

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HONDURAS

**DIRECCIÓN DEL SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO
ESCUELA DE FÍSICA**

MAESTRÍA EN RECURSOS HÍDRICOS CON ORIENTACIÓN EN HIDROGEOLOGÍA



TESIS

**MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE LA SUBCUENCA RÍO GRANDE O
CONCEPCIÓN.**

PRESENTA:

IRIS GRICELDA LARA PEÑA

PREVIA OPCIÓN AL GRADO DE MÁSTER EN:

RECURSOS HÍDRICOS CON ORIENTACIÓN EN HIDROGEOLOGÍA

ASESORES:

M.S.C. MAYNOR ALBERTO RUIZ ALVAREZ

M.S.C. MANUEL DE JESÚS RODRÍGUEZ MARADIAGA

TEGUCIGALPA, M.D.C.

HONDURAS, C.A.

FEBRERO, 2024

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 JOSÉ HERRERA ALVARADO
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
FEBRERO, 2024

RESUMEN

El presente estudio pretende construir un modelo conceptual hidrogeológico, basado en la información geológica, geofísica, piezométrica e hidrogeoquímica de la subcuenca Río Grande o Concepción, dicha subcuenca posee una geología con características hidrogeológicas de acuífero de fisura y se encuentra ubicada al suroeste de la ciudad de Tegucigalpa con un área de 140.97 Km².

Se realizaron siete sondeos geofísicos por el método de tomografía eléctrica, así como también revisión de información geológica, piezométrica, hidrológica e hidrogeoquímica para la elaborar el modelo conceptual hidrogeológico.

Dentro de los resultados obtenidos en los sondeos geofísicos se identificaron materiales con resistividad de 20 a 300 Ω m que se interpretan como tobas, 1000 Ω m como lavas, 300 Ω m como ignimbritas, 10 Ω m de arcillas y limos saturados y resistividad de 5 Ω m de agua subterránea. De acuerdo con la altura piezométrica que se obtuvo de los pozos, se determina que la dirección de flujo de la subcuenca es del suroeste (parte alta) al noreste (parte baja), observándose una inversión del flujo en la parte baja. La hidrogeoquímica de la cuenca muestra una clasificación de sus aguas bastante homogénea, refleja una tendencia bicarbonatada sódica y bicarbonatada cálcica o magnésica. En cuanto al balance hídrico se identificó infiltraciones potenciales para las áreas de recarga de 394 mm, 407.5 mm y 427.25 mm.

Se construyó un modelo conceptual hidrogeológico con la ayuda de información geológica, geofísica, hidrológica, piezométrica e hidrogeoquímica.

Abstract

The present study aims to build a conceptual hydrogeological model, based on the geological, geophysical, piezometric and hydrogeochemical information of the Río Grande or Concepción sub-basin, said sub-basin has a geology with hydrogeological characteristics of a fissure aquifer and is located southwest of the city. of Tegucigalpa with an area of 140.97 Km².

Seven geophysical surveys were carried out using the electrical tomography method, as well as a review of geological, piezometric and hydrogeochemical information to develop the hydrogeological conceptual model.

Among the results obtained in the geophysical surveys, materials with resistivity of 20 to 300 Ωm are identified, which are interpreted as tuffs, 1000 Ωm as lavas, 300 Ωm as ignimbrites, 10 Ωm of saturated clays and silts and 5 Ωm resistivity of groundwater. According to the piezometric height obtained from the wells, it is determined that the flow direction of the sub-basin is from the southwest (upper part) to the northeast (lower part), with an inversion of the flow being observed in the lower part. The hydrogeochemistry of the basin shows a homogeneous classification of its waters, reflecting a sodium bicarbonate and calcium or magnesium bicarbonate tendency. Regarding the water balance, potential infiltrations were identified for the recharge areas of 394 mm, 407.5 mm, and 427.25 mm.

A conceptual hydrogeological model was built with the help of geological, geophysical, piezometric and hydrogeochemical information.

ABREVIATURAS

LISTA DE ABREVIATURAS

Km²	kilómetros cuadrados (medida de área)
Km	kilometro (medida de longitud)
mm	milímetros
msnm	metros sobre el nivel del mar (altura)
m²	metros cuadrados
Ohm	ohmios (unidad derivada de la resistencia eléctrica)
V	voltios
A	amperio
μS	microsiemens
μmhos	micromho
cm	centímetros
°C	grados Celsius (temperatura)
°F	grados Fahrenheit (temperatura)
Fe	hierro
Mn	Manganeso
CaCO₃	Carbonato de calcio
Mg	Magnesio
Na	Sodio
CO₂	Dióxido de carbono

CONTENIDO

RESUMEN	3
Abstract	4
ABREVIATURAS.....	5
Contenido de ilustraciones.....	9
Contenido de mapas	11
Contenido de tablas	12
Contenido de Graficas	13
AGRADECIMIENTOS.....	14
1. INTRODUCCIÓN	15
2. CAPÍTULO I: Delimitación del problema.....	17
2.1 Descripción de la problemática:.....	17
2.2 Justificación de la investigación.	18
2.2.1 Justificación Práctica:	18
2.2.2 Límites de la investigación.....	19
2.2.3 Límite de tiempo:	19
2.2.4 Limite de espacio o territorio:.....	19
2.2.5 Limite de recursos:	19
2.3 Definición del Problema:	20
3. CAPITULO II: Objetivos	22
3.1 Objetivo general:	22
3.2 Objetivos específicos:	22
4. CAPITULO III: Marco de Referencia	23
4.0. Marco Teórico	23
4.1. Modelo hidrogeológico conceptual	23
4.2. Geología.....	23

4.3 Geofísica	25
4.3.1 Método eléctrico	25
4.4 Piezometría.....	31
4.5 Hidrogeoquímica	33
4.5.1 Características físicas.....	33
4.6 Balance hídrico	40
4.6.1 Parámetros que intervienen en el Balance Hídrico.....	40
5. CAPITULO IV: Descripción del medio.....	42
5.1 Situación Geográfica.....	42
5.2 Descripción Biofísica	44
6. CAPITULO V: Metodología.....	54
6.1 Tipo de investigación	54
6.2 Diseño de la investigación	54
6.4. Recopilación y análisis de la información del área de estudio	55
6.4.1 Información para descripción del medio.....	55
6.4.2. Información Geológica	56
6.4.3. Información Hidrogeoquímica.....	56
6.4.4. Información piezométrica	56
6.4.5 Balance hídrico	57
6.5. Trabajo de campo.....	57
6.5.1 Tomografía Eléctrica.....	58
6.5.2. Programas para la interpretación tomografía eléctrica	58
6.5.3. Equipo geofísico:	58
6.6. Construcción del Modelo Conceptual Hidrogeológico.....	59
7. CAPITULO VI: Análisis e interpretación de los datos	60
7.1 Geología.....	60
7.1.1Estratigrafía	60

