su parte, los acuíferos emperchados son definidos por Stanley (1971), como aquellos característicos de formaciones compuestas por intercalaciones de materiales de grano fino, dentro de una secuencia constituída predominantemente por materiales granulares gruesos. En estos casos los lentes finos actúan como “un paraguas” generando una zona “saturada” por encima del lente impermeable que define el nivel freático emperchado o colgado.

2.2.4.e.- Acuíferos semilibres

Según Stanley (1971) los acuíferos semilibres representan una situación intermedia entre un acuífero libre y uno semiconfinado. En este caso, la capa confinante superior es un estrato semipermeable o acuitardo, de características tales que la componente horizontal del flujo no puede ignorarse.

2.2.5.- Tipos de pozos

Los pozos pueden ser clasificados como surgentes, artesiano, de control y de observación, los cuales se definen a continuación;

2.2.5.a- Pozo surgente

De acuerdo con la USGS (2004) el pozo surgente se presenta cuando el nivel

piezométrico está por encima de la cota de la boca del pozo, y el agua llega a este nivel por presión subterránea interna del acuífero que contiene agua.

2.2.5. b.-Pozo artesiano

Según la USGS (2004) indica que un pozo artesiano la cota de la boca del pozo está por encima del nivel piezométrico.

2.2.5. c.-Pozo de control

Según Castany (1972) un pozo de control es aquel que dispone de fuerza motriz, bombas y equipo de control adecuado, para realizar la extracción del agua proveniente del acuífero.

2.2.5. d.-Pozo de observación

De acuerdo con Castany (1972) un pozo de observación es aquel que se utiliza para medir el nivel estático del agua subterránea, especialmente para observar la frecuencia y magnitud de los cambios en los niveles o de otros parámetros físicos o químicos.

2.2.6.-Recarga natural

Castany (1972) indica que la recarga natural es el volumen de agua que entra en un embalse subterráneo durante un período de tiempo, a causa de la infiltración de las precipitaciones o de un curso de agua. Mientras más profundos sean los pozos construidos en áreas de recarga, a mayor profundidad se encontrará el nivel del agua en los mismos.

2.2.7.-Descarga natural

Castany (1972) define como descarga natural al volumen de agua que sale de un embalse subterráneo, en un período de tiempo ya sea a través de los manantiales terrestres, subfluviales o submarinos, así como también por evapotranspiración si la

zona saturada queda muy cerca de la superficie en amplias áreas.

2.2.8.-Balance hídrico

Castany (1972) definen al balance hídrico desde el punto de vista hidrogeológico, señalando que éste tiene como finalidad determinar el volumen de agua proveniente de la precipitación, la cual recarga a los acuíferos por efecto de la infiltración directa. Igual que para todo balance, los elementos principales que se deben identificar son aquellos que tienen los aportes o entradas y los gastos o salidas. De esta forma, se tiene que la expresión general del balance, empleada con frecuencia, es la siguiente: $P=ET+Esc+I$, donde “P” es la precipitación media anual (mm), “ET” es la evapotranspiración real media anual (mm), “Esc” es la escorrentía superficial media anual (mm), “I” es la infiltración eficaz al manto acuífero (mm).

2.2.9.-Balance de aguas

Castany (1972) apuntan que las reservas representan el volumen total de agua almacenada en el acuífero; es decir, liberable en el curso de un período determinado, o en un instante dado en una capa acuífera o en una roca almacén y que puede ser aprovechable.

Las mismas están condicionadas en primer lugar por la estructura hidrogeológica, son un reflejo de las dimensiones y después por la porosidad o rendimiento específico o el coeficiente de almacenamiento, que expresa el volumen de agua libre en la roca almacén.

Los datos dimensionales que determinan las reservas en aguas subterráneas son el substrato y techo impermeable de los mantos cautivos, coeficiente de almacenamiento o variables, superficie piezométricas de los mantos libres.

2.2.10.-Nivel piezométrico

Stanley (1971) exponen que el nivel piezométrico es el lugar geométrico de

los puntos que indican la carga hidráulica en un acuífero, referida a un mismo plano de referencia. Generalmente se toma como datum el nivel del mar, se determina partiendo de la siguiente ecuación: $NP=CT-H$, donde “NP” es el nivel piezométrico, “CT” es la cota de terreno y “H” es la distancia vertical medida desde la superficie del terreno hasta el nivel del agua.

2.2.11.-Morfología de la superficie

Stanley (1971), exponen que el nivel piezométrico posee una geometría que le es propia, comparable a la de una superficie topográfica: depresiones, ondulaciones y rupturas de pendientes.

Pueden trazarse en ellas curvas de nivel que unan los puntos de igual altitud. Estas curvas presentan el lugar de los puntos de igual presión o de igual nivel piezométrico. Son las curvas isopiezas. Se identifican con las líneas equipotenciales. Sobre estas curvas pueden trazarse líneas perpendiculares a las isopiezas, en el supuesto caso de flujo laminar, de modo que el conjunto forma una red ortogonal.

La morfología de la superficie piezométrica permite estudiar, a escala global, las características del movimiento del agua subterránea.

Las fluctuaciones de la superficie piezométrica en el tiempo, permiten estudiar la variación de las reservas; la alimentación de los mantos, y sobre todo, su observación y control son importantes para la conservación de los recursos en aguas subterráneas.

2.2.12.-Potencial hidráulico

En un estudio de aguas subterráneas hecho por Bear (1972), el potencial hidráulico se define como la energía por unidad de peso del fluido, que en el caso del agua se suele llamar nivel piezométrico (ver la imagen N°5). Se trata de una magnitud escalar, es decir, que en cada punto se puede expresar y definir mediante un solo número.

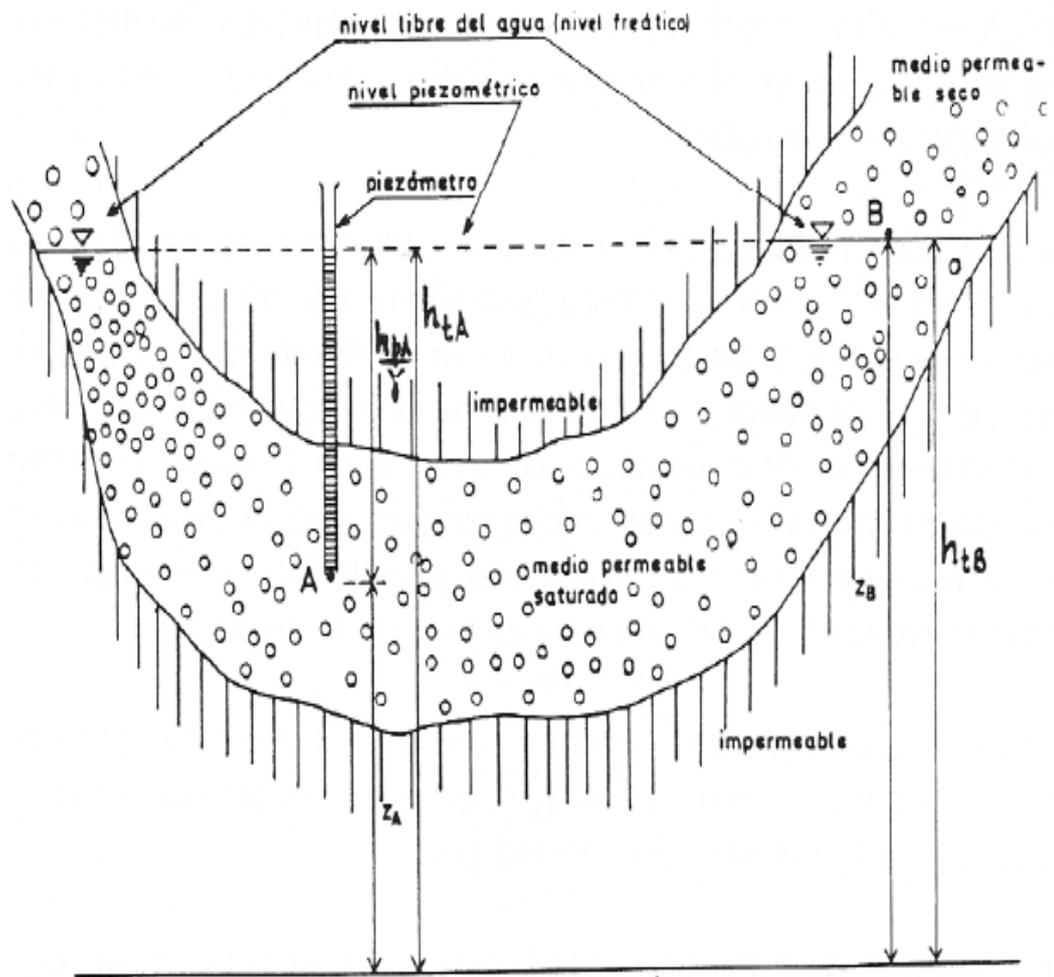


Imagen N°5. Concepto de potencial hidráulico. Tomado y modificado de (Freeze & Cherry,1979)

2.2.13.-Gradiente hidráulico

Según Bear (1972) el gradiente hidráulico es un vector gradiente entre dos o más mediciones de la carga hidráulica a lo largo de la trayectoria del flujo. Este vector describe la dirección del flujo de agua subterránea, donde los valores negativos indican el flujo a lo largo de la dimensión, y cero indica que no hay flujo. Su ecuación es: $i = \Delta H / l$, donde “ ΔH ” es la diferencia de potencial entre dos puntos del acuífero y “ l ” es la distancia en la dirección del flujo entre estos dos puntos (imagen N° 6).

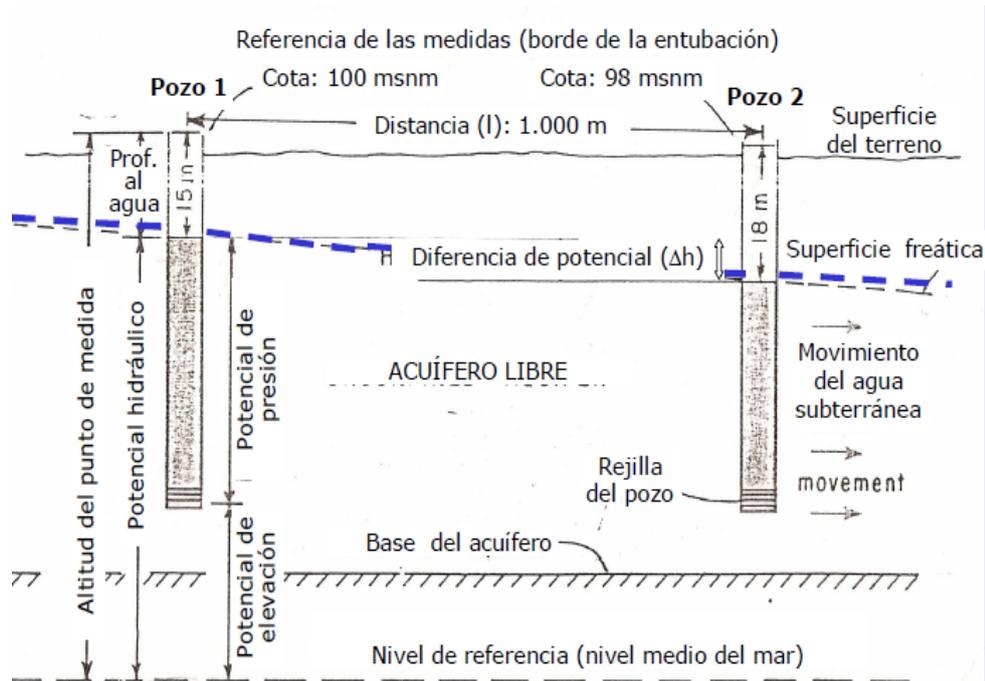


Imagen N°6. Concepto de gradiente hidráulico. Tomado y modificado de (Freeze & Cherry,1979)

2.2.14.-Flujo subterráneo

Stanley (1971) define al flujo subterráneo como el estado o comportamiento de un flujo en un canal subterráneo, gobernado por los efectos de viscosidad y gravedad relativa a las fuerzas de inercia del flujo.

2.2.15.-Líneas equipotenciales

Stanley (1971) las líneas equipotenciales son curvas que unen puntos con igual potencial hidráulico (en la sección vertical o en la horizontal); por tanto, representan la altitud o cota absoluta de la superficie freática.

2.2.16.-Líneas de flujo

Stanley (1971) explica que las líneas de flujo o líneas de corriente indican la trayectoria del movimiento del agua que representan de forma idealizada, el itinerario seguido por las partículas de agua en su movimiento a través del medio saturado.

2.2.17.-Redes de flujo

Stanley (1971) señalan que una red de flujo es un gráfico bidimensional compuesto por dos familias de curvas de índole especial: las líneas de flujo o líneas de corriente y las líneas equipotenciales. Queda unívocamente determinada al fijar el número de líneas de corriente o el de líneas equipotenciales.

2.2.18.- Conductividad hidráulica

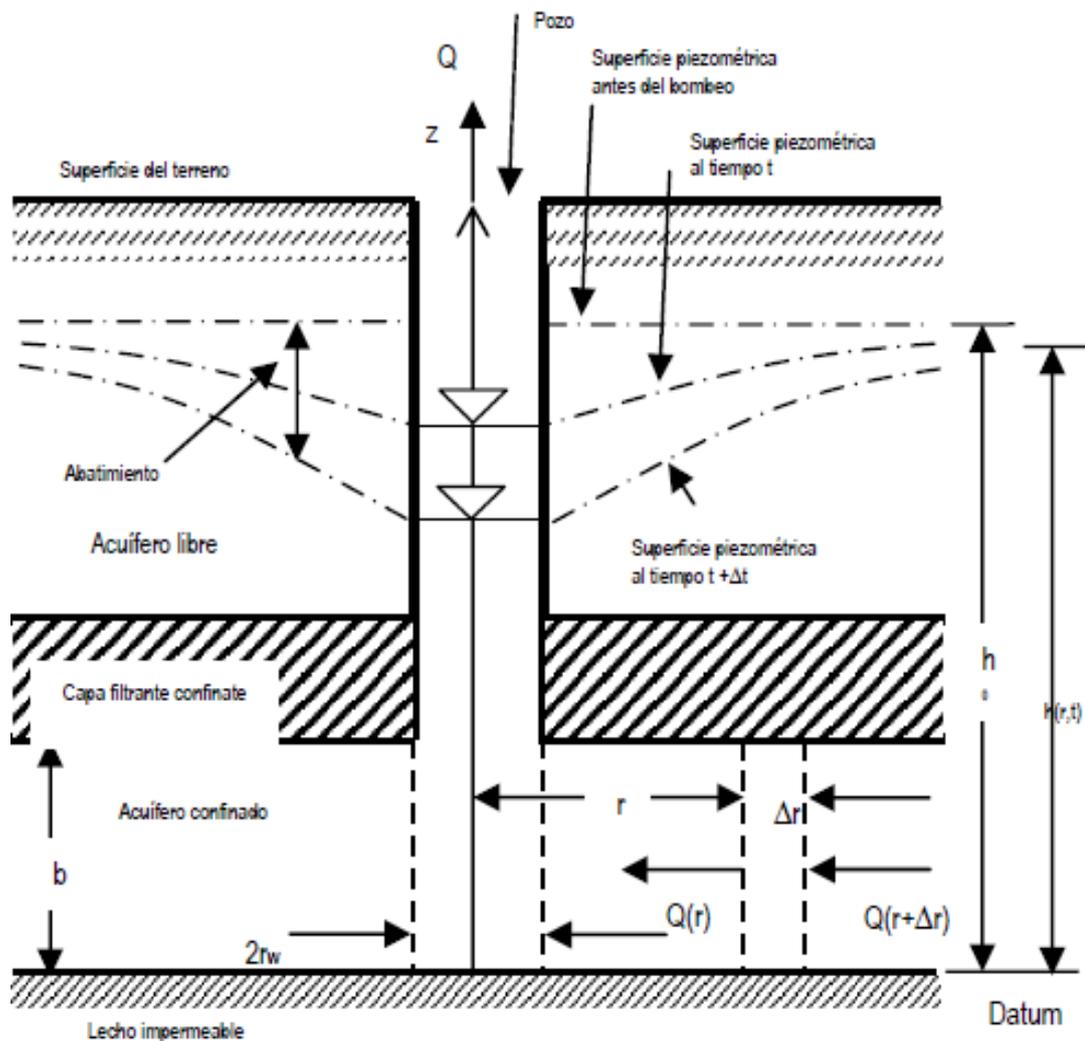
Según Castany (1971) define a la conductividad hidráulica como es un coeficiente de proporcionalidad que describe la velocidad a la que el agua se mueve a través del medio permeable. Depende de la densidad y la viscosidad del fluido. Posee dimensiones de velocidad. Con frecuencia se denomina permeabilidad.

