

***EVALUACION DE LA FACTIBILIDAD DE USO DE AGUAS SUBTERRANEAS  
PARA EL ACUEDUCTO BOLIVARIANO. ESTADO FALCON.***

Por  
Rosibeth Karina Toro Mora

**Trabajo Especial de Grado para optar por el grado de Especialista en Gestión de Sistemas de  
Abastecimiento, Recolección y Tratamiento de Agua.**

Bdigital.ula.ve

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
VICE- RECTORADO ACADEMICO  
CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO E INVESTIGACIÓN  
AMBIENTAL Y TERRITORIAL

Mérida, Julio 2014.

C.C.Reconocimiento

## DEDICATORIA

*A mi hija Valentina,  
por hacer de mi vida un mundo lleno de colores y sonrisas.*

C.C.Reconocimiento

## AGRADECIMIENTOS

*A Dios Todopoderoso por ser mi guía y permitirme vivir otro triunfo.*

*A mi querida madre por brindarme el apoyo que necesitaba y estar siempre presente en cada uno de mis logros.*

*A mi tutor Hervé Jégat por ser además de un profesor excelente, un amigo que siempre estuvo para ayudarme en todo, dándome ánimo para realizar nuevas investigaciones, enriqueciendo mis conocimientos en hidrogeología y sobre la vida. Mil gracias profe.*

*A los profesores Luis Mora y Omar Guerrero quienes siempre me han brindado su amistad, sus consejos y su apoyo para lograr este nuevo éxito.*

*La Universidad de Los Andes y en especial al Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT) por ser instituciones impulsadoras de talentos.*

*Al personal que labora en la institución del CIDIAT, quienes con su excelente emotividad me brindaron el apoyo para la culminación de esta meta.*

*A mis amigos Emilio, Ricardina, Marisela, Ana, Norely y Nelso que me ofrecieron toda la ayuda necesaria durante la carrera, gracias amigos.*

*A todas aquellas personas que de alguna manera estuvieron involucradas con mi trabajo.*

*A todos, Gracias.*

## INDICE

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| <b>AGRADECIMIENTOS</b> .....   | ii          |
| <b>INDICE</b> .....  | iii         |
| <b>LISTA DE TABLAS</b> .....   | vi          |
| <b>LISTA DE FIGURAS</b> .....  | vii         |
| <b>LISTA DE ECUACIONES</b> .....   | ix          |
| <b>RESUMEN</b> .....   | x           |
| <b>INTRODUCCIÓN</b> .....  | xi          |
| <b>CAPITULO 1</b> .....  | 2           |
| <b>GENERALIDADES</b> .....   | 2           |
| 1.1. Formulación del Problema .....  | 2           |
| 1.2. Objetivos .....   | 2           |
| 1.2.1. Objetivo General .....  | 2           |
| 1.2.2. Objetivos Específicos .....   | 3           |
| 1.3. Justificación del Estudio .....   | 3           |
| 1.4. Alcances .....  | 3           |
| 1.5. Limitaciones .....  | 3           |
| <b>CAPITULO 2</b> .....  | 4           |
| <b>MARCO TEÓRICO</b> .....   | 4           |
| 2.1. Antecedentes .....  | 4           |
| 2.2. Bases Teóricas .....  | 5           |
| 2.2.1. Hidrogeología .....   | 5           |
| 2.2.2. Ciclo Hidrológico .....   | 5           |
| 2.2.3. Aguas Subterráneas .....  | 6           |
| 2.2.4. División de las formaciones geológicas según su comportamiento hidrológico. ....          | 6           |
| 2.2.5. Clasificación de los Acuíferos según las circunstancias hidráulicas y estructurales. .... | 7           |
| 2.2.6. Clasificación de los Acuíferos según la Textura de los Materiales que lo Conforman .....  | 7           |
| 2.2.7. Recarga de Acuíferos .....  | 8           |
| 2.2.8. Descarga de Acuíferos .....   | 8           |
| 2.2.9. Características Hidrogeológicas del Acuífero .....  | 8           |
| 2.2.10. Modelos .....  | 9           |
| 2.2.11. Modelo de Simulación de Acuíferos .....  | 10          |
| 2.2.12. Modelo Hidrogeológico Conceptual .....   | 10          |

|  |    |
|--|----|
| 2.2.13. Modelos Hidrogeológicos Matemáticos: .....           | 10 |
| 2.2.14. Proceso de modelación. ....                          | 11 |
| 2.2.15. Uso del programa visual Modflow 4.1.....             | 11 |
| <b>CAPITULO 3</b> .....                                      | 18 |
| <b>MARCO REFERENCIAL</b> .....                               | 18 |
| 3.1. Ubicación del área de estudio .....                     | 18 |
| 3.2. Características físico- geográficas del área.....       | 19 |
| 3.2.1. Clima .....   | 19 |
| 3.2.2. Relieve .....   | 19 |
| 3.2.3. Vegetación .....                                      | 19 |
| 3.2.4. Hidrografía.....                                      | 19 |
| 3.2.5. Aguas Subterráneas .....                              | 21 |
| 3.2.6. Suelos.....   | 22 |
| 3.2.7. Geomorfología .....                                   | 23 |
| 3.3. Geología .....  | 23 |
| 3.3.1 Evolución de la Cuenca de Falcón .....                 | 23 |
| 3.3.2 Geología estructural de la Cuenca de Falcón .....      | 24 |
| 3.3.3 Estratigrafía regional .....                           | 25 |
| 3.3.4 Geología estructural local .....                       | 32 |
| <b>CAPITULO 4</b> .....                                      | 34 |
| <b>METODOLOGIA</b> .....                                     | 34 |
| 4.1. Etapa I. Recopilación de Información Básica .....       | 35 |
| 4.1.1. Información geológica .....                           | 35 |
| 4.1.2. Información hidrogeológica .....                      | 35 |
| 4.1.3. Fase de Campo .....                                   | 35 |
| 4.2. Etapa II. Procesamiento de la información .....         | 36 |
| 4.2.1. Elaboración del Modelo 3D del Terreno.....            | 36 |
| 4.2.3. Ubicación y selección de los pozos .....              | 36 |
| 4.2.4. Correlación de las secciones estratigráficas .....    | 36 |
| 4.2.5. Elaboración del Modelo Hidrogeológico Conceptual..... | 37 |
| 4.2.6. Generación del Modelo Matemático.....                 | 37 |
| 4.3. Etapa III. Calculo de Reservas .....                    | 37 |
| 4.3.1. Calculo de las Reservas Permanentes Permeables .....  | 37 |
| 4.3.2. Calculo de la Recarga Natural.....                    | 37 |

|   |    |
|---|----|
| 4.4. Etapa IV. Políticas de Explotación.....                                | 37 |
| 4.5. Conclusiones y Recomendaciones .....                                   | 37 |
| <b>CAPITULO 5</b> .....   | 38 |
| <b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....   | 38 |
| 5.1. Etapa I. Recopilación de Información Básica .....                      | 38 |
| 5.1.1. Levantamiento geológico.....   | 38 |
| 5.1.2. Pruebas de infiltración .....  | 47 |
| 5.1.2.1. Cálculos de infiltración .....                                     | 50 |
| 5.1.3. Inventario de pozos.....   | 52 |
| 5.2. Etapa II. Procesamiento de la Información.....                         | 58 |
| 5.2.1. Modelo 3D .....  | 58 |
| 5.2.2. Elaboración del Modelo Geológico .....                               | 59 |
| 5.2.3. Correlación de las secciones .....                                   | 60 |
| 5.2.4. Modelo Hidrogeológico Conceptual.....                                | 65 |
| 5.2.5. Visualización del modelo hidrogeológico en 3D con ModFlow 3.0 .....  | 68 |
| 5.3. Etapa 3. Calculo de Reservas.....                                      | 73 |
| 5.3.1. Reservas Permanentes Permeables .....                                | 73 |
| 5.3.2. Balance hídrico de la zona: .....                                    | 75 |
| 5.4. Etapa 4. Políticas de Explotación .....                                | 78 |
| 5.4.1. Establecimiento de políticas de explotación .....                    | 78 |
| 5.4.2. Propuesta de Nuevas Fuentes de Abastecimiento .....                  | 80 |
| 5.4.3. Evaluación de alternativas de extracción de aguas subterráneas ..... | 80 |
| <b>CAPITULO 6</b> .....   | 82 |
| <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....                                 | 82 |
| 6.1. Conclusiones .....   | 82 |
| 6.2. Recomendaciones.....   | 83 |
| <b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b> .....                                     | 84 |
| <b>REFERENCIAS ELECTRONICAS</b> .....                                       | 85 |
| <b>ANEXO</b> .....  | 86 |

## LISTA DE TABLAS

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Tabla 5.1. Resumen de ubicación de los afloramientos observados en campo .....       | 38          |
| Tabla 5.2. Ubicación de las pruebas de infiltración .....                            | 47          |
| Tabla 5.3. Prueba de infiltración.....   | 50          |
| Tabla 5.4. Infiltración acumulada.....   | 51          |
| Tabla 5.5. Información litológica de los pozos aguas abajo del embalse Matícora..... | 53          |
| Tabla 5.6. Porosidades totales y eficaces de diversos materiales .....               | 74          |
| Tabla 5.7. Volumen de las capas permeables .....                                     | 74          |
| Tabla 5.8. Estaciones de precipitación seleccionadas .....                           | 75          |

Bdigital.ula.ve

## LISTA DE FIGURAS

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Figura 2.1. Agua Subterránea.....  | 6           |
| Figura 2.2. Discretización de modelo en 3D.....  | 12          |
| Figura 2.3. Celdas en diferencias finitas.....   | 13          |
| Figura 3.1. Ubicación del área de estudio.....   | 18          |
| Figura 3.2. Mapa de relieve del municipio Mauroa, estado Falcón.....                             | 20          |
| Figura 3.3. Vegetación xerófila característica de la región.....                                 | 20          |
| Figura 3.4. Ubicación de los principales ríos en el área de estudio.....                         | 22          |
| Figura 3.5. Planicies características de la zona de estudio.....                                 | 23          |
| Figura 3.6. Tabla de correlación general para la Cuenca de Falcón.....                           | 26          |
| Figura 3.7. Mapa geológico de la cuenca del río Matícora.....                                    | 32          |
| Figura 3.8. Principales Bloques formados por las fallas presentes en el área.....                | 33          |
| Figura 4.1. Esquema metodológico para el desarrollo del estudio.....                             | 34          |
| Figura 5.1. Ubicación de los afloramientos observados en campo.....                              | 38          |
| Figura 5.2. Afloramiento de la Formación Isnotú. Estado Falcón.....                              | 39          |
| Figura 5.3. Evidencias de acanaladuras. Afloramiento de la Formación Urumaco. Estado Falcón..... | 39          |
| Figura 5.4. a) Alternancias de Lutitas y areniscas abigarradas de La Formación Isnotú.....       | 40          |
| b) Tubificación presente en material arcilloso.....  | 40          |
| Figura 5.5. Estructura de Disyunción en bola. Formación Isnotú.....                              | 40          |
| Figura 5.6. Lateritas presentes en La Formación Isnotú.....                                      | 41          |
| Figura 5.7. Afloramiento de la Formación Bariro. Estado Falcón.....                              | 41          |
| Figura 5.8. Afloramiento de la Formación Bariro. Estado Falcón.....                              | 42          |
| Figura 5.9. Afloramiento de la Formación Urumaco. Estado Falcón.....                             | 43          |
| Figura 5.10. Cristales de Yeso. Formación Urumaco. Estado Falcón.....                            | 43          |
| Figura 5.11. Tope de la Formación Urumaco. Estado Falcón.....                                    | 43          |
| Figura 5.12. Afloramiento de la Formación Bariro. Estado Falcón.....                             | 44          |
| Figura 5.13. Fallas de Venezuela.....  | 45          |
| Figura 5.14. Mapa geomorfológico de la zona de estudio.....                                      | 46          |
| Figura 5.15. Ubicación de las pruebas de infiltración.....                                       | 47          |
| Figura 5.16. Lugar adecuado para la instalación del infiltrómetro.....                           | 48          |
| Figura 5.17. Modo de instalación del infiltrómetro.....  | 48          |
| Figura 5.18. Infiltrómetro lleno de agua.....  | 49          |
| Figura 5.19. Mediciones del descenso del nivel de agua.....                                      | 49          |

|  |    |
|--|----|
| Figura 5.20. Información de pozos obtenida por el CIDIAT con la Herramienta <i>Access</i> .        | 53 |
| Figura 5.21. Ubicación de pozos en el área de estudio.   | 54 |
| Figura 5.22. Ubicación de los pozos en el área de estudio.   | 55 |
| Figura 5.23. a) Representación de la litología de los pozos encontrados.                           | 56 |
| Figura 5.23. b) Representación de la litología de los pozos encontrados.                           | 57 |
| Figura 5.24. Modelo 3D del área de estudio.  | 58 |
| Figura 5.25. Modelo Geológico del área de estudio.   | 59 |
| Figura 5.26. Ubicación de los pozos con litología.   | 60 |
| Figura 5.27. Ubicación de la sección litológica n°1  | 61 |
| Figura 5.28. Sección estratigráfica n°1 del área de estudio  | 62 |
| Figura 5.29. Ubicación de la sección litológica n°2.   | 63 |
| Figura 5.30. Sección estratigráfica n° 2 del área de estudio.                                      | 63 |
| Figura 5.31. Ubicación de la sección litológica n°3.   | 64 |
| Figura 5.32. Sección estratigráfica n° 3 del área de estudio.                                      | 65 |
| Figura 5.33. Ventana de diálogo para la corrección de la intersección de capas                     | 66 |
| Figura 5.34. Designación de colores en función de la permeabilidad de las capas                    | 66 |
| Figura 5.35. Modelo Hidrogeológico Conceptual del área de estudio                                  | 67 |
| Figura 5.36. Establecimiento de las Propiedades del Modelo   | 68 |
| Figura 5.37. Visualización del reticulado con el mapa base.  | 70 |
| Figura 5.38. Visualización del reticulado con el mapa base y celdas inactivas del área de interés. | 70 |
| Figura 5.39. Sección transversal original que no ilustra la conductividad de las capas             | 71 |
| Figura 5.40. Sección transversal original que muestra la conductividad de las capas                | 71 |
| Figura 5.41. Secciones del modelo de acuífero realizado en ModFlow 3.0 en dirección SE - NO        | 72 |
| Figura 5.42. Visualización del modelo en 3D en Modflow   | 72 |
| Figura 5.43. Ventana para el cálculo del volumen total de roca.                                    | 73 |
| Figura 5.44. Mapa base de la cuenca del Embalse Matícora. Escala 1:100.000.                        | 76 |
| Figura 5.45. Subcuencas para la calibración.   | 76 |
| Figura 5.46. Polígonos de Thiessen   | 77 |
| Figura 5.47. Salidas de la calibración.  | 77 |
| Figura 5.48. Simulación del acuífero en condiciones actuales durante un periodo de 10 años.        | 78 |
| Figura 5.49. Simulación para el caso extracción igual a la recarga durante un período de 10 años.  | 79 |
| Figura 5.50. Simulación para extracción mayor a la recarga.  | 79 |
| Figura 5.51. Ubicación espacial de los sitios de aprovechamiento señalado en verde.                | 81 |

## LISTA DE ECUACIONES

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| Ecuación 1. Balance Hidrico .....                                   | 9           |
| Ecuación 2. Diferencias finitas.....                                | 12          |
| Ecuación 3. Conductancia hidraulica.....                            | 14          |
| Ecuación 4. Ecuacion de flujo.....                                  | 14          |
| Ecuación 5. Ecuacion de flujo convinado .....                       | 14          |
| Ecuación 6. Ecuacion de externo.....                                | 15          |
| Ecuación 7. Infiltracion.....                                       | 50          |
| Ecuación 8. Velocidad de Infiltracion.....                          | 50          |
| Ecuación 9. Coeficiente. Velocidad de Infiltracion .....            | 51          |
| Ecuación 10. Exponente adimensional. Velocidad de Infiltracion..... | 51          |
| Ecuación 11. Infiltracion basica .....                              | 51          |
| Ecuación 12. Tiempo basico de infiltracion.....                     | 51          |
| Ecuación 13. Volumen de Reservas Permanentes Permeables.....        | 73          |

Bdigital.ula.ve

## RESUMEN

El Acueducto Bolivariano en el estado Falcón, constituye una de las obras prioritarias que, en materia de abastecimiento de agua, desarrolla el estado venezolano. El mismo consiste en extraer 2.500 l/s del Embalse Matícora, y conducirlos, a través de una aducción de 180 Km. de longitud para incorporarlos al Sistema de Abastecimiento Falconiano, el cual incluye a la ciudad de Coro y la Península de Paraguaná. La cuenca aportante al embalse de Matícora se encuentra muy degradada y el aporte de sedimentos al embalse es considerable reduciendo la vida útil del mismo y amenazando la factibilidad del acueducto. Por lo tanto el agua subterránea representa una fuente alterna, confiable, continua y económica de abastecimiento de agua tanto para el acueducto como para las diferentes comunidades. El área de estudio se encuentra específicamente en el municipio Mauroa, cubriendo un área de 1727,76 Km<sup>2</sup>. Geológicamente la zona está cubierta por rocas de edad Terciaria y depósitos aluviales del Cuaternario, provenientes de la degradación de los cerros que bordean la zona. Las formaciones productoras de agua están representadas por material aluvial, terrazas cuaternarias y depósitos de valles recientes. El acuífero es de tipo confinado. Se elaboró el modelo conceptual del acuífero para luego plasmarlo en un modelo matemático a través del software *Visual Modflow 3.0* y simular diferentes alternativas de explotación. Se estimaron las reservas permanentes y la recarga natural del acuífero. Se concluye sobre las posibilidades de explotación del acuífero haciendo recomendaciones sobre la rehabilitación y reequipamiento de los pozos existentes, la ubicación de nuevas extracciones y el volumen potencialmente explotable.

**Palabras Claves:** Matícora, disponibilidad, aguas subterráneas, modelo hidrogeológico, modelo matemático, ModFlow 3.0.

## INTRODUCCIÓN

La evaluación del agua subterránea ha sido una tarea que ha adquirido gran importancia en las últimas décadas en nuestro país, ya que se considera como la mejor alternativa para incremento de la demanda por este recurso. En tal sentido, se ha advertido acerca de la necesidad de conocer el orden de magnitud de las reservas, la ubicación de los depósitos y las posibilidades de poder aprovecharlos.

En tal sentido dentro de los proyectos generados por el gobierno venezolano, se encuentra El Proyecto del Acueducto Bolivariano en el estado Falcón, el cual consiste, en extraer 2.500 litros por segundo del embalse Matícora, ubicado a 7 kilómetros de la población de Mene Mauroa, para conducirlos a través de una aducción de 180 kilómetros de longitud, e incorporarlos al Sistema de Abastecimiento Falconiano, el cual incluye a la ciudad de Coro y la Península de Paraganá, igualmente el proyecto contempla la construcción de 4 plantas de tratamiento, una estación de bombeo y la posibilidad de extraer agua del acuífero ubicado aguas abajo al embalse para complementar la extracción.

El embalse Matícora fue puesto en funcionamiento en 1978, teniendo como objetivos el riego, abastecimiento de agua y control de crecientes. Desde su creación hasta la actualidad, ha estado sometido a un proceso de acumulación de sedimentos, originado por procesos de meteorización, causado por las variaciones climáticas ocurridas en la zona, por el uso irracional del suelo, además de problemas originados en la cuenca baja al embalse, por lo que se ha reducido su vida útil y ha afectado las fuentes de abastecimiento de agua potable existentes.

A partir de esta situación, se realizara un estudio hidrogeológico que me permita evaluar la disponibilidad de agua subterránea en la parte baja al embalse de Matícora, mediante la construcción de un Modelo Hidrogeológico Conceptual y Matemático, para lo cual se hace necesaria la aplicación de técnicas geoestadísticas para el estudio de variables distribuidas en el espacio como es el caso de coordenadas, cotas, límites y espesores litológicos; con la finalidad de determinar las reservas y recarga natural del acuífero que suplirá el recurso a la zona involucrada; a la vez de proporcionar información de manera tal que las comunidades conozcan la calidad y cantidad del recurso disponible y la posibilidad de poder aprovecharla tanto para la actividad agrícola y pecuaria como para el propio abastecimiento de la población.

Dentro de las áreas de investigación del CIDIAT, este estudio se encuentra ubicado en:

- Planificación y Gestión de Recursos Hidráulicos:  
Planificación de desarrollo de planes, programas y proyecto de gestión sustentable del recurso agua: sistemas de abastecimiento de agua potable.

# CAPITULO 1

## GENERALIDADES

### 1.1. Formulación del Problema

Uno de los grandes desafíos para el desarrollo que enfrenta la comunidad internacional es proporcionar el acceso universal al agua, con el fin de asegurar el abastecimiento a la población dada la creciente demanda del vital líquido, tema este que cada día ocupa más la atención de científicos, políticos, técnicos y comunidades. De hecho, la desproporción entre la cantidad de agua que se capta por escurrimiento y las pocas precipitaciones ocurridas en ciertas zonas hacen que la disponibilidad de agua sea menor, e incluso el aumento de la contaminación en ciertas áreas hace que disminuya la cantidad de agua apta para el uso y consumo humano.

No hay escasez de agua en la tierra, por el contrario la mayor parte de nuestro planeta está cubierto por agua, pero muy poca es apta para el consumo humano. Del total de agua en el planeta menos del 3% es agua dulce, encontrándose más de dos tercios en los glaciales, una pequeña parte como agua superficial y casi todo el resto de los recursos de agua dulce como agua subterránea, suministrando estas un reservorio esencial.

El estado Falcón por su ubicación geográfica y características locales, tiene una diversidad de climas pero específicamente en la zona de estudio prevalece el clima seco la mayor parte del año y poca lluvia, lo que hace que el recurso hídrico superficial sea escaso, por lo que el agua subterránea en esta zona puede convertirse en la principal fuente hídrica para el abastecimiento urbano y representa también un factor importante para el desarrollo social y económico de la zona. La falta de agua dulce detiene en gran medida el desarrollo de la región, la cual está influenciada por la actividad agrícola y ganadera, además de la calidad de vida de sus habitantes.

La importancia del presente estudio radica en la predicción de la disponibilidad del recurso subterráneo, ya que se determina su origen, ocurrencia, calidad y variabilidad tanto en el tiempo como en el espacio, convirtiéndose así, en una fuente alterna, confiable, continua y económica de abastecimiento de agua para consumo humano y riego, que no requiere de complicados sistemas de tratamiento para la potabilización, haciendo de su localización y monitoreo, una actividad científica de gran valor.

### 1.2. Objetivos

#### 1.2.1. Objetivo General

Evaluar la disponibilidad del recurso agua subterránea para complementar el suministro requerido por el proyecto Acueducto Bolivariano en el estado Falcón.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- ✓ Realizar una recopilación, evaluación y verificación de la información básica existente de la zona.
- ✓ Actualizar el inventario de los pozos dentro del área de estudio.
- ✓ Generar un modelo hidrogeológico conceptual y matemático de las aguas subterráneas en la zona.
- ✓ Calcular las reservas de agua subterránea aguas abajo del embalse de Matícora.
- ✓ Realizar un modelo de simulación del acuífero para dos escenarios de funcionamiento: en condiciones actuales y en condiciones futuras.
- ✓ Proponer posibles zonas de extracción de agua subterránea.

### 1.3. Justificación del Estudio

La zona de estudio ha experimentado en los últimos años una escasez del recurso hídrico debido al mal funcionamiento del Embalse Matícora, aunado a un importante crecimiento de la población y desarrollo económico, dado que las condiciones del suelo son favorables para la actividad agrícola y ganadera. Para obtener un óptimo aprovechamiento de las reservas de agua subterránea evitando así su uso irracional, se debe realizar estudios a los diferentes acuíferos por etapas; las cuales contemplen la evaluación del recurso hídrico a través de modelos conceptuales y numéricos para simular varios escenarios y así planificar su extracción. Seguidamente la verificación de la calidad del agua para gestionar los planes de distribución y saneamiento para sus distintos usos. Finalmente, un monitoreo periódico de los proyectos, actualizando los datos, lo cual permite una buena gestión del recurso. Sobre las bases de las consideraciones anteriores, es importante realizar el estudio de la disponibilidad de agua subterránea para esta zona, a través del análisis del modelo hidrogeológico conceptual y cálculo de reservas, con el fin de contribuir con la recopilación de información, para ser utilizado en futuros proyectos de actualización y estudio de vulnerabilidad del acuífero.

### 1.4. Alcances

Mediante la realización de esta investigación se pretende efectuar un estudio hidrogeológico, con el fin de generar un modelo hidrogeológico conceptual y matemático del acuífero aguas abajo del embalse de Matícora a través del *Sofward Visual Modflow 4.1*, para establecer las reservas de agua subterránea, con la finalidad de aportar información válida para el aprovechamiento de este recurso.

### 1.5. Limitaciones

La principal limitación surgió al momento de realización de la investigación que sirviera para generar el modelo el cual presentara las condiciones más cercanas a la realidad de los acuíferos presentes, fue la escasez de información de estudios geológicos y la obtención de información de los pozos que se encuentran en la zona sur del estado Falcón. Otra limitante fue el acceso a los lugares de interés, dado que mucho de estos se encuentran dentro de terrenos de propiedad privada, y dependió de la ayuda que pudieron prestar los habitantes y empresas que se hallaban dentro del sector.

## CAPITULO 2

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes

- **Díaz, (2006).** Realizó un estudio de la disponibilidad del recurso agua subterránea en las Sabanas de Carora, estado Lara, con la finalidad de proponer un Modelo Hidrogeológico Conceptual, para observar el comportamiento de las variables hidrogeológicas y contribuir con el desarrollo de la región, evaluando la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo como fuente alterna de abastecimiento, tanto para consumo humano como para riego.
- **Ramírez, (2006).** Se enfocó en la evaluación de las disponibilidades de aguas subterráneas entre los ríos Morador y Sarare del estado Portuguesa con el propósito de construir un modelo hidrogeológico conceptual donde evaluara las reservas permanentes y la recarga natural de las aguas subterráneas. Las propiedades físicas de la cobertura sedimentaria (porosidad, permeabilidad y transmisibilidad) y la posición geográfica le permitieron dividir el área de estudio en función de su capacidad de recarga por infiltración: La zona piemontina, representa el área de mayores aportes y tiene un comportamiento de acuífero libre; mientras que la zona de llanuras aluviales constituye una región menos propicia para la recarga, y debido a su cobertura impermeable se adapta a la definición de acuífero confinado. Así mismo se encontró un volumen de reservas permanentes permeables de  $3,18 \times 10^{10} \text{ m}^3$  y un valor promedio de recarga natural por precipitación de  $227,84 \text{ l/m}^2/\text{año}$ .
- **Mora, (2007).** Se enfocó en la disponibilidad de agua subterránea en la planicie aluvial entre los ríos Sarare y San Carlos, teniendo como objetivo evaluar la disponibilidad de agua subterránea y además en segundo plano realizar una evaluación de la calidad y clasificación de las aguas de los acuíferos de esta zona. Por tal motivo en este estudio se presenta la elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual para la estimación de las reservas permanentes, la realización de un balance hídrico para el cálculo de la recarga natural, la construcción de un conjunto de mapas de propiedades geoquímicas de las aguas y la elaboración de los diagramas de Piper y Wilcox para el desarrollo de la evaluación de la calidad y clasificación de las aguas de la zona de estudio.
- **Trasmonte, (2007).** Realizó una Evaluación de la disponibilidad del recurso de agua subterránea en el área comprendida entre las poblaciones de Ciudad Ojeda y Cabimas en el estado Zulia, determinando que los niveles de agua muestran un descenso a medida que los pozos se acercan a la costa, y el flujo preferencial del agua subterránea es de dirección noreste a suroeste. Adicionalmente evaluó la calidad del agua subterránea, basándose en datos como pH, sólidos disueltos entre otros y determino que las mismas son aptas para el consumo humano y riego.
- **Sala, (2009).** Evaluó la disponibilidad de aguas subterráneas del área comprendida entre el río Santo Domingo, estado Barinas y el río Guanare, estado Portuguesa, su finalidad consistió en implementar el aprovechamiento integral de los recursos superficiales y subterráneos. Dichos recursos naturales se encuentran en formaciones geológicas permeables representadas en secciones estratigráficas que han sido utilizadas para la construcción de un modelo hidrogeológico

conceptual con la finalidad de evaluar las reservas permanentes permeables cuyo valor se estima en  $7,40 \times 10^{10} \text{ m}^3/\text{Km}^2$ . A partir de los datos de las estaciones pluviométricas La Quinta y Mesa de Cavacas se tiene que la recarga natural del área de estudio es de  $0,508 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{año}$ . De acuerdo al análisis químico del agua del acuífero, se deduce que esta es de buena calidad, apta para el consumo humano ya que presentan valores de pH 6.5 a 7; los valores de conductividad eléctrica oscilan entre 100 y 650  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , el valor de TSD es inferior a 500 mg/l y la dureza total oscila entre 250 y 360. Se emplea el Diagrama de Piper, para clasificar las aguas subterráneas del área de estudio como aguas bicarbonatadas cálcicas y magnésicas, las cuales son consideradas como aguas jóvenes o recientes. Mediante el uso de Diagramas de Wilcox, las aguas subterráneas que se encuentran en el área de estudio son clasificadas como aptas para el riego ya que corresponden a los tipos C1-S1 y C2-S1; y poseen una conductividad cuyos valores oscilan entre 50 y 650  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; presentan bajo peligro de alcalinización y de bajo a medio peligro de salinización del suelo.

## 2.2. Bases Teóricas

### 2.2.1. Hidrogeología

Se define como “la ciencia que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, las formas de los yacimientos, 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” (Mijailov, L. 1989).

Un estudio hidrogeológico abarca la evaluación de las condiciones climáticas de una región, su régimen pluviométrico, la composición química del agua, las características de las rocas como permeabilidad, porosidad, figuración, su composición química, los rasgos geológicos y geotectónicos. Es así que la investigación hidrogeológica implica, entre otras, tres temáticas principales:

- El estudio de las relaciones entre la geología y las aguas subterráneas.
- El estudio de los procesos que rigen los movimientos de las aguas subterráneas en el interior de las rocas y de los sedimentos.
- El estudio de la química de las aguas subterráneas (hidroquímica e hidrogeoquímica).