7.1.2 Estructura geológica	62
7.2 Geofísica	65
7.2.1 Tomografía No. 1:	67
7.2.2 Tomografía eléctrica No. 2:	68
7.2.3 Tomografía Eléctrica No.3	69
7.2.4 Tomografía Eléctrica No.4	70
7.2.5 Tomografía Eléctrica No.5	71
7.2.6 Tomografía Eléctrica No.6	72
7.2.7 Tomografía Eléctrica No.7	73
7.3 Piezometría.....	74
7.4 Hidrogeoquímica	76
7.4.1 Conductividad eléctrica y PH.....	77
7.4.2 Cationes y Aniones	77
7.4.3 Nutrientes.....	77
7.4.4 Metales Pesados.....	78
7.5 Balance hídrico	80
7.5.1 Elementos generales balance hidrometeorológico	80
7.6 Modelo Conceptual Hidrogeológico.....	88
8. CAPITULO VII: Discusión	90
8.0 Discusión.....	90
8.1 Geología de la subcuenca Río Grande o Concepción	90
8.2 Identificación del material del subsuelo mediante sondeos geofísicos	90
9. Conclusiones.....	93
10. Recomendaciones	95
11. Bibliografía	96
12. Contribuciones científicas	106
12.1 Sección 1: Publicaciones.....	106

12.2 Sección 2: Congresos.....	106
13. ANEXOS.....	108
Anexo 1: Puntos de sondeos geofísicos	108
Anexos 2: Pozos de Agua utilizados para mapa de isopiezas.....	112
Anexos 3: Mapas Geológicos.....	112
Anexos 4: Estaciones Meteorológicas	115
Anexos 5: Tablas comparativas de resultados de muestra.	117

Contenido de ilustraciones

Ilustración 1:Ejemplo de una estructura Geológica. Tomado de (Rodríguez R., 2011)	23
Ilustración 2: Ejemplo de una falla geológica. Tomada de (Russell, 2010).	24
Ilustración 3:Ejemplo de una Diaclasa. Tomada de (Ortega, 2018).	24
Ilustración 4:Ejemplo de un Pliegue. Tomado de (Ortega, 2018).	25
Ilustración 5: Geometrías de electrodos más comunes utilizadas en resistividad. Tomado de (Burger, 1992)	27
Ilustración 6: Esquema de aplicación de corriente eléctrica al terreno. Tomado de (Huitzil, 2015)	29
Ilustración 7: Esquema de los dispositivos electródicos más habituales en los métodos de resistividad. Tomado de (Crio, 2009).....	29
Ilustración 8: Secuencia de medidas con dispositivo Wenner. Tomado de (Crio, 2009).	31
Ilustración 9: Distribución de resistividades reales tras la inversión. Tomado de (Muñoz, 2021).....	31
Ilustración 10: Borde impermeable. Tomado de (Escuder, et al., 2009)	32
Ilustración 11: Borde Permeable. Tomado de (Escuder, et al., 2009).....	32
Ilustración 12: Diagrama de Piper. Tomado de (Fetter, 2000).....	39
Ilustración 13: Diagrama de Stiff. Tomado de (Fetter, 2000).....	39
Ilustración 14: Descripción de las actividades a desarrollar en el modelo conceptual.....	55
Ilustración 15: Cota del Nivel del Agua. Tomado de Sánchez, 2015.	57
Ilustración 16: Esquema del dispositivo requerido en el método tomografía eléctrica. Tomado de (Crio, 2009).....	58
Ilustración 17: Equipo Geofísico utilizado en campo para la elaboración de sondeos geofísicos.	59

Ilustración 18: Toba volcánica en la represa concepción. Ilustración 19: Coladas basálticas de pahoehoe en La Brea Lepaterique.....	61
Ilustración 20: Ignimbritas en El Aguacatal Ojojona. Ilustración 21: Basaltos en El Aguacatal Ojojona ..	62
Ilustración 22: Perfil A-A' de la Subcuenca Río Grande o Concepción. Tomado del Mapa Geológico de La Universidad de Austin Texas	64
Ilustración 23: Perfil B-B' de la Subcuenca de Río Grande o Concepción. Tomado del Mapa Geológico de La Universidad de Austin Texas.	65
Ilustración 24: Tomografía 1 ubicada en la represa Concepción. Obtenido del Resistivímetro Terrameter ABEM SAS 1000.	67
Ilustración 25: Resultados de tomografía 1 en donde se puede apreciar dos capas de material, toba y arcilla con limo saturado. Este análisis se logró con ayuda de tablas de resistividad y programas CAD.	67
Ilustración 26: Tomografía 2 ubicada en El Aguacatal Ojojona. Obtenido del Resistivímetro Terrameter ABEM SAS 1000.	68
Ilustración 27: Resultados de tomografía 2 en donde se puede apreciar tres capas de material, toba, ignimbrita y lava. Este análisis se logró con ayuda de tablas de resistividad y programas CAD.....	68
Ilustración 28: Tomografía 3 ubicada en Aldea Surcos de Caña Ojojona. Realizada con Resistivímetro Terrameter ABEM SAS 1000.....	69
Ilustración 29: Resultados de tomografía 3 en donde se puede apreciar tres capas de material, toba, ignimbrita y lava. Este análisis se logró con ayuda de tablas de resistividad y programas CAD.....	69
Ilustración 30: Tomografía 4 ubicada en la Brea Lepaterique. Realizada con Resistivímetro Terrameter ABEM SAS 1000.....	70
Ilustración 31: Resultados de tomografía 4 en donde se puede apreciar tres capas de material, toba, aguas subterráneas, arcilla y limo saturadas. Este análisis se logró con ayuda de tablas de resistividad y programas CAD.....	70
Ilustración 32: Tomografía 5 ubicada en Las Tablas Lepaterique. Realizada con Resistivímetro Terrameter ABEM SAS 1000.	71
Ilustración 33: Resultados de tomografía 5 en donde se puede apreciar cuatro capas de material, toba, aguas subterráneas, lava, arcilla y limo saturadas. Este análisis se logró con ayuda de tablas de resistividad y programas CAD.....	71
Ilustración 34: Tomografía 6 ubicada en Aldea Las Tablas Lepaterique. Realizada con Resistivímetro Terrameter ABEM SAS 1000.....	72
Ilustración 35: Resultados de tomografía 6 en donde se puede apreciar tres capas de material toba, aguas subterráneas, arcilla y limo saturadas. Este análisis se logró con ayuda de tablas de resistividad y programas CAD.	72

Ilustración 36: Tomografía 7 ubicada en El Llano Ojojona. Realizada con Resistivímetro Terrameter ABEM SAS 1000.....	73
Ilustración 37: Resultados de tomografía 7 en donde se puede apreciar cinco capas de material toba, aguas subterráneas, lava, ignimbritas, arcilla y limo saturadas. Este análisis se logró con ayuda de tablas de resistividad y programas CAD.....	73
Ilustración 38: Modelo Conceptual Hidrogeológico de la Subcuenca Río Grande o Concepción.....	88
Ilustración 39: Perfil de tomografía eléctrica #4 realizada en La Brea municipio de Lepaterique.....	89
Ilustración 40: Sondeo 1 Colonia concepción Distrito Central de Subcuenca Río Grande o Concepción...	108
Ilustración 41: Sondeo 2 El Aguacatal Ojojona de Subcuenca Río Grande o Concepción.	109
Ilustración 42: Sondeo 3 Aldea Surcos de Caña Ojojona de Subcuenca Río Grande o Concepción.	109
Ilustración 43: Sonde 4 La Brea Lepaterique de Subcuenca Río Grande o Concepción.....	110
Ilustración 44: Sondeo 5 Las Tablas Lepaterique de Subcuenca Río Grande o Concepción.	110
Ilustración 45: Sondeo 6 Aldea las Tablas Lepaterique de Subcuenca Río Grande o Concepción.....	111
Ilustración 46: sondeo 7 El Llano Ojojona de Subcuenca Río Grande o Concepción.	111