2.2.19.- Cono de depresión

Castany (1971), expone que el cono de depresión es la representación física del efecto de la extracción sobre un manto de agua subterránea que se explica de la siguiente forma para acuíferos libres: la diferencia de presión creada por la extracción se transmite a lo largo de las líneas de corriente y la superficie piezométrica se hunde en forma de cono de revolución con una generatriz curvilínea.

Según Stanley (1971) al producirse el descenso del nivel estático del pozo, se establece un gradiente hidráulico entre cualquier punto de la formación y el pozo, originándose un movimiento radial desde todas las direcciones hacia el pozo en una forma simétrica y de tal manera que el caudal “Q” que se extrae del pozo es igual al caudal que pasa por cualquier sección del acuífero. A medida que la velocidad aumenta, mayor será el gradiente hidráulico ya que aumenta la fricción existente entre el fluido y las partículas sólidas en contacto; es por eso que lo que se forma alrededor del pozo se le conoce como cono de depresión que sobre un plano vertical presenta una curva conocida con el nombre de curva de abatimiento. La forma, alcance y profundidad de este cono de depresión dependerá de las condiciones hidrogeológicas

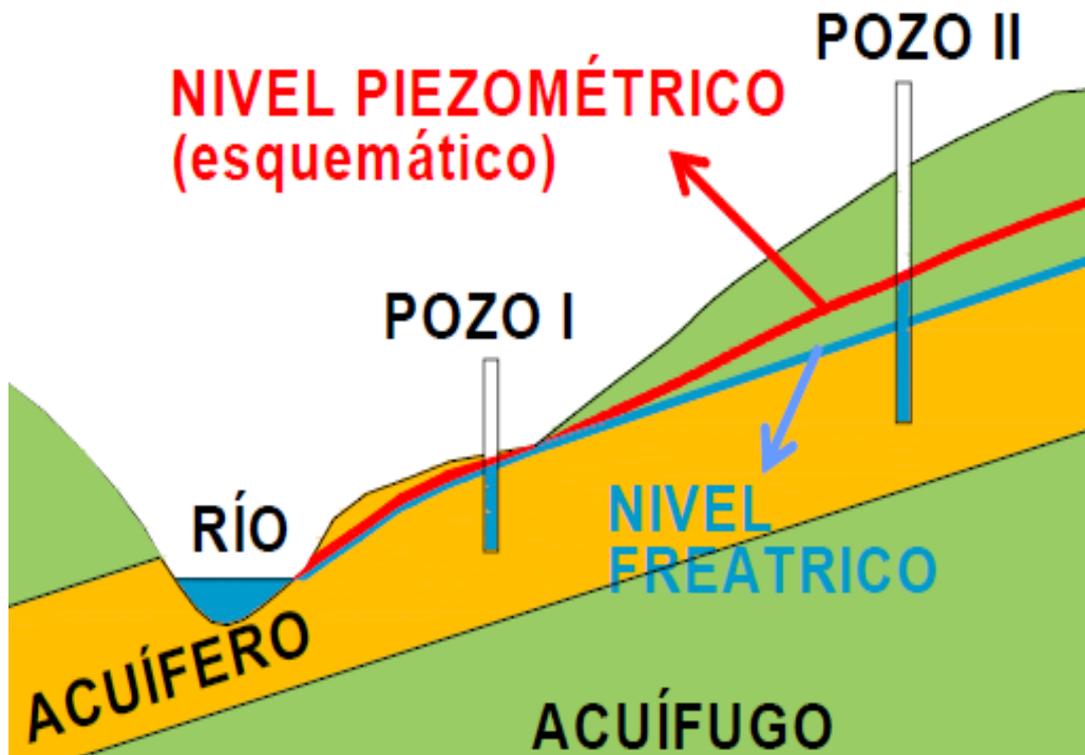
(transmisividad y coeficiente de almacenamiento del acuífero), del caudal y el tiempo de bombeo o inyección (imagen N°7).



Imágen N°7. Esquema representativo del bombeo de un pozo en un acuífero libre. Tomado y modificado de (Donado,1998)

2.2.20.-Nivel freático

Stanley (1971) expone que el nivel freático corresponde en un acuífero libre al lugar en el que se encuentra el agua subterránea. En éste nivel la presión de agua del acuífero es igual a la presión atmosférica, (imágen N°8).



Imágen N°8. Diferencia entre nivel piezométrico y nivel freático. Tomado y modificado de (Angelone, 2006)

2.2.21.- Nivel dinámico

Stanley (1971) indica que el nivel dinámico también conocido como nivel de bombeo es producido cuando comienza la descarga del acuífero por el pozo. Este nivel depende del caudal de bombeo, del tiempo de bombeo y de las características hidrogeológicas del acuífero. También se debe tener en cuenta la técnica desarrollada en el diseño de pozo

2.2.22.- Superficie equipotencial

La superficie equipotencial según Castany (1971), es el lugar geométrico de todos los puntos que tienen un mismo potencial hidráulico. Por tanto, el flujo se producirá perpendicularmente a las superficies equipotenciales, buscando el máximo gradiente (imagen N°9).

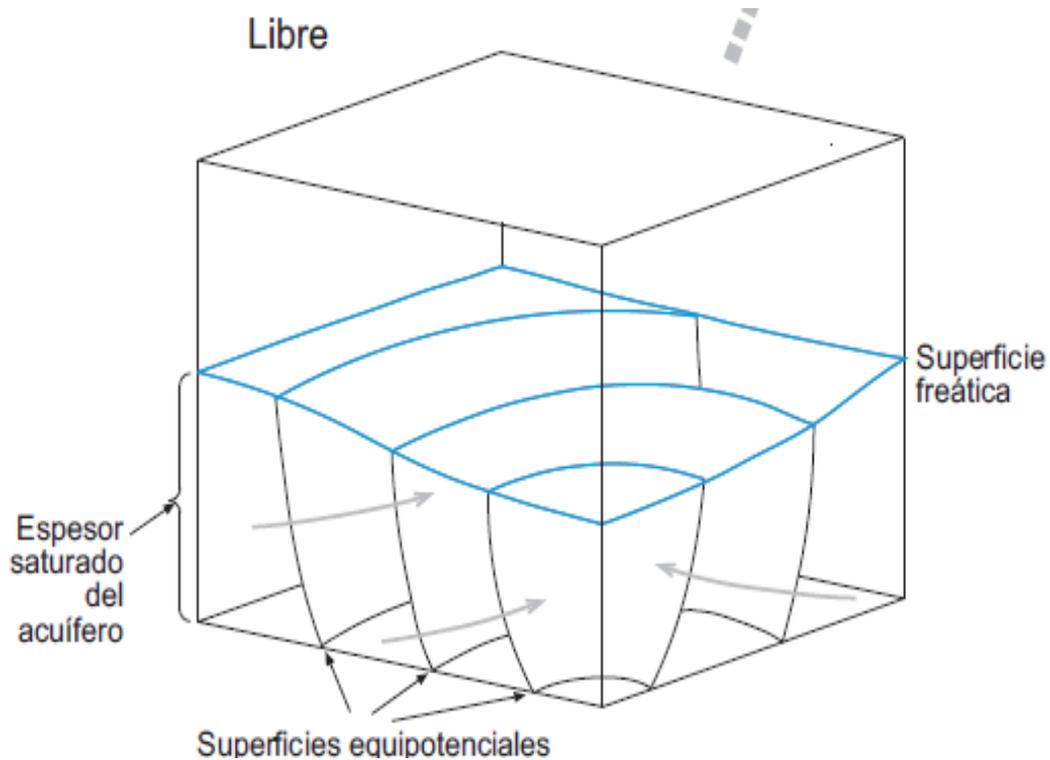


Imagen N°9. Superficies Equipotenciales en un acuífero libre. Tomado y modificado de (Sánchez, 2010)

2.3.- MODELO DE SIMULACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

2.3.1.- Visualización del modelo con el programa Visual Modflow 4.2 Pro®.

Mosquera & Parravano (2005), señalan que los modelos de simulación son una herramienta de análisis que permiten un mejor entendimiento del comportamiento hidráulico e hidrogeológico de un acuífero, así como también la predicción de casos específicos.

El Modelo Hidrogeológico Conceptual es la idealización y/o simplificación de las características conocidas de un lugar para facilitar una aproximación práctica que comprende las siguientes características: (a) el número de niveles o capas del acuífero; (b) características del suelo, que incluye el agrupamiento macroscópico de tipos de suelos conocidos para definir las unidades hidroestratigráficas primarias; (c)

condiciones iniciales del nivel freático; y (d) límites horizontales y verticales.

Las aplicaciones de los modelos hidrogeológicos son fundamentalmente diseñados con el propósito de: (a) mejorar el entendimiento de la hidrogeología de la zona; (b) manejar el recurso agua subterránea en cuanto a la estimación de las máximas tasas de bombeo permisibles, para calcular las áreas de protección y las reservas, (c) predecir impactos a través de casos específicos como el impacto de una presa sobre el flujo regional de agua subterránea y de la simulación de fallo de un sistema de drenaje; (d) diseñar y optimizar sistemas de remediación; y (e) analizar riesgos ambientales con el propósito de determinar la dirección más probable del transporte de un contaminante, así como predecir las concentraciones de contaminantes en un punto receptor.

En este estudio, el modelaje de simulación fue aplicado con el fin de mejorar el entendimiento de la hidrogeología del acuífero, que permita manejar los recursos de aguas subterráneas en cuanto a la estimación de las máximas tasas de bombeo permisibles.

2.3.2.-Las capacidades de simulación del programa Visual Modflow 4.2 Pro®.

Según la Rockware, Inc (2011), Visual Modflow 4.2 Pro® ha sido diseñado específicamente para aumentar la productividad de modelado y disminuir la complejidad típicamente asociada con la construcción de flujos subterráneos y modelos de transporte de contaminantes.

Al abrir o crear un archivo, se puede cambiar de manera amigable entre tres modelos para crear o modificar los parámetros de entrada del modelo, ejecutar las simulaciones y mostrar resultados en planta o en pantalla completa en sección transversal.

La capacidad rápida y fácil de cambiar de vista en planta y sección transversal de la exhibición representativa del modelo es una potente característica de Visual Modflow 4.2 Pro® que permite al usuario obtener una mejor perspectiva en tres dimensiones de los parámetros de entrada del modelo y resultados de la simulación.

Por su parte el Cubo Navigator proporciona una representación tridimensional esquemática de la malla del modelo y las capas. Además proporciona una rápida referencia visual de su posición activa en el dominio del modelo. La ubicación del ratón activa (X, Y, Z) para modelo de cooperación, mientras que (I, J, K) coordina la red, los cuales se muestran interactivamente por debajo del cubo navegador al pasar el ratón por la pantalla.

Por su parte, el Inspector de la Célula se utiliza para examinar los valores de los parámetros seleccionados en un modelo de célula a célula. Modelo de parámetros que se pueden ver en el Inspector de la Célula, los cuales son: posición de la cuadrícula, posición del modelo, posición mundial, propiedades como (K_x, K_y, K_z) , rendimiento específico, almacenamiento específico, la porosidad efectiva, valores iniciales de concentración, entre otros, y condiciones de frontera y la salida.

CAPÍTULO III

3.-MARCO METODOLÓGICO

3.1.-Diseño de la investigación

De acuerdo con lo planteado por Baptista *et al.* (2006), acerca del diseño de investigación:

El investigador debe visualizar la manera práctica y concreta de responder a las preguntas de investigación, además de cubrir los objetivos fijados. Esto implica seleccionar o desarrollar uno o más diseños de investigación y aplicarlos al contexto particular de su estudio. El término diseño se refiere al plan o estrategia concebida para obtener la información que se desea. En el enfoque cuantitativo el investigador utiliza su o sus diseños (...) para aportar evidencia respecto de los lineamientos de la investigación.

Por otra parte, desde el punto de vista del contexto en los que llega a tomar lugar un diseño experimental, Baptista *et al.* (2006) indica como diseño experimental de campo lo siguiente:

Un estudio de investigación efectuado es una situación realista en la que una o más variables independientes son manipuladas por el experimentador en condiciones tan cuidadosamente controladas como lo permite la situación.

En ese sentido, en este estudio fue definido un contexto de diseño experimental donde se manipulan variables independientes como cantidad de perforaciones, profundidades de perforación, localización y espaciamiento de las perforaciones y cantidad de unidades litoestratigráficas definidas en el perfil litológico del acuífero; todo ello en una situación realista como los ensayos de combustión en sitio en el acuífero del Sector del Campo Bare, bajo condiciones cuidadosamente controladas por los encargados de ejecutar las perforaciones en campo del proyecto.

Para ello, se desarrolló un diseño de investigación que funcionó como la

estrategia para darle solución al problema planteado en el presente trabajo de investigación en base a un experimento de campo. Esto para cumplir con los objetivos propuestos e indicados en el capítulo anterior. Así mismo se aportan evidencias respecto a los lineamientos de la investigación, que involucró las siguientes etapas:

3.1.1.- Trabajo de oficina y laboratorio

Ubicación: Laboratorio de combustión en sitio de PDVSA-INTEVEP.

Duración estimada: Ocho (08) meses.

Los ensayos de combustión en sitio se realizaron en la zona del Sector del Campo Bare establecida por PDVSA-INTEVEP para tales fines.

3.1.2.- Trabajo de campo

Este trabajo estuvo en manos de los investigadores del proyecto de combustión en sitio en un Sector del Campo Bare de PDVSA, quienes recolectaron muestras representativas de suelo y roca mediante ensayos de combustión en sitio. Estas muestras se tomaron como el propósito de usar los resultados en la presente investigación para su posterior análisis y discusión; así mismo, estos sirvieron para complementar y validar la información geológica existente de la Formación Mesa a la que corresponden los sedimentos y las rocas sedimentarias de la zona en estudio.

3.1.3.- Objetivos por etapas

Primera etapa

- (a) Búsqueda, revisión y recolección de información general existente, publicada o inédita, así como trabajos previos realizados en la zona en la que se encuentra el acuífero de estudio.
- (b) Revisión de los mapas topográficos y selección de los mapas y escalas que mejor muestren la zona donde se ubica el acuífero de estudio.

Segunda etapa

- (c) Determinación del diseño de la investigación, de las variables o indicadores, de la muestra, de los instrumentos, del procedimiento y de las técnicas para el procesamiento de datos o análisis de datos, así como del cronograma de actividades y limitaciones, todos referentes a la metodología aplicada en esta investigación.

Tercera etapa

- (d) Obtención de resultados de geología local a través de la investigación realizada en la primera etapa y del análisis de los perfiles litológicos resultantes de las perforaciones de combustión en sitio.
- (e) Correlación de la geología regional y de la geología local para la determinación de los rasgos geológicos completos de la zona donde se encuentra ubicado el acuífero de estudio.
- (f) Establecimiento de las direcciones y velocidades de flujo del acuífero en estudio.
- (g) Determinación de las direcciones de flujo subterráneo, identificación de las zonas de recarga y descarga de acuerdo a la información aportada por los mapas topográficos de la zona de estudio.
- (h) Elaboración del modelo hidrogeológico digitalizado a través del programa Visual Modflow 4.2 Pro[®], que muestre las direcciones de flujo subterráneo y sus velocidades.
- (i) Generar una base cartográfica de georeferencia digital de la zona de estudio, en la plataforma ArcGis 9.2[®], con la información hidrogeológica recopilada de los perfiles litológicos y de consultas bibliográficas y páginas web.

Cuarta etapa

- (j) Generación de los análisis, las discusiones e interpretaciones de los resultados.

(k) Planteamiento de conclusiones y recomendaciones.

3.1.4.-Instrumentos

La recolección de información geológica del Sector del Campo Bare, se realizó a través de la utilización y análisis de libros, textos, de páginas web, de mapas topográficos y de mapas geológicos. Por su parte, la información hidrogeológica del acuífero de estudio se recopiló a partir de mapas topográficos y descripciones de las perforaciones de los pozos P₀, P₁ y P₂, en los que se representan unidades litológicas y profundidades de perforación.

3.1.5.-Análisis de datos

El procesamiento de datos fue realizado mediante la utilización de la plataforma ArcGis 9.2[®] de georeferencia, generando una base cartográfica de la zona de estudio con toda la información geológica e hidrogeológica recopilada con los instrumentos anteriormente nombrados.

De la misma forma se usó la plataforma Visual Modflow 4.2 Pro[®], para generar el modelo hidrogeológico con direcciones de flujos de aguas subterráneas del acuífero bajo estudio, indicando las velocidades de las mismas.

CAPÍTULO IV

4.-RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1.-GEOLOGÍA LOCAL DE BARE, ESTADO ANZOÁTEGUI

4.1.a.-Fisiografía de la Zona de Estudio Entre los Pozos P₀, P₁ y P₂

Se observa en la fisiografía de la zona bajo estudio de la imagen N°10, a escala 1:100.000, que de forma regional al sureste, existe un río anastomosado de canal ancho cuyos ríos tributarios poseen patrones de drenaje dendrítico. Nótese que las densidades de drenaje aumentan de media a alta de sureste a sur, lo cual indica presencia de rocas poco competentes como areniscas delgadas y lutitas en el sustrato donde el drenaje tiene densidad media, y presencia de arcillas en el sustrato donde se ubican los cauces de los ríos con densidad alta.