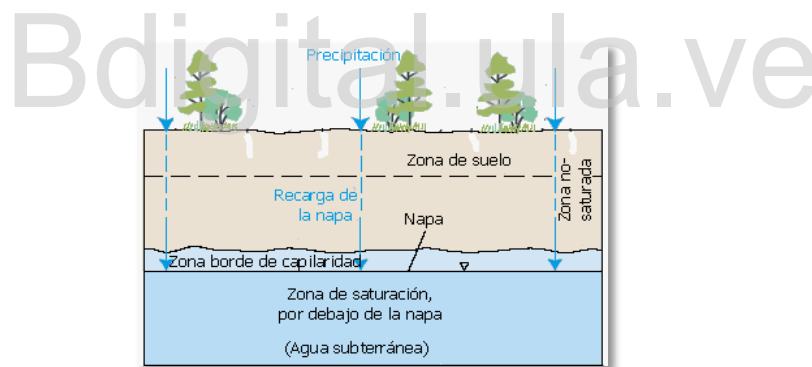
### 2.2.2. Ciclo Hidrológico

El agua existe en la Tierra en tres estados: sólido, líquido y gas, por lo tanto los océanos, ríos, nubes y lluvia están en constante cambio y la cantidad total de agua en el planeta no varía. La circulación y conservación de agua en la Tierra se llama **Ciclo Hidrológico o del Agua**. El ciclo comienza con la **evaporación** del agua desde la superficie del océano. A medida que se eleva, el aire humedecido se enfría y el vapor se transforma en agua: es la **condensación**. Las gotas se juntan y forman una nube. Luego, caen por su propio peso: es la **precipitación**. Si en la atmósfera hace mucho frío, el agua cae como nieve o granizo. Si es más cálida, caerán gotas de lluvia. Una parte del agua que llega a la tierra será aprovechada por los seres vivos; otra escurrirá por el terreno hasta llegar a un río, un lago o el océano. A este fenómeno

se le conoce como **escorrentía**. Otro poco del agua se filtrará a través del suelo, formando capas de agua subterránea. Este proceso es la **percolación**. Más tarde o más temprano, toda esta agua volverá nuevamente a la atmósfera, debido principalmente a la evaporación. Al evaporarse, el agua deja atrás todos los elementos que la contaminan o la hacen no apta para beber (sales minerales, químicos, desechos). Por eso el ciclo del agua nos entrega un elemento puro. Pero hay otro proceso que también purifica el agua, y es parte del ciclo: **la transpiración** de las plantas a través de las raíces las cuales absorben el agua y la desplaza hacia arriba a través de los tallos o troncos, al llegar a las hojas y flores, se evapora hacia el aire en forma de vapor de agua.

### 2.2.3. Aguas Subterráneas

Las aguas subterráneas es uno de los recursos más importantes y ampliamente distribuidos de la tierra. Se encuentran bajo la superficie del terreno o dentro de los poros, fisuras o fracturas de las rocas, o dentro de las masas de regolito; en zonas húmedas a metros de profundidad, y en desiertos a cientos de metros. La cantidad de agua que se infiltra debe ser suficiente para saturar un espesor de roca apreciable, y pasar a ser un recurso aprovechable. En otras palabras, el agua subterránea, es aquella situada bajo el nivel freático y que está saturando completamente los poros y fisuras del terreno (Figura 2.1). Esta agua fluye a la superficie de forma natural a través de manantiales, cauces fluviales, o bien directamente al mar. Puede también dirigirse artificialmente a pozos, galerías y otros tipos de captaciones. Se renueva de modo constante por la naturaleza, a merced de la recarga, la cual procede principalmente de las precipitaciones, escorrentía superficial y cursos superficiales de agua, de acuíferos próximos o de retorno de ciertos usos (regadíos).



**Fuente:** <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>.

**Figura 2.1.** Agua Subterránea.

### 2.2.4 División de las formaciones geológicas según su comportamiento hidrológico.

Existe en la naturaleza una amplia gama de formaciones con capacidades muy diversas para almacenar y transmitir el agua. Desde el punto de vista hidrogeológico suelen dividirse en:

- **Acuíferos:** Son unidades o formaciones geológicas subterráneas compuesta de grava, arena o piedra porosa, capaces de almacenar, transportar y transmitir el agua.

- **Acuitardos:** Capaces de almacenar el agua en cantidades muy importantes, pero la transmiten muy lentamente; se suelen denominar con frecuencia formaciones semipermeables (limos, arenas limosas, arenas arcillosas, etc.), y su capacidad de drenaje es media a baja.
- **Acuicludos:** Son aquellas formaciones geológicas que pueden almacenar el agua en grandes cantidades, pero no tienen la posibilidad de transmitirla y se drenan con mucha dificultad; el agua se encuentra encerrada en los poros de la formación y no puede ser liberada (arcillas, arcillas plásticas, limos arcillosos, etc).
- **Acuifugos:** Formaciones incapaces de almacenar y de transmitir el agua; están representados por las rocas compactas, como granitos y gneises, y a veces incluso calizas muy compactas sin carstificar, se muestran como impermeables salvo que existan fracturas que pueden permitir flujo.

#### 2.2.5. Clasificación de los Acuíferos según las circunstancias hidráulicas y estructurales.

- **Acuíferos Libres, Freáticos o No Confinados:** Son aquellos en que el agua subterránea presenta una superficie libre, sujeta a la presión atmosférica, como límite superior de la zona de saturación. La superficie del agua será el nivel freático y podrá estar en contacto directo con el aire o no, pero lo importante es que no tenga por encima ningún material impermeable
- **Acuíferos Cautivos o Confinados:** Son aquellos acuíferos que están aislados en el subsuelo, rodeados de materiales impermeables por todos sus lados. El nivel de agua está por encima del techo del material del acuífero, encontrándose a presión o en carga debido al peso de los materiales superiores.
- **Acuífero Semiconfinado:** Constituye una variedad de los confinados, y se caracteriza por tener el techo (parte superior) y/o el muro (parte inferior), sellado por materiales que no son totalmente impermeables, sino que constituyen un acuitardo, es decir, un material que permite una filtración vertical que alimenta muy lentamente al acuífero principal.

#### 2.2.6. Clasificación de los Acuíferos según la Textura de los Materiales que lo Conforman

- **Acuíferos Detríticos o Sedimentarios:** Su permeabilidad es debida a su porosidad intergranular; entre ellos se encuentran las gravas, arenas, arcosas. La textura del medio está constituida por granos, permitiendo que el agua se almacene y circule por los huecos intergranulares; dichos huecos pueden estar rellenos de material granular fino, disminuyendo las características del medio para el almacenamiento y transporte de agua, o incluso estar rellenos de materiales arcillosos, dejando prácticamente anuladas estas características. En ocasiones, los mismos granos están constituidos por material poroso que les aporta, incluso, mejores propiedades como almacén de agua. Los medios granulares, dada su génesis, suelen ser muy homogéneos a escalas reducidas.
- **Acuíferos Fisurados y Kársticos:** Son aquellos cuya permeabilidad es debida a grietas y fisuras tanto de origen mecánico como por disolución. Entre ellos se encuentra calizas, dolomías, granitos, basaltos, etc. Las cuevas de estalactitas son un ejemplo muy conocido de este tipo de acuíferos que son los karstificados. La carstificación es un proceso de disolución por acción del agua en formaciones carbonatadas previamente fisuradas; los acuíferos kársticos son poco homogéneos a pequeña escala, pero suelen presentarse más homogéneos si la escala de trabajo es suficientemente amplia

- **Acuíferos Kársticos y Porosos:** Son aquellos acuíferos cuya permeabilidad es debida a un conjunto de las dos anteriores causas, teniendo así los acuíferos cársticos y porosos, son típicas las calcarenitas.

### 2.2.7. Recarga de Acuíferos

Las recargas se efectúan de dos formas:

- **Recargas Naturales:** se llama así, todo aquel acuífero cuya recarga se realiza por infiltración del agua procedente de las precipitaciones, de las escorrentías superficiales o del flujo subterráneo.
- **Recargas Artificiales:** se realiza en los acuíferos sobreexplotados. Durante los periodos excedentarios, se toman aguas de los cauces fluviales y se inyectan (pozos de inyección) o se estancan para que pasen posteriormente al acuífero (estanques de infiltración).

### 2.2.8. Descarga de Acuíferos

El agua subterránea mana o brota de forma natural en distintas clases de surgencias en las laderas y a veces en fondos del relieve, siempre allí donde el nivel freático intercepta la superficie. Cuando no hay surgencias naturales, al agua subterránea se puede acceder a través de pozos, perforaciones que llegan hasta el acuífero y se llenan parcialmente con el agua subterránea, siempre por debajo del nivel freático, en el que provoca además una depresión local. Otras veces, se puede hablar de una descarga debida a un flujo hipodérmico o interflujo, que es aquel que circula de modo somero y rápido por ciertas formaciones permeables de escasa profundidad, por lo general, ligada a álveos fluviales (acuíferos subálveos); que proceden de una rápida infiltración, alta velocidad de transmisión, y escaso recorrido, que hacen que pronto vuelvan al exterior, representando ser formaciones de escaso o nulo almacenamiento.

### 2.2.9. Características Hidrogeológicas del Acuífero

La productividad de un acuífero es función, además de sus características geológicas, de sus características hidrogeológicas y de los factores del flujo de las aguas subterráneas. Dentro de éstas características o parámetros hidrogeológicos se encuentran:

- **Porosidad:** Es la fracción del volumen total de la roca no ocupada por el esqueleto mineral de la misma, es decir, se refiere a la medida del espacio intersticial entre grano y grano, por lo que define la posibilidad de la roca de almacenar más o menos cierta cantidad de fluido. Se expresa por el porcentaje de volumen de poros respecto al volumen total de la roca. Existe porosidad total y eficaz.
- **Permeabilidad (K):** Es una propiedad que indica la capacidad que tiene una roca para conducir un fluido a través de sus poros interconectados, sin alterar su estructura interna. La velocidad con la que el fluido atraviesa el material depende del tipo de roca, de la naturaleza del fluido, de la presión del fluido y de la temperatura.
- **Coficiente de Almacenamiento (S):** Amisial y Jégat (1984), lo expresan como el volumen de agua de una columna vertical del acuífero, que tiene como base la unidad de área y como altura el espesor medio del acuífero, libera por expansión del agua y compactación de la matriz sólida cuando la carga hidráulica disminuye en una unidad.

- **El almacenamiento específico (Ss):** Según Amisial y Jégat (1984), es el volumen de agua que un volumen unitario de acuífero libera por expansión del agua y compactación de la matriz sólida del mismo, cuando la carga hidráulica disminuye en una unidad.
- **Transmisividad (T):** Según González, L., (2003), la Transmisividad puede definirse como el volumen de agua que se escurre por una sección del acuífero de 1 metro de ancho por todo su espesor bajo una pendiente hidráulica unitaria.
- **Gradiente Hidráulico (I):** El gradiente hidráulico, es un número sin dimensiones, que representa la pérdida de carga por unidad de longitud. En otras palabras, es la pendiente de la superficie piezométrica si se acepta que los hilillos sobre la misma vertical son paralelos entre ellos.
- **Velocidad Real (Vr):** La velocidad real, Vr, del flujo de agua subterránea se refiere a la sección real de flujo determinada por la porosidad eficaz ( $\phi$ ).
- **Caudal de Flujo (Q).** Es el volumen de agua en  $m^3$  que atraviesa una sección total de la capa acuífera, o sección de flujo en  $m^2$ , normal a la dirección de flujo.
- **Balance Hídrico:** Desde el punto de vista hidrogeológico, el balance hídrico tiene como finalidad, determinar el volumen de agua proveniente de la precipitación, la cual recarga a los acuíferos por efecto de la infiltración directa. Los factores que juegan un importante papel en el balance hídrico son aquellos que constituyen los gastos y las entradas del fluido. De acuerdo a esto se tiene la ecuación:

$$P = ETR + Esc + I \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Dónde:

- P** = Precipitación media anual (mm.)
- ETR** = Evapotranspiración real media anual (mm.)
- Esc** = Escorrentía superficial media anual (mm.)
- I** = Infiltración eficaz al manto acuífero (mm.)

### 2.2.10. Modelos

Un modelo se construye con la finalidad de ilustrar un evento real que puede ser concreto o abstracto. Puede dar información directa sobre el evento que representa si se construye en relación simétrica con la realidad, es decir, que la correspondencia entre el modelo y el evento representado sea, al menos parcialmente reversible y que permita la conversión de las propiedades del modelo a la realidad. Usualmente representa el comportamiento de sistemas naturales de interés científico y a la larga, económico. Los modelos deben representar características de los eventos de forma sencilla para facilitar su comprensión, teniendo en cuenta que estas características de funcionamiento generalmente son muy complejas e involucran un gran número de variables. Para poder definir el movimiento del agua en un acuífero se necesita:

- La descripción de su geometría
- La descripción de unas propiedades físicas del medio en cada punto del dominio. Permeabilidad, transmisividad, coeficiente de almacenamiento, etc.
- Las leyes que rigen el movimiento del agua.
- Las condiciones en los límites del sistema.
- Las condiciones del sistema en un tiempo  $t = 0$ .

- La descripción de las acciones exteriores al sistema.

#### *2.2.11. Modelo de Simulación de Acuíferos*

Los modelos de simulación son herramientas de análisis que permiten comprender el funcionamiento de un sistema de reservas de aguas subterráneas, así como también predecir casos específicos. La elaboración de los modelos puede ser hecha de dos formas:

- Modelo Hidrogeológico Conceptual.
- Modelo Hidrogeológico Matemático.

En el desarrollo de este proyecto se utilizaron ambos y se describen a continuación

#### *2.2.12. Modelo Hidrogeológico Conceptual*

Es la representación de las variables conocidas de una localidad determinada para obtener una aproximación práctica de su funcionamiento, presenta las siguientes características:

- Número de capas del acuífero.
- Rasgos del suelo. Sectorización macroscópica de los tipos de suelo conocidos para definir las unidades hidroestratigráficas primarias.
- Condiciones iniciales del nivel freático.
- Límites verticales y horizontales.

#### *2.2.13. Modelos Hidrogeológicos Matemáticos:*

Representan una abstracción matemática del prototipo preservando las propiedades más importantes de este. Son relativamente más baratos, flexibles, existiendo una gran variedad listos para ser usados, ya sea haciendo o no modificaciones a este, para ajustarlo a las condiciones de un caso en particular. Dentro de los modelos matemáticos se encuentran:

- Determinístico
- Probabilísticos
- Conceptuales
- Paramétricos

Utiliza métodos numéricos para resolver la ecuación diferencial. El método a utilizar en la investigación es el de Diferencias Finitas, con el que se obtiene la solución de la ecuación para una serie de puntos discretos en el espacio y en el tiempo. De acuerdo con este método, la descripción del sistema se hace en elementos celulares asignados a cada uno de los puntos del espacio. La ecuación diferencial se aproxima por una serie de ecuaciones algebraicas en que las incógnitas son las alturas piezométricas en los puntos escogidos, y las particularidades del método consisten en el planteamiento de esas ecuaciones y en la forma de solucionarlas.

#### 2.2.14. Proceso de modelación.

Uzcátegui en el 2004, considera el proceso de modelación enfocado desde dos puntos de vista diferentes: el matemático y el físico.

- **Proceso de modelación matemático:** Consta de tres pasos básicos:

Conceptualización: se deben identificar los procesos físicos dominantes y hacer ciertas hipótesis sobre los no dominantes.

Formulación: Plantear las ecuaciones diferenciales que gobiernan el proceso.

Solución de las ecuaciones Diferenciales: pueden ser analíticas o numéricas.

- **Proceso de modelación físico.**

Conceptualización: analizar el medio, identificar los contornos, acciones exteriores, geometría del medio, entre otros. A veces se le llama formación del modelo conceptual y es un paso importante, ya que ya que en los pasos siguientes se pueden cuantificar los errores, mientras que aquí no. Distintas conceptualizaciones pueden representar el medio real, pero darán predicciones diferentes.

Discretización del medio: se divide el medio en una serie de subregiones que lo cubran y no se solapen. La forma de las subregiones depende del método numérico que se emplee e influye en los errores numéricos que se cometerán.

Estimación de los parámetros: la conceptualización realizada depende de una serie de parámetros que deben obtenerse, pero es difícil porque el medio en la realidad es heterogéneo y desconocido. La forma de obtenerlos es midiendo y calibrando el modelo. La medición es importante y hay que hacerlo, pero no es suficiente, porque una medida es sólo un valor puntual o quizás de un pequeño entorno en cambio a partir de la calibración, y dadas medidas de respuesta del sistema y de los parámetros medidos, se intentan estimar parámetros representativos del medio, que reproduzcan la respuesta observada. La calibración puede ser automática y manual. Es manual cuando se juega con los parámetros para ajustar los valores calculados con los medidos; la automática, busca por medio de un ordenador los parámetros que reproduzcan mejor la respuesta del sistema. La evaluación de los errores del sistema se realiza haciendo variar los parámetros obtenidos, que se consideran óptimos, observando la respuesta del sistema y de esta manera analizar qué tan razonable es dicha respuesta.

Verificación o validación: Consiste en evaluar o correr el modelo para condiciones distintas a las que se utilizaron en la calibración.

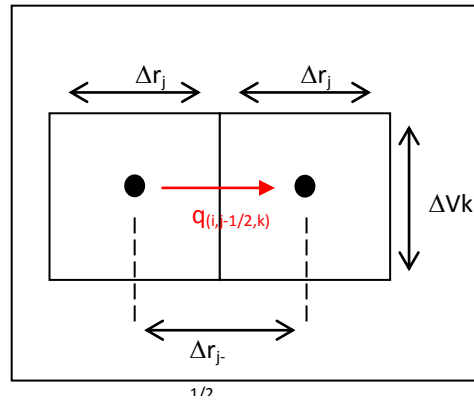
Predicción: Es utilizada una vez construido el modelo.

#### 2.2.15. Uso del programa visual Modflow 4.1.

El Visual Modflow fue creado con el objeto de originar un programa que pudiese ser modificado, que fuese simple de usar y mantener, que pueda ejecutarse en una gran variedad de computadoras con cambios mínimos y que fuera relativamente eficiente en memoria de cálculo y tiempo de ejecución.

Bdigital.ula.ve

C.C.Reconocimiento



Fuente: Uzcátegui (2004).

Figura 2.3. Celdas en diferencias finitas.

Dónde:

$h(i,j,k)$  es el nivel piezométrico en  $(i, j, k)$

$q(i,j,k)$  es el caudal a través de la cara de las dos celdas.

$K(i,j,k)$  es la conductividad hidráulica o permeabilidad entre los nudos  $(i, j, k)$  y  $(i, j-1, k)$ .

$\Delta r_{j-1/2}$  es la distancia entre los nudos  $(i, j, k)$  y  $(i, j-1, k)$ .

No debe asociarse el subíndice  $(i, j-1/2, k)$  con un punto específico entre dos puntos, sino que  $K$  representa la conductividad hidráulica o permeabilidad efectiva de toda la región entre los dos nudos. Similares expresiones se obtienen para el flujo a través de las otras caras.

$$q_{(i,j+1/2,k)} = K_{(i,j+1/2,k)} * \Delta C_i * \Delta V_k * \frac{(h_{(i,j+1,k)} - h_{(i,j,k)})}{\Delta r_{(j+1/2)}}$$

$$q_{(\bar{i}+1/2,j,k)} = K_{(i+1/2,j,k)} * \Delta r_j * \Delta V_k * \frac{(h_{(i+1/2,j,k)} - h_{(i,j,k)})}{\Delta C_{(i+1/2)}}$$

$$q_{(\bar{i}-1/2,j,k)} = K_{(i-1/2,j,k)} * \Delta r_j * \Delta V_k * \frac{(h_{(i-1/2,j,k)} - h_{(i,j,k)})}{\Delta C_{(i-1/2)}}$$

$$q_{(\bar{i},j,k+1/2)} = K_{(i,j,k+1/2)} * \Delta C_i * \Delta r_j * \frac{(h_{(i,j,k+1/2)} - h_{(i,j,k)})}{\Delta V_{(k+1/2)}}$$

$$q_{(i,j,k-1/2)} = K_{(i,j,k-1/2)} * \Delta Ci * \Delta rj * \frac{(h_{(i,j,k-1/2)} - h_{(i,j,k)})}{\Delta V_{(k-1/2)}}$$

Las ecuaciones anteriores expresan el flujo a través de las caras de la celda (i, j, k) en función de los niveles de h, dimensiones de la grilla y conductividad hidráulica. La notación puede simplificarse combinando las dimensiones de la grilla y la conductividad hidráulica en una constante única, la conductancia hidráulica:

$$C_{(i,j-1/2,k)} = K_{(i,j-1/2,k)} * \frac{\Delta Ci * \Delta Vk}{\Delta r_{(j-1/2)}} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Donde C(i,j-1/2,k) es la conductancia en la fila i y el estrato k entre los nudos (i, j, k) y (i, j-1, k).

Conductancia es entonces, el producto de la conductividad hidráulica por el área de flujo dividido por la longitud del camino de flujo.

Estas ecuaciones toman en cuenta el flujo entrante/saliente de cada celda con sus seis celdas contiguas. Para tener en cuenta el flujo hacia o desde elementos externos al acuífero tales como ríos, drenes, recarga, evapotranspiración y pozos, se requieren términos adicionales. Estos flujos pueden depender del nivel en la celda en cuestión o ser totalmente independientes de él. El flujo desde fuera del acuífero puede representarse mediante la ecuación:

$$a_{i,j,k} = p_{i,j,k,n} * h_{i,j,k,n} + q_{i,j,k,n} \quad \text{(Ecuación 4)}$$

Donde

$a$  es el flujo desde la fuente externa n en la celda (i, j, k)

p y q son constantes.

En general si hay N fuentes o sumideros que afecten una celda, el flujo combinado se expresa:

$$QS_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N a_{i,j,k,n} = \sum_{n=1}^N p_{i,j,k,n} * h_{i,j,k} + \sum_{n=1}^N q_{i,j,k,n} \quad \text{(Ecuación 5)}$$

Se llama

$$P_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N p_{i,j,k,n}$$

$$Q_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N q_{i,j,k,n}$$

El término general para el flujo externo a la celda (i,j,k) es:

$$QS_{i,j,k} = P_{i,j,k,n} * h_{i,j,k,n} + Q_{i,j,k,n} \quad \text{(Ecuación 6)}$$

Considerando que la suma de los flujos a la celda (i,j,k) es igual a la variación de almacenamiento de ella:

$$\begin{aligned} & q_{i,j-1/2,k} + q_{i,j+1/2,k} + q_{i-1/2,j,k} + q_{i+1/2,j,k} + q_{i,j,k-1/2} + q_{i,j,k+1/2} + QS_{i,j,k} = \\ & = SS_{i,j,k} \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} * \Delta rj * \Delta Ci * \Delta Vk \end{aligned}$$

Dónde:

$\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}$  Es la aproximación en diferencias finitas de la derivada del nivel respecto del tiempo.

$SS_{i,j,k}$  Es el almacenamiento específico de la celda

$\Delta rj * \Delta Ci * \Delta Vk$  Es el volumen en la celda

Si se sustituye el caudal en función de la conductancia y los niveles aclarando a qué tiempo corresponden dichos niveles, se tiene:

$$\begin{aligned}
& Cr_{i,j-1/2} * (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + Cr_{i,j+1/2,k} * (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i,-1/2,j,k} * (h_{i,-1,j,k}^m) CC_{i,+1/2,j,k} * \\
& * (h_{i,+j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k-1/2} * (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+1/2} * (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) + P_{i,j,k} * h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = \\
& = SS_{i,j,k} \frac{(h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1})}{t_m - t_{m-1}} * \Delta r_j * \Delta C_i * \Delta V_k
\end{aligned}$$

En esta expresión se desconocen los hm, es decir, se tiene una ecuación con siete incógnitas y si se plantea una ecuación como ésta para cada nudo, se obtiene un sistema de n ecuaciones con n incógnitas que deben resolverse simultáneamente.

El valor de  $h_{i,j,k}^{m-1}$  es, al inicio, los niveles iniciales (dato).

El Modflow usa métodos iterativos para obtener la solución del sistema de ecuaciones en cada paso de tiempo; se parte de un valor arbitrario o estimado para el nivel en cada nudo al fin de cada paso. Estos valores se varían obteniéndose un mejor ajuste del sistema de ecuaciones y así sucesivamente. Se debe especificar el criterio de convergencia, que especifica la máxima variación de nivel que puede producirse en una iteración, puede usarse un valor del criterio de convergencia de un orden de magnitud menor que el error deseado.

Bdigital.ula.ve

En cuanto a los niveles iniciales de niveles estimados al inicio de la iteración, el Modflow utiliza los niveles calculados en el paso anterior como valor inicial.

Debe tenerse en cuenta que los métodos iterativos dan una solución sólo aproximada al sistema de ecuaciones de diferencias finitas para cada paso de tiempo, sin embargo, si se obtuviese una solución exacta del sistema de ecuaciones de cada paso, esto sólo sería una aproximación a la solución de la ecuación de flujo. La discrepancia entre el valor obtenido en diferencias finitas y de solución exacta de la ecuación diferencial se llama error de truncación. En general, este error será mayor, en cuanto mayor sea el espaciado de la malla y el paso del tiempo.

Finalmente, debe reconocerse que aunque se obtenga una solución formal de la ecuación diferencial, será sólo una aproximación a las condiciones reales en el campo.

- **Tipo de celdas del modelo y condiciones de borde.**

Las celdas se agrupan en tres tipos:

Celdas de Nivel Variable: aquellas en que se calcula un nivel para cada paso de tiempo ( $\Delta t$ ).

Celdas de Nivel Constante: aquellas en las que el nivel se especifica previamente y se mantiene constante a lo largo de toda la simulación.

Celdas Inactivas: son aquellas que presentan flujo nulo.

Todas las ecuaciones anteriormente presentadas se plantean sólo para las celdas de nivel variable.

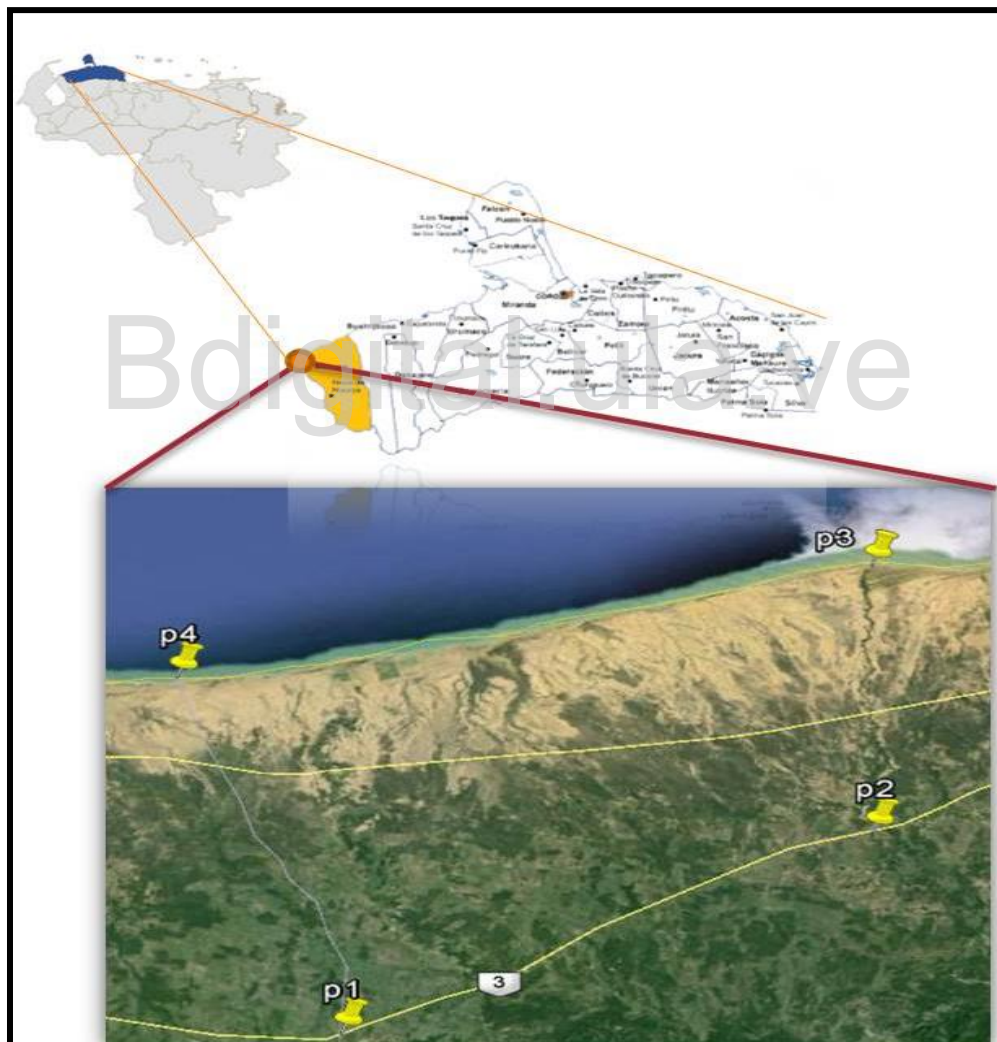
Bdigital.ula.ve

## CAPITULO 3

### MARCO REFERENCIAL

#### 3.1. Ubicación del área de estudio

El área de estudio se encuentra al Noroeste de Venezuela, en el límite entre los estados Falcón y Zulia. Comprende el municipio Mauroa del estado Falcón y se encuentra enmarcada entre las coordenadas UTM (*Datum Regwen*) 256.000 a 292.000 E y 1.176.000 a 1.220.000 N, cubriendo un área aproximada de 1.727,76 Km<sup>2</sup> (Figura 3.1).



Fuente: Elaboración propia

Figura 3. 1. Ubicación del área de estudio.

## 3.2 Características Físico- Geográficas del área

### 3.2.1. Clima

Parra (1967), elaboró el estudio agroclimático de Maticora, en el cual se consideran dos tipos de climas en la región: uno árido en la parte baja de la cuenca (zona norte) y otro semi-árido que corresponde a la parte media y baja del Río Maticora. Según Lahoud (2001), el clima de la región pertenece al clima semiárido megatérmico, su precipitación media anual corresponde a 850 mm., distribuidos de forma bimodal en dos periodos que van desde Mayo a Junio y de Agosto a Noviembre, el periodo seco abarca desde Diciembre hasta Abril. La evaporación en la zona es elevada, los meses de mayor evaporación son de Marzo a Agosto en orden decreciente y los meses de menor evaporación son de Noviembre a Diciembre. La temperatura media anual es de 28°C, la máxima media absoluta de 33,5 °C y la mínima de 23°C, con una máxima absoluta de 40,4°C y mínima absoluta de 18°C.

### 3.2.2. Relieve

El Río Maticora se encuentra ubicado dentro del Sistema Coriano, que desde el punto de vista orográfico, representa la transición entre la Cordillera de La Costa y la Cordillera de Los Andes. Las elevaciones en la zona son poco significativas, ya que escasamente superan los 600 m.s.n.m. (Figura 3. 2), localizándose las mayores altitudes al Sureste de la zona.

### 3.2.3. Vegetación

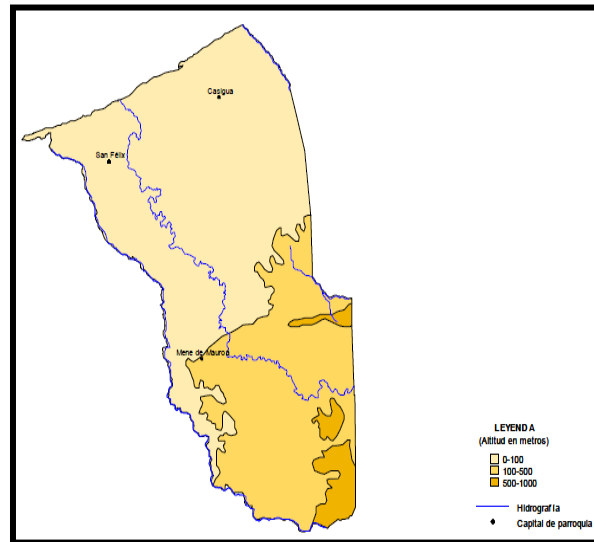
Según la clasificación de Holdridge “Zonas de Vidas de Venezuela”, esta zona pertenece al llamado Bosque Espinoso Seco Tropical, donde lamentablemente en la época actual han quedado muy pocos testigos de este tipo de vegetación, abundante hasta principios de siglo. La vegetación natural de zona, debido a las condiciones climáticas predominante es xerófila en 80%, con predominio de cactáceas tales como Cardón (*Cereus griseus*) y la Tuna (*Opuntia caracasana*), complementados con el Cují (*Prosopis sp.*). Sin embargo en el pasado existió una explotación maderera muy intensiva que prácticamente desnudo el suelo en alguno sectores, causando una erosión laminar severa y desapareciendo especies valiosas como Roble (*Catalpalongisilicua*), Curarí (*Tecoma Seratifolia*), Pardillo (*Cordia Alliodora*) y Vera (Figura 3.3).