Contenido de mapas

Mapa 1: Mapa de Ubicación de Subcuenca de Río Grande o Concepción. Elaborado con el modelo de elevación digital de honduras y con la distribución cuencas del SANAA del DC en el programa ArcGIS.....	42
Mapa 2: Mapa de Ubicación de Estaciones Meteorológicas de la Subcuenca Río Grande o Concepción. Tomado del SANAA	46
Mapa 3:Pendientes en porcentajes.....	47
Mapa 4: Mapa de geología de Subcuenca Río Grande o Concepción. Tomado de Mapa Geológico de Honduras.	49
Mapa 5: Cobertura del suelo de la Subcuenca Río Grande o Concepción. Tomado del Mapa de Cobertura Forestal 2018.	50
Mapa 6: Red de drenaje de la Subcuenca de Río Grande. Tomado de mapa del portal de ICF.....	52
Mapa 7: Mapa hidrogeológico de la Subcuenca Río Grande o Concepción. Tomado del mapa hidrogeológico de Honduras.	53
Mapa 8: Mapa geológico de la subcuenca Concepción. Tomado del Mapa Geológico de La Universidad de Austin Texas.....	63
Mapa 9: Distribución espacial de las líneas de tomografía eléctrica realizadas en el área de estudio.	66
Mapa 10: Pozos con niveles piezométricos de Subcuenca Río Grande o Concepción.	74

Mapa 11: Curvas Isofreáticas de la subcuenca Río Grande o Concepción. Elaboración propia, utilizando el método de interpolación de Kriging en el programa ArcGIS.	75
Mapa 12: Mapa geológico del Municipio de Lepaterique. Tomado de (Texas, 2022).	113
Mapa 13: Mapa Geológico del municipio de Ojojona. Tomado de (Harwood, 2018).	114

Contenido de tablas

Tabla 1: Resistividades de algunas rocas y agua. Tomada de (Castrechin, 2019)	30
Tabla 2: valores de conductividad eléctrica para diferentes tipos de agua. Tomado de (Gómez, 2009).	34
Tabla 3: Valores más comunes de pH. Tomado de (Gómez, 2009).	35
Tabla 4: Aldeas dentro del área de estudio.	43
Tabla 5: Estaciones meteorológicas dentro de la Subcuenca de Río Grande. Tomado de SANAA.	44
Tabla 6: Tabla de cobertura de suelo de Subcuenca Río Grande o Concepción	51
Tabla 7: Tabla comparativa de resultados de las muestras con valores de los parámetros de la Norma Técnica de Calidad de Agua Potable para Consumo de Honduras y Organización Mundial de la Salud (OMS). ver en anexos los demás resultados. Elaboración propia.	76
Tabla 8: precipitación media mensual de las estaciones meteorológicas la Brea y Concepción. Tomada de SANAA.	81
Tabla 9: Temperatura promedio de la estación meteorológica Concepción. Tomado de SANAA.	81
Tabla 10: Tabla Calculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP), por el Método de Thornthwaite and Matter (1986) para suelos Litosol-Cocona.	82
Tabla 11: Tabla Calculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP), por el Método de Thornthwaite and Matter (1986) para suelos Andosol-Milile.	82
Tabla 12: Tabla Calculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP), por el Método de Thornthwaite and Matter (1986) para suelos Alfisol-Salalica.	82
Tabla 13: Recarga potencial según los valores obtenidos con el Balance Hidrometeorológico, Thornthwaite and Matter (1986) para Suelo Cocona.	83
Tabla 14: Recarga potencial según los valores obtenidos con el Balance Hidrometeorológico, Thornthwaite and Matter (1986) para Suelo Milile.	83
Tabla 15: Recarga potencial según los valores obtenidos con el Balance Hidrometeorológico, Thornthwaite and Matter (1986) para Suelo Salalica.	84
Tabla 16: Coordenadas de sondeos geofísicos.	108
Tabla 17: Pozos de agua utilizados para sacar la isopiezas y dirección de flujo.	112
Tabla 18: Estación Meteorológica la Brea.	115

Tabla 19: Estación Meteorológica Concepción.	116
Tabla 20: Tabla comparativa de parámetros fisicoquímicos.....	117
Tabla 21: Tabla comparativa de parámetros fisicoquímicos.....	118

Contenido de Graficas

Gráfico 1: Precipitación Media Anual de la Subcuenca Río Grande o Concepción con base en datos de las estaciones de la Brea y Concepción en la serie de años de 1990-2015. Tomado del SANAA.....	45
Gráfico 2: Temperatura Media Anual de la Subcuenca Río Grande o Concepción con base en datos de la estación Concepción en los años de 1990-2015. Tomado de SANAA.....	45
Gráfico 3: Diagrama de Piper de la Subcuenca Río Grande. Creación propia con utilizando datos hidrogeoquímicos del Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra. Tomado (IHCIT, 2021).....	79
Gráfico 4: Diagrama de Stiff de la Subcuenca Río Grande o Concepción. Creación propia utilizando datos hidrogeoquímicos del Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra. Tomado (IHCIT, 2021).....	79
Gráfico 5: Comportamiento mensual de los principales componentes del Balance Hidrometeorológico, en la zona de recarga del área de estudio para Suelos Cocona. Elaboración Propia.	85
Gráfico 6 Comportamiento mensual de los principales componentes del Balance Hidrometeorológico, en la zona de recarga del área de estudio para Suelos Milile.....	86
Gráfico 7: Comportamiento mensual de los principales componentes del Balance Hidrometeorológico, en la zona de recarga del área de estudio para Suelos Salalica.	87

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios por brindarme la oportunidad de culminar mi Maestría con éxito y estar conmigo en todo momento.

A mi familia por brindarme su apoyo incondicional a lo largo de mi vida y logros profesionales. A ellos les dedico este trabajo porque alimentaron mi deseo de superación y triunfo en la vida.

A mis asesores de tesis M.Sc. Maynor Alberto Ruiz Álvarez, M.Sc. Manuel de Jesús Rodríguez Maradiaga quien me ayudaron con todas las inquietudes con el desarrollo de esta, al Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra quien me brindó la información necesaria para realizar esta investigación, y a otras personas que contribuyeron para el desarrollo de la tesis.

A la coordinación de la maestría de recursos hídricos con orientación en hidrogeología por el apoyo en la gestión de equipo para la realización de los sondeos geofísicos.

