

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HONDURAS
DIRECCIÓN DEL SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO
ESCUELA DE FÍSICA
MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS CON ORIENTACIÓN EN HIDROGEOLOGÍA



TESIS

“Caracterización hidrogeológica preliminar en la zona alta del Cerro de Hula, ubicado en el municipio de Santa Ana, Francisco Morazán, para el manejo sostenible de las aguas subterráneas”

PRESENTA: Kelly Mariela Almendares Rivera

**PREVIA OPCIÓN AL GRADO DE MÁSTER EN:
RECURSOS HÍDRICOS CON ORIENTACIÓN EN HIDROGEOLOGÍA**

ASESORES:

Asesor principal: M.Sc. Tania Peña

Asesor temático: Dr.-Ing. Carlos R. Guevara Morel

TEGUCIGALPA, M.D.C.

HONDURAS, C.A.

Octubre, 2023

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HONDURAS
DIRECCIÓN DEL SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO
ESCUELA DE FÍSICA

MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS CON ORIENTACIÓN EN HIDROGEOLOGÍA

Ciudad Universitaria, Tegucigalpa, Honduras.



AUTORIDADES UNIVERSITARIAS:

MÁSTER: FRANCISCO JOSE HERRERA ALVRADO

RECTOR

Dra. JESSICA PATRICIA SÁNCHEZ MEDINA

SECRETARÍA GENERAL

DOCTOR: ARMANDO EUCEDA

DIRECTOR DE POSTGRADOS

MÁSTER: TANIA PEÑA

COORDINADOR DE LA MAESTRÍA

MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS CON ORIENTACIÓN EN HIDROGEOLOGÍA

Octubre, 2023

RESUMEN

La zona en estudio está ubicada al sur de la capital de Honduras, la ciudad de Tegucigalpa, específicamente en el Cerro de Hula, entre los municipios de Santa Ana, San Buenaventura y Ojojona, perteneciente al departamento de Francisco Morazán, con un área de influencia de 18.7 km². Dentro de esta área se identificaron alrededor de 11 comunidades (entre aldeas y caseríos), con una población aproximada proyectada de 2013 al 2022 de 5262 personas.

La morfología de esta zona en estudio muestra elevaciones superiores a los 1460 msnm, llegando a su parte más alta en el Cerro de Hula con aproximadamente a los 1700msnm, considerado en estudios geológicos como volcán en escudo de agua, cuya actividad actualmente ha cesado, y de acuerdo con la presencia de rocas es considerado como un domo basáltico fracturado, donde se originaron los flujos de lava basáltica que le han conferido esta morfología tipo mesa. Dentro de las formaciones geológicas presentes en el área de estudio se encuentran los basaltos cuaternarios, los basaltos Padre Miguel, y aluvión del cuaternario, y lo cual condiciona la hidrogeología encontrándose dos tipos de acuíferos: fracturados en los basaltos y poroso en el aluvión.

El Cerro de Hula debido a su gran altura, la mayor fuente de abastecimiento de agua es subterránea, cuya área recientemente se ha convertido en una zona de importancia para la capital de Honduras, puesto que, gran porcentaje de su población, se traslada hacia la ciudad de Tegucigalpa para laborar, además el crecimiento periurbano de la capital hacia la zona sur ya que existen oportunidades de obtener viviendas en nuevas urbanizaciones a menor costo, que se abastecen la mayoría de fuentes de agua subterránea, se vuelve importante realizar estudios de los recursos hídricos subterráneos de la zona, que sirvan como herramientas de gestión del recurso hídrico subterráneo para detener o revertir estos procesos de agotamiento por alta demanda del agua subterránea.

Por lo tanto, la investigación se ha basado en levantar un inventario actualizado y georreferenciado de las fuentes de agua subterránea, medir los niveles freáticos de esos puntos y con ellos construir las curvas isofreáticas, y, además, tratar de estimar de manera preliminar parámetros hidráulicos como la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento, mediante técnicas analíticas y pruebas de campo en la zona. Y para alcanzarlo, se realizaron visitas a campo a levantamiento de datos generales, niveles freáticos y realización de pruebas de bombeo en abril 2022 (época seca), los cuales fueron analizados, procesados e interpolados usando el método Kriging en el software ArcGis para construcción de curvas isofreáticas, y para la estimación de los parámetros hidráulicos se utilizaron dos métodos, métodos doble porosidad aplicado a medios fracturados en el software AquiferTest, y el método de aproximación de Logan (1964), según el Manual on pumping test analysis in fracturedrock aquifers de Tonder (2002).

Dentro de los principales hallazgos, está la identificación de 21 fuentes de abastecimiento de agua subterránea en la zona, de las cuales 8 fueron censadas en un estudio del Proyecto Fondo de Adaptación en 2015, y los 13 puntos restantes han sido levantados durante esta investigación, que abastecen alrededor de 2900 personas. Del total de pozos, 5 son pozos profundos que superan los 150 m de profundidad, y 16 son pozos someros cuyas profundidades no superan los 15 m. De estos puntos, se logró medir en el mes de abril 2022 (época seca), los niveles freáticos de los cuales se han construido las curvas isofreáticas del agua en la zona de estudio, que ayudan de manera preliminar conocer el movimiento del flujo de agua subterránea, cuyos resultados muestran un flujo radial, con curvas que van desde los 5 m de profundidad del nivel freático quedando en la zona oeste del área (parte más alta), y se mueve hacia abajo hasta las curvas de 100 m de profundidad. Y los resultados de la estimación de los parámetros hidráulicos al ser comparados con valores teóricos muestran que se está en presencia de medios basáltico fracturado.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	3
Índice de gráficos.....	7
Índice de ilustraciones.....	8
Índice de mapas.....	9
Índice de tablas	9
ABREVIATURAS.....	11
AGRADECIMIENTOS.....	12
1. INTRODUCCIÓN	13
2. CAPÍTULO I: DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	14
2.1 Descripción de la problemática	14
2.2 Justificación de la investigación	15
2.3 Límites de la investigación.....	16
A. Límites de tiempo.....	16
B. Límites de espacio o territorio	16
C. Límites de recursos.....	16
2.4 Definición del problema	17
3. CAPITULO II: OBJETIVOS	19
3.1 Objetivo general:.....	19
3.2 Objetivos específicos:.....	19
4. CAPITULO III: MARCO DE REFERENCIA	20
4.1 Marco histórico	20
4.2 Marco político y legal del recurso hídrico	20
4.3 Marco teórico	22
A. Agua subterránea	23
5. CAPITULO IV: DESCRIPCIÓN DEL MEDIO	28
5.1 Descripción socioeconómica del agua.....	28

A.	Ubicación	28
B.	Población	29
C.	Uso del suelo	30
5.2	Descripción biofísica	31
A.	Climatología	31
B.	Morfología	34
C.	Geología	36
D.	Suelos	40
E.	Hidrografía	40
F.	Hidrogeología	41
G.	Elevaciones de recarga	43
H.	Hidroquímica	44
6.	CAPITULO V: METODOLOGÍA	45
6.1	Tipo de investigación	45
6.2	Diseño de la investigación	45
A.	Descripción de las fases	46
B.	Materiales y variables utilizadas en el estudio	57
7.	CAPITULO VI: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS	58
7.1	Actualización del inventario de fuentes de agua subterránea en la zona de estudio	58
7.2	Construcción de las curvas isofreáticas a partir de los datos de niveles freáticos del inventario de fuentes de agua de la zona realizado en abril 2022	62
7.3	Estimación preliminar de los parámetros hidráulicos del área en estudio, mediante el análisis de pruebas de bombeo	66
A.	Identificación régimen de flujo	66
B.	Identificación modelo de análisis	67
C.	Estimación de parámetros hidráulicos	69
8.	CAPITULO VII: DISCUSIÓN	71

8.1	Actualización del inventario de fuentes de agua subterránea en la zona de estudio	71
8.2	Construcción de las curvas isofreáticas a partir de los datos de niveles freáticos del inventario de fuentes de agua de la zona realizado en abril 2022	72
8.3	Estimación preliminar de los parámetros hidráulicos del área en estudio, mediante el análisis de pruebas de bombeo	72
8.4	Propuesta de unidad hidrogeológica Cerro de Hula	73
9.	CONCLUSIONES	75
10.	RECOMENDACIONES	76
11.	BIBLIOGRAFÍA	77
12.	ANEXOS.....	89
12.1	Ficha recolección datos de campo	89
12.2	Fotos giras de campo.....	90
12.3	Tabla censo PFA 2014/2015	92
12.4	Tabla actualización inventario de fuentes de agua	92
12.5	Detalle perfiles niveles freáticos	93
12.6	Resultados AcuíferoTest	94
A.	Pozo Cerrito de Ayasta	94
B.	Pozo Quebraditas	95
C.	Pozo Yastepec.....	96
12.7	Resultados FC_Example.....	97
A.	Pozo Cerrito de Ayasta	97
B.	Pozo Quebraditas	97
C.	Pozo Yastepec.....	98

Índice de gráficos

Gráfico 1	Climograma de la Zona de Estudio	32
Gráfico 2	Profundidades pozos censados PFA 2014/2015.....	43

Gráfico 3 Línea meteórica Cerro de Hula	44
Gráfico 4 Inventario pozos malacate abril 2022	59
Gráfico 5 Inventario pozos perforados abril 2022	60
Gráfico 6 Log-Log datos prueba bombeo pozo Cerrito de Ayasta	68
Gráfico 7 semi-Log datos prueba bombeo pozo Cerrito de Ayasta	68
Gráfico 8 Log-Log datos prueba bombeo pozo Quebraditas	68
Gráfico 9 Semi-Log datos prueba bombeo pozo Quebraditas	68
Gráfico 10 Log-Log datos prueba bombeo pozo Yastepec.....	68
Gráfico 11 Semi-Log datos prueba bombeo pozo Yastepec	68

Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Crecimiento poblacional grandes ciudades de Latinoamérica	15
Ilustración 2 Ejemplo de perfil y mapa freático	27
Ilustración 3 Perfil geológico A-A'.....	38
Ilustración 4 Columna litológica del área	39
Ilustración 5 Perfil geológico B-B'.....	40
Ilustración 6 Unidad hidrogeológica del área.....	42
Ilustración 7 Descripción general de la metodología de la investigación	45
Ilustración 8 Relación de resultados con la metodología empleada.....	46
Ilustración 9 Esquema análisis pruebas de bombeo	51
Ilustración 10 Comportamiento hidráulico del modelo de fractura	53
Ilustración 11 Gráficos de diagnóstico típicos en hidrogeología: a Modelo Theis: acuífero confinado bidimensional infinito; b doble porosidad acuífero inconfinado; c Línea infinita sin límite de flujo; d límite de cabeza constante lineal infinito; e acuífero semiconfinado; f Almacenamiento del pozo y efecto piel; g fractura vertical de conductividad infinita; h Dimensión de flujo radial general no entera menor que 2; i modelo de flujo radial general: dimensión de flujo no entera mayor que 2; j Efecto combinado del almacenamiento en el pozo y el límite de carga constante lineal infinito (modificado por Renard 2005b)	54
Ilustración 12 Modelo doble porosidad de Warren y Root (1983)	55
Ilustración 13 Comportamiento típico de Modelo doble porosidad escala log-log.....	56
Ilustración 14 Predicción de errores de calidad datos niveles freáticos	62
Ilustración 15 Perfil de niveles freáticos A-A'.....	64
Ilustración 16 Perfil de niveles freáticos B-B'	64

Ilustración 17 Perfil de niveles freáticos C-C'	65
Ilustración 18 Perfil de niveles freáticos D-D'	65
Ilustración 19 Comportamiento hidráulico del modelo de flujo de fractura	69
Ilustración 20 Curvas tipo análisis hidrogeológico de las derivadas double porosity	69

Índice de mapas

Mapa 1 Ubicación área de estudio.....	28
Mapa 2 Comunidades dentro del área de estudio.....	30
Mapa 3 Uso del suelo	31
Mapa 4 Comportamiento precipitación media anual	33
Mapa 5 Comportamiento temperatura media anual.....	34
Mapa 6 Zonas altimétricas	35
Mapa 7 Pendientes en porcentaje	36
Mapa 8 Geología área de estudio	37
Mapa 9 Subcuencas y drenajes de agua superficial.....	41
Mapa 10 Hidrogeología área de estudio	42
Mapa 11 Fuentes de agua inventariadas en abril 2022	61
Mapa 12 Población abastecida de las fuentes de agua inventariadas 2022.....	61
Mapa 13 Curvas isofreáticas zonas de estudio	63
Mapa 14 Ubicación pozos perforados en análisis de pruebas de bombeo.....	66
Mapa 15 Propuesta Unidad Hidrogeológica Cerro de Hula	74

Índice de tablas

Tabla 1 Legislación de Honduras en temática del recurso hídrico	20
Tabla 2 Instancias Gubernamentales de Honduras entorno al recurso hídrico.....	22
Tabla 3 Clasificación de algunos materiales sedimentarios según su permeabilidad.....	25
Tabla 4 Valores de transmisividad.....	26
Tabla 5 Comunidades dentro del área de estudio	29
Tabla 6 Usos del suelo área de estudio	30
Tabla 7 Valores estimados de conductividad hidráulica (m/d) de diferentes autores	55
Tabla 8 Inventario de nuevas fuentes de agua y actualización de existentes, abril 2022	58

Tabla 9 Datos entrada cálculo transmisividad..... 69

Tabla 10 Estimación de parámetros hidráulicos 69

ABREVIATURAS

IHCIT	Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra
CONASA	Consejo Nacional de Agua Potable y Saneamiento
GWP	Global Water Partnership
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SINIT	Sistema de Información Territorial
ICF	Instituto de Conservación Forestal
UNICEF	Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia
SANAA	Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados
ERSAPS	Ente Regulador de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
OMM	Organización Meteorológica Mundial
INE	Instituto Nacional de Estadística
PFA	Proyecto Fondo de Adaptación
m.s.n.m.	Metros Sobre el Nivel del Mar
Km ²	Kilómetros cuadrados
km ³ /año	Kilómetros cúbicos al año
°C	Grados centígrados
L ³ t ⁻¹	Medidas de distancia al cubo entre tiempo
L t ⁻¹	Medidas de distancia entre tiempo
L ²	Medidas de distancia al cuadrado
Ha	Hectárea
mm	Milímetros
m	Metros
NF	Nivel freático
plg	Pulgadas
M ² /día	Metros cuadrados al día
M ³ /día	Metros cúbicos al día
h	Horas
Adim	Adimensional
LOG	Escala logarítmica
SEMILOG	Escala semilogarítmica
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
Coordenadas UTM	Coordenadas Universal Transverse Mercator
DEM	Modelo de elevación digital

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios como ser superior de creación que me permitió comenzar y finalizar este proceso de crecimiento académico.

A mis hijas y mi esposo, por su amor y por su paciencia en esos momentos difíciles, con tiempos limitados, por el apoyo y acompañamiento durante las giras a campo, y ánimos para seguir y poder llegar a este momento de culminación.

A mis padres, por la vida, por su amor incondicional, y que desde el inicio en este camino se dispusieron a apoyarme y animarme.

A mis hermanos y sus familias, que de una u otra forma me apoyaron.

A Tania Peña, quien ha sido más que asesora principal de mi trabajo, me ha animado desde antes del inicio en este camino, quien ha invertido de su tiempo para apoyarme a finalizar.

A los pobladores de las comunidades que visité que muy amablemente me recibieron, apoyaron y acompañaron con el levantamiento de la información.

A Carlos Guevara por la asesoría temática, por su paciencia y comprensión con los tiempos de entrega.

Se agradece a la Coordinación de la Maestría en Recursos Hídricos con Orientación en Hidrogeología de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras por el apoyo en la gestión de equipo para el levantamiento de información en campo y el acompañamiento en todo el proceso.

Al Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra (IHCIT) de la UNAH, por la información preliminar proporcionada.

A todos mis profesores que formaron parte del camino de este programa.

Y por último a quienes no son incluidos, pero participaron con algún apoyo sin siquiera esperar ser reconocidos.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el agua subterránea por su naturaleza y abundancia forma un recurso importante frente a la predecible disminución de los recursos hídricos superficiales. Existen una serie de factores que hacen muy asequible su utilización, como por ejemplo su amplia distribución geográfica, que habitualmente las sitúa próximas al centro de consumo; su fácil adaptación a la demanda hídrica, ya que pueden satisfacer, de un modo rápido y eficaz; su uniformidad en la calidad química; y su protección ante la agresión de diferentes agentes (LLera & Azcoiti, 2009).

Por tal razón, la investigación pretende de manera preliminar realizar una caracterización hidrogeológica, la cual se llevó a cabo durante la época seca del año 2022, siendo esta temporada crítica en términos de abundancia de precipitación, y por ende se caracteriza de mejor manera el comportamiento de los niveles de agua subterránea para su caracterización en la zona alta del Cerro de Hula, en el municipio de Santa Ana, Francisco Morazán.

El área en estudio se ubica en la zona sur de Tegucigalpa, zona cuya morfología es montañosa con grandes alturas sobre el nivel del mar, por lo que la mayor fuente de abastecimiento de agua es subterránea. El clima se caracteriza por tener bastantes lluvias, presentándose una precipitación media anual que oscila entre los 1197 mm y 1126 mm, con temperaturas medias anuales que están entre los 22.6°C y los 21.5°C. La hidrografía presente es de drenajes efímeros, que alimentan cuerpos de agua en las partes bajas alrededor del mismo (IHCIT-UNAH, 2014). El uso del suelo está dominado por pastos y cultivos, bosque latifoliado deciduo y vegetación secundaria decidua, con un 35.4%, 35.3% y 23% respectivamente (ICF, 2018).

Como principales objetivos se han tenido el levantamiento de un inventario actualizado de fuentes de agua subterránea en la zona, la construcción de un modelo isofreático y estimación de parámetros hidráulicos importantes como ser la conductividad hidráulica, y con ello poder de manera preliminar hacer la caracterización hidrogeológica de la zona, que contribuya a generar un marco de referencia para el manejo sostenible de las aguas subterráneas, que garantice el abastecimiento a las poblaciones actuales y futuras.

2. CAPÍTULO I: DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

2.1 Descripción de la problemática

La problemática de escasez del agua en el mundo se ha venido evidenciando desde los últimos años, esto debido principalmente a cambios en el clima, deforestación, agricultura extensiva, entre otros, que han afectado almacenamiento, disponibilidad y calidad del agua, así como una alta demanda de este líquido por el crecimiento poblacional.

Las grandes ciudades del mundo en los últimos cien años han registrado un crecimiento poblacional urbano sin precedentes, ya que su economía ya no depende tanto de la agricultura sino del comercio y producción, además, se ha centralizado el poder de decisión político y económico hacia estos sitios, lo que provoca que las personas migren hacia estos lugares y zonas cercanas en busca de mejores condiciones económicas, pero en los países con subdesarrollo ese crecimiento poblacional induce una expansión física incontrolada, generando problemas ambientales siendo uno de ellos la escasez de agua, ya que el abastecimiento es insuficiente (Hardoy & Satterthwaite, 1987).

Asimismo, la gestión del recurso hídrico en el mundo ha cambiado, pues dentro de los desafíos actuales está el tratar de encontrar nuevas fuentes que cubran el escaso abastecimiento a la demanda actual y futura percibidas, para de esta manera tratar de cubrir las necesidades más básicas del ser humano a cualquier costo, lo cual tiene un impacto socioeconómico generando una problemática multidimensional (Gleick, 2000).

Latinoamérica está sufriendo una situación parecida, las ciudades está creciendo a tasas muy altas, en las grandes ciudades vive el 75% de la población mundial, en el mundo hay más de 4000 asentamientos que han crecido, de las cuales el 60% estaban localizadas en regiones en desarrollo como Latinoamérica y el Caribe, pasando la tasa de urbanización de 41% en 1950 al 79% en 2010 (Terraza, Rubio Blanco, & Vera, 2016).

Para el caso de Honduras, el Consejo Nacional de Agua Potable y Saneamiento (CONASA) en el 2015 realizó el análisis de las cuencas del país con algunos elementos que permiten priorizar estudios relacionados al agua, en el cual se identifica que la densidad población, es decir, que el crecimiento poblacional se ha convertido en un aspecto importante para considerar en temas de demanda de agua en el país (Peña, Oviedo, Rojas, Marín, & Lanza, 2016). En este estudio se evidencia que a partir de esto, se pueden generar dificultades como el aumento de los niveles de contaminación y disminución de la disponibilidad de agua en las cuencas con mayor población en Honduras, siendo estas Chamelecón y Choluteca (Global Water Partnership Centro América, 2017), dentro de esta última se encuentra la capital del país Tegucigalpa.

Crecimiento población 1955 - 2014

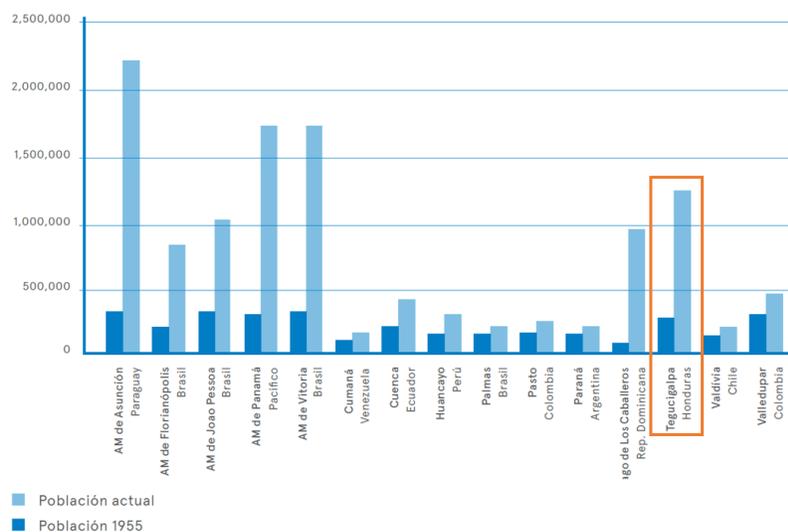


Ilustración 1 Crecimiento poblacional grandes ciudades de Latinoamérica
 Fuente: tomada de (Terraza, Rubio Blanco, & Vera, 2016)

En Tegucigalpa, el crecimiento poblacional y expansión urbana ha sido acelerado desde la década de los 50 (ver ilustración 1), siendo esta, una de las causas que ha influido para que el abastecimiento de agua potable sea restringido e insuficiente para suministrar a toda la población capitalina (Rodríguez Cruz, 2021), provocando nuevas áreas de inversión inmobiliaria en la zona sur de Tegucigalpa, lo cual genera una migración hacia las zonas periurbanas siendo una de ellas el Cerro de Hula (Chaín Rojas, 2013).

2.2 Justificación de la investigación

La previsible disminución del recurso hídrico superficial, ha generado que las aguas subterráneas constituyan un recurso estratégico por su naturaleza y abundancia ante esta problemática (Pernía Llera & Fornés Azcoiti, 2009), por lo que, esta fuente de abastecimiento está tomando una importancia que debió tener siempre, pues además, es la fuente de agua dulce con mayor proporción de agua en el planeta, que por su dinámica física está menos expuesta a la contaminación a causa de las actividades antropogénicas.

Al hablar del área de estudio Cerro de Hula, parte del municipio de Santa Ana, Francisco Morazán, zona ubicada a 24 kilómetros al sur de Tegucigalpa (Alvarez & Cruz, 2020) (ver mapa 1), se puede decir que tiene un relieve montañoso con altura aproximada de 1700 msnm en la parte más alta del Cerro (IHCIT-UNAH, 2016), lo cual provoca que las fuentes de abastecimiento sean de agua subterránea.

Sumado a eso, se puede destacar que esta es un área de importancia para Tegucigalpa, ya que gran porcentaje de la población se traslada a la ciudad a trabajar (Cruz, Galindo, Vásquez, & Edwar, 2020), y además, esta zona ha tenido un crecimiento poblacional en los últimos años debido a que existen oportunidades de obtener viviendas en nuevas urbanizaciones a bajo costo, las cuales que se abastecen de

fuentes de agua subterránea (El-Heraldo, 2021), por lo que, es conveniente prever que en los próximos años provocará que sea una zona más poblada con mayor demanda de agua.

Ante lo anterior, la gestión del conocimiento de las aguas subterráneas en la zona es imprescindible para su aprovechamiento y sostenibilidad. Las principales necesidades de conocimiento abordadas en este estudio están basadas en realizar la caracterización de los acuíferos mediante un inventario de fuentes de abastecimiento en la zona, estimación de parámetros hidráulicos y elaboración de líneas isofreáticas que permitan ver preliminarmente el comportamiento del flujo, que son base para el planteamiento de modelos hidrogeológicos que permiten comprender el flujo del agua en el suelo y, por ende, tener un mejor aprovechamiento del recurso hídrico (Mira, Vives, Rodríguez, & Veroslavsky, 2018) (Salazar Fernández, 2020).

2.3 Límites de la investigación

A. Límites de tiempo

El periodo de estudio de la investigación inició en mayo 2021 a octubre 2023, tomándose datos de niveles piezométricos en abril 2022 (época seca). Para el caso de las pruebas de bombeo se desarrollaron también en abril 2022, tomándose niveles de descensos de agua para diferentes tiempos en varios pozos perforados, cuyos tiempos fueron condicionados por cada propietario, de acuerdo con la capacidad de la bomba instalada y por los aspectos socioeconómicos de explotación, es decir, los costos de consumo de energía que les genera según el tiempo de encendido de la bomba.

B. Límites de espacio o territorio

El área de estudio es la cota 1400 msnm hacia arriba del Cerro de Hula, comprendida geográficamente dentro del municipio de Santa Ana, departamento de Francisco Morazán, teniendo un área de 18.7 km², teniendo en esta zona las dos principales aldeas del municipio, siendo estas La Bodega y El Limón que representan el 47% y 16% de la población total del municipio respectivamente, es decir que, en conjunto el área de estudio cubre aproximadamente el 63% de la población del municipio de Santa Ana (INE, 2013).

C. Límites de recursos

Se tomó como información base, estudios que el Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra (IHCIT) ha realizado en la zona desde el año 2014 hasta el 2021, tal como la geología, descripción del clima, hidrogeología, hidrología, isotopía y calidad del agua. Además, se considerarán como base las capas SIG de las plataformas del Sistema de Información Territorial SINIT, ICF y otras que muestran información espacial para poder hacer la descripción del medio.

El estudio se basa en los datos de los pozos que actualmente existen, también restringida por el grado de su disponibilidad y accesibilidad por parte de los propietarios, así como de los requerimientos técnicos para la realización de pruebas de bombeo, que se basan principalmente en tener pozos de explotación y observación cercanos para monitoreo de descensos del agua al mismo tiempo, lo cual por la dinámica económica y social de las comunidades y debido a los limitados recursos económicos disponibles para esta investigación, no se contó con pozos de observación nuevos construidos y tampoco se logró instalar equipo especializado para extracción de agua en pozos malacate, por lo que, se ha tomado hacer el análisis de pruebas de bombeo solamente para pozos perforados de explotación en tres de los cinco pozos profundos encontrados durante el inventario.

El equipo especializado que se utilizó para la toma de datos en campo como para el procesamiento de la información pertenece al IHCIT, el cual ha sido gestionado a través de la coordinación de esta maestría. Y el presupuesto destinado para esta investigación son recursos propios.

2.4 Definición del problema

La problemática de la escasez de agua es una situación que empeora día a día en el mundo, lo cual ha animado a poner mayor cuidado e interés de la población, este evento de escasez provocado por la falta de abastecimiento es de los desafíos más grandes que enfrenta el mundo, pues el utilizar y consumir el agua ha crecido de manera exponencial, esto por el aumento de la tasa de crecimiento de la población y a consecuencias del cambio climático.

La escasez de agua se asocia al recurso hídrico cuando este es insuficiente para abastecer las necesidades de una población, y en la actualidad esto es debido a varios factores tales como el cambio climático, deforestación descontrolada, agricultura extensiva, crecimiento poblacional, entre otros (Romero Guzmán & Romero Guzmán, 2020).

Aproximadamente el 80% de la población mundial está expuesta a un potencial estrés hídrico (Vörösmarty, y otros, 2010), pues la seguridad hídrica se ve amenazada, y sumado a ello los efectos del cambio climático reflejan una crisis de escasez de agua que se agudiza aún más en la época seca del año, pues estudios más recientes muestran que un 7% de la población mundial está exhibida a una escasez del recurso hídrico en un 20% debido a cada grado de calentamiento global que se registra (IPCC, 2018).

En Honduras, esa problemática de disminución y contaminación del agua es evidente, la capital Tegucigalpa evidencia en cada época seca del año, una escasez mediante una distribución restringida a la población que se abastece (UNICEF Internacional, 2018), y que en los últimos años este racionamiento se ha extendido a todo el año, algunos entes relacionados al tema le atribuyen a la destrucción de los bosques por

deforestación e incendios, al cambio climático, a la extensión de zonas agrícolas, al crecimiento poblacional, al inadecuado manejo de agua y de las zonas de aprovechamiento hídrico del que se abastece Tegucigalpa, entre otros.

Esta realidad ha sido alcanzada en las zonas periurbanas de la capital, siendo una de estas zonas el Cerro de Hula (Peña, Chirinos, Almendares, & Garcia, 2022), zona montañosa que alcanza grandes alturas en metros sobre el nivel del mar, además, es de mencionar que esta zona ha tenido un crecimiento poblacional, ya que la comunidad capitalina a migrado a estas áreas periurbanas en busca de adquisición de viviendas a menor costo (El-Heraldo, 2021), y lo más importante un abastecimiento de agua más frecuente o no tan escaso que en Tegucigalpa, y que por su relieve es un área que se abastece de recurso hídrico subterráneo, por lo que, en su mayoría la población es abastecida por agua subterránea mediante pozos y manantiales (Peña, Chirinos, Almendares, & Garcia, 2022).

Sin embargo, es indudable que, el incremento de la población genera una alta demanda de agua subterránea en la zona, y el desarrollo de distintas actividades antropogénicas (además de las naturales) que alteran el estado natural del agua, pueden provocar que exista una escasez de agua por alta demanda actual y futura, sumado a eso, ha tenido una afluencia de personas por diversas actividades turísticas que se han desarrollado en los últimos años lo que genera también una necesidad de este vital líquido (Once-Noticias, 2019).

Sumado a lo anterior, la ausencia de información en cuanto a datos de parámetros hidráulicos clave, y modelos de isofreáticas e hidrogeológicos en la zona, hace que desde el punto de una gestión sostenible sea un desafío aun mayor, pues este conocimiento es de suma importancia para predecir los efectos de cambios en el uso de la tierra, del clima y en la disponibilidad del agua subterránea.

Ante la problemática expuesta, se vuelve una necesidad realizar estudios de investigación como herramientas de gestión del recurso hídrico, tales como la caracterización hidrogeológica de la parte alta del Cerro de Hula y la construcción de curvas isofreáticas como línea base para conocer de manera preliminar el movimiento del flujo de agua subterránea en la zona.

3. CAPITULO II: OBJETIVOS

3.1 Objetivo general:

Caracterizar hidrogeológicamente la zona alta del Cerro de Hula, ubicado en el municipio de Santa Ana, Francisco Morazán, durante la época seca del año 2022 de manera preliminar, que contribuya a generar un marco de referencia para el manejo sostenible de las aguas subterráneas.

3.2 Objetivos específicos:

- Elaborar un inventario actualizado y georreferenciado de las fuentes de agua subterránea.
- Desarrollar un modelo isofreático que permita a la representación de la variabilidad espacial de los niveles freáticos.
- Estimar parámetros hidráulicos clave, como la conductividad hidráulica y el coeficiente de almacenamiento, mediante técnicas analíticas y pruebas de campo en la zona.

4. CAPITULO III: MARCO DE REFERENCIA

4.1 Marco histórico

El municipio de Santa Ana, que abarca más del 90% del área de estudio, fue creado en el año 1756, de acuerdo con el título ancestral, el cual fue otorgado por la colonia española, pero, otras fuentes mencionan la creación en el año 1887, ya que, en ese año, se renovó el título por el gobierno de la república, ya que, el título original estaba deteriorado (Municipalidad de Santa Ana, 2018).

El municipio de Santa Ana desde que fue creado, se le llamó Santa Ana de Ula (debido al Cerro de Hula), el cual tiene como significado “Abundancia de Hule”. Históricamente este municipio ha sido reconocido por las terrazas del Cerro de Hula, y de acuerdo con muchos geólogos que han observado estas, “reconocen esta obra como una arquitectura imponente natural, perfecta”, que son obras de drenaje y salidas de escorrentías naturales e imponentes, dan la impresión de haber sido diseñadas con tecnología de última generación, y por la característica de ser un volcán de agua inactivo (Municipalidad de Santa Ana, 2018).

4.2 Marco político y legal del recurso hídrico

Al realizar una exploración del marco político y legal en torno a los recursos hídricos en el país, de manera explícita existe la Ley General de Agua, pero, además, hay una gran cantidad de leyes y reglamentos relevantes, que son vinculantes a esta temática, y en especial a los recursos hídricos subterráneos.