### 3.2.4. Hidrografía

En la zona de estudio existen tres cursos de aguas de importancia, el río Maticora, río Cocuiza y el río Borojó. La red hidrográfica de la hoya de los ríos pertenece al tipo detrítico con modificaciones de tipo sub-detrítico y pinado.

El río Maticora nace a unos 750 m.s.n.m. al pie del cerro Madre de Agua (960 m.s.n.m.), en la cercanía de la localidad de Tupure. En los primeros 36 km de su curso está representado por el río Tupure. Toma su

nombre de Matícora en Tupurito, cuando se una con el río Mojino. Sigue una dirección aproximada este-oeste, hasta la altura de Mene Mauroa, donde toma un rumbo norte-noroeste, para desembocar en el golfo de Venezuela, a unos 20 km al noreste de la localidad de Casigua. Tiene una longitud de 151 km y drena una cuenca de aproximadamente 2840 km<sup>2</sup> de superficie. Su pendiente longitudinal media es de un 0,5%.



**Fuente:** FUDECO, 2004.

**Figura 3. 2.** Mapa de relieve del municipio Mauroa, estado Falcón.



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 3.3.** Vegetación xerófila característica de la región.

El Matícora tiene un lecho bien definido, profundamente (4 a 5 m) encajonado en el fondo del valle, formado por numerosos glacis terrazas de origen coluvial. Al salir de la zona montañosa, el Matícora cambia de dirección para seguir un rumbo septentrional. El valle se abre en un enorme abanico aluvial de tipo explayamiento, el río se encaja dentro de sus aluviones formando numerosos meandros. La pendiente longitudinal no alcanza 0,2 %. Los numerosos brazos de influencia, que antes caracterizaban a este sector, se están convirtiendo en madres viejas.

El río Borojó es esporádico y nace entre la Serranía de La Palma y Las Copas en el sitio conocido como los Ojos de Agua, su primer curso está completamente encajonado entre montañas hasta salir a la llanada de La Danta, luego este se torna zigzagueante hasta verter sus aguas en el Golfo de Venezuela. Por su lecho corre agua los meses de lluvia, su cauce es profundo y angosto, esto hace que se desborde en las épocas de crecidas por su margen izquierdo. Hay dos quebradas importantes que alimentan el cauce del río, la Barisigua o Antúnez con su ramal de la quebrada de En medio por su parte Este y la de Arroyo Hondo unida a la de Seque por su parte Oeste. Hay que resaltar la importancia de la Ciénaga de Canapo, ubicada en la parte Oeste de la Boca del río Borojó, tiene unos 56 Km de longitud por 1Km<sup>2</sup> de ancho cuando está llena, este recurso de agua es totalmente subutilizado para la cría de ganado caprino.

El río Cocuiza es el más occidental de los ríos del área de estudio. Drena una cuenca pequeña de unos 1760 km<sup>2</sup>, caracterizada por un relieve bajo de colinas y mesetas cuyas alturas no alcanzan 300 m de altitud. El Cocuiza nace a unos 40 m.s.n.m. en la montaña de Pregoneras, ubicado al pie del cerro Cerrón. Escurre dentro de un pequeño valle de tipo coluvial. Desemboca en la ciénaga de los olivitos, dividiéndose en numerosos brazos, tales como caño Guaraguaro, Quisiro y la quebrada La Cuchara, la cual sale al río Palmar.

### 3.2.5. Aguas Subterráneas

Aguas abajo del embalse, en el área geográfica del valle de río Matícora, existen 86 pozos distribuidos en cuatro grupos principales; el primero, alrededor de las colinas de Mene Mauroa, el segundo esparcido en las fincas de la zona de Matícora, aguas debajo de la presa, en las cercanías del puente que existe en la vía Falcón-Zulia, el tercer grupo en la zona de “Corralito” incluyendo la actual de riego y el cuarto en los alrededores de la población de San Félix. En el caso de los pozos ubicados en el tercer grupo, presentan en su mayoría, aguas de muy mala calidad, prácticamente salobres, de baja capacidad de producción y algunos de ellos utilizados como fuente de agua potable para los caseríos de la zona, aunque sus pobladores intentan en lo posible no consumirla por el alto contenido de sales y sólo la emplean para sus necesidades domésticas. Por lo cual su uso generalmente es para riego, tomando en cuenta el potencial del Río Matícora, es muy reducido tanto en calidad como en cantidad.



la fracción limo; reacción ácida a ligeramente alcalina; acumulaciones frecuentes de sales ( $\text{CO}_3\text{Ca}$  y  $\text{SO}_4\text{Ca}$ ), a profundidades variables que se acentúan con la profundidad del perfil; estructura de bloques angulares a subangulares de moderado desarrollo, topografía plana: drenaje interno y externo mediano; tipos de texturas predominantes: arcillosa y franco-arcillosa.

### 3.2.7. Geomorfología

El área de estudio comprende planicies levemente inclinadas hacia el mar, formadas por depósitos aluviales recientes provenientes del piedemonte, arrastrados y almacenados por numerosos ríos y quebradas que atraviesan la zona. El sistema está constituido por las planicies de explayamiento del Pleistoceno Medio a Superior que comprende las planicies de desbordamiento del río Matícora y el conjunto de planicies deltaicas formadas por diferentes corrientes de agua que en invierno desembocan en la costa Noroccidental del estado Falcón (Figura 3.5).



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura 3. 5.** Planicies características de la zona de estudio.

## 3.3. Geología

### 3.3.1 Evolución de la Cuenca de Falcón

En el estado Falcón se puede observar afloramientos de la edad Eoceno en la parte Occidental (González de Juana, 1938) específicamente en los Cerros de Tacal y en la parte Oriental del Alto de Guacharaca, y en la Sierra de Churuguara, donde se encuentra la sección tipo de las formaciones Santa Rita y Jarillal, hoy atribuidas al Eoceno Medio. Durante esta misma época, se produjo una extensa transgresión hacia el Oeste-Suroeste, que tiene su mejor expresión en la Formación Jarillal, mientras que la Formación La Victoria presenta características regresivas y erosionales identificadas para el Eoceno Superior. La forma particular de la cuenca fue definida en el Oligoceno Inferior, con la sedimentación de la Formación El

Paraíso, considerada como un complejo deltaico progradante. Otros elementos positivos que limitaban la cuenca, son la Cordillera de Churuguara y su prolongación por el Sur, el Alto de Dabajuro al Noroeste, formado por rocas aflorantes del Eoceno Medio y El Alto de Paraguaná-Coro, separado del Alto de Dabajuro por El Surco de Urumaco. Hacia el cierre del Oligoceno y comienzos del Mioceno la parte central de la cuenca sufrió una subsidencia rápida que la situó a profundidades de 1500 m., lo cual conlleva ambientes profundos hasta el borde sur del Alto de Dabajuro, el cual continuó parcialmente emergente. El Alto de Paraguaná, también continuó emergente, pero su prolongación El Alto de Coro se situó a profundidades adecuadas para el desarrollo de arrecifes en su borde Sur, donde avanza un pronunciado talud hacia la zona central profunda.

En el Mioceno cesó la subsidencia de la cuenca y comenzó su relleno dando lugar a la disminución de su profundidad. La sedimentación de la Formación Castillo, en el borde Sur del Alto de Dabajuro y la lente conglomerática de Guarabal en el área del arrecife de San Luís, forman parte de este relleno. La Formación Agua Clara, de aguas moderadamente profundas a someras, cubre grandes extensiones de terreno llegando en el norte hasta el Alto de Paraguaná, donde ha producido petróleo en la ensenada de La Vela; igualmente recubre en parte el Alto de Tacal-Dabajuro. La parte noroccidental de la cuenca para el Mioceno Medio, constituida por distrito Buchivacoa y Alto de Dabajuro, se caracteriza por levantamientos y plegamiento posiblemente concomitantes con movimientos contemporáneos registrados en la Cuenca del Lago de Maracaibo, los cuales en los campos Buchivacoa se reflejan en la pronunciada angularidad entre las capas de la Formación Agua Clara y los sedimentos del Grupo La Puerta, coincidentes con el pronunciado cambio litológico sobre Agua Clara. Fenómenos similares ocurrieron en la región de Tigüaje, donde la discordancia de La Puerta se hace más severa, llegando a mostrar angularidad entre el Eoceno y La Puerta con ausencia de Agua Clara. A partir de la depresión de Urumaco, este período se caracterizó por transgresiones y regresiones más locales entre los ambientes deltaicos de la Formación Cerro Pelado y los más marinos de la secuencia Socorro-Quiérales.

Observando el espesor reducido de Cerro Pelado y sus conglomerados basales en ciertas estructuras como El Saladillo (Mina de Coro), se puede deducir la presencia de pliegues de crecimiento. Durante este período en la zona Noroccidental se sedimentó la secuencia continental del Grupo La Puerta, productor de petróleo y más hacia el Este, la mencionada secuencia de Socorro-Querales y Caujarao-Urumaco que durante el Mioceno Superior grada a las formaciones Codore, La Vela y equivalentes, de carácter menos marino. Durante toda esta evolución la parte Oriental de la cuenca permaneció subsidente, con profundidades de más de 500 m hasta probablemente 1500 m. Las reconocidas como rocas madres de petróleo del Grupo Agua Salada se sedimentaron en estos periodos. Las condiciones paleogeográficas cambiaron solamente en el Mioceno Superior, cuando un levantamiento general sedimentó las calizas limoníticas impuras de la Formación Punta Gavilán, discordantes sobre el Grupo Agua Salada, en la parte Oriental y las rocas semejantes de la Formación El Veral en la región de Cumarebo. Este levantamiento marca el período de orogénesis tardía para el Mioceno Superior- Plioceno, responsable de las últimas de formaciones estructurales de Falcón, posiblemente relacionada con el levantamiento final andino y los movimientos jóvenes detectados en la Cuenca del Lago de Maracaibo, particularmente en la región de Mene Grande.

### *3.3. 2 Geología estructural de la Cuenca de Falcón*

La estructura de Falcón Occidental tiene rumbo dominante Este-Noreste marcado por numerosos pliegues y fallas cuyas estructuras incluyendo las de varios campos productores, son bastante similares, mostrando

un flanco meridional suave y un flanco norte de fuerte buzamiento fallado y hasta volcado. Las fallas mayores son longitudinales de tipo inverso buzando al Sur, pero con cierta frecuencia se aprecia un sistema secundario de orientación Noreste-Sureste, como en el área de Tigüaje. Al Este del meridiano de Cumarebo los anticlinales largos y subparalelos cambian y dan lugar a domos fallados, unas veces cruzados al rumbo predominante Este-Noreste, como el domo alargado que caracteriza el campo de petróleo de Cumarebo, prácticamente Noreste-Suroeste y otras con ejes casi Este-Oeste, como los domos de La Víana, Isidro, Aguide, etc. González de Juana (1937) sugiere que el cambio en el plegamiento así como en la dirección del fallamiento, como en la Falla de La Soledad, Noreste-Sureste, y las fallas de San Pedro y Santa Rita, Noreste-Sureste pueden ser debidos al cambio notable en el carácter de la columna sedimentaria, con un contenido mucho mayor de rocas plásticas hacia el Este. Este autor sugiere también movimiento horizontal (transcurrente) en la Falla de La Soledad.

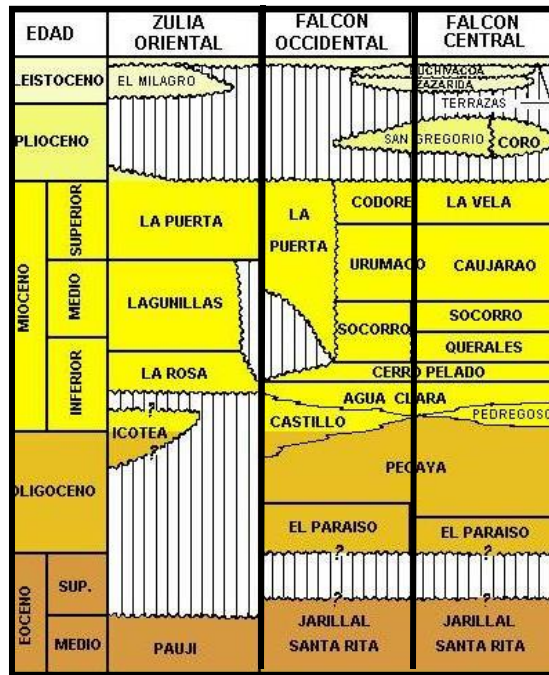
### 3.3.3 Estratigrafía regional

La Cuenca de Falcón se conoce en el Cenozoico, donde se manifiestan el Paleoceno, Eoceno, inferior, medio y superior, Oligoceno, Mioceno, Plioceno, Pleistoceno. La cuenca se diferencia en el Oligoceno y comienza a recibir sedimentos marinos hacia el centro, con frecuentes cambios de facies, marginal deltaico hacia el Suroeste de la cuenca y desarrollo de arrecifes en los bordes Norte y Sureste. En el Mioceno se depositan grandes sedimentos en el centro de la Cuenca de Falcón y los primeros sedimentos marinos en la Ensenada de La Vela, la sedimentación se va haciendo más llana hasta llegar a playera continental, con intervalos conglomeráticos del Conglomerado de Coro hacia fines del Mioceno. A principio del Mioceno la Cuenca de Falcón invade de una forma marina a la Cuenca de Maracaibo, depositando una arena basal y lutitas con ciertos horizontes locales productores de petróleo, de la Formación Santa Rosa, ambiente marino a playero en las formaciones Cerro Pelado y Socorro, zonas productoras en Falcón y la Formación Agua Clara con lutitas de ambiente marino (Figura 3.6). Finalmente, en el Plioceno se va rellenando la Cuenca de Falcón, la sedimentación tiene cada vez más influencia continental y ocurren numerosos movimientos y levantamientos que terminaron de diferenciar las Cordilleras de Los Andes y Perijá, y afectaron todas las estructuras.

Regionalmente se distinguen las formaciones siguientes (Figura 3.6):

- *Formación Mene Grande. Eoceno*

La localidad tipo se encuentra ubicada en el Campo Mene Grande, Distrito Baralt del estado Zulia. Litológicamente la Formación Mene Grande se encuentra formada por areniscas gris oscuro en capas delgadas y lutitas negras, también lentes de calizas orbitoidales. En los afloramientos, la formación se presenta bastante diaclasada y oxidada. Los espesores varían entre 75 a 475 m en la sección tipo. La Formación Mene Grande yace concordante y transicionalmente sobre la Formación Paují, el tope está truncado, quedando la formación en discordancia bajo la Formación Isnotú. Contiene una abundante fauna de foraminíferos, la cual, en parte, es similar a la de la Formación Paují infrayacente. La mayoría de los autores que estudiaron originalmente la Formación Mene Grande, consideraron que representaba el cambio a condiciones de aguas llanas, luego de la sedimentación de aguas más profundas de la Formación Paují.



**Fuente:** Modificado de Lourdes de Gamero, *Léxico Estratigráfico de Venezuela*, 1997.

**Figura 3.6.** Tabla de correlación general para la Cuenca de Falcón.

- *Formación Paují. Eoceno*

La localidad tipo se encuentra en el Río Paují, a unos 20 Km. al Sureste del campo petrolífero de Mene Grande, estado Zulia. Esencialmente, la unidad es una espesa secuencia de lutitas, claramente diferenciable de las areniscas de las formaciones Misoa infrayacente, y Mene Grande suprayacente. Las lutitas típicas tienen color gris mediano a oscuro, y son macizas a físis y concrecionarias. El contacto inferior es generalmente transicional y concordante con las capas de la Formación Misoa. El contacto superior es generalmente discordante y angular, con capas más jóvenes y sólo en el área del campo Mene Grande, se reconoce el contacto concordante y transicional con la Formación Mene Grande. La rica y variada fauna de foraminíferos indica que la formación a través del área de deposición reconocida, fue depositada en aguas limpias y profundas.

- *Formación El Jarillal. Eoceno Medio Tardío a Eoceno Tardío Temprano*

Se describe como una secuencia lutítica mas ó menos arenosa, de color gris oscuro a abigarrado, siendo los primeros 50 m. de la secuencia muy fosilíferos, con moluscos y crustáceos; la parte superior de la Formación Jarillal en la localidad tipo es de lutitas estériles, la cual, se encuentra ubicada a lo largo de la vieja carretera Piedra Grande-Baragua. Pittelli y Molina (1989), describieron una secuencia monótona de

lutitas, cerca del 90% de la formación, y algunos intervalos delgados de areniscas y ocasionales calizas lodosas hacia la base. Las lutitas son gris oscuro a negro, duras, ocasionalmente limosas y calcáreas. La parte basal se caracteriza por una alternancia de areniscas calcáreas, micáceas, de color gris claro, de grano fino a muy fino, moderadamente escogidas; lutitas calcáreas negras, con escasos restos biogénicos, y calizas grises lodosas y arenosas, con macrofósiles. Ocasionalmente, a través de este intervalo, se encuentran gránulos de cuarzo, chert y fragmentos ferruginosos. El único contacto inferior observado en el subsuelo fue en el pozo Pica Pica-1X siendo este concordante y transicional sobre la Formación Santa Rita. El contacto superior es también concordante y transicional con la Formación La Victoria.

- *Formación El Paraíso. Oligoceno Temprano a Medio*

Aflora en los anticlinales que se encuentran al Sur y al Oeste de Pecaya. Se divide en dos miembros informales. El miembro inferior está constituido por lutitas oscuras con capas delgadas y nódulos de ferrolita que meteorizan marrón rojizo a oscuro, areniscas de tipo “sal y pimienta”, calcáreas, moderadamente endurecidas con granos de ftanita negra que meteoriza a gris marrón, en una matriz calcárea blanca y blanda con capas delgadas y nódulos de ferrolita que meteorizan a marrón rojizo oscuro y areniscas ferruginosas calcáreas bien cementadas; son comunes los lentes de conglomerados con guijarros de ftanita. Estas areniscas se agrupan en paquetes continuos de hasta 50 m. de espesor.

El miembro superior consta de lutitas no calcáreas, gris violáceas oscuras, con areniscas cuarzosas muy endurecidas, de colores diversos y ocasionales carbones color gris oscuro que meteorizan a rojo, con frecuentes capas y nódulos de ferrolita e intercalaciones de limolitas calcáreas de color gris oscuro, a veces fosilíferas, areniscas duras de color gris a marrón, con cemento silíceo en capas de pocos centímetros hasta 2 m. de espesor, con marcas de oleaje y a veces restos de plantas, lignito y pocas lentes de calizas.

- *Formación Pecaya. Oligoceno Medio a Mioceno Temprano*

Esta unidad, que es una facies predominante lutítica de color gris oscuro, generalmente físciles y limolíticas, localmente calcáreas, con ocasionales interestratificaciones de areniscas y calizas bioclásticas, en capas delgadas. Estas intercalaciones se han citado principalmente de la región Norte, cerca de la Sierra de San Luís, donde también aparecen grandes concreciones irregulares de material calcáreo, de color ocre amarillento, de hasta más de 2 m. de diámetro. Hacia los bordes Occidental y Sur de la cuenca, la formación contiene capas de arenisca parduzca, limolitas nodulares de color gris oscuro, areniscas glauconíticas y en algunos casos, intercalaciones de calizas. También se encuentran nódulos de arcillas ferrolítica de unos 10 cm. de diámetro, alineados según la estratificación. La Formación Pecaya contiene un miembro arenoso completamente incluido dentro de ella, denominado Miembro San Juan de La Vega, que aflora al Norte del centro de la cuenca, en las cercanías de Río Mitare. Hacia la base de la formación, en la parte central de la cuenca, las lutitas son calcáreas, meteorizando a gris claro, en ocasiones casi blanco y los afloramientos están cubiertos de pequeños fragmentos de calcita. Localmente, también hacia la base de la unidad, se encuentran algunos lentes de caliza fuertemente lenticular, de los cuales la caliza de Bocaína es uno de los más extensos. A lo largo de una faja relativamente estrecha, que empieza directamente al Sur de La Cruz de Taratara y termina al Este de Pueblo Nuevo, afloran una serie de cuerpos ígneos de carácter basáltico, que intrusionan la Formación Pecaya.

- *Formación Castillo. Oligoceno a Mioceno Temprano*

La localidad tipo aflora en Cerro Frío, unos 5 Km. al Este de Cerro Castillo, a unos 27 Km. al Sur de Dabajuro. Se caracteriza por una secuencia litológica altamente variable, lateral y verticalmente y por la presencia de gruesas capas de areniscas y conglomerados. El espesor de la Formación Castillo es variable a lo largo de su área de afloramientos. En afloramientos hacia la cuenca abierta, la Formación Castillo yace concordantemente sobre las Lutitas de Pecaya. Hacia el borde de la cuenca, la Formación Castillo descansa con discordancia angular sobre rocas eocenas e infrayace de manera concordante, a la Formación Agua Clara. El contacto Castillo-Agua Clara es diacrónico hacia el borde Sur de la cuenca, haciéndose progresivamente más joven a expensas de la Formación Agua Clara. Se presenta una extensa lista de macroforaminíferos, foraminíferos béticos y moluscos fósiles. Se considera que la unidad se depositó en diferentes ambientes, encontrándose facies de aguas someras y salobres en las cercanías de los cerros Castillo y Frío; con facies más marinas hacia la cuenca.

- *Formación La Rosa. Mioceno*

La sección tipo se encuentra descrita en los campos petrolíferos de La Rosa, al Sur de Cabimas, tiene un espesor variable relacionado con su sedimentación pero en general varía de 180 a 250 m. Está dividida en cuatro miembros, caracterizados por areniscas arcillosas poco consolidadas, de colores grises a marrones, lutitas gris verdoso interlaminadas con areniscas. También se encuentran lignitos y nódulos de siderita. El Miembro Santa Bárbara, capas delgadas de calizas duras en la parte Sur del campo costanero de Bolívar. Los contactos de la Formación La Rosa están definidos para la parte inferior con una discordancia angular sobre la Formación Misoa o sobre la Formación Icotea y el contacto superior es transicional con la Formación Lagunillas. Hacia el Noreste del lago, La Rosa se correlaciona con la Formación Agua Clara, de la Cuenca de Falcón.

- *Formación Lagunillas. Mioceno*

La formación en la parte Oeste del Lago de Maracaibo. En el área del lago central y cuatro para la costa Oriental, pero en términos generales, la formación consiste en areniscas poco consolidadas, arcillas, lutitas y algunos lignitos. Las características individuales de los miembros reflejan el cambio de ambiente marino somero, a deltáico y fluvial. Los espesores varían entre 300 m. para la localidad tipo y de 960 m. para el lago central. En la localidad tipo y en la mayor parte de la Cuenca de Maracaibo, la Formación Lagunillas suprayace concordantemente a la Formación La Rosa, excepto en aquellas áreas donde, ésta no se depositó y reposa directamente sobre la discordancia del Eoceno.

- *Formación Isnotú. Mioceno*

Esta formación está compuesta en su mayoría por arcillas, alrededor del 65%, con numerosas areniscas intercaladas y capas subordinadas de arcilla laminar, carbón y conglomerado. Las arcillas son macizas pero blandas, de color gris claro, corrientemente abigarradas en rojo, púrpura y amarillo y localmente carbonáceas; las areniscas son de color variable, principalmente blancas a gris claro y se presentan en capas de 2 a 3 m. de espesor. En general el espesor en los afloramientos es bastante constante alrededor de 11.000 m, disminuyendo de Norte a Oeste. El contacto inferior es concordante y transicional sobre la Formación Palmar, que difiere de ella por su color y mayor contenido de areniscas y lutitas, mientras que

su contacto superior es concordante y transicional con la Formación Betijoque, que se diferencia por sus conglomerados, areniscas parduzcas y ausencia de colores abigarrados. La formación carece casi totalmente de fósiles, salvo restos indeterminados de plantas.

- *Formación Agua Clara. Mioceno Temprano*

La localidad tipo se encuentra ubicada en las cercanías del poblado de Agua Clara, en el Río Mitare, estado Falcón. En su localidad tipo, la formación se describe formada por lutitas ferruginosas, concrecionarias, arenosas y yesíferas de color gris negruzco, con intercalaciones delgadas de areniscas limosas y calcáreas, localmente glauconíticas y fosilíferas, de color verdoso a gris. Aflorando 1.320 m de la Formación Agua Clara, en sección incompleta. En el área tipo, el contacto inferior de la unidad es concordante con la Formación Pedregoso, pero cerca del borde Occidental, la Formación Agua Clara descansa sobre la Formación Castillo. El contacto superior es concordante con la Formación Cerro Pelado. Además se publica una extensa lista de moluscos y foraminíferos fósiles, las lutitas de la mitad superior de la formación contienen una variedad de foraminíferos bénticos, que hacia arriba pasan a conjuntos dominados por ostrácodos y foraminíferos arenáceos y mencionan que, de acuerdo a la evidencia sedimentológica y micropaleontológica, la Formación Agua Clara es una unidad marina que, en su parte superior, fue sedimentada en un ambiente de escasa profundidad pasando hacia arriba a un ambiente de prodelta.

- *Formación Cerro Pelado. Mioceno Temprano*

La localidad tipo se encuentra ubicada en los cerros Pelado y Hormiga, al Norte de Pedregal, entre Agua Clara y Urumaco, estado Falcón. La Formación Cerro Pelado en su área tipo está compuesta de areniscas intercaladas con lutitas y algunos lignitos, especialmente abundantes en su parte superior. Las areniscas son ferruginosas, de colores gris, gris marrón y marrón rojizo, de grano fino a grueso, moderadamente duras, y se disponen en capas delgadas a masivas, lajosadas, con estratificación cruzada y marcas de oleaje. Las lutitas son de color gris azul a gris oscuro, arenosas, yesíferas, micáceas, ferruginosas y carbonosas. El espesor es algo más de 1.000 m. en la localidad tipo y disminuye a unos 800 m. al Sur de Mene de Mauroa. Geográficamente se extiende a lo largo del frente de montañas de Falcón Occidental, desde la región de Mene de Mauroa al Oeste, hasta el Río Mitare al Este. El contacto inferior es concordante y transicional con la Formación Agua Clara, y el superior igualmente concordante y transicional con la Formación Querales. La Formación Cerro Pelado es pobremente fosilífera. Ocasionalmente se encuentran raras conchas de moluscos y las lutitas contienen una microfauna muy pobre, predominantemente de foraminíferos arenáceos típicos de aguas salobres. La microflora, al contrario, es abundante y variada. El ambiente interpretado para esta unidad, es el de un delta progradante.

- *Formación Socorro. Mioceno Medio*

La localidad tipo se encuentra en los alrededores del caserío El Socorro, al Sur de Urumaco, Distrito Democracia, estado Falcón. La Formación Socorro en la quebrada El Paují (parte Oriental del Surco de Urumaco) en tres miembros informales: el miembro inferior que consiste en una secuencia alterna de areniscas, limolitas y arcillas. El miembro medio de litología alternante de calizas, areniscas, arcillitas, limolitas y niveles carbonosos y el superior presenta características similares al miembro inferior, pero contiene unos escasos niveles calcáreos. La unidad tiene un espesor que supera los 1500 m. Aflora desde

la región Oriental del Distrito Buchivacoa, en Falcón Occidental, hasta el Sur de Coro y tiene contactos inferior y superior concordantes y transicionales con las formaciones Querales y Urumaco, respectivamente. Se menciona algunos moluscos fósiles de esta formación, indicando que la parte inferior es pobremente fosilífera, pero a partir del intervalo medio se encuentran microfaunas bien preservadas acompañadas de foraminíferos béticos diversos.

- *Formación Caujarao. Mioceno Medio a Plioceno Temprano*

La sección tipo, tiene unos 1.220 m. de espesor y se encuentra ubicada en el Río Coro, incluyendo la represa colonial sobre el río, cerca de Caujarao, a 3 Km. al Sur de Coro, Distrito Miranda. Consiste principalmente de lutitas arcillosas, con intercalaciones de margas y calizas fosilíferas, topográficamente muy prominentes, y algunas capas de arenas de grano fino en su parte inferior. En dirección Occidental, en la región situada entre Sabaneta y Coro. La Formación Caujarao como calizas y material calcáreo en general. Las areniscas calcáreas se distribuyen hacia la base y el tope de la secuencia, las calizas hacia la parte media, las limolitas calcáreas y delgados intervalos carbonosos se encuentran hacia la base, aunque muy escasos; las areniscas se distribuyen a lo largo de toda la secuencia, observándose sus mayores espesores hacia la parte media, asociadas a calizas; las lutitas se encuentran distribuidas en toda la sección y son ocasionalmente calcáreas.

- *Formación Urumaco. Mioceno Tardío*

La localidad tipo se encuentra ubicada al Sur y Norte de la población de Urumaco, a unos pocos kilómetros al Oeste de la misma, Distrito Democracia, estado Falcón. La sección tipo se compone de tres miembros que constituyen la secuencia litológica: el primero de ellos, corresponde a un miembro inferior *lutítico-limoso*, un segundo miembro *lutítico-arenoso-calcáreo*, y el miembro *superior lutítico-arenoso*. El espesor de la sección tipo varía entre 1.700 y 2.000 m., de acuerdo a la selección de los contactos. La Formación Urumaco descansa concordante y transicionalmente sobre la Formación Socorro y es pobremente microfósilífera, con foraminíferos arenáceos y escasos calcáreos, típicos de aguas salobres.

- *Formación El Veral. Plioceno Temprano a Tardío*

La localidad tipo se encuentra en el extremo Occidental de la Fila El Veral, a unos 500 m. al Norte del Campo Cumarebo, Distrito Zamora, estado Falcón. Litológicamente se compone de arcillas glauconíticas intercaladas con calizas detríticas, con granos de cuarzo y ftanita; algunas intercalaciones de arcilla contienen foraminíferos. Localmente presenta una capa basal con cantos de calizas, areniscas y ftanitas (Payne, 1951). En la fila El Veral, la unidad tiene unos 210 m., al Oeste de esta localidad aumenta de espesor; al Este de Campo Cumarebo alcanza unos 360 m; en el Río Cumarebo. Además se identificaron el contenido faunal de las lutitas y margas de la Formación El Veral, mencionando foraminíferos planctónicos, béticos y moluscos mal preservados. La Formación El Veral se sedimentó sobre la plataforma media y externa. Tratándose inicialmente, de depósitos de margen de plataforma, transgresivos hacia arriba, le siguen depósitos de subida relativa del nivel del mar y termina terminando en un contacto superior discordante, correspondiente al límite de secuencia.