1. INTRODUCCIÓN

Para una gestión adecuada de los recursos hídricos de un acuífero o zona en específicas importante poder contar con modelos hidrogeológicos a diferentes escalas como herramientas de planificación. De acuerdo con Melo (2017) “Un modelo hidrogeológico conceptual es una representación bidimensional o tridimensional, en la que se busca describir el funcionamiento y las características, así como las condiciones estáticas y dinámicas de dichos sistemas” (p.20). Esto indica la importancia de realizar estudios que evalúen los recursos hídricos subterráneos, y se conviertan en una herramienta de gestión ambiental para evaluar los impactos que amenazan dichos recursos.

Dentro del impacto ambiental a considerar en nuestro país, la sequía y la calidad del agua son temas de suma importancia, debido a la contaminación y explotación del agua. Teniendo en cuenta la demanda de dicho recurso y el agotamiento de las fuentes superficiales en el verano, es necesario encontrar fuentes alternas, como lo son las fuentes subterráneas.

En Honduras existen formaciones geológica o capa extensa de subsuelo saturada de agua conocida como acuíferos, pueden ser semiconfinados, confinados y libres. En los acuíferos semiconfinados y confinados se requiere de perforación profunda para la extracción de agua, en cuanto a los acuíferos libre son aquellos donde el agua se encuentra a presión atmosférica como los pozos malacate. En nuestra área de estudio se encuentran pozos perforados y malacates que brindan agua a algunas aldeas de los municipios de Ojojona y Lepaterique, los cuales fueron utilizados para realizar el mapa de isopiezas y encontrar la dirección del flujo del agua subterránea.

La subcuenca Río Grande o Concepción se encuentra ubicada al suroeste de la Capital de Tegucigalpa y cierra en la represa Concepción, con un área de 140.97 Km² y un perímetro de 80.06 Km. Las elevaciones varían de 900 a 2248 msnm, forma parte de la división de subcuencas del Distrito Central y abastece el 45% del agua en la ciudad de Tegucigalpa. (Berrios, 2014).

Esta investigación se lleva a cabo con el objetivo de construir un modelo hidrogeológico conceptual, tomando como base la información geológica, geofísica, piezométrica, hidrológica e hidrogeoquímica que caracteriza el comportamiento del agua de la subcuenca Río Grande o Concepción.

Para describir la litología de la formación geológica de la subcuenca, se utilizó el mapa geológico de la Universidad de Austin Texas, donde prevalecen Basaltos Cuaternarios, Miembro Nueva Aldea, Rocas volcánicas más jóvenes (ignimbritas riolíticas, vítrica cristalina soldada, lahares, coladas), Padre Miguel Inferior.

Con respecto a la información geofísica recopilada por tomografía eléctrica, en todos los puntos se identifican materiales, como tobas con valores de resistividad de 20 a 300 Ωm , lavas 1000 Ωm , ignimbritas de 300 Ωm , arcillas y limos saturados con resistividad de 10 Ωm y agua subterránea con valores de resistividad de 5 Ωm .

Se utilizó información piezométrica para crear un mapa que muestra la dirección del flujo del agua subterránea, el cual fluye hacia el suroeste en la parte alta de la subcuenca y hacia el noroeste en la parte baja.

Las características hidrogeoquímicas de las fuentes superficiales y subterráneas de la Subcuenca incluyen valores de conductividad eléctrica de 34.40 y 324.30 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el agua subterránea durante la estación lluviosa, valores de pH de 6.06 a 8.12 y valores de metales pesados, nutrientes, cationes y aniones dentro de los valores recomendados.

El cálculo promedio de almacenamiento subterráneo y subsuperficial es de 788.8 mm, 815.1 mm y 854.5 mm de suelo Cocona, Milile y Salalica en la subcuenca Río Grande o Concepción, correspondiente a un 61.8%, 63.9% y 66.9% de la precipitación media total. Con el balance hídrico se identificó infiltraciones potenciales para las áreas de recarga de 394 mm, 407.5 mm y 427.25 mm.

En los capítulos del I al IV se detalla la delimitación y descripción del problema, la sustentación teórica, producto de una extensa revisión bibliográfica sobre los modelos hidrogeológicos conceptuales existentes y sus implicaciones en la gestión de recursos hídricos, que involucran la toma de decisiones y planteamientos de políticas, encaminadas a la conservación y preservación de los recursos hídricos de las fuentes cercanas a la ciudad capital de Honduras. En el capítulo V se detalla la metodología utilizada, la cual tiene un enfoque cuantitativo con un alcance descriptivo. En el capítulo VI y VII se detallan los hallazgos a partir de los datos obtenidos mediante sondeos geofísicos, niveles piezométricos, información hidrogeoquímica y geológica de los mapas geológicos de Ojojona y Lepaterique. Y finalmente, se detallan las conclusiones generales y recomendaciones sugeridas a partir de los resultados obtenidos.

2. CAPÍTULO I: Delimitación del problema

2.1 Descripción de la problemática:

Dentro de los principales desafíos que enfrenta el mundo en la actualidad, se encuentra la preservación de los recursos hídricos; el impacto directo del cambio climático sobre estos pone en manifiesto la vulnerabilidad de dichos recursos y la necesidad de encontrar alternativas ante las sequías por falta de lluvia y la escasez de agua dulce.

Debido al rápido crecimiento de la población y el consiguiente aumento de la demanda de agua, muchos países enfrentan una presión sin precedentes para enfrentar esta problemática, y satisfacer la demanda es una de las prioridades más importantes en todas las regiones del mundo, en términos de cantidad, distribución y calidad de los recursos. (Hernández, 2023)

Como respuesta a este desafío y con el propósito de disminuir el impacto de la escasez de agua, una de las propuestas consideradas como viables es el uso de las aguas subterráneas.

El agua subterránea representa el 30% del agua dulce disponible en el mundo y el 98% del agua dulce no congelada disponible, es más abundante que el agua superficial y puede utilizarse para diversos fines. Aproximadamente un tercio de la extracción mundial de agua dulce proviene de fuentes subterráneas destinadas para usos agrícolas (42%), domésticos (36%) e industriales (22%), y esta se ha convertido en una importante fuente de agua, dando una luz de esperanza ante la necesidad de dicha demanda. (Lina M. Cerón, 2021, pág. 49)

A pesar de su enorme importancia, este recurso natural a menudo se subestima y como resultado se gestiona mal e incluso se sobreexplota. Por lo que es importante no pasar por alto su potencial y la necesidad de una gestión cuidadosa y adecuada, ya que representan la única forma viable y asequible de ampliar el acceso al agua básica para la mayoría de las poblaciones rurales de bajos ingresos en todo el mundo. (Richard Connor, 2022, pág. 4)