Debido a lo anterior, se presenta a continuación una serie de instrumentos que tienen una relación directa entorno al aprovechamiento de los recursos hídricos, y en algunos casos en especial énfasis a las aguas subterráneas (ver tabla 1).

Tabla 1 Legislación de Honduras en temática del recurso hídrico

Ley, Decreto, Normativa, año	Descripción
Constitución de la Republica de Honduras	Art. 145: “El acceso al agua y saneamiento como un derecho humano. "Cuyo aprovechamiento y uso será equitativo preferentemente para consumo humano. Asimismo, se garantiza a la preservación de las fuentes de agua a fin de que éstas no pongan en riesgo la vida y salud pública” (Asamblea Nacional Constituyente de Honduras, 1982)
Ley General Ambiente (Decreto 104-93).	Art. 28: Secretaría de Estado en el Despacho del Ambiente se le atribuye “la planificación del aprovechamiento racional de los recursos naturales, considerando sus usos alternativos y la interrelación natural en el ecosistema; y ordenamiento de las cuencas hidrográficas”. Art. 29: Las municipalidades se les atribuye “La protección y conservación de las fuentes de abastecimiento de agua a las poblaciones, incluyendo la prevención y control de su contaminación y la ejecución de trabajo de reforestación”. Art.30 establece que: “Corresponde al Estado y las Municipalidades en su respectiva jurisdicción, el manejo, protección y conservación de las cuencas y depósitos naturales de agua, incluyendo la preservación de los elementos que intervienen en el proceso hidrológico” Art. 31: que será objeto de protección y control especial las aguas que son utilizadas para el abastecimiento de las poblaciones o consumo humano en general. Art 33: menciona que “Se prohíbe ubicar asentamientos humanos, bases militares, instalaciones industriales o de cualquier otro tipo en las áreas de influencia de las fuentes de abastecimiento de agua a las poblaciones o de sistemas de riego

	<p>de plantaciones agrícolas destinadas al consumo humano, cuyos residuos aún tratados, presenten riesgos potenciales de contaminación, las municipalidades velarán por la correcta aplicación de esta norma”. (Congreso Nacional de Honduras, 1993) Art. 34: menciona que se ejecutarán proyectos de ordenamiento hidrológico, siendo las cuencas hidrográficas las unidades de operación y manejo, y además que, “Todo proyecto hidroeléctrico, de irrigación o cualquier otro destinado a aprovechar en gran escala aguas superficiales o subterráneas dentro del territorio nacional, será precedido obligatoriamente de un plan de ordenamiento hidrológico y de una evaluación de impacto ambiental”. Art. 92: menciona como delito ambiental, la descarga de contaminantes peligrosos en los depósitos de aguas subterráneas, o infiltrar en el subsuelo desechos residuales que puedan perjudicar la salud humana o al ecosistema en general. Art. 100: establece crear la “Red Nacional de Cuencas Hidrográficas, a fin de coordinar la administración de los Recursos Hídricos, mejorando su calidad y cantidad, con el propósito de garantizar a la población el uso permanente del Recurso” (Congreso Nacional de Honduras, 1993)</p>
Ley General de Agua (Decreto 181-2009)	<p>Esta ley tiene por objetivo “establecer los principios y regulaciones aplicables al manejo adecuado del recurso agua para la protección, conservación, valorización y aprovechamiento del recurso hídrico para propiciar la gestión integrada de dicho recurso a nivel nacional”, los artículos que mencionarán será los que están directamente relacionados a los recursos hídricos subterráneos. Art. 4: Menciona que es aplicable para las aguas subterráneas. Art 6: define las aguas subterráneas como “las aguas que se infiltran y penetran en el suelo y subsuelo, saturando los poros o grietas de las rocas y que eventualmente se acumulan encima de capas impermeables formando un reservorio subterráneo” y también define un acuífero como “el reservorio de aguas subterráneas del cual se pueden extraer cantidades significativas del recurso”. (Congreso Nacional de Honduras, 2009) Art. 25: son de dominio público las aguas subterráneas, y que serán utilizadas de forma equitativa en la cuenca o región. Art. 26: menciona, el dominio público de las aguas subterráneas no perjudica el derecho de la propiedad superficial, pero cualquier actividad que pueda contaminar o deteriorar el acuífero estará sujeto a disposiciones de esta Ley. Art 42: Los espacios utilizados para urbanizaciones u otras construcciones que afecten la cantidad de agua subterránea, tendrán que establecer medidas de compensación de la pérdida. Art. 63: “El aprovechamiento de estas aguas, este sujeto a investigaciones, planes reguladores y mapas de zonificación hídricos a efecto de mantener el adecuado balance hídrico y la calidad en estos acuíferos”, además menciona que, se deben establecer estudios adecuados para determinar el potencial y posible aprovechamiento, para su uso. Art. 66: El derecho a usar el agua subterránea se otorgará mediante permiso, licencia y concesionamiento a solicitud del interesado, pero podrá ser denegado si afecta el balance del recurso hídrico subterráneo.</p>
Ley de Ordenamiento Territorial (Decreto 180-2003)	<p>Art. 22 y 36: establece que el sistema de cuencas hidrográficas es una entidad de régimen especial por lo que debe ser considerado en el ordenamiento territorial, y en su defecto para el Plan de Ordenamiento Territorial. Art. 43: establece que el servicio de agua potable y saneamiento se considera un aspecto a considerar en el diagnóstico territorial. Art. 49: “El mapa municipal de zonificación territorial será elaborado sobre la base de las microcuencas y su relación de importancia con los asentamientos humanos” Art. 90: menciona “En caso de conflictos sobre la prioridad de uso de los recursos naturales y los asentamientos humanos, se dará prioridad a éstos, de acuerdo a la disponibilidad de agua en cantidad y calidad y sin menoscabar la sostenibilidad de los recursos naturales” (Congreso Nacional de Honduras, 2003)</p>
Ley Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre (Decreto 156-2007)	<p>Art. 2: es principio de este instrumento “La conservación y protección de las Áreas Protegidas y la Vida Silvestre, así como la protección de su potencial genético y los recursos hídricos”. Art. 11: se define como servicios ambientales “Son los servicios que brindan los ecosistemas a la sociedad y que inciden directa o indirectamente en la protección y mejoramiento del ambiente y por lo tanto en la calidad de vida de las personas” considerando el recurso hídrico, y, como zona de protección forestal a “Superficie de tierras forestales dedicada por la Ley como bosque a perpetuidad normalmente asociada a la protección del recurso hídrico u otras” Art. 20: es una atribución de la subdirección, declarar las microcuencas abastecedoras de agua a las comunidades, así como coordinar y ejecutar políticas relacionadas a la protección de abastecimiento de agua. Art. 53: Las áreas de las microcuencas abastecedoras de agua para consumo tendrán prioridad de investigación. Art. 63: son áreas forestales de protección las públicas o privadas de importancia para la conservación de los recursos hídricos. Art. 123: Protección de las fuentes y cursos de agua, siendo zonas de protección exclusiva las zonas de recarga hídrica o cuenca alta, la que tiene que ser cuidada y conservada. Art 124: se declararán</p>

	zonas de protección de microcuencas a las áreas que podrían abastecer de agua a la población. (Congreso Nacional de Honduras, 2007)
Reglamento de la Ley General de Agua, mediante acuerdo ejecutivo No. 002-2021	Art. 2: “Constituye el marco general regulatorio al cual se subordinará la legislación particular en materia de aguas marítimas, pesca, aguas para consumo humano, riego con fines agrícolas, generación de hidroelectricidad, la protección de ecosistemas acuáticos, biodiversidad y cualquier otra que se promulguen en relación con usos del agua” (Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente, 2021)

Fuente: Elaboración propia, a partir de datos de los diferentes instrumentos legales

Cabe mencionar que se está trabajando en la revisión y aprobación del **reglamento de aguas subterráneas de Honduras** (Global Water Partnership, 2012).

También se puede decir que, en Honduras, existen instancias gubernamentales que se establecen para el cuidado y protección de los recursos hídricos, entre ellas se mencionan (ver tabla 2):

Tabla 2 Instancias Gubernamentales de Honduras entorno al recurso hídrico

Instancias Gubernamentales	Descripción
Secretaría de Energía, Recursos Naturales, Ambiente y Minas (MiAmbiente)	Esta es la secretaria de estado que a su vez es la máxima autoridad en materia ambiental. Insta de una entidad técnica, la Dirección Nacional de Recursos Hídricos, que aún tiene el rol de la Autoridad del Agua ADA, instancia contemplada en la Ley General del Agua.
Secretaría Ejecutiva de Consejo de ministros	Son los responsables de promover el plan de nación, en el cual tiene un horizonte de planificación al año 2038., en donde se establecen acciones de fortalecimiento de iniciativas de protección del recurso hídrico y su aprovechamiento sostenible.
Instituto de Conservación Forestal (ICF)	Es la autoridad en lo correspondiente a políticas para la protección, fomento, biodiversidad y aprovechamiento del recurso forestal. Pero, además, es responsable de elaborar lineamientos, aprobar y supervisar los planes de manejo de cuencas para diversas categorías.
Comisión Nacional de Agua y Saneamiento (CONASA)	Esta ha sido creada como entidad dentro de la Ley Marco del Sector Agua Potable y Saneamiento, con funciones específicas para la planificación, establecimiento de políticas, estrategias, normas y financiación en relación con los servicios de agua y saneamiento a nivel nacional.
Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados (SANAA)	Entidad que cambió su rol a partir de la Ley Marco del Sector Agua Potable y Saneamiento. Pasó de ser un ente normativo y operador de servicios, a convertirse en la secretaria técnica del CONASA.
Ente Regulador de los Servicios de Agua Potable y Saneamiento (ERSAPS).	También creado a partir de la Ley Marco del Sector Agua Potable y Saneamiento, con el fin de establecer mecanismos de regulación, vigilancia y control de los prestadores públicos y privados de agua y saneamiento en todo el país, con el apoyo de las municipalidades.

Fuente: Elaboración propia, a partir de datos de los diferentes instrumentos legales

4.3 Marco teórico

Conocer el ciclo del agua es importante para la gestión del recurso hídrico en cualquier área, pues permite entender el funcionamiento de todos los elementos involucrado dentro del ciclo y con ello concebir como se mueve el agua en el área.

Se ha llamado ciclo del agua al movimiento de del agua en la superficie, en la atmósfera y bajo la tierra (López-Geta, Fornés Azcoiti, Ramos González, & Villarroya Gil, 2009), dentro de los elementos importante del ciclo están las aguas subterráneas.

A. Agua subterránea

Uno de los recursos más valioso y accesible que existe es el agua subterránea, aunque no siempre se le dé la importancia debida, pues si se conoce la distribución del agua en el planeta, aproximadamente el 14% del 100% de agua dulce es agua subterránea (J.Tarback & Lutgens, 2005).

Las aguas subterráneas son un elemento importante dentro del ciclo hidrológico, este es un recurso que es utilizado principalmente para uso agrícola, doméstico e industrial en todo el mundo; aproximadamente el 43% del agua que se usa para irrigación a nivel mundial proviene de fuentes de agua subterránea (Siebert, y otros, 2010) . Además, estas aguas sirven para nutrir a otro tipo de fuentes como ser lagos, ríos, humedales y otros ecosistemas que dependen de este tipo de agua.

Las aguas subterráneas, son aquellas que se encuentran bajo la superficie del terreno, es el agua que está presente en los poros y fisuras del terreno, es decir, aquella que se encuentra bajo el nivel freático, que se define como el nivel del agua que se ubica a una profundidad con respecto a la superficie (López-Geta, Fornés Azcoiti, Ramos González, & Villarroja Gil, 2009), esta agua se mueve de forma natural por medio de manantiales, ríos, y que también escurre al mar. La recarga del agua subterránea se puede realizar de manera natural, y que viene fundamentalmente de la precipitación, pero también se puede presentar a raíz de escorrentía superficial o ríos principalmente en ambiente áridos.

Por lo tanto, las aguas subterráneas naturalmente son el producto de la precipitación que infiltran en el suelo, dependiendo de las condiciones que esté presente, pasando por un proceso de percolación a través de la zona saturada, sin embargo, existe también la recarga artificial producida por diferentes técnicas que permiten, mediante intervención la introducción directa o inducida de agua en el suelo, incrementando la disponibilidad de agua subterránea y actuar sobre su calidad, y que viene a tomar importancia debido a la cantidad de agua en el planeta y el uso a nivel mundial principalmente para irrigación, uso doméstico e industrial.

Ante esta importancia, es determinante mencionar que la ciencia que se encarga del estudio de las aguas subterráneas es la hidrología subterránea, que también es llamada hidrogeología, y que tiene interacción importante con otras ciencias, siendo una de ella la geología, pues del estudio de esta, parte el conocimiento de las formaciones geológicas que almacenan el agua subterránea.

Las formaciones geológicas son una serie de unidades de roca y sedimento, ya sea en estado poroso o fracturadas, que pueden o no contener agua en los espacios vacíos (IDEAM, 2015), las cuales se pueden dividir de acuerdo con su capacidad de almacenar y transmitir el agua.

i. Definiciones de acuífero

Es el estrato o formación geológica que permite la circulación del agua por los poros y grietas, lo cual genera que el ser humano pueda aprovecharla en cantidades apreciables económicamente hablando para cubrir sus necesidades; el término proviene del latín aqua que significa «agua» y fero que significa «llevar» (Custodio & Llamas, Hidrología Subterránea, 1983).

Los acuíferos pueden ser clasificados desde el punto de vista hidráulico en acuíferos libres, confinados y semiconfinados (IDEAM, 2015), y otros de acuerdo con la textura del medio geológico en donde se encuentran los cuales son acuíferos de medios fracturados y medios poroso.

Los acuíferos fracturados son mantos rocosos que presentan fracturación, este tipo de acuíferos almacenan y transmiten el agua por medio de grietas, fracturas y juntas en un estrato de roca que parece ser impermeable. Este tipo de medios acuíferos se encuentra en topografías empinadas (Liquid Earth, 2010). Por lo que, es el medio que se encuentra en el área de estudio.

En el Cerro de Hula, por su topografía el agua subterránea viene siendo la alternativa principal de aprovechamiento para los diferentes usos, es por eso por lo que se vuelve importante el estudio de este tipo de agua en un medio fracturado, todo para tener una buena gestión de los recursos hídricos

ii. Propiedades de los acuíferos

Para poder comprender y estudiar el comportamiento de los acuíferos, es necesario determinar propiedades fundamentales, las cuales se presentan a continuación:

a. **Permeabilidad o conductividad hidráulica (k)**

El coeficiente de permeabilidad se presenta con dimensiones de velocidad, por lo que se puede definir como el caudal que está siendo pasado por una sección unitaria del acuífero, esto bajo un gradiente también unidad a una temperatura fija o determinada (Custodio & Llamas, Hidrología Subterránea, 1983).

Para poder calcular la permeabilidad, se tiene que hablar de la ecuación de Henry Darcy (ver ecuación 1), quien, en 1856, dio paso al descubrimiento de la ley que reglamenta el movimiento de las aguas subterráneas, para lo cual se calcula el caudal [$L^3 t^{-1}$] en función de la permeabilidad de los materiales, teniendo la siguiente ecuación:

$$Q = k A \frac{h}{L} \quad \text{Ecuación 1 Darcy, tomada de (Custodio \& Llamas, Hidrología Subterránea, 1983)}$$

De donde $k [L t^{-1}]$ es el coeficiente de permeabilidad, $A [L^2]$ el área de la sección transversal a través del cual se produce el flujo del agua, $h [L]$ la diferencia de carga entre la entrada y la salida, y, $L [L]$ el recorrido que debe realizar el agua.

La Ley de Darcy establece las siguientes limitaciones (Custodio & Llamas, Hidrología Subterránea, 1983):

- Flujo laminar, aplicable en movimiento lento, no es aplicable si el movimiento es rápido, tampoco en suelos muy finos
- Flujo en el sistema es constante y uniforme
- Flujo sea estacionario durante el proceso de flujo
- El medio permeable debe estar saturado sin presencia de aire para evitar la condición de multifluido multifase asegurando la valoración de la permeabilidad y el movimiento del fluido por los poros del medio permeable
- La energía cinética es despreciable
- Es válida sólo si el terreno es homogéneo e isotrópico, en este caso k es constante
- Las características físicas y químicas de los medios deben permanecer constantes: el líquido no puede reaccionar con el medio y la porosidad y la permeabilidad de este no deben cambiar durante el ensayo

La permeabilidad depende de factores intrínsecos y extrínsecos, siendo los primero los propios del acuífero que dependen del tamaño de los poros, y los extrínsecos dependen del fluido, siendo estos la viscosidad y su peso específico, por lo que en la tabla 3 se muestran valores de referencia para diferentes materiales:

Tabla 3 Clasificación de algunos materiales sedimentarios según su permeabilidad

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

Fuente: elaboración propia a partir de (Custodio & Llamas, Hidrología Subterránea, 1983)

Los ensayos de bombeo que han sido definidas anteriormente son un método para el cálculo de la permeabilidad en campo, sin embargo, existen otros métodos para la determinación de este parámetro.

b. Transmisividad (T)

Este término ha sido interpuesto por Theis en 1935, las unidades son de velocidad por una longitud ($m^2/día$ o cm^2/s), por lo que se define como “el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno, de

ancho unidad y de altura igual a la del manto permeable saturado bajo un gradiente unidad a una temperatura fija determinada” (Custodio & Llamas, Hidrología Subterránea, 1983).

El cálculo de transmisividad T [$L^2 t^{-1}$] por general depende de la permeabilidad k [$L t^{-1}$] por el ancho del acuífero b [L], teniendo la siguiente ecuación para su determinación (ver ecuación 2):

$$T = k b \quad \text{Ecuación 2 Cálculo de la transmisividad, tomada de (Custodio \& Llamas, Hidrología Subterránea, 1983)}$$

Los supuestos de la fórmula de Theis son (Custodio & Llamas, Hidrología Subterránea, 1983):

- Régimen transitorio
- Acuífero cautivo, homogéneo e isótropo
- Flujo radial

Existen valores referencia de transmisividad respecto a las posibilidades del acuífero, los cuales se muestran a continuación (ver tabla 4):

Tabla 4 Valores de transmisividad

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

Fuente: (IGME, 1984)

c. Niveles piezométricos e isofreáticos

El nivel piezométrico en un acuífero es el sitio preciso del nivel del agua para los acuíferos libres, y en este caso coincide con el nivel freático, mientras que para los acuíferos confinados se trata del nivel que alcanzaría el agua en estas formaciones confinadas. Con los niveles piezométricos se pueden construir curvas potenciométricas que son líneas de isopiezas, las cuales sirven para determinar el flujo subterráneo, lo cual se puede visualizar a través de un mapa piezométrico (Diaz, Duarte, & Ricciardi, 1998).

Además, el comportamiento de los niveles freáticos y/o piezométricos pueden apoyar en determinar la relación entre el agua superficial y el agua subterránea, pues al visualizarlas en planta, permiten identificar el tipo de curva hidráulica, que pueden ser planas, cilíndricas, y radiales, y en este último caso se subdividen en radiales convergente o radiales divergentes, lo cual indica zonas de recarga o descarga del agua subterránea respectivamente (Auge, 2016) (ver ilustración 2).

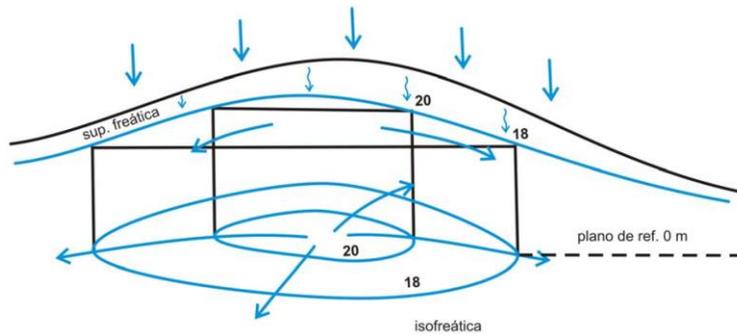


Ilustración 2 Ejemplo de perfil y mapa freático
Fuente: (Auge, 2016)

En definitiva, el mapa piezométrico nos sirve para identificar las características del movimiento del agua subterránea, permitiendo, además, definir la zona permeable saturada a escalas tanto local como regional (Mejías D., Jégat N., Mora M., & Linares S., 2011).

d. Caudal (Q)

El caudal de extracción de los pozos se puede determinar midiendo la cantidad de agua que pasa a través de una sección transversal en un tiempo determinado, por lo que se suele expresar en unidades de volumen por unidad de tiempo, existen diferentes métodos de medición, dentro de las cuales existe el volumétrico, con molinete, entre otros, la elección del método dependerá de las condiciones del lugar que se quiere medir (OMM, 1994).

iii. Método de obtención de parámetros hidráulicos

a. Pruebas de bombeo

Las pruebas de bombeo son un método que a través de la extracción de agua de un pozo puede estimar el funcionamiento, aforo y el dominio del agua subterránea, mediante este método se pueden determinar algunas características hidráulicas de un pozo como se la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento (Castañeda Zavaleta, 2019).

Esta prueba consiste en bombear agua de un pozo, que generalmente se hace a caudal constante y simultáneamente se están midiendo los niveles de agua conocidos como descensos en el pozo que se está bombeando, igualmente en un pozo de observación llamado piezómetro se miden los descensos, la duración de estas pruebas depende del propósito del ensayo y disponibilidad, pero generalmente duran entre 24 y 72 horas dependiendo de las condiciones del acuífero hasta alcanzar la estabilidad de este, esto principalmente cuando se alcanza el nivel de estabilidad del agua en el pozo (Castañeda Zavaleta, 2019).

5. CAPITULO IV: DESCRIPCIÓN DEL MEDIO

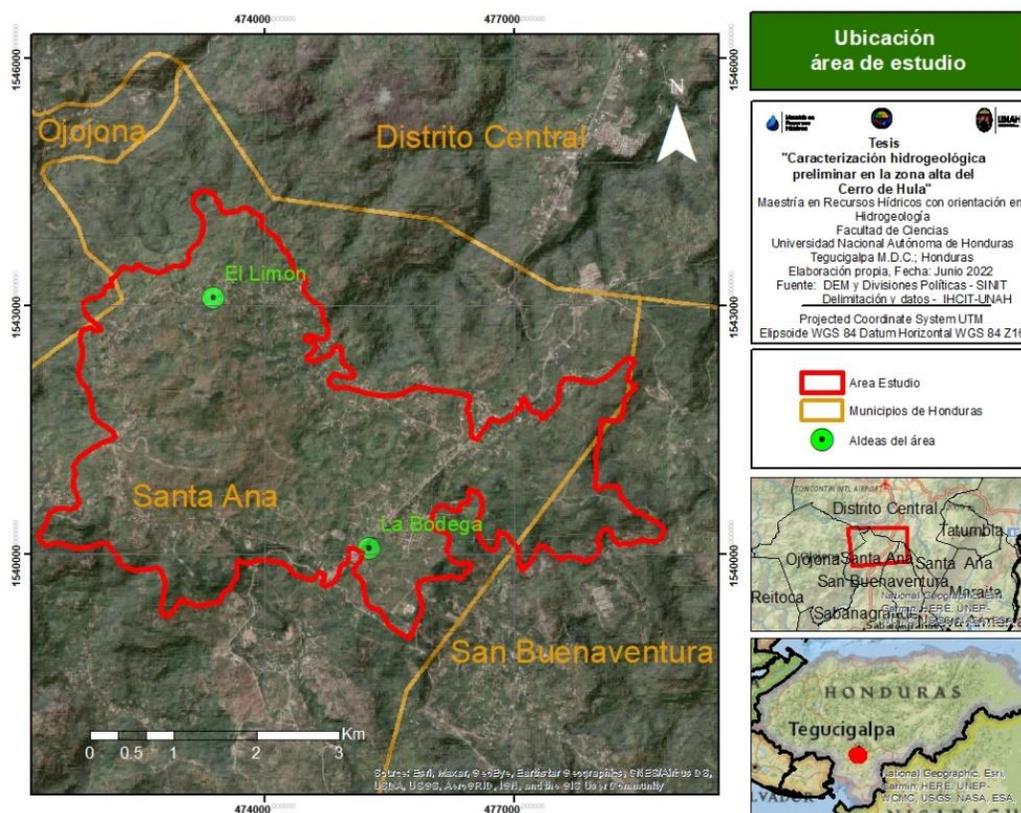
El Cerro de Hula es uno de los lugares más reconocidos de la zona sur de Tegucigalpa, pues este, comprende algunos de los municipios del sur de Francisco Morazán que históricamente se conoce así porque en el pasado se encontraban muchas plantas conocidas popularmente como de hule, de allí proviene su nombre (Municipalidad de Santa Ana, 2018).

5.1 Descripción socioeconómica del agua

A. Ubicación

La zona en estudio está ubicada al sur de Tegucigalpa, específicamente en el Cerro de Hula, contenido entre los municipios de Santa Ana, San Buenaventura y Ojojona, todos pertenecen al departamento de Francisco Morazán, ubicado entre las coordenadas 13°56'50" N y 87°14'51" W, teniendo un área de 18.7 km².

El municipio Santa Ana es el que cubre un área mayor dentro de la zona en estudio con un 93% del área total otro porcentaje del 6% y 1% del área total caen dentro de los municipios de San Buenaventura y Ojojona respectivamente. Importante hay que mencionar que, dos de las principales aldeas del municipio de Santa Ana caen en el área de estudio siendo estas La Bodega y el Limón (ver mapa 1).



Mapa 1 Ubicación área de estudio

Fuente: elaboración propia a partir de DEM y divisiones políticas SINIT, delimitación y datos IHCIT-UNAH

Las principales actividades económicas del área de estudio son la agricultura, especialmente la producción de maíz y frijol, pero, además, en menor cantidad la ganadería, fabricación de artesanías y el desarrollo artesanal de productos derivados de la leche (principalmente cuajada) (Menjivar Flores, 2003).

Es de destacar que, en los últimos años la incorporación de la actividad de producción de energía eólica en la zona, lo que ha servido como atractivo turístico y de recreación, generando un impulso y dinamización de la economía en el sector.

Además, es de evidenciar que, la otra mayoría de los habitantes del municipio de Santa Ana viajan al municipio de Tegucigalpa donde laboran para sustentar a sus familias, aproximadamente el 90% de la población es empleada en empresas de diferentes actividades económicas de Tegucigalpa (Municipalidad de Santa Ana, 2018).

B. Población

Dentro del área de estudio se encuentran dos de las principales aldeas del municipio de Santa Ana, siendo estas, El Limón y La Bodega, identificándose alrededor de 11 comunidades (las aldeas y caseríos), con una población aproximada de 3287 personas, comprendidas en 727 viviendas (INE, 2013) y proyectada al 2022 la población es aproximadamente 5262 personas utilizando método de crecimiento poblacional compuesto a una tasa de crecimiento del 5.37% (ver tabla 5).

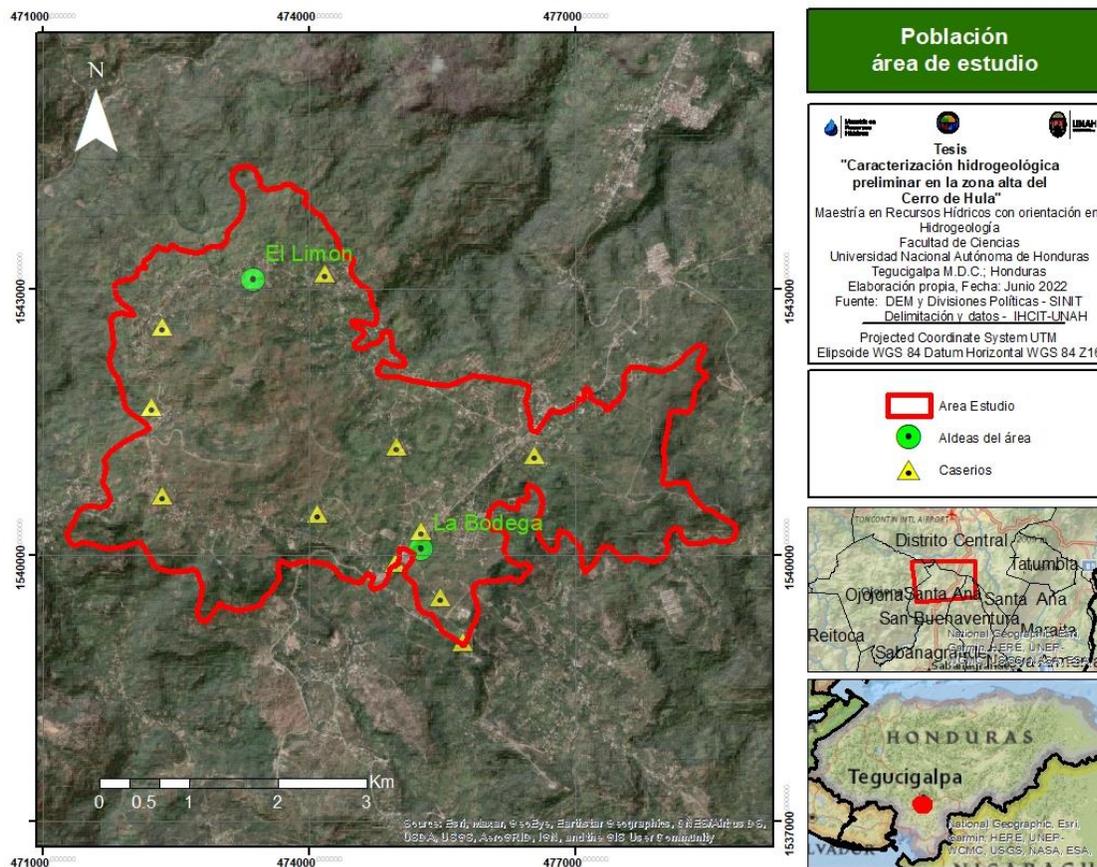
Tabla 5 Comunidades dentro del área de estudio

N°	Comunidad	Población INE 2013	Población Proyectada al 2022 (Pt = Po (1 + r) ^t) ¹
1	Babanato	463	741
2	La Joya	7	11
3	Las Mesitas	412	660
4	Los Encinos	403	645
5	La Bodega	772	1236
6	Cerritos de Ayastas	187	299
7	El Cruce	454	727
8	La Cienega	167	267
9	Las Quebraditas	325	520
10	El Suyatillo	48	77
11	Las Cuevas	49	78
TOTAL		3287	5262

Fuente: elaboración propia a partir de datos (INE, 2013)

¹ Pt=Población final, Po= población inicial, r= tasa de crecimiento en %, y t= tiempo en años

Así mismo, en el mapa 2 se logran identificar la ubicación de las comunidades dentro del área de estudio, pudiéndose observar que, están alrededor del denominado domo del Cerro de Hula.



Mapa 2 Comunidades dentro del área de estudio

Fuente: elaboración propia a partir de DEM y divisiones políticas SINIT, delimitación y datos IHCIT-UNAH

C. Uso del suelo

El uso del suelo en el área de estudio está dominado por pastos y cultivos, bosque latifoliado deciduo y vegetación secundaria decidua, con un 35.4%, 35.3% y 23% respectivamente. Es importante destacar que, la abundancia de pastos y cultivos es concordante con las actividades económicas predominantes (agricultura y ganadería) en la zona. De forma general, a continuación, se muestran los diferentes usos presentes en el área de estudio (ver tabla 6):

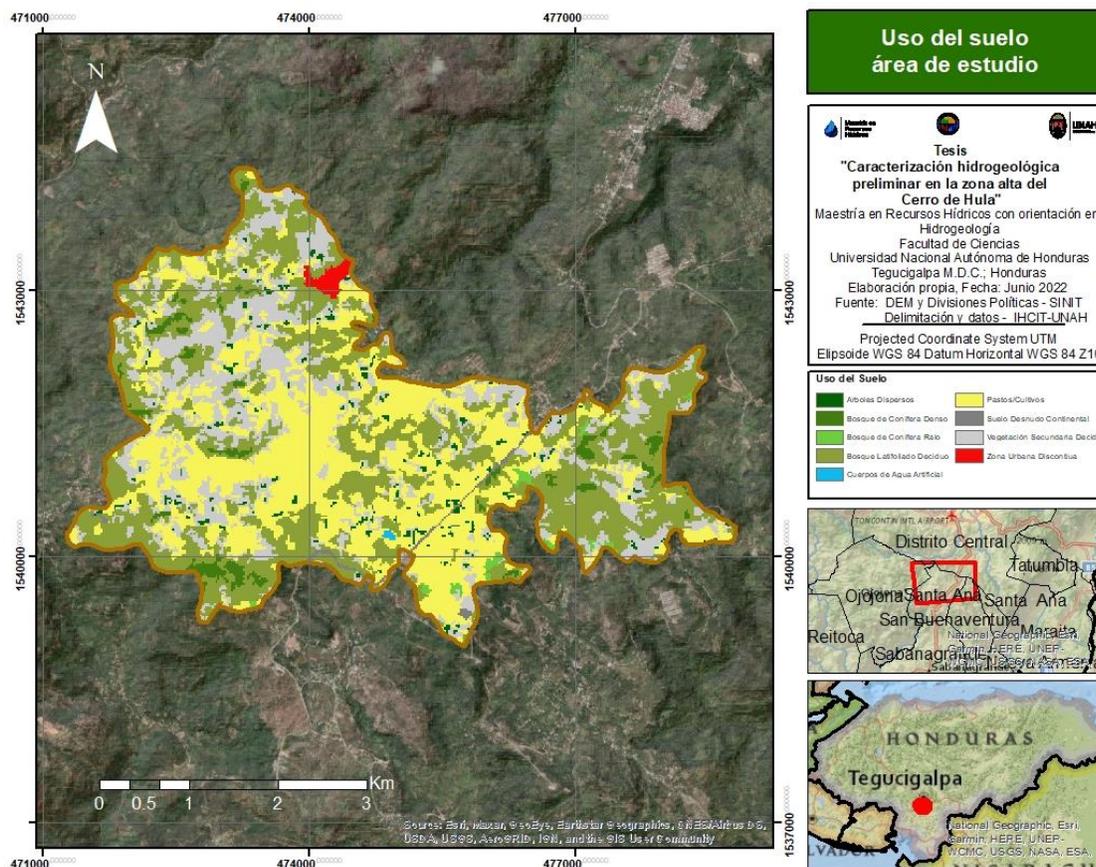
Tabla 6 Usos del suelo área de estudio

Uso del Suelo	Área (Ha)	%
Arboles Dispersos	33.8	1.8%
Bosque de Conífera Denso	47.2	2.5%
Bosque de Conífera Ralo	12.6	0.7%
Bosque Latifoliado Deciduo	658.5	35.3%
Cuerpos de Agua Artificial	1.2	0.1%
Pastos/Cultivos	661.6	35.4%

Suelo Desnudo Continental	11.5	0.6%
Vegetación Secundaria Decidua	429.3	23.0%
Zona Urbana Discontinua	11.7	0.6%

Fuente: elaboración propia a partir de datos (ICF, 2018)

En el mapa 3 que se presenta a continuación se logra observar espacialmente la distribución del uso del suelo en el área, teniendo la gran carga de pastos y cultivos en el centro, una gran mancha de zona urbana discontinua en la parte norte de área, y la mayoría de bosque identificado alrededor de la misma que oscila alrededor del 40.3%, lo que representa una zona potencial de recarga.