Por su parte, la zona que va desde el sur hasta el oeste de la imagen está cubierta por ríos secundarios con patrones dendríticos, cuya densidad del drenaje es media, por lo que probablemente existan rocas poco competentes como lutitas y areniscas delgadas en el sustrato donde transcurren los cauces de dichos ríos. Al oeste-suroeste de ésta zona se observa que a lo largo de una tercera parte de la trayectoria del drenaje al comienzo del cauce del río tributario, que a su vez está al noroeste del río meandriforme principal nombrado anteriormente, existe una fractura a la cual se le puede adjudicar un origen por gravedad, debido a su joven edad (Pleistoceno aproximadamente), con respecto al período Cámbrico en el que hubo tectónica en Venezuela y en el que se le pudo haber otorgado un origen tectónico.

La zona al noroeste de la imagen está cubierta por ríos secundarios con patrones de drenaje dendrítico cuya densidad es alta, por lo que es posible la existencia de arcilla en el sustrato por donde transcurren los cauces de éstos ríos.

En contraste con éstos últimos, los ríos que ocupan el norte, noreste y este de la imagen tienen densidades de baja a media, sugiriendo la presencia de rocas duras en su mayoría, como areniscas gruesas. Todos estos ríos poseen patrones de drenajes

dendríticos. Se atribuye la coloración rojiza de la superficie del terreno, a la presencia de suelos por encima de las areniscas gruesas del sustrato, que tienen su origen en la influencia de agentes de meteorización que actúan sobre la roca, obteniendo como producto de la meteorización la presencia de suelos altamente alterados, característicos de ésta coloración.

En contraste con las zonas del terreno con densidad baja del drenaje que están cubiertas por suelos de coloración rojiza como los anteriores, las zonas que están cubiertas por drenajes de densidad media a alta, se observa que el terreno está muy drenado, esto debido a que el sustrato al estar constituido de rocas blandas, permite que el proceso predominante sea la erosión. Este proceso es eficiente sobre las lutitas y las arcillas drenando con alta densidad la superficie del terreno, lo que permite explicar que en dichas zonas del terreno el color predominante de estos drenajes sea el verde.

Localmente, en la imagen N°10 se observa que el origen de los ríos secundarios divergen de un centro elevado de extensión limitada por los drenajes dendríticos, construyendo un patrón que se distribuye de forma radial generalizada en toda la zona cubierta por la imagen, dando la apariencia de una red con radios.

En ésta imagen también se observa claramente el contraste entre la superficie rojiza del terreno, que como se mencionó, esta coloración se atribuye a los suelos originados por la meteorización de rocas duras (areniscas gruesas) presentes en el sustrato; mientras que, el color verde que en la imagen se refiere a los drenajes de alta densidad, frecuentemente producidos por la erosión de las rocas poco competentes (arcillas y lutitas) presentes en el sustrato.

Localmente, toda la zona vendría siendo ocupada por Mesa La Tentación, de la Formación Mesa (imagen N°10).

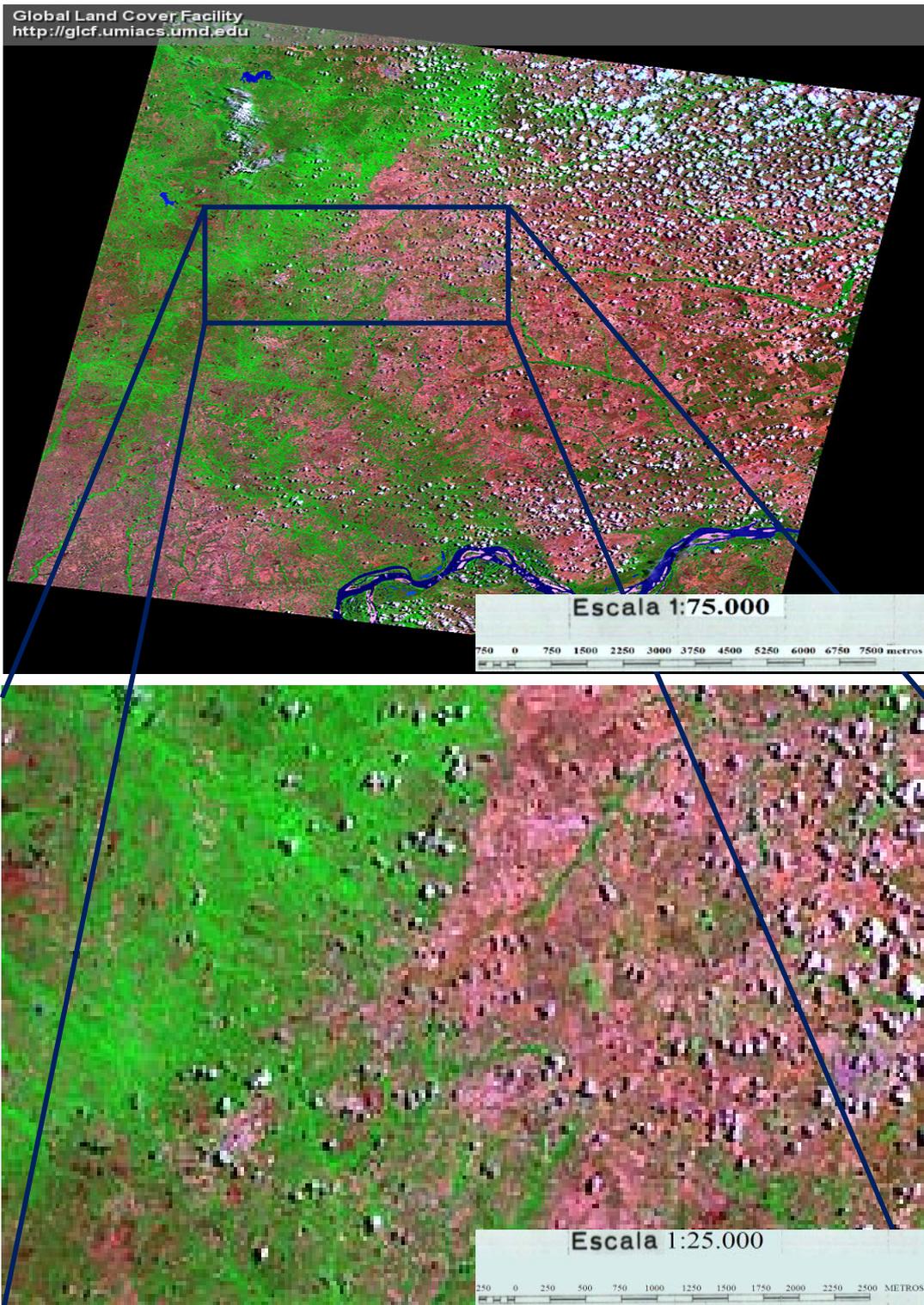


Imagen N°10. Fisiografía de la zona de estudio desde lo regional a lo local, en una imagen orbital tomada desde el Satélite Landsat. Tomado y modificado de (Landsat, 2000)

4.1. b.-Descripción de las perforaciones de los pozos P₀, P₁ y P₂

Descripción de la perforación del pozo P₀: El pozo P₀ es un pozo de control y de bombeo activo, el cual poseía la fuerza motriz de una bomba para obtener el agua del acuífero de forma mecánica, y equipo de control adecuado, de 124,40 m de profundidad, con un tubo de PVC de 8".

La descripción de base a tope de la perforación del pozo P₀, permite señalar que en la base se observa una arenisca de grano medio de 2 m de espesor, continúa hacia el tope una gruesa capa de lutita de 22,50 m de espesor, a la que le sigue una arenisca de grano medio de 12,67 m, después de la cual se observa una lutita de 1 m de espesor, luego se encuentra una gruesa capa de arenisca de grano medio de 13,67 m de espesor, posterior a ésta se observa una delgada capa de lutita de 1,50 m de espesor, a la cual le sigue una capa de arenisca de grano medio de 4 m de espesor, y continuando hacia el tope se encuentra una intercalación compuesta de dos capas de lutitas con una capa de arenisca de grano medio de 4,33 m de espesor.

Posteriormente hacia el tope, se observa una intercalación de dos capas de areniscas de grano grueso con dos capas de areniscas de grano medio de 6,67 m, después se observa una delgada capa de arenisca de grano grueso de 1 m, luego se observa una capa de arenisca de grano medio de 4 m de espesor, y continúa con una delgada capa de lutita de 1,33 m de espesor. Hacia el tope le sigue una intercalación compuesta de dos capas de areniscas de grano grueso con dos capas de areniscas de grano medio de 8,67 m de espesor, en medio de la cual se encuentra el nivel freático a 35 m de profundidad, después se observa una capa de arenisca de grano medio de 8 m de espesor. A ésta le sigue una capa de lutita de 1 m de espesor, luego se encuentra una intercalación de cuatro capas de arenisca de grano medio con tres capas de arenisca de grano fino de 14 m de espesor. Le sigue una arenisca de grano grueso de 3,67 m y otra de arenisca de grano medio de 1,33 m. En el tope se observa una delgada capa de lutita de 1,33 m de espesor (imagen N°11).

Descripción de las perforaciones de los pozos P₁ y P₂: Los pozos P₁ y P₂ son pozos de observación (sin bomba), cuyas características son iguales al pozo control sólo que para el P₁ la tubería es de 6". Éstos permitieron el monitoreo y registro de los cambios del nivel de agua por efectos del bombeo, midiendo el abatimiento y posteriormente la recarga del acuífero por un lapso de tres días.

En la descripción de base a tope de la perforación del pozo "P₁", se observa una intercalación de 7,33 m de espesor, compuesta de dos capas de areniscas de grano grueso y dos capas de areniscas de grano medio. Prosiguiendo una intercalación de 12 m de espesor, compuesta de dos capas de lutitas con una de arenisca de grano grueso de 0,67 m de espesor. A ésta le sigue una intercalación de 8 m de espesor, compuesta por dos capas de lutitas con una de arenisca de grano medio, después de la cual continúa una intercalación de dos capas de areniscas de grano medio con una arenisca de grano grueso de 4,67 m de espesor. Se observa después de ésta una intercalación de 7 m de espesor, compuesta de cuatro capas de areniscas de grano fino con tres capas de areniscas de grano medio, a la cual le sigue una delgada capa de lutita de 0,67 m de espesor.

Luego, en la perforación hacia el tope se observa un estrato de 5,33 m de espesor de una intercalación de tres capas de areniscas de grano fino con dos capas de areniscas de grano medio. Después se encuentra una lutita de 1,33 m de espesor, a la cual le sigue una intercalación de tres capas de areniscas de grano medio con tres capas de areniscas de grano fino de 4 m de espesor, luego se observa una intercalación de 4 m de espesor que está compuesta por dos capas de areniscas de grano fino con una capa de arenisca de grano grueso con tres capas de areniscas de grano fino de 4 m de espesor, luego se observa una intercalación 6 m de espesor compuesta por cuatro capas de areniscas de grano medio y cinco capas de lutitas, después se observa una intercalación de 8,67 m de espesor compuesta por tres capas de areniscas de grano medio con dos capas de areniscas de grano grueso. Hacia el tope continúa una intercalación de dos capas de lutitas con una de areniscas de grano medio de 2,33 m de espesor (imagen N°12).

Prosigue hacia el tope una intercalación de 4,67 m de espesor, compuesta por

dos capas de areniscas de grano medio y una arenisca de grano grueso, en la cual se presenta el nivel freático a 35,02 m de profundidad, a la cual prosigue una delgada capa de lutita de 0,67 m de espesor. Continúa hacia el tope de la perforación una intercalación de dos capas de areniscas de grano fino con una capa de arenisca de grano medio, también de 3,17 m de espesor. Posteriormente se encuentra una intercalación de 3,17 m de espesor, compuesta por dos capas de areniscas de grano medio con una de lutita. Después de ésta intercalación, se observa una delgada capa de arenisca de grano fino de 1 m de espesor (imagen N°12).

Luego se observa una intercalación de dos capas de areniscas de grano medio con dos capas de areniscas de grano grueso de 4,67 m de espesor, después se presenta una intercalación de dos capas de areniscas de grano medio con dos capas de areniscas de grano fino de 5,67 m de espesor. Posteriormente, se observa una intercalación de dos capas de lutitas con una arenisca de grano medio de 4,67 m en total, a la cual le sigue una capa de areniscas de grano medio de 2,67 m de espesor, observándose después una delgada capa de arenisca de grano grueso de 0,67 m de espesor, y hacia el tope continúa una capa de areniscas de grano fino de 1 m de espesor. Luego hacia el tope se encuentra una intercalación compuesta de dos capas de areniscas de grano medio con una arenisca de grano grueso de 5,33 m de espesor; finalmente en el tope se observa una arenisca de grano fino de 1,33 m de espesor (imagen N°12).

Por su parte , en la perforación del pozo “P₂” de base a tope, se observa hacia la base una capa de 3,33 m de espesor de una intercalación de areniscas de grano medio y areniscas de grano grueso, a la cual le siguen 25,33 m de intercalación de cinco capas de lutitas con cuatro capas de areniscas de grano medio. Continuando hacia el tope 27,33 m de una intercalación de siete capas de areniscas de grano medio con siete capas de lutitas.

Luego se observan 24 m de espesor de una intercalación de seis capas de areniscas de grano medio con seis capas de areniscas de grano fino, continuando 4,67 m de espesor de areniscas de grano medio en la que se observa el nivel freático a los 35,31 m de profundidad. Continuando hacia el tope, se observa una lutita de 3,33 m,

luego una arenisca de grano medio de 4,33 m, después se observa 1,33 m de una delgada intercalación de dos capas de areniscas de grano grueso con una arenisca de grano fino, a la cual le sigue una gruesa capa de arenisca de grano medio de 11,33 m.

Continúa hacia el tope una lutita de 1,33 m, mientras que finalmente se observa en el tope una capa de 12,33 m de una intercalación de dos capas de areniscas de grano medio con una de grano fino, como se observa en la imagen N°13.

Entre los pozos P_0 y P_1 se interpretó una falla normal con un salto de aproximadamente 2 m, la cual se puede apreciar en profundidad entre los 40 m y 120 m, otorgándole un origen por gravedad, descartando el origen por tectónica, debido a su joven edad del Pleistoceno, (imagen N°14).