Para América Latina y el Caribe la escasez de agua representa un peligro, ya que impacta no solamente en la agricultura, sino también la generación de electricidad, así como también en el abastecimiento para uso doméstico, minero e industrial. Ballesteros (2015) afirma “que, aunque América Latina cuenta con casi un tercio de los recursos hídricos de la Tierra, en los últimos años, ha demostrado repetidamente que las reservas de agua no son suficientes para satisfacer las necesidades de la población” (P. 7). Ya que, en algunas áreas, el 35% de la población vive en estrés hídrico elevado o extremadamente elevado. Esto se debe principalmente a la sequía, a la explotación de los acuíferos, la contaminación del agua y el aumento general

e indiscriminado de la demanda, lo que conlleva consecuencias negativas como escasez de alimentos, desplazamientos de población y pérdida de biodiversidad. (Sosa, 2023, pág. 34)

La auditoría de gestión ambiental practicada a la División Metropolitana del Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados (SANAA) en Honduras, el aumento en la demanda de recursos hídricos y la reducción en la disponibilidad de algunos recursos naturales (superficiales y subterráneos) van alterando los ecosistemas e inician los procesos de degradación en las zonas productoras de agua, poniendo en peligro tanto la cantidad como su calidad. Por lo tanto, el crecimiento poblacional y el incremento de la agricultura en el área donde se encuentra ubicada la subcuenca del Río Grande o Concepción, afecta de forma directa a uno de los suministros que abastece la ciudad de Tegucigalpa, mayormente durante los periodos secos, ya que dicha subcuenta forma parte de los dos suministros principales con que cuenta la ciudad, y durante estas épocas del año los niveles de sus fuentes superficiales son bajos. Todo lo anterior implica una alta demanda para satisfacer los diferentes usos que necesita la población de dicha región, creando los escenarios propicios para una mala gestión de los recursos naturales. (Fernández, 2005).

Como el agua subterránea es una fuente alternativa de suministro ante la problemática antes expuesta, se sugiere la necesidad de hacer un modelo conceptual hidrogeológico que describa el movimiento de flujo y sus características químicas y geológicas, que permitan conocer el grado de contaminación utilizando los resultados de laboratorio de aniones, cationes, nutrientes, metales pesados y las posibles zonas de descarga de aguas subterráneas en la Subcuenca de Río Grande o Concepción.

2.2 Justificación de la investigación.

2.2.1 Justificación Práctica:

El agua subterránea se vuelve la alternativa más prometedora para reducir el impacto negativo en la población mundial debido al agotamiento de los recursos superficiales. Las aguas subterráneas se convierten en una fuente importante de suministro de agua porque son la fuente de agua dulce con mayor proporción en la Tierra. Esto se debe a su alta calidad y a la menor exposición a la contaminación humana. (Lina M. Cerón, 2021)

La subcuenca Río Grande o Concepción, ubicada en los municipios de Distrito Central, Ojojona y Lepaterique, dentro de ella se encuentra la represa Concepción, que es una fuente importante para el abastecimiento de agua, ya que esta abastece la parte sur y este del Distrito Central (JICA, 2021).

Esta investigación servirá de ayuda para las organizaciones encargadas del manejo de los recursos hídricos, como ser Junta de Aguas, Unidades Ambientales Municipales (UMA), Instituto de Conservación Forestal

(ICF), Ente Rector de Servicio de Agua Potable y Saneamiento (ERSAPS), Unidad Municipal de Agua Potable y Saneamiento (UMAPS), CONASA, Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente, y otras.

Considerando dichas alternativas, el modelo hidrogeológico conceptual en la Subcuenca del Río Grande o Concepción propuesto por este estudio, pretende dar a conocer el movimiento de flujo de las aguas subterráneas y las características del subsuelo de la subcuenca durante el año 2022, lo cual fortalecerá el área de los recursos hídricos de la región. También aportará una sustentación teórica que sirva de referencia a investigaciones futuras, ya que luego de una exhaustiva revisión bibliográfica, se cuenta con muchos vacíos o poca disponibilidad de información sobre estudios hidrogeológicos existentes.

2.2.2 Límites de la investigación

El área de estudio corresponde a la Subcuenca del Río Grande o Concepción con jurisdicción en los municipios de Distrito Central, Ojojona y Lepaterique, con coordenadas 13° 59' 34"N, 87° 16' 58"W.

Esta investigación es realizada con la información y patrocinio brindado por el Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra (IHCIT).

A continuación, se describen las limitaciones de tiempo, espacio y recurso de la investigación:

2.2.3 Límite de tiempo:

El modelo hidrogeológico conceptual de la Subcuenca Río Grande o Concepción, tiene una duración de un año, que abarca desde el año 2021 al 2022, donde se llevó a cabo siete sondeos geofísicos realizados en julio de 2022 en época Lluviosa, en estos sondeos, se utilizó el método de tomografía eléctrica.

2.2.4 Limite de espacio o territorio:

La investigación tiene como área de estudio la Subcuenca de Río Grande o Concepción, la cual forma parte de la cuenca de Río Choluteca, comprendida geográficamente dentro de los municipios de Distrito Central, Ojojona y Lepaterique, teniendo un área de 140.97 km² por lo que esta investigación hidrogeológica está circunscrita a ese espacio.

2.2.5 Limite de recursos:

En esta investigación hay limitantes debido a factores financieros, de seguridad y de equipo.

Debido a los limitados recursos económicos y a que el presupuesto utilizado son recursos propios para esta investigación no se pudo realizar muestreo de agua, ni medición de niveles de pozos, y por ello los datos usados para los análisis piezométricos e hidrogeoquímicos fueron obtenidos de la base de datos que tiene el Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra del año 2021.

La gestión para la realización de los sondeos geofísicos fue llevada a cabo por medio de la coordinación de la maestría, la cual ayudó a que el Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra nos prestara un equipo geofísico para la toma de datos y procesamiento de estos mismos, pero la logística de transporte y demás se realizó con recursos económicos propios limitados.

La poca accesibilidad y disponibilidad restringida por parte de los propietarios para la elaboración de los sondeos también representó una limitante para esta investigación.

2.3 Definición del Problema:

La escasez de agua ocurre cuando la demanda de agua dulce excede el suministro de agua dulce en una región determinada, aunque se puede esperar que la escasez de agua aumente con casi cualquier forma de desarrollo económico, muchas de sus causas pueden predecirse, prevenirse o mitigarse si se identifican adecuadamente. (FAO, 2013)

El crecimiento de la población mundial, el rápido desarrollo agrícola y el mayor uso industrial han llevado a un aumento constante de la demanda de agua subterránea. El mayor uso de aguas subterráneas ha ayudado a mejorar la vida de millones de personas en el mundo en zonas rurales, como urbanas, pero también ha provocado el agotamiento a largo plazo de los acuíferos, la contaminación de las aguas subterráneas (Atómica, 2023). Costa Posada (2015). Afirma que “el seguimiento a la sostenibilidad del uso del agua es fundamental para orientar la gestión pública y privada del recurso hídrico hacia un desarrollo sostenible” (p.104).

De Centroamérica, Honduras es uno de los países que más depende del agua subterránea, con un aprovechamiento que varía entre el 60 al 80% para uso doméstico, industrial y agrícola, es por esta razón que la generación de modelos conceptuales hidrogeológicos es una prioridad para nuestro país y para el desarrollo futuro de nuestros recursos naturales, que cada vez son más escasos (UNAH-IHCIT, 2015).