Mapa 3 Uso del suelo

Fuente: elaboración propia a partir de DEM y divisiones políticas SINIT, delimitación, datos IHCIT-UNAH, (ICF, 2018)

5.2 Descripción biofísica

A. Climatología

Debido a la presencia en gran porcentaje de vegetación secundaria (plantas pequeñas), esta zona se puede considerar como una región de transición del bosque seco, por lo que tiene una característica de un clima seco.

Para poder realizar una descripción del comportamiento de la precipitación y la temperatura, se han utilizado información del estudio de Evaluación de los Recursos Hídricos a nivel nacional del 2014, y para la

elaboración del climograma se utilizaron datos de las estaciones más cercanas, siendo estas Toncontín de la Agencia Hondureña de Aeronáutica Civil (AHAC) y Cerro de Hula de la Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente (SERNA). Cabe destacar que, los datos se encuentran a nivel mensual, que el distanciamiento de las estaciones con mayor dato como lo es Toncontín con la zona de estudio, el estado de los datos (continuidad en el tiempo y calidad de estos), hace que la descripción del clima se dificulte.

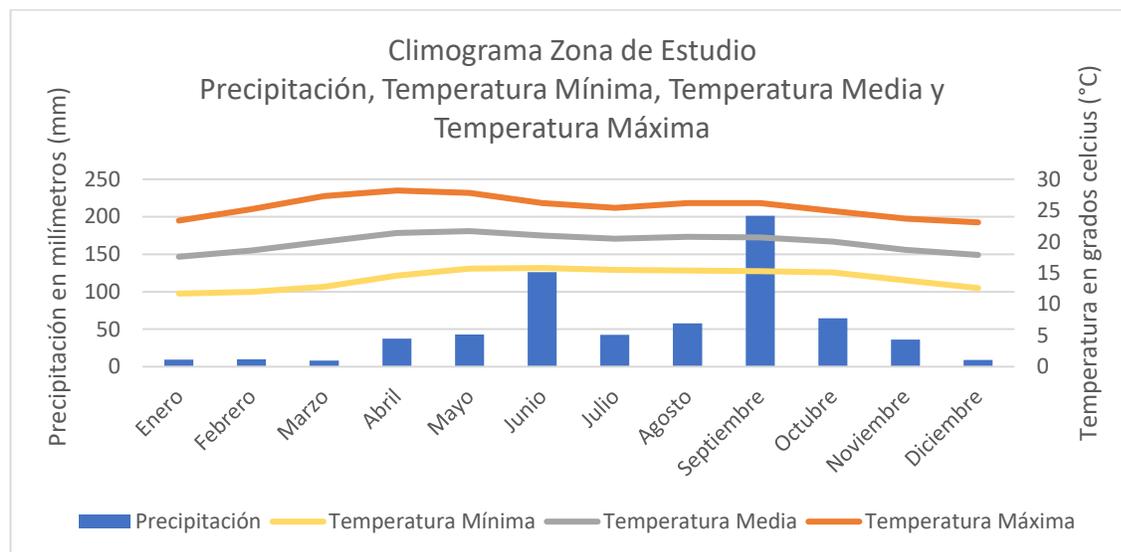
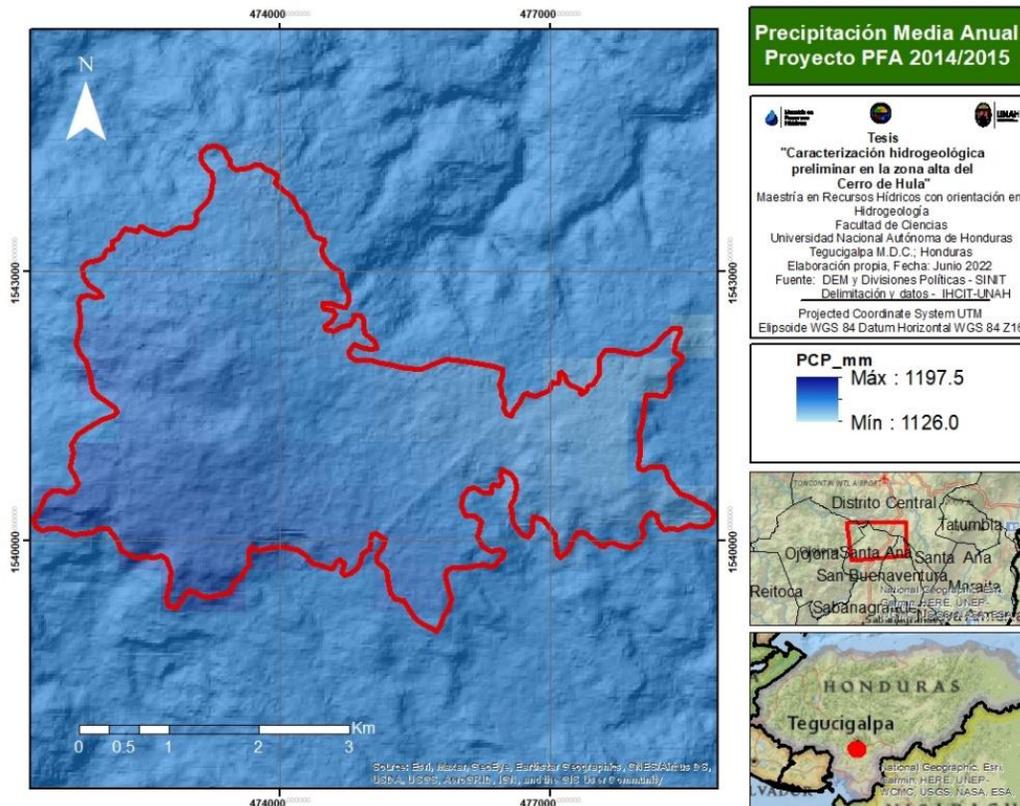


Gráfico 1 Climograma de la Zona de Estudio

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos

i. Precipitación

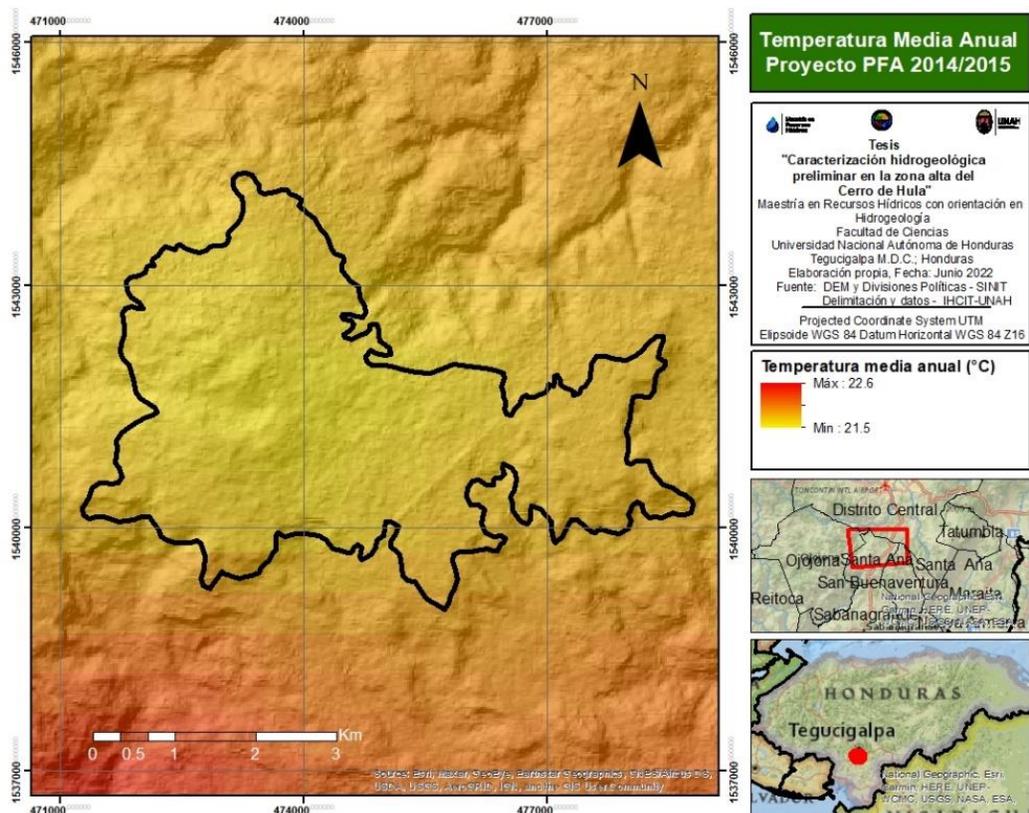
El comportamiento de la precipitación en la zona en estudio es bimodal, es decir se marca como en el país las épocas secas y épocas lluviosas, siendo los valores máximos de precipitación media anual del área 1197 mm y valores mínimos de 1126 mm (ver mapa 4). Los meses más lluviosos se presentan entre mayo y junio, y septiembre y octubre (IHCIT-UNAH, 2014).



Mapa 4 Comportamiento precipitación media anual
Fuente: elaboración propia a partir de datos (IHCIT-UNAH, 2014)

ii. Temperatura

Al observar el mapa 5, se puede visualizar que la temperatura media anual oscila entre los 22.6°C, siendo este el valor máximo y los 21.5°C que corresponde al valor más bajo, presentándose en la parte más norte del área de estudio, mientras que el valor más alto se muestra más en la parte sur de la zona. Por lo tanto, las temperaturas son relativamente bajas, coincidiendo que corresponde a una zona de altura (IHCIT-UNAH, 2014).



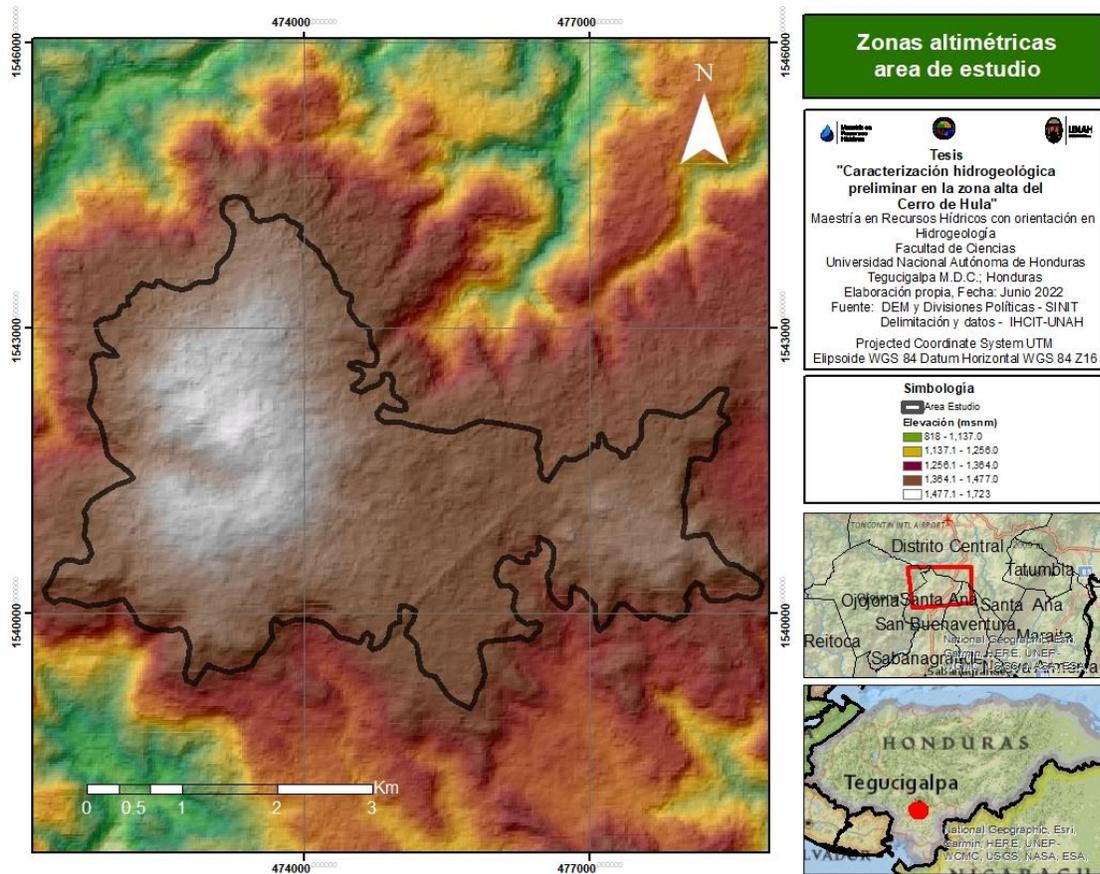
Mapa 5 Comportamiento temperatura media anual

Fuente: elaboración propia a partir de datos (IHCIT-UNAH, 2014)

B. Morfología

El área de estudio el Cerro de Hula, tiene elevaciones superiores a los 1400 msnm, llegando a su parte más alta aproximadamente a los 1700 msnm, considerado uno de los principales cerros presentes en los municipios del área. Este cerro ha sido considerado en estudios geológicos como volcán en escudo de agua, en donde la actividad actualmente ha cesado, y de acuerdo con la presencia de rocas es considerado como un domo basáltico fracturado ubicado en la parte oeste del área de trabajo (ver mapa 6), donde se originaron los flujos de lava basáltica que le han conferido esta morfología tipo mesa (Ruiz, 2015).

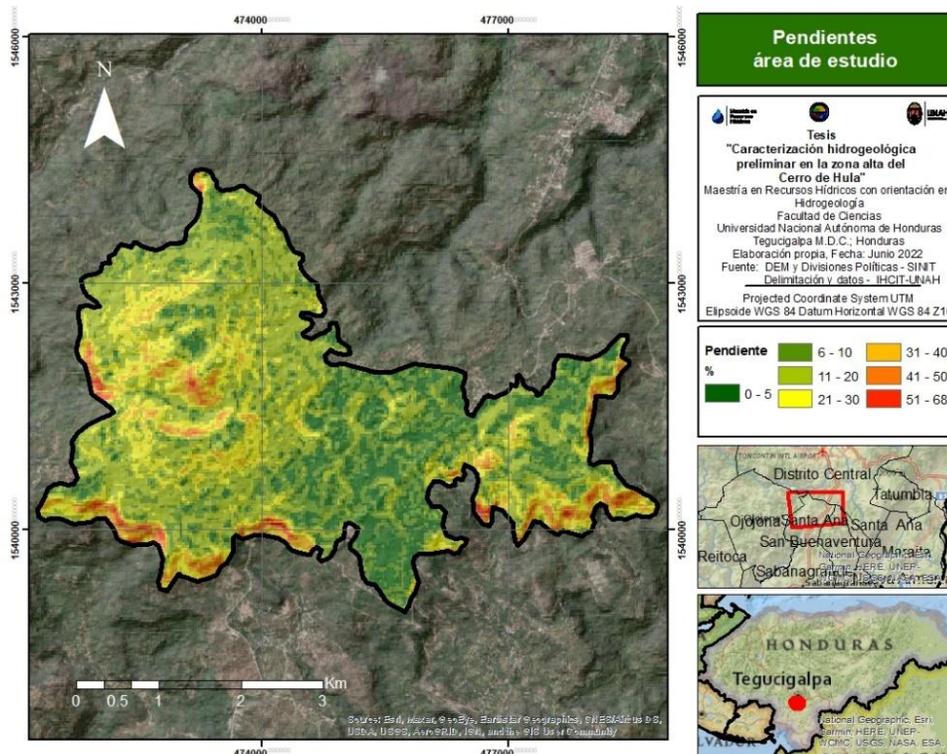
Esta zona, tiene un relieve accidentado, esto debido a la presencia de fracturas, fallas y otras estructuras geológicas, además que, según (Ruiz, 2015), con anterioridad al evento volcánico se dieron altas tasas de erosión y sedimentación de rocas provocando la existencia de numerosas terrazas fluviales que son evidentes en la actualidad.



Mapa 6 Zonas altimétricas

Fuente: elaboración propia a partir de DEM y divisiones políticas SINIT, delimitación y datos IHCIT-UNAH

En el mapa de pendientes (mapa 7) se logra observar que estas oscilan de 0 - 68%, presentándose las pendientes más pronunciadas en el área del domo basáltico, las cuales comprenden entre las pendientes superiores a 40%, mientras que las pendientes más bajas de 0% a 10% se logran visualizar en la parte media.



Mapa 7 Pendientes en porcentaje

Fuente: elaboración propia a partir de DEM y divisiones políticas SINIT, delimitación y datos IHCIT-UNAH

C. Geología

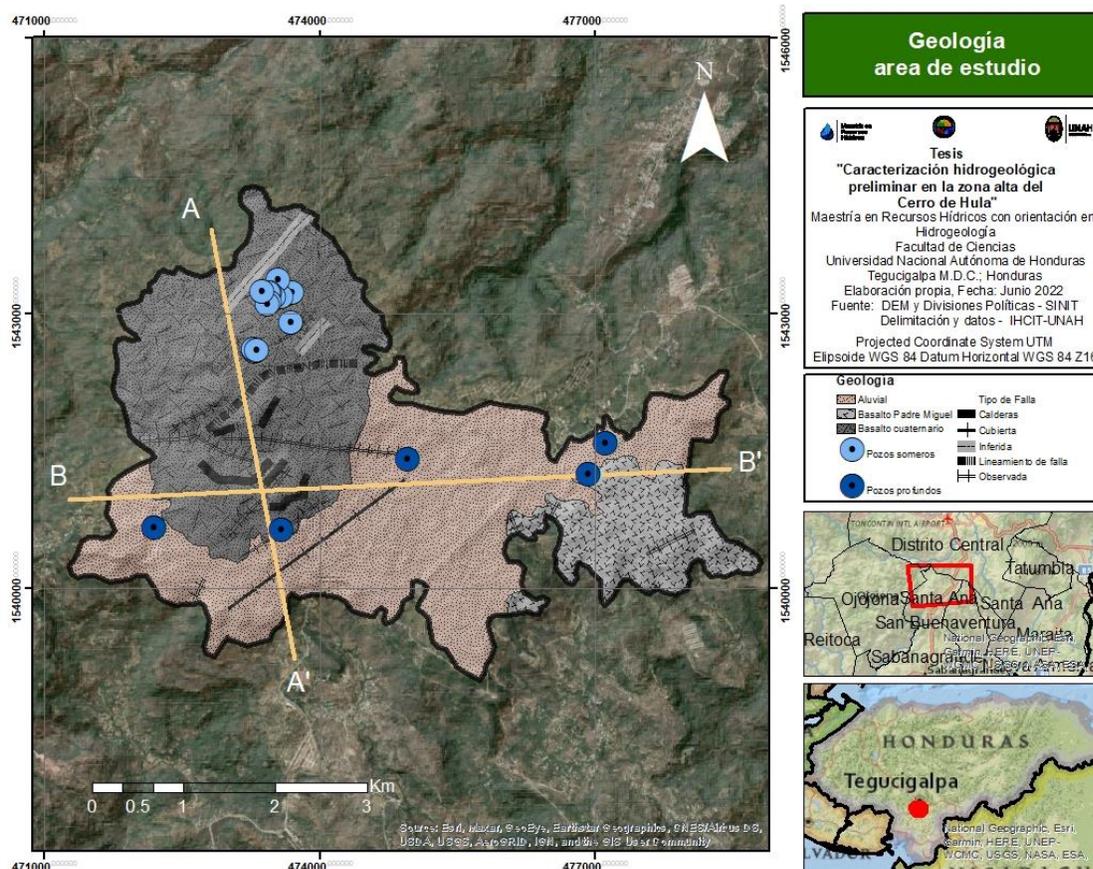
Dentro de las formaciones geológicas presentes el área de estudio se encuentran los basaltos cuaternarios, se trata de una serie de coladas de lava de tipo basalto a basalto andesita, los basaltos Padre Miguel se tratan de basaltos de color negro a gris oscuro (Harwood, 1991), y en algunas zonas de color rojo, esto es producto de la alteración por hierro, estos, presentan una textura porfídica a afanítica, observándose algunas minerales plagioclasas y un poco de augita y olivino, y aluvión del cuaternario, el cual presenta materiales no consolidados de gravas, arenas gruesas a finas y arcillas, producto de la alteración de las rocas piroclásticas y basaltos (Ruiz, 2015) (ver mapa 8, ilustración 3).

- **Basaltos Cuaternarios:** se encuentra representado por formaciones de rocas ígneas efusivas y material sedimentario producto de la alteración de estas rocas ígneas y de rocas más antiguas. Se trata de una serie de coladas de lava de tipo basalto a basalto andesita, basaltos vesiculares y aglomerados volcánicos de color negro, compactos, poco alterados, se estima una potencia de 120m, y presenta un buzamiento de la formación de 15°NW. (Ruiz, 2015).
- **Basaltos Padre Miguel,** según (Harwood, 1991), está compuesto por basaltos de color negro a gris oscuro y ocasionalmente rojo, ya que ha sido alterado por hierro, la textura presentada es porfídica a afanítica, y, además, se logran observar algunas minerales plagioclasas y un poco de augita y olivino. Para el área de estudio, este basalto fracturas verticales de rumbo S70°W y N72°E, el rumbo

de la formación es N15°E y buzamiento de 15°SE. Muestran un contacto discordante con la subyacente unidad Miembro Padre Miguel Superior, su espesor se estima en 120 m, este se presenta en la parte este del área de estudio, cerca de la comunidad de Cerrito de Ayastas.

- **Aluvi3n cuaternario:** el material encontrado en el 3rea generalmente son sedimentos ricos en arcillas rojas, producto de la alteraci3n de los basaltos dominantes en la zona, se encuentran formado por fragmentos subredondeados a subangulosos de basalto y andesitas, generalmente se observan alterados, el desarrollo de suelos es incipiente.

Por lo tanto, el conjunto de rocas que predominan dentro del grupo de basaltos cuaternarios (Harwood, 1991), (Anderson, 1985) y (Rogers R. O., 1993) son las ignimbr3ticas riol3ticas fracturadas y dep3sitos de tobas ignimbr3ticas porosas. Para el caso del basalto Padre Miguel son basaltos de color oscuro, y el material de aluvi3n son gravas, arenas gruesas y finas, y arcillas producto de los procesos de meteorizaci3n principalmente por el viento y al efecto del arrastre de escorrent3a superficial de las rocas pirocl3sticas y basaltos.



Fuente: elaboraci3n propia a partir de DEM y divisiones pol3ticas SINIT, delimitaci3n y datos IHCIT-UNAH

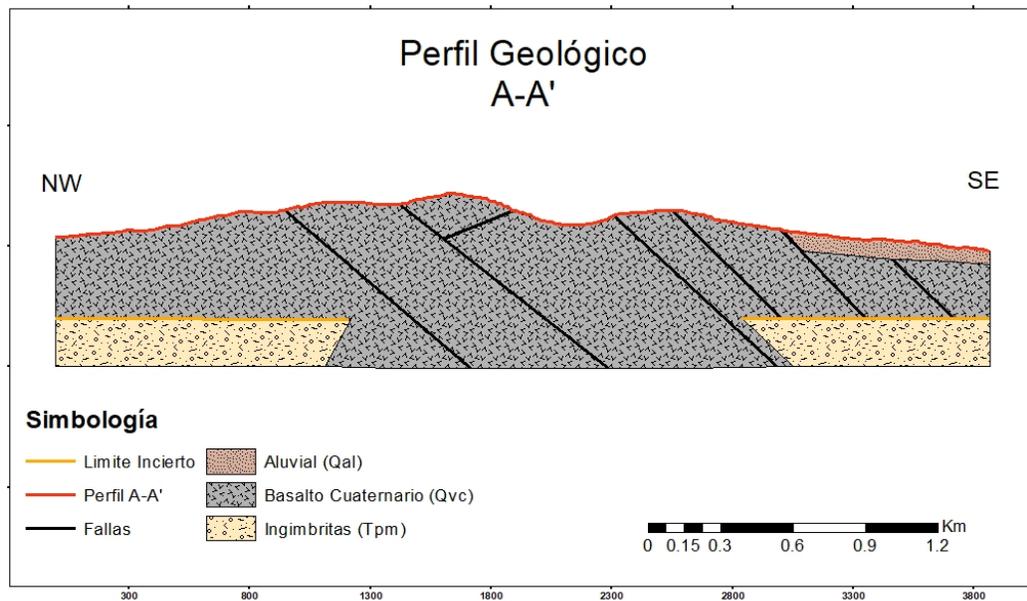


Ilustración 3 Perfil geológico A-A'

Fuente: elaboración propia a partir de los datos (Ruiz, 2015)

Los depósitos aluviales cerca del Cerro de Hula, en las comunidades de La Bodega, Las Quebraditas y Las Mesitas, generalmente son sedimentos ricos en arcillas rojas, producto de la alteración de los basaltos dominantes en la zona que, generalmente se observan alterados, desarrollándose algunos suelos en las terrazas prehispánicas construidas naturalmente en las laderas del Cerro de Hula.

La litología propuesta del área es predominada por aluvial de sedimentos no consolidados, arenosos, arcillosos y arcillo arenosos de espesor aproximado de 20 m, y el basalto del cuaternario y basalto Padre Miguel del terciario que se encuentra bajo el aluvial, principalmente por las coladas basálticas con un espesor aproximado de 100 m, y 120 m respectivamente, este último tiene un alto grado de consolidación (Ruiz, 2015) (ver ilustración 4).

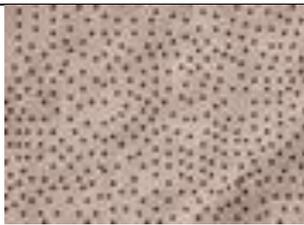
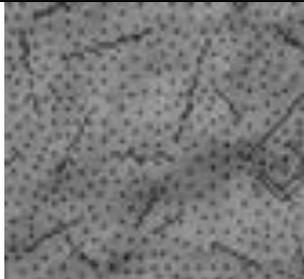
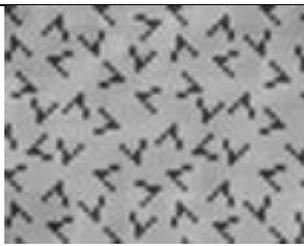
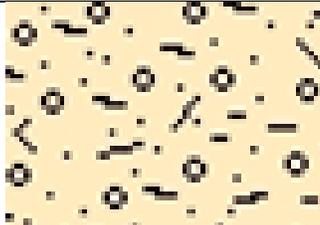
Era	Edad		Unidad	Litología
Cenozoico	Cuaternario		Qal	<u>Sedimentos aluviales no consolidados:</u> arenosos, arcillosos y arcillo arenosos, de espesor aproximado 20 m.
			Qvc	<u>Basaltos del cuaternario:</u> coladas de lava del tipo basalto a basalto andesítica, espesor aproximado superior a los 100 m.
	Terciario		Tpb	<u>Basalto Padre Miguel:</u> basalto de color negro a gris oscuro, espesor aproximado superior a los 120 m.
			Tpm	<u>Ignimbritas:</u> Tobas ignimbríticas porosas.

Ilustración 4 Columna litológica del área

Fuente: elaboración propia a partir de (Ruiz, 2015)

i. Geología estructural

Esta unidad geológica del basalto cuaternario en el Cerro de Hula, se caracteriza por presentar un intenso fracturamiento vertical, con una densidad promedio de 15 fracturas por 1m², las direcciones dominantes son; S80°W, S60°W, S20°W, N45°W y S30°W, el rumbo de esta unidad es de N15°E y buzamiento general de 12°NW, su espesor estimado es de 50 m (Ruiz, 2015).

Muchas de estas fallas y fracturas verticales y sub-verticales observadas e inferidas, se muestran abierta y rellenas de material detrítico, principalmente arenas y arcillas, cortan ampliamente los depósitos de materiales y generalmente terminan en secuencia de suelos jóvenes (ver mapa 8, ilustración 5).

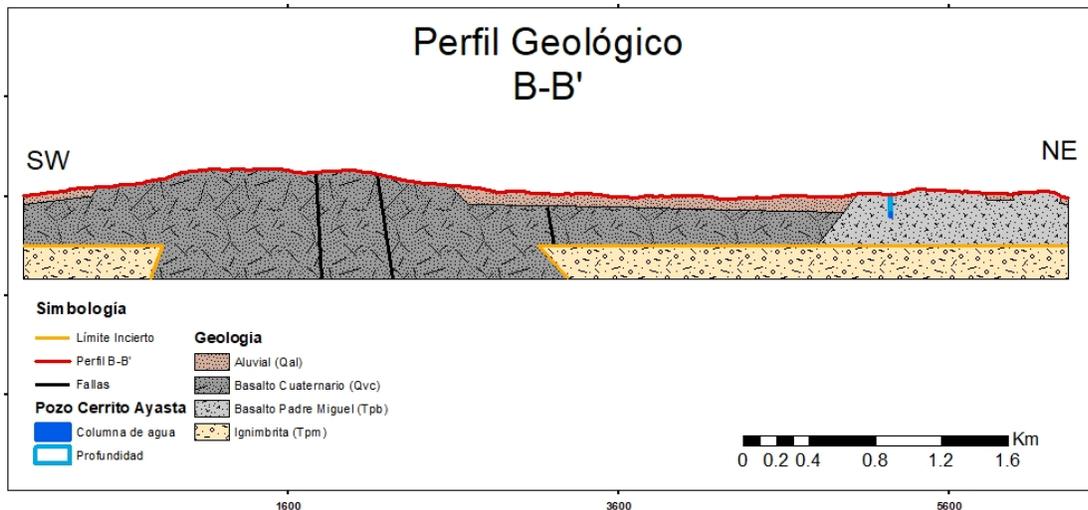


Ilustración 5 Perfil geológico B-B'

Fuente: elaboración propia a partir de los datos (Ruiz, 2015)

D. Suelos

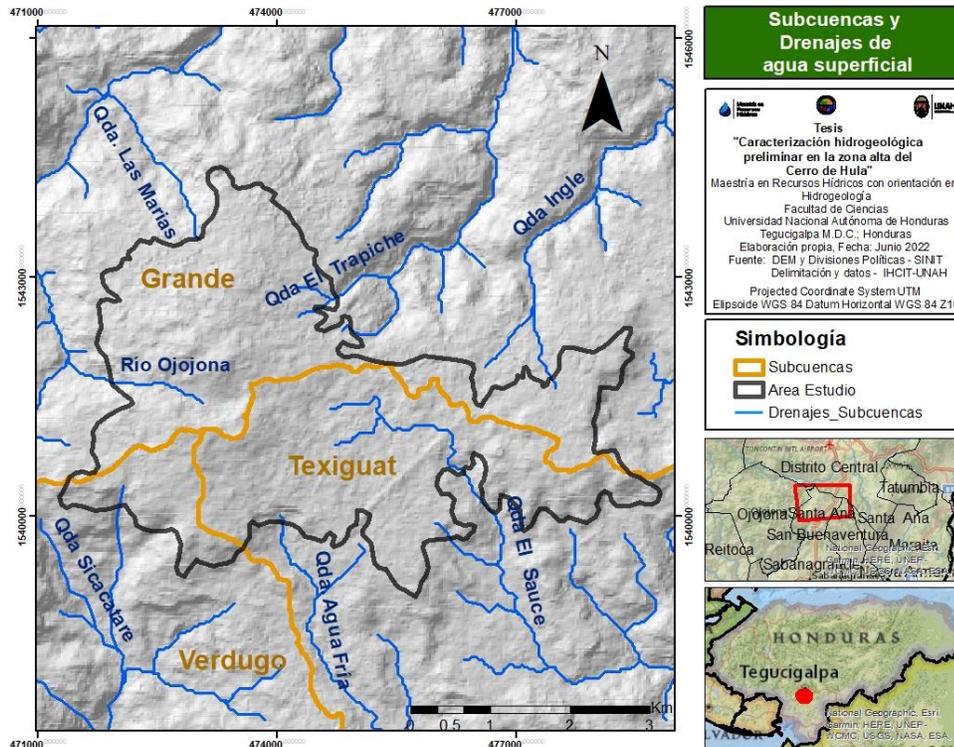
Para el caso de los suelos, según (Simmons, 1969), el área de estudio presenta **suelos de los valles**, se caracterizan por ser suelos aluviales, que comprenden gran parte de la superficie del país que son aptos para el cultivo intensivo.