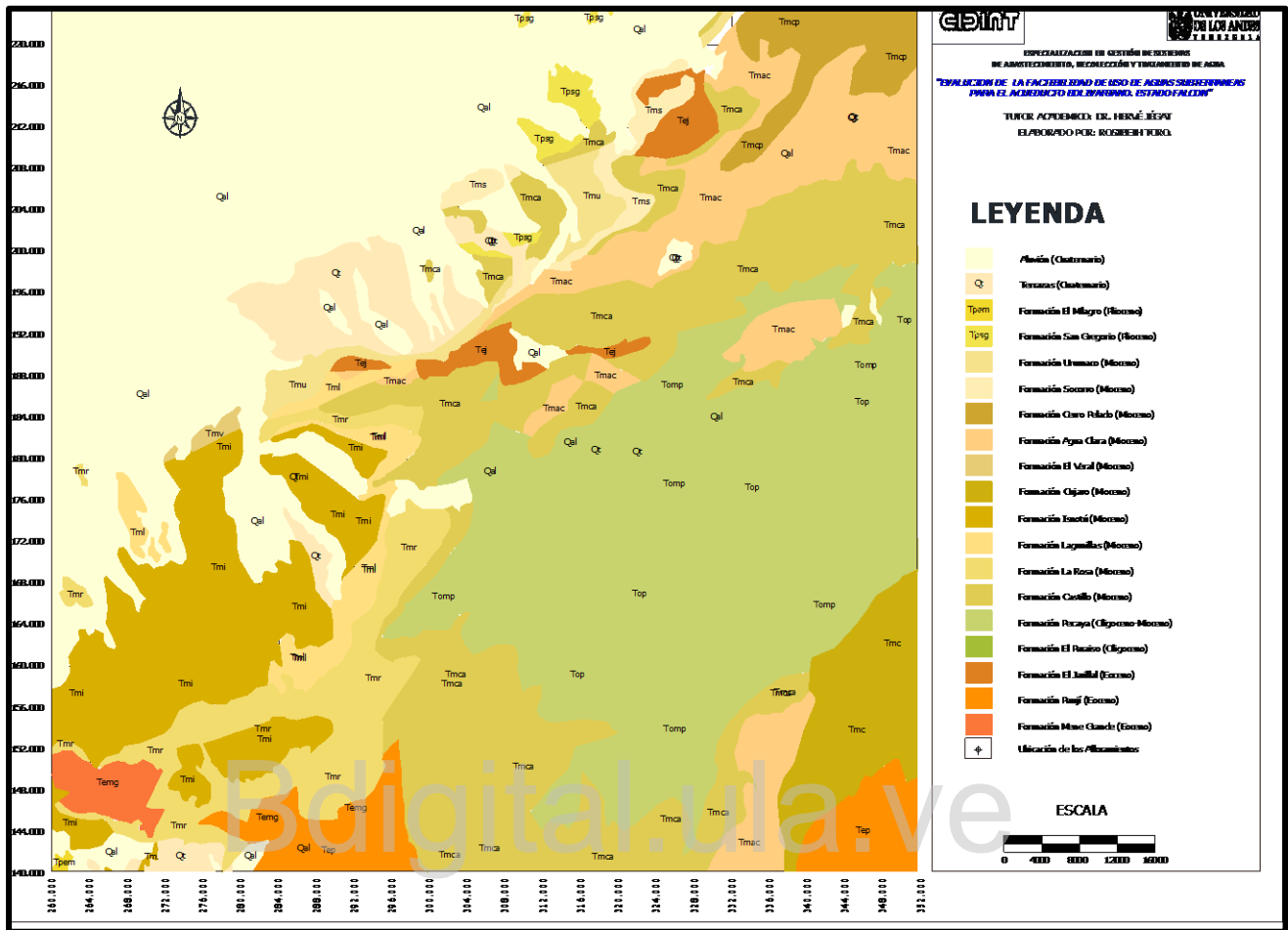
- *Formación San Gregorio. Plioceno Tardío*

El estratotipo está localizado a 2 Km. al Este del pueblo de San Gregorio, desde Ciénaga Vergeles hasta el sinclinal del Río Seco, distritos Democracia y Miranda, estado Falcón. La unidad fue descrita por primera

vez como consistente de limolitas, areniscas, conglomerados, arcillitas ocasionales y capas fosilíferas. Stainforth (1962) define y describe los tres miembros reconocibles por la presencia de un intervalo fosilífero intermedio. El Miembro Vergel está compuesto de aproximadamente 85% de limolitas, 5% de areniscas y 10% de conglomerados, con cantidades menores de arcillitas. Los conglomerados son lenticulares. El Miembro Cocuiza, se caracteriza por la presencia de numerosas capas fosilíferas conspicuas separadas por limolitas. Las capas fosilíferas usualmente son arenosas, no consolidadas a poco endurecidas, pero algunas son coquinas con poca arena asociada. El Miembro Río Seco se caracteriza por presentar limolitas, areniscas gruesas a conglomeráticas, con estratificación cruzada y conglomerados que coronan las pequeñas cuevas que destacan en la topografía. En la sección tipo, la unidad tiene 572 m. de espesor total. La Formación San Gregorio suprayace discordantemente al Miembro Algodones de la Formación Codore e infrayace discordantemente a sedimentos recientes. Esta formación solo presenta fósiles en el intervalo marino conocido como Miembro Cocuiza.

- *Formación El Milagro. Plioceno- Pleistoceno*

La localidad tipo de la formación se encuentra en el Barrio El Milagro de la ciudad de Maracaibo, estado Zulia. Sobre el Arco de Maracaibo, la formación consiste de arenas friables, finas a gruesas, muy micáceas, de color crema a pardo-rojizo, limos micáceos de color gris claro, interestratificados con arcillas arenosas, rojas y pardo-amarillentas y lentes lateríticos bien cementados. Presentándose dos capas de arcillas arenosas y limosas, con abundantes fragmentos y troncos de madera silicificada. Estas capas cubren horizontes caracterizados por abundantes nódulos de hierro y formación laterítica, que fueron interpretados como paleosuelos. El paleosuelo superior separa la gruesa unidad inferior de la sección arenosa, característica de la Formación El Milagro. El paleosuelo inferior está desarrollado sobre el centro del arco. La unidad varía en espesor de 0 a 33 m. en el centro del Arco de Maracaibo, y aumenta rápidamente hacia el Sur, sin embargo en el subsuelo se desconoce su espesor. No se menciona la presencia de fósiles en la formación, excepto fragmentos de madera silicificada, abundantes en la base que incluyen troncos enteros de árboles. Según Sutton (1946), estos sedimentos son de aguas dulces y llanas, depositados a una distancia considerable del área fuente.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.7. Mapa geológico de la cuenca del río Matucora.

### 3.3.4 Geología estructural local

En la región occidental de la cuenca el movimiento transpresional se manifiesta por tres fallas transcurrentes dextrales principales: la Falla Oca, la Falla de El Mayal y la Falla de Ancón de Iurre, que hacia el Oeste convergen en la depresión de El Tablazo. La Falla Oca separa en Falcón Occidental, dos regiones diferentes: un área al Norte de la falla, Bloque Dabajuro, que se extiende hacia el Golfo de Venezuela, y un área al Sur, hasta el frente de montañas.

El área del Norte se muestra con características de una sedimentación tranquila y de poca actividad tectónica, con excepción de la parte Este donde se desarrolla un sistema de fallas normales. El área al Sur muestra rasgos de una actividad tectónica mayor, causada por desplazamiento lateral. Comprende los bloques El Mayal, Santa Cruz, Cocuiza. En El Mayal se encuentra el Campo Tigüaje, y en Santa Cruz los campos de Mauroa. El Bloque Santa Cruz se extiende en dirección Este a Oeste y está limitado al Norte y

al Sur por las fallas de El Mayal y Ancón de Iturre. En el extremo Sureste del Bloque se encuentran los campos El Mene, Media y Hombre Pintado.

La estructura dominante en el Bloque Santa Cruz son pliegues anticlinales suaves que se reflejan sobre el Mioceno superior (Formación La Puerta), y una gran falla normal Noreste-Suroeste de buzamiento Norte casi vertical, con desplazamiento de unos 4° a 6°. Los campos de Mauroa se encuentran asociados a esta falla. La estructura de El Mene, es un anticlinal asimétrico, con su flanco más inclinado al Norte, cortado por la gran falla longitudinal. En Hombre Pintado el anticlinal de la Formación Agua Clara se encuentra entre dos bloques del Eoceno levantados (Figura 3.8).

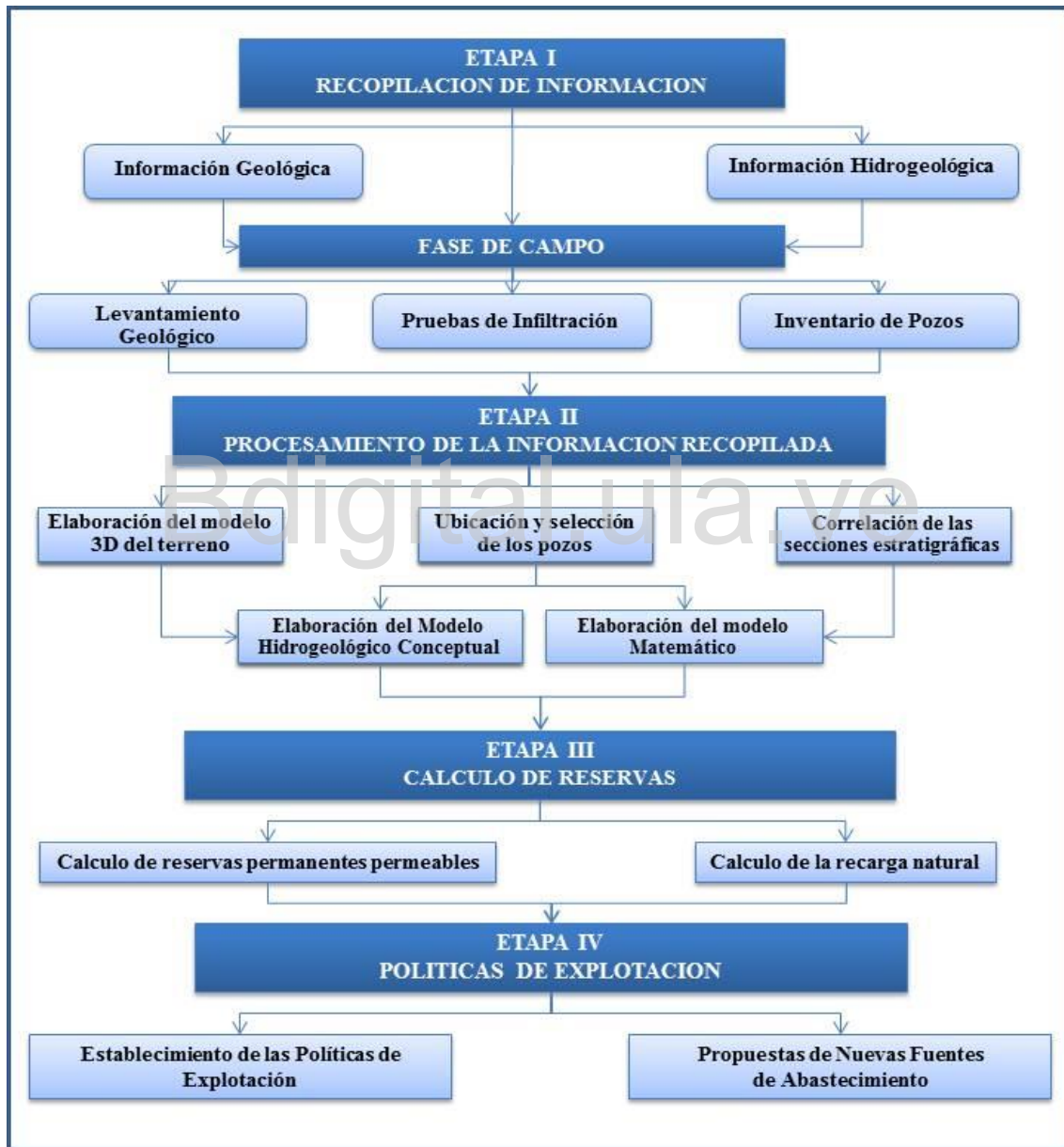


**Fuente:** Código Geológico de Venezuela (1997).

**Figura 3.8.** Principales Bloques formados por las fallas presentes en el área.

## CAPITULO 4 METODOLOGIA

La metodología empleada para cumplir con los objetivos planteados en el presente estudio, es del tipo descriptiva, la cual contempla cuatro etapas (Figura 4.1), que incluye todas las actividades y procedimientos que se realizaron para generar los resultados, interpretar los mismos y posteriormente redactar el informe final.



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 4. 1.** Esquema metodológico para el desarrollo del estudio.

## 4.1. Etapa I. Recopilación de Información Básica

Se basó en una búsqueda y revisión exhaustiva de antecedentes referentes al tema y/o al área en estudio, cuyas fuentes fueron de origen impresa o electrónica disponible en diferentes instituciones públicas y privadas, como la Escuela de Ingeniería Geológica, Mapoteca de la Escuela de Geografía, CORPOANDES, INGEOMIN, INPARQUES y la Fundación Programa Andes Tropicales-Departamento de Geografía Aplicada. De la Cartografía Nacional a escala 1:100.000 se utilizaron las cartas: (5949), (6049), (5948), y (6048); para delimitar la zona de estudio, cada una de las hojas fue debidamente georeferenciada y digitalizada en formatos \*.dwg y \*.dxf de Map WipWindows 4.3, con referencia al Datum REGVEN.

### 4.1.1. Información geológica

Para esta actividad se empleó la información de trabajos anteriores realizados en el área, además de los mapas geológicos del SIGATLAS y de la UGSS en colaboración con Escuela Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela y la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, a escala 1:25.000. La interpretación fotogeológica se realizó a través de imágenes satelitales de acceso libre como lo son las *Google Earth* y *LANDSAT\_7 ETM*, esta última se adquirió a través de la página <http://glcf.umiacs.umd.edu/data/>, permitiendo reconocer la topografía, los patrones de drenaje, depósitos recientes, aspectos litológicos y estructurales, identificación de vías de acceso y puntos de interés social como viviendas y sembradíos. Fueron usadas conjuntamente con los mapas topográficos y geológicos mencionados anteriormente.

### 4.1.2. Información hidrogeológica

La información de los pozos pertenecientes a la zona de estudio fue suministrada por el Prof. Hervé Jégat a través de la base de datos del Sistema de Información Geográfica del Atlas Hidrogeológico de Venezuela (SIGATLAS). Los datos climatológicos de precipitación, evaporación y escorrentía fueron proporcionados por la Empresa Noroccidental de Mantenimiento y Obras Hidráulicas, C.A., ENMHOCA en su proyecto “Estimación de la Recarga por lluvia en el acuífero de Maticora”.

### 4.2.1. Fase de Campo

- **Levantamiento Geológico:** Con la finalidad de obtener una descripción geológica general que incluya el área de estudio y sus alrededores, se realizaron varios levantamientos litoestratigráficos a lo largo de carreteras en diferentes sectores, los cuales presentaban la mayor cantidad de información útil para el desarrollo del estudio. Para ello se aplicaron métodos convencionales de geología de superficie, los cuales incluyen descripción de los afloramientos georeferenciación a través del Sistema de Posicionamiento Global (GPS), brújula, fotografías aéreas y mapas topográficos.
- **Pruebas de Infiltración:** Las pruebas de infiltración constituyen una importante herramienta para conocer la riqueza o pobreza de los mantos acuíferos que se forman debido a la infiltración de la misma, así como la capacidad de infiltración del suelo dependiendo de su tipo, composición y

caracterización. El propósito principal de estas pruebas consistió en determinar la proporción en que el agua penetra en la tierra, en función del tiempo. El método utilizado para estas pruebas fue el de anillo simple a nivel variable. Aun cuando es uno de los experimentos más simples que se pueden realizar para medir tasa de infiltración, su precisión es considerablemente buena.

- **Inventario de Pozos:** Aquí se incluyeron visitas a algunos pozos de extracción de aguas subterráneas (activos o no); donde se efectuaron las siguientes mediciones y determinaciones: Geoposicionamiento con GPS, aforo del caudal, medición del nivel estático o el dinámico, temperatura, pH, conductividad eléctrica y se respaldó con fotografías. De igual manera se revisó la base de datos SIGATLAS, donde se obtuvo información de 86 pozos ubicados en la zona de estudio.

## 4.2. Etapa II. Procesamiento de la información

### 4.2.1. Elaboración del Modelo 3D del Terreno

A partir del mapa topográfico de Cartografía Nacional del estado Falcón a escala 1:100.000, hojas (5949), (6049), (5948), y (6048), se procedió a escanear el área de estudio y a digitalizarlo utilizando el programa *ArcMap 10*, creando capas individuales (*shapefile*) con los siguientes nombres: curvas de nivel, curso de aguas principales, curso de aguas secundarias, centros poblados y vías. Dicha digitalización constituyó el mapa de superficie.

### 4.2.2. Elaboración del Modelo Geológico

Se realizó con la finalidad de evidenciar rasgo geológico que se pudieran relacionar con el comportamiento de aguas en superficiales y subterránea, e igualmente utilizarlo como base para la realización de otros mapas temáticos. Para ello se utilizó la herramienta *AutoCAD 2010* basándose en la metodología de *layers*.

### 4.2.3. Ubicación y Selección de los Pozos

Una vez finalizado el inventario de pozos, se procedió a la ubicación de los mismos en el mapa de superficie del área de estudio de acuerdo a sus coordenadas utilizando la herramienta *Surfer 10.0*. Posteriormente se cargaron los datos de los pozos con y sin litología al programa a través del comando *Worksheet*, para realizar los mapas de puntos utilizando la opción *Map – Post Map* y con la opción *Overlay Maps* representarlos en el mapa geológico del área, con el fin de ilustrar la distribución de estos y definir la orientación de las secciones estratigráficas según los datos litológicos.

### 4.2.4. Correlación de las Secciones Estratigráficas

Se realizaron 3 perfiles litológicos con la ayuda de la herramienta *AutoCAD 2010*, con el fin de efectuar una descripción detallada de la litología presente en la zona y observar el comportamiento del acuífero. Para ello se ubicaron los pozos con litología en el mapa geológico y posteriormente se observó la

distribución espacial, para interpretar como podría haber sido el comportamiento del acuífero en el área de estudio.

#### *4.2.5. Elaboración del Modelo Hidrogeológico Conceptual*

Luego de la determinación de las secciones geológica, con la información obtenida de los pozos en el SIGATLAS se construyó el modelo hidrogeológico. Para ello se elaboró una tabla con las profundidades de las distintas capas que constituyen el modelo hidrogeológico, siendo éste construido empleando el programa *Surfer 10.0*.

#### *4.2.6. Generación del modelo matemático*

Se desarrolló con ayuda del programa *Visual ModFlow 4.2* donde se utilizó el método de diferencias finitas que permite pasar de la ecuación diferencial a un sistema de  $n$  ecuaciones lineales con incógnitas, que es resuelto de forma matricial por métodos implícitos. El programa requiere ciertos parámetros de entrada para desarrollar el modelo como: ubicación y características de los pozos, geometría del acuífero, mecanismos de recarga y descarga, condiciones de borde y condiciones iniciales de niveles para obtener a través de este modelo dos escenarios de funcionamiento: condiciones actuales y futuras (10 años).

### **4.3. Etapa III. Calculo de Reservas**

#### *4.3.1. Calculo de las Reservas Permanentes Permeables*

Las reservas permanentes se calcularon una vez obtenido el Modelo Hidrogeológico Conceptual, ya que a través de las capas permeables e impermeables que lo definen, es que se generó un aproximado del volumen total de la roca, para luego mediante una fórmula calcular las reservas de agua en el subsuelo.

#### *4.3.2. Calculo de la Recarga Natural*

Para este punto se utilizaron los datos arrojados por la Empresa Noroccidental de Mantenimiento y Obras Hidráulicas, C.A., ENMHOCA, en su trabajo titulado “Estimación de la recarga por lluvia en el acuífero de Matícora”, el cual se efectuó mediante la aplicación del modelo de simulación hidrológica de escala de tiempo mensual SIMULACI.

### **4.4. Etapa IV. Políticas de Explotación**

Esta etapa refleja el cumplimiento o no de los objetivos fijados al inicio de la investigación, confrontando la simulación con la realidad actual del embalse y estableciendo finalmente las políticas de explotación y propuesta de nuevas fuentes de abastecimiento.

### **4.5. Conclusiones y Recomendaciones**

Con la finalidad de consolidar los conocimientos adquiridos y analizados a lo largo de la investigación, se sintetizan los criterios reflejando sus aciertos, dificultades y/o recomendaciones para investigaciones posteriores relacionadas con el tema.

## CAPITULO 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Etapa I. Recopilación de Información Básica

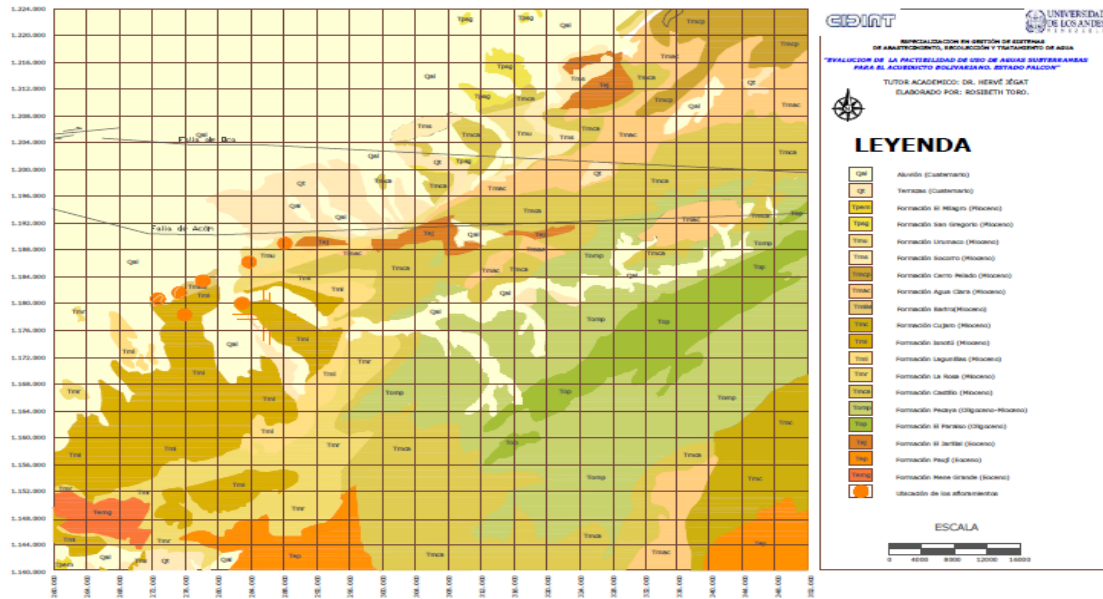
#### 5.1.1. Levantamiento Geológico

Se realizó de manera general un recorrido al área de estudio y aguas arriba al embalse Matícora, con la finalidad de verificar las características litológicas aflorantes en la zona (tamaño de grano, textura, etc.); corroborando así las unidades geológicas aflorantes en superficie, sus contactos y su disposición.

**Tabla N° 5.1.** Resumen de ubicación de los afloramientos observados en campo. *Datum REGVEN.*

| Afloramiento N° | Este    | Norte     | Cota |
|-----------------|---------|-----------|------|
| 1               | 281.352 | 1.181.269 | 131  |
| 2               | 280.926 | 1.189.070 | 54   |
| 3               | 292.634 | 1.179.002 | 152  |
| 4               | 288.839 | 1.176.291 | 162  |
| 5               | 278.929 | 1.180.806 | 119  |
| 6               | 278.530 | 1.170.920 | 123  |
| 7               | 289.249 | 1.176.696 | 187  |

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia

**Figura 5.1.** Ubicación de los afloramientos observados en campo.

- **Afloramiento N°1:** Ubicado en los alrededores del Embalse Matícora específicamente entre las coordenadas 281.352 E, 1.181.269 N y con cota 131 m.s.n.m., se caracteriza por la presencia de areniscas macizas, compactas de grano medio, pertenecientes a la Formación Isnotú, de color ocre, con algunos rasgos aparentes de meteorización en el tope. La vegetación característica del afloramiento es de tipo xerófila, con la presencia de algunos cactus (Figura 5.2).



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 5.2.** Afloramiento de la Formación Isnotú. Estado Falcón.

- **Afloramiento N°2:** Ubicado en la carretera que une los poblados de Barracas y Mene de Mauroa, específicamente entre las coordenadas 280.926 E, 1.189.070 N y con cota 54 m.s.n.m., se caracteriza por la presencia de areniscas macizas, de grano medio a fino, pertenecientes a la Formación Urumaco, de color ocre, muy meteorizadas; con alto contenido de hierro y acanaladuras producto de la intervención del hombre (Figura 5.3).



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 5.3.** Evidencias de acanaladuras. Afloramiento de la Formación Urumaco. Estado Falcón.

Bdigital.ula.ve

C.C.Reconocimiento



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 5.6.** Lateritas presentes en La Formación Isnotú.

- **Afloramiento N°4:** Se encuentra ubicado a orillas de la carretera específicamente entre las coordenadas 288.839 E, 1.176.291 N y cota 162 m.s.n.m., de base a tope se compone de areniscas blancas de tamaño medio las cuales presentan disyunción en bola y estratificación sigmoidal, cruzada y convoluta, seguido por intercalaciones de capas limosas con disyunción prismática, tubificaciones y areniscas blancas, meteorizadas de grano grueso. Hacia el tope del afloramiento se distinguen conglomerados polimícticos con alto contenido de oxidación, presenta rumbo N15°E y buzamiento de 16°NO (Figura 5.7). Por sus características litológicas pertenece a La Formación Bariro.



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 5.7.** Afloramiento de la Formación Bariro. Estado Falcón.

- **Afloramiento N°5:** Con espesor aproximado de 15 m, ubicado en 278.929 E, 1.180.806 N y cota de 119 m.s.n.m., se compone por paquetes de areniscas que varían desde 10 cm hasta 1m de espesor, en general los mismos se observan de grano medio, color blanco, meteorizadas y de base a tope se percibe variabilidad en su estructuras por lo que se pueden distinguir estratificación cruzada, en surco y planar. Su color de meteorización es ocre y presenta concreciones ferruginosas hacia la base del mismo (Figura 5.8).



**Fuente:** Elaboración propia

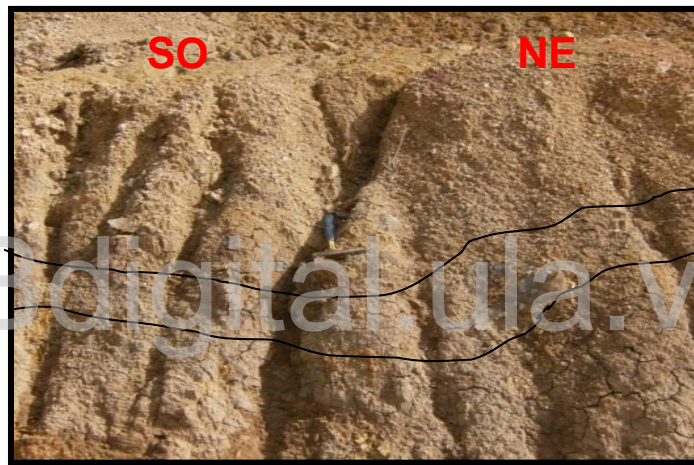
**Figura 5.8.** Afloramiento de la Formación Bariro. Estado Falcón.

- **Afloramiento N°6:** Se encuentra ubicado dentro de las instalaciones del Restaurant La Cascada (Figura 5.9), específicamente entre las coordenadas 278.530 E, 1.170.920 N y cota 123 m.s.n.m., hacia la base del afloramiento se puede observar paquetes limo-arcillosos, de color gris claro, meteorizado y con un alto contenido de cristales de yeso (Figura 5.10), azufre y nódulos de hierro. Hacia el tope del afloramiento está compuesto por areniscas de grano medio, color blanco, estratificación cruzada meteorizada, diaclasada y presentan intercalaciones láminas de hierro (Figura 5.11). Muestra y rumbo N85°O y buzamiento 33°SE.



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 5.9.** Afloramiento de la Formación Urumaco. Estado Falcón.



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 5.10.** Cristales de Yeso. Formación Urumaco. Estado Falcón.



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 5.11.** Tope de la Formación Urumaco. Estado Falcón.

- **Afloramiento N° 7:** Se encuentra ubicado entre las coordenadas 289.249 E, 1.176.696 N y cota 187 m.s.n.m., está compuesto por paquetes de areniscas de grano medio, de color blanco y meteorizado. Presentan estratificación cruzada y convoluta, láminas de hierro, hacia la base del afloramiento se puede observar paquetes de lutitas, de colores gris claro y meteorizados (Figura 5.12).



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 5.12.** Afloramiento de la Formación Bariro, Estado Falcón.

Con lo observado podemos indicar que el área de estudio desde el punto de vista estructural corresponde a la Plataforma de Dabajuro, la cual comienza en la región de Mene Mauroa, en el límite occidental del área y se termina al este, a la altura del anticlinal parcialmente de La vela. Hacia el norte con la costa del Golfo de Venezuela, generalmente resalta por un cordón de Dunas litorales y al sur por el contacto con la Cordillera Montañosa Septentrional del anticlinorio de Falcón por medio de filas monoclinales. Igualmente se encuentra influenciada por la cercanía a las fallas del Ancón y la Orca (Figura 5.13).

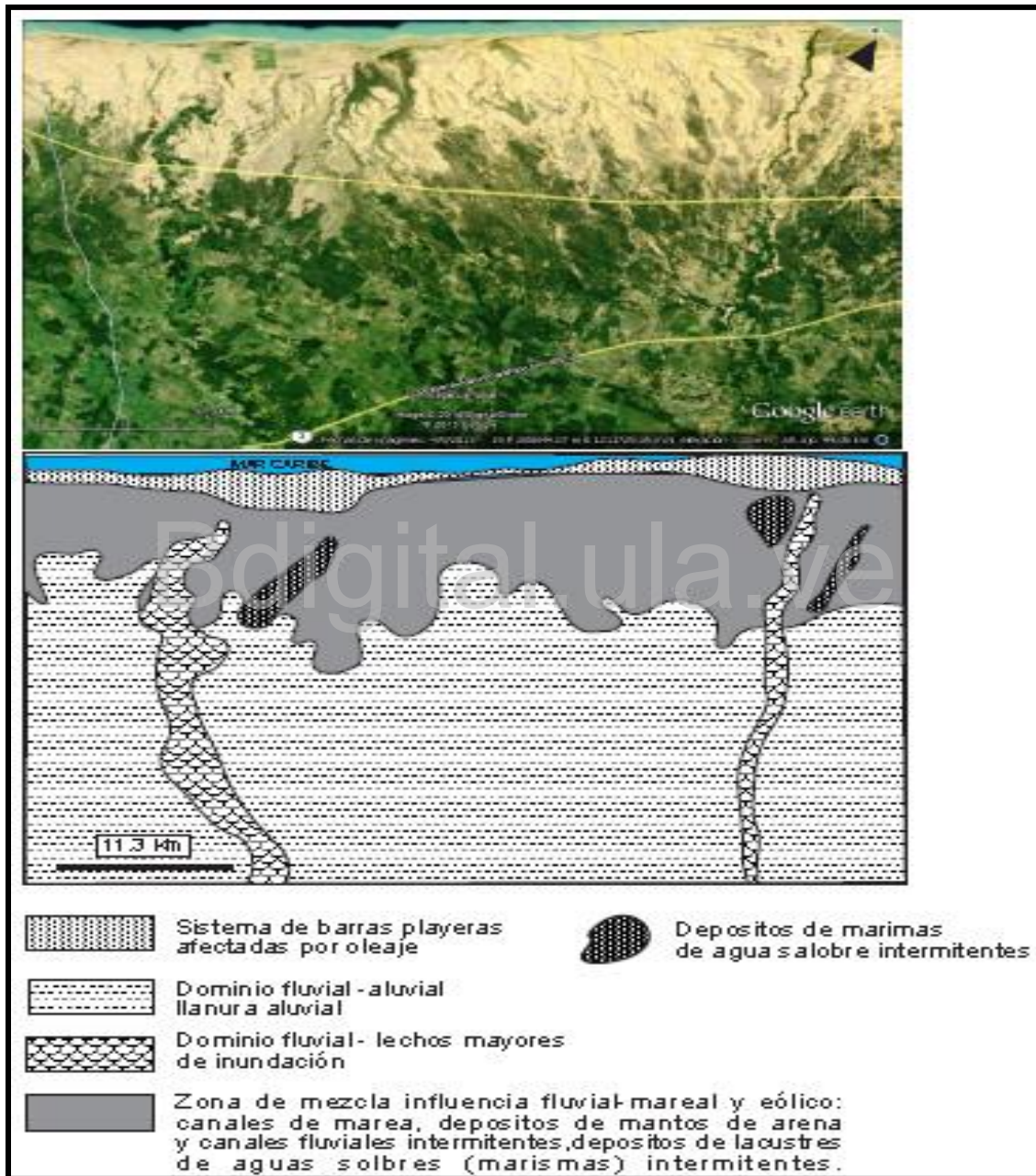
Desde el punto de vista topográfico se observa las planicies aluviales muy poco desarrolladas culminadas por pequeños deltas que forman los ríos Cocuiza, Matícora y Borojó. Desde el punto de vista geomorfológico con ayuda de imágenes satelitales libres obtenidas a través del programa *Google Earth* se observan formaciones de pie de monte costero que consiste en extensas tierras bajas, llanas a ligeramente inclinadas en forma de glacis.