4.1.c.- Perforaciones de los pozos P₀, P₁ y P₂

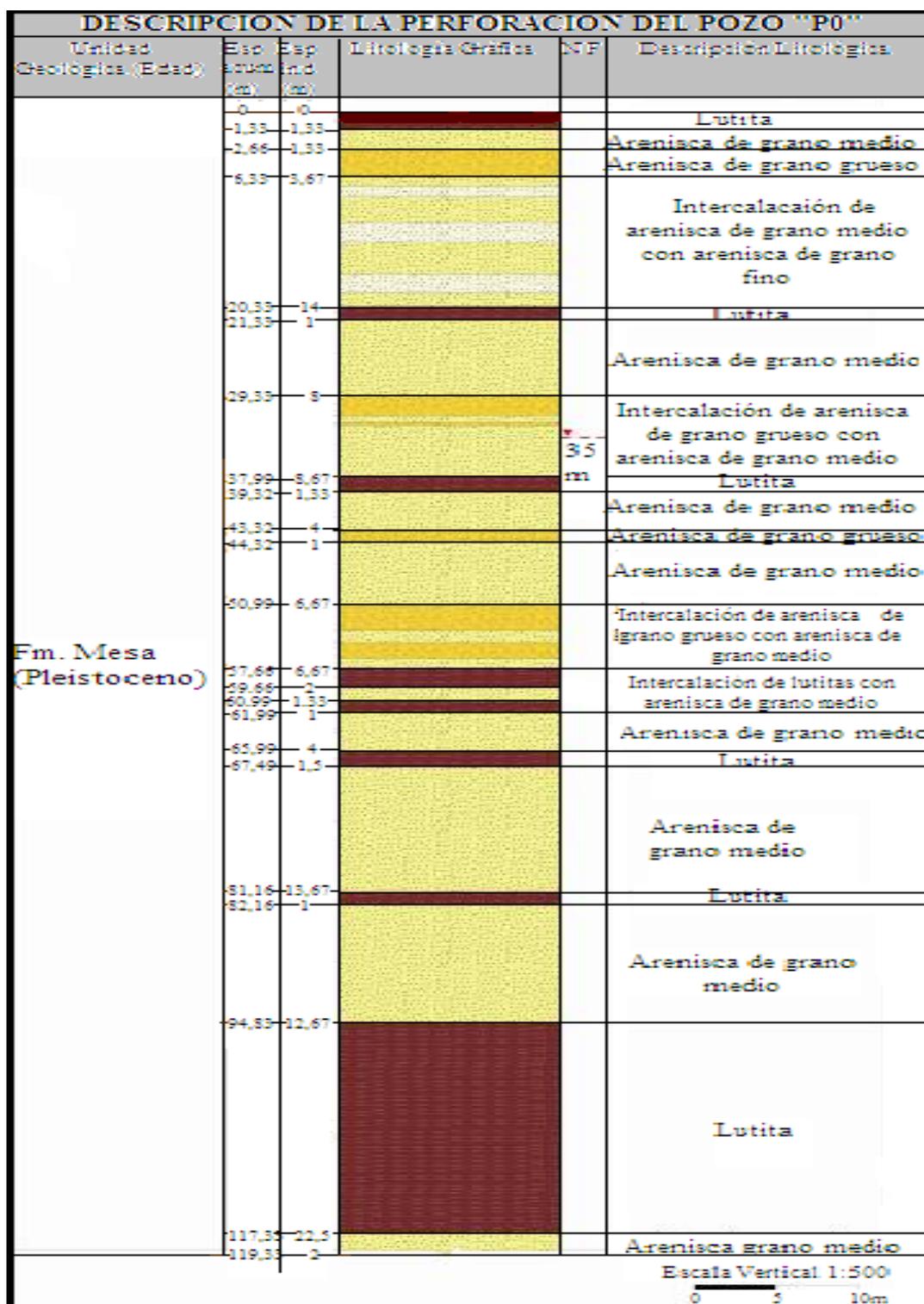


Imagen N°11. Descripción de la Perforación del Pozo Po. Tomado y modificado de (LNH, 2010)

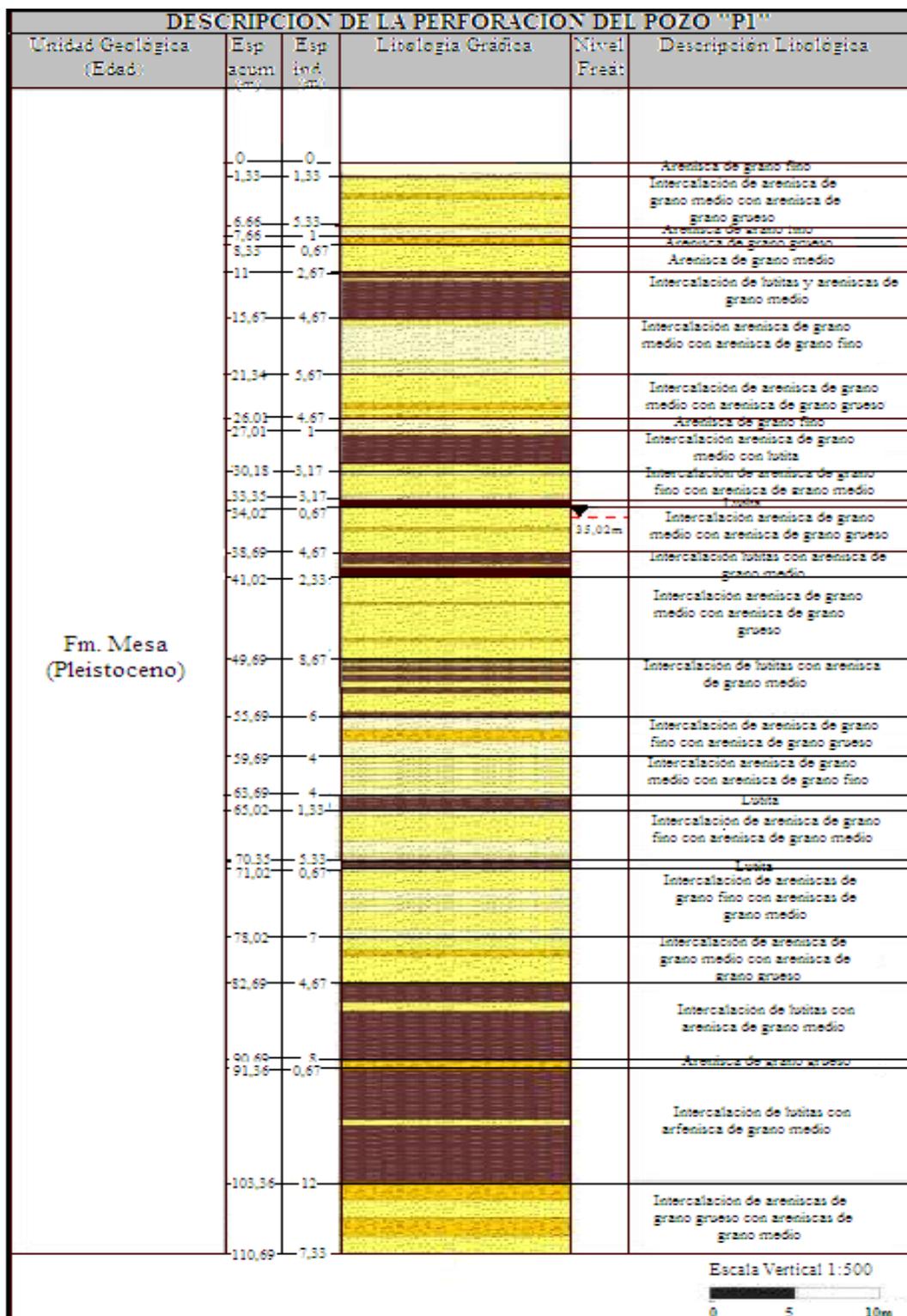


Imagen N°12. Descripción de la Perforación del Pozo P₁. Tomado y modificado de (LNH, 2010)

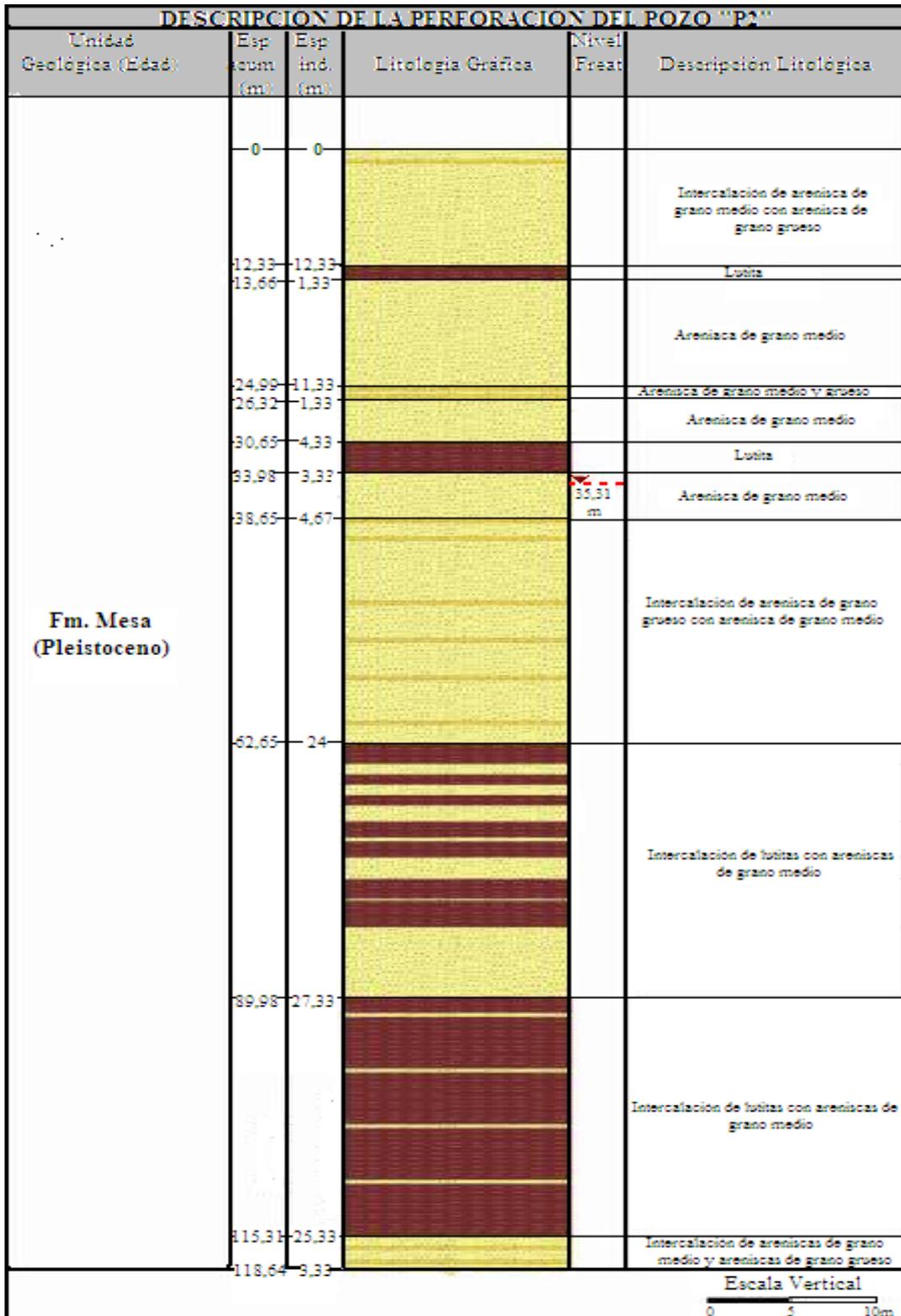


Imagen N°13. Descripción de la Perforación del Pozo P₂. Tomado y modificado de (LNH, 2010)

4.1.d.- Profundidades y distancias entre los pozos P₀, P₁ y P₂.

Las profundidades de los tres pozos de perforación (P₀, P₁ y P₂) son de 124,40 m.

Las distancia entre el pozo P₀ y P₁ es de 10 m, y entre los pozos P₁ y P₂ es de 72,24 m como se observa en la imagen N°14.

4.1.e.- Unidades litoestratigráficas observadas en la correlación de los registros de los pozos P₀, P₁ y P₂

Localmente, el acuífero al que se le aplicó el modelo hidrogeológico de flujos de aguas subterráneas entre los pozos P₀, P₁ y P₂, alcanza una profundidad máxima de 124,40 m. A ésta profundidad la zona se caracteriza litológicamente por la presencia de la unidad litoestratigráfica de la Formación Mesa, la cual según la correlación entre los registros de potencial espontáneo y resistividad de los tres pozos, se puede dividir en dos subunidades.

Una descripción de base a tope, la segunda subunidad del Pleistoceno Tardío, constituida por una arenisca permeable desde los 124,40 m hasta los 120 m, la cual presenta un espesor de 4,40 m. Continuando hacia el tope, se observa una lutita de 25 m de espesor, desde los 120 m hasta los 95 m. Toda la subunidad presenta un espesor de 29,40 m (imagen N°14).

La primera subunidad en contacto concordante con la segunda y por encima de ella, está compuesta hacia la base por un cuerpo lutítico de 18 m de espesor con intercalaciones y lentes delgados de arenas permeables. Continuando hacia el tope, entre los 95 m y 0 m se observan arenas y arcillas del Pleistoceno Tardío. En estos 95 m de espesor se identificaron tres capas de areniscas permeables con intervalos de 70 a 54 m, de 52 a 38 m y de 30 a 15 m. En el tope se observan suelos superficiales del Holoceno.

Estas areniscas permeables tienen espesores que varían entre los 5 y 30 m, mientras que las lutitas poseen espesores que no superan los 5 m, como se puede observar en la imagen N°14.

4.1.f.-Ambientes de deposición de las unidades litoestratigráficas observadas entre los pozos P₀, P₁ y P₂

Localmente, los sedimentos entre los pozos P₀, P₁ y P₂ están compuestos por areniscas y lutitas que se depositan en ambientes fluviales y aluviales.

De forma específica, en el ambiente fluvial los sedimentos tienden a depositarse en subambientes de canales de los ríos secundarios con patrones dendríticos; mientras que los sedimentos que se depositan en ambientes aluviales lo hacen en los valles que forman los ríos principales con patrones meandriformes que drenan la zona, (imagen N°14).

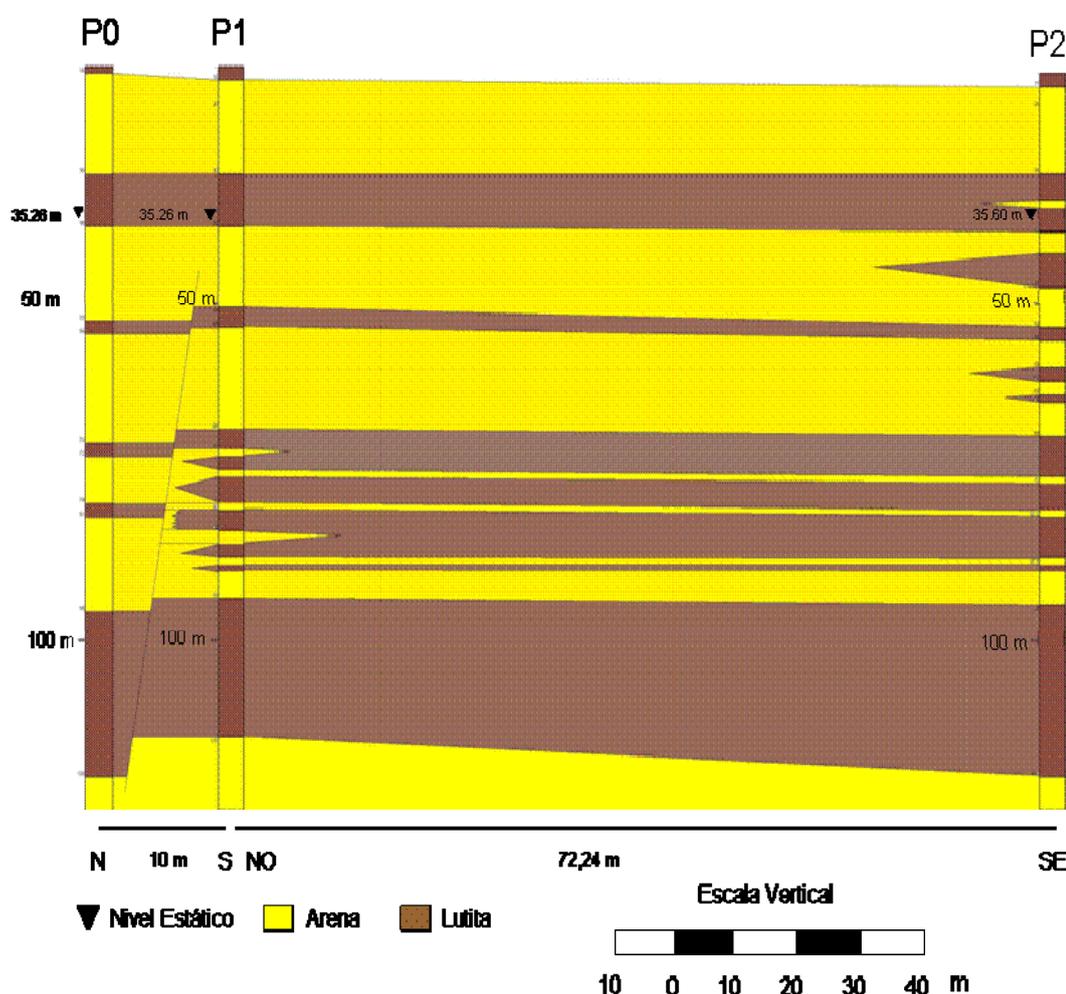


Imagen N°14. Correlación de los registros de pozos P₀, P₁ y P₂. Modificado de Laboratorio Nacional de Hidráulica, 2010)

4.2.-HIDROGEOLOGÍA LOCAL DE BARE, ESTADO ANZOÁTEGUI

4.2.a.- Origen y clasificación de las aguas subterráneas, y del acuífero de Bare, estado Anzoátegui

Las aguas subterráneas del acuífero en estudio provienen de aguas de lluvias por lo que han estado en contacto reciente con el sustrato en el ciclo hidrológico, por ello conceptualmente se señala que son del tipo meteóricas. De acuerdo con González de Juana *et al.* (1980), una parte de la precipitación infiltrada en la zona puede perderse por evapotranspiración, mientras que la porción restante, considerada infiltración efectiva, percola lentamente hacia el nivel freático debido a la variabilidad de los sedimentos en el sentido horizontal y vertical de los acuíferos.

Químicamente, las aguas del acuífero son del tipo cloruradas-sódicas (Na-Cl). Como provienen de la precipitación están cargadas por dióxido de carbono en solución y además al infiltrarse meteorizan algunos minerales carbonáticos, generando un aumento en el pH de las aguas, por lo que las aguas así recargadas son del tipo bicarbonatadas cálcicas ($\text{HCO}_3^- \text{Ca}$).