Estos suelos son los menos descritos porque contiene una diversidad de materiales, sin embargo, se pueden identificar dos tipos: los de material aluvial reciente plano de inundación, los cuales son considerados profundos, de texturas gruesas, con poco de erosión, pendientes de 2%, conformado principalmente por sedimentos aluviales. Y están los suelos del valle de terrazas antiguas, los cuales son considerados suelos profundos, conteniendo materiales de textura fina, con pendientes de 2.5%, con ligera erosión, se considera que se han desarrollado sobre terrazas aluviales terciarias, cuyo uso principal es como pastos y para el cultivo de granos básicos.

Dentro del área de estudio se caracteriza más con la presencia de suelos del valle de terrazas antiguas, pues la morfología y las pendientes están asociadas más a este tipo de suelo.

E. Hidrografía

De acuerdo con la descripción morfológica y geológica, la zona en estudio se sugiere es una estructura de domo basáltico que ha sufrido procesos de erosión hasta formar las terrazas, por lo tanto, la hidrografía presente es de drenajes efímeros, que alimentan cuerpos de agua en las partes bajas alrededor del mismo, siendo los principales, Qda. El Trapiche, Río Ojojona, Qda. El Sauce, Qda. Agua Fría y Qda. Sicacatare, los cuales son parte de las subcuencas de agua superficial, Verdugo, Grande o San José y Texiguat, pertenecientes todas a la Cuenca de río Choluteca. (ver mapa 9).



Mapa 9 Subcuenas y drenajes de agua superficial

Fuente: elaboración propia a partir de DEM y divisiones políticas SINIT, delimitación y datos IHCIT-UNAH

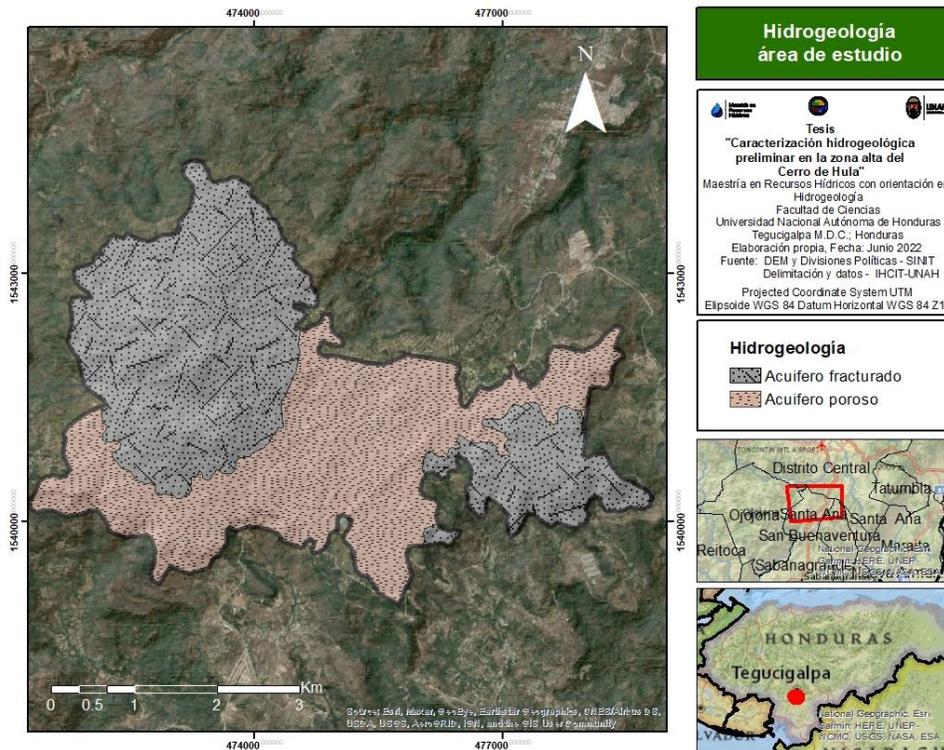
Es importante destacar que el área de estudio es la parte más alta de las subcuenas Grande, Verdugo y Texiguat, las cuales son de mucha importancia hídrica para la ciudad de Tegucigalpa, esto debido a que, de estas subcuenas se alimenta una de las principales fuentes de abastecimiento de agua para la ciudad, ya que, como se muestra en la descripción del uso del suelo (zona con gran porcentaje de vegetación) se trata de una zona potencial de recarga de estos cuerpos de agua.

F. Hidrogeología

i. Estructuras hidrogeológicas

La hidrogeología del lugar está condicionada principalmente por la geología del área, encontrándose dos tipos de acuíferos, fracturados y poroso. El acuífero fracturado está siendo dominado por las estructuras geológicas presentes, ese fracturamiento de las ignimbritas y basaltos, las estructuras desarrolladas en las coladas de lava, las discontinuidades y niveles de aglomerados, forman afloramientos o en profundidades someras, esta red de flujo subterráneo llamado acuífero fracturado. Este tipo de acuífero por el grado de fracturamiento que es alto, sugiere permeabilidades altas, lo cual puede apuntar a que se trate de una posible zona de recarga de agua subterránea, la cual es condicionada por otros elementos como el uso del suelo, pendiente y el tipo de suelo (Ruiz, 2015).

Para el caso del acuífero poroso, se debe principalmente al material aluvial presente el área, encontrándose terrazas aluviales con unas profundidades aproximadas de 20 m (Ruiz, 2015), y debido a que la granulometría es de elementos grandes, se infiere permeabilidades medias-altas (ver mapa 10).



Mapa 10 Hidrogeología área de estudio

Fuente: elaboración propia a partir de DEM y divisiones políticas SINIT, delimitación y datos IHCIT-UNAH

Por lo tanto, se ha propuesto que se tiene una unidad hidrogeológica que consta de un acuífero poroso que obedece a la presencia de material aluvial poco profundo, luego se presenta un acuífero fracturado de basalto de gran profundidad y después continua un acuífero fracturado de ignimbritas (ver ilustración 6).

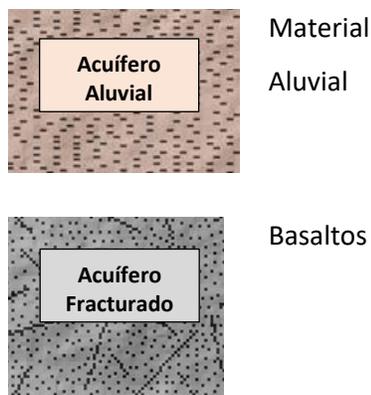


Ilustración 6 Unidad hidrogeológica del área

Fuente: elaboración propia a partir de (Ruiz, 2015)

ii. Censo de fuentes de agua-PFA

El Proyecto Fondo de Adaptación (PFA) en el 2014/2015 realizó censo de fuentes de agua en la parte alta de la cuenca del río Choluteca, teniéndose para el área de estudio 9 puntos identificados, de los cuales se tiene un manantial, 4 pozos profundos y 4 pozos someros, de estos se tienen escasos datos de las profundidades y niveles freáticos.

Los pozos profundos oscilan entre los 70 m y valores menores a 160 metros de profundidad, mientras que los pozos someros andan entre 0-15 metros (ver gráfico 2).

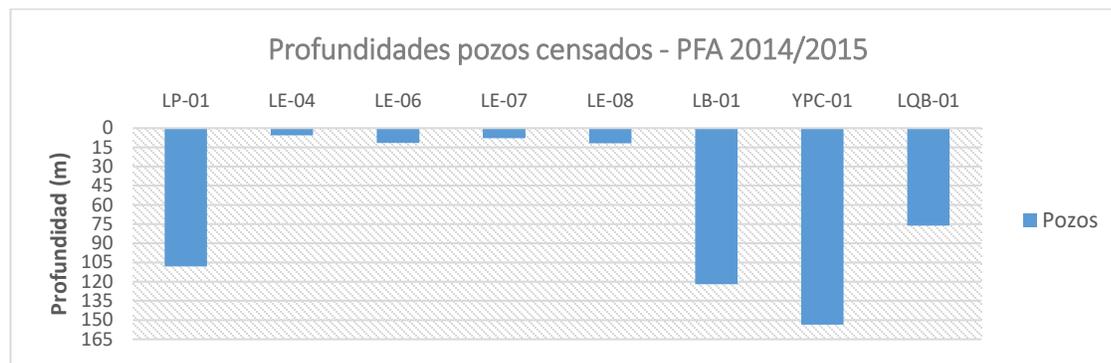


Gráfico 2 Profundidades pozos censados PFA 2014/2015

Fuente: elaboración propia a partir de datos de PFA 2014/2015

G. Elevaciones de recarga

En el año 2021 desde el Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra (IHCIT), se realizó el estudio de alturas de recarga utilizando métodos isotópicos para toda la parte alta de la Cuenca del Río Choluteca, en la cual se encuentra la zona en estudio.

Partiendo de ese estudio, considerando que una de las estaciones de recolección de lluvia analizadas ha sido una que se ubica en el Cerro de Hula, y que, además, se incorporó el pozo perforado de la comunidad de La Bodega, es importante mencionar que, al ver el ajuste de las gráficas de línea meteórica construida para el Cerro de Hula y el comportamiento del análisis de los muestreo en el pozo, ambos análisis de 2018 al 2021, se determinó que las alturas de recarga encontradas en esta área son aproximadamente las superiores a los 1572 m.s.n.m. (García-Santos, y otros, 2022), por lo tanto, se fortalece la teoría de que el área en estudio de esta investigación es una zona de recarga subterránea (ver gráfico 3).

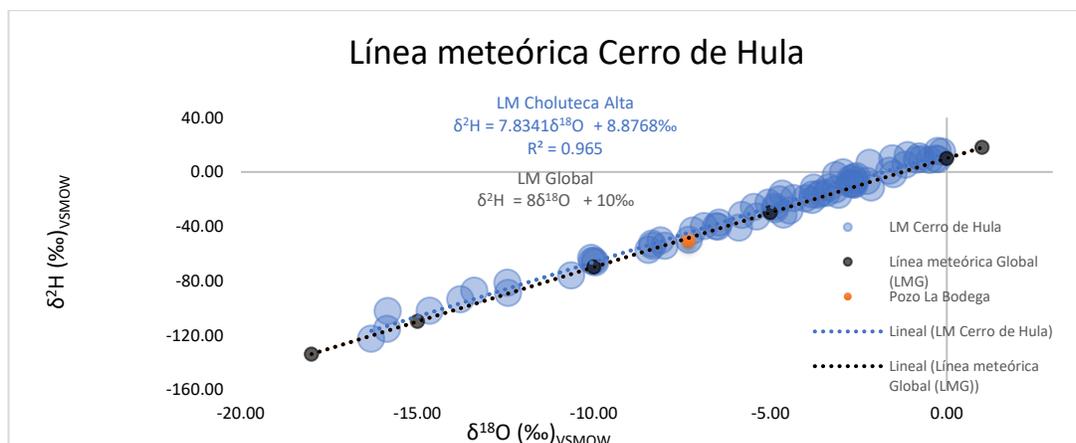


Gráfico 3 Línea meteórica Cerro de Hula

Fuente: elaboración propia a partir de datos de (García-Santos, y otros, 2022)

H. Hidroquímica

Con la identificación de la hidroquímica de las aguas, su comportamiento espacial y temporal, pueden mostrar cual es el origen, los procesos fisicoquímicos que aparentemente están sucediendo, y por ende el estado de la calidad de estas (García Hidalgo, Carlos, & Vargas Rodríguez, 2012).

En ese sentido, después de la entrevista realizada a una de las personas que estuvo desarrollando el estudio de la Ecología del Agua de la parte alta de la Cuenca del Río Choluteca ejecutado en el año 2023, y debido a que el área de esta investigación se encuentra gran parte dentro de la zona antes mencionada, es de destacar que, los resultados muestran que en las subcuencas Grande o San José hay presencia de altas concentraciones de metales pesados tales como hierro, manganeso y zinc en el agua de los pozos, siendo el pozo de la comunidad de La Bodega el que presenta una mayor cantidad de concentración de estos metales (Peña-Paz, 2023), superando la Norma Técnica para la Calidad del Agua Potable de Honduras (NTCAPH) (<0.30 ppm), lo cual evidencia la presencia de basalto en el área de estudio con la aparición de metales pesados encontrados en el agua del pozo de la comunidad en mención.

6. CAPITULO V: METODOLOGÍA

6.1 Tipo de investigación

El enfoque de la investigación es descriptivo apoyado con metodología cuantitativa, ya que implica una fuerte toma de datos en campo para su posterior análisis y correlación (Babbie, 2010). Este enfoque descriptivo se caracteriza por no tener una hipótesis exacta, lo cual permite ordenar los resultados de las características y los datos hidrogeológicos, a diferencia de los enfoques inferenciales, por lo que se exterioriza una imagen más definida de la caracterización hidrogeológica, siendo esta de suma importancia para el inicio de una categorización y correspondencia eficiente de los parámetros hidrogeológicos de la zona, lo cual es fundamental para la conservación, manejo y desarrollo sostenible del recurso hídrico en el área.

6.2 Diseño de la investigación

La metodología de la investigación está estructurada en un diseño secuencial dividido en tres fases críticas (Creswell & Creswell, 2018). La fase 1 actúa como la línea de base del estudio y está diseñada para establecer el marco contextual y los parámetros de referencia en la esfera de la hidrogeología. En la fase 2, realiza la recolección de datos mediante técnicas de muestreo validadas y herramientas de medición de alta precisión. Y al final, la fase 3 brinda el procesamiento y análisis estadístico de los datos acumulados, lo cual conduce a la síntesis de resultados y hallazgos significativos (ver ilustración 7). Estas fases no solo estructuran la investigación de forma lógica y sistemática, sino que también aseguran que el estudio se alinee con los estándares científicos contemporáneos en el ámbito de las ciencias del agua.



Ilustración 7 Descripción general de la metodología de la investigación

Fuente: Elaboración propia

Es importante destacar que los procesos mencionados están ligados a la obtención de los resultados finales del estudio, es por eso por lo que a continuación se muestra la relación directa que hay entre el cumplimiento de los objetivos con la información base recopilada, la toma y análisis de información de campo en abril 2022 y el procesamiento de dicha información (ver ilustración 8):

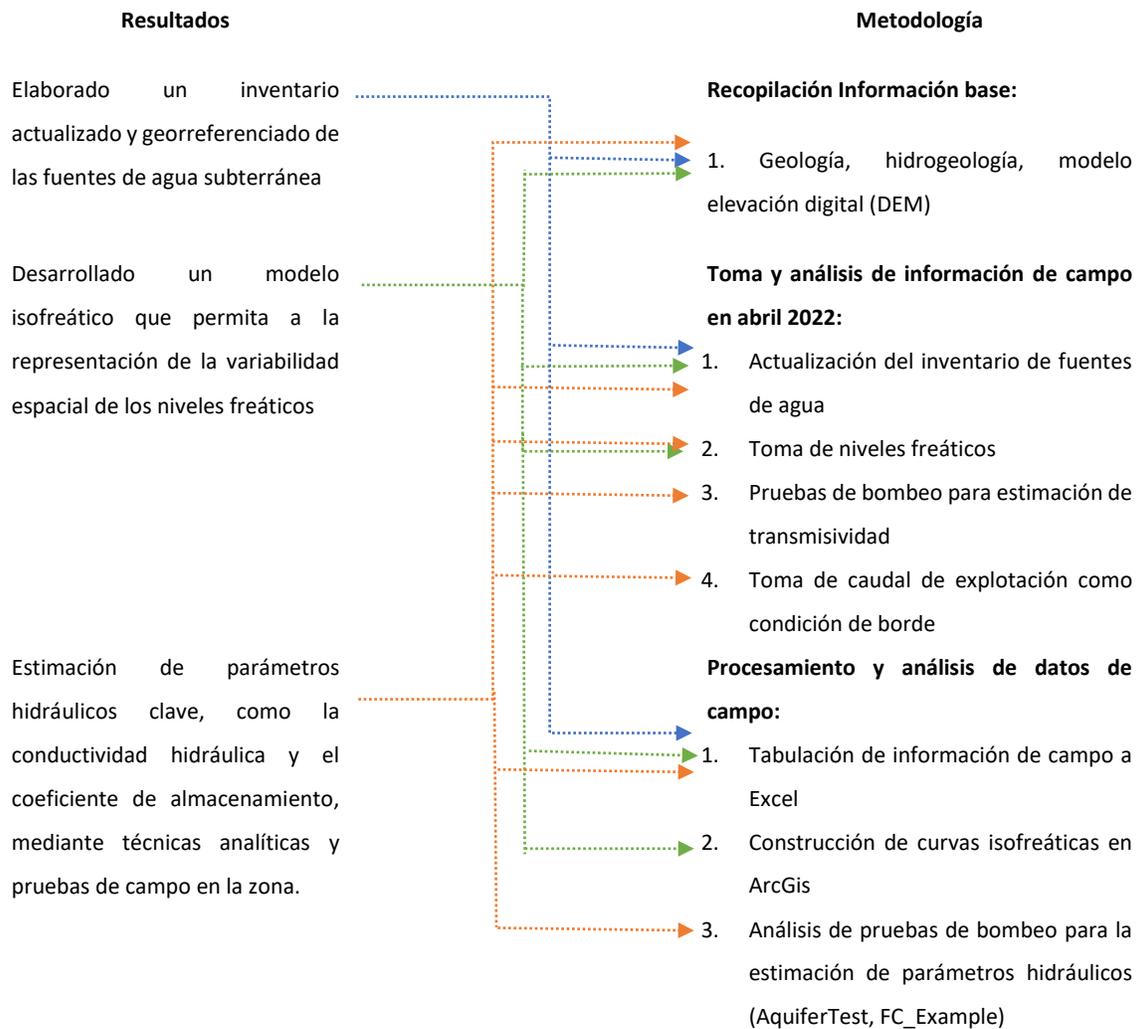


Ilustración 8 Relación de resultados con la metodología empleada

Fuente: Elaboración propia

A. Descripción de las fases

Una vez conocida esta relación, así como el proceso general de cómo llegar a obtener los resultados, se hace una descripción de las fases.

i. Fase 1: Recopilación Información base

a. Metodología de obtención de la información

La primera fase consistió en la obtención, recopilación y tratamiento de información base, la cual alcanza la revisión bibliográfica y consulta de informes de estudios, proyectos e investigaciones realizados previamente en la zona de estudio, además de datos preliminares de clima, geología, suelos, la parte social, hidrogeología, usos, hidroquímica, isotopía y geomorfología.

b. Fuentes de información base

Los estudios existentes se centran en descripciones del medio generadas desde el año 2012 en adelante, especialmente aquellas derivadas del proyecto Fondo de Adaptación ejecutado por el Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra (IHCIT). Los datos incluyen, entre otros, análisis hidrogeoquímicos detallados y muestreos de fuentes de abastecimiento superficial y subterráneo, con resoluciones geológicas de hasta 1:389,000 (IHCIT-UNAH, 2012).

Un estudio subsecuente en 2016 aportó una mayor resolución en el análisis geológico y la identificación de tipos de acuíferos, incluyendo acuíferos fracturados (basalto) y porosos. Se instaló además una infraestructura de monitoreo hidrológico compuesta por una estación climática y vertederos para la medición de caudales (IHCIT-UNAH, 2016).

c. Datos complementarios

Se integraron datos de información complementaria como el de usos del suelo ha sido tomada de la base de datos de Instituto de Conservación Forestal (ICF) que fue generada en el 2018 (ICF, 2018), los datos de los suelos fue tomada del estudio Suelos de Honduras (Simmons, 1969), la descripción de las altura de recarga utilizando metodología isotópica (García-Santos, y otros, 2022) y la parte hidroquímica (Peña-Paz, 2023), han sido tomadas de estudios que el IHCIT ha desarrollado en los años 2021 y 2023 respectivamente, el censo población y de vivienda de 2013 del Instituto Nacional de Estadísticas (INE, 2013) para el perfil social, y el modelo de elevación digital a 15m del Sistema Nacional de Información Territorial (Secretaría de Estado en el Despacho de Planificación Estratégica de Honduras, 2022), que además cuenta con cartografía básica, fisiografía y recursos naturales, aspectos sociales y económicos, y de infraestructura y equipamiento.

d. Herramientas y procesamiento de datos

Toda la información ha sido visualizada y procesada en diversos softwares de sistemas de información geográfico, los datos se pueden presentar en capas vectoriales (shapes) representadas por puntos, líneas o polígonos o capas tipo ráster, es decir, que es una imagen digital representada en una malla de un tamaño

especifico, la cual contiene un valor determinado, el cual es asignado al centro de la casilla (Longley, Goodchild, Maguire, & Rhind, 2015).

ii. Fase 2: Toma de datos en campo en abril 2022 y análisis preliminar

Esta fase comprendió la toma de datos en campo, para lo que, se realizaron giras de campo para la actualización del inventario de fuentes hídricas, en donde también se lograron medir los niveles piezométricos de los puntos censados, y, posteriormente se realizaron las pruebas de bombeo a los pozos perforados profundos que dentro de sus características de construcción se pudo introducir la sonda para medición de niveles. Importante he de destacar que, todos los datos de campo se obtuvieron en abril de 2022, el cual es un periodo de baja precipitación, y con esto se evita tener sesgos asociados con la variabilidad estacional, es decir, que los niveles no varían en el tiempo, ya que es una época considerada seca o de no lluvia.

a. **Actualización de inventario de fuentes hídricas**

Una vez reunida la información preliminar, se realizaron giras de campo para la elaboración del inventario de fuentes hídricas existentes en el área, toda la información de las fichas de recolección de datos fue completada en colaboración con las comunidades locales y sus juntas de agua, en la cual se incluyen aspectos tales como datos generales de la fuente, su georreferenciación y especificaciones físicas del pozo como la profundidad, el diámetro, bomba de extracción, caudal de extracción y nivel del agua (Maidment, 1993).

Materiales y equipo: GPS, sonda métrica solinst Modelo 107, balde plástico, cinta métrica, cronómetro, cámara fotográfica, tablero, fichas de campo (ver anexo 1) y lápices.

b. **Medición de niveles piezométricos**

Los niveles en los pozos perforados se tomaron utilizando la sonda métrica solinst Modelo 107 (Solinst, 2023). Los datos recopilados fueron posteriormente transcritos y ajustados en una hoja de cálculo Excel como base para la generación de las curvas isofreáticas y posterior análisis de pruebas de bombeo (Kruseman & De Ridder, 1975).

c. **Evaluación de pruebas de bombeo**

Se efectuaron pruebas de bombeo a pozos perforados de explotación a caudal constante ante la ausencia de pozos de observación. Estos datos permiten estimar parámetros hidráulicos del acuífero, tales como la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento, que sirven para la caracterización hidrogeológica, y esta a su vez es vital para la modelización hidrogeológica conceptual (Tonder, y otros, 2002).

Es importante destacar que solo se hicieron pruebas en 3 de los 5 pozos perforados profundos encontrados. Las condicionantes de esto han sido por el estado después de la construcción de los pozos, que permitió introducir las sondas de monitoreo de niveles de agua solamente en 3 de los 5 pozos profundos inventariados. Asimismo estas pruebas estuvieron condicionadas, a pesar de que el tiempo recomendado de duración es de 8 horas según (Tonder, y otros, 2002), por la capacidad de extracción de caudal de la bomba que está instalada en los pozos, teniendo por esta razón, duración de las pruebas oscilando entre 6 horas (siendo el pozo de La Bodega con este tiempo) a un poco más de 11 horas para el resto de los pozos, lo importante es medir los descensos del nivel del agua respecto a la profundidad del pozo sin llegar a que se termine el agua dentro del pozo.

Toda la información de campo fue tomada en el mes de abril 2022, es decir en una época seca, para su posterior análisis.

d. Medición de caudales de extracción

Los caudales de extracción se midieron volumétricamente en los tanques de almacenamiento y se emplean como condiciones de contorno para estimaciones posteriores de parámetros hidráulicos. Estos datos fueron recolectados al menos semanalmente durante el mes de abril de 2022 (Domenico & Schwartz, 1997).

iii. Fase 3: Procesamiento y análisis de datos

Durante la fase 3, se hizo el procesamiento, análisis y verificación de datos de campo y datos teóricos, mediante la implementación de software, en donde se introdujo toda la información recolectada y validada, así como la interpretación de los resultados.

a. Elaboración inventario actualizado de fuentes hídricas

En esta sección se procedió a vaciar la información recolectada en campo a una tabla en Excel, en donde se trataron para la construcción de la cartografía de ubicación de las fuentes inventariadas existentes en estudios pasado y nuevas, además, de separar aquellos datos que fueran requeridos para la construcción de las curvas isofreáticas, y análisis de pruebas de bombeo.

b. Generación de curvas isofreáticas

Las curvas isofreáticas se construyeron partiendo de los valores medidos de niveles freáticos para todos los puntos obtenidos, ya sea de pozos malacate de niveles someros como de pozos perforados de niveles profundos, esto se ha dado así ya que, su geología consiste en un estrato de basalto fracturado con profundidad superior a los 100 m, la topografía del área que el flujo de agua parte desde la parte más alta del Cerro de Hula teniendo teóricamente un flujo radial, y que la ubicación de los pozos malacate de niveles

de agua bajo se encuentran en la parte más alta y los pozos perforados con niveles de agua profundos están en la parte más baja.

De esta información se creó una malla de puntos con la ubicación espacial y teniendo una de sus propiedades el nivel freático medido, con esta información se procedió a realizar la interpolación por medio del método de kriging ordinario, la cual se define como un método para el análisis geoestadístico de variación de los datos, esto significa, que, analiza el comportamiento de los datos en el espacio mediante el análisis de variogramas (Villatoro, Henríquez, & Sancho, 2008) (Zucarelli, Paris, & Macor, 2014).

El método de interpolación utilizado ha sido usado en la minería, geología e hidrología, pues es un método de interpolación espacial flexible, y por ejemplo, una aplicación útil es para el diseño de redes de muestreo, pues kriging es un método que puede ser utilizado para el análisis de datos en geohidrología (Hughes & Lettenmaier, 1981), (Rouhani & Hall, Geostatistical Schemes for Groundwater Sampling, 1988), (Rouhani, Geostatistics in Water Resources, 1989), (Kitanidis, 1997).

Para el análisis geoestadístico se utilizó la herramienta geostatistical analyst disponible en el software ArcGis (Mejía Rivera, Betancur Vargas, & Londoño Ciro, 2007), (Gaspari & Delgado, 2010), con la cual primero se hizo un análisis exploratorio inicial, en la cual se puede visualizar como se distribuyen los datos, las tendencias espaciales y los valores atípicos, posteriormente se sacó una muestra aleatoria de los datos para la generación del modelo de interpolación y otra muestra para la validación de este modelo, seguidamente se realizó el modelo de interpolación con la muestra aleatoria generada usando el método de kriging, utilizando semivariograma de modelo esférico es el más utilizado para este tipo de análisis (Rouhani & Hall, Geostatistical Schemes for Groundwater Sampling, 1988) , y al final se validó este modelo generado con los datos que no estuvieron dentro de la muestra aleatoria mencionada anteriormente, cumpliéndose los estándares de calidad estadístico y el cual se ajustó de mejor manera al comportamiento de los datos. Una vez creado el modelo de interpolación, se procedió a generar las curvas isofreáticas a cada 5 metros.

c. Análisis pruebas de bombeo

Para el análisis de las pruebas de bombeo se ha seguido el esquema propuesto por Tonder, 2002, del Manual on pumping test analysis in fracturedrock aquifers (ver ilustración 5):

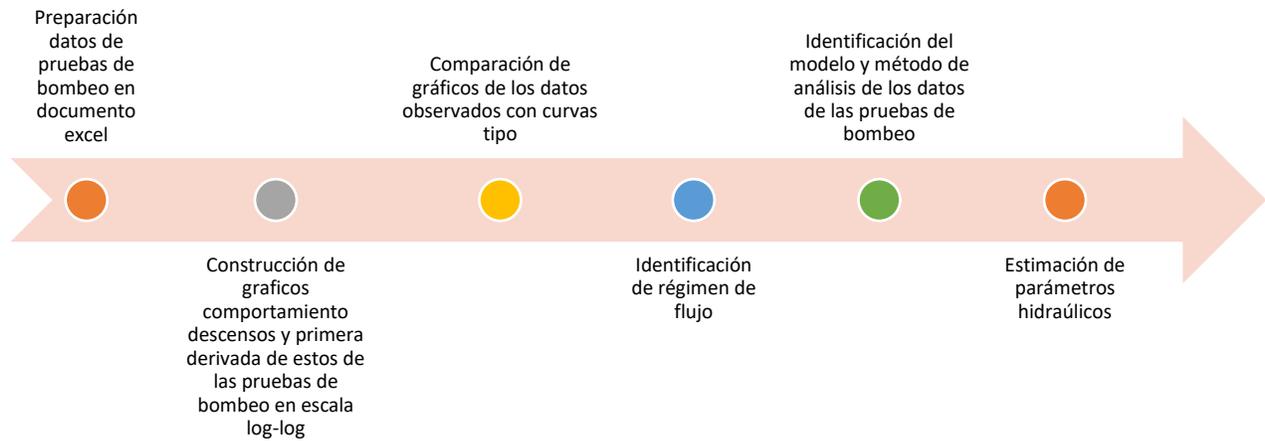


Ilustración 9 Esquema análisis pruebas de bombeo

Fuente: Elaboración propia

El análisis de pruebas de bombeo puede ser de dos tipos, métodos convencionales y métodos de curvas tipo, para este estudio se ha utilizado el método de curvas tipo propuestas inicialmente por Agarwal, Al-Hussainy y Ramey en 1970. Esta metodología lo que hace es buscar de acuerdo con los datos reales de la prueba de bombeo, la curva tipo que mejor aproximación tenga, y por efectos de dar mejor precisión en la búsqueda del mejor ajuste gráfico. Bourdet en 1983, propuso que las gráficas de las derivadas de los datos en escala log-log, pueden caracterizar de mejor manera los regímenes de flujo (Yagual Muñoz O. , 2016).

Por lo tanto, la información obtenida en las pruebas de bombeo fue trasladada a un documento Excel, en donde se logró determinar el descenso de los niveles de agua en cada uno de los pozos en donde se realizó la prueba de bombeo, los cuales se calculan restando el valor de profundidad en cada tiempo menos el dato de profundidad inicial (nivel freático inicial), es decir, en el tiempo cero, sin iniciado el bombeo. Cabe mencionar que solo se consideraron 3 pozos profundos para el análisis, esto debido a la limitación del tiempo mínimo requerido de bombeo que es 8 horas según el Manual on pumping test analysis in fracturedrock aquifers (Tonder, y otros, 2002), el cual ha sido utilizado como base para análisis de pruebas de bombeo para la estimación de parámetros hidráulicos, ya que es un manual orientado al análisis de acuíferos fracturados, medio que es característico de la zona de estudio según la descripción geológica, lo cual generó que quedara en análisis los pozos de las comunidades de Cerrito de Ayasta, Quebraditas y Yastepec.

Para este análisis se utilizó primero el software AquiferTest, en donde se lograron visualizar los datos, tanto de los descensos versus tiempo, como sus derivadas, y con ellos tener la estimación de valores hidráulicos y gráficos para analizar, y así poder caracterizar hidrogeológicamente el área de estudio. Además, se utilizó el FC_Example como programa de análisis creado y utilizado por (Tonder, y otros, 2002) en el Manual on pumping test analysis in fracturedrock aquifers, y también se hicieron gráficos de comportamiento de

descensos de las pruebas de bombeo y sus derivadas utilizando el lenguaje Python en la plataforma de Google colab, haciendo uso de la ecuación 3 quien ha sido tomada de (Renard, Glenz, & Mejias, 2009), con la idea de tener una mejor visualización del comportamiento de la derivada para su posterior análisis con gráficos tipo.

$$\frac{\partial s}{\partial \ln t} |_{t_m} \approx \left(\frac{t_i + t_{i-1}}{2} \right) \left(\frac{s_i - s_{i-1}}{t_i + t_{i-1}} \right) \quad \text{Ecuación 3 Primera derivada}$$

La aproximación de la ecuación anterior está ligada al tiempo central del intervalo de tiempo tm [t], el cual ha sido calculado con la media aritmética, en donde t es el tiempo [t] y S los descensos [L].