El Distrito Central utiliza recursos hídricos superficiales como su principal fuente de abastecimiento, pero en los últimos años, estos se han reducido debido a actividades realizadas dentro de las cuencas y variabilidad climática. Como consecuencia de ello, el uso del agua subterránea ha incrementado en varios sectores (UNAH, 2015). Según el Instituto Nacional de Estadísticas, en los últimos 20 años la población del Distrito Central ha aumentado más del doble, razón por la que los racionamientos de agua se hacen más frecuentes. (INE, 2019)

El Distrito Central cuenta con una de las principales cuencas hidrográficas como lo es, el Río Choluteca, compuesto a su vez por las Subcuencas del Río Guacerique, Río Grande, Río Sabacuante, Río Tatumbula y Río

Chiquito, decretadas oficiales por el Instituto Nacional de Conservación y Desarrollo Forestal, Áreas Protegidas y Vida Silvestre (ICF, 2022).

Tomando en cuenta dichos recursos hídricos, el presente estudio se centra en un modelo hidrogeológico conceptual como una herramienta para la toma de decisiones y planteamientos de políticas, encaminadas a la conservación y preservación del recurso de las fuentes cercanas a la ciudad capital.

La represa La Concepción abastece el 45% del agua de la ciudad de Tegucigalpa, la cual se encuentra ubicada dentro de la subcuenca Río Grande o Concepción, convirtiéndose por esta razón en objeto de estudio de esta investigación. (Berrios, 2014).

Un modelo hidrogeológico conceptual es una herramienta que aporta conocimiento acerca del sistema hídrico, usualmente contiene la información sobre la geometría de acuífero, la caracterización geológica, piezométrica, hidrogeoquímica, el balance hídrico, entre otras. En esta investigación solo se toma en cuenta la información hidrogeoquímica, piezométrica, geológica y balance hidrometeorológico ya que no se cuenta con la disponibilidad de recursos económicos que permitan la investigación total de las características antes mencionadas.

Por lo tanto, la falta de la información se vuelve un limitante, ya que de contar con más registros de pozos, nivel freático en la zona de estudio, más datos sobre la hidrogeoquímica, así como más información geológica e hidrogeológica, podría aportar una mayor comprensión del subsuelo y convertir este modelo conceptual en términos de gestión sostenible de recursos hídricos, como una herramienta más eficaz al permitir predecir las consecuencias de los cambios en el uso de la tierra, el clima y la disponibilidad de las aguas subterráneas.

3. CAPITULO II: Objetivos

3.1 Objetivo general:

- Elaborar un modelo hidrogeológico conceptual de la Subcuenca de Río Grande o Concepción como herramienta para el manejo de los recursos hídricos subterráneos.

3.2 Objetivos específicos:

- Caracterizar la geología de la Subcuenca Río Grande o Concepción.
- Identificar las unidades acuíferas y no acuíferas, mediante el método de Tomografía Eléctrica.
- Inferir la dirección del flujo subterráneo y niveles de pozos.
- Determinar las características hidrogeoquímica del agua de fuentes superficiales y subterráneas de la Subcuenca de Río Grande o Concepción.
- Calcular la disponibilidad de agua subterránea mediante un balance hidrometeorológico anual.

4. CAPITULO III: Marco de Referencia

4.0. Marco Teórico

4.1. Modelo hidrogeológico conceptual

El modelo hidrogeológico conceptual está compuesto por información geológica, geofísica, hidrogeoquímica, piezométrica, que puede ser utilizada para obtener resultados de geología estructural, composición del subsuelo, dirección de flujo y características hidrogeoquímica.

“Un modelo hidrogeológico conceptual es un esquema lógico que trata de predecir el comportamiento del flujo del agua, determinar recursos explotables y prever posibles impactos ambientales sobre el sistema de aguas subterráneas” (Osorio, 2015, p.19).

4.2. Geología

La geología es una parte importante en un estudio hidrogeológico porque nos permite identificar los componentes y sus capacidades de almacenamiento y transporte de agua. Se puede definir como la ciencia que estudia todos aquellos fenómenos naturales, así como su origen e interrelaciones mutuas, que se producen en el planeta Tierra, ya sea bajo la superficie terrestre, o en ella misma (Custodio, E.; Llamas, M. R., 2001).

4.2.1 Geología estructural

La geología estructural estudia y describe las deformaciones de la corteza y el manto superior de la tierra (Ghiglione, 2019). Es necesario identificar las estructuras geológicas de la zona de estudio, tales como fallas, diaclasas y pliegues, para una mejor interpretación del medio geológico del lugar.

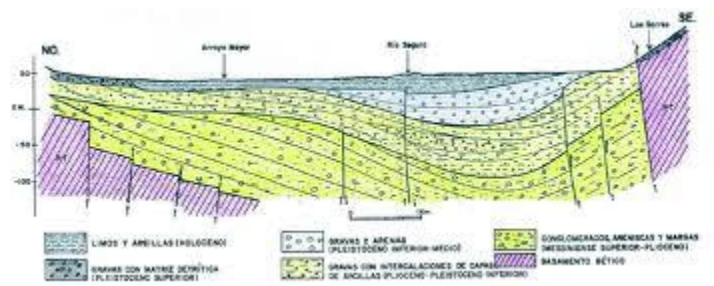


Ilustración 1: Ejemplo de una estructura Geológica. Tomado de (Rodríguez R., 2011)

4.2.1.1 Falla

Podemos definir a una falla como una discontinuidad que se forma debido a la fractura de grandes bloques de rocas en la Tierra cuando las fuerzas tectónicas superan la resistencia de las rocas (IMPRES, 2014).

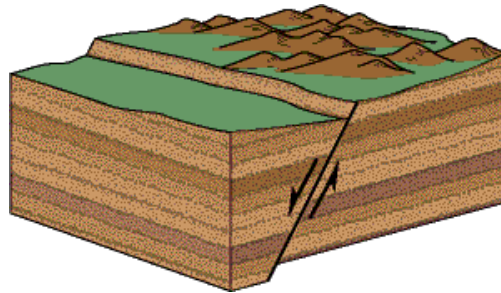


Ilustración 2: Ejemplo de una falla geológica. Tomada de (Russell, 2010).

4.2.1.2 Diaclasas

Las diaclasas son fracturas o superficies de discontinuidad que parten la roca en bloques más pequeños y a lo largo de las cuales no hay desplazamiento. Las diaclasas son de gran importancia en un estudio hidrogeológico debido a que determinan muchas veces el comportamiento hidrológico de una roca (Custodio E., 2001)

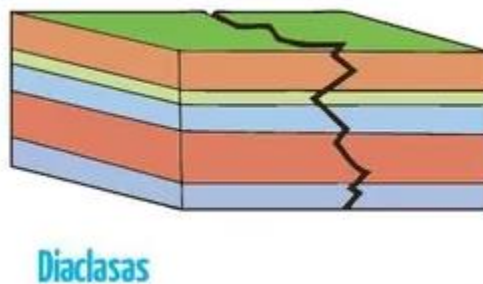


Ilustración 3: Ejemplo de una Diaclasa. Tomada de (Ortega, 2018).