Bdigital.ula.ve

C.C.Reconocimiento

zona montañosa no alcanza ni el 0,2 %, lo que este hecho traduce que solo las partículas finas (limos y arcillas) puedan ser transportadas.

- **Medios litorales**, arreglados por la corriente marina litoral y por las acciones eolicas observable claramente a la orilla de la costa y sobre todo al este de la zona.



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 5.14.** Mapa geomorfológico de la zona de estudio.

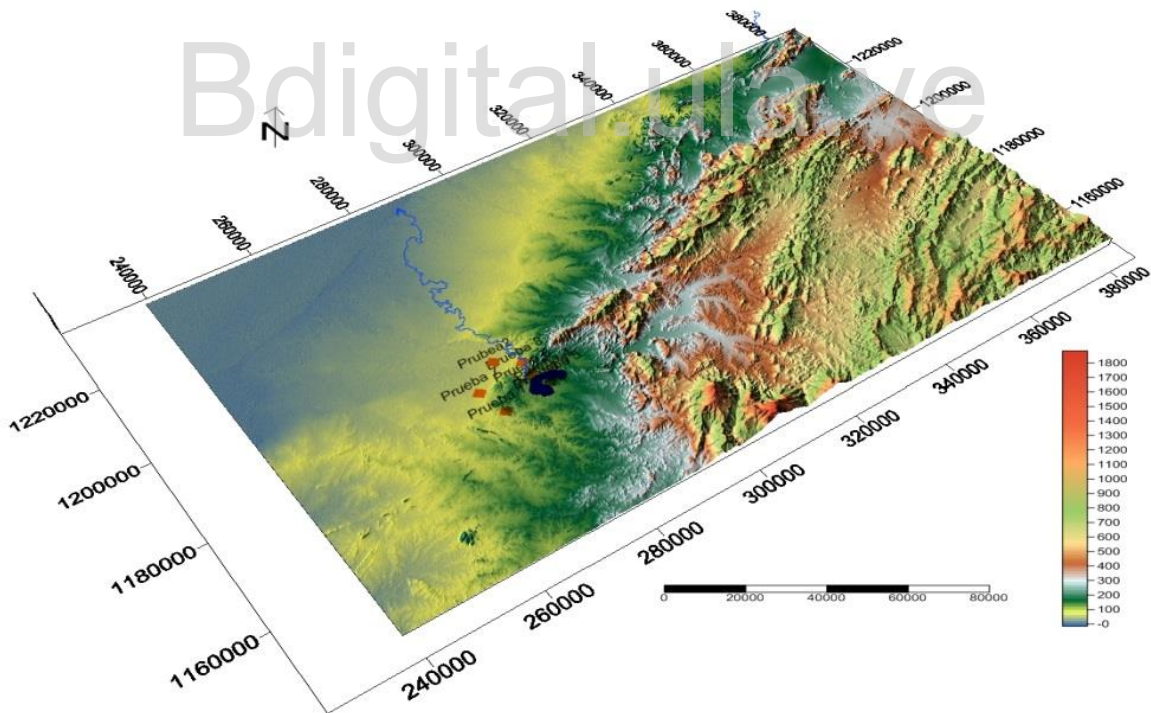
### 5.1.2. Pruebas de Infiltración

A continuación se describen los pasos seguidos para la elaboración de doce (12) pruebas de infiltración en diez (10) lugares diferentes (Figura 5.15), dentro del área de estudio (Anexo 1):

**Tabla 5.2.** Ubicación de las pruebas de infiltración. Coordenadas UTM (*Datum WGS 84*).

| Nº        | Este (m) | Norte (m) |
|-----------|----------|-----------|
| Prueba 1  | 279637   | 1187643   |
| Prueba 2  | 275209   | 1176844   |
| Prueba 3  | 281728   | 1189427   |
| Prueba 4  | 285849   | 1179550   |
| Prueba 5  | 286833   | 1178197   |
| Prueba 6  | 283020   | 1181419   |
| Prueba 7  | 273942   | 1182957   |
| Prueba 8  | 283616   | 1184679   |
| Prueba 9  | 284680   | 1178077   |
| Prueba 10 | 279637   | 1187643   |

**Fuente:** Elaboración propia



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 5.15.** Ubicación de las pruebas de infiltración

1. Se buscaron los lugares más planos y característicos, para instalar el infiltrómetro (Figura 5.16), sus coordenadas están presentes en la Tabla 5.2. Antes de instalarlo se procedió a limpiar las impurezas que pudieran intervenir el flujo normal del agua.



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 5.16.** Lugar adecuado para la instalación del infiltrómetro.

2. Se enterró el infiltrómetro unos cuantos centímetros de la forma más vertical posible. Para esto posiciona el anillo en el lugar seleccionado, martillándolo firmemente en los bordes con el mazo (Figura 5.17). Para que no se suelten los bordes opuestos a los que están siendo golpeados, se apoya un pie en éstos. Lo anterior debe hacerse paulatinamente en todos los bordes, así el cilindro entrará de manera uniforme.



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 5.17.** Modo de instalación del infiltrómetro.

Bdigital.ula.ve

C.C.Reconocimiento

5. En total se realizaron 12 pruebas de infiltración distribuidas de forma aleatoria en el área de estudio, a continuación en la Tabla 5.3 se presenta un ejemplo de los datos obtenidos de una de ellas. El resto de los datos se muestran en el Anexo 1.

**Tabla 5.3.** Prueba de infiltración

| TIEMPO ACUMULADO (min) | PROF ACUMULADA (mm) |
|------------------------|---------------------|
| 0                      | 0                   |
| 2                      | 3.1                 |
| 4                      | 4.9                 |
| 6                      | 7.4                 |
| 11                     | 9.9                 |
| 16                     | 13                  |
| 21                     | 16.8                |
| 31                     | 20.7                |
| 41                     | 26.7                |
| 51                     | 32.8                |
| 61                     | 39.1                |
| 71                     | 45                  |
| 86                     | 51.7                |
| 101                    | 58.6                |
| 141                    | 67.1                |

**Fuente:** Elaboración propia

#### 5.1.2.1. Cálculos de infiltración

Existen varias ecuaciones empíricas para expresar la velocidad de infiltración como una función del tiempo, que pueden ser representadas por una curva de forma hiperbólica. La ecuación de *KOSTIAKOV (1932)* expresa la velocidad de infiltración en un punto:

$$I = a \cdot t^b \quad (\text{Ecuación 7})$$

Dónde:

**I:** es la velocidad de infiltración (mm / min) o (mm / h)

**t:** es el tiempo de infiltración en min o en hora.

**a:** es un coeficiente, el cual representa la velocidad de infiltración.

**b:** es un exponente adimensional, siempre es negativo con valores que van de 0 a -1.

$$I_{cum} = A \cdot t^B \quad (\text{Ecuación 8})$$

Los valores de A y B son para la prueba de infiltración N° 1: 1.773 y 0.743 respectivamente.

$$a = A * (b+1)$$

$$a = A * B \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$b = (b + 1) \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$a = 1.773 * 0.743 = 1.24$$

$$b = (B - 1) = (0.743 - 1) = -0.30$$

$$I = 1.24 * t^{-0.30} \text{ (mm/min)}$$

$$I = 31.80 * t^{-0.21} \text{ (mm/h)}$$

**Ib infiltración básica, Tb tiempo básico.**

$$Ib = a * (-600 * b)^b \quad (\text{Ecuación 11})$$

$$Ib1 = 0.24 \text{ mm/h}$$

$$Tb = (-600) * (b) \quad (\text{Ecuación 12})$$

$$Tb1 = (-600) * (-0.30)$$

$$Tb1 = 180 \text{ min.}$$

De la misma manera se realizó para el resto de las pruebas y luego se calculó el promedio. Los valores de Infiltración Acumulada en la Tabla 5.4:

A partir de los resultados anteriores se obtuvo el valor de la Infiltración Básica promedio y del Tiempo Básico promedio para el área en estudio mostrado en la tabla siguiente:

|                              |                                   |                    |
|------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| <b>Ib = a*tb<sup>b</sup></b> |                                   | <b>0.1972 mm/h</b> |
|                              | <b>Ib = a*(-600b)<sup>b</sup></b> |                    |
| <b>tb = -10*b</b>            |                                   | <b>3.17 min</b>    |

**Tabla 5.4.** Infiltración Acumulada

| PRUEBA<br>n° | ECUACIÓN                   | A<br>(mm) | B<br>(mm) |
|--------------|----------------------------|-----------|-----------|
| 1            | $I_{cum} = 1.773t^{0.743}$ | 1.77      | 0.7       |
| 2            | $I_{cum} = 1.424t^{0.717}$ | 1.42      | 0.7       |
| 3            | $I_{cum} = 3.182t^{0.777}$ | 3.18      | 0.7       |
| 4            | $I_{cum} = 2.361t^{0.794}$ | 2.36      | 0.7       |
| 5            | $I_{cum} = 1.489t^{0.874}$ | 1.49      | 0.9       |
| 6            | $I_{cum} = 1.027t^{0.740}$ | 1.03      | 0.7       |
| 7            | $I_{cum} = 0.954t^{0.878}$ | 0.95      | 0.9       |
| 8            | $I_{cum} = 1.732t^{0.841}$ | 1.73      | 0.8       |
| 9            | $I_{cum} = 0.211t^{0.492}$ | 0.21      | 0.5       |
| 10           | $I_{cum} = 0.952t^{0.142}$ | 0.95      | 0.1       |
| 11           | $I_{cum} = 1.659t^{0.761}$ | 1.66      | 0.8       |
| 12           | $I_{cum} = 1.502t^{0.772}$ | 1.50      | 0.7       |
| PROMEDIOS    |                            | 1.5       | 0.7       |

Este resultado nos indica baja infiltración para la zona por su cantidad de material arcilloso o fino en la superficie

### 5.1.3. Inventario de Pozos

Aquí se incluyeron visitas a algunos pozos de extracción de aguas subterráneas activos o no; donde se efectuaron las siguientes mediciones y determinaciones:

- Geoposicionamiento con GPS.
- Aforo del caudal, si el pozo se encontraba en funcionamiento.
- Medición del nivel estático o el dinámico, dependiendo de si el pozo se encontraba en funcionamiento o apagado.
- Temperatura, pH y conductividad eléctrica.
- Fotografías.

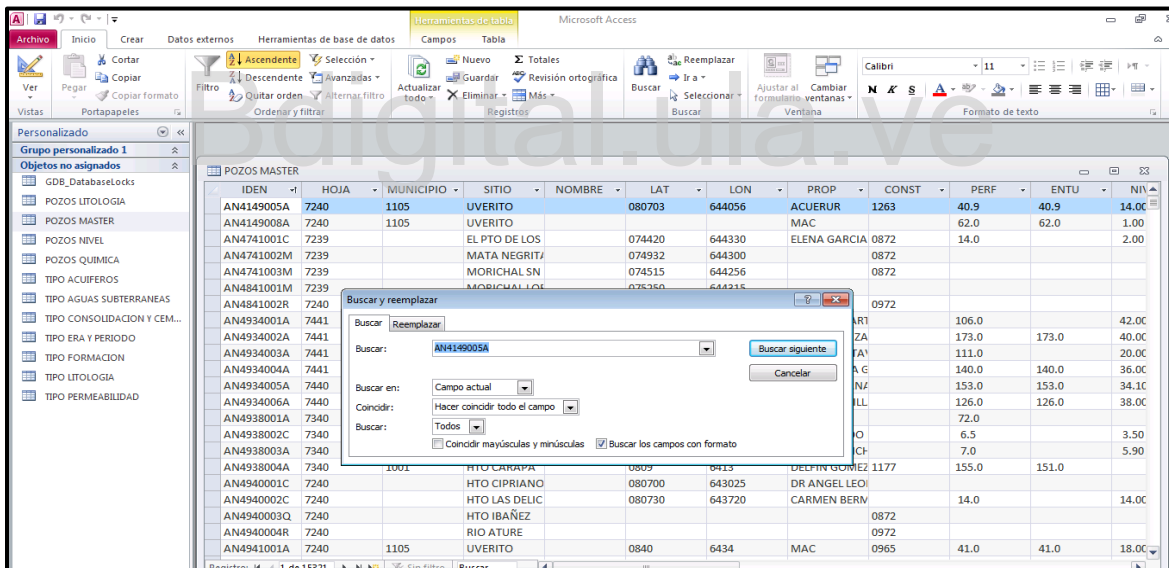
De igual manera se revisó la base de datos **SIGATLAS** (Figuras 5.20), donde se obtuvo información de 86 pozos ubicados en la zona de estudio (Figura 5.21). En la misma, cada pozo está identificado con un código de diez caracteres (FA6679010A) de los cuales los dos primeros se refieren al Estado (FA= Falcón), los siguientes cuatro dígitos (6679) representan la cuadrícula (o sección extensa) a la que pertenece el pozo, luego tres dígitos que identifican el número del pozo dentro de la sección extensa (010), y finalmente un carácter literal que señala la condición de funcionamiento del pozo (A= en funcionamiento para el momento del inventario). Entre la información del inventario general se tiene 18 pozos con información litológica, solo 33 pozos con caudal, 13 pozos con nivel estático y 33 pozos con datos químicos (pH, conductividad eléctrica, Total de Sólidos Disueltos, etc.), fueron descartados aquellos pozos que no tenían ningún tipo de información o que se encontraban fuera del área de estudio.

En el Anexo 2, se presenta el resumen del inventario de campo, indicando las coordenadas Este y Norte con referencia al Datum La Canoa, cota, información de pH, temperatura (T), conductividad eléctrica (CE), nivel estático (NE) y caudal (Q) y nivel dinámico (ND). Los datos litológicos mostrados en la Tabla 5.5, fueron digitalizados en el programa *AutoCad 10* para una mejor visualización de los mismos (Figura 5.22 a y b). En ellos se indicó la identificación del pozo, la profundidad de cada una de las capas presentes y el tipo de material.

**Tabla 5.5.** Información litológica de los pozos aguas abajo del embalse Matícora.

| IDEN | DESDE (m) | HASTA (m) | LITOLOGÍA        |
|------|-----------|-----------|------------------|
| P77  | 0         | 24        | Cantos           |
|      | 24        | 50        | Arcilla          |
|      | 50        | 90        | Arena fina       |
|      | 90        | 100       | Arcilla compacta |

**Fuente:** Elaboración propia



**Fuente:** Elaboración propia

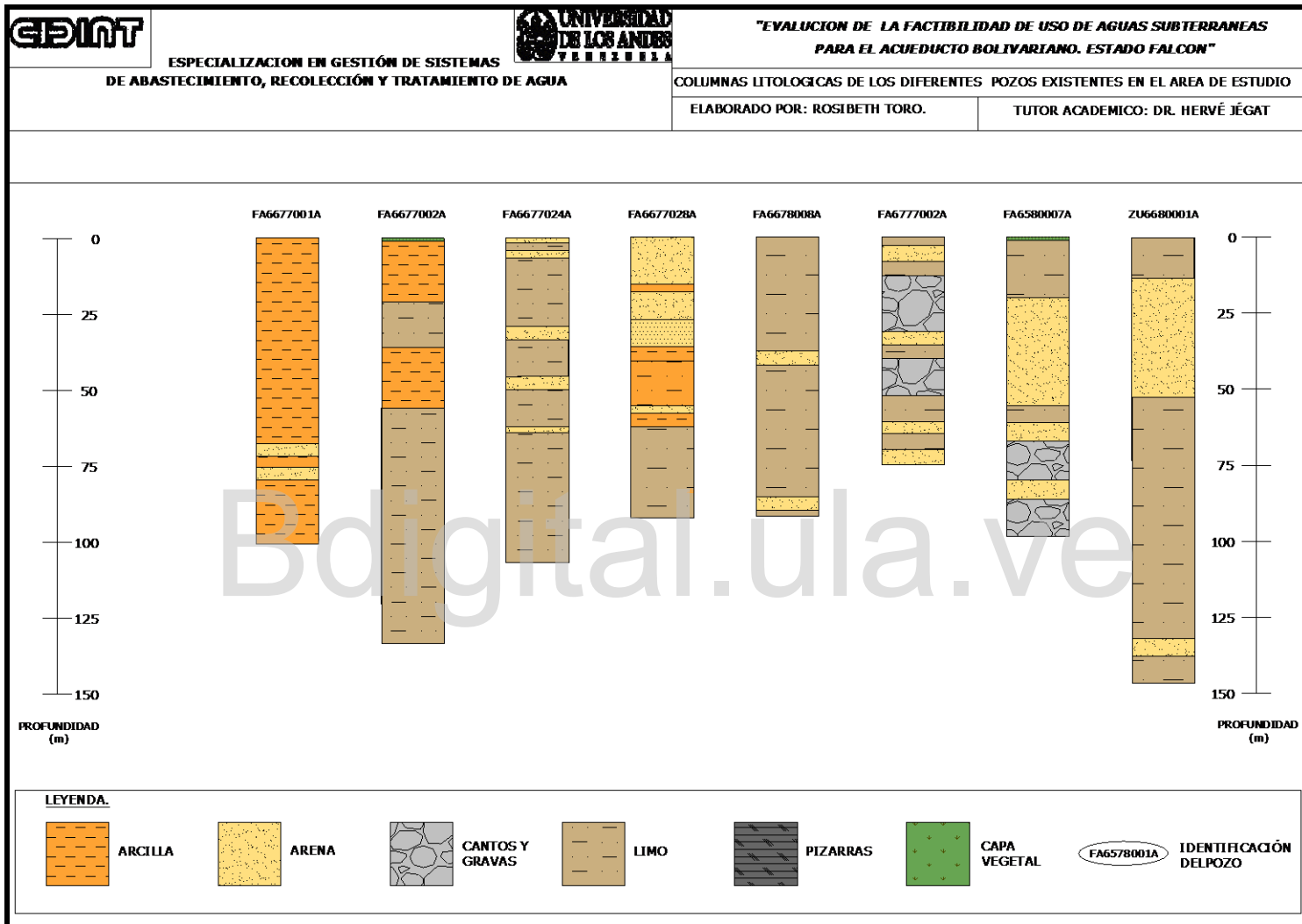
**Figura 5.21.** Información de pozos obtenida por el CIDIAT con la Herramienta Access.

Bdigital.ula.ve

C.C.Reconocimiento

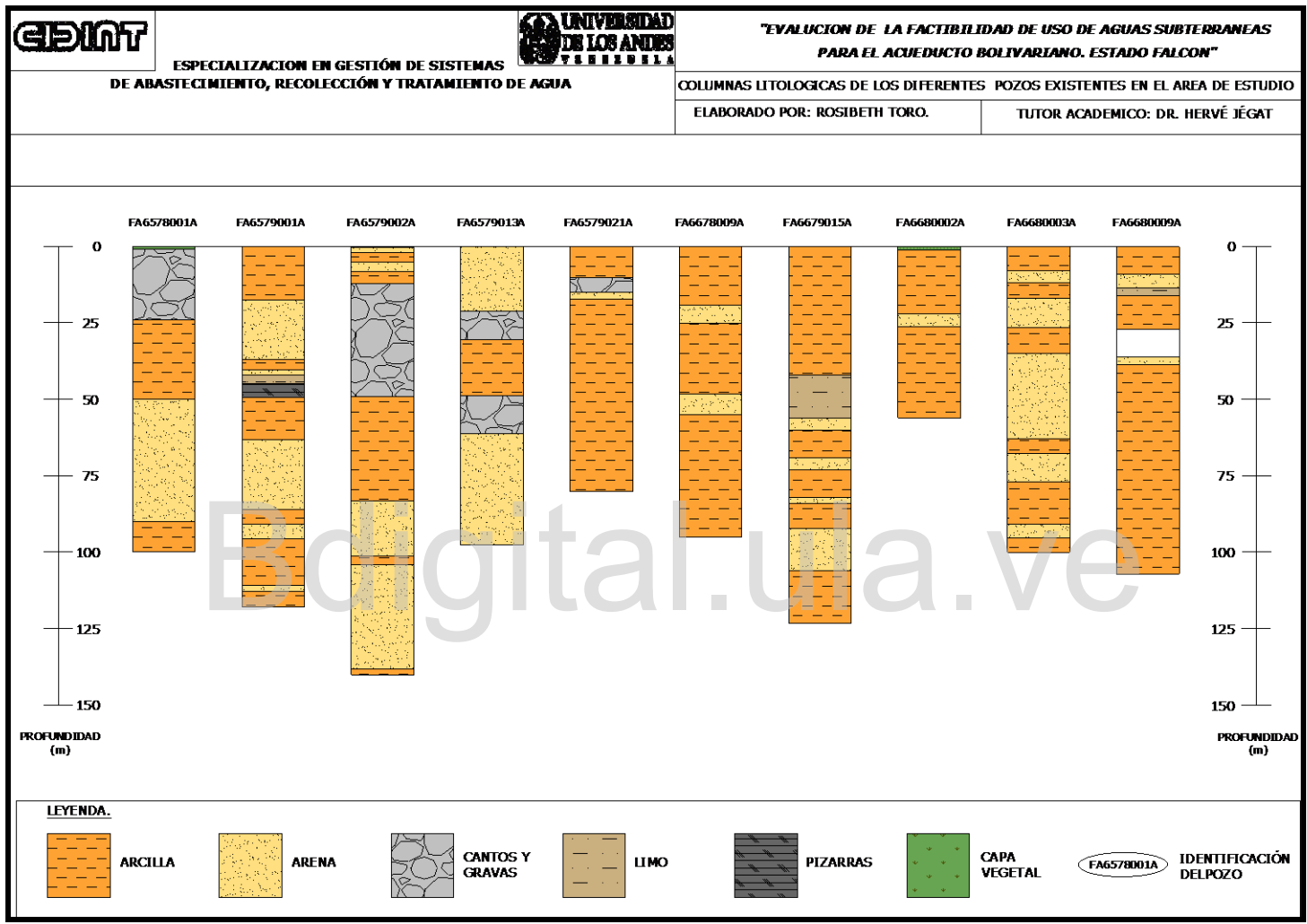
Bdigital.ula.ve

C.C.Reconocimiento



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.23. a) Representación de la litología de los pozos encontrados.



Fuente: Elaboración propia

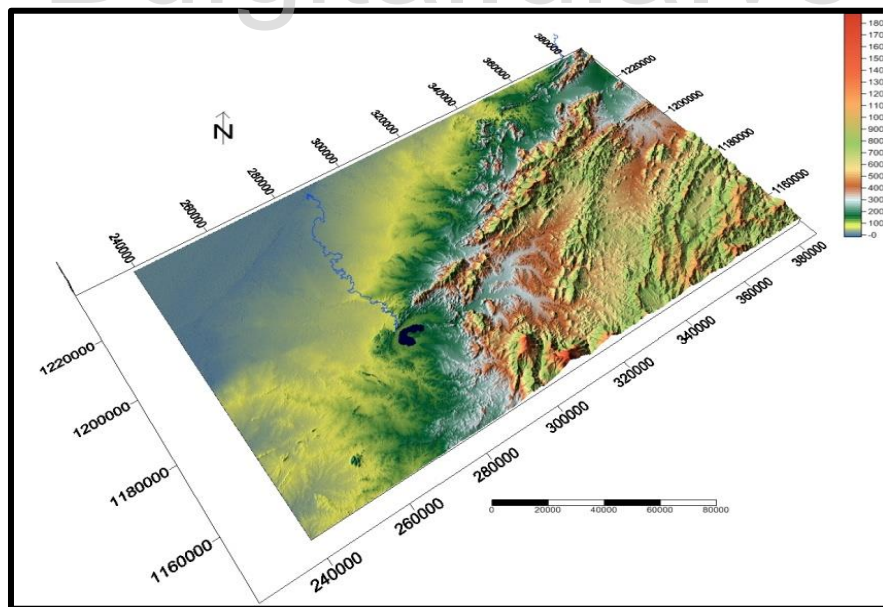
Figura 5.23. b) Representación de la litología de los pozos encontrados.

De la realización del inventario de pozos en la zona podemos observar la carencia de la supervisión por parte de un organismo estatal, todos son pozos privados o construidos por la comunidad por lo que no garantizan la demanda poblacional, igualmente la ubicación de los mismo se encuentran en el margen izquierdo del río y aguas abajo al embalse donde se concentran la mayoría de los centros poblados y la carencia de vital líquido. La litología se encuentra representada en su mayoría por material fino (limo y arcillas) con intercalaciones de gravas y arenas.

## 5.2. Etapa II. Procesamiento de la Información

### 5.2.1. Modelo 3D

Para la elaboración del modelo tridimensional del terreno se creó una base de datos y se generó con el programa *ArcMap 10* un mapa de superficie. Posteriormente se transformó dicho mapa en un formato aceptable para ser empleado en el programa *Golden Software Surfer 10.0*, donde a través del método de interpolación de la información se dio origen al modelo tridimensional (Figura 5.24). En él se puede observar claramente geformas como los piedemonte y la planicie aluvial generados en las adyacencias de las elevaciones montañosas formadas principalmente por las formaciones geológicas descritas anteriormente con edades Terciarias en forma de monoclinales, rodeadas de depósitos recientes donde se localizaron los pozos. Esta planicies aluvionales han sido originadas principalmente por los depósitos de los ríos localizados en toda la zona de estudio, lo que ha ocasionado la presencia en el subsuelo, no de cursos fósiles como podría imaginarse, sino de mantos clásticos relativamente continuos, extendidos a todo lo largo y ancho de la planicie, sin que se haya notado algún cambio sustancial con la profundidad.



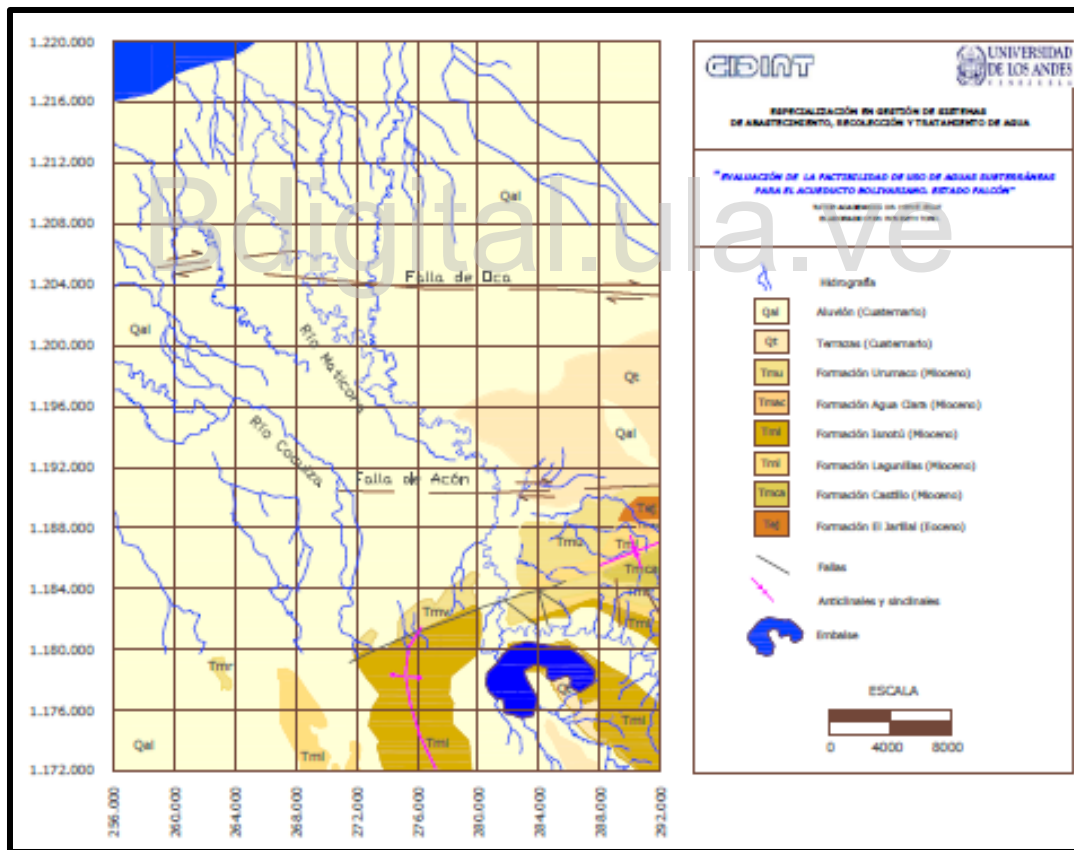
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.24. Modelo 3D del área de estudio.

### 5.2.2. Elaboración del Modelo Geológico

Se construyó un mapa geológico de la zona en estudio y sus alrededores ubicando en las zonas altas, es decir, aguas arriba del embalse con la finalidad de observar todo el material erosionado y corroborar así las hipótesis planteadas y que a la vez sirviera de base para otros mapas temáticos (Figura 5.25), utilizando la herramienta *AutoCAD 2010* y basándose en la metodología de *layers*.

En este mapa se observa que la litología de la mayoría de las formaciones geológicas son materiales arenosos y arcillosos, deformados, fracturados y meteorizados, lo cual genera su fácil transporte a lo largo de la cuenca, a baja velocidad y con pendientes que no superan el 5%. Esto como consecuencia del desplazamiento que sufrió la cuenca de Falcón en el Terciario con una dirección este-oeste, dejando un movimiento transpresional y dos fallas importantes transcurrentes dextrales como la falla Ancón de Iturre y Oca-Chirinos, siendo esta última la que más influencia se observa. Se desconoce la profundidad total de las capas afectas sin embargo estudios realizados por FUNVISIS en los alrededores del pueblo de Buchivacoa señalan que en trincheras realizadas se pueden ver la deformación del material litológico a 10 metros de profundidad.