1) Identificación régimen de flujo

El régimen de flujo es determinar el comportamiento del flujo en el medio fracturado que está en estudio, este comportamiento depende de factores como la geometría del acuífero, de la geología y la tasa de extracción (Van Bosch, 2000), para ello, se analizaron las curvas de las derivadas de los datos, respecto a la curva tipo de la derivada en un medio fracturado propuesta por Enachescu, Dmour, & Acs, 2016 (ver ilustración 6), en donde se muestra el comportamiento de la derivada y de acuerdo con ella, cual podría suponer el comportamiento del flujo a tasa constante, este análisis del comportamiento de la derivada suele ser una ventaja ya que se muestra factores como el efecto piel, por lo tanto, viene a ser un buen método para determinar regímenes de flujo de un medio (Van Bosch, 2000).

El comportamiento del flujo puede ser según (Van Bosch, 2000) y (Enachescu, Dmour, & Acs, 2016):

- **Lineal**, las características geológicas típicas donde se observa flujo lineal son fracturas subverticales o entre dos límites impermeables paralelos, fallas, o diques. Para estos flujos las pendientes en gráficos de primeras derivadas a escala log-log es de 0.5.
- **Radial**, aparece cuando el cono de depresión es aproximadamente circular, generalmente en pozos penetrantes de medios homogéneos, esa depresión causada por una red de fracturas vertical con conductividad infinita. Para este caso, en el gráfico de primera derivada en escala log-log se muestra un comportamiento de línea recta, es decir, una pendiente de casi cero.
- **Bilineal**, en este caso las pendientes suelen estar en 0.25.
- **Esférico**, puede ser considerado como un caso especial del flujo radial, en donde pequeñas dimensiones y durante un corto período de tiempo, se puede ver un cono de depresión esférico, ya que al llegar al fondo del acuífero y el cono se convertirá en un ordinario flujo radial.

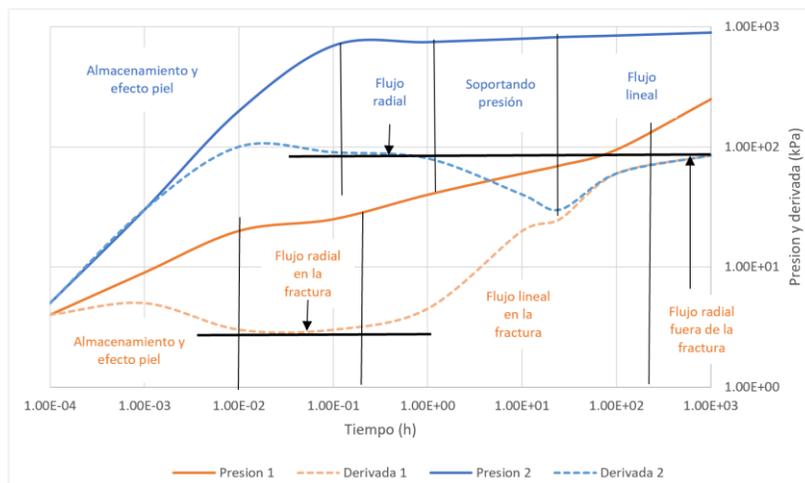


Ilustración 10 Comportamiento hidráulico del modelo de fractura

Fuente: Elaboración propia con datos tomados de (Enachescu, Dmour, & Acs, 2016)

Es importante destacar que, el análisis de pruebas de bombeo mediante el uso de gráficas diagnósticas es una manera de caracterizar hidrogeológicamente un área, que sirve para facilitar la identificación de un modelo conceptual más adecuado para interpretar los datos (Renard, Glenz, & Mejias, 2009).

2) Identificación modelo de análisis

Se realizó un análisis del comportamiento del gráfico de la derivada de los datos obtenidos de la plataforma de Google Colab respecto a las curvas de comportamiento típico de las derivadas en hidrogeología, que permiten identificar qué modelo se puede utilizar para interpretar los datos de pruebas de bombeo, las cuales sirven para comparar el diagnóstico gráfico de las derivadas de los datos de campo con un conjunto de gráficos de diagnóstico típicos mostrados en la ilustración 7 (Renard, Glenz, & Mejias, 2009).

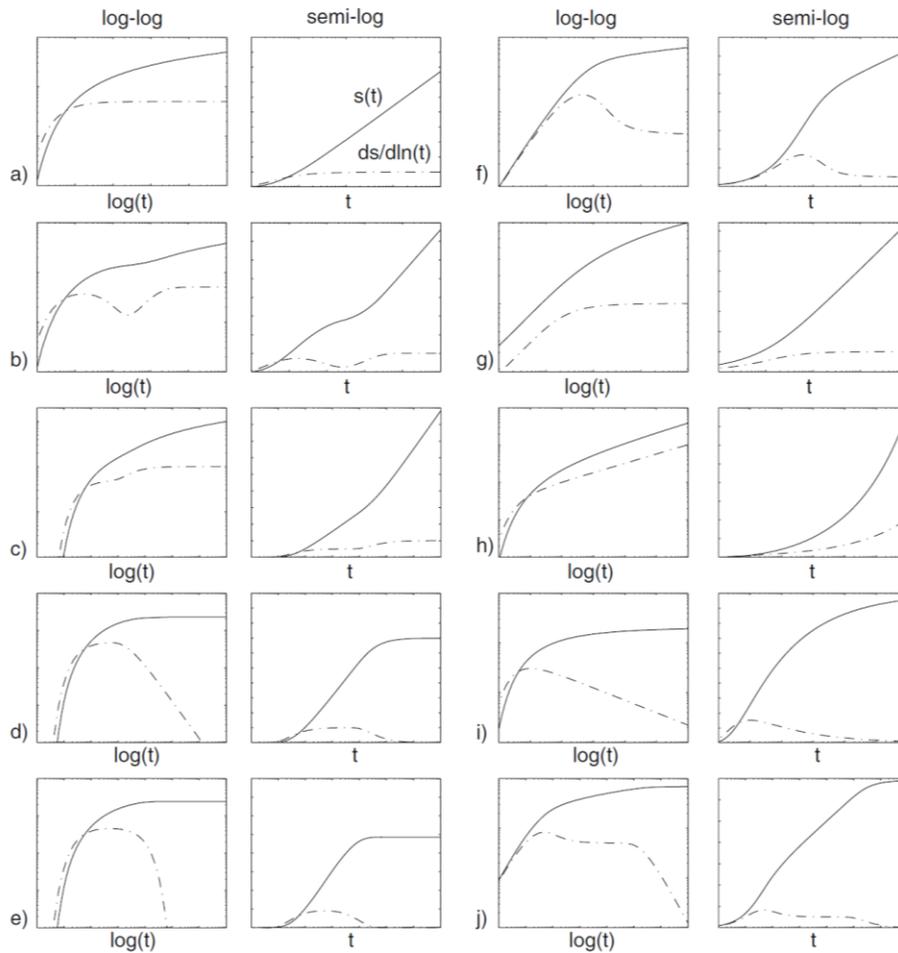


Ilustración 11 Gráficos de diagnóstico típicos en hidrogeología: **a** Modelo Theis: acuífero confinado bidimensional infinito; **b** doble porosidad acuífero inconfinado; **c** Línea infinita sin límite de flujo; **d** límite de cabeza constante lineal infinito; **e** acuífero semiconfinado; **f** Almacenamiento del pozo y efecto piel; **g** fractura vertical de conductividad infinita; **h** Dimensión de flujo radial general no entera menor que 2; **i** modelo de flujo radial general: dimensión de flujo no entera mayor que 2; **j** Efecto combinado del almacenamiento en el pozo y el límite de carga constante lineal infinito (modificado por Renard 2005b)

Fuente: tomado de (Renard, Glenz, & Mejias, 2009)

3) Estimación de las propiedades hidráulicas

Para esta estimación, se partió de la suposición que, el espesor del acuífero es, la distancia que hay entre el nivel freático medido antes de la prueba de bombeo (en tiempo 0) y la distancia de la profundidad del pozo.

Los valores de conductividad hidráulica K , han sido estimados a partir de los datos de transmisividad T calculados, partiendo de la siguiente fórmula (ver ecuación 4):

$$K = \frac{T}{b}$$

Ecuación 4 Valor estimado de conductividad hidráulica (Custodio & Llamas, Hidrología Subterránea, 1983)

Donde K es la permeabilidad [$L t^{-1}$], T es la transmisividad [$L^2 t^{-1}$] y b , el ancho del acuífero [L].

La estimación de la transmisividad fue a partir de los softwares AquiferTest (Waterloo Hydrogeologic, 2022) y FC-Example (Tonder, y otros, 2002) del Manual on pumping test analysis in fractured rock aquifers, y estos fueron comparados con los valores teóricos de permeabilidad según diferentes autores, esto, de acuerdo con el medio geológico en donde están ubicados los pozos analizados (ver tabla 7).

Tabla 7 Valores estimados de conductividad hidráulica (m/d) de diferentes autores

Rocas Cristalinas	Domenico (Domenico & Schwartz, 1997)	Smith & W (Smith & Wheatcraft, 1993)	Freeze (Freeze & Cherry, 1979)	Sanders (Sanders, 1998)
Basalto inalterado, sin fracturar		10^{-6} a 10^{-3}		10^{-6} a 10^{-3}
Basalto fractura/vesicular Cuaternario		10 a 1000		0.1 a 10^6
Basalto permeable	0.03 a 2000		0.02 a 1000	

Fuente: tomado de (Sanchez, 2022)

AquiferTest

Este es un software de análisis de pruebas de bombeo, en donde se realizó un ajuste de datos obtenidos y gráficos tipo en este software, estableciendo un método de análisis que se ajustará al modelo de análisis identificado, encontrado entonces, dos métodos, los cuales se detallan a continuación:

1. Doble porosidad

Para este modelo este software utiliza un estado pseudoestable desarrollado por (Warren & Root, 1963) y Moench (1984), en donde se establece una solución de un acuífero fracturado con presencia de bloques (matriz) y fisuras (ver ilustración 8).

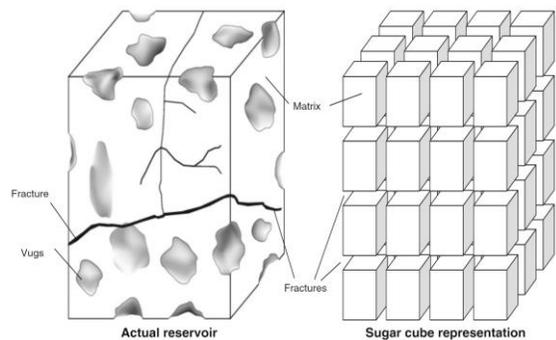


Ilustración 12 Modelo doble porosidad de Warren y Root (1983)

Fuente: tomado de (Biryukov & Kuchuk, 2012)

Para este caso, las suposiciones son las siguientes:

- La suposición principal para este modelo se basa en que la matriz y la fractura pueden considerarse como dos medios continuos superpuestos.

- El agua se mueve de un bloque matriz a una fractura, no de un bloque a otro o de una fractura a otra, el bloque matriz sirve únicamente como fuente de agua.
- La tasa de flujo entre la matriz y las fracturas es proporcional a la conductividad de la matriz y a las diferencias de carga hidráulica entre los dos sistemas.
- Acuífero confinado.
- Acuífero infinito.
- Flujo darciano en fracturas y matriz de bloques.
- El pozo penetra completamente en el acuífero.
- Almacenamiento y efecto piel insignificante en el pozo.
- Tanto la red de fractura como la matriz se consideran como continuo durante todo el período de extracción.

Este método establece que al inicio de la prueba de bombeo, el agua es bombeada del almacenamiento de la fractura, en ese momento la matriz no afecta el flujo, a medida que se sigue con el bombeo, el flujo del pozo aumenta debido a agua que es liberada desde la matriz, y hacia el final del bombeo, se muestra una “estabilidad entre fractura y matriz”, la cual indicaría que se comportaría como un acuífero de porosidad única con propiedad combinada de la matriz y la fractura (Tonder, y otros, 2002). En la ilustración 13, se muestra un comportamiento típico de datos con modelo doble porosidad.

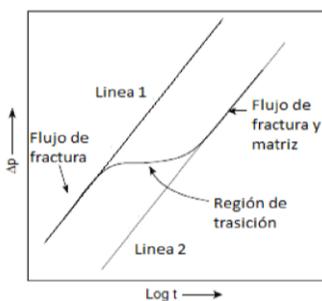


Ilustración 13 Comportamiento típico de Modelo doble porosidad escala log-log
Fuente: tomado de (Biryukov & Kuchuk, 2012)

FC Example

El Manual on pumping test analysis in fractured rock aquifers hace referencia a este software, en el cual se introdujeron los valores de tiempo y descensos, el cual de manera automática estima valores de Transmisividad, mediante la ecuación adaptada por Logan (Tonder, et al., 2002). A continuación, se muestra la ecuación de Logan utilizada para determinar el valor de T (ver ecuación 5):

$$T = \frac{1.22 Q}{s} \quad \text{Ecuación 5 Valor estimado de Transmisividad de la fractura adaptada por Logan}$$

En donde T , es la transmisividad en $[L^2/t]$, Q es el caudal de extracción en $[L^3/t]$, s $[L]$ es el descenso al final de la prueba.

Este método es utilizado cuando se tienen datos muy limitados, sin embargo, hay que considerar que tiende a tener errores grandes, pero es conocido por muchos hidrogeólogos del mundo y utilizado para tener las primeras aproximaciones en estudios de donde no se cuenta con pozos de observación, teniendo como principal suposición para su aplicación, que se trata de un acuífero confinado (Logan, 1964).

B. Materiales y variables utilizadas en el estudio

i. Equipamiento de campo

- Sistema de Posicionamiento Global (GPS): Utilizado para la geolocalización precisa de los pozos en estudio.
- Sonda Métrica Solinst 101: Empleada para la medición de niveles de agua subterránea (Solinst, 2023).
- Balde de Plástico: Utilizado en la recolección de muestras de agua.
- Cinta Métrica: Para mediciones dimensionales relacionadas con la infraestructura del pozo.
- Cronómetro: Utilizado para la temporalización de diversos aspectos del estudio, tales como la duración de las pruebas de bombeo.
- Cámara Fotográfica: Para documentar visualmente las condiciones del terreno y el equipo.
- Tablero y Fichas de Campo: Para el registro manual in situ de datos y observaciones.
- Instrumentos de Escritura: Lápices utilizados para el llenado de las fichas de campo.

ii. Software de análisis

- Microsoft Excel: Utilizado para el análisis preliminar de datos y para la creación de gráficos descriptivos.
- ArcGIS: Empleado para el análisis espacial y la visualización geográfica de los pozos y otros elementos relevantes en el estudio.
- AquiferTest versión de prueba: Manejado para la estimación de los parámetros hidráulicos clave (Waterloo Hydrogeologic, 2022).

7. CAPITULO VI: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS

7.1 Actualización del inventario de fuentes de agua subterránea en la zona de estudio

En el estudio del IHCIT en el 2014 se habían registrado 8 fuentes de agua (4 pozos perforados y 4 pozos malacate), y en esta investigación se lograron inventariar 13 nuevas fuentes de agua, de las cuales 12 puntos pertenecen a pozos malacate con profundidad somera y un pozo perforado profundo, de este último se tiene escasa información, solamente datos de las profundidades y niveles freáticos, teniendo como resultado un total de 21 fuentes de agua identificadas en la zona de estudio (ver tabla 8).

Las profundidades de los pozos malacate oscilan entre 0 y 15 metros, mientras que las de los pozos perforados están entre los 76 y 154 metros.

Tabla 8 Inventario de nuevas fuentes de agua y actualización de existentes, abril 2022

Código	Municipio	Comunidad	Tipo de Fuente	Q extracción (m ³ /d)	Prof_m	NF_m	# Personas que abastece
NUEVOS PUNTOS							
CEA-01	Santa Ana	Cerrito de Ayastas	Pozo perforado	76.3139	132.2	104.21	325
LE-01	Santa Ana	Los Encinos	Pozo malacate	No hay dato	3.7	1.16	5
LE-02	Santa Ana	Los Encinos	Pozo malacate	No hay dato	10.4	9.3	5
LE-03	Santa Ana	Los Encinos	Pozo malacate	No hay dato	13.0	12.07	4
LE-05	Santa Ana	Los Encinos	Pozo malacate	No hay dato	8.8	3.5	8
LE-09	Santa Ana	Los Encinos	Pozo malacate	No hay dato	10.7	5.9	15
LE-10	Santa Ana	Los Encinos	Pozo malacate	No hay dato	9.0	7.9	15
LE-11	Santa Ana	Los Encinos	Pozo malacate	No hay dato	8.3	4.1	5
LE-12	Santa Ana	Los Encinos	Pozo malacate	No hay dato	8.3	5.9	6
LE-13	Santa Ana	Los Encinos	Pozo malacate	No hay dato	5.5	3.6	520
LE-14	Santa Ana	Los Encinos	Pozo malacate	No hay dato	5.1	2.3	
LE-15	Santa Ana	Los Encinos	Pozo malacate	No hay dato	4.8	2.6	
LE-16	Santa Ana	Los Encinos	Pozo malacate	No hay dato	8.5	3.8	
SITIOS ACTUALIZADOS INFORMACIÓN BASE							

LB-01	Santa Ana	La Bodega	Pozo perforado	136.512	121.9	76.2	1440
LE-04	Santa Ana	Los Encinos	Pozo malacate	No hay dato	5.6	5.1	5
LE-06	Santa Ana	Los Encinos	Pozo malacate	No hay dato	11.6	10.2	10
LE-07	Santa Ana	Los Encinos	Pozo malacate	No hay dato	7.9	7.6	6
LE-08	Santa Ana	Los Encinos	Pozo malacate	No hay dato	11.7	10.9	2
LP-01	Santa Ana	Los Patios	Pozo perforado	No hay dato	108	76.0	80
LQB-01	Santa Ana	Las Quebraditas	Pozo perforado	374.11	76.2	25	325
YPC-01	Santa Ana	Yastepec	Pozo perforado	28.081	154	89.96	150

Fuente: elaboración propia, a partir de datos de campo

A continuación, se muestra el comportamiento de las profundidades y niveles freáticos, como resultado de la actualización de los pozos inventariados (ver gráfico 4 y 5):

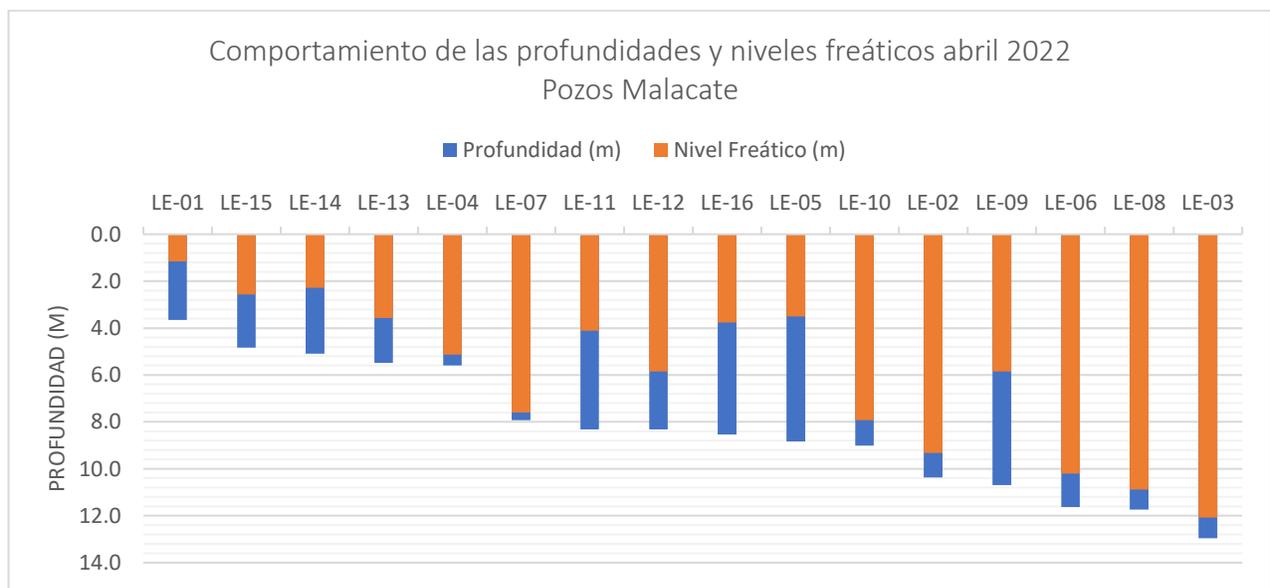


Gráfico 4 Inventario pozos malacate abril 2022

Fuente: elaboración propia, a partir de datos de campo

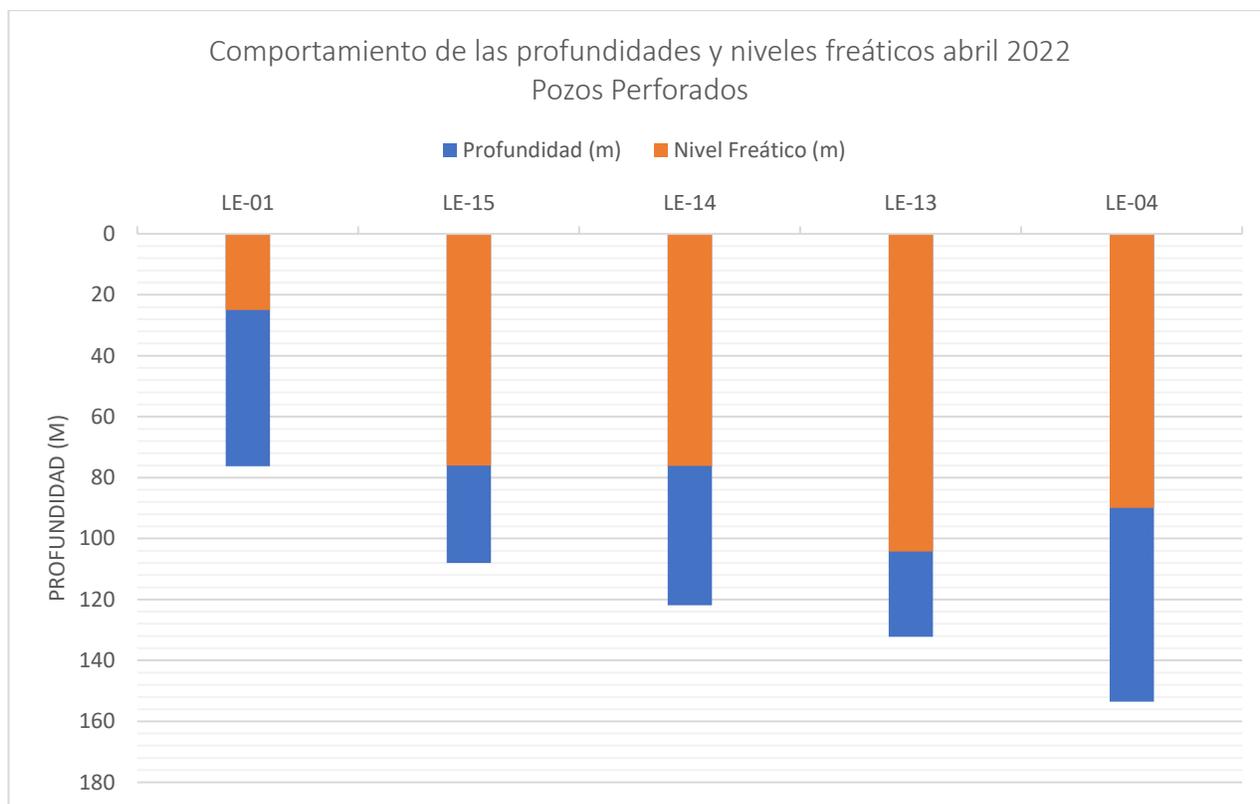
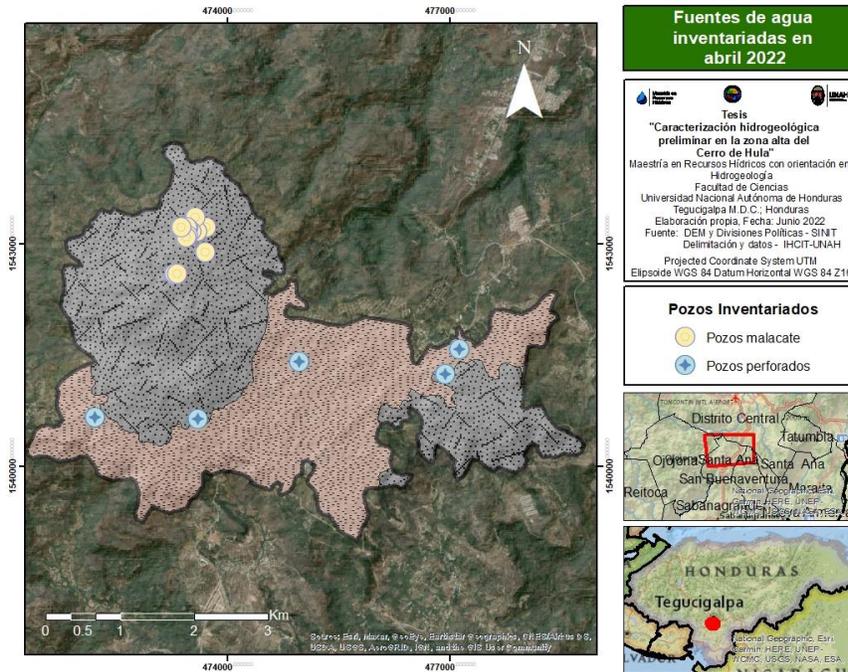


Gráfico 5 Inventario pozos perforados abril 2022
Fuente: elaboración propia, a partir de datos de campo

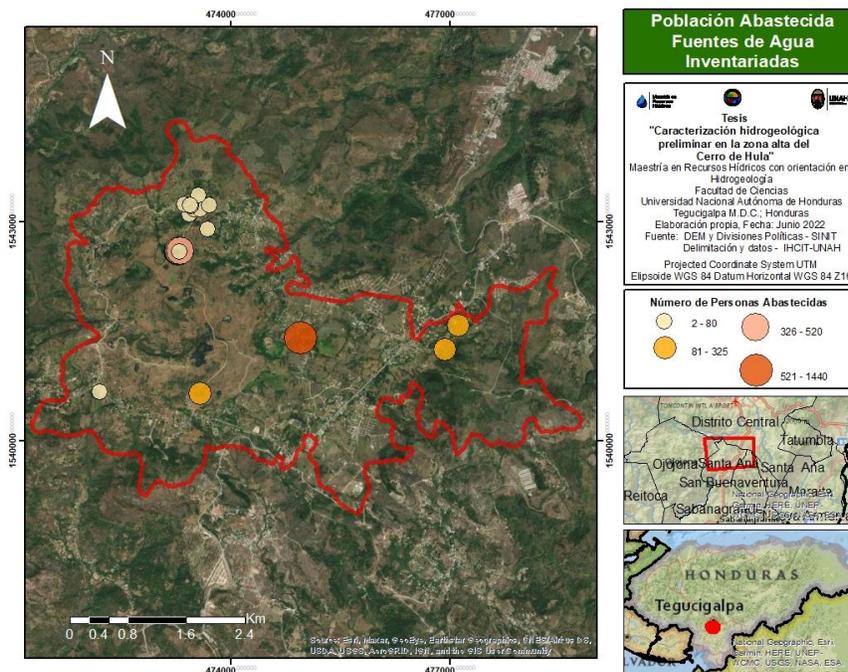
Es importante mencionar que, todos los pozos identificados son de explotación y tiene como principal uso el doméstico, es decir, lo utilizan en casa para los quehaceres de esta, además, de acuerdo con la información recolectada, los pozos perforados son pozos comunitarios que son administrados a través de juntas de agua de cada comunidad, a excepción del pozo de Yastepec que es manejado por los dueños del Centro turístico en donde está ubicado. Para el caso de los pozos malacate, todos son privados, es decir, que pertenecen a personas individuales dentro de las comunidades, que han construido estos para complementar el abastecimiento comunal.

En el mapa 11 se muestra la ubicación espacial de las fuentes de agua inventariadas nuevas y actualizadas como parte del primer objetivo de este estudio.



Mapa 11 Fuentes de agua inventariadas en abril 2022
Fuente: elaboración propia, a partir de datos de campo

Es significativo indicar que, la población que se abastece de estos pozos oscila alrededor de 2926 personas en total, lo que representa aproximadamente un 55% de la población proyectada al 2022 de la zona (ver mapa 12 y tabla 8).



Mapa 12 Población abastecida de las fuentes de agua inventariadas 2022
Fuente: elaboración propia, a partir de datos de campo

7.2 Construcción de las curvas isofreáticas a partir de los datos de niveles freáticos del inventario de fuentes de agua de la zona realizado en abril 2022

Al realizar el análisis de los pozos de agua subterráneas, se construyeron las curvas isofreáticas, las cuales oscilan entre la 5 m ubicada en la parte más alta del Cerro de Hula en la zona oeste del área en estudio, y la curva más baja se presenta en 100 m ubicada en la parte más baja en el pozo profundo perteneciente a la comunidad de Cerrito de Ayasta, lado Este del área de estudio.

Es relevante indicar que, para la construcción de las curvas isofreáticas, se realizaron una pequeña revisión exploratoria de los datos con la idea de que estos al ser interpolados con el método kriging presentaran errores de interpolación aceptables para validar ese modelo objetivo, a lo cual se obtuvieron valores de error cuadrático medio estandarizado aproximadamente de 1%, el cual representa un valor aceptable en términos de calidad de los datos, lo que dio paso a la realización de la interpolación geoestadística (ver ilustración 14)

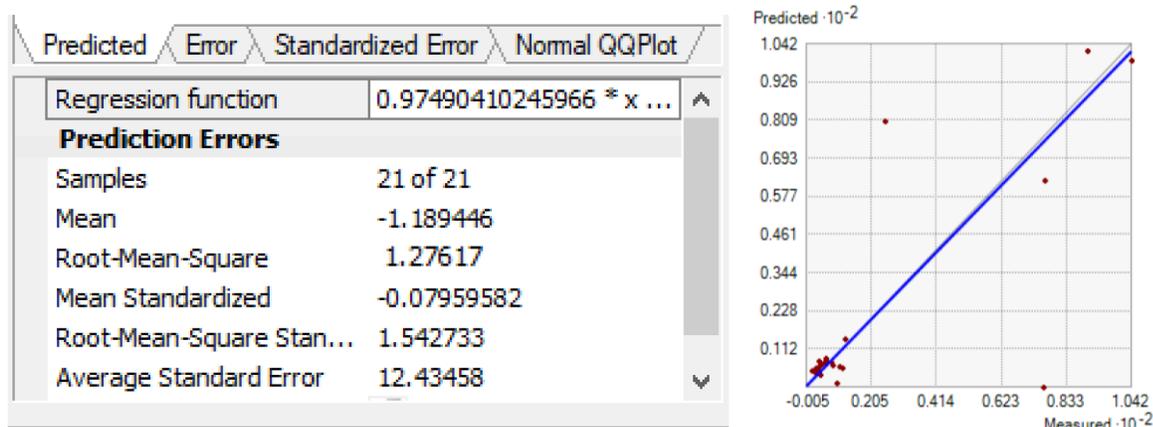
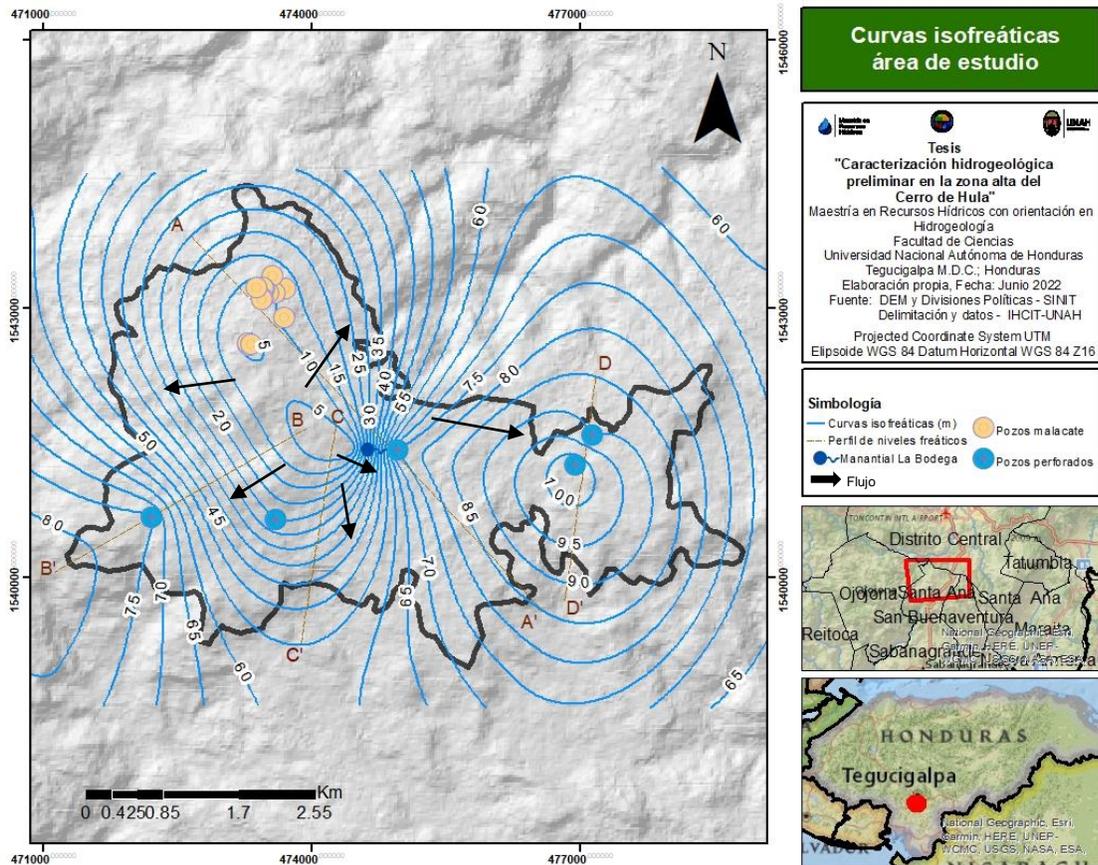


Ilustración 14 Predicción de errores de calidad datos niveles freáticos

Fuente: Tomado del análisis estadístico en ArcGis

Al construir las curvas isofreáticas utilizando en conjunto los niveles freáticos de los pozos malacate y pozos perforados, ya que todos se encuentran en el mismo estrato de basalto fracturado, y los niveles encontrados muestran un comportamiento de bajo nivel freático en pozos malacates en la parte más alta del Cerro de Hula y los pozos perforados con niveles de agua profundos están en la parte más baja, observándose que el potencial flujo tiene un comportamiento radial, desde lo más alto hacia las partes más bajas, siendo este flujo de los más comunes para diferenciar si hay zonas de convergencia como zonas de descarga y divergencia con zonas de recarga (Auge, 2016), y que según el mapa desde la parte alta hasta la parte central del área en estudio el comportamiento es divergente, lo que potencialmente muestra zona de recarga y desde la curva 10 m hasta la 75 m (zona Este del área de estudio) se muestra una convergencia lo que representaría zona de descarga (ver mapa 13).