4.2.1.3 Pliegues

Un pliegue es una estructura geológica que se forma por la deformación del medio rocoso (Suarez, 2019).

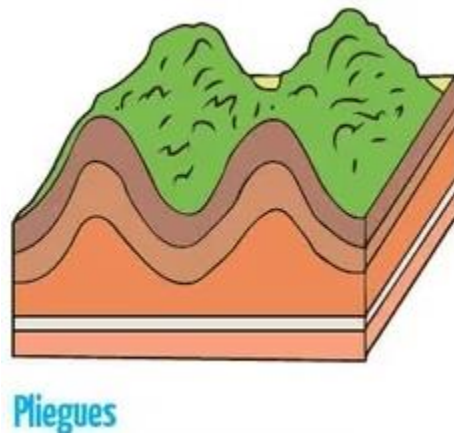


Ilustración 4: Ejemplo de un Pliegue. Tomado de (Ortega, 2018).

4.3 Geofísica

La geofísica es la rama del estudio de la tierra desde el punto de vista de la física, donde se realizan mediciones sobre la tierra para inferir la composición del subsuelo se miden por algún parámetro físico como la velocidad de las ondas mecánicas (sísmicas) o cambios en el campo gravitatorio (campo gravitacional) provocados por diferencias de densidad o la intensidad de la corriente más o menos relacionada con la propagación de cargas eléctricas (geoeléctrica) (Gomez, 2009).

Los métodos geofísicos pueden ser utilizados para la solución de problemas geológicos que estén conectados con la hidrogeología y es de gran importancia conocer los límites de cada método geofísico, así como también, tener el conocimiento de cómo se utiliza para poder obtener resultados asertivos. Gran parte de los problemas que se proyectan en hidrogeología requieren de un conocimiento del subsuelo en una interpretación vertical, unido al rol que toma el agua con la resistividad de las rocas, por lo cual podemos considerar que el método de resistividad eléctrica es uno de los métodos más utilizados para la resolución de problemas relacionados con la hidrogeología.

4.3.1 Método eléctrico

Este método emplea aplicación de corriente eléctrica y la resistividad para analizar variaciones de las propiedades eléctricas de las rocas y minerales, debido a que la finalidad de la resistividad es encontrar y localizar cuerpos y estructuras geológicas. Regularmente, aplican un campo artificial eléctrico creado en la superficie que transmite una corriente en el subsuelo. Los resultados permiten definir los límites del acuífero, el nivel del agua en los acuíferos, la presencia de agua salada y la cartografía de las unidades litológicas. Se aplican como métodos para el reconocimiento y detalle, sobre todo para la exploración de aguas subterráneas.

Los objetos con conductividad eléctrica se pueden dividir en metales y semiconductores. Todos los cuerpos son eléctricamente conductores, ya que permiten, más o menos, el paso de los portadores de carga eléctrica y estos portadores pueden ser electrones o iones que distinguen dos tipos de conductividad: conductividad iónica y conductividad electrónica.

Cuando la roca contiene una cantidad considerable de minerales semiconductores puede considerarse conductora, es decir, solo los minerales metálicos son conductores. Todas las rocas tienen más o menos poros, que suelen estar ocupados total o parcialmente por electrolitos, lo que significa que, en su conjunto, la roca se comporta como un conductor iónico y su resistividad depende de la situación. La resistividad de las rocas puede variar mucho según el contenido del agua, la salinidad y la distribución de los poros.

El suelo es una mezcla de roca, gas, agua y otros materiales orgánicos e inorgánicos; esta mezcla hace que la resistividad del suelo dependa de su composición inherente y de otros factores externos, como temperatura, humedad, presión, etc. Estos factores pueden hacer que el mismo suelo presente diferentes resistividades a lo largo del tiempo. Entre todos, la humedad es la más importante, porque cambia más fácilmente por el agua de lluvia o el riego en el suelo, y en una misma área de terreno, los distintos grados de humedad conducirán a diferentes resistividades, lo que puede llevar a una mala interpretación de los materiales constituyentes del suelo (Gasulla, 1999).

4.3.1.1 Medidas de resistividad en el suelo

La resistividad eléctrica es cuando se aplican corrientes alternas de baja frecuencia en la superficie del suelo y la diferencia de potencial se mide entre dos puntos. Las variaciones en la resistividad nos brindan información sobre la estructura y los materiales del subsuelo (Burger, 1992).

Las medidas de resistividad en el suelo que se toman en campo se realizan con diferentes arreglos de electrodos colocados con una estructura determinada. Los electrodos que se utilizan para una medición de resistividad son Wenner, Schlumberger, o dipolo-dipolo, los cuales se ilustran a continuación:

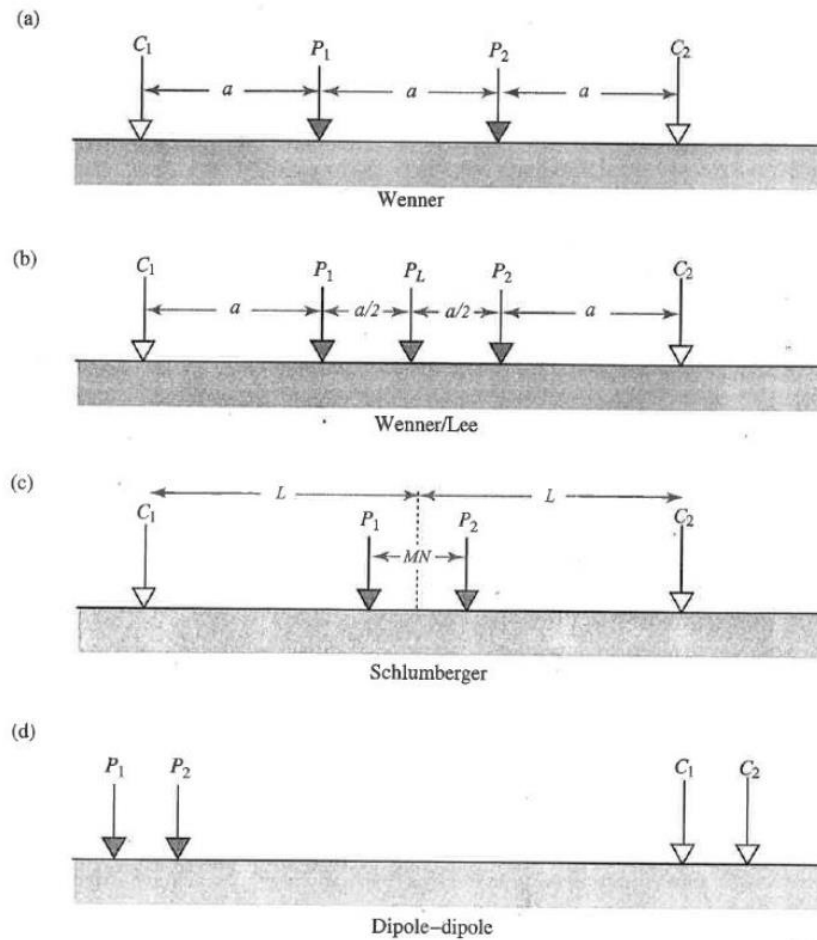


Ilustración 5: Geometrías de electrodos más comunes utilizadas en resistividad. Tomado de (Burger, 1992)