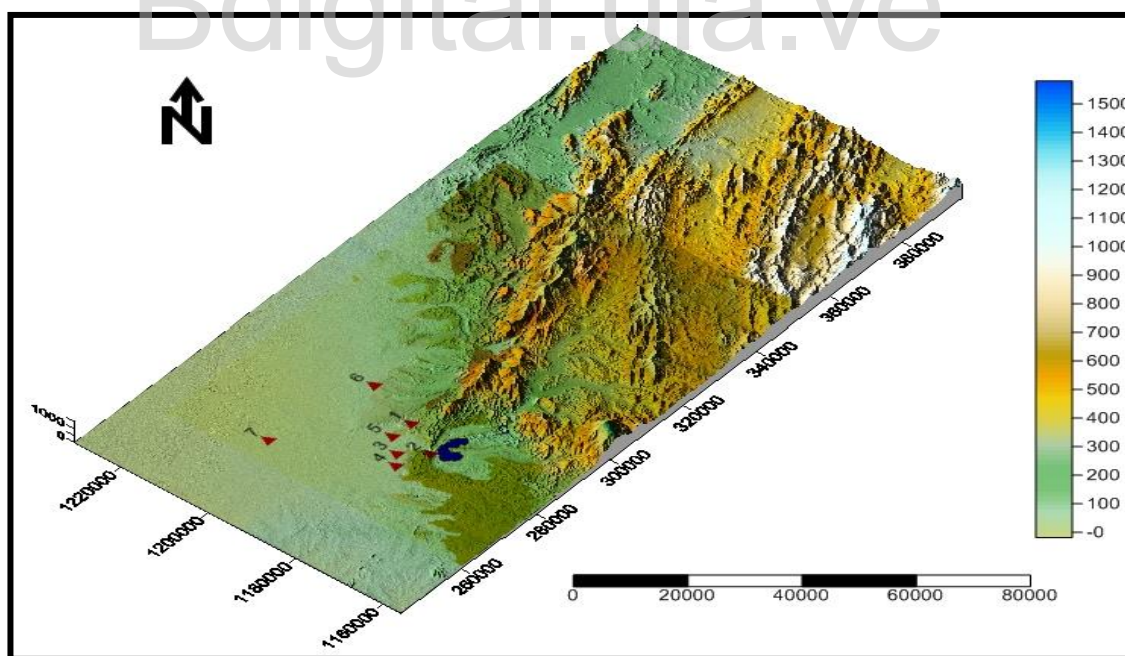


Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.25. Modelo Geológico del área de estudio.

### 5.2.2. Correlación de las secciones

Una vez realizadas las 18 columnas con las respectivas litologías de cada pozo, se procedió a clasificar y agrupar de acuerdo a su composición en capas impermeables (color ocre) y permeables (color azul) con la finalidad de inferir el tipo de acuífero. Luego se procedió a ubicar los pozos en el modelo 3D para establecer la dirección de las secciones a realizar (Figura 5.26), con ello se logró establecer tres (3) secciones, con una separación comprendida entre 0,6 Km. y 3,9 Km, que nos permitieran observar la continuidad de las capas en el subsuelo. Se tomó como el menor porcentaje de error al momento de definir una sección estratigráfica y que la separación entre los pozos no debe exceder de 4 Km. La visualización de la correlación de las capas fue hecha igualmente con el programa AutoCAD 2010, utilizando los valores de las cotas superficiales de los pozos para definir un *Datum* a partir del cual se estableció la escala adecuada en la dirección vertical que sería utilizada en todas las secciones transversales. Luego, se estableció el espaciamiento entre los pozos para determinar la escala horizontal, que venía en metros (según las coordenadas UTM) y fue convertida a kilómetros de modo que se obtuviesen valores de menor apreciación decimal, con el fin de facilitar la determinación de la graduación. La analogía de los rangos de permeabilidad fue el criterio utilizado para trazar las correlaciones, y desde el punto de vista geológico las secciones fueron realizadas bajo el esquema de una sección estratigráfica. Cada pozo está acompañado de una escala progresiva de profundidad para facilitar la ubicación de las capas así como la determinación de los espesores. A continuación se muestra las secciones.



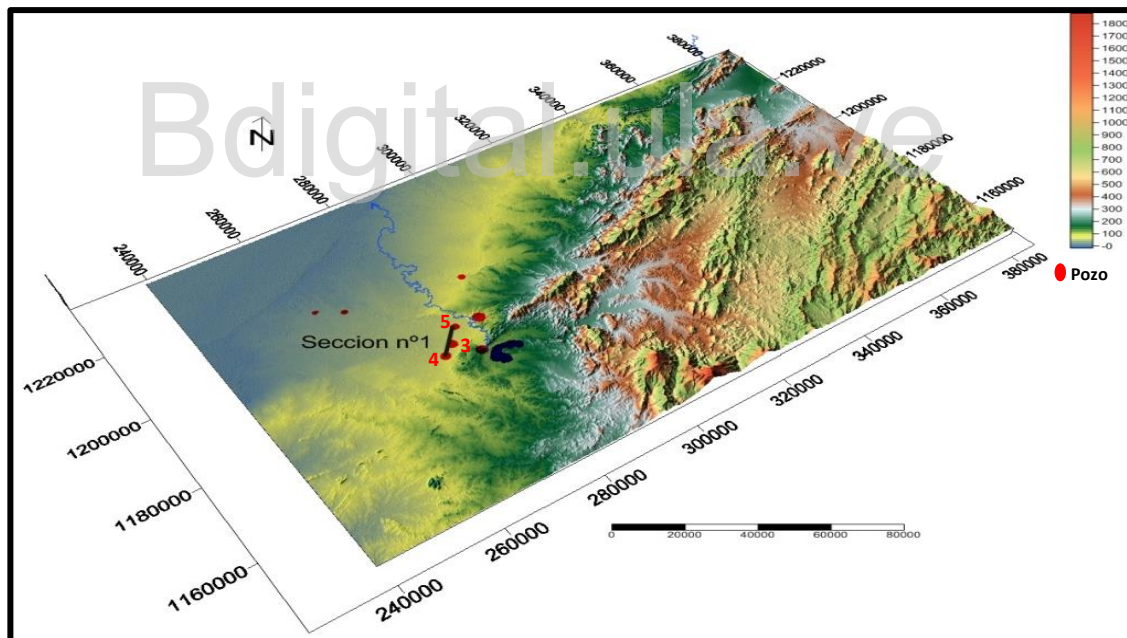
**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 5.26.** Ubicación de los pozos con litología.

- **Sección estratigráfica n°1.**

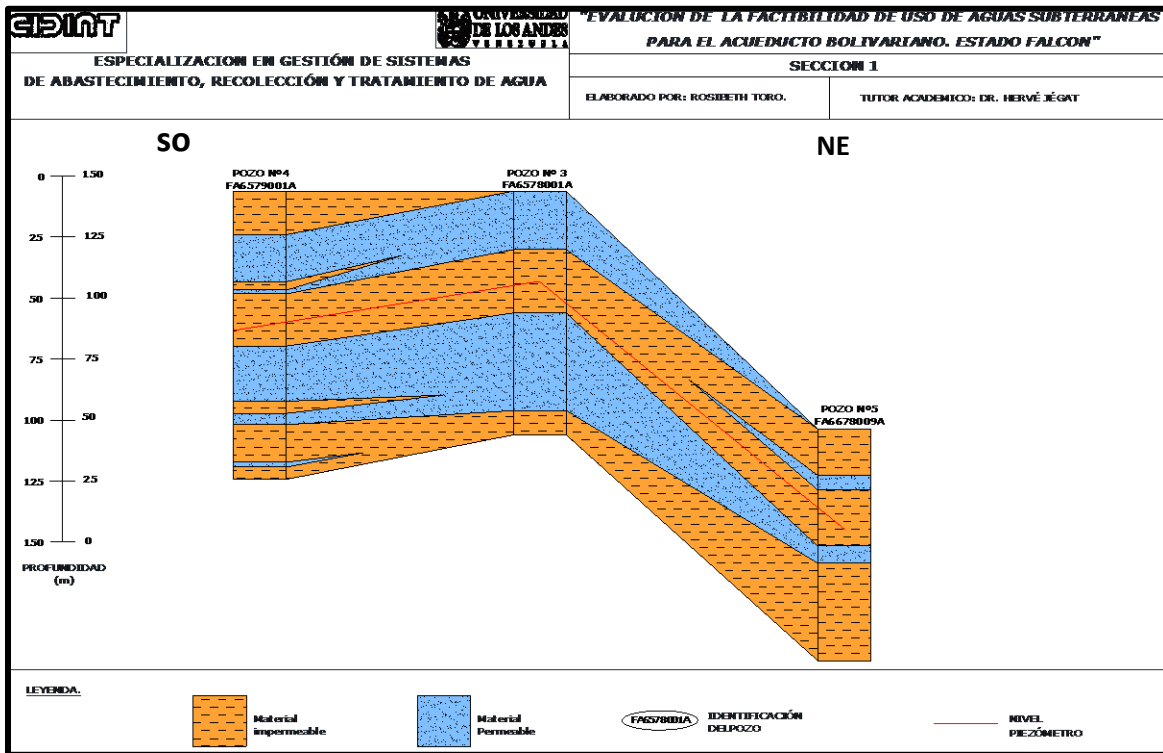
Esta sección está ubicada al oeste del área de estudio, sobre la margen derecha del río Maticora, según la orientación SO-NE constituido por los pozos P4 y P3 con una separación entre ellos de 3,5 Km y otro tramo por los pozos P3 y P5 cuya distancia es de 1,3 Km (Figura 5.27), alineados siguiendo las capas permeables y no permeables en trayectoria transversal al río. En ella se evidencia la distribución de los sedimentos y de acuerdo a la topografía que controla los niveles de energía de los agentes de transporte fluvial: hacia el sureste se encuentra el piedemonte, donde sedimentos más gruesos son cubiertos por una delgada capa de material fino proveniente de la cuenca alta y que se alterna con material grueso.

En la sección, se observa en la primera capa, un acuñamiento en dirección NE de una capa impermeable la cual impide el proceso de infiltración, debido a que actúa como una capa sello en parte de la sección, actuando de igual manera como capa protectora de los agentes que puedan contaminar las aguas subterráneas (Figura 5.28). El nivel piezométrico se encuentra entre 50 a 57 m de profundidad aproximadamente entre los pozos P4 y P3 ya que para el pozo P5 se encuentra a los 38 m permaneciendo en toda la sección en capa impermeable lo que permite clasificar a esta zona como un acuífero confinado. Posterior a ello se observan 4 capas de material permeable de espesor importante, las cuales presentan buenas condiciones para la presencia de agua subterránea, producto a su espesor de 37 m y continuidad lateral.



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 5.27.** Ubicación de la sección litológica n°1



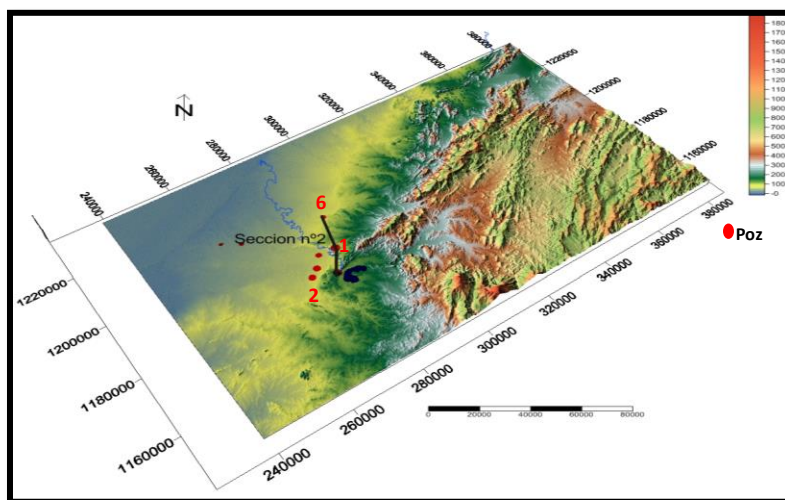
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.28. Sección estratigráfica n°1 del área de estudio

- **Sección Estratigráfica n°2**

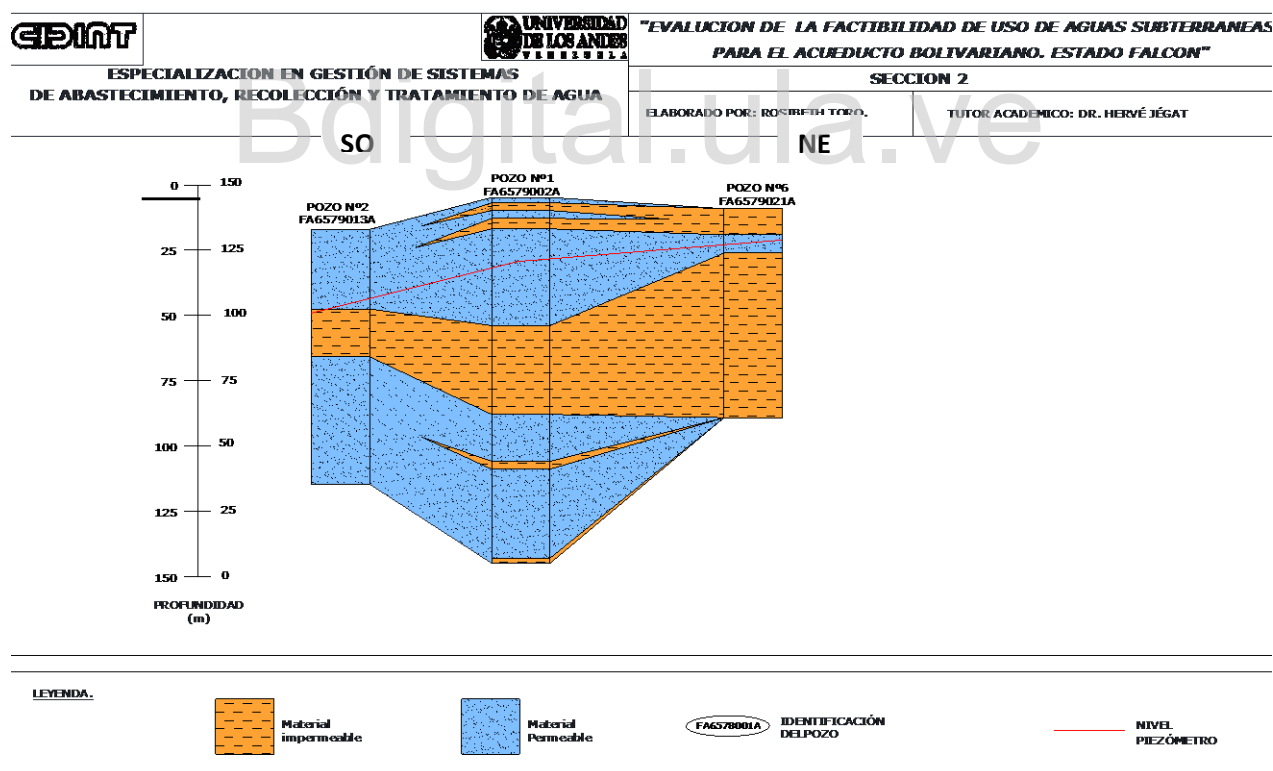
Se localiza de forma transversal al río Maticora y está constituida por los pozos P1, P2 y P6 en dirección SO - NE (Figura 5.29). La separación entre los pozos P6 y P1 es de 3,9 Km. y los pozos P1 y P2 se hayan separados por una distancia de 3,5 Km.

En la sección se observa capas permeables de espesores importantes intercaladas con pequeños espesores de capas impermeables producto de la depositación del río Maticora y de su baja pendiente, constituyendo una zona de inundación o llanura aluvial. Su nivel piezométrico se encuentra en la capa permeable de forma continua desde los 50 m a 27 m aproximadamente lo que le confiere un comportamiento de libre en la zona donde se encuentra el río y de confinado hacia el noreste (Figura 5.29).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.29. Ubicación de la sección litológica n°2.



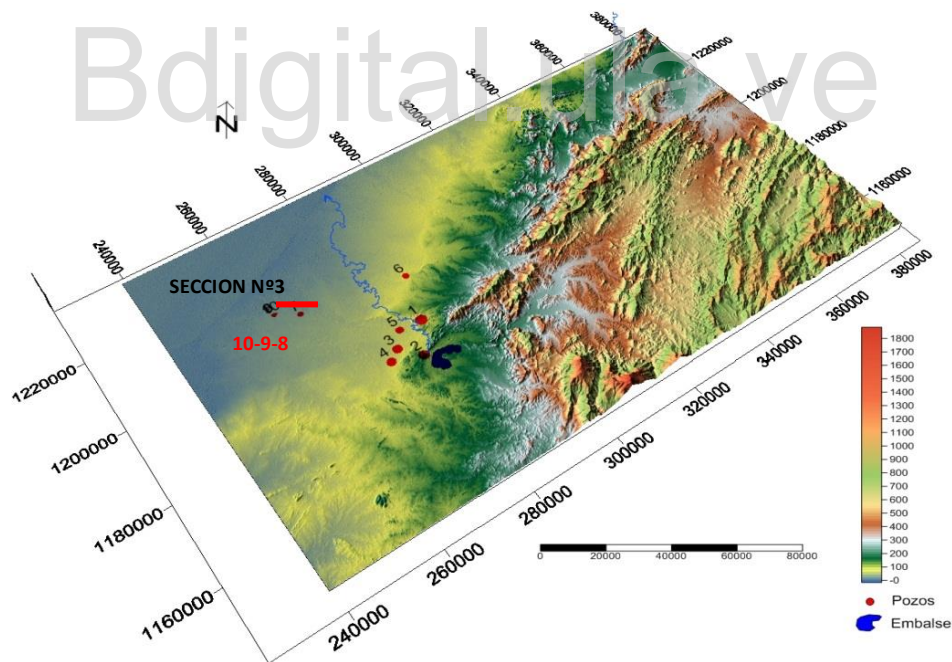
Fuente: Elaboración propia

Figura 5. 30. Sección estratigráfica n° 2 del área de estudio.

- **Sección Estratigráfica n°3.**

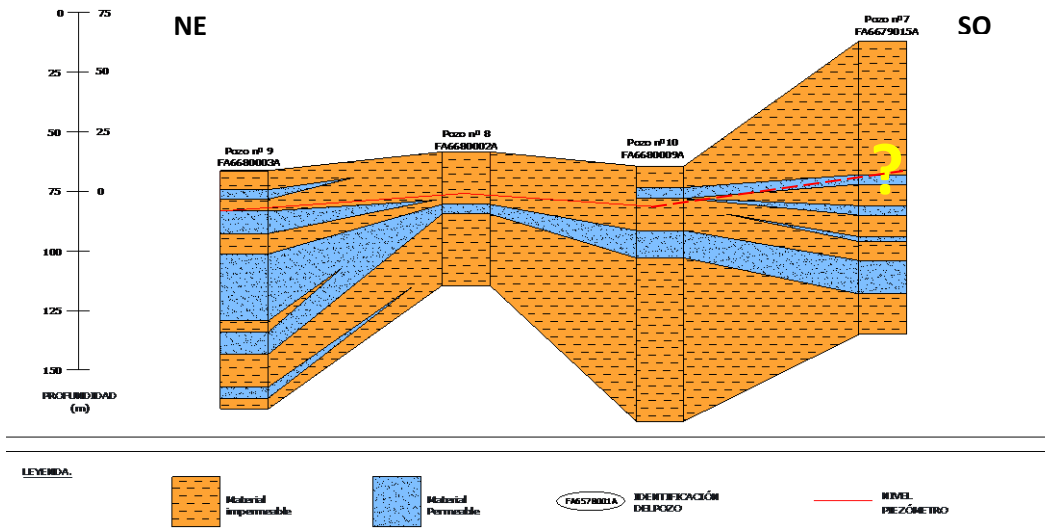
Esta sección estratigráfica aledaña al río, específicamente en la planicie aluvial y llegando a zona de mezcla, se indagó la conformidad de las capas, con dirección noroeste-sureste (Figura 5.31) y conformada por los pozos P9, P8, P10 y P7 cuyas separaciones no superan los 2 Km a excepción del pozo 6 quien se encuentra a 3 Km. En esta sección se puede observar que la primera capa de condición impermeable y que presenta material arcilloso compacto e intercalado con finas capas de arena de grano medio a grueso con espesor promedio de 25 a 50 m. sirve de capa confinante al material que subyace a él. Este material impermeable es característico de esta zona ya que corresponde a zona de poca energía con pendientes mínimas, es decir menor al 2%, mezclada con la arena fina que transportan los vientos alisios a la zona.

El nivel piezométrico en esta zona se encuentra entre los 12 a 32 m. en la capa impermeable lo que caracteriza a esta zona como acuífero confinado. Las capas infrayacentes están conformadas por un acuífero progresivo de la capa permeable con dirección al sureste (Figura 5.32), destacando así la cercanía a la zona de la planicie aluvial del río Maticora, donde se disminuye la conductividad hidráulica por la cantidad de material fino. Se destaca igualmente en esta sección el aumento de espesor en general de las capas impermeables con la misma dirección antes mencionada y la falta de datos del pozo 7 para dar continuidad al nivel piezométrico.



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 5.31.** Ubicación de la sección litológica n°3.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5.32. Sección estratigráfica n° 3 del área de estudio.

Estas secciones fueron realizadas con la finalidad de contar con información más detallada acerca de la geología del subsuelo, útil para la construcción del modelo hidrogeológico conceptual y de ellas se desprende que a medida que nos acercamos más al norte o línea costera se disminuye el espesor del acuífero y aumentan las capas impermeables, condición aceptable ya que prevalece la depositación de capas de finos por medios eólicos y aluviales.

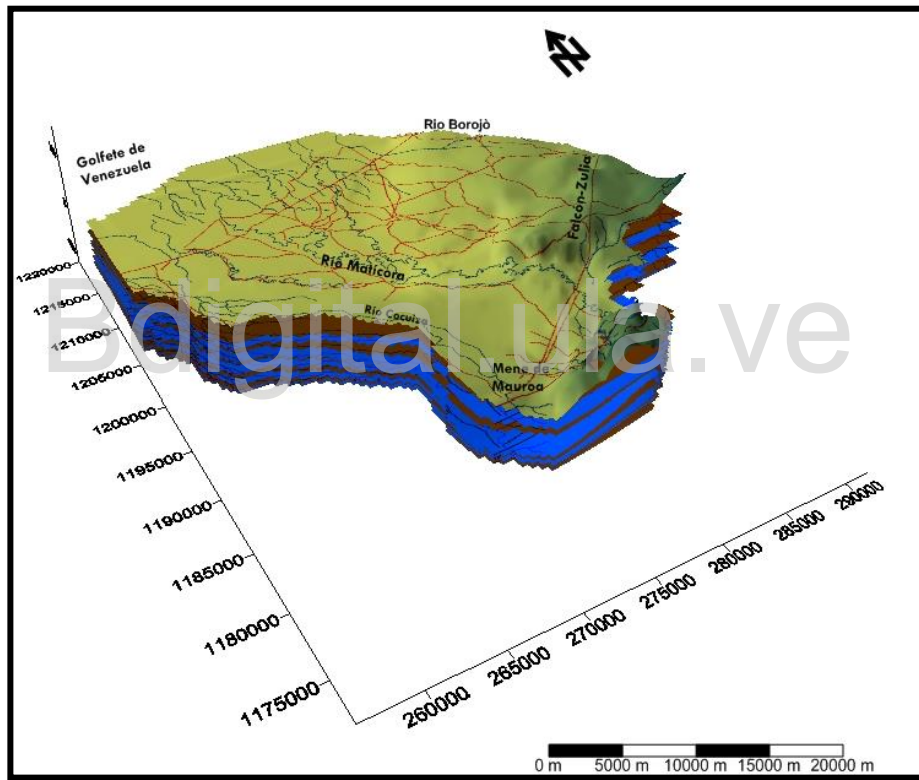
#### 5.2.4. Modelo Hidrogeológico Conceptual

A partir de la información litológica de pozos obtenida del SIGATLAS se construyó el modelo hidrogeológico. Para ello se elaboró una tabla con las profundidades de las distintas capas que constituyen el modelo hidrogeológico, siendo éste construido empleando el programa *Surfer 10.0*, con el variograma de ajuste respectivo. Se realizó el *Grid* correspondiente a cada capa, con los comandos; *Grid Data*, seleccionando en el cuadro de diálogo *Open*, la tabla de datos en Microsoft Excel, que contenía los datos de los pozos con litología. Seguidamente se colocaron las coordenadas Norte, Este y la capa a la cual se le realizó el *Grid*, en la columna de data "x", "y" y "z"; así como las coordenadas correspondientes al área de estudio, y el número de filas y de columnas; las cuales fueron de 100 por 100. Posteriormente, a través del menú *Grid*, en el comando *Math* (Figura 5.33), se estableció la función matemática que permite restringir la intersección entre capas, para evitar el corte mutuo que pueda afectar el correcto despliegue del modelo. En la ventana de diálogo de la figura se muestran los parámetros a seleccionar, repitiendo el proceso para cada una de las capas, de modo que se corrijan los posibles errores de visualización. En la casilla de *Input Grid File A*, se abre el archivo *.grd* correspondiente a la capa superior (en este caso, la superficie del

Bdigital.ula.ve

C.C.Reconocimiento

piezométricos o de las que no fue posible conseguir información; de igual forma se blanquearon las zonas montañosas que se comportan como acuífugo. El procedimiento de blanqueo se realizó con una propiedad del programa que permite digitalizar el área que se quiere eliminar, denominada *Digitize*. Tomando en cuenta la ubicación de los pozos inventariados, los cuales se seleccionaron a través del comando *Post Map* y cuya digitalización se mantiene constante para todos los mapas a los que se aplique. Para obtener el mapa blanqueado se selecciona *Grid Blank*, y se elimina de él, el área anteriormente digitalizada. Este procedimiento se realiza para todos los mapas en los que el objetivo principal sea mostrar alguna característica específica del acuífero. Luego seleccionamos el mapa realizado con el blanqueo y en la herramienta *Properties* cambiamos las propiedades como el color, escala, entre otras. Realizando este procedimiento para cada una de las capas litológicas. Finalmente, se procede a crear el modelo en 3D (Figura 5.35), cargando cada una de las capas corregidas por los procesos anteriores, y luego se genera la superposición de las capas integradas en el Modelo Hidrogeológico Conceptual 3D, que se muestra a continuación:



**Fuente:** Elaboración propia

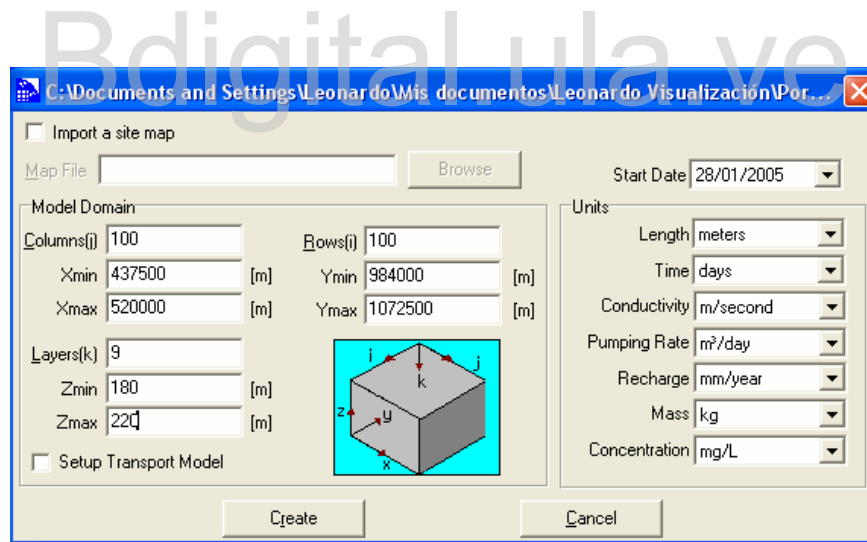
**Figura 5.35.** Modelo Hidrogeológico Conceptual del área de estudio

La utilidad del Modelo Hidrogeológico Conceptual obtenido (Figura 5.35), se restringe a las aproximaciones de la geoestadísticas y las herramientas informáticas. Las variables empleadas y los resultados interpretados deben enmarcarse dentro de un contexto de idealización virtual de un escenario real, teniendo presente los márgenes de errores que de ello se derivan, con el fin de obtener una

información lo más acertada posible. Vale destacar, que en un modelo tridimensional virtual no se producen acuñamientos entre capas, es decir, en el modelo hidrogeológico conceptual, las capas impermeables como las permeables se extienden en toda la superficie de forma intercalada, esto es debido a que el programa utilizado (*Surfer 10.0*), exige un espesor mínimo para las capas que siempre debe ser mayor a cero, lo cual constituye una desventaja porque los límites inferiores de las capas no corresponden a los límites verdaderos. Con las secciones estratigráficas se obtuvo los espesores de las capas permeables y la clasificación de 11 capas, las profundidades de los niveles estáticos se promediaron entre 12 a 57 m. En el modelo de relieve en 3D (Figura 5.35), se puede observar la dirección preferencial al aporte de sedimentos en sentido SE - NO.

### 5.2.5. Visualización del modelo hidrogeológico en 3D con ModFlow 3.0

Utilizando una tecnología alternativa, desarrollada por Waterloo Hidrogeológico, específicamente el *software Visual Modflow 3.0*, bastante útil para los fines perseguidos en este trabajo; se llevó a cabo la visualización del Modelo Hidrogeológico Conceptual. Cuando se va a desarrollar un modelo nuevo, el programa solicita la creación de un archivo \*.vmf. Entonces, deben establecerse los parámetros iniciales que determinarán las características del “proyecto” con un tiempo de modelado de diez años (3650 días), según la terminología del *software*. En la Figura 5.36, se muestra la ventana de diálogo para definir las propiedades: El dominio de Modelo, dado por el número de columnas, filas y capas que constituyen la estructura; también los valores máximos y mínimos para estas variables; y finalmente, las unidades en que se anejarán los parámetros hidrológicos del acuífero.



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 5.36.** Establecimiento de las Propiedades del Modelo

En un principio, el programa crea un reticulado estándar visto en planta, sobre el cual se comienza a trabajar. Ahora, se deben cargar los archivos \*.grd, hechos en *Golden Software Surfer 10.0*; que corresponden a las bases de las capas y la superficie del terreno. La carga se hace de forma individual en *Import Elevation* comenzando por la superficie del terreno, siguiendo en forma descendente hasta la base del modelo; esto dentro de un mismo archivo de *Modflow*, que corresponde al denominado “proyecto”,

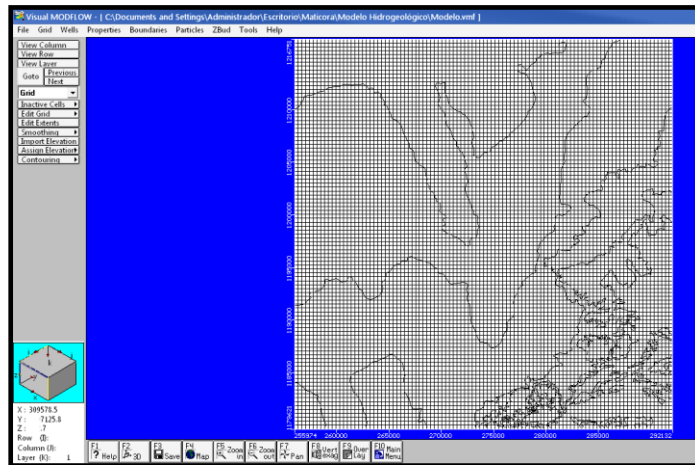
que en informática, más allá de un archivo, se cataloga como directorio. A continuación se realiza la carga del mapa base, hecho en *AutoCAD*, en el que se muestra la posición de los ríos y pozos en el área de estudio; que corresponde a un archivo \*.*dxf* y su importación se hace a través de la función *Map F4*. El reticulado inicial tienen forma rectangular, una vez que se carga el mapa base el área de estudio queda delimitada sobre el reticulado inicial (Figura 5.37), entonces se requiere desactivar las celdas del reticulado no incluidas dentro del área. Esto se hace a través de *Inactive Cells*, trazando una poligonal cerrada en el área de interés (Figura 5.38).