Mapa 13 Curvas isofreáticas zonas de estudio

Fuente: elaboración propia, a partir de datos de campo

Además, para comprender de mejor manera ese flujo radial identificado en los resultados de las curvas desde los niveles freáticos de los pozos malacate con nivel somero que están en la parte más alta en términos topográficos, hasta llegar a los pozos perforados con nivel profundo ubicados en la parte baja, la extracción de agua se hace desde un mismo estrato geológico (basalto), y, que por la topografía la interpolación es válida para pozos malacate junto con los pozos perforados, y como evidencia, se muestran los perfiles de niveles freáticos A-A', B-B', C-C' y D-D' (ver anexo 12.5 para mejor detalle de ubicación de los perfiles).

En el perfil de nivel freático A-A' cuyo sentido va de NW a SE, se puede observar que corta un pozo malacate de la comunidad Los Encinos, ubicado en la parte alta del Cerro de Hula, y un pozo perforado perteneciente a la comunidad de La Bodega, ambos fueron utilizados para la construcción del modelo freático, y este perfil se muestra que, la caída del agua con pendiente baja de aproximadamente 7%, que desde la parte más alta en donde se ubica el pozo malacate de poca profundidad y nivel de agua somero, hasta el pozo perforado profundo, con un nivel de agua profundo (ver ilustración 15).

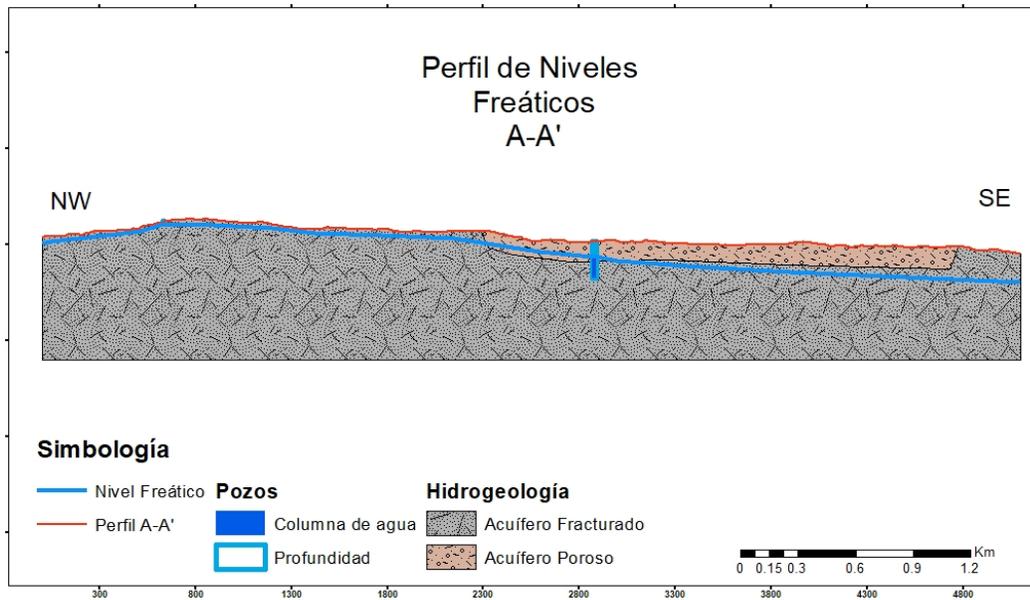


Ilustración 15 Perfil de niveles freáticos A-A'

Fuente: elaboración propia a partir de los datos de campo

Para el caso del perfil B-B', va en orientación NE-SW y comienza en la parte más alta en el nivel de agua de 5m y atraviesa el pozo perforado de la comunidad de Los Patios que está en un nivel de 75 m, siendo el más bajo de 70 m, en donde se observa un descenso del agua acorde a la topografía del lugar, desde la parte más alta hasta la parte más baja. Igual comportamiento se refleja en el perfil C-C', excepto que no se tiene un pozo en este corte (ver ilustraciones 16 y 17).

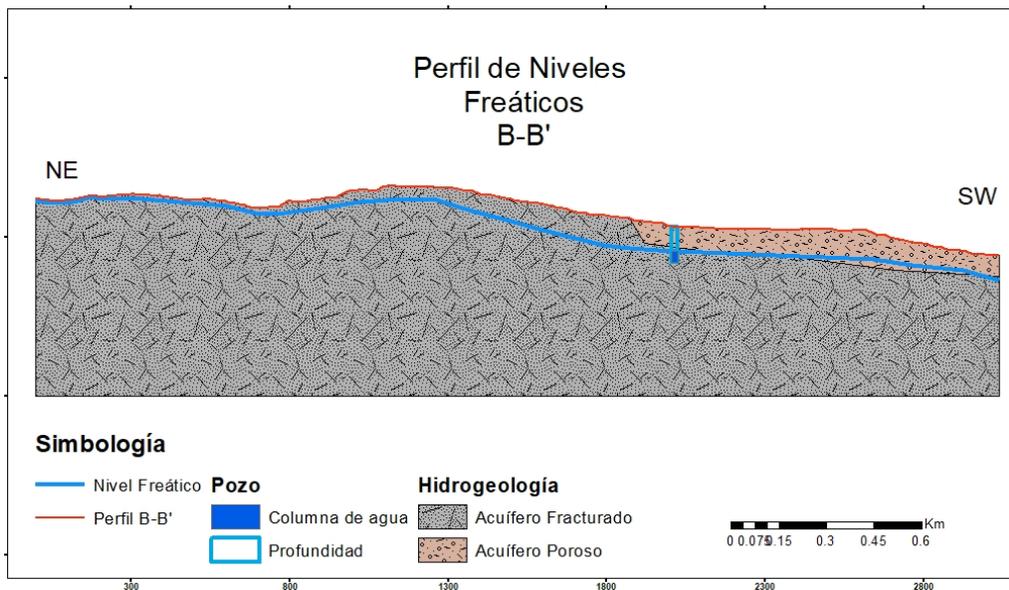


Ilustración 16 Perfil de niveles freáticos B-B'

Fuente: elaboración propia a partir de los datos de campo

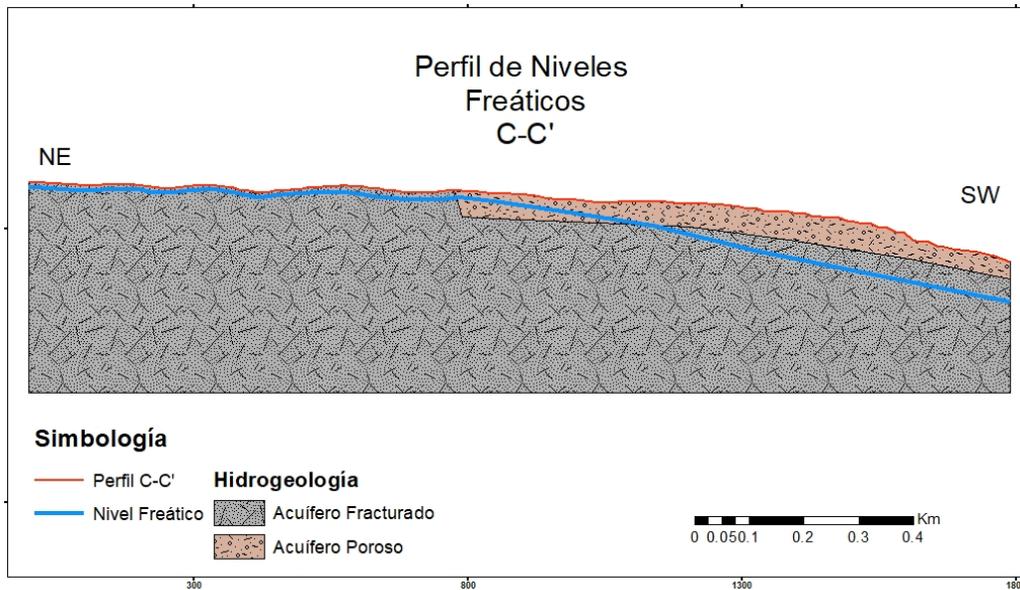


Ilustración 17 Perfil de niveles freáticos C-C'

Fuente: elaboración propia a partir de los datos de campo

El caso del perfil D-D' con orientación NE-SW, no difiere de la conducta del nivel freático de los perfiles anteriores, pero se logra observar con mejor precisión que el flujo tiene comportamiento desde la parte más alta hasta las partes más bajas, acorde con la topografía de domo, y que además refleja un flujo radial (ver ilustración 18).

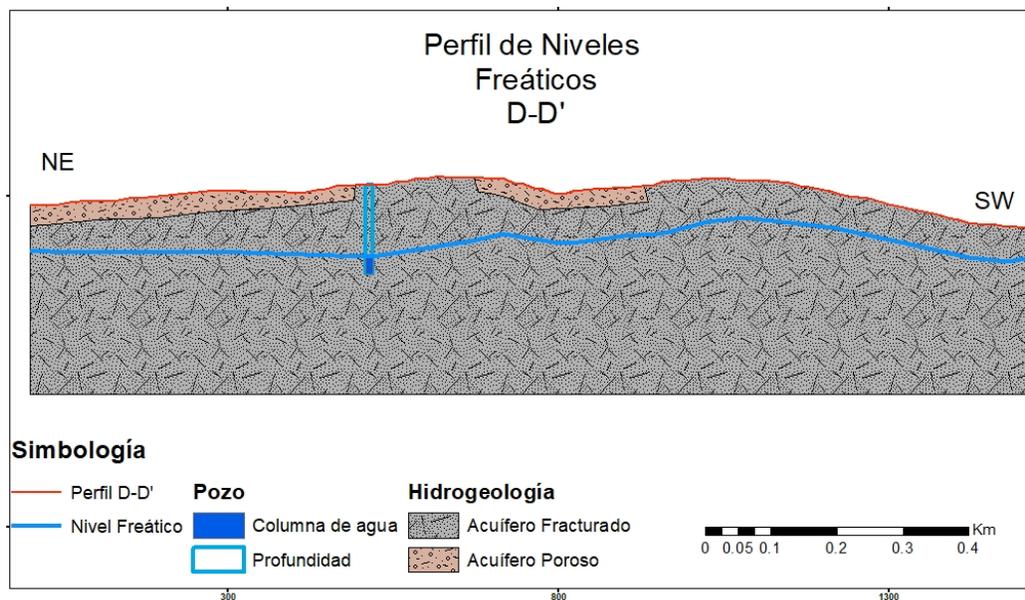
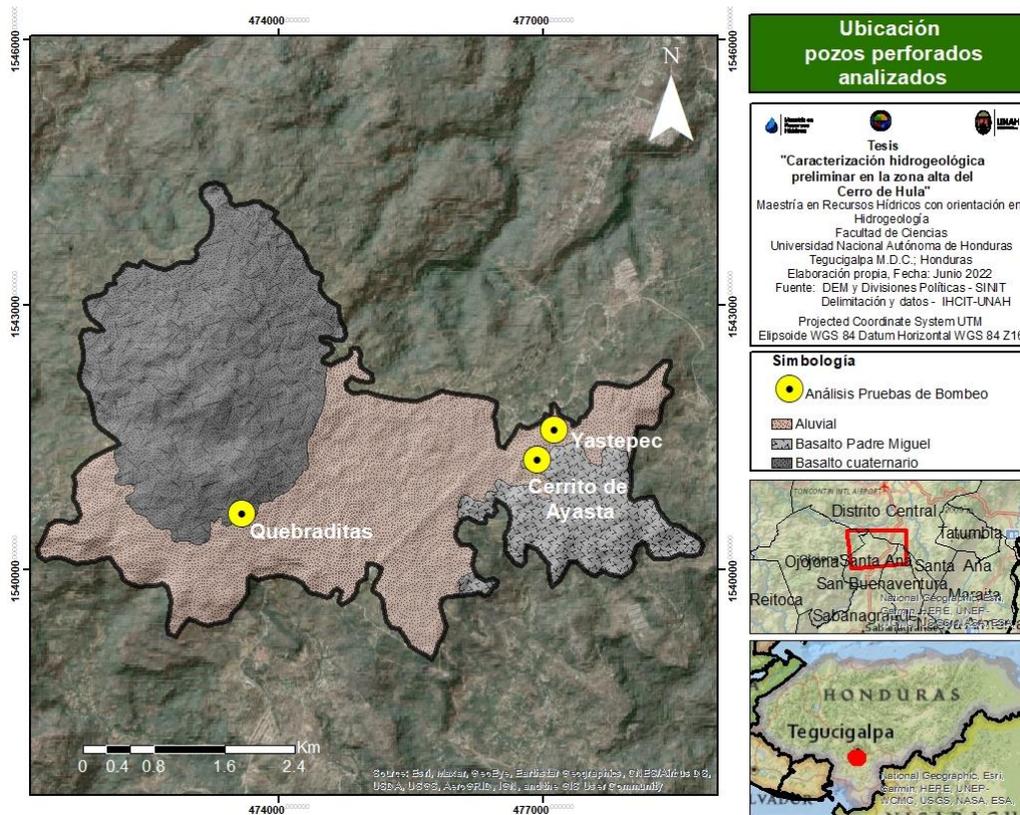


Ilustración 18 Perfil de niveles freáticos D-D'

Fuente: elaboración propia a partir de los datos de campo

7.3 Estimación preliminar de los parámetros hidráulicos del área en estudio, mediante el análisis de pruebas de bombeo

El análisis de las pruebas de bombeo se ha basado en el Manual on pumping test analysis in fractured rock aquifers (Van Bosch, 2000) (Tonder, y otros, 2002), quien determina un paso a paso de cómo se analizan pruebas de bombeo en medios fracturados, este análisis preliminarmente se estableció realizarlo en 4 de los 5 pozos profundos, sin embargo, debido a las limitaciones del tiempo mínimo de duración de la prueba de bombeo (8 horas) establecido en el Manual, solo se consideraron 3 pozos profundos, los cuales son **Cerrito de Ayasta, Quebraditas y Yastepec** (ver mapa 14).



Mapa 14 Ubicación pozos perforados en análisis de pruebas de bombeo

Fuente: elaboración propia, a partir de datos de campo

A. Identificación régimen de flujo

Al observar los gráficos del 6 al 11 que corresponden a el comportamiento del abatimiento y derivadas versus el tiempo en escalas log-log y semilog-log de los datos observados en los pozos bombeados, con la ilustración 10 *Comportamiento hidráulico del modelo de fractura*, la cual muestra el comportamiento de los regímenes de flujo en medios fracturados, se observa:

Para el caso del pozo de **Cerrito de Ayasta**, inicialmente tiene un comportamiento de influencia de almacenamiento y piel del pozo, lo cual puede simbolizar que se está bombeando inicialmente el agua que está en el pozo y por ende la fractura del medio; luego cae a un flujo radial, representando una estabilización

entre la fractura y la matriz (característica del medio fracturado), el agua viene de todos sentidos en el pozo, en este caso las propiedades hidráulicas no cambian (medio homogéneo); después el flujo parece ser de pendiente superior a unitaria, el cual es peculiar de flujo de un sistema cerrado delimitado por una barrera impermeable; y al final aparentemente es una pendiente superior unitaria pero negativa, lo que indica que existe un acuífero con alto potencial de producción, es decir, de alta transmisividad, a cierta distancia de donde se está desarrollando la prueba (Enachescu, Dmour, & Acs, 2016).

En el pozo de la comunidad de **Quebraditas**, aparentemente el efecto de almacenamiento y piel es tardío; posterior a este tramo de almacenamiento, se muestra un comportamiento de pendiente aparentemente superior unitaria positiva; seguido de un comportamiento semejante al radial; y termina con trecho de pendiente unitaria positiva, el cual es peculiar de flujo de un sistema cerrado delimitado por una barrera impermeable.

Y según el comportamiento en el pozo de la comunidad de **Yastepec**, es muy similar al de Quebraditas, almacenamiento y piel tardío; seguido de una pendiente superior a la unitaria positiva distintivo de flujo de un sistema cerrado delimitado por una barrera impermeable; luego un flujo radial; con la diferencia que cierra primero con una caída negativa de pendiente superior unitaria, indicando un potencial acuífero con alto potencial de producción; y culminando con otra pendiente superior a la unitaria negativa.

B. Identificación modelo de análisis

El análisis de la tendencia del comportamiento del gráfico de la derivada de los datos de los **pozos en estudio Cerrito de Ayasta, Quebraditas y Yastepec**, los cuales se encuentra en un medio fracturado, cuyos espesores oscila entre los 100- 120 m (Ruiz, 2015), y de acuerdo con el conjunto de gráficos de diagnóstico típicos hidrogeológicos, muestra que el modelo que se ajusta mejor a los datos es el de **dobles porosidad**, este modelo establece porosidad primaria y secundaria, para la fractura y en conjunto de matriz fracturas respectivamente (Gamal Rezk, 2016). (ver gráficos del 6 al 11 con las ilustraciones 19 y 20)

LOG

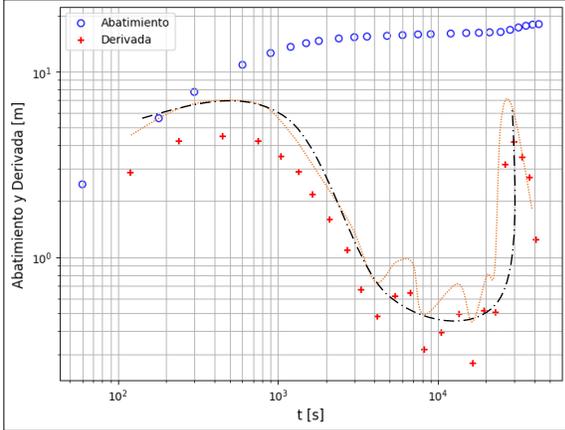


Gráfico 6 Log-Log datos prueba bombeo pozo Cerrito de Ayasta

Fuente: elaboración propia en Google colab, a partir de datos de campo

SEMILOG

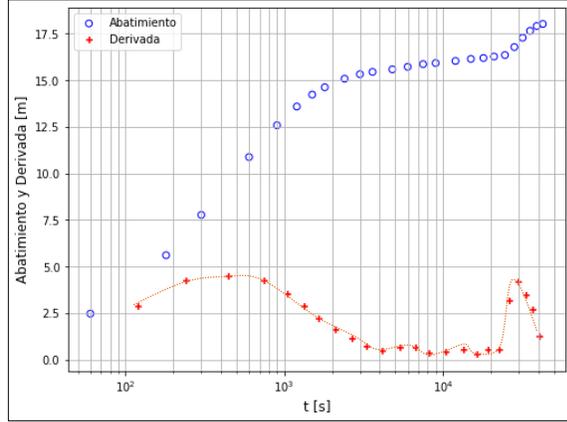


Gráfico 7 semi-Log datos prueba bombeo pozo Cerrito de Ayasta

Fuente: elaboración propia en Google colab, a partir de datos de campo

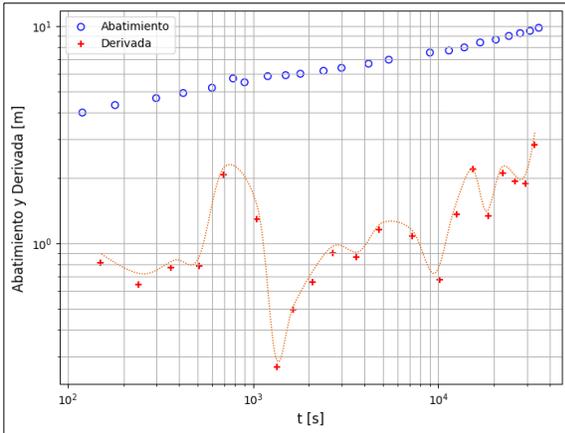


Gráfico 8 Log-Log datos prueba bombeo pozo Quebraditas

Fuente: elaboración propia en Google colab, a partir de datos de campo

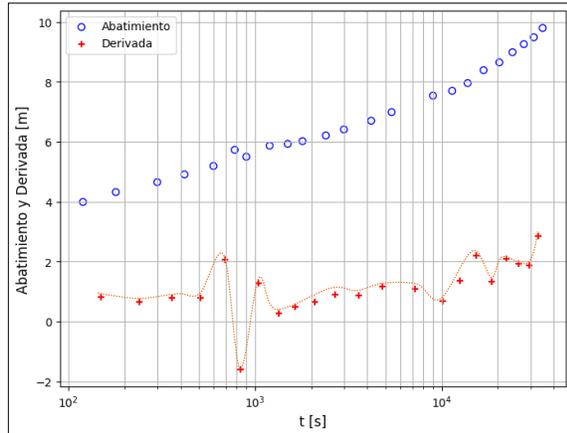


Gráfico 9 Semi-Log datos prueba bombeo pozo Quebraditas

Fuente: elaboración propia en Google colab, a partir de datos de campo

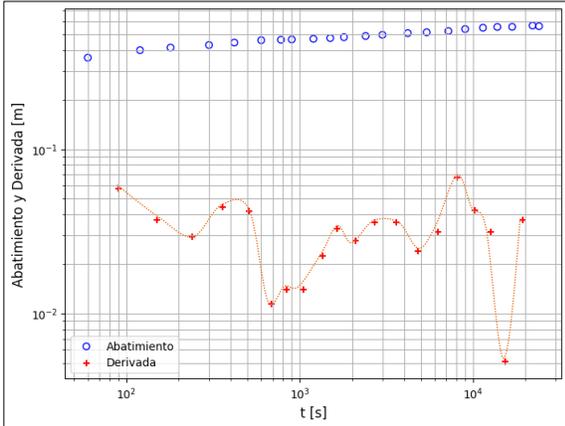


Gráfico 10 Log-Log datos prueba bombeo pozo Yastepec

Fuente: elaboración propia en Google colab, a partir de datos de campo

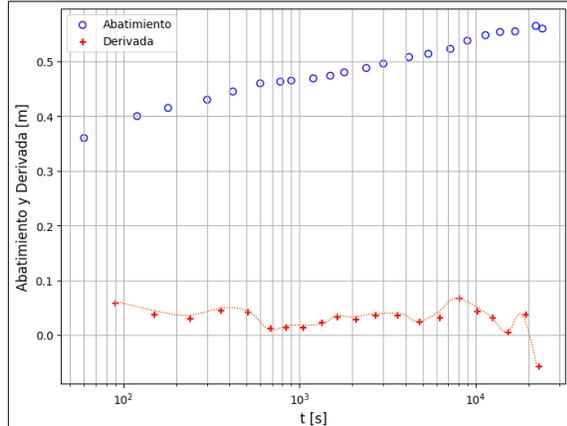


Gráfico 11 Semi-Log datos prueba bombeo pozo Yastepec

Fuente: elaboración propia en Google colab, a partir de datos de campo

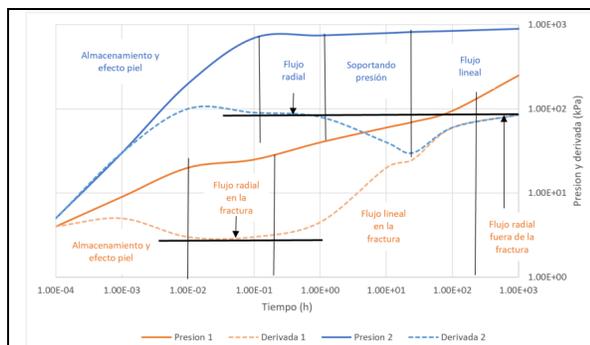


Ilustración 19 Comportamiento hidráulico del modelo de flujo de fractura

Fuente: Elaboración propia con datos tomados de (Enachescu, Dmour, & Acs, 2016)

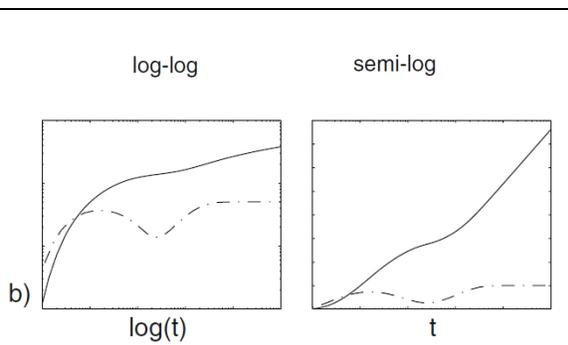


Ilustración 20 Curvas tipo análisis hidrogeológico de las derivadas double porosity

Fuente: tomado de (Renard, Glenz, & Mejias, 2009)

C. Estimación de parámetros hidráulicos

La estimación se realizó usando software AquiferTest y FC_Example (propuesto por el Manual on pumping test analysis in fracturedrock aquifers de Tonder, y otros, 2002). A continuación, se muestran los datos de entrada (ver tabla 9):

Tabla 9 Datos entrada cálculo transmisividad

Parámetro	Pozo Cerrito de Ayasta	Pozo Quebraditas	Pozo Yastepec
Tipo de medio	Basalto fracturado	Basalto fracturado	Basalto fracturado
Profundidad del pozo (m)	120	76.22	153.25
Nivel Freático (m)	92.01	25.07	89.96
Espesor estimado del acuífero b (m)	27.99	51.15	63.39
Caudal de extracción Q (m ³ /d)	76.314	374.11	28.080
Duración de la prueba de bombeo (h)	11.8	9.8	9.7
Descenso al final de la prueba "s" (m)	18.03	9.8	12.53

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo

Después de realizar el análisis del método doble porosidad y fórmula aproximada de Logan (1964) en los programas AquiferTest y FC_Example respectivamente, se obtuvieron los siguientes resultados (ver tabla 10):

Tabla 10 Estimación de parámetros hidráulicos

Pozo	Análisis	Transmisividad (m ² /d)	Permeabilidad (m/d) K=T/b	Coefficiente de almacenamiento (adim)
Cerrito de Ayasta	AquiferTest (ver resultados en anexo 12.5)	1.38	0.05	0.99
	FC_Example (ver resultados en anexo 12.6)	5.16	0.184	ND ²
Quebraditas	AquiferTest (ver resultados en anexo 12.5)	0.000262/ 2.62x10 ⁻⁴	0.00000513/ 5.13x10 ⁻⁶	4.51x10 ⁻¹

² ND: no hay dato

	FC_Example (ver resultados en anexo 12.6)	46.6	0.91	ND
Yastepec	AquiferTest (ver resultados en anexo 12.5)	0.000148/ 1.48x10 ⁻⁴	0.00000233/ 2.33x10 ⁻⁶	3.60x10 ⁻⁴
	FC_Example (ver resultados en anexo 12.6)	2.7	0.043	ND
Valores Teóricos Tomado de (Sanchez, 2022)	Basalto inalterado, sin fracturar	ND	10 ⁻⁶ a 10 ⁻³ (Smith & Wheatcraft, 1993) y (Sanders, 1998)	ND
	Basalto fracturado/ vesicular cuaternario	ND	10 a 1000 (Smith & Wheatcraft, 1993) 0.1 a 10 ⁶ (Sanders, 1998)	ND
	Basalto permeable	ND	0.03 a 2000 (Domenico & Schwartz, 1997) 0.02 a 1000 (Freeze & Cherry, 1979)	ND

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de campo y análisis

Como se observa en la tabla 10, los valores de transmisividad estimados difieren tanto los realizados en AquiferTest como en el FC_Example, teniendo mayor diferencia en el pozo de la comunidad de Quebraditas, seguido en la comunidad de Yastepec, y por último en Cerrito de Ayasta.

Si se analizan los valores teóricos de permeabilidad con los estimados con ambos métodos, muestran para el caso de Cerrito de Ayasta que se está en un potencial medio de basalto fracturado, para el caso de la comunidad de Quebraditas, aplicando doble porosidad en el AquiferTest exponen un basalto inalterado sin fracturar, y la aproximación de Logan (1964) con FC_Example un basalto fracturado para la comunidad de Quebraditas y un basalto permeable para Yastepec.

8. CAPITULO VII: DISCUSIÓN

Al realizar un análisis de los pozos identificados, se puede decir que, se tuvo información limitada debido a condiciones físicas que van acarreadas principalmente por la deficiente técnica de construcción de los pozos y el almacenamiento, como por ejemplo pozos perforados profundos tapados completamente con láminas de hierro que no permitió la medición de niveles, y los tanques de almacenamiento con poca capacidad como para extender las pruebas de bombeo que se realizó en 3 de los 5 pozos perforados profundos inventariados, sociales por el desconocimiento de la importancia de la gestión desde la construcción de los pozos hasta el aprovechamiento del agua en cada casa y comunidad visitada, y de económicas tanto de la comunidad por falta de fondos para cubrir gastos de uso, manejo y mantenimiento de los pozos, como de fondos disponibles para el desarrollo de este estudio. Por lo que, el alcance de los objetivos propuestos en este estudio que conllevan a la caracterización hidrogeológica preliminar de la zona estuvo limitada a la información disponible.

8.1 Actualización del inventario de fuentes de agua subterránea en la zona de estudio

Al analizar la actualización del inventario de fuentes, los resultados demuestran que desde el estudio del PFA 2014/2015 en la zona, la construcción de fuentes de agua en la zona aumento en más del 100% de los puntos existentes, ya que pasó de tener 8 fuentes a 21 fuentes de agua actualmente, lo cual ha alcanzado al año 2022 un abastecimiento a más de 2926 personas, y si se compara con el abastecimiento al año 2014/2015 que era de 2018 personas, ha aumentado en un 31% de abastecimiento de agua a la población.

Importante destacar que se logró identificar en la zona un manantial que pertenece a la comunidad de La Bodega, sin embargo, este no ha sido considerado para el análisis puesto que, solo se tuvo acceso a la ubicación espacial.

Además, se identificaron dentro de los nuevos puntos inventariados, más pozos malacate de niveles someros (poca profundidad), que pertenecen algunos a la junta de agua completa como lo son los pozos que abastecen a la comunidad de Los Encinos, y otros siempre en esta comunidad, pero fuentes por casa, siendo este un indicador de que cada familia en la zona tiene una mayor necesidad de agua, lo que los ha llevado a la construcción de pozos propios. Y el único pozo profundo identificado como nuevo, pertenece a la comunidad de Cerrito de Ayasta. Y según noticias del periódico El Heraldó (2021), ambas comunidades están ubicadas en zonas de expansión de nuevas viviendas, y que ya para el caso de años futuros se podrían perforar más pozos para esas nuevas urbanizaciones.

8.2 Construcción de las curvas isofreáticas a partir de los datos de niveles freáticos del inventario de fuentes de agua de la zona realizado en abril 2022

En cuanto a las curvas isofreáticas, este análisis presenta un comportamiento preliminar del flujo subterráneo (Barrera-de-Calderón, Garfias, Martel, & Salas-García, 2021) de tipo radial en la zona, el cual está dominado por su topografía, ya que se muestra una estructura geológica tipo domo de basalto en la parte más alta del Cerro de Hula (Ruffo, Albouy, Giorgi, & Bastianelli, 2019), y que con el correr del tiempo se ha venido erosionando hasta tener en la parte más baja del cerro un medio más poroso de poca profundidad.