El acuífero se clasifica como confinado puesto que la mesa de agua se encuentra en una lutita que funciona como roca sello en el acuífero, cuyo nivel freático está a 35,26 m de profundidad en promedio entre los tres pozos P₀, P₁ y P₂, y, observable en la imagen N°14. El acuífero también se puede clasificar como libre puesto que el nivel freático varía considerablemente, existiendo la posibilidad de que la superficie libre del agua contenida en las areniscas, esté en contacto directo con el aire y por lo tanto, a la presión atmosférica. Localmente el patrón de drenaje analizado en los mapas topográficos de la zona de estudio, Atapirire hoja 7341-I-SO, escala 1:25.000, a través de la plataforma del programa ArcGis 9.2[®], se identificó un patrón radial de flujo subterráneo, también observado a nivel regional, (imagen N°14).

4.2.b.-Zonas de recarga y descarga en la base cartográfica de georeferencia digital de Bare, estado Anzoátegui, en la plataforma ArcGis 9.2[®]

En el campo Bare del área Ayacucho de la Faja Petrolífera del Orinoco, de acuerdo a las características geomorfológicas y de drenajes observadas en los mapas topográficos de la zona de Atapirire correspondiente a los pozos P₀, P₁ y P₂, recopiladas en una base cartográfica de georeferencia digital de la zona de estudio en la plataforma ArcGis 9.2[®] como se observa en la imagen N°15, considerando además la geología y el desarrollo estructural de la Formación Mesa, puede señalarse que estas aguas tienen origen en la infiltración de aguas provenientes de las lluvias que se infiltran; por su parte el drenaje posee un patrón radial cuya zona de recarga, se encuentra en Mesa La Tentación. Desde el punto de vista geomorfológico, en esta área, las zonas de descarga se encuentran hacia los cauces principales del río Moquete al noreste, norte y noroeste, río Atapirire y Qda. Cunaguaro al oeste y suroeste y río Limo al sur y sureste, (imagen N°15).

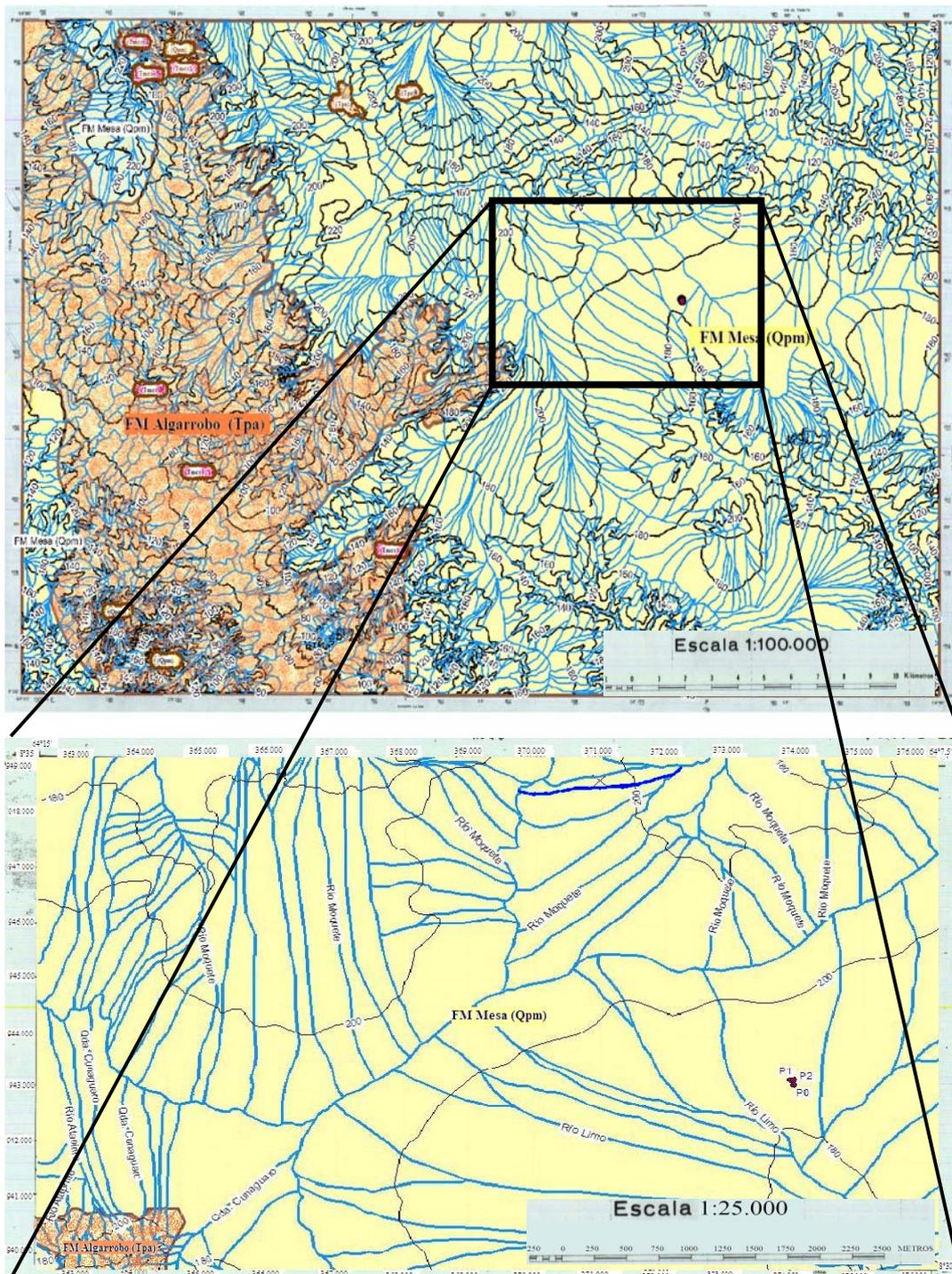


Imagen N°15. Zonas de recarga y descarga de la base cartográfica de georeferencia digital en la plataforma ArcGis 9.2®, desde la región de Atapirire hoja 7341 escala original 1:100.000 hasta la localización de los pozos P₀, P₁ y P₂ de Bare, estado Anzoátegui, en la hoja 7341 I-SO de Atapirire, escala original 1:25.000. Tomado y modificado de (Cartografía Nacional, 1966)

4.3.-PERMEABILIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO EN EL MAPA HIDOGEOLÓGICO DE VENEZUELA

Tanto en la imagen superior a escala 1:740.700, como en la inferior derecha, de escala 1:270.300, se observa que la permeabilidad en la zona es de media a alta. Esto explica la presencia de las aguas subterráneas, las cuales se mueven a través de sedimentos granulares, que en el caso de la zona de estudio caracterizada por la presencia de rellenos del Pleistoceno (terrazas aluvionales), del Período Cuaternario/Época Pleistoceno/Formación Mesa (Qpm). De acuerdo a la clasificación de estas permeabilidades según la leyenda inferior izquierda, el acuífero de la zona de estudio en el Campo Bare, se puede clasificar como un acuífero de alto rendimiento, como se observa en la leyenda de la imagen N°16.

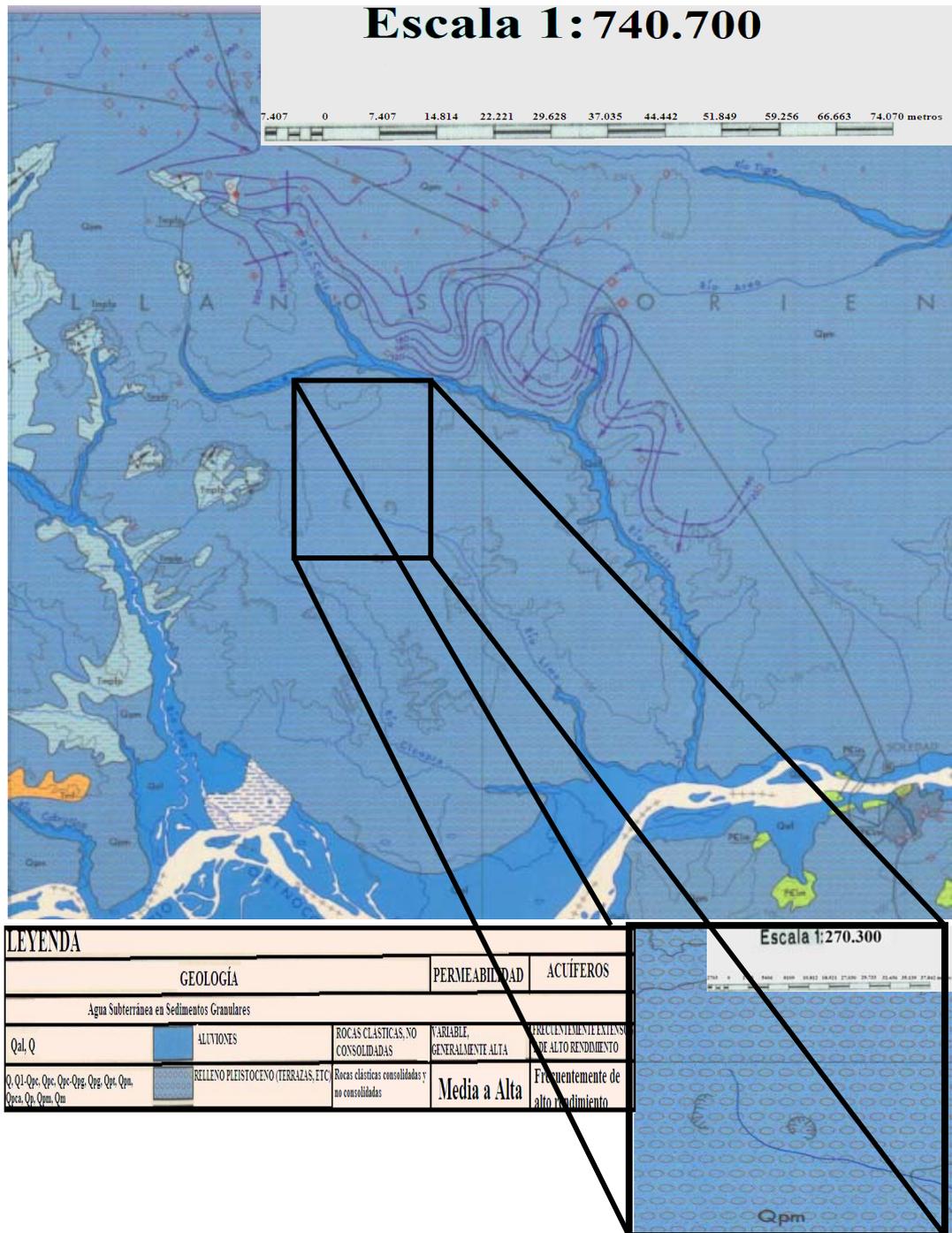


Imagen N°16. Clasificación de las permeabilidades de la zona de estudio en el Mapa Hidrogeológico de Venezuela, a escala regional 1:740.700 y a escala local 1:270.300. (Modificado de Ministerio de Minas e Hidrocarburos, 1972)

4.4.-MODELO HIDROGEOLÓGICO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS, QUE MUESTRA LAS DIRECCIONES Y VELOCIDADES DEL FLUJO SUBTERRÁNEO EN EL ACUÍFERO DE BARE, ESTADO ANZOÁTEGUI

El modelo se realizó tomando como referencia las coordenadas X; Y; Z en metros, de los pozos dentro del polígono del Proyecto Piloto Combustión en Sitio a Larga Distancia (CESLD), las cuales resultaron ser: P₀ (352,50; 212,50; 124,40) m, P₁ (357,50; 205; 124,40) m, y P₂ (400; 182,50; 124,40) m. Por su parte, las magnitudes del modelo, se ajustan a dicho polígono, siendo sus medidas: 810; 245; 124,40 m.

Así mismo, para generar el modelo se necesitaron los siguientes valores de los pozos P₁ y P₂: Permeabilidad $K= 6 \times 10^{-7}$ m/d, Coeficiente de Almacenamiento $S_y= 5,62 \times 10^{-3}$, Transmisibilidad $T=2707,44$ m²/d, Recarga= 1×10^{-3} m³/d, y para el pozo P₀ se necesitó el valor del caudal $Q_{P_0}= -1042,08$ m³/d, como se observa en la imagen N°17.

4.4.a.-Direcciones de flujo subterráneo en los sedimentos permeables del acuífero de Bare, estado Anzoátegui

El Laboratorio Nacional de Hidráulica (2011) establece que las aguas subterráneas de la zona del estado Anzoátegui donde se encuentra el acuífero bajo estudio; es decir entre los pozos P₀, P₁ y P₂ perteneciente a la Formación Mesa, son recargadas en dirección norte-sur y noreste-sur desde la región de Jusepín-El Furrial, hasta Mesa La Tentación, debido a la infiltración que ocurre en los afloramientos dentro de la cuenca del río Guarapiche. Al mismo tiempo, debe señalarse que la recarga natural sigue siendo posible gracias a las interconexiones litológicas, producto de las características estratigráficas de la formación que está dominada por los cambios de facies y por la alta variabilidad, tanto lateral como vertical a cortas distancias.

Para la zona de estudio, localmente la dirección de la recarga del acuífero tiene componentes diferentes: una vertical, debido a la infiltración directa del agua de lluvia, y otra lateral asociada al movimiento de las aguas subterráneas que

proviene de los ríos adyacentes, este es el caso de los cauces secundarios del Río Limo. En la imagen N°14, puede observarse en el mapa a escala 1:25.000 que éste muestra las características hidrogeológicas de la zona de estudio.

Así mismo, la componente vertical posee una recarga de $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{d}$, para un período de tres días, en el modelo realizado en la plataforma de Visual Modflow 4.2 Pro[®].

También se conocen datos de recarga por año para el acuífero, los cuales según González de Juana *et al.* (1980) son: recarga por infiltración en el componente vertical de $84 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$; mientras que, la componente lateral es equivalente a $6,63 \text{ m}^3/\text{s}$ durante todo el año.

En el modelo hidrogeológico de aguas subterráneas en planta (X, Y) del Acuífero de Bare, estado Anzoátegui, se observan intervalos de variación de las superficies equipotenciales que van desde una profundidad de los -5 m, a una ubicada a los -45 m, cuyos intervalos se diferencian con los colores rojo oscuro (-5 a -10,71) metros, rojo de (-10,71 a -16,43) m, amarillo de (-16,43 a -22,14) m, verde claro de (-22,14 a -27,86) m, verde de (-27,86 a -33,57) m, verde azulado de (-33,57 a -39,29) m, azul de (-39,29 a -45) m, y azul oscuro a profundidades mayores a los -45 m, tal como se muestra en los cuadros titulados “Ranges to color” del modelo de la imagen N°17.

Las flechas que se observan de color azul aguamarina, indican las direcciones y magnitudes de las velocidades del flujo de las aguas subterráneas, que en conjunto construyen un patrón de drenaje de forma radial. Las velocidades crecen conforme las magnitudes de las flechas aumentan, desde los pozos de observación P₁ y P₂ hacia el pozo de bombeo activo P₀, desde el cual se obtiene el agua de forma mecánica, lo cual indica que las velocidades del flujo subterráneo aumentan conforme el agua se acerca al pozo de bombeo artificial para ser obtenida del acuífero. Estas flechas representan físicamente el efecto de la extracción de aguas subterráneas sobre un manto acuífero, donde la diferencia de presión creada por la extracción se transmite a lo largo de las líneas de corriente. Aunque no es visible en ésta sección transversal por el poco tiempo al que se sometió la recarga del acuífero en el modelo (tres días), éstas flechas

terminan hundiéndose en forma de cono de revolución con una generatriz curvilínea, generando lo que se conoce como el cono de depresión, (imagen N°17).