El valor de la resistividad (ρ) es uniforme, cuando la resistividad real del suelo es de composición homogénea. La ρ que se obtiene es una mezcla de las resistividades de varios materiales. Por lo tanto, el valor calculado se llama resistividad aparente (ρ_a). A continuación, se describe la fórmula en la ecuación 1.

$$\text{Ecuación 1: } \rho_a = \frac{2\pi\Delta v}{I} \left(\frac{1}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}} \right)$$

Donde

Δv : Diferencia de potencial (V - mV)

I : Intensidad (A - mA)

r = distancia entre electrodos

Al simplificar la segunda fracción, la cual llamaremos k , queda la siguiente fórmula la cual se utiliza en campo en cada medida:

$$\text{Ecuación 2: } \rho = k \frac{\Delta V}{I}$$

La constante K se denomina coeficiente geométrico del dispositivo, porque depende solamente de las distancias entre los cuatro electrodos. Si está trabajando a una distancia predeterminada, el valor de K ya se ha calculado.

4.3.1.2 Tomografía Eléctrica

“Es una técnica geofísica aplicada a la ingeniería y en exploración de recursos naturales, ya que permite determinar las variaciones de resistividad y conductividad eléctrica de las rocas y suelos” (Bernal, 2019, p.5). La resistividad es una medida de la resistencia de un material al flujo de corriente eléctrica, medida en ohmios-metros. En general, consiste en inyectar una corriente de fuerza conocida en el suelo a través de electrodos fijados a distancias iguales a lo largo del circuito, ver ilustración 2 (Muñoz, 2021).

4.3.1.3 Interpretación de Tomografía Eléctrica

Desde el punto de vista hidrogeológico, su finalidad es interpretar el sondeo eléctrico vertical y así generar un modelo de composición del suelo en profundidad, que también pueda diferenciar los tipos de rocas e identificar formaciones con base en diferencias en resistividad.

El propósito del método es obtener una sección transversal bidimensional de resistencia real en el subsuelo, con esto podemos determinar si existen filtraciones de agua en la parte profunda del suelo.

El método tradicional requiere solo 4 electrodos alineados a igual distancia entre sí que se introducen en el terreno, donde pasa corriente continua por dos electrodos (A, B) los cuales están conectados a un miliamperímetro, y los otros dos electrodos (M, N) están conectados a un milivoltímetro, para medir la diferencia potencial entre estos dos puntos, a partir de esto podemos calcular el valor de la resistencia en el punto medio del dispositivo y a una profundidad determinada. Existen varias configuraciones para colocar 4 electrodos, las más utilizadas son Wenner, Schlumberger, Wenner-Schlumberger, Dipolo-dipolo ver ilustración 3 (Crio, 2009).

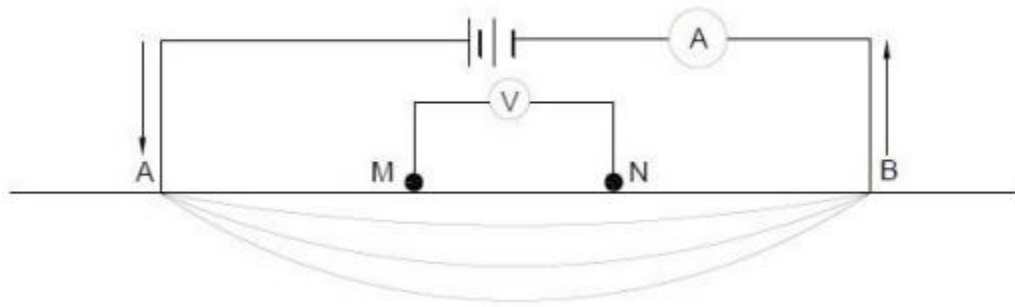
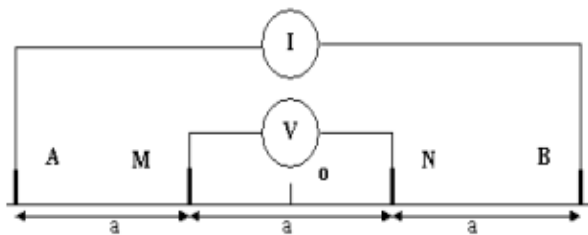
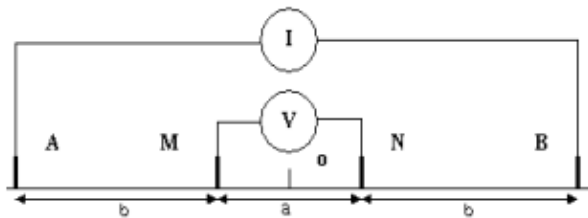


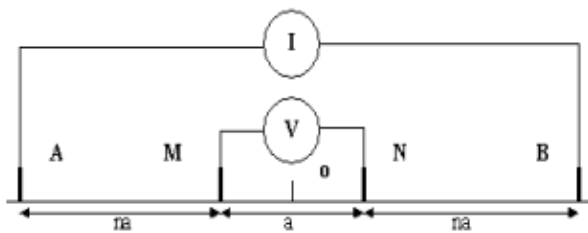
Ilustración 6: Esquema de aplicación de corriente eléctrica al terreno. Tomado de (Huitzil, 2015)



WENNER α



SCHLUMBERGER



WENNER-SCHLUMBERGER

$n = 1 \Rightarrow$ Wenner
 $n \geq 2 \Rightarrow$ Schlumberger

Ilustración 7: Esquema de los dispositivos electródicos más habituales en los métodos de resistividad. Tomado de (Crio, 2009)

A diferencia de los métodos tradicionales, la tomografía electrónica se caracteriza porque ahora todas las medidas se realizarán de forma totalmente automática, es decir, sin necesidad de mover manualmente ningún electrodo. Esto se debe a que, por un lado, utilizaremos una gran cantidad de electrodos en el suelo (dispuestos equidistante), por otro lado, nuestro equipo de medición resistencia, automáticamente realiza toda la secuencia. Formado así todas las combinaciones posibles de cuatro electrodos (Crio, 2009).

De esta forma, se irá obteniendo la variación de resistividad del subsuelo tanto en profundidad como lateralmente, ver Ilustración 4. Genera la capa de resistividad real que se muestra en la Ilustración 5 y luego se usan los valores de la lista de resistividad de diferentes rocas, la cual se muestra en la Tabla 1, o los valores obtenidos directamente de los afloramientos en el área de prospección (calibración) para asociar los tipos de rocas con estos valores.

Es importante recordar que, al llevar a cabo este tipo de estudio como la aplicación de la tomografía eléctrica, en la realidad no siempre se presentan medios homogéneos, al contrario, se presentan medios