El comportamiento del flujo radial de las curvas isofreáticas, (Barrera de Calderón, Garfias, Martel, & Salas Garcia, 2020) (Gastmans, Veroslavsky, Kiang Chang, Caetano-Chang, & Nogueira Pressinotti, 2012), tiene en la parte central una convergencia (curvas juntas) desde la curva 10 m de profundidad del nivel freático hasta la curva de 85 m (zona este), lo cual representa potencialmente un comportamiento de descarga inmediata de agua subterránea (Auge, 2016) y que según el mapa 13 coincide con la ubicación del manantial de la comunidad de La Bodega, mientras que en la parte más alta (zona este, curva 5 m), y en la parte más baja (zona oeste, curva 100 m), expone un comportamiento de recarga de agua.

Los comportamientos de las curvas isofreáticas, son una herramienta de gestión de los recursos hídricos, pues muestran un preliminar del movimiento del agua subterránea en la zona de estudio, lo que marca una línea base para las futuras iniciativas entorno al estudio de las aguas subterráneas del país.

8.3 Estimación preliminar de los parámetros hidráulicos del área en estudio, mediante el análisis de pruebas de bombeo

Al referirse a el análisis de las pruebas de bombeo para la estimación de los parámetros hidráulicos, es importante mencionar que se pueden estimar a partir de datos limitados, pero reconocer que se puede exponer a errores grandes, y ante esta condición se pueden aplicar escasos métodos de aproximación como lo es el de Logan (1964) y que está enmarcado en el programa FC_Example propuesto en el Manual on pumping test analysis in fractured rock aquifers, cuyo método es simple pero importante en ausencia de datos adecuados, y registrando que los valores estimados resultantes de transmisividad son aceptables solo como primeras aproximaciones.

Así que, al comparar los resultados del método Logan (1964), con los valores teóricos, se refleja que el medio geológico para el estudio es de basaltos como se asume desde el inicio del estudio, pues los valores encontrados para la transmisividad y permeabilidad, siendo este último parámetro el comparable con los datos teóricos, oscila entre 0.043 m/d en el pozo de Yastepec, 0.184 m/d en Cerrito de Ayasta, hasta 0.91

m/d en el pozo de Quebraditas, valores enmarcados en este tipo de roca, como un basalto permeable. Y los valores de transmisividad como resultado de este método de análisis son de 5.16 m²/d para Cerrito de Ayasta, 2.7 m²/d para Yastepec y 46.6 m²/d para Las Quebraditas, y al analizar estos datos, se observa que la diferencia de estos valores se debe a que el pozo de Las Quebraditas está ubicado en el medio de basalto fracturado del cuaternario y que además coincide con la existencia de una fractura observada en la zona (ver mapas 8 y 14).

Para el caso del método de doble porosidad aplicado en el software AquiferTest, este es un método aplicable y confiable para el análisis de pruebas de bombeos de pozos en medios fracturados, sin embargo, este método tiene una serie de suposiciones y consideraciones en cuanto a disponibilidad de información, como para poder de manera más precisa identificar hasta el grado de fracturamiento en medios de este tipo, sin embargo, la información disponible en este estudio ha sido limitada, por lo tanto, los parámetros hidráulicos estimados por este método son aceptables solamente como datos preliminares.

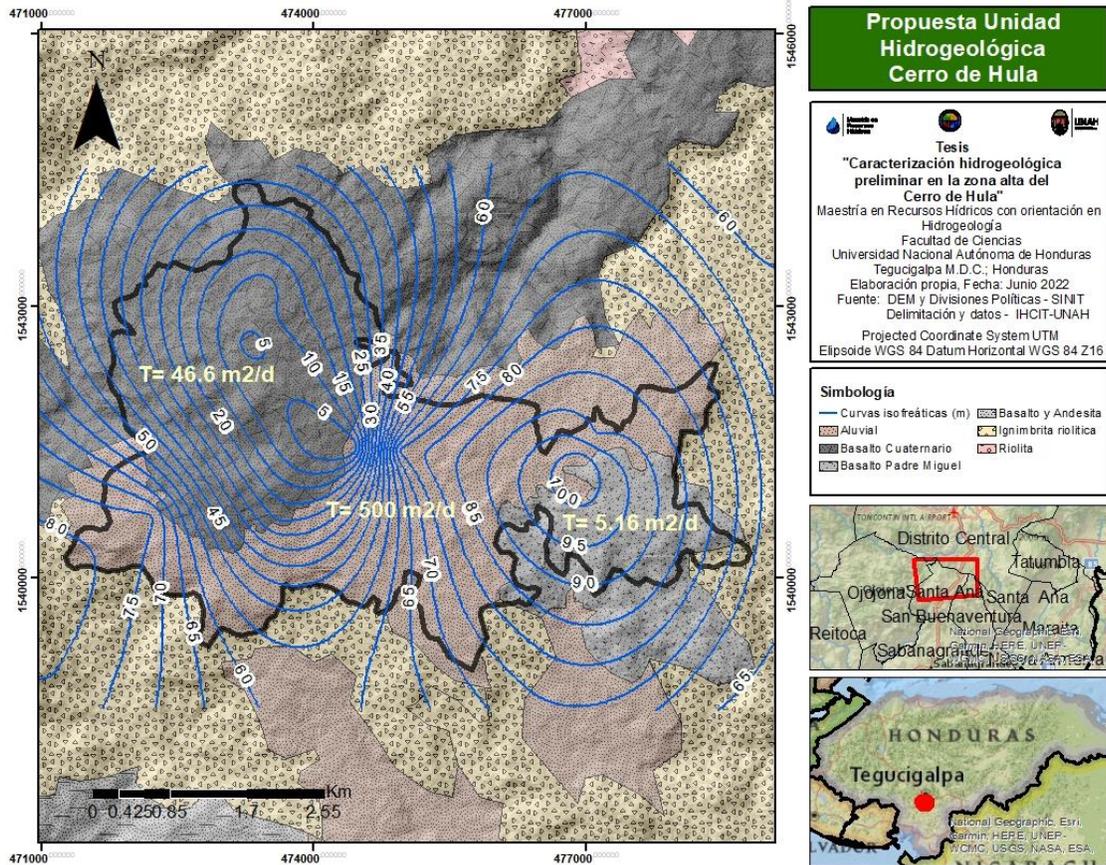
Partiendo de lo anterior, los resultados del método de doble porosidad reflejan valores de permeabilidad entre 2.33x10⁻⁶ m/d en el pozo de Yastepec, 5.13x10⁻⁶ m/d en Quebraditas y 0.05 m/d en el pozo de Cerrito de Ayasta, los cuales, al ser comparados con valores teóricos, muestran que en efecto es un basalto, pero inalterado sin fracturar, a excepción del pozo de Cerrito de Ayasta que se considera un basalto permeable.

8.4 Propuesta de unidad hidrogeológica Cerro de Hula

Ante lo anterior, para la construcción de la propuesta de la unidad hidrogeológica del Cerro de Hula, se consideran los resultados del análisis de aproximación de la ecuación de Logan (1964), primero porque es un método propuesto por el manual de análisis de pruebas de bombeo en medios fracturados como punto de partida, el cual fue base para este estudio, y segundo, si bien el análisis con el método de doble porosidad es más aceptable pues en condiciones ideales es un método confiable y aplicado a medios fracturados, el requerimiento en cuanto a información disponible es mayor, por ejemplo, se debe ingresar datos de pozos de observación, de efecto de piel y almacenamiento, etc., que no se tuvieron por las limitaciones expresadas en la sección 2.3 Límites de la Investigación y en la sección de la metodología 6.2 Diseño de la investigación, lo que pudo representar resultados con mayor sesgo que el de aproximación de Logan (1964).

En tal sentido, la propuesta de unidad hidrogeológica ha considerado valores de transmisividad para los medios fracturados del cuaternario y terciario de 46.6 m²/d y 5.16 m²/d respectivamente, lo que representa un mayor fracturamiento del basalto cuaternario, y para el caso del medio poroso contenido por material aluvial contenido de grava, arena gruesa a fina y arcillas, he propuesto un valor teórico de permeabilidad establecido por (Fetter, 2001) de 25m/d, considerando que el espesor máximo de este estrato según (Ruiz,

2015) es de 20m, teniendo entonces un valor teórico de transmisividad para este medio poroso de aproximadamente 500 m²/d (ver mapa 15).



Mapa 15 Propuesta Unidad Hidrogeológica Cerro de Hula

Fuente: elaboración propia, a partir de datos de campo

Por todo lo mencionado, la información recopilada y generada en este estudio, se plantea puede ser utilizada solamente a manera de punto de partida, como datos preliminares hacia la caracterización hidrogeológica en la zona alta del Cerro de Hula, ubicado en el municipio de Santa Ana, Francisco Morazán, para el manejo sostenible de las aguas subterráneas, es decir, es una investigación base de futuras investigaciones con más recursos disponibles, que permitan tomar información de campo más detallada y concreta, y así se pueda construir modelos hidrogeológicos conceptuales y numéricos con mayor precisión.

9. CONCLUSIONES

- Dentro del área de estudio, se lograron inventariar 21 fuentes de agua subterráneas, de las cuales se actualizó información de 8 que fueron identificadas en el estudio del IHCIT (2014), y las 13 fuentes restantes son pozos considerados como inventario nuevo de la investigación, y del total, 5 son del tipo pozos profundos y 16 pozos someros, cuyas profundidades oscilan entre los 70 m a 153 m y 4.8 m a 15 m respectivamente.
- El análisis de las curvas isofreáticas muestran un comportamiento preliminar de flujo radial, característico según la topografía del lugar, y en cuanto a este comportamiento en la zona central entre las curvas 10 m a la 85 m, es un tipo radial divergente, lo cual refleja una zona potencial de descarga, ahora en la parte superior, zona más alta ubicada al este del área de estudio por la curva 5m y en la parte más baja (zona oeste, curva 100 m), expone un comportamiento convergente, lo cual representa un potencial zona de recarga de agua.
- Para la estimación de los parámetros hidráulicos del estudio, se utilizaron dos métodos, uno es de aproximación y el otro es de determinación, siendo el primero el de Logan (1964), cuyos resultados de transmisividad oscilan entre 2.7 m²/d en el pozo de Yastepec, 5.16 m²/d en Cerrito de Ayasta, hasta 46.6 m²/d en el pozo de Quebraditas, valores que al ser comparados con valores teóricos muestran presencia de un basalto permeable, y el segundo método doble porosidad para la estimación de parámetros hidráulicos, muestra valores de transmisividad que rondan entre 1.48x10⁻⁴ m²/d en el pozo de Yastepec, 2.62x10⁻⁴ m²/d en Quebraditas y 1.38 m²/d en el pozo de Cerrito de Ayasta, los cuales, al ser comparados con valores teóricos, muestran que en efecto es un basalto, pero inalterado sin fracturar, a excepción del pozo de Cerrito de Ayasta que se considera un basalto permeable.
- Este estudio es solo el inicio de la caracterización hidrogeológica de la zona, para posteriormente poder construir modelos conceptuales y numéricos, cuyos elementos tratan de describir las aguas subterráneas, entendiendo que un modelo de flujo de agua subterránea se convierte en una herramienta fundamental para ayudar a comprender cómo funciona el sistema y de qué volúmenes de los componentes del balance de masas se dispone para una correcta gestión del recurso hídrico subterráneo.

10. RECOMENDACIONES

- Es trascendental la gestión de fondos para futuras iniciativas de investigación en la zona, pues es una zona de gran importancia para la capital de Honduras, estas iniciativas deben ir encaminadas a mejorar las condiciones de la construcción de los pozos que permitan el monitoreo de estos, crear condiciones que permitan extender los tiempos de las pruebas de bombeo, a realizar exploraciones con métodos geofísicos para caracterizar de una mejor manera las fracturas dentro del estrato de basalto, y hasta de ser posible construir pozos de observación, los cuales son clave para la estimación del coeficiente de almacenamiento en medios fracturados.
- Es necesario el fortalecimiento de las capacidades locales en términos de gobernanza del recurso hídrico en la zona, y que las autoridades como ente de toma de decisiones para la gestión de fondos y, por tanto, en la gestión integrada de los recursos hídricos subterráneos en la zona.
- Se requiere para poder crear en un futuro modelos hidrogeológicos conceptuales y numéricos más precisos, el monitoreo de los niveles de los pozos en la zona, idealmente en pozos de observación y de explotación con condiciones físicas requeridas para este propósito.
- Lo que se refiere a esta investigación, se recomienda el uso de los datos de parámetros hidráulicos estimados solamente como valores preliminares para futuras investigaciones de una caracterización hidrogeológica más precisa.
- Es requerido crear mecanismos de protección de las zonas potenciales de recarga identificadas, pues son estas zonas importantes para el manejo sostenible de las aguas subterráneas, esto ante el previsible aumento de la población en la zona.

11. BIBLIOGRAFÍA

- Agarwal, R. G., Al-Hussainy, R., & Ramey, H. (1970). An Investigation of Wellbore Storage and Skin Effect in Unsteady Liquid Flow: I. Analytical Treatment. *SPE Journal*, 10(3), 279-290. doi:10.2118/2466
- Alvarez, A. (2003). *Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil*. Secretaria de Comunicaciones y Transporte, Instituto Mexicano de Transporte, Sanfandila, Querétaro. Obtenido de <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt229.pdf>
- Alvarez, H., & Cruz, S. (2020). Análisis actual de la energía eólica en Honduras de 2011 hasta junio de 2018. *Revista de la Escuela de Física UNAH*, 117-129. doi:<https://doi.org/10.5377/ref.v8i2.10856>
- Anderson, M. (1985). *Geology of Lepaterique Quadrangle*. Instituto Cartografico Nacional, Tegucigalpa, Honduras.
- Arroyo Carrasco, A. (1996). *Bases Teóricas e Interpretación de Registros Geofísicos de Pozos* (Primera ed.). Distrito Federal, México: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Asamblea Nacional Constituyente de Honduras. (1982). *Constitución de la República de Honduras*. Tegucigalpa. Obtenido de <https://www.poderjudicial.gob.hn/CEDIJ/Leyes/Documents/Constituci%C3%B3n%20de%20la%20Rep%C3%ABlica%20de%20Honduras%20%28Actualizada%202014%29.pdf>
- Auge, M. (2016). *Hydrogeology of Plains*. Buenos Aires, Argentina: Springer. Obtenido de <https://www.bfa.fcny.unlp.edu.ar/id/42552>
- Babbie, E. (2010). *The Practice of Social Research* (12th ed.). Belmont, CA, London: Wadsworth.
- Barrera de Calderón, M. L., Garfias, J., Martel, R., & Salas Garcia, J. (2020). Influencia potencial de las fallas en el flujo de agua subterránea de un acuífero volcánico conformado por materiales porosos y fracturados. (T. y. agua, Ed.) *Repositorio Institucional Universidad Autónoma del Estado de México*. Obtenido de <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/106013>
- Barrera-de-Calderón, M., Garfias, J., Martel, R., & Salas-García, J. (2021). Controles geológicos en el flujo de agua subterránea y distribución de volúmenes de extracción asociados a una estructura volcánica compleja. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 73(1). doi:<https://doi.org/10.18268/BSGM2021v73n1a170820>

- Berre, I., Doster, F., & Keilegavlen, E. (2019). Flow in Fractured Porous Media: A Review of Conceptual Models and Discretization Approaches. *Transp Porous Med*, 215-236. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s11242-018-1171-6>
- Biryukov, D., & Kuchuk, F. J. (2012). Transient Pressure Behavior of Reservoirs with Discrete Conductive Faults and Fractures. *Transp Porous Med*, 95, 239–268. doi:<https://doi.org/10.1007/s11242-012-0041-x>
- Brassington, F. C., & Younger, P. L. (2010). A proposed framework for hydrogeological conceptual modelling. *Water and Environment Journal*, 24, 261-273. doi:[doi:10.1111/j.1747-6593.2009.00173.x](https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2009.00173.x)
- Castañeda Zavaleta, M. E. (2019). *Ejecución de Pruebas de Bombeo*. doi:[0.13140/RG.2.2.30613.3760](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30613.3760)
- Chaín Rojas, I. L. (2013). *Caracterización de las Urbanizaciones Cerradas como Fenómeno Residencial Emergente en la Ciudad de Distrito Central, Honduras*. Tesis Máster en Gestión Social Urbana, Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Facultad de Ciencias Sociales, Tegucigalpa.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá, Colombia.
- Congreso Nacional de Honduras. (1993). *Ley General Ambiente (Decreto 104-93)*. Secretaria de Recursos Naturales y Ambiente, Tegucigalpa. Obtenido de https://portalunico.iaip.gob.hn/portal/ver_documento.php?uid=NTk1NjM4OTM0NzYzNDg3MTI0NjE5ODcyMzQy
- Congreso Nacional de Honduras. (2003). *Ley de Ordenamiento Territorial (Decreto 180-2003)*. Tegucigalpa. Obtenido de <https://www.suelourbano.org/wp-content/uploads/2017/08/ley-ordenamiento-territorias.pdf>
- Congreso Nacional de Honduras. (2007). *Ley Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre (Decreto 156- 2007)*. Tegucigalpa. Obtenido de <https://fapvs.hn/wp-content/uploads/2018/08/Ley-Forestal-Areas-Protegidas-y-Vida-Silvestre-1.pdf>
- Congreso Nacional de Honduras. (14 de Diciembre de 2009). Ley General de Aguas. *Gaceta N° 32088*.
- Congreso Nacional de Honduras. (2009). *Ley General de Aguas (Decreto 181-2009)*. Tegucigalpa. Obtenido de https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cam_files/ley-general-de-aguas-2009.pdf
- Creswell, J. W., & Creswell, J. D. (2018). *Research Design: Qualitative, Quantitative and Mixed Methods Approaches* (5th ed.). SAGE Publications, Inc.

- Cruz, V. H., Galindo, K., Vásquez, C., & Edwar. (2020). *Plan de Desarrollo Municipal - Municipio de Santa Ana Francisco Morazán*. Municipalidad de Santa Ana, Unidad Técnica Municipal, Santa Ana, Francisco Morazán. Obtenido de <https://www.sgjd.gob.hn/biblioteca-virtual/docspdm/pdm-certificados/fco-morazan-pdm-certificados/1207-pdm-santa-ana-francisco-morazan/file>
- Custodio, E., & Llamas, M. (1983). *Hidrología Subterránea* (Segunda ed.). Barcelona, España.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (2001). *Hidrología subterránea, Tomo I*. Barcelona, España: Ediciones omega, S.A; Segunda Edición .
- DHI Group. (2022). *DHI*. Obtenido de MIKE: <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/feflow>
- Diaz, E., Duarte, O., & Ricciardi, C. (1998). *Tecnología de Tierras y Aguas I - Aguas Subterráneas*. Obtenido de <http://www.fca.uner.edu.ar/files/academica/deptos/catedras/riego/Archivos/Cap%2007%20-%20Aguas%20Subterranas.pdf>
- Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1997). *Physical and Chemical Hydrogeology* (Segunda ed.). Wiley.
- El-Heraldo. (2021). La zona sur de la capital se perfila como el nuevo polo de desarrollo. *El Heraldo*. Obtenido de <https://www.elheraldo.hn/tegucigalpa/zona-sur-tegucigalpa-desarrollo-honduras-LXEH1465097#image-1>
- Enachescu, C., Dmour, H., & Acs, V. (2016). Integrated well test interpretation of a naturally fractured carbonate reservoir - A case study. *Professional Journal*, 100-109. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/290391450_Integrated_well_test_interpretation_of_a_naturally_fractured_carbonate_reservoir_-_A_case_study
- Enemark, T., Peeters, L., Mallants, D., & Batelaan, O. (2018). Hydrogeological conceptual model building and testing: A review. *Journal of Hydrology*, 310-329. doi:10.1016
- ERSAPS. (2012). *Agua Potable y Saneamiento en Honduras. Indicadores*. Tegucigalpa. Obtenido de <https://centrohistoricoabierto.ecosistemaurbano.com/wp-content/uploads/2015/07/ERSAPS-Indicadores-2012.pdf>
- ESRI. (2022). *Environmental Systems Research Institute*. Obtenido de Esri-ArcGIS: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/about-arcgis/overview>
- FAO - Simmons, O. d. (1969). *Informe al gobierno de Honduras, Los Suelos de Honduras*. Roma: FAO, N AT 2630.

- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology* (4ta ed.). Prentice-Hall.
- Freeze, A. R., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall. Obtenido de <https://www.unigrac.org/sites/default/files/resources/files/Groundwater%20book%20-%20English.pdf>
- Gamal Rezk, M. (2016). Analysis of Pressure Transient Tests in Naturally Fractured Reservoirs. *Oil & Gas Research*, 2(3). doi:10.4172/2472-0518.1000121
- García Hidalgo, Y., Carlos, B. E., & Vargas Rodríguez, H. (2012). Caracterización hidroquímica de las aguas de riego de la cuenca del río Naranjo, municipio Majibacoa, provincia Las Tunas. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(3), 29-34. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542012000300005&lng=es&tlng=es
- García-Santos, S., Sánchez-Murillo, R., Peña-Paz, T., Chirinos-Escobar, M., Hernández-Ortiz, J., Mejía-Escobar, E., & Ortega, L. (2022). Water Stable Isotopes Reveal Groundwater Vulnerability to Land Use Fragmentation and Climate Variability in Central Honduras. *Science of The Total Environment*, 844. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156941>
- Gaspari, F. J., & Delgado, M. I. (2010). Caracterización morfométrica geoespacial. Estudio de caso: Arroyo Belisario, Argentina. *Tecnociencia Chichuahua*, 4(3). doi:<https://doi.org/10.54167/tch.v4i3.711>
- Gastmans, D., Veroslavsky, G., Kiang Chang, H., Caetano-Chang, M. R., & Nogueira Pressinotti, M. M. (2012). Modelo hidrogeológico conceptual del Sistema Acuífero Guaraní (SAG): una herramienta para la gestión. *Boletín Geológico y Minero*, 123(3), 249-265. Obtenido de https://www.igme.es/boletin/2012/123_3/8_ARTICULO%204.pdf
- Geólogos Asociados. (2022). *Geólogos Asociados S.A.* Obtenido de <https://www.geologos.com.ar/servicios/geologia/>
- Gleick, P. (2000). The Changing Water Paradigm: A Look at Twenty-First Century Water Resources Development. *Water International*, 25, 127-138. doi:<http://dx.doi.org/10.1080/02508060008686804>
- Global Water Partnership. (2012). *GWP*. Obtenido de https://www.gwp.org/es/GWP-Centroamerica/EN_ACCION/NOTICIAS/Reglamento-de-Aguas-Subterraneeas-en-Honduras/
- Global Water Partnership Centro América. (2017). *Situación de los Recursos Hídricos de Centroamérica: Hacia una gestión integrada*. Tegucigalpa: Global Water Partnership. Obtenido de

https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cam_files/situacion-de-los-recursos-hidricos_fin.pdf

Gómez Hernández, I. (2018). *Zonificación de Capas de Roca en Registros Geofísicos de Pozos*. Facultad de Ingeniería. Méxicio D. F.: Universidad Nacional Autónoma de México.

Gonzalez, D. A. (2010). *Cálculo de caudales de crecida, caso de estudio cuenca del río Cabra, Panamá*. Tesis maestría, Universidad de San Carlos Guatemala, Facultad de Ingeniería, Guatemala. Obtenido de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0400_MT.pdf

Guillén, R., & Tabora, F. (2015). *Situación de los Recursos Hídricos en Centroamérica*. Honduras : GWP Centroamérica.

GWP Centroamérica. (2017). *La Situación de los Recursos Hídricos en Centroamérica*. Tegucigalpa. Obtenido de https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cam_files/situacion-de-los-recursos-hidricos_fin.pdf

Hardoy, J. E., & Satterthwaite, D. E. (1987). *Las ciudades del Tercer Mundo y el medio ambiente de pobreza*. Obtenido de https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/50653/WHF_1987_8_n1_p87-96_spa.pdf

Harwood, R. (1991). *Geology of Ojojona Quadrangle*. Instituto Geográfico Nacional y Dirección General de Minas e Hidrocarburos, Tegucigalpa, Honduras.

Hughes, J., & Lettenmaier, D. (1981). Data Requirements for Kriging: Estimation and Network Design. *Water Resources Research*, 17(6), 1641-1650. doi: <https://doi.org/10.1029/WR017i006p01641>

ICF. (2018). *Geoportal del Sector Forestal de Honduras*. Obtenido de <http://www.geoportal.icf.gob.hn/geoportal/main>

ICF. (2019). *Instituto Nacional de Conservación Forestal*. Obtenido de Geoportal del Sector Forestal de Honduras: <https://geoportal.icf.gob.hn/geoportal/main>

IDEAM. (2015). *Principios Básicos para el Conocimiento y Monitoreo de las Aguas Subterráneas en Colombia - Contenidos del Taller de Formación*. Instituto de Hidrología, Meteorología y de Estudios Ambientales - IDEAM, Bogotá, Colombia. Obtenido de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023541/Principios.pdf>

- IGME. (1984). Capítulo 1 Introducción General. En *Pozos y Acuíferos - Técnicas de Evaluación mediante Ensayos de Bombeo*. Obtenido de <https://www.yumpu.com/es/document/read/14488064/pozos-y-acuiferos-instituto-geologico-y-minero-de-espana>
- IHCIT-UNAH. (2012). *Estudio Hidrogeoquímico de la parte alta de la cuenca del Río Choluteca*. Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Tegucigalpa.
- IHCIT-UNAH. (2014). *Evaluación de los Recursos Hídricos en su Régimen Natural*. Tegucigalpa.
- IHCIT-UNAH. (2016). *Índice de Vulnerabilidad al Cambio Climático en el sector hídrico a nivel comunitario*. Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Tegucigalpa.
- INE. (2013). *Instituto Nacional de Estadística Honduras*. Obtenido de INE: <http://181.115.7.199/binhnd/RpWebEngine.exe/Portal?BASE=MUNDEP08&lang=ESP>
- IPCC. (2018). *Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*.
- J. Tarbuck, E., & Lutgens, F. K. (2005). *Ciencias de la Tierra: Una Introducción a la Geología Física* (Octava ed.). Madrid: PEARSON PRENTICE HALL. Obtenido de <http://www.xeologosdelmundo.org/wp-content/uploads/2016/03/TARBUCK-y-LUTGENS-Ciencias-de-la-Tierra-8va-ed.-1.pdf>
- Kitanidis, P. K. (1997). *Introduction to Geostatistics: : Applications in Hydrogeology*. Stanford, California, EUA. Obtenido de https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=ZvoibTTS9QwC&oi=fnd&pg=PR19&dq=Introduction+to+Geostatistics+P.+K.+KITANIDIS&ots=q7BwBHFQqV&sig=9Fy-vSPhmDW_-OHUMROL40RMyNE#v=onepage&q=Introduction%20to%20Geostatistics%20P.%20K.%20KITANIDIS&f=false
- Konikow, L. (2002). Uso de Modelos Numéricos para Simular el Flujo y el Transporte Subterráneo. En IGME, *Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico*. Madrid, España. Obtenido de <http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/LIBRO%20ISOTOPOS/PDF%20Isotopos-VI/Seccion%20VI-4.pdf>
- Kruseman, G., & De Ridder, N. A. (1975). *Analysis and evaluation of pumping test data*. Wageningen, International Institute for Land Reclamation and 'Improvement, Holanda. Obtenido de <https://edepot.wur.nl/72327>

- Liquid Earth. (2010). *Fractured Rock and Confined Aquifers - Recommendations for Sustainable Management*. Southland. Obtenido de <https://www.es.govt.nz/repository/libraries/id:26gi9ayo517q9stt81sd/hierarchy/environment/water/groundwater/groundwater-monitoring/documents/groundwater-reports/management-of-fractured-rock-and-confined-aquifers-2010.pdf>
- LLera, J. M., & Azcoiti, J. M. (2009). Cambio Climático y Agua Subterránea. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17(2), 172-178. Obtenido de <https://www.raco.cat/index.php/ECT/article/view/199866>
- Logan, J. (1964). Estimating transmissibility from routine production test of water wells. *Ground Water*, 35-37. doi:<https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1964.tb01744.x>
- Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic Information Science and Systems* (4th ed.). Wiley.
- López-Geta, J., Fornés Azcoiti, J., Ramos González, G., & Villarroya Gil, F. (2009). *Las aguas subterráneas. Un recurso natural del subsuelo* (Cuarta ed.). Madrid, España: Instituto Geológico Y Minero De España.
- Maidment, D. R. (1993). *Handbook of Hydrology* (Primera ed.). McGraw-Hill. Obtenido de http://dl.watereng.ir/HANDBOOK_OF_HYDROLOGY.PDF
- Mejía Rivera, O., Betancur Vargas, T., & Londoño Ciro, L. (2007). Aplicación de técnicas geoestadísticas en la hidrogeología del bajo Cauca Antioqueño. *SciELO Analytics*, 74(152). Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532007000200012
- Mejías D., J. E., Jégat N., H. J., Mora M., L. E., & Linares S., M. A. (2011). Modelo hidrogeológico conceptual para la evaluación del acuífero de la planicie aluvial del río Motatán (Venezuela). *Revista Geográfica Venezolana*, 52 (1), 31-44.
- Menjivar Flores, G. E. (2003). *Diagnostico Sociodemografico del Municipio de Santa Ana, Francisco Morazan*. Tesis , Tegucigalpa. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/113125073/Diagnostico-Sociodemografico-del-Municipio-de-Santa-Ana-Francisco-Morazan-Honduras>
- Mira, A., Vives, L., Rodríguez, L., & Veroslavsky, G. (2018). Modelo hidrogeológico conceptual y numérico del Sistema Acuífero Guaraní (Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay). *Sociedad Geológica de España-Geogaceta*(64), 67-70. Obtenido de https://sge.usal.es/archivos/geogacetas/geo64/geo64_17.pdf

- Monforte García, G., & Cantú Martínez, P. (2009). Escenario del Agua en Mexico. *Cultura Científica y Tecnológica*, 31-40. Obtenido de <http://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/356>
- Monroy Vargas, E. R. (2015). Jornadas de Investigación y Actualización en Ingeniería Civil: Modelo hidrogeológico conceptual de acuíferos. *1(1)*, 35-40.
- Municipalidad de Santa Ana. (2018). *Informe Levantamiento Línea Base Municipio de Santa Ana, Francisco Morazán*. Santa Ana, Francisco Morazán. Obtenido de <https://www.sgjd.gob.hn/biblioteca-virtual/docspdm/linea-base/08-francisco-morazan/1475-linea-base-santa-ana-francisco-morazan/file>
- OMM. (1994). *Guía de Prácticas Hidrológicas*. Obtenido de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/012406/012406.htm>
- Once-Noticias. (2019). JOYA NATURAL: Santa Ana, el municipio que deleita e inyecta energía que mueve a Honduras. *Once Noticias*. Obtenido de <https://www.oncenoticias.hn/santa-ana-honduras/>
- Peña, T., Chirinos, M., Almendares, K., & Garcia, S. (2022). Cosechas de agua lluvia para recarga de acuíferos locales en Honduras. *Revista de la Escuela de Física UNAH*, 96-105. Obtenido de <https://fisica.unah.edu.hn/publicaciones/revista-ref/ultimo-volumen-ref/ref-unah-10-1-7/>
- Peña, T., Oviedo, A., Rojas, G., Marín, M., & Lanza, S. (2016). *Estado del Arte del Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas*. Tegucigalpa, Honduras. Obtenido de <https://diciht.unah.edu.hn/investigacion-cientifica/becas-i-d-i/proyectos-especiales-de-investigacion-cientifica/manejo-integrado-de-cuencas-hidrograficas/>
- Peña-Paz, T. (2023). *Ecología del Agua Parte Alta de la Cuenca del Río Choluteca*. Tegucigalpa.
- Peralta Herrera, C. (2015). *Scribd*. Obtenido de Scribd Inc.: <https://www.scribd.com/doc/26228291/Registro-o-Perfilaje-de-Pozos>
- Perdomo M., V. M., & Rojas L., C. A. (2017). *Modelo Hidrogeológico Conceptual a partir de Información Secundaria, en los Alrededores del Centro Urbano del Municipio de Chiquinquirá*. Tesis, Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería, Bogotá. Obtenido de https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15317/1/MODELO_HIDROGEOLOGICO%20CONCEPTUAL_MUNICIPIO_CHIQUINQUIRA.pdf
- Pernía Llera, J., & Fornés Azcoiti, J. (2009). Cambio Climático y Agua Subterránea. *Enseñanza de las ciencias de la tierra*, *17(2)*, 172-178.