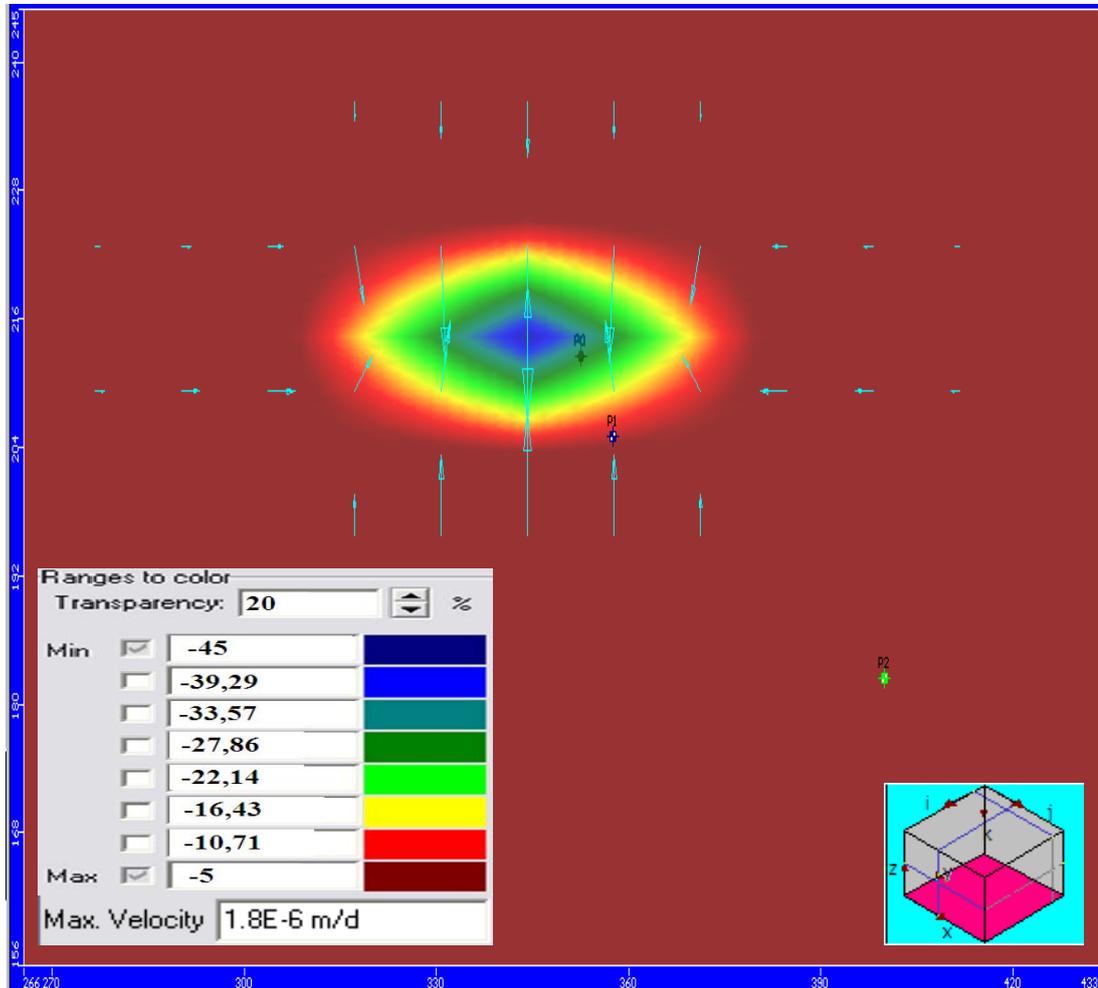


Imagen N°17. Modelo hidrogeológico de aguas subterráneas que muestra direcciones y velocidades del flujo subterráneo en planta (X, Y) del acuífero de Bare, estado Anzoátegui en la plataforma de Visual Modflow 4.2®. Tomado y modificado de (LNH, 2011)

Así mismo, la vista transversal del modelo (Z, Y) en la imagen N°17, se observa que desde los pozos P₁ y P₂ las flechas muestran direcciones del flujo subterráneo que va desde afuera hacia el centro de manera radial; es decir desde el pozos de observación P₁, en este caso, hacia el pozo de bombeo P₀. A su vez, estas flechas que muestran las direcciones del flujo subterráneo en el acuífero, son perpendiculares a las superficies equipotenciales tal y como lo expresa el concepto de

superficie equipotencial, en el que se indica que el flujo se producirá perpendicularmente a las superficies equipotenciales buscando el máximo gradiente, (imagen N°18).

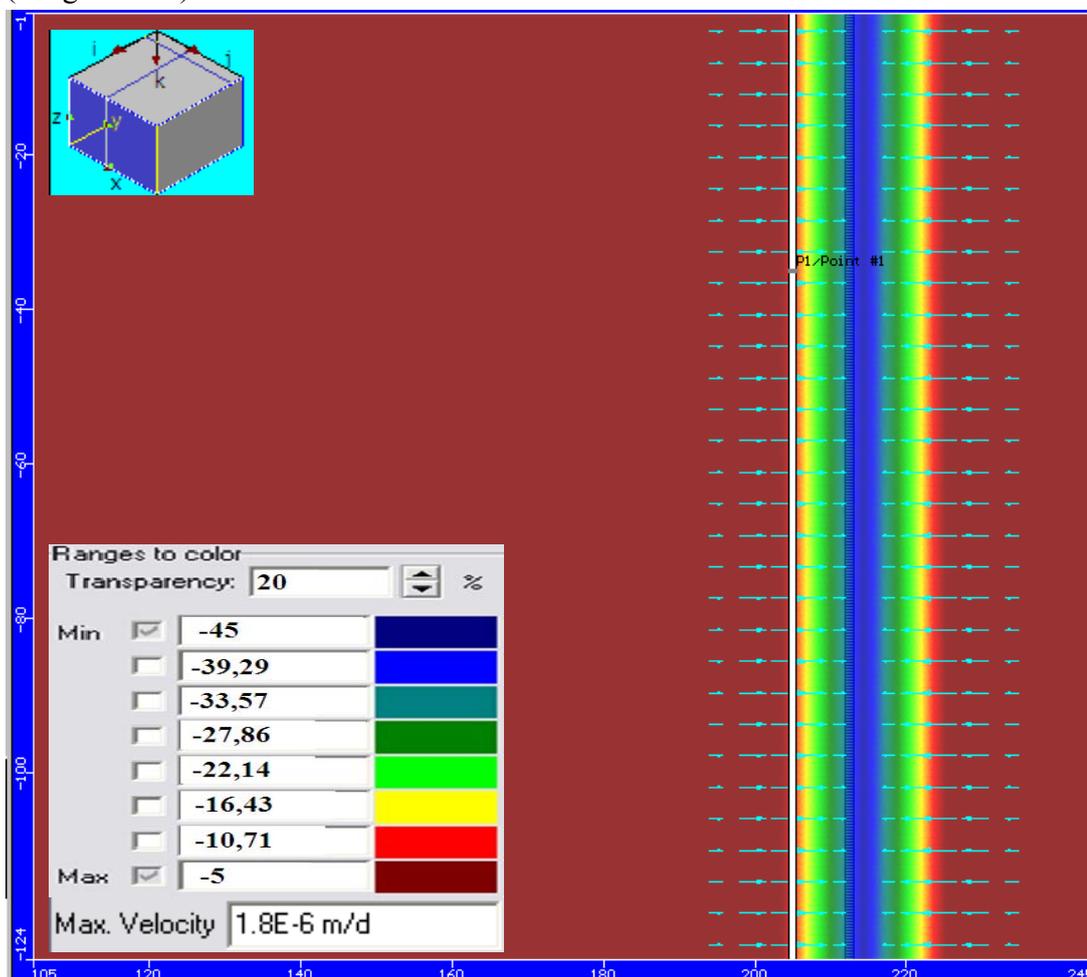


Imagen N°18. Modelo hidrogeológico de direcciones y velocidades del flujo subterráneo en corte transversal (Z, Y) del acuífero de Bare, estado Anzoátegui en la plataforma de Visual Modflow 4.2 Pro®. Tomado y modificado de (LNH, 2011)

En el gráfico del nivel freático observado frente al nivel freático calculado, (imagen N° 19), se visualiza que los valores del nivel freático calculado de los pozos más cercanos entre sí P₀ y P₁, se encuentran por debajo de la recta azul, área donde se localizan los valores calculados por el programa, y a la vez entran en el intervalo confidencial demarcado entre las rectas rojas punteadas, (imagen N°19). La recta azul representa el lugar geométrico de todos los puntos donde el valor observado del

nivel freático es igual al calculado, y por encima de ella se encuentran los valores del nivel freático observados in situ.

Por otra parte, se observa en el gráfico de nivel freático observado frente al nivel freático calculado, que el valor del nivel freático calculado en el modelo presenta un error estimado estándar de 4,42 m de diferencia del valor observado, por lo que el modelo calculado por el programa se ajusta en un 87,40 % al nivel freático observado de 35,26 m, entre los tres pozos, (imagen N°19).

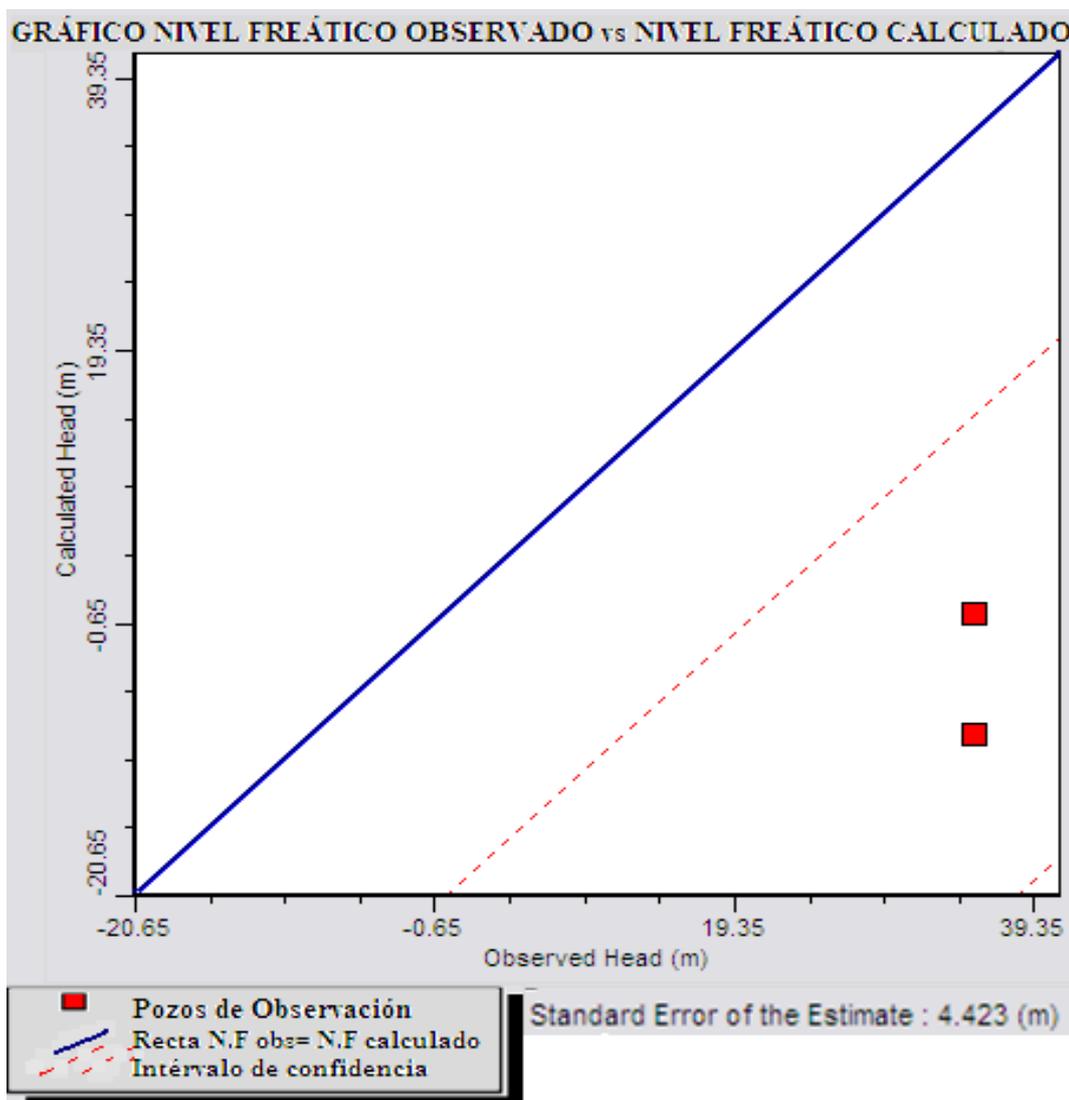


Imagen N°19. Gráfico del nivel freático calculado vs nivel freático observado en el modelo hidrogeológico del acuífero de Bare, estado Anzoátegui en la plataforma de Visual Modflow 4.2 Pro®. Tomado y modificado de (LNH, 2011)

4.4.b.-Velocidades de flujo subterráneo en los sedimentos permeables del acuífero de Bare, estado Anzoátegui

La velocidad máxima que se observa en el modelo de flujo de aguas subterráneas desde la vista lateral y en planta para un período de tres (3) días es de $1,8 \times 10^{-6}$ m/d, (imágenes N°17 y 18).

5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1- CONCLUSIONES

En las imágenes satelitales de la zona de estudio, se observa que el origen de los ríos secundarios divergen de un centro elevado en Mesa La Tentación, de extensión limitada por los drenajes dendríticos, construyendo un patrón de drenaje que se distribuye de forma radial generalizada en toda la zona cubierta por la imagen. Éste centro constituye la zona de recarga, y las terminaciones de los ríos secundarios constituyen las zonas de descarga en la zona de estudio.

La superficie rojiza del terreno, se atribuye a los suelos originados por la meteorización de rocas duras (areniscas gruesas) presentes en el sustrato, mientras que el color verde asociados a los drenajes de alta densidad, producen la erosión de las rocas blandas (arcillas y lutitas) presentes en el sustrato.

El centro elevado de extensión limitada por los drenajes dendríticos es la zona de recarga, y las terminaciones de los ríos secundarios que se encuentran distribuidos con un patrón de drenaje radial generalizado en toda la zona constituyen las zonas de descarga en la zona de estudio que se ubica en Mesa La Tentación.

El modelo hidrogeológico de flujos de aguas subterráneas entre los pozos P₀, P₁ y P₂, alcanza una profundidad máxima de 124,40 m. A ésta profundidad la zona se caracteriza litológicamente por la presencia de la unidad litoestratigráfica Formación Mesa, y se puede dividir en dos subunidades; La segunda subunidad del Pleistoceno Tardío en la base, está constituida por areniscas permeables y lutitas entre los (124,40 y 95) m. Continúa hacia el tope con la primera subunidad constituida por arenas y arcillas del Pleistoceno Tardío, comprendida entre (95 y 0) m, en la cual se identificaron tres capas de areniscas permeables con presencia de agua fresca en los intervalos (70 a 54)m, (52 a 38)m y de (30 a15) m. En el tope presenta una superficie de suelo del Holoceno.

Todas éstas areniscas funcionan como rocas que fungen de reservorios de las

aguas subterráneas, las cuales se sacan del acuífero de forma artificial a través del bombeo en el pozo P₀, y son utilizadas en actividades como el consumo humano, en las actividades petroleras y en la agricultura de la zona.

Estas areniscas permeables tienen espesores que varían entre los 5 y 30 m, y funcionan como rocas reservorios de las aguas subterráneas del acuífero de estudio (imagen N°13).

Entre los pozos P₀ y P₁ se interpretó una falla normal con un salto de aproximadamente 2 m, la cual se puede apreciar en profundidad entre los 40 m, y 120 m, y se le otorga un origen por gravedad, descartando la posibilidad que haya sido por tectónica debido a su joven edad (Pleistoceno).

Localmente, los sedimentos entre los pozos P₀, P₁ y P₂ están compuestos por areniscas y lutitas que se depositan en ambientes fluviales y aluvionales. Especificando, los sedimentos se depositaron en el ambiente fluvial, tienden a depositarse en subambientes de canales de los ríos secundarios, con patrones dendríticos, y los sedimentos que se depositan en ambientes aluvionales, lo hacen en los valles que forman los ríos principales, con patrones meandriformes que drenan la zona.

La permeabilidad en la zona es de media a alta, donde las aguas subterráneas se mueven a través de sedimentos granulares, en este caso de rellenos del Pleistoceno (terrazas aluvionales), del Período Cuaternario/Época Pleistoceno/Formación Mesa (Qpm). De acuerdo a la clasificación de permeabilidades, el acuífero de la zona de estudio en el Campo Bare, se puede clasificar como un acuífero de alto rendimiento.

En el modelo de flujo de aguas subterráneas desde la vista en planta (X, Y), las direcciones de flujo subterráneo se analizan con patrón radial, producido por el bombeo artificial del agua desde el pozo de control, y observada desde los pozos P₁ y P₂.

Las velocidades del flujo subterráneo dentro del acuífero aumentan a medida que se acercan al pozo de bombeo activo P₀. A medida que la velocidad aumenta, mayor será el gradiente hidráulico porque aumenta la fricción existente entre el fluido y las partículas sólidas en contacto

Aunque el cono de depresión no pudo ser visualizado por el poco tiempo de tres días al que se sometió la recarga del acuífero en el modelo, se puede reflejar el crecimiento del gradiente hidráulico por el aumento de la profundidad de las superficies equipotenciales identificadas con los colores rojo oscuro, rojo, amarillo, verde claro, verde, verde azulado, azul y azul oscuro, desde una profundidad de -5 m hasta mayores de -45 m.

El flujo se produjo perpendicularmente a las superficies equipotenciales buscando el máximo gradiente.

La velocidad máxima del flujo de las aguas subterráneas entre los pozos P₀, P₁ y P₂, es de $1,8 \times 10^{-6}$ m/d, para un período de tres días.

Los valores del nivel freático calculado de los pozos más cercanos entre sí (P₀ y P₁), entran en el intervalo confidencial demarcado entre las rectas rojas punteadas; es decir, los valores del nivel freático calculados por el programa son confiables.

El modelo presenta un error estimado estándar de 4,42 m de diferencia con respecto al valor observado, por lo que el nivel freático calculado por el programa se ajusta en un 87,40 % al nivel freático observado real, de 35,26 m, lo que quiere decir que tanto el valor calculado del nivel freático como el modelo realizado en la plataforma de Visual Modflow 4.2 Pro[®], son aceptables.