Previamente las capas del modelo han sido clasificadas en función de sus propiedades físicas inherentes a los intereses de este trabajo, esto son, según su conductividad hidráulica, almacenamiento y niveles iniciales.

La conductividad hidráulica ( $K_x$ ,  $K_y$  y  $K_z$ ), se hace en el *Visual ModFlow 3.0* a través de la opción *Conductivity*, en la que se dan valores direccionales (X, Y, Z) de permeabilidad, de modo que el programa asigna el color azul a las capas permeables y el color blanco a las capas no permeables (Figuras 5.37 y 5.38). En este caso asignamos los datos deseados a las capas permeables utilizando el comando *Assing- Window – zone* y se consideró igual en x y y (horizontalmente), y menor en sentido vertical, a razón de  $K_x/K_z = 10$ ; esto es debido a que la depositación del material se hace en sentido vertical, y este material se va consolidando a medida que transcurre el tiempo, por lo que los espacios vacíos presentes entre los granos van disminuyendo y por ende, disminuye la permeabilidad, mientras en las direcciones horizontales ésta permanece igual. El valor asignado se asignaron de manera constantes en toda el área de estudio, ya que no se contaba con data suficiente como para asignarlos de manera distribuida, es por ello que para las capas impermeables fue de  $3 \times 10^{-5}$  por presentar características de material arcilloso compacto, pizarras, limos arenosos y para las capas permeables de  $4 \times 10^{-2}$  por ser gravas y arenas medias a finas (Custodio y Llamas, 1983).

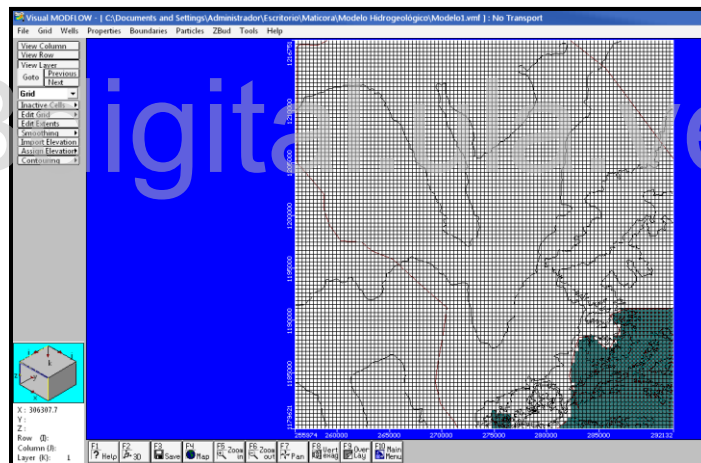
Los valores de almacenamiento corresponden a:

- Almacenamiento específico ( $S_s$ ), Para la presente investigación se estimó un valor promedio del coeficiente de almacenamiento de  $1 \times 10^{-4}$  para aquellas zonas de comportamiento confinado, ya que no se cuentan con pruebas de bombeo actualizadas que permitan una mejor aproximación de este valor. Para obtener el almacenamiento específico, basta dividir el coeficiente de almacenamiento y dividirlo entre el espesor saturado de acuífero. El espesor saturado promedio de acuífero se estimó en 20 m, que es el valor más común en toda la extensión de acuífero. Para estos valores el almacenamiento específico promedio para toda el área se estimó en 0.00001 1/m.
- Rendimiento específico ( $S_y$ ), es análoga a la porosidad efectiva o drenable del acuífero ( $P_{eff}$ ), cuyo valor se estimó como constante para toda el área e igual a 0.06, similar al coeficiente de almacenamiento, ya que el material que conforma el acuífero está compuesto de arenas y gravas arenosas principalmente.
- Porosidad total ( $P_{tot}$ ), se estimó al igual que los demás parámetros, constante para todo el volumen acuífero, con un valor promedio de 0.20, correspondiente a arenas gruesas y gravas.



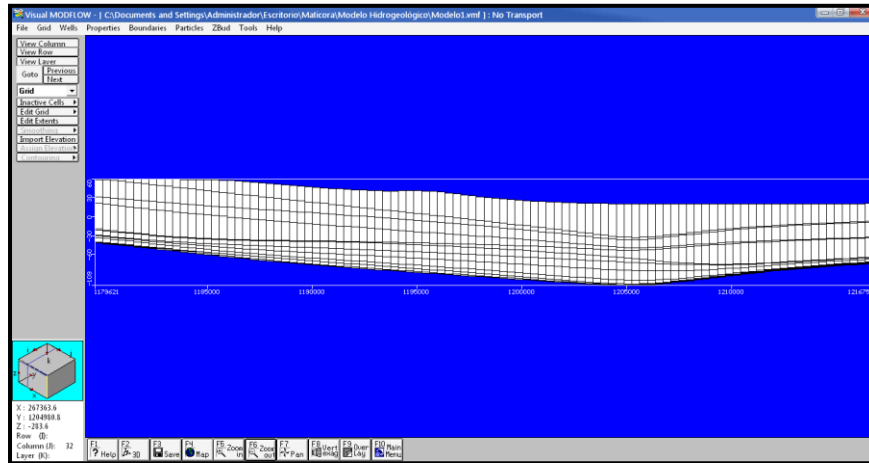
**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 5.37.** Visualización del reticulado con el mapa base.



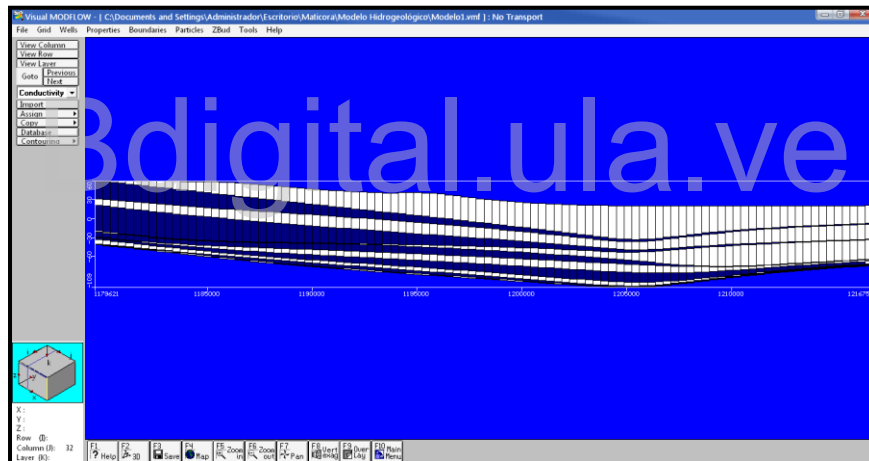
**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 5.38.** Visualización del reticulado con el mapa base y celdas inactivas del área de interés.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.39. Sección transversal original que no ilustra la conductividad de las capas



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.40. Sección transversal original que muestra la conductividad de las capas

El programa posee, además, las herramientas para desplazarse entre cada capa (*Go to Layer* y *View Layer*) y obtener la visualización de secciones transversales en dirección horizontal (*View Row*) y vertical (*View Column*). A continuación se muestran algunas secciones tomadas del modelo (Figura 5.41):

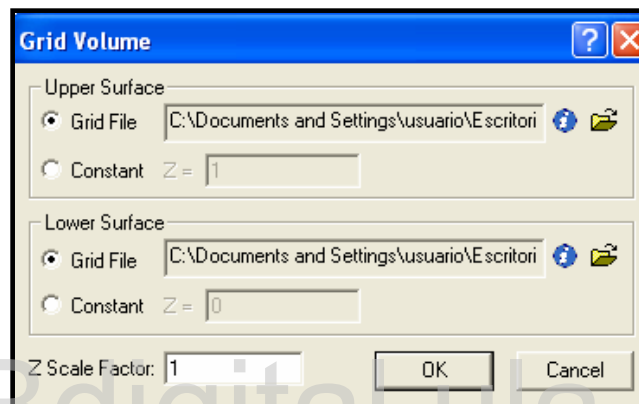
Bdigital.ula.ve

C.C.Reconocimiento

### 5.3. Etapa 3. Calculo de Reservas.

#### 5.3.1. Reservas Permanentes Permeables

Las reservas permanentes se calculan una vez obtenido el Modelo Hidrogeológico Conceptual, ya que a través de las capas permeables e impermeables que lo definen, es que se genera un aproximado del volumen total de la roca, para luego mediante una fórmula calcular las reservas de agua en el subsuelo. Para determinar el volumen total de roca existente en el acuífero se empleó el programa *Surfer* 10.0, empleando, el comando *Volumen*, de la ventana *Grid*. En la ventana de dialogo se selecciona la capa superior (impermeable) y luego la capa inferior (capa correspondiente a una capa permeable) (Figura 5.43).



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.43. Ventana para el cálculo del volumen total de roca

El programa arroja un reporte del cálculo para cada capa permeable. Luego de obtener todos los valores individuales se determinan el total del volumen de las capas en las que se encuentran las reservas de agua que determinan el acuífero. Entre los datos entregados en el reporte de programa se encuentran diversos volúmenes calculados por métodos matemáticos diferentes, de ellos se toma el volumen de relleno (*Net Volume [Cut-Fill]*). El Volumen de Reservas Permanentes (VRP) se obtiene a través del Volumen Permeable Total Saturado (VPTS), multiplicado por la porosidad eficaz del material ( $\phi_{ef}$ ). Así se tiene:

$$VRPP=VPTS*\phi_{ef} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Dónde:

- VRPP = Volumen de Reservas Permanentes Permeables
- VPTS = Volumen Permeable Total Saturado
- $\phi_{ef}$  = Porosidad Eficaz

La porosidad eficaz media se expresa en porcentaje y el valor utilizado es 20%, tomando en cuenta que el material que constituye el acuífero, en este caso representa a rocas sedimentarias sueltas - arenas, esto

según la Tabla 5.6 de porosidades totales y eficaces de Johnson (1967), Davis (1969), Schoeller (1962) y Ward (1967).

**Tabla 5.6.** Porosidades Totales y Eficaces de Diversos Materiales Sholler, 1962; Jonson, 1967; Ward, 1967; Davis, 1969. Tomado de Ramírez, 2005.

| Material                     |                            | Porosidad Total (%) |     |     | Porosidad Eficaz (%) |     |     |
|------------------------------|----------------------------|---------------------|-----|-----|----------------------|-----|-----|
| Tipo                         | Descripción                | Media               | Máx | Min | Media                | Máx | Min |
| Rocas Masivas                | Granito                    | 0,3                 | 4   | 0,2 | <0,2                 | 0,5 | 0,0 |
|                              | Caliza                     | 8                   | 15  | 0,5 | <0,5                 | 1   | 0,0 |
|                              | Dolomia                    | 5                   | 10  | 2   | <0,5                 | 1   | 0,0 |
|                              | Areniscas                  | 15                  | 25  | 3   | 10                   | 20  | 0,0 |
| Rocas Metamórficas           |                            | 0,5                 | 5   | 0,2 | <0,5                 | 2   | 0,0 |
| Rocas Volcánicas             | Piroclastos y Tobas        | 30                  | 50  | 10  | <5                   | 20  | 0,0 |
|                              | Escorias                   | 25                  | 80  | 10  | 20                   | 50  | 1   |
|                              | Pumitas                    | 85                  | 90  | 50  | <5                   | 20  | 0,0 |
|                              | Basaltos Densos, Fonolitas | 2                   | 5   | 0,1 | <1                   | 2   | 0,1 |
|                              | Basaltos Vacuolares        | 12                  | 30  | 5   | 5                    | 10  | 1   |
| Rocas Sedimentarias Suelitas | Aluviones                  | 25                  | 40  | 20  | 20                   | 35  | 5   |
|                              | Dunas                      | 35                  | 40  | 30  | 25                   | 30  | 10  |
|                              | Gravas                     | 30                  | 40  | 25  | 20                   | 35  | 10  |
|                              | Loess                      | 45                  | 55  | 40  | <5                   | 10  | 0,1 |
|                              | Arenas                     | 35                  | 45  | 20  | 25                   | 35  | 10  |
|                              | Depósitos Glaciares        | 5                   | 35  | 15  | 15                   | 30  | 5   |
|                              | Limos                      | 40                  | 50  | 35  | 10                   | 20  | 2   |
|                              | Arcillas sin Compactar     | 45                  | 60  | 40  | 2                    | 10  | 0,0 |
|                              | Suelos Superiores          | 50                  | 60  | 30  | 10                   | 20  | 1   |

Fuente: Elaboración propia

Los cálculos efectuados por el programa empleado, para cada una de las capas permeables se muestran a continuación en la Tabla 5.7:

**Tabla 5.7.** Volumen de las capas permeables

| Capa                                 | Volumen permeable (m <sup>3</sup> ) |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 1                                    | 5.889.808.654,624                   |
| 2                                    | 8.620.581.846,416                   |
| 3                                    | 5.848.874.445,890                   |
| 4                                    | 6.217.717.521,575                   |
| 5                                    | 2.699.166.812,765                   |
| <b>Volumen total (m<sup>3</sup>)</b> | <b>29.276.149.281,271</b>           |

Fuente: Elaboración propia

### 5.3.2. Balance hídrico de la zona:

La estimación de las recarga hacia el acuífero ubicado aguas abajo del Embalse Matícora llevado a cabo se tomó del estudio realizados por el grupo de Ingenieros Civiles & Asociados y EMOHCA, el cual se efectuó mediante la aplicación del modelo de simulación hidrológica de escala de tiempo mensual SIMULACI. Los datos hidroclimática utilizados se muestran en la Tabla 5.8, donde se incluyen sus coordenadas UTM y geográficas referidas al *Datum La Canoa*.

**Tabla 5.8.** Estaciones de precipitación seleccionadas

| Estación    |    | Norte      | Este      | Latitud   | Longitud  |
|-------------|----|------------|-----------|-----------|-----------|
| Barrancas   | P1 | 1178845,84 | 293251,60 | 10°39'30" | 70°53'24" |
| Cuesta De   | P2 | 1185784,90 | 315448,21 | 10°43'20" | 70°41'15" |
| El Mojino   | P3 | 1168074,80 | 329458,79 | 10°33'46" | 70°33'31" |
| Goajiro     | P4 | 1174344,69 | 311616,38 | 10°37'07" | 70°43'19" |
| Guaracaro   | P5 | 1171316,28 | 283445,68 | 10°35'23" | 70°58'45" |
| La Porteria | P6 | 1157929,83 | 324481,79 | 10°28'15" | 70°36'13" |
| Mene Mauroa | P7 | 1182950,40 | 276072,81 | 10°41'40" | 71°02'50" |

**Fuente:** Estimación de la recarga por lluvia en el acuífero de Matícora. Ingenieros Civiles & Asociados y EMOHCA

La estación de evaporación seleccionada fue la que se aprecia en Tabla 5.9. Así mismo, en Tabla 5.10 se presenta la estación de escorrentía utilizada.

**Tabla 5.9.** Estación de evaporación.

| Estación        | Coordenadas UTM |           | Coordenadas Geográficas |           |
|-----------------|-----------------|-----------|-------------------------|-----------|
|                 | Norte           | Este      | Latitud                 | Longitud  |
| <b>Pedregal</b> | 1218063,34      | 378005,83 | 11°01'00"               | 70°07'00" |

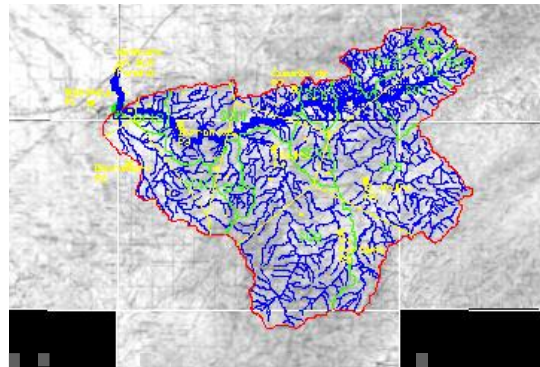
**Fuente:** Estimación de la recarga por lluvia en el acuífero de Matícora. Ingenieros Civiles & Asociados y EMOHCA

**Tabla 5.10.** Estación de escorrentía.

| Estación                      | Coordenadas UTM |        | Coordenadas Geográficas |           |
|-------------------------------|-----------------|--------|-------------------------|-----------|
|                               | Norte           | Este   | Latitud                 | Longitud  |
| <b>Matícora en Don Pancho</b> | 1189586,62      | 281070 | 10°45'17"               | 71°00'07" |

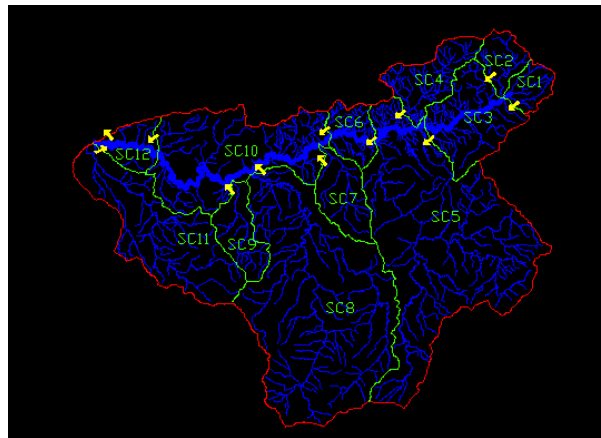
**Fuente:** Estimación de la recarga por lluvia en el acuífero de Matícora. Ingenieros Civiles & Asociados y EMOHCA

Dicho modelo fue aplicado en dos etapas. En la primera se efectuó la simulación para toda la cuenca aportante al embalse (Figura 5.44); ello con la finalidad de calibrar el algoritmo con los datos de escorrentía de la estación Don Pancho y, a partir de dicha calibración, obtener los parámetros correspondientes a las subcuencas próximas al área del acuífero (Figura 5.44). Luego, y debido a que en el sector del acuífero propiamente dicho no se cuenta con información de escorrentía que permita la calibración del modelo, se aplicó el SIMULACI en fase de simulación (Figura 5.45). Previamente, fue necesario efectuar una modificación al programa a fin de que almacenara y presentara los valores mensuales de la recarga estimada por lluvia. Como criterio indirecto de validación de la simulación se utilizó el coeficiente de escorrentía anual, el cuál fue previamente calculado para la Estación Matícora en Don Pancho.



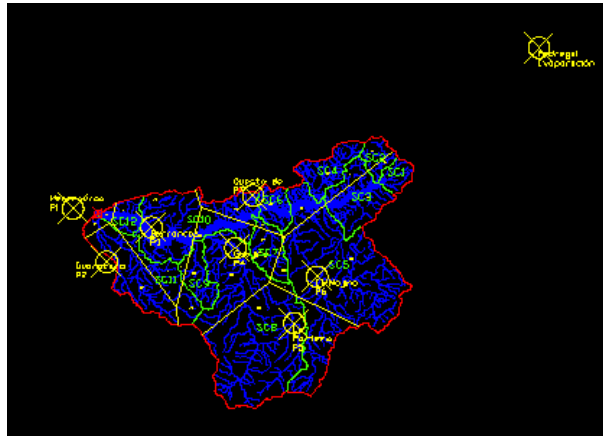
**Fuente:** Estimación de la recarga por lluvia en el acuífero de Matícora.  
Ingenieros Civiles & Asociados y EMOHCA

**Figura 5.44.** Mapa base de la cuenca del Embalse Matícora. Escala 1:100.000.



**Fuente:** Estimación de la recarga por lluvia en el acuífero de Matícora.  
Ingenieros Civiles & Asociados y EMOHCA

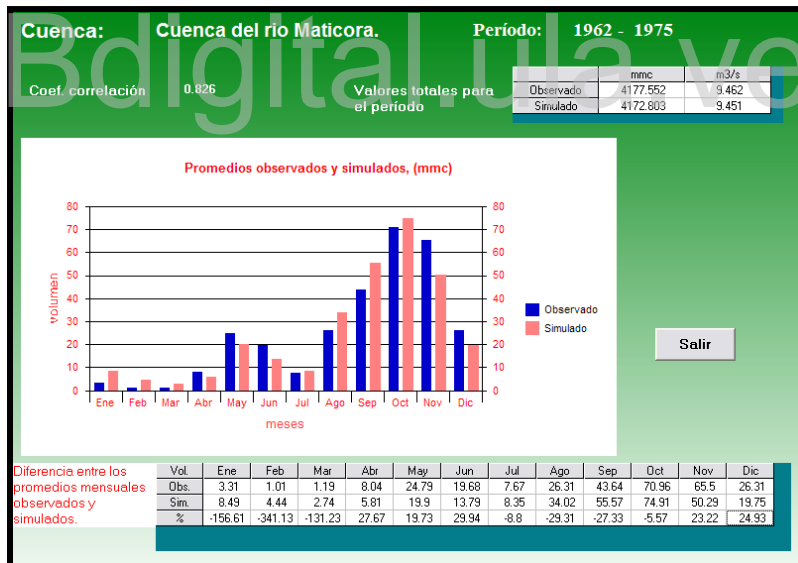
**Figura 5.45.** Subcuencas para la calibración.



**Fuente:** Estimación de la recarga por lluvia en el acuífero de Matucora. Ingenieros Civiles & Asociados y EMOHCA.

**Figura 5.46.** Polígonos de Thiessen

Como se puede apreciarse en la figura 5.47, el volumen total observado en el período de calibración es de 4177.552 millones de metros cúbicos (mmc), mientras que el simulado es de 4177.803 mmc, lo cual equivale a un caudal continuo de 9.451 m<sup>3</sup>/s. El coeficiente de correlación obtenido fue de 0.826.



**Fuente:** Estimación de la recarga por lluvia en el acuífero de Matucora. Ingenieros Civiles & Asociados y EMOHCA

**Figura 5.47.** Salidas de la calibración.

Como resultados de la simulación se estimó un área para el acuífero 1047.92 km<sup>2</sup>, o 104792 Ha, el coeficiente de escorrentía medio anual obtenido para la cuenca durante la fase de calibración fue de 0.12

hasta la estación de escorrentía Matícora en Don Pancho. En la subcuenca 12, y para el mismo período, se obtuvo un valor de 0.13 para el coeficiente de escorrentía medio anual, lo cual se estimó como una buena aproximación. El período de simulación fue 1961 – 1981. La estación de precipitación considerada fue Mene Mauroa, la cual es la más próxima al área de estudio.

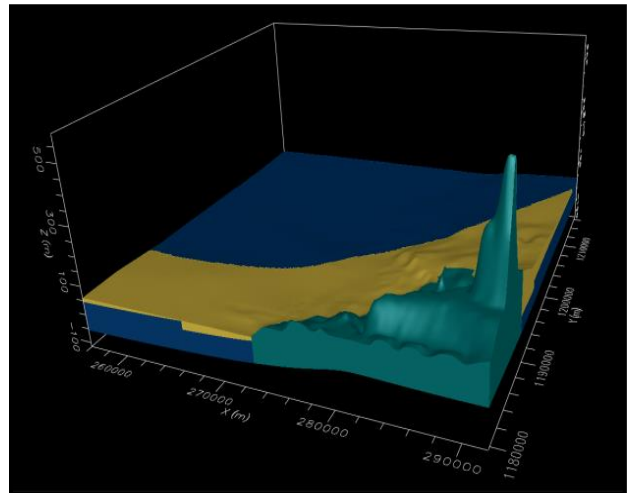
Para el periodo considerado el valor promedio de lluvia sobre el área del acuífero fue de 1057.925 millones de metros cúbicos, mmc, mientras que el valor escurrido fue de 143.992 mmc. Con estos valores, el coeficiente de escorrentía será de 0.1361 ó 13.61 %, lo cual puede considerarse una aproximación adecuada al valor observado de este parámetro. En estas condiciones, el porcentaje de recarga por lluvia puede estimarse en 9.041 % de la precipitación media anual, lo cual corresponde a un volumen anual de 95.653 mmc para todo el área del acuífero.

## 5.4 Etapa 4. Políticas de Explotación

### 5.4.1. Establecimiento de Políticas de Explotación

Para este apartado se realizó una simulación matemática, planteando diferentes alternativas relacionadas al desarrollo de las aguas subterráneas en un futuro debido a la extracción de forma no controlada por los poblados cercanos aguas abajo del embalse de Matícora, en el estado Falcón. La misma se basó en la simulación del acuífero existente considerado para un periodo de tiempo de 3650 días y tomando en cuenta la situación actual, la extracción igual a la recarga y finalmente la extracción mayor a la recarga. Para las simulaciones, las áreas que resultaron secas se representan en color amarillentos mientras que aquellas del acuífero que contienen agua se simbolizan en color azul.

1. **Análisis situación actual:** En la Figura 5.48 se presentan la simulación realizada para el acuífero de Matícora en las condiciones actuales, en color ocre las celdas secas y en azul las celdas que contiene agua. Para el período de tiempo considerado puede apreciarse que de continuarse con las políticas actuales de extracción se observaría un agotamiento significativo en las reservas del acuífero influenciado en gran medida primero, por la baja recarga que éste presenta y en segundo lugar por la presencia estructural aguas arriba del embalse Matícora aunado a las condiciones civiles que se realizaron al momento de la construcción de el mismo evitando posibles filtraciones.



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.48. Simulación del acuífero en condiciones actuales durante un periodo de 10 años.

Bdigital.ula.ve

C.C.Reconocimiento

#### 5.4.2. Propuesta de Nuevas Fuentes de Abastecimiento

Una vez establecidas las políticas de explotación, se ubicaron espacialmente las posibles nuevas extracciones y se evaluaron a través del modelo: los diferentes sitios de aprovechamiento y las alternativas de extracción de agua subterránea. Esto fue realizado empleando un software especializado diseñado para modelar acuíferos a través del método de diferencias finitas para la solución de las ecuaciones diferenciales de flujo del agua subterránea. Este software permitió aumentar el número de celdas o refinar la malla en las zonas críticas, de mayor explotación, o en donde existe dificultad en definir el problema en forma detallada. Además ofrece facilidades en la construcción del modelo, flexibilidad de involucrar condiciones complejas de frontera y un adecuado manejo de la información disponible de las variables.

En la simulación del acuífero de Matícora se consideraron 86 pozos existentes en el área de estudio con extracciones actuales de aproximadamente 0.5 l/s a 19 l/s, con la simulación se logró establecer el caudal máximo que se puede extraer aguas abajo del área de estudio y al cabo de 3650 días de extracción continua de agua subterránea. Además se discretizó el sistema acuífero mediante un mallado de 100 filas por 100 columnas. Para el estudio de la litología de las capas se recurrió a la revisión de la data existente, contándose con 18 pozos con información importante para la correlación de las capas de igual litología. De la misma manera se restringieron en el programa las cotas máximas y mínimas, asignándose la propiedad de conductividad para una de las capas existentes en el modelo.

Una vez sustituido el acuífero por la malla y acorde con la información disponible, se establecieron ciertas condiciones restrictivas: celdas inactivas o de flujo nulo, que corresponde a las zonas montañosas y el acuífero presenta comportamiento como acuífugo, ya que eran causantes de error y zonas de recarga: contentivo al valor esperado anual para el acuífero aguas abajo del embalse de Matícora

Se logró mediante la ubicación espacial del pozo al que se le puede extraer el caudal máximo aguas abajo del área, para contribuir con el Sistema de Abastecimiento Falconiano, manteniendo el equilibrio con los demás pozos existentes en el área, la recarga al acuífero y el flujo subterráneo afluente.

Los sitios de aprovechamiento recomendados para la extracción se señalan en la Figura 5.51, ubicada dentro de las coordenadas detalladas a continuación:

#### 5.4.3. Evaluación de alternativas de extracción de aguas subterráneas

Es frecuente la coincidencia de áreas con valores mínimos de precipitación con la presencia de una población turística importante y con máximos requerimientos de agua. Esta situación se produce, en ciertas zonas áridas, como el área de estudio, que presentan un déficit hídrico agravado durante los períodos de sequía. Para cubrir las necesidades de agua, tanto para abastecimiento urbano, regadío, industria o requerimientos medioambientales, se han utilizado tradicionalmente las aguas superficiales y subterráneas reguladas respectivamente mediante presas y captaciones subterráneas (pozos, sondeos, etc.). Sin embargo, ni la regulación superficial ni el aprovechamiento de las aguas subterráneas, se han mostrado suficientes para poder afrontar las necesidades hídricas que con cierta regularidad se produce sobre todo en períodos de marcado déficit hídrico.

Bdigital.ula.ve

C.C.Reconocimiento

## CAPITULO 6

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. Conclusiones

- Las características geológicas de zona de estudio están constituidas por el Piedemonte del Anticlinal de Falcón donde se observan tres paisajes geomorfológicos característicos: El Paisaje de Piedemonte, los Medios de Planicies y los Medios Litorales, influenciados por los procesos erosivos los cuales han modelado las areniscas, limolitas y lutitas de las formaciones de edad Terciaria que se encuentran en la parte superior de la cuenca del río Maticora y son los responsables del colmatamiento del embalse y de la depositación del sedimento finos aguas abajo del mismo.
- Para el desarrollo de la presente investigación se contó con una data que permitió realizar un inventario de 86 pozos, de cuales solo 18 pozos poseían información litológica, 33 información de caudales, 13 niveles estáticos y 33 pozos con datos químicos.
- Se realizaron 12 pruebas de infiltración de forma local como herramienta complementaria para conocer la riqueza ó pobreza de los mantos acuíferos, la cual arrojó como resultado 0.1972 mm/h o 3.17 min por lo que se considera una filtración local muy mala.
- Para el cálculo de la recarga natural fueron empleadas ocho (8) estaciones pluviométricas en un periodo de 20 años, que corresponde a las aguas meteóricas dando un valor de infiltración de 20.75 mm/año para toda el área de estudio.
- A través del modelo hidrogeológico arrojado para el área de estudio se pudo determinar que la misma presenta un comportamiento de acuífero confinado esto se aprecia al evaluar los niveles estáticos de los pozos que se encuentran dentro de la capa superficial, mostrando un pequeño confinamiento, donde su volumen de reservas permanentes permeables está alrededor de  $2,92 \times 10^{10}$  m<sup>3</sup> aproximadamente y un valor promedio de recarga natural por precipitación de 95.653 mm por año.
- Con la simulación obtenida del acuífero se puede estimar que su proyección en un periodo de tiempo de 10 años o 3.650 días y tomando en cuenta las políticas de explotación en que se encuentra, se aprecia el agotamiento significativo de sus reservas, el cual se agudiza, al simular la recarga es igual a su extracción y aún más si su extracción supera a las recargas.
- Para la simulación se logró establecer el caudal máximo de extracción continua sin perjudicar el acuífero durante un periodo de 3.650 días el cual es de 120 l/seg. De igual manera el lugar óptimo para la realización de la extracción contribuyendo con el sistema de abastecimiento Falconiano y cumpliendo con el equilibrio con los demás pozos existentes de la zona, dicha zona se ubica al sureste del área de estudio, donde las capas permeables son más espesas, no se altera las condiciones de flujo de forma tal que se deteriore la calidad de las aguas pudiendo revertir las pendientes piezométricas y haciendo que el acuífero se llene de aguas saladas.
- De la realización del inventario de pozos en la zona podemos observar la carencia de la supervisión por parte de un organismo estatal, todos son pozos privados o construidos por la comunidad por lo

que no garantizan la demanda poblacional, igualmente la ubicación de los mismo se encuentran en el margen izquierdo del rio y aguas abajo al embalse donde se concentran la mayoría de los centros poblados y la carencia de vital líquido. La litología se encuentra representada en su mayoría por material fino (limo y arcillas) con intercalaciones de gravas y arenas.