- PQWT. (2017). *Operation Manual*. Hunan Puqi Geologic Exploration Equipment Institute. Obtenido de <https://spanish.pqwtc.com/Automatic-mapping-water-detector/-pqwt-tc300-automatic-mapping-water-detector-for-300m-deep->
- Renard, P., Glenz, D., & Mejias, M. (2009). Understanding diagnostic plots for well-test interpretation. *Hydrogeology Journal*, 589-600.
- Rodríguez Cruz, G. O. (2021). Escasez de agua en Tegucigalpa, Honduras: ¿Está siendo afectada la subcuenca Guacerique por la variabilidad climática y el arrastre de sedimentos? *Revista de Ciencias Ambientales*, 55(1), 118-136. doi:<http://dx.doi.org/10.15359/rca.55-1.6>
- Rodríguez, M., & Ruiz, M. (2021). Uso del método potencial natural en la exploración de agua subterránea: caso de estudio Hospital de Olanchito. *Revista de la Escuela de Física UNAH*. Obtenido de <https://fisica.unah.edu.hn/dmsdocument/11492-refunahv9i1-1-9-pdf>
- Rogers, R. O. (1993). *Geología del Cuadrangulo de Tegucigalpa, Francisco Morazán*. Instituto Cartográfico Nacional, Tegucigalpa, Honduras.
- Rogers, R., Mann, P. D., Tenorio, C., & Rodríguez, M. (2005). Two styles of active transtensional deformation along the western North America-Caribbean plate boundary zone. *Geological Society America*.
- Romanazzi, P. (2017). *Modelación geoestadística de medios geológicos naturalmente fracturados*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.
- Romero Guzmán, E. T., & Romero Guzmán, L. (2020). Estrés hídrico y escasez del agua: ¡No al día cero del agua! *Revista Glosa*, 8(14), 28-30. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Elizabeth-Teresita-Romero-Guzman/publication/341322998_ESTRES_HIDRICO_Y_ESCASEZ_DEL_AGUA_NO_AL_DIA_CERO_D_EL_AGUA/links/5ebac13592851c11a861345d/ESTRES-HIDRICO-Y-ESCASEZ-DEL-AGUA-NO-AL-DIA-CERO-DEL-AGUA.pdf
- Rouhani, S. (1989). Geostatistics in Water Resources. *Georgia Water Resources Conference*. Georgia. Obtenido de <https://repository.gatech.edu/server/api/core/bitstreams/e66fc3cd-6b12-4e20-af07-69a98da79499/content>
- Rouhani, S., & Hall, T. J. (1988). Geostatistical Schemes for Groundwater Sampling. *Journal of Hydrology*, 103, 85-102. doi:[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(88\)90007-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(88)90007-8)

- Ruffo, A. G., Albouy, R., Giorgi, J., & Bastianelli, N. (2019). El agua subterránea para abastecimiento humano en las dunas costeras del suroeste bonaerense. *I Jornadas del agua en el Sudoeste Bonaerense*, (págs. 293-296). Bahía Blanca, Argentina. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/338047277_El_agua_subterranea_para_abastecimiento_humano_en_las_dunas_costeras_del_suroeste_bonaerense
- Ruiz, M. (2015). *Geología del área de influencia de los municipios de: Santa Ana, Ojojona y San Buenaventura*. UNAH, Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra, Tegucigalpa.
- Salazar Fernández, G. (2020). *Modelo Hidrogeológico de una Explotación Minera Subterránea*. Tesis, Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Concepción, Chile.
- Salinas, A. (1999). *Manual de Referencias hidrológicos*. Tegucigalpa : FHIS - BID .
- Sanchez, F. J. (2022). *Hidrología superficial y subterránea* (2da edición ed.). Salamanca, España. Obtenido de <https://hidrologia.usal.es/index.html>
- Sanders, L. (1998). *A Manual of Field Hydrogeology*. Prentice Hall.
- Saraguro, R., & Fernando, C. (2009). *Rediseño y calibración de un instrumento de laboratorio para medir porosidad usando helio*. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Guayaquil, Ecuador. Obtenido de <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/6141>
- Secretaría de Estado en el Despacho de Planificación Estratégica de Honduras. (2022). *Secretaría de Estado en el Despacho de Planificación Estratégica*. Obtenido de Sistema Nacional de Información Territorial (SINIT): <https://spe.gob.hn/sinit/inicio/>
- Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente. (2021). *Reglamento de la Ley General de Aguas (Acuerdo Ejecutivo No. 002-2021)*. Mi Ambiente. Tegucigalpa: La Gaceta. Obtenido de <https://www.tsc.gob.hn/web/leyes/Acuerdo-Ejecutivo-002-2021.pdf>
- Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Doll, P., & Portmann, F. T. (2010). Groundwater use for irrigation – a global inventory. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(10), 1863–1880. doi:doi:10.5194/hess-14-1863-2010
- Simmons, C. S. (1969). *Los Suelos de Honduras*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), Roma.

- Smith, L., & Wheatcraft, S. J. (1993). Groundwater Flow. En D. Maidment, *Handbook Hydrology*. Obtenido de http://dl.watereng.ir/HANDBOOK_OF_HYDROLOGY.PDF
- Solinst, C. (2023). *Solinst Canada Ltd.* Obtenido de Solinst Canada Ltd: https://www.solinst.com/espanol/productos/instrumentos-de-medicion-de-nivel/101-medidor-de-niveles-de-agua/ficha-tecnica/?utm_source=GA-&utm_medium=Search-&utm_campaign=101-GA-101-search-sa&utm_term=LM-SA-&utm_content=responsivetextad-spanish1&gad=1&gclid
- Terraza, H., Rubio Blanco, D., & Vera, F. (2016). *De ciudades Emergentes a Ciudades Sostenibles: Comprendiendo y proyectando las metrópolis del siglo XX*. Providencia, Santiago, Chile. Obtenido de <https://publications.iadb.org/es/de-ciudades-emergentes-ciudades-sostenibles>
- Tonder, G. v., Bardenhagen, I., Riemann, K., Bosch, J. v., Dzanga, P., & Xu, Y. (2002). *Manual on pumping test analysis in fractured rock aquifers actualizado*. Manual, University of the Free State, Institute for Groundwater Studies, Pretoria. Obtenido de http://www.wrc.org.za/wp-content/uploads/mdocs/1116_1_021.pdf
- UNICEF Internacional. (2018). Obtenido de UNICEF Web Site: <https://www.unicef.es/blog/sostenibilidad/escasez-agua-honduras-cuestion-paradojica>
- Van Bosch, I. (2000). *Manual on pumping test analysis in fractured rock aquifers*. University of the Orange Free State, Faculty of Natural and Agricultural Sciences, Department of Geohydrology. Obtenido de <https://scholar.ufs.ac.za/handle/11660/7423>
- Vélez Otálvaro, M. V. (1999). *Hidráulica de Aguas Subterráneas*. Medellín, Colombia. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/8387?show=full>
- Villanueva, M., & Iglesias, A. (1984). *Pozos y acuíferos, Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo*. Madrid, España.
- Villarroya, F. (2009). *Jornadas Técnicas de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas para Riego*. Universidad Complutense, Facultad de Ciencias Geológicas, Departamento de Geodinámica, Madrid. Obtenido de <http://chilorg.chil.me/download-doc/86199>
- Villatoro, M., Henríquez, C., & Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores idw y kriging en la variación espacial de ph, ca, cice y p del suelo. *Agronomía Costarricense*, 32(1), 95-105. Obtenido de <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6773>

- Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., . . . Davies, P. M. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 555–561 . doi:<https://doi.org/10.1038/nature09440>
- Warren, J. E., & Root, P. J. (1963). The Behavior of Naturally Fractured Reservoirs. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 3(03), 245–255. doi:<https://doi.org/10.2118/426-PA>
- Waterloo Hidrogeologic. (2023). *Waterloo Hidrogeologic*. Obtenido de Waterloo Hidrogeologic: <https://www.waterloohydrogeologic.com/products/aquifertest/>
- Waterloo Hydrogeologic. (2022). *Waterloo Hydrogeologic*. Obtenido de Waterloo Hydrogeologic: <https://www.waterloohydrogeologic.com/products/aquifertest/>
- Yagual Muñoz, E. A., & Orellana Lucumi, V. M. (2015). *Interpretación de los métodos de prueba de presión y modelos de flujo para análisis comparativo entre pozos horizontales y verticales del oriente ecuatoriano*. Tesis, Universidad Estatal Península de Santa Elena, Facultad de Ciencias de la Ingeniería-Carrera de Ingeniería en Petróleo, Santa Elena, Ecuador.
- Yagual Muñoz, O. (2016). *Modelación de Flujo Subterráneo - Aplicación en la cuenca del Milagro-Ecuador y análisis de pozo en subcuenca del Río Suquía*. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Córdoba. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/72041521.pdf>
- Zucarelli, A., Paris, M., & Macor, J. (2014). *Utilización de kriging para la elaboración de curvas isohietas de precipitación mensual en la Provincia de Santa Fe, Argentina*. Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Ingeniería en Ciencias Hídricas, Santa Fé, Argentina. Obtenido de <http://www.tvdigitalargen.ina.gov.ar/ifrh-2014/Eje3/3.39.pdf>

12. ANEXOS

12.1 Ficha recolección datos de campo

Ficha de Información de Aguas Subterráneas

Datos Generales

Fecha:	Hora:	Nombre del Sitio:	
Código de la Muestra	Nombre del Contacto:		
	Tel Contacto:		Personal de Muestreo:
Coordenadas	X:	Y:	
Altitud:		Precisión:	
Condiciones Climáticas Actuales:			
Uso del Suelo:			
# personas que usan el pozo:		Población de la zona:	

Datos del Pozo

Diámetro:		Tipo de Pozo:	Artesanal		Perforado	
Nivel Freático:		Estado del Pozo:	En Uso		Abandonado	
Profundidad:		Finalidad del Pozo:	Monitoreo		Producción	
Columna de Agua		Trayectoria de Aguas Lluvias:	Infiltración		Escurrimiento	
Antigüedad		Sistema de Aguas Lluvias:		Sistema de Agua Potable		
Tipo de Bomba:		Energía Eléctrica:			Olor	
Caudal de Extracción:		Sistema de Aguas Negras			Sabor	
Intensidad de Lluvias		Letrina		Alcantarillado		Color
Periodos Húmedos		Periodos de Estiaje				

Parámetros Físicoquímicos

Temperatura:	°C	pH:	
Oxígeno Disuelto:	mg/L	Oxígeno disuelto:	%
TDS:	g/L	Conductividad Eléctrica:	µS/cm
Salinidad:		Cloro Residual:	
Turbiedad del Agua:		ORP:	

Fuentes Potenciales de Contaminación:

Observaciones:

12.2 Fotos giras de campo



Naciente comunidad La Bodega



Material excavado Comunidad Los Encinos



Monitoreo Pozo perforado Cerrito de Ayasta



Pozo perforado Las Quebraditas



Presa comunidad La Bodega



Pozo malacate Los Encinos



Pozo malacate Los Encinos



Pozo perforado Cerrito de Ayasta



Camino pozo perforado La Bodega



Cerro de Hula

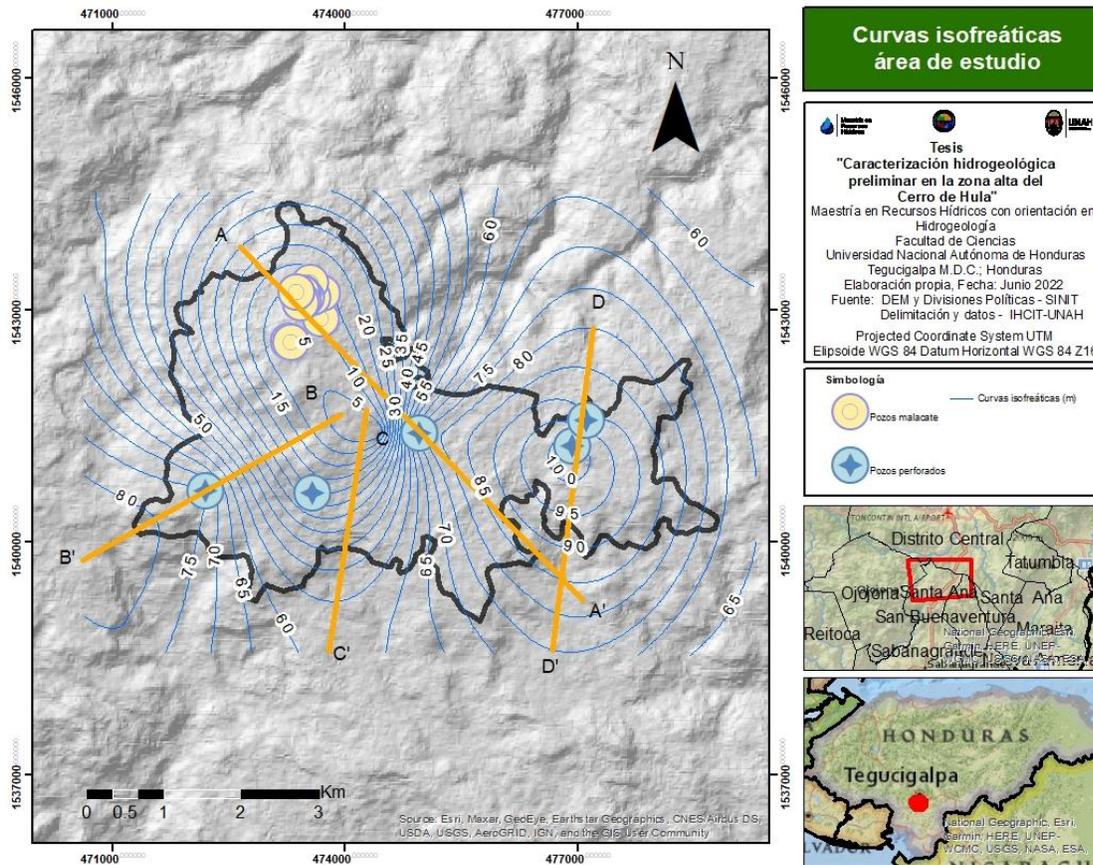
12.3 Tabla censo PFA 2014/2015

Codigo	Municipio	Comunidad	X	Y	Z	Pertenece a:	Tipo de fuente	Q extracción (m3/d)	Prof_m	NF_m	# Personas que abastece	Diámetro (plg)
LB-01	Santa Ana	La Bodega	474958	1541413	1511	Junta de Agua La Bodega	Pozo profundo	136.512	121.9	76.2	1440	4.0
LE-04	Santa Ana	Los Encinos	473704	1543229	1595	Xiomara Lagos	Pozo somero	No hay dato	5.6	5.1	5	39.4
LE-06	Santa Ana	Los Encinos	473503	1543178	1619	Luz Nolasco	Pozo somero	No hay dato	11.6	10.2	10	59.1
LE-07	Santa Ana	Los Encinos	473462	1543223	1608	Axel Lopez	Pozo somero	No hay dato	7.9	7.6	6	59.1
LE-08	Santa Ana	Los Encinos	473448	1543231	1606	Idania Cabrera	Pozo somero	No hay dato	11.7	10.9	2	47.2
LP-01	Santa Ana	Los Patios	472203	1540666	1551	Junta de Agua los Patios	Pozo profundo	No hay dato	108	76.0	80	4
LQB-01	Santa Ana	Las Quebraditas	473588	1540641	1583	Junta de Agua Las Quebraditas	Pozo profundo	374.11	76.22	25	325	3.0
YPC-01	Santa Ana	Yastepec	477125	1541584	1510	Centro Turistico Yastepec	Pozo profundo	28.081	153.53	89.96	150	4.0

12.4 Tabla actualización inventario de fuentes de agua

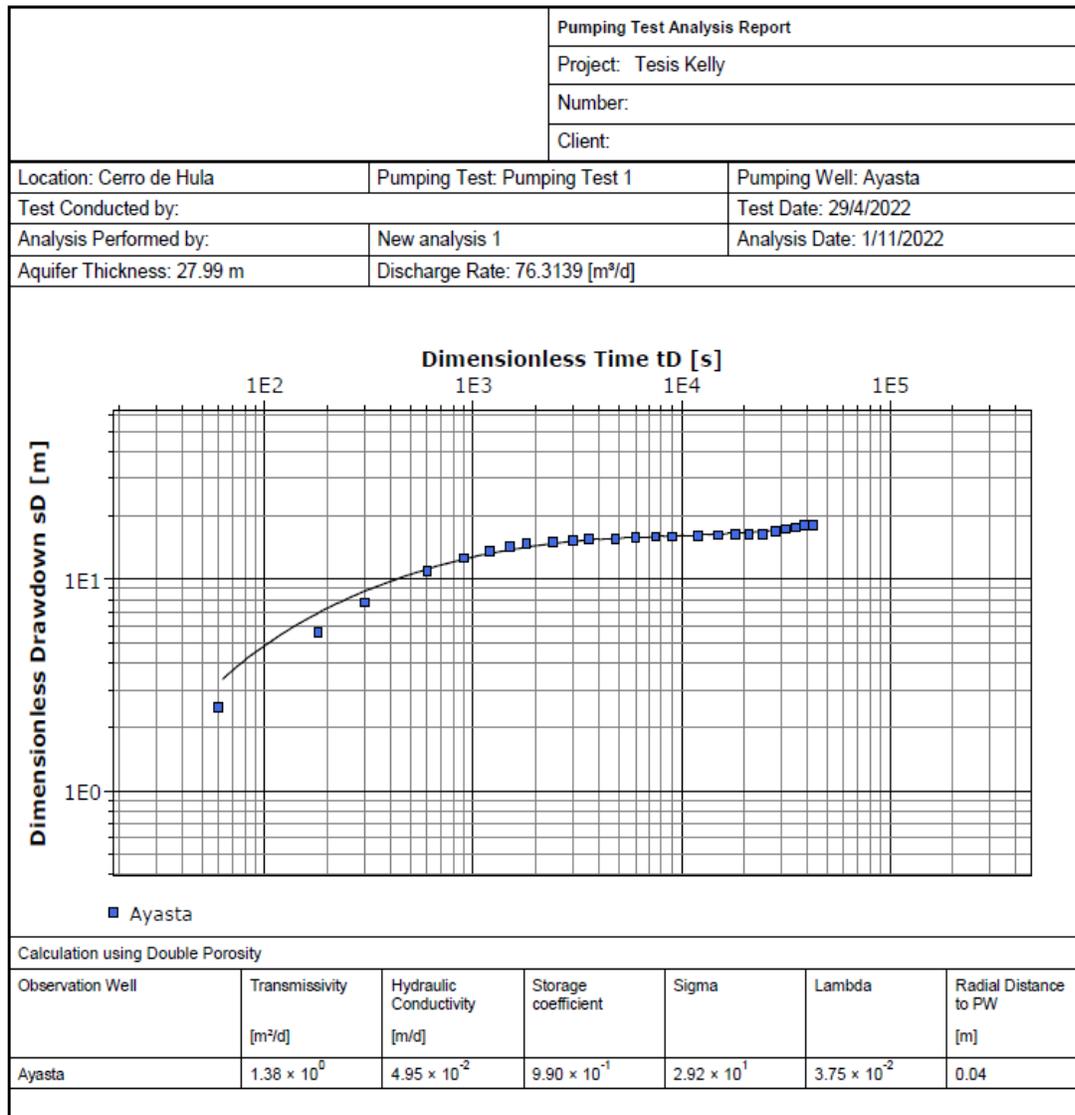
Codigo	Municipio	Comunidad	X	Y	Z	Pertenece a:	Tipo de fuente	Q extracción (m3/d)	Prof_m	NF_m	# Personas que abastece	Diámetro (plg)
CEA-01	Santa Ana	Cerrito de Ayastas	476937	1541249	1523	Junta de Agua Cerrito de Ayastas	Pozo profundo	76.3139	132.2	104.21	325	4
LE-01	Santa Ana	Los Encinos	473298	1542594	1657	Miguel Gonzalez	Pozo somero	No hay dato	3.7	1.16	5	78.7
LE-02	Santa Ana	Los Encinos	473555	1543371	1580	Marlon Avila	Pozo somero	No hay dato	10.4	9.3	5	92.1
LE-03	Santa Ana	Los Encinos	473690	1542897	1612	Idania Nolasco	Pozo somero	No hay dato	13.0	12.07	4	39.4
LE-05	Santa Ana	Los Encinos	473580	1543178	1605	Ana Raquel Matute	Pozo somero	No hay dato	8.8	3.5	8	39.4
LE-09	Santa Ana	Los Encinos	473453	1543120	1610	Mayra Aguilar	Pozo somero	No hay dato	10.7	5.9	15	39.4
LE-10	Santa Ana	Los Encinos	473433	1543100	1605	Bayron Silva	Pozo somero	No hay dato	9.0	7.9	15	59.1
LE-11	Santa Ana	Los Encinos	473372	1543237	1597	Luis Garcia	Pozo somero	No hay dato	8.3	4.1	5	59.1
LE-12	Santa Ana	Los Encinos	473456	1543226	1600	Ana Julia Cerrato	Pozo somero	No hay dato	8.3	5.9	6	59.1
LE-13	Santa Ana	Los Encinos	473280	1542597	1649	Junta de Agua Los Encinos	Pozo somero	No hay dato	5.5	3.6	520	78.7
LE-14	Santa Ana	Los Encinos	473292	1542590	1661	Junta de Agua Los Encinos	Pozo somero	No hay dato	5.1	2.3	520	78.7
LE-15	Santa Ana	Los Encinos	473282	1542609	1649	Junta de Agua Los Encinos	Pozo somero	No hay dato	4.8	2.6	520	78.7
LE-16	Santa Ana	Los Encinos	473312	1542599	1652	Junta de Agua Los Encinos	Pozo somero	No hay dato	8.5	3.8	520	78.7

12.5 Detalle perfiles niveles freáticos

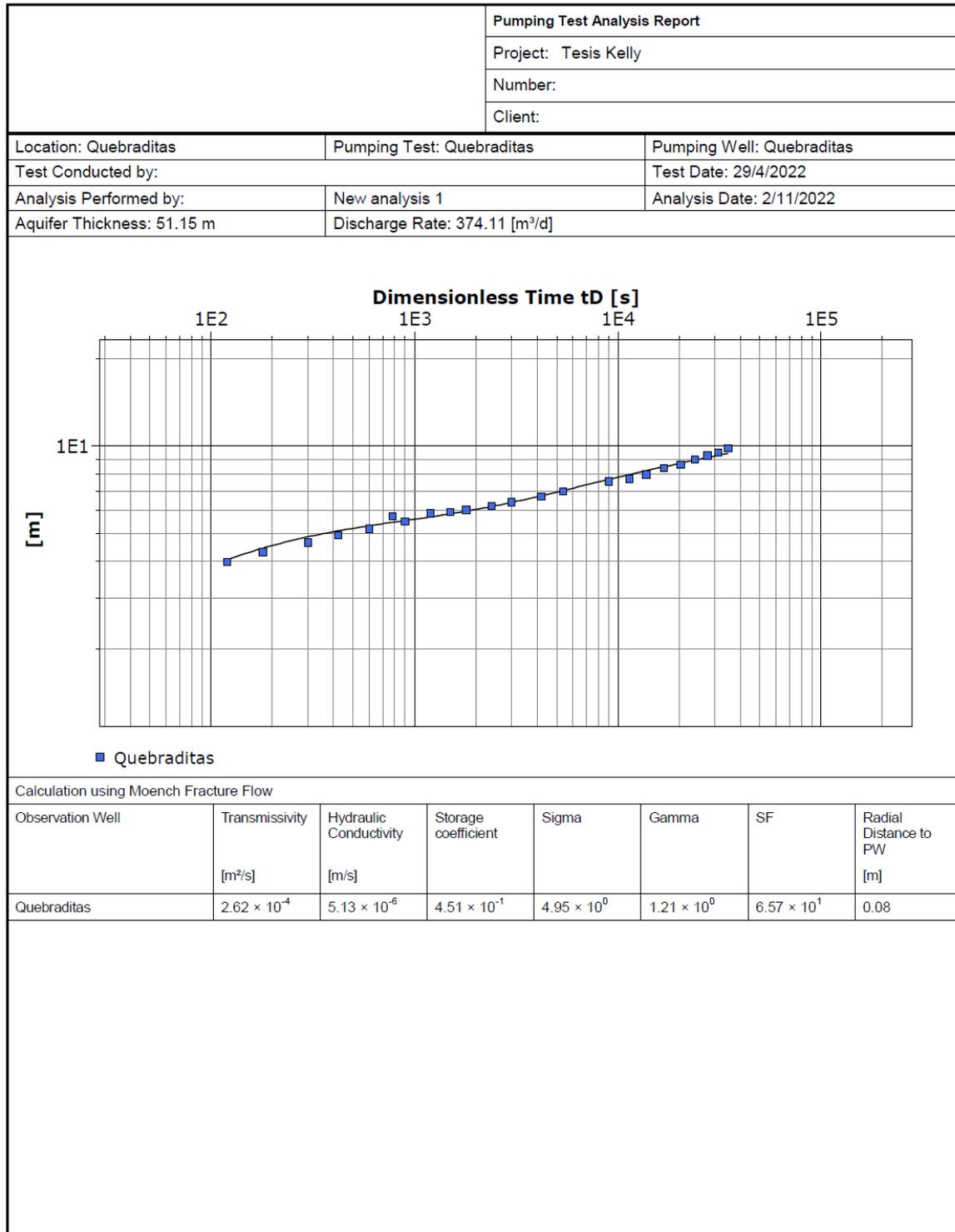


12.6 Resultados AquiferTest

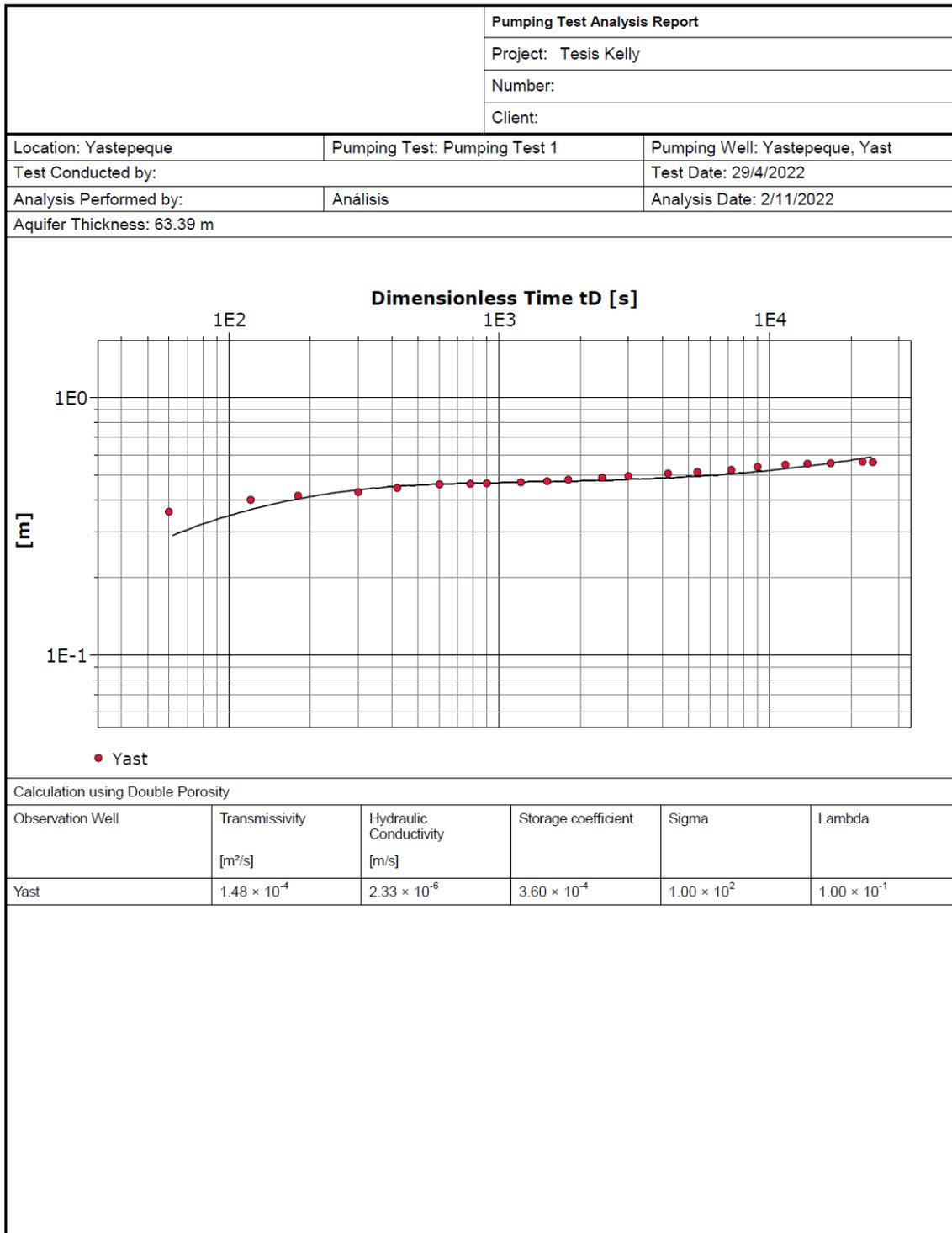
A. Pozo Cerrito de Ayasta



B. Pozo Quebraditas



C. Pozo Yastepec



C. Pozo Yastepec

DATA sheet: Enter general info and data of constant rate pumping test and recovery (optional)																		
Country:	Honduras										Main	Geology:	Basalto					
Region:	Central (Francisco Morazan)										Diagnostic	Derivativ	Depth of BH:					
Owner:	Yastepec										Sust_Q	Water strikes:						
X-coord:												Date of Test:	abr-22					
Y-coord:												Contractor:	Kelly Almdares					
CONSTANT RATE TEST DATA : enter values in cells which are coloured light yellow																		
Borehole:	BACL										S _{max} =	12.53	Recom. AD =	12.5	AD = available drawdown for managing the borehole			
Distance from Rest WL to main water strike (m) = 580.00																		
Q (l/s) =	0.32														Recovery data	T (m ² /d) : Logan eq.	2.7	t _e = extrapolation time
t (min)	s (m)	avg s'	s'	avg s'		Log s'	log s'	T (m ² /d)	T/S	S	avg T	avg S	Time t'	Res. s	ut	Wl rise	s'	Rec.
1	1.36																	
2	1.40																	
3	2.42	-4.96	0.25	0.38	0.38	0.76	0.76											
5	3.43	5.58	0.51	0.43	0.43	0.82	0.82	0.86	5.49E+02	1.57E-03	0.86	1.57E-03						
7	4.45	6.92	0.52	0.55	0.55	0.66	0.66	0.75	4.71E+02	1.59E-03	0.75	1.59E-03						
10	5.46	8.24	0.62	0.58	0.58	0.68	0.68	0.60	3.24E+02	1.88E-03	0.60	1.88E-03						
13	6.46	9.63	0.61	0.48	0.48	0.68	0.68	0.51	2.34E+02	2.19E-03	0.51	2.19E-03						
15	7.50	10.52	0.21	0.20	0.20	0.61	0.61	0.47	2.28E+02	2.09E-03	0.47	2.19E-03						
20	8.59	10.36	-0.24	-0.47	-0.47	0.57	0.57	0.46	2.07E+02	2.23E-03	0.46	2.23E-03						
25	9.64	8.61	-1.38	-1.14	-1.14	0.44	0.44	0.54	2.73E+02	1.90E-03	0.54	2.23E-03						
30	10.68	6.16	-1.80	-1.67	-1.67	0.26	0.26	0.82	1.05E+03	7.77E-04	0.82	2.23E-03						
40	10.79	3.90	-1.83	-1.51	-1.51	0.16	0.16	1.26	8.39E+03	1.51E-04	1.26	2.23E-03						
50	11.30	2.82	-0.90	-0.91	-0.91	0.09	0.09	2.10	6.36E+05	1.99E-06	1.26	2.23E-03						
70	11.51	2.38	-0.01	-0.25	-0.25	0.09	0.09	2.18	8.79E+05	1.44E-06	1.26	2.23E-03						
90	11.71	2.42	0.17	0.12	0.12	0.09	0.09	2.11	6.38E+05	1.99E-06	1.26	2.23E-03						
120	12.02	2.23	-0.52	-0.85	-0.85	0.09	0.09	1.99	3.08E+05	4.14E-06	1.26	2.23E-03						
150	12.44	1.62	-2.21	-2.51	-2.51	0.06	0.06	2.79	2.69E+07	1.00E-06	1.26	2.23E-03						
190	12.45	0.72	-4.82	-3.56	-3.56	0.03	0.03	5.46	8.23E+13	1.00E-06	1.26	2.23E-03						
230	12.45	0.36	-3.64	#NUM!	0.00	0.01	0.01	22.05	1.91E+56	1.00E-06	1.26	2.23E-03						
280	12.50	#NUM!	#NUM!	#NUM!	0.00	0.01	0.01	22.58	1.35E+56	1.00E-06	1.26	2.23E-03						
367	12.52	#NUM!	#NUM!	#NUM!	0.00	#NUM!	0.00	#NUM!	#NUM!	#NUM!	1.26	2.23E-03						
580	12.53	#NUM!	#NUM!	#NUM!	0.00	#NUM!	0.00	#NUM!	#NUM!	#NUM!	1.26	2.23E-03						

Semi-log

Log-log