5.2- RECOMENDACIONES

Para una mejor comprensión del cambio del gradiente hidráulico que sufre el nivel de agua en la zona de captación del pozo de bombeo activo “P₀”, en el modelo de flujo de aguas subterráneas del acuífero en un Sector del Campo Bare, Estado Anzoátegui, generado a través de la plataforma de Visual Modflow 4.2 Pro[®], se recomienda aumentar el tiempo de recarga del acuífero, lo cual ocasionará mayor probabilidad de que se logre modelar el cono de depresión en la zona de captación del pozo de control y de bombeo activo P₀, desde los pozos de observación P₁ y P₂.

Contando con suficientes datos de pozos perforados en el acuífero de la zona de estudio y sus propiedades hidráulicas, como lo son las permeabilidades en dichos pozos, también se recomienda realizar un mapa en el que se muestre la distribución de permeabilidades de la zona de estudio, y en base a ésta distribución será posible identificar las zonas de recarga y descarga. Todo lo cual, se deberá hacer sobre la base de la información local que aporta el mapa topográfico Atapirire I-SO, escala 1:25.000, de Cartografía Nacional, en cuanto a coordenadas y curvas de nivel de la zona de estudio se refiere.

Por otra parte, si se llegara a contar con suficientes datos de pozos perforados en el acuífero en estudio, en los que se mostraran las características litológicas y la profundidad de los estratos, se lograría producir un mapa del subsuelo de la zona de estudio a escala local, sobre la base de las coordenadas del mapa topográfico Atapirire I-SO, escala 1:25.000, de Cartografía Nacional, en el cual se podrá graficar y delimitar las areniscas que funcionan de reservorios del agua subterránea dentro del acuífero, así como las rocas sellos (lutitas) del presente estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albrizzio, C., (Sin fecha). Fundamentos de la Interpretación de Imágenes Geociencias. UCV, Caracas. p. 5
- Alezones, R., (2003). Introducción a la Geología de Campo (Conceptos Básicos). UCV, Caracas, p. 47.
- Angelone, S., (2006). Geología y Geotecnia-Permeabilidad de Suelos. Universidad Nacional de Rosario. (Página en Línea). Disponible en: <http://fiselect2.fceia.unr.edu.ar/geologiygeotecnia/Permeabilidad%20en%20Suelos.pdf>
- Baptista, P., Hernández, R. y Fernández-Collado, C., (2006). Metodología de la Investigación. 4ta Edición. Ed. Mc Graw-Hill. México D.F.
- Bear, J., (1972). Dinámica de fluidos en medios porosos. Ed. Elsevier. Nueva York, EEUU. p. 755.
- Castany, G., (1971). Tratado Práctico de las Aguas Subterráneas. Ed. Omega. Barcelo, España. p. 347-348.
- Coplanarh, (1974). Estudio Geomorfológico de los Llanos Occidentales. Ministerio de Agricultura y Cría, Caracas, p. 41.
- Creole Petroleum Corporation, (1961). Mapa F-10, Geología de Superficie, Escala 1:100.000. Departamento de Geología. Caracas.
- Creole Petroleum Corporation, (1961). Mapa G-10, Geología de Superficie, Escala 1:100.000. Departamento de Geología. Caracas.
- Cuevas, M., (2008). Proyecto Pilote de Combustión en Sitio a Larga Distancia (CESLD). (Página en Línea). Disponible en: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cacher:rJxoLcabM_wJ:yacimientos-de-gas.blogspot.com/2008/02/proyecto-piloto-de-combustin-ensitio.html.
- Chacín, E., (2001). Estratos Conglomeráticos de la Formación Mesa. (Página en línea). Disponible en: <http://www.pdvsa.com/lexico/image/m40-2.gif>.

- Díaz, A., (2005). Guía de Hidrogeología, Temas N° 1,2,3 y 5.UCV, Caracas.
- Dirección de Cartografía Nacional, (1991). Índice de Vuelos Aerofotográficos Por Entidades Federales (1975-1990) Edo. Anzoátegui, Misión 0401101. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Caracas, p. 101.
- Donado, L., (1999). Hidráulica de Pozos. Universidad Nacional de Colombia. Santafé de Bogotá. (Página en línea): http://www.docentes.unal.edu.com/lddonadog/Presentations/Donado_1999b.
- Flores, J., (2006). Estudio geoquímico de los acuíferos medio y profundo de las Formación Las Piedras en la región de Jusepín-El Furrial, estado Monagas. Tesis de grado, Universidad Central de Venezuela, p. 113
- Freeze & Cherry, (1979). Groundwater. Prentice Hall, Inc.
- Geocin, (1973). Estudio Preliminar de las exploraciones hidrogeológicas region Mesa de Guanipa, estado Anzoátegui. MMH, Dirección de Geología, División de Hidrogeología, 52 p.
- González de Juana, C., (1946). Estudio sobre aguas subterráneas en los Llanos de Venezuela. *Rev. de Fomento* 8(64): 9-59.
- González, C., Iturralde, J., y Picard,X., (1980). Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas. Tomo II. Ed. Foninves, Caracas.
- Griem, W., y Griem, S., (2008), Apuntes de Geología. Introducción, Geología Regional. (Página en línea). Disponible en: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:F0MuM_wRp8cJ:www.geovirtual.cl
- Hedberg & Pyre., (1944). Stratigraphy of Northeastern Anzoátegui, Venezuela. American Association of Petroleum Geologist Bulletin 20.
- LNH, (2009). Levantamiento de línea de base hidrogeológica en el área del Proyecto CESLD. Caracas.
- LNH, (2011). Levantamiento de línea de base hidrogeológica en el área del Proyecto CESLD. Caracas.
- Macsoyay, (2001). Vista de afloramientos de los clásticos característicos de la Formación Mesa en la carretera hacia la población de Urica, Distrito Freites, estado Anzoátegui. (Página en línea) .Disponible en: <http://www.pdvsa.com/lexico/image/m40-1.gif>

- Méndez, O., (Sin Fecha). Métodos de Subsuelo. Capítulo 4: Fotografías Aéreas y Sensores Remotos. UCV, Caracas, p. 35.
- Ministerio de Minas e Hidrocarburos, (1970). Léxico Estratigráfico de Venezuela. Boletín de Geología. Publicación Especial N° 4. Dirección de Geología.
- Ministerio de Minas e Hidrocarburos, (1971). Mapa Hidrogeológico de Venezuela. Dirección de Geología, División de Hidrogeología. Caracas.
- Ministerio de Minas e Hidrocarburos, (1978). Estudio Preliminar de Ampliación de la Región de Explotación de Aguas Subterráneas, Mesa de Guanipa. Dirección de Geología, División de Hidrogeología. Caracas.
- Ministerio de Minas e Hidrocarburos, (1978). Modelo Matemático Preliminar de las Posibilidades de Explotación de Aguas Subterráneas, Región Mesa de Guanipa. Dirección de Geología, División de Hidrogeología. Caracas.
- Ministerio de Minas e Hidrocarburos, (1980). Modelo Matemático Avanzado de Aguas Subterráneas-Región Mesa de Guanipa. Dirección de Geología, División de Hidrogeología. Caracas, p. 39.
- Mikaty, M., (2009). Instructivo para la Presentación de Tesis de Pregrado, postgrado, Doctorado y Trabajo de Ascenso. Subcomisión de Bibliotecas para la Normalización de la Presentación de Trabajos Especiales de Grado y Subcomisión de Depósito Legal de la Comisión de Bibliotecas de la Facultad de Ingeniería UCV, Caracas.
- Mosquera, L., & Parravano, V., (2005). Evaluación de la Disponibilidad del Recurso Agua Subterránea en el Acuífero de la Mesa de Guanipa, Estado Anzoátegui. Universidad de los Andes, Mérida.
- Rockware, Inc., (2011). Sobre el modelo de interfaz de Visual Modflow 4.2 Pro. (Página en línea). Disponible en: <http://translate.google.com/translate?hl=es&sl=en&u=http://www.rockware.com/product/newFeaturesContent.php>
- Royo, J & Gómez., (1956). Léxico Estratigráfico de Venezuela. Ministerio de Minas e Hidrocarburos. Dirección de Geología. Editorial Sucre, Caracas.
- Sánchez, J., (2010). Hidráulica Subterránea (Principios Básicos). Dpto. de Geología, Universidad de Salamanca, España. (Página en línea). Disponible en: <http://web.usal.es/javisan/hidro>.

Stanley, D., (1971). Hidrogeología. 2da Edición. Ed. Ariel. Barcelona, España.

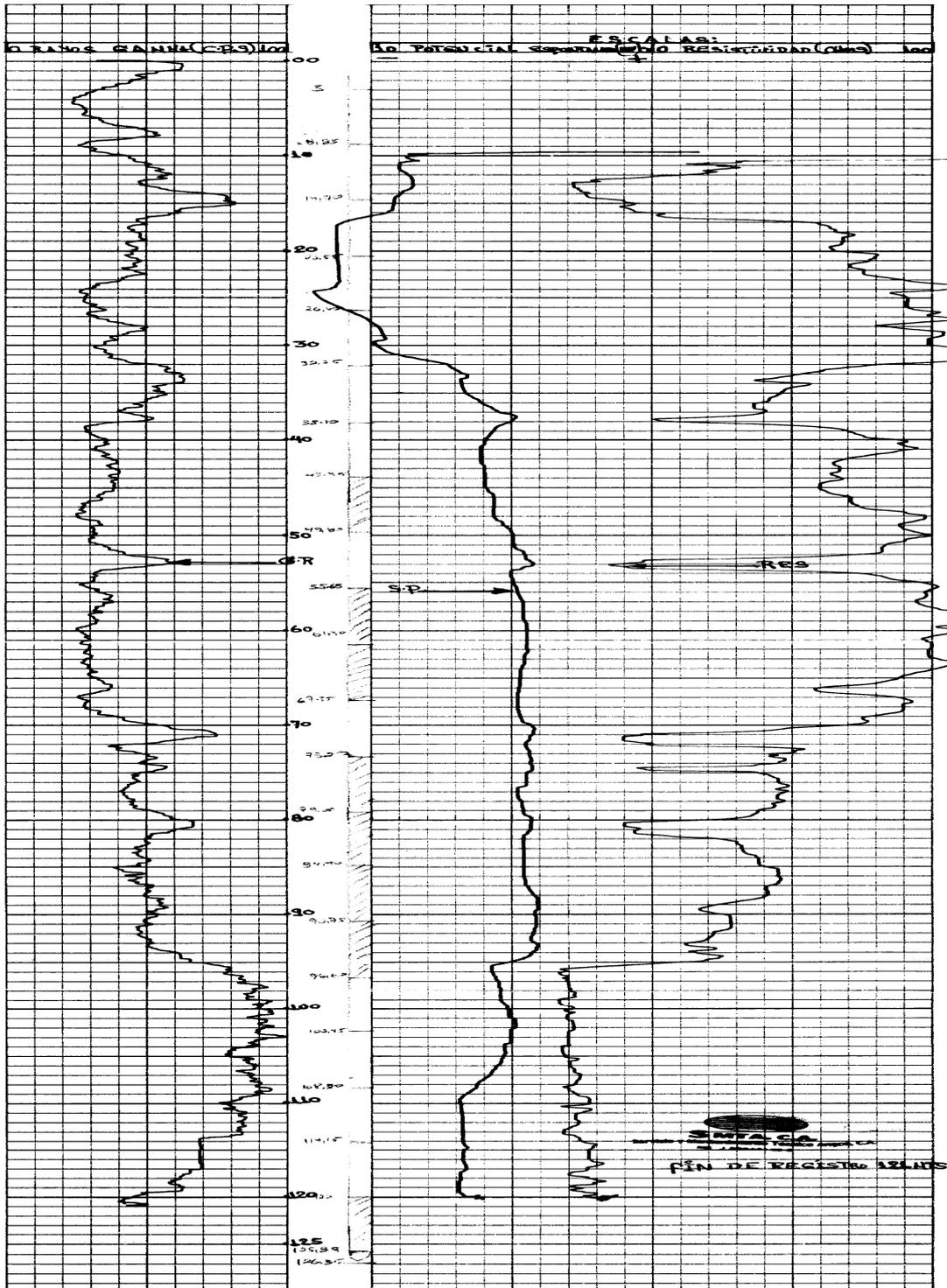
United States Geological Survey, (2004). Un pozo artesiano. (Página en línea).
Disponible en: <http://water.usgs.gov/gotita/gwartesian.html>.

Zinck, A & Urriola, P., (1970). Origen y Evolución de la Formación Mesa. Un Enfoque Edafológico. Ministerio de Obras Públicas. Barcelona, Venezuela. p. 70.

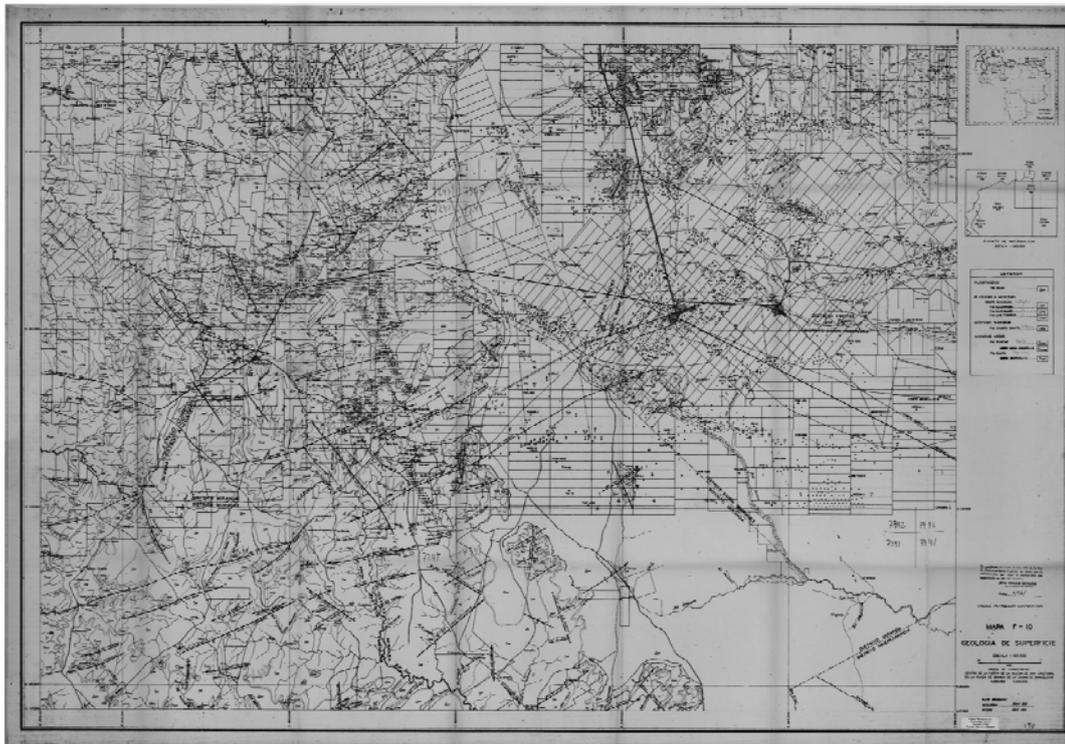
ANEXOS



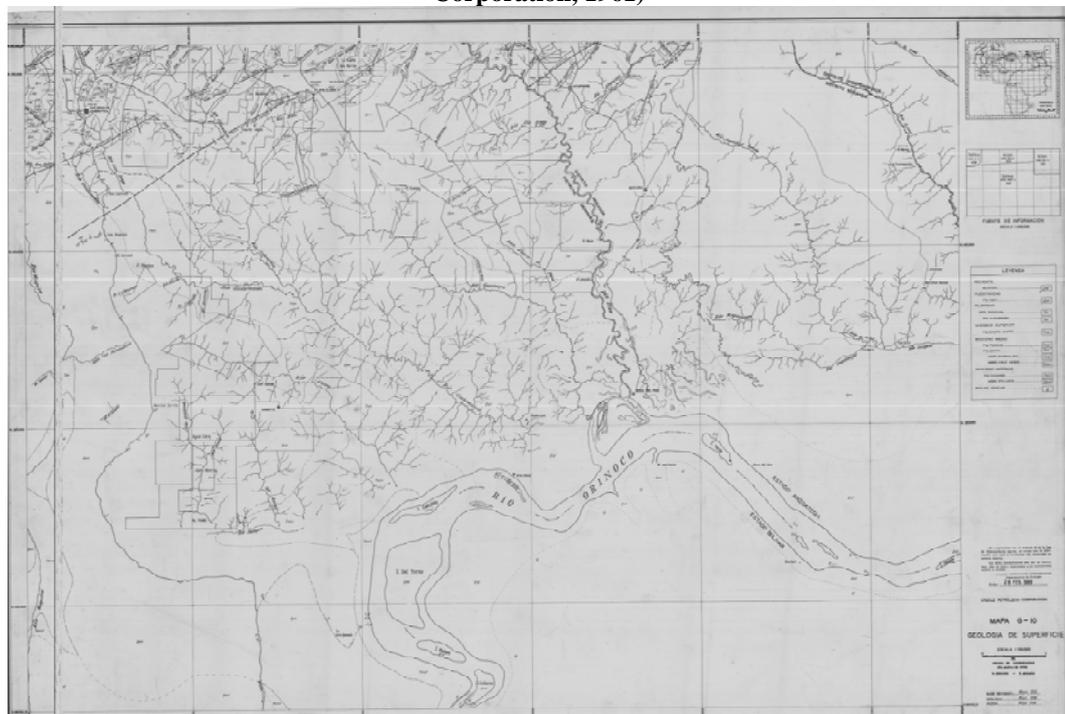
Anexo N°1. Vista de los afloramientos de los clásticos característicos de la Formación Mesa en la carretera hacia la población de Urica, distrito Freites, estado Anzoátegui. (Macsoy, 2001)