## 6.2. Recomendaciones

- Evaluar la posibilidad de la rehabilitación, mejoramiento y supervisión de los pozos ubicados aguas abajo al embalse de Matícora, los cuales podría incrementar la producción actual y con ello optimizar la calidad del sistema para beneficio de los pobladores de la región.
- Es necesaria la actualización de las campañas de medición y de ensayos químicos, para tener datos más recientes del comportamiento de los niveles del acuífero, ya que estos datos son los utilizados en la calibración. También es de suma importancia conocer los volúmenes de extracción, para lo cual es necesaria una estricta fiscalización del uso del recurso.
- Realizar pruebas químicas del agua para ratificar su calidad actual y hacerle seguimiento ante contaminantes externos.
- Recomendar que se estudie la posible intrusión salina que afecte de alguna manera al acuífero.
- Se recomienda que los caudales extraíbles para el acuífero de Matícora no deben exceder los 120 l/s, ubicados en los sitios propuestos para el aprovechamiento del área en estudio, ya que en caso de sobrepasarse este valor, se sobreexplotaría el acuífero causando posibles daños irreversibles al mismo y en caso de ubicar los pozos de extracción más lejos, no será factible debido a que los costos técnicos se incrementarían notablemente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Custodio, E. (1996). Hidrogeología Subterránea. Tomo1 y 2. Ed. Omega S.A.; Barcelona, España.
- Díaz, R. (2006). Tesis de pregrado. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. Universidad de Los Andes, Escuela de Ingeniería Geológica. Mérida – Venezuela.
- Espinoza, C. (2004). Guía sobre hidráulica de agua subterránea y su aprovechamiento. Universidad de Chile.
- González de Juana, C. (1980), Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas.
- Hedberg. (1937). Sinopsis de las formaciones geológicas de la parte occidental de la Cuenca de Maracaibo, Venezuela, *Bol. Geol. y Min.*, Caracas, 1(2-4): 77-120.
- Jégat, H. (1999), “Las Aguas Subterráneas”. Guía Teórica de la definición, origen e importancia de las aguas subterráneas.
- Lahoud B. J. (2001). Diagnóstico del potencial de salinidad del sistema de riego del río Matícora y el efecto de la utilización de sus aguas en el desarrollo de la zona. CIDIAT- ULA. Mérida, Venezuela.
- Liddle, R. (1946). *The geology of Venezuela and Trinidad*, (2nd. Ed), Paleont. Res. Inst., Ithaca, N.Y., 890 p.
- Mijailov, L. (1989). Hidrogeología y Geología. Editorial Mir. Moscú, Rusia. 285 p.
- Mora, A. (2007). Evaluación de las disponibilidades de agua subterránea entre los ríos Sarare y San Carlos en el límite entre los estados Portuguesa y Cojedes. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. Universidad de Los Andes, Escuela de Ingeniería Geológica. Mérida – Venezuela.
- Ministerio de Obras Públicas. (1968), Proyecto Embalse Matícora.
- Parra J.R. (1967). Estudio edafotécnico del sistema de riego Matícora, edo. Falcón. Estación edafotécnica del Zulia, MOP, Maracaibo.
- Payne, A. L. (1951). Cumarebo oil fields, Falcón, Venezuela, *Amer. Assoc. Petr. Geol. Bull.*, 35(8): 1850-1878.
- Pitelli, R. (1989). El Eoceno Medio Tardío y Eoceno Tardío de la parte occidental de la cuenca de Falcón, *Soc. Venez. Geol.*, Bol., 36: 5-12.
- Quintero, Z. (2007). Disponibilidades de agua subterránea en la cuenca del Río Sanchón, estado Carabobo. Tesis de pregrado. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. Universidad de Los Andes, Escuela de Ingeniería Geológica. Mérida – Venezuela.
- Ramírez, L. (2006). Evaluación de las disponibilidades de agua subterránea entre los ríos Morador y Sarare del Estado Portuguesa. Tesis de pregrado. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. Universidad de Los Andes, Escuela de Ingeniería Geológica. Mérida – Venezuela.
- Sala, R. (2009). Evaluación de las disponibilidades de agua subterránea del área comprendida entre el Río Santo Domingo, Estado Barinas y el Río Guanare, Estado Portuguesa. Tesis de pregrado. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. Universidad de Los Andes, Escuela de Ingeniería Geológica. Mérida – Venezuela.
- Uzcátegui M. (2004). Evaluación del Impacto de una recarga artificial sobre el acuífero del Valle de Quibor. Trabajo de grado para optar al título de Magíster Scientiae en Obras Hidráulicas. Universidad de Los Andes. Mérida Venezuela.

## REFERENCIAS ELECTRONICAS

- <http://www.a-venezuela.com/mapas/map/html/estados/falcon.html>
- <http://www.a-venezuela.com/mapas/mapapdf.html>.
- [http://www.gobiernoenlinea.gob.ve/venezuela/perfil\\_falcon.html](http://www.gobiernoenlinea.gob.ve/venezuela/perfil_falcon.html)
- <http://www.pdv.com/lexico>

Bdigital.ula.ve

Bdigitalula.ve

**ANEXO**

1. Datos de las pruebas de infiltración realizadas en campo

**Prueba de infiltración 1**

| TIEMPO ACUMU. (min) | PROF ACUMU.(mm) |
|---------------------|-----------------|
| 0                   | 0               |
| 2                   | 3.1             |
| 4                   | 4.9             |
| 6                   | 7.4             |
| 11                  | 9.9             |
| 16                  | 13              |
| 21                  | 16.8            |
| 31                  | 20.7            |
| 41                  | 26.7            |
| 51                  | 32.8            |
| 61                  | 39.1            |
| 71                  | 45              |
| 86                  | 51.7            |
| 101                 | 58.6            |
| 141                 | 67.1            |

**Prueba de infiltración 2**

| TIEMPO ACUMU. (min) | PROF ACUMU.(mm) |
|---------------------|-----------------|
| 0                   | 0               |
| 2                   | 3               |
| 4                   | 3.5             |
| 6                   | 5               |
| 11                  | 7.5             |
| 16                  | 9.5             |
| 21                  | 12              |
| 31                  | 16              |
| 41                  | 20              |
| 51                  | 22              |
| 61                  | 27              |
| 76                  | 32              |
| 91                  | 37              |
| 106                 | 42              |
| 126                 | 49              |
| 146                 | 57              |

**Prueba de infiltración 3**

| TIEMPO ACUMU. (min.) | PROF ACUMU. (mm.) |
|----------------------|-------------------|
| 0                    | 0                 |
| 2                    | 5                 |
| 4                    | 10                |
| 6                    | 14                |
| 11                   | 21                |
| 16                   | 26.5              |
| 21                   | 33.5              |
| 31                   | 44.5              |
| 41                   | 54.5              |
| 51                   | 65.5              |
| 61                   | 78.5              |
| 76                   | 94.5              |
| 91                   | 104.5             |
| 106                  | 119.5             |
| 122                  | 134.5             |
| 138                  | 150.5             |
| 158                  | 166.5             |

**Prueba de infiltración 4**

| TIEMPO ACUMU. (min.) | PROF ACUMU. (mm.) |
|----------------------|-------------------|
| 0                    | 0                 |
| 2                    | 4                 |
| 4                    | 7                 |
| 6                    | 11                |
| 11                   | 15                |
| 16                   | 20                |
| 21                   | 26                |
| 31                   | 37                |
| 41                   | 46                |
| 51                   | 57                |
| 66                   | 67                |
| 81                   | 78                |
| 96                   | 90                |
| 116                  | 101               |
| 136                  | 113               |

Bdigital.ula.ve

C.C.Reconocimiento

**Prueba de infiltración 9**

| TIEMPO<br>ACUMU (min) | PROF<br>ACUMU (mm) |
|-----------------------|--------------------|
| 0                     | 0                  |
| 1                     | 0.2                |
| 2                     | 0.3                |
| 3                     | 0.4                |
| 10                    | 0.6                |
| 20                    | 0.9                |
| 40                    | 1.5                |
| 60                    | 1.7                |
| 90                    | 1.7                |

**Prueba de infiltración 10**

| TIEMPO<br>ACUMU (min) | PROF<br>ACUMU (mm) |
|-----------------------|--------------------|
| 0                     | 0                  |
| 1                     | 1.1                |
| 2                     | 1.1                |
| 3                     | 1.1                |
| 5                     | 1.1                |
| 10                    | 1.1                |
| 15                    | 1.2                |
| 20                    | 1.3                |
| 30                    | 1.5                |
| 45                    | 1.8                |
| 60                    | 1.9                |
| 90                    | 2                  |

**Prueba de infiltración 11**

| TIEMPO<br>ACUMULADO<br>(min.) | PROF<br>ACUMULADA<br>(mm.) |
|-------------------------------|----------------------------|
| 0                             | 0                          |
| 2                             | 3.1                        |
| 4                             | 4.5                        |
| 6                             | 6.3                        |
| 11                            | 9.9                        |
| 16                            | 13.3                       |
| 21                            | 16.8                       |
| 31                            | 22                         |
| 41                            | 27.9                       |
| 51                            | 33.6                       |
| 61                            | 39.6                       |
| 71                            | 44.7                       |
| 86                            | 51.7                       |
| 101                           | 58.2                       |
| 141                           | 65.7                       |

**Prueba de infiltración 12**

| TIEMPO<br>ACUMULADO<br>(min.) | PROF<br>ACUMULADA<br>(mm.) |
|-------------------------------|----------------------------|
| 0                             | 0                          |
| 2                             | 2.9                        |
| 4                             | 4.2                        |
| 6                             | 5.9                        |
| 11                            | 8.8                        |
| 16                            | 11.9                       |
| 21                            | 15.6                       |
| 31                            | 20.6                       |
| 41                            | 26                         |
| 51                            | 31.3                       |
| 61                            | 37.5                       |
| 71                            | 43.2                       |
| 86                            | 49.7                       |
| 101                           | 56.1                       |
| 141                           | 63.2                       |

**Anexo 2.** Resumen de la data de los pozos en el aria de estudio.

| N°  | SECTOR                    | E       | N         | COTA | pH   | T (°C) | CE (mS/cm) | NE (m) | Q (lps) | ND (m) |
|-----|---------------------------|---------|-----------|------|------|--------|------------|--------|---------|--------|
| P1  | Sabana Grande             | 279.534 | 1.180.882 | 125  |      | 29.80  | 424.00     | 27.70  |         |        |
| P2  | Sabana Grande             | 279.464 | 1.180.824 | 125  |      | 29.80  | 315.00     | 29.00  |         |        |
| P3  | Sabana Grande             | 279.454 | 1.180.775 | 119  |      | 29.60  | 888.00     | 27.80  |         |        |
| P4  | Sabana Grande             | 279.534 | 1.180.790 | 118  |      |        |            |        |         |        |
| P5  | Sabana Grande             | 279.488 | 1.180.724 | 120  |      |        |            |        |         |        |
| P6  | Vía La Represa            | 280.439 | 1.181.884 | 109  |      | 30.30  | 1018.00    | 19.60  |         |        |
| P7  | Vía La Represa            | 280.627 | 1.181.933 | 99   |      |        |            |        |         |        |
| P8  | Vía La Represa            | 280.676 | 1.182.110 | 103  |      |        |            |        |         |        |
| P9  | Km. 16                    | 277.540 | 1.180.467 | 110  | 8.35 | 30.60  | 1275.00    |        |         |        |
| P10 | La Bomba                  | 274.889 | 1.183.914 | 67   | 6.30 | 29.70  | 1244.00    |        | 11.60   |        |
| P11 | La Radal                  | 273.975 | 1.183.328 | 65   |      | 29.80  | 2500.00    | 33.50  |         |        |
| P12 | La Radal                  | 274.174 | 1.182.725 | 68   |      | 29.60  | 2870.00    | 36.20  |         |        |
| P13 | La Radal                  | 274.298 | 1.182.146 | 73   |      | 29.90  | 776.00     | 41.00  |         |        |
| P14 | 52 La Güiría              | 274.425 | 1.182.243 | 73   | 6.46 | 29.80  | 888.00     | 43.40  |         |        |
| P15 | La Radal Bar Tres Colores | 273.511 | 1.182.900 | 55   | 6.09 | 30.30  | 1582.00    | 31.60  |         |        |
| P16 | 4 Bocas                   | 272.264 | 1.181.965 | 56   | 6.15 | 28.90  | 1418.00    |        |         |        |
| P17 | 4 Bocas                   | 271.720 | 1.181.972 | 54   | 6.10 | 28.50  | 699.00     |        | 13.20   |        |
| P18 | 4 Bocas                   | 271.777 | 1.181.823 | 50   | 6.28 | 30.00  | 482.00     |        | 3.59    |        |
| P19 | Las Radalas               | 274.361 | 1.181.747 | 57   | 6.04 | 29.60  | 755.00     |        | 1.53    |        |
| P20 | 4 Bocas                   | 272.394 | 1.181.768 | 52   | 6.16 | 30.10  | 929.00     |        | 6.33    |        |
| P21 | Alcabala La Raya          | 271.920 | 1.182.673 | 52   | 6.22 | 29.40  | 1145.00    |        |         |        |
| P22 | Alcabala La Raya          | 272.236 | 1.182.725 | 53   | 6.49 | 26.80  | 1603.00    |        |         |        |
| P23 | Alcabala La Raya          | 272.168 | 1.183.006 | 51   |      | 29.00  | 3180.00    | 25.30  |         |        |
| P24 | Alcabala La Raya          | 272.883 | 1.182.837 | 55   |      | 29.40  | 7530.00    | 29.10  |         |        |
| P25 | La seis                   | 277.750 | 1.186.579 | 55   |      |        |            |        | 19.00   |        |
| P26 | La siete                  | 277.635 | 1.187.780 | 53   | 6.36 | 28.90  | 1015.00    |        | 10.60   |        |
| P27 | La siete                  | 277.863 | 1.189.095 | 50   | 6.39 | 29.30  | 828.00     |        |         |        |
| P28 | La ocho                   | 278.455 | 1.189.011 | 52   | 6.39 | 29.30  | 785.00     |        |         |        |
| P29 | Km. 7                     | 277.770 | 1.187.256 | 54   | 6.50 | 29.00  | 2800.00    | 24.00  |         |        |

| N°  | SECTOR                             | E       | N         | COTA | pH   | T (°C) | CE (mS/cm) | NE (m) | Q (lps) | ND (m) |
|-----|------------------------------------|---------|-----------|------|------|--------|------------|--------|---------|--------|
| P30 | Comunidad Los Pedros               | 286.835 | 1.195.566 | 89   |      |        |            | 24.00  |         |        |
| P31 | Los Pedros                         | 287.808 | 1.196.880 | 86   | 6.45 | 30.30  | 520.00     |        |         |        |
| P32 | Los Pedros Vía Casigua             | 284.403 | 1.195.695 | 81   | 5.90 | 32.00  | 103.00     |        | 2.52    |        |
| P33 | Comunidad de Jadagua               | 281.555 | 1.197.729 | 58   |      |        |            |        |         |        |
| P34 | 40 pesos                           | 290.830 | 1.192.487 | 127  |      |        |            |        |         |        |
| P35 | Rincón de León - Los Pedros        | 283.669 | 1.191.273 | 57   | 5.72 | 29.70  | 323.00     | 20.40  |         |        |
| P36 | El seis                            | 275.901 | 1.186.490 | 46   | 6.40 | 28.70  | 1841.00    |        | 0.50    |        |
| P37 | El seis                            | 276.089 | 1.186.756 | 46   | 6.38 | 28.00  | 899.00     |        | 12.00   |        |
| P38 | El seis                            | 276.199 | 1.185.530 | 50   | 6.41 | 29.10  | 1242.00    |        | 12.00   |        |
| P39 | El Ultimo Tiro Vía San Félix       | 271.819 | 1.195.911 | 33   | 6.75 | 30.50  | 863.00     |        |         |        |
| P40 | Comunidad El Llanito               | 270.126 | 1.201.062 | 27   | 7.05 | 31.80  | 1279.00    |        |         |        |
| P41 | Comunidad de Sibira                | 271.474 | 1.198.740 | 35   | 6.71 | 31.50  | 2150.00    |        |         |        |
| P42 | Sistema de riego Matícora – Sibira | 271.483 | 1.197.762 | 37   | 6.85 | 31.50  | 2370.00    |        |         |        |
| P43 | Sistema de riego Matícora – Sibira | 270.934 | 1.196.789 | 33   | 6.97 | 30.60  | 673.00     | 28.00  | 18.55   |        |
| P44 | La seis                            | 276.262 | 1.187.363 | 52   | 6.37 | 28.80  | 1019.00    |        |         |        |
| P45 | La seis                            | 276.120 | 1.187.997 | 52   |      |        |            |        |         |        |
| P46 | La seis                            | 276.601 | 1.186.973 | 47   | 6.40 | 29.40  | 707.00     |        |         |        |
| P47 | Comunidad Las Cocuizas             | 281.236 | 1.202.401 | 39   | 6.81 | 30.00  | 500.00     | 40.00  | 8.00    |        |
| P48 | Los Pedros                         | 284.654 | 1.194.195 | 88   |      |        |            |        |         |        |
| P49 | Los Pedros                         | 280.735 | 1.189.252 | 47   | 6.86 | 30.20  | 1203.00    |        |         |        |
| P50 | Los Pedros                         | 280.436 | 1.189.072 | 53   |      | 29.40  | 606.00     | 20.30  |         |        |
| P51 | Los Pedros                         | 279.326 | 1.189.584 | 49   |      |        |            |        |         |        |
| P52 | Km. 7                              | 277.516 | 1.187.013 | 52   |      | 29.00  | 846.00     | 24.80  |         |        |
| P53 | Km. 7 vía San Félix                | 277.528 | 1.189.478 | 48   | 6.28 | 30.80  | 1092.00    |        |         |        |
| P54 | Los Indios Vía San Félix           | 279.361 | 1.191.661 | 50   | 6.37 | 29.80  | 1723.00    | 16.70  |         |        |

| N°  | SECTOR                             | E       | N         | COTA | pH   | T (°C) | CE (mS/cm) | NE (m) | Q (lps) | ND (m) |
|-----|------------------------------------|---------|-----------|------|------|--------|------------|--------|---------|--------|
| P55 | Los Indios Vía San Félix           | 278.175 | 1.191.582 | 50   | 6.48 | 29.50  | 1699.00    | 17.00  |         |        |
| P56 | Los Indios Vía San Félix           | 278.037 | 1.191.715 | 51   |      | 29.80  | 2050.00    | 16.80  |         |        |
| P57 | Los Indios Vía San Félix           | 277.283 | 1.192.873 | 47   | 6.20 | 30.30  | 2540.00    |        |         |        |
| P58 | Los Indios Vía San Félix           | 276.235 | 1.193.505 | 47   |      | 30.80  | 2150.00    | 17.00  |         |        |
| P59 | Los Indios Vía San Félix           | 275.201 | 1.194.375 | 45   | 6.25 | 31.00  | 1426.00    | 19.10  |         |        |
| P60 | Los Indios Vía San Félix           | 275.547 | 1.194.557 | 46   |      | 30.40  | 1284.00    | 19.00  |         |        |
| P61 | Embalse Matícora                   | 281.661 | 1.181.672 | 121  | 7.75 | 29.40  | 709.00     |        |         |        |
| P62 | Embalse Matícora                   | 281.615 | 1.181.828 | 87   | 7.78 | 26.60  | 710.00     |        |         |        |
| P63 | Los Indios                         | 272.822 | 1.194.989 | 33   | 6.69 | 30.60  | 1266.00    |        |         |        |
| P64 | Los Indios                         | 272.706 | 1.195.359 | 38   |      | 30.60  | 1957.00    | 26.60  |         |        |
| P65 | El Ultimo Tiro Vía San Félix       | 271.859 | 1.196.839 | 31   |      | 31.20  | 1310.00    | 27.00  |         |        |
| P66 | Sibira                             | 270.598 | 1.197.851 | 31   |      |        |            |        |         |        |
| P67 | Sistema de riego Matícora- Sibira  | 268.883 | 1.197.241 | 24   |      | 30.70  | 1358.00    | 28.00  |         |        |
| P68 | Sistema de riego Matícora- Sibira  | 268.619 | 1.196.837 | 28   | 6.78 | 30.60  | 1075.00    |        |         |        |
| P69 | Sistema de riego Matícora- Sibira  | 270.408 | 1.198.312 | 29   | 6.70 | 29.60  | 2050.00    | 18.50  |         |        |
| P70 | Sistema de riego Matícora- Sibira  | 269.205 | 1.198.906 | 27   |      | 29.20  | 1534.00    | 11.40  |         |        |
| P71 | Sistema de riego Matícora- Sibira  | 269.408 | 1.199.059 | 31   | 6.91 | 31.10  | 966.00     |        |         |        |
| P72 | Sist. de riego Matícora – Terronal | 268.460 | 1.201.150 | 35   |      | 32.00  | 4450.00    | 19.20  |         |        |
| P73 | Sist. de riego Matícora            | 269.056 | 1.200.853 | 33   |      | 30.20  | 1320.00    | 21.70  |         |        |

| N°  | SECTOR                          | E       | N         | COTA | pH   | T (°C) | CE (mS/cm) | NE (m) | Q (lps) | ND (m) |
|-----|---------------------------------|---------|-----------|------|------|--------|------------|--------|---------|--------|
|     | - Terronal                      |         |           |      |      |        |            |        |         |        |
| P74 | La Bomba                        | 273.872 | 1.185.990 | 48   |      |        |            |        |         |        |
| P75 | La Bomba                        | 273.824 | 1.185.947 | 51   |      |        |            |        |         |        |
| P76 | La Bomba                        | 274.819 | 1.184.362 | 58   | 6.02 | 29.70  | 3830.00    |        |         |        |
| P77 | Mene Mauroa                     | 285.292 | 1.189.191 | 76   |      |        |            | 34,00  |         |        |
| P78 | Mene Mauroa                     | 280.742 | 1.181.168 |      |      |        |            | 57,00  |         |        |
| P79 | El seis                         | 277.186 | 1.185.801 | 64   |      |        |            | 27,00  |         |        |
| P80 | Entrada a Mene Mauroa           | 274.559 | 1.183.821 |      |      |        |            | 32,00  |         |        |
| P81 | Mene Mauroa                     | 280.281 | 1.189.653 | 55   |      |        |            | 12,00  |         |        |
| P82 | Carretera Falcón- Zulia Km. 418 | 289.259 | 1.201.304 |      |      |        |            | 38,00  | 7,00    | 54     |
| P83 | Mene Mauroa                     | 265.895 | 1.205.456 |      |      |        |            |        |         |        |
| P84 | San Félix                       | 261.209 | 1.208.533 | 14   |      |        |            | 17,40  |         |        |
| P85 | San Félix                       | 261.086 | 1.208.442 |      |      |        |            | 17,00  | 5,00    |        |
| P86 | Acueducto San Félix             | 261.663 | 1.208.407 |      |      |        |            | 17,00  | 12,00   | 24     |

**Anexo 3.** Base de datos para el modelado de la base de las capas.

| ID         | X         | Y          | COTA  | NE   | COTA - NE | CP1  | COTA-CP1 | CAP2 | COTA - CP2 |
|------------|-----------|------------|-------|------|-----------|------|----------|------|------------|
| FA6578001A | 285292,28 | 1189190,56 | 76,15 | 34   | 42,15     | 1    | 75,15    | 25   | 51,15      |
| FA6579001A | 280742,33 | 1181167,99 | 138,2 | 57   | 81,2      | 17,7 | 120,5    | 37   | 101,2      |
| FA6579002A | 277185,94 | 1185801,24 | 63,88 | 27   | 36,88     | 1    | 62,88    | 3    | 60,88      |
| FA6579013A | 274558,77 | 1183821,03 | 60,8  | 32   | 28,8      | 1    | 59,8     | 31,5 | 29,3       |
| FA6579021A | 280280,92 | 1189653,25 | 54,89 | 12   | 42,89     | 10   | 44,89    | 17   | 37,89      |
| FA6678009A | 289258,58 | 1201304,38 | 77,25 | 38   | 39,25     | 19   | 58,25    | 21   | 56,25      |
| FA6679015A | 265895,13 | 1205456,42 | 17,2  |      |           | 56   | -38,8    | 60   | -42,8      |
| FA6680002A | 261208,6  | 1208532,82 | 14,15 | 17,4 | -3,25     | 22   | -7,85    | 26   | -11,85     |
| FA6680003A | 261086,44 | 1208441,5  | 14,52 | 17   | -2,48     | 8    | 6,52     | 12   | 2,52       |
| FA6680009A | 261663,34 | 1208406,59 | 14,71 | 17   | -2,29     | 9    | 5,71     | 13,5 | 1,21       |

| ID         | X         | Y          | COTA  | CAP2 | COTA - CP2 | CP3  | COTA - CP3 | CP4  | COTA - CP4 |
|------------|-----------|------------|-------|------|------------|------|------------|------|------------|
| FA6578001A | 285292,28 | 1189190,56 | 76,15 | 25   | 51,15      | 51   | 25,15      | 91   | -14,85     |
| FA6579001A | 280742,33 | 1181167,99 | 138,2 | 37   | 101,2      | 40,4 | 97,8       | 42   | 96,2       |
| FA6579002A | 277185,94 | 1185801,24 | 63,88 | 3    | 60,88      | 6    | 57,88      | 9    | 54,88      |
| FA6579013A | 274558,77 | 1183821,03 | 60,8  | 31,5 | 29,3       | 49,8 | 11         | 98,6 | -37,8      |
| FA6579021A | 280280,92 | 1189653,25 | 54,89 | 17   | 37,89      | 80   | -25,11     | 81   | -26,11     |
| FA6678009A | 289258,58 | 1201304,38 | 77,25 | 21   | 56,25      | 53   | 24,25      | 55   | 22,25      |
| FA6679015A | 265895,13 | 1205456,42 | 17,2  | 60   | -42,8      | 69   | -51,8      | 73   | -55,8      |
| FA6680002A | 261208,6  | 1208532,82 | 14,15 | 26   | -11,85     | 56   | -41,85     | 57   | -42,85     |
| FA6680003A | 261086,44 | 1208441,5  | 14,52 | 12   | 2,52       | 17   | -2,48      | 26,4 | -11,88     |
| FA6680009A | 261663,34 | 1208406,59 | 14,71 | 13,5 | 1,21       | 27   | -12,29     | 38,5 | -23,79     |

| ID         | X         | Y          | COTA  | CP5  | COTA-CP5 | CP6   | COTA-CP6 | CP7   | COTA-CP7 |
|------------|-----------|------------|-------|------|----------|-------|----------|-------|----------|
| FA6578001A | 285292,28 | 1189190,56 | 76,15 | 101  | -24,85   | 102   | -25,85   | 103   | -26,85   |
| FA6579001A | 280742,33 | 1181167,99 | 138,2 | 63,4 | 74,8     | 86    | 52,2     | 91    | 47,2     |
| FA6579002A | 277185,94 | 1185801,24 | 63,88 | 13   | 50,88    | 50    | 13,88    | 84    | -20,12   |
| FA6579013A | 274558,77 | 1183821,03 | 60,8  | 99,6 | -38,8    | 100,6 | -39,8    | 101,6 | -40,8    |
| FA6579021A | 280280,92 | 1189653,25 | 54,89 | 82   | -27,11   | 83    | -28,11   | 84    | -29,11   |
| FA6678009A | 289258,58 | 1201304,38 | 77,25 | 95   | -17,75   | 96    | -18,75   | 97    | -19,75   |
| FA6679015A | 265895,13 | 1205456,42 | 17,2  | 84   | -66,8    | 92    | -74,8    | 106   | -88,8    |
| FA6680002A | 261208,6  | 1208532,82 | 14,15 | 58   | -43,85   | 59    | -44,85   | 60    | -45,85   |
| FA6680003A | 261086,44 | 1208441,5  | 14,52 | 35   | -20,48   | 63    | -48,48   | 67,8  | -53,28   |
| FA6680009A | 261663,34 | 1208406,59 | 14,71 | 107  | -92,29   | 108   | -93,29   | 109   | -94,29   |

| ID         | X         | Y          | COTA  | CP8   | COTA-CP8 | CP9   | COTA-CP9 | CP10  | COTA-CP10 |
|------------|-----------|------------|-------|-------|----------|-------|----------|-------|-----------|
| FA6578001A | 285292,28 | 1189190,56 | 76,15 | 104   | -27,85   | 105   | -28,85   | 106   | -29,85    |
| FA6579001A | 280742,33 | 1181167,99 | 138,2 | 95,6  | 42,6     | 111   | 27,2     | 113   | 25,2      |
| FA6579002A | 277185,94 | 1185801,24 | 63,88 | 102   | -38,12   | 105   | -41,12   | 139   | -75,12    |
| FA6579013A | 274558,77 | 1183821,03 | 60,8  | 102,6 | -41,8    | 103,6 | -42,8    | 104,6 | -43,8     |
| FA6579021A | 280280,92 | 1189653,25 | 54,89 | 85    | -30,11   | 86    | -31,11   | 87    | -32,11    |
| FA6678009A | 289258,58 | 1201304,38 | 77,25 | 98    | -20,75   | 99    | -21,75   | 100   | -22,75    |
| FA6679015A | 265895,13 | 1205456,42 | 17,2  | 123   | -105,8   | 130   | -112,8   | 131   | -113,8    |
| FA6680002A | 261208,6  | 1208532,82 | 14,15 | 61    | -46,85   | 62    | -47,85   | 63    | -48,85    |
| FA6680003A | 261086,44 | 1208441,5  | 14,52 | 77    | -62,48   | 90,8  | -76,28   | 95,4  | -80,88    |
| FA6680009A | 261663,34 | 1208406,59 | 14,71 | 110   | -95,29   | 111   | -96,29   | 112   | -97,29    |

| ID         | X         | Y          | COTA  | CP11  | COTA-CP11 |
|------------|-----------|------------|-------|-------|-----------|
| FA6578001A | 285292,28 | 1189190,56 | 76,15 | 107   | -30,85    |
| FA6579001A | 280742,33 | 1181167,99 | 138,2 | 118   | 20,2      |
| FA6579002A | 277185,94 | 1185801,24 | 63,88 | 141   | -77,12    |
| FA6579013A | 274558,77 | 1183821,03 | 60,8  | 105,6 | -44,8     |
| FA6579021A | 280280,92 | 1189653,25 | 54,89 | 88    | -33,11    |
| FA6678009A | 289258,58 | 1201304,38 | 77,25 | 101   | -23,75    |
| FA6679015A | 265895,13 | 1205456,42 | 17,2  | 132   | -114,8    |
| FA6680002A | 261208,6  | 1208532,82 | 14,15 | 64    | -49,85    |
| FA6680003A | 261086,44 | 1208441,5  | 14,52 | 100   | -85,48    |
| FA6680009A | 261663,34 | 1208406,59 | 14,71 | 113   | -98,29    |