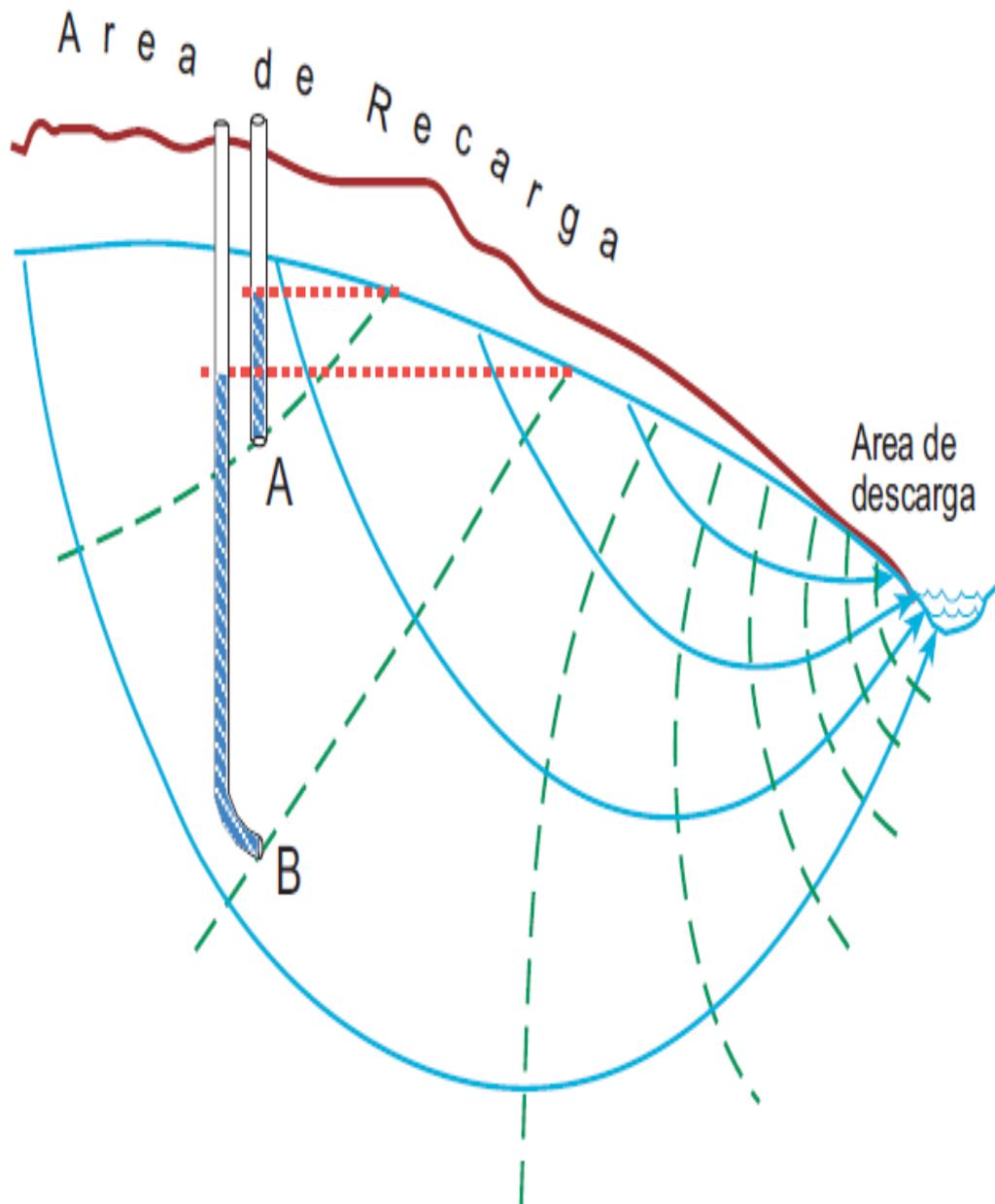
Anexo N°2. Ejemplo de registro del Pozo P₀. Tomado y modificado de (LNH,2009)



Anexo N°3. Mapa Geológico que muestra al sureste la zona de estudio. (Creole Petroleum Corporation, 1961)



Anexo N°4. Mapa Geológico que muestra al noreste la zona de estudio. Tomado y modificado de (Creole Petroleum Corporation, 1961)



Anexo N° 5. Ejemplo de superficies equipotenciales y perforaciones de pozos en áreas de recarga, áreas de descarga del flujo subterráneo debajo de una ladera, suponiendo que la permeabilidad del medio es isotrópica y homogénea. Tomado y modificado de (Sánchez, 2010)

GLOSARIO

Abatimiento: Se define como el descenso de la superficie freática dentro de un acuífero.

Aluvión: Sedimento de origen fluvial, de granulometría relacionada con el caudal y compuesta de cantos, grava y arena en depósitos frecuentemente lenticulares; la fracción fina está constituida de limos y arcillas, arenas, gravas, bloques, transportados y sedimentados por corrientes fluviales.

Anisótropo: Es una característica que se atribuye a un sistema material para el cual las propiedades físicas dependen a menudo de la dirección. Como ejemplo están los sólidos monocristalinos, para los cuales las propiedades físicas dependen a menudo de la dirección.

Arenisca: Roca sedimentaria detrítica compuesta de un 85% en promedio de granos de cuarzo relativamente redondeados, de 1/16 mm a 2 mm. Constituyen rocas comunes en la mayoría de las secuencias sedimentarias y se presentan tanto en capas como en lentejones. El color es variable, gris claro, blanco, diversamente coloreadas en la mayoría de los casos, según la naturaleza del cemento, rojo (óxido de hierro), verde (glauconita). Las variedades se distinguen por el tamaño de grano, matriz, minerales y otros constituyentes.

Cauce: Lecho de los ríos o arroyos o de cualquier otra corriente del agua que funciona como un canal para conducir el agua por las tierras.

Caudal (Q): Cantidad de agua que pasa por un punto determinado de una corriente, dependiente de su volumen y velocidad, y expresada en metros cúbicos por segundos.

Cobertura vegetal arbórea: Se corresponde a plantas leñosas que se ramifican a mayor altura.

Cobertura vegetal arbustiva: Se corresponde a plantas leñosas que comienzan a ramificarse cerca del suelo y son de baja altura.

Cobertura vegetal herbácea: Se corresponde a plantas de la formación vegetal herbácea, hierbas o pequeñas plantas que carecen de tallos leñosos.

Combustión: Es un conjunto de reacciones de oxidación con desprendimiento de calor, que se producen entre dos elementos: el combustible que puede ser un sólido (Carbón, Madera, etc.), y un líquido (Gasóleo, Fuel-Oil, etc.) o un gas (Natural, Propano, etc.), con la presencia del comburente que es el Oxígeno. Se distingue de otros procesos de oxidación lenta, por ser un proceso de oxidación rápida y con presencia de llama; a su vez también se diferencia de otros procesos de oxidación muy rápida (detonaciones, deflagraciones y explosiones) por obtenerse el mantenimiento de una llama estable.

Concordancia: Relación geométrica entre dos unidades estratigráficas superpuestas en las que existe paralelismo entre los materiales infra y suprayacentes.

Cota: Es la altitud asociada a un punto. Habitualmente un mapa de elevaciones está formado por curvas de nivel o isohipsas y por puntos acotados. El origen se hace con referencia, casi obligatorio, al nivel del mar.

Correlación: Establecimiento de correspondencia en carácter y posición estratigráfica entre dos unidades geológicas.

Cuenca: Porción de territorio drenada por un único sistema de drenaje natural. Una cuenca hidrográfica se define por la sección del río al cual se hace referencia y es delimitada por la línea de las cumbres, también llamada «divisoria de

aguas» hidrológicas. Término geológico que se refiere a zonas deprimidas, hundidas, donde se producen procesos de sedimentación.

Densidad del Drenaje: O textura del relieve del terreno en cuanto a jerarquía y ramificación se refiere, y se calcula como la relación de la sumatoria de la longitud de los cursos, a la superficie de la cuenca; $d=I/A$, donde “d” es la densidad del drenaje, “I” es la sumatoria de la longitud de los cursos y “A” es la superficie de la cuenca.

Drenaje: Es la forma en que el terreno dispone de sus aguas, es el segundo indicador más confiable de las condiciones del terreno en la fotointerpretación y se caracteriza por su configuración y densidad.

Estratigrafía: Parte de la geología que trata de la descripción de los estratos que forman la corteza terrestre y su organización en unidades distintivas, útiles, reconocibles, sobre la base de sus propiedades o atributos inherentes.

Falla: Es la deformación de las rocas o de los estratos en su continuidad. La discontinuidad se manifiesta por la aparición de un plano de fractura que separa dos bloques entre los cuales se produce un salto. Son roturas en las rocas a lo largo de la cual han tenido lugar movimientos. Este movimiento se llama desplazamiento. Origen de estos movimientos son fuerzas tectónicas en la corteza terrestre, las cuales provocan las roturas en la litosfera.

Falla normal: Clasificación de los planos de falla si el desplazamiento es según el buzamiento, cuando el bloque de techo baja con respecto al bloque de piso.

Formación: Unidad litoestratigráfica formal fundamental de rango intermedio, que se encuentra constituida por estratos de miembros de rocas sedimentarias, complejo ígneo intrusiva o extrusivas, o asociación de rocas

metamórficas.

Geología: Ciencia que trata de la forma exterior e interior del globo terrestre; de la naturaleza de las materias que lo componen y de su formación; de los cambios o alteraciones que éstas han experimentado desde su origen, y de la colocación que tienen en su actual estado.

Geomorfología: Interpretación científica del origen y desarrollo del relieve de la corteza terrestre; desarrollo moderno de la fisiografía.

Hidrogeología: Es la parte de la geología que estudia las aguas subterráneas. La hidrogeología es la ciencia que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, las formas de yacimiento, su difusión, movimiento, régimen y reservas, su interacción con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas); así como las condiciones que determinan las medidas de su aprovechamiento, regulación y evacuación.

Holoceno: Se aplica al superior del Cuaternario, era que se extiende desde el Pleistoceno hasta el presente.

Homogéneo: Medio que posee iguales características o formado por elementos iguales.

Imágenes orbitales multispectrales: Se compone de cuatro imágenes que abarcan respectivamente segmentos de emulsión: azul, verde, rojo e infrarrojo del espectro electromagnético. Se toman desde satélites como el Landsat y su cobertura sintética de 180 kilómetros x 180 kilómetros, que cubren grandes áreas de la superficie terrestre, las hace especialmente útiles para captar las relaciones regionales por lo que no están diseñadas para mostrar detalles.

Infiltración: Es el proceso mediante el cual el agua penetra desde la superficie del terreno hacia el subsuelo. La percolación es el movimiento del agua a través después de la entrada. Muchos factores influyen en la tasa de infiltración, incluyendo la condición de la superficie del suelo y su cubierta vegetal, las propiedades del suelo, tales como la porosidad y la conductividad hidráulica, y el contenido de humedad presente en el mismo, así como también la duración de la lluvia y del patrón de drenaje en la cuenca.

Isótropo: Es una característica que se atribuye a un sistema material cuando presenta las mismas propiedades físicas en todas las direcciones, en el sentido de que si se miden magnitudes como conductividad hidráulica, permeabilidad, dilatación, conductibilidad eléctrica, entre otras, no dependen de la dirección. Son isótropos, por ejemplo, todos los gases, los líquidos y los sólidos policristalinos, mientras no respeten la dirección.

Landsat: Satélite que barre la superficie terrestre con fotografías en forma sistemática en una órbita casi polar a 960 kms, efectúa catorce órbitas diarias, observa el globo terráqueo completo cada 18 días y cada fotografía cubre una extensión de 180 kms por 180 kms, con una resolución de 80 mts. Se encuentra a una altura de 705 kms, y está dotado de una cámara exploradora multiespectral que toma cuatro tipos de fotografías en luz visible, radar, ultravioleta e infrarroja, y de un sistema Vidicon de 3 cámaras con haz de retorno (RBV).

Lutita: Roca sedimentaria detrítica cuyos componentes tienen diámetros inferiores a 1/16 mm (arcillas).

Meandro: Cada una de las curvas que presenta un río a lo largo de su recorrido, en el que la acción geológica del río es muy diferente según se trate de la cara cóncava o la cara convexa.

Nivel estático: Es el nivel de agua presente en la formación acuífera antes de comenzar el bombeo, el cual se ve afectado por efectos meteorológicos (precipitación, infiltración) estacionales o por cargas adicionales (edificaciones), o por la descarga producida por pozos cercanos.

Patrón de drenaje dendrítico: Diseño que tiene la apariencia de las nervaduras de una hoja, con los ríos secundarios distribuidos y espaciados con densidad uniforme, que se unen al curso principal en ángulo agudo. Casi siempre se desarrolla libremente sin control estructural, sobre terreno homogéneo de rocas sedimentarias horizontales, ígneas masivas o metamórficas plegadas y complejas.

Patrón de drenaje radial: Disposición de los ríos que divergen de un centro elevado, de extensión limitada, tiene la apariencia de una red con radios.

Perfil litológico: Representa gráficamente la estratigrafía generalizada de un sector. Los estratos más antiguos en la base y arriba en el tope los estratos más jóvenes.

Potencial espontáneo: Las variaciones de las diferencias de potencial entre dos electrodos (uno en movimiento dentro del pozo, el otro fijo en superficie) están relacionados con el intercambio de iones entre el lodo y el agua de la formación, los cuales tienen diferentes concentraciones iónicas.

Pozo: Excavación o perforación en el terreno que alcanza a las aguas subterráneas. Las perforaciones se designan comúnmente como sondeo.

Pozos perforados: Son aquellos cuya perforación con la barrena ha sido concluida y cuentan con tubería de revestimiento ya cementada, pero que todavía no han sido sometidos a las operaciones subsecuentes que permiten la producción de agua o hidrocarburos.

Porosidad: Es una propiedad de las rocas y suelos de contener espacios vacíos y se expresa por la relación del volumen de poros al volumen total de la roca, en porcentaje.

Precipitación: Ocurre cuando se eleva una masa de vapor de agua en la atmósfera, de tal forma que se enfría parte de la humedad condensada generándose una humedad atmosférica la cual cae en la superficie terrestre, principalmente en estado líquido (llovizna, lluvia) o en estado sólido (escarcha, nieve, granizo).

Recarga: es la entrada neta de agua en el terreno (infiltración menos evaporación menos escorrentía subsuperficial) que se transmite hasta los acuíferos. Se mide como una tasa (altura/tiempo) o un caudal.

Relieve: Conjunto de formas complejas que accidentan la superficie de la Tierra, y se explica por la existencia de la gran masa rocosa de la superficie del globo y por las dislocaciones y deformaciones que sufre dicha masa bajo la acción de las fuerzas naturales como los hundimientos tectónicos, fallas y agentes erosivos.

Resistividad: La resistencia de punto simple, es una medición que pasa corriente alterna entre un electrodo en superficie o lodo conductor y una sonda electrodo. La sonda electrodo está ubicada justo debajo de la punta de la sonda y debe ser la única pieza de metal expuesta durante el proceso de registro. La electrónica de superficie rectifica la corriente alterna entre estos dos electrodos y utilizando la ley de Ohm en el sistema para calcular la resistencia entre ellos. La medición SPR es la suma de la resistencia del cable, y la resistencia basada en la composición del medio, el área transversal y la longitud de la ruta a través del medio. Por lo tanto el registro de punto simple de resistencia no es cuantitativo.

Rocas sedimentarias: Formación que resulta de la acumulación de fragmentos minerales, conchas y sedimentos, así como por precipitación química.

Sistema de Meandros: Conjunto de ríos meandriiformes de canal sencillo, alta sinuosidad, baja relación ancho/ profundidad, y con presencia de canales abandonados.

Zona de captura: Es el área de captación de un pozo de bombeo, es decir, es aquella parte del medio en la que si una partícula se encuentra allí inicialmente, acabará llegando al pozo en un tiempo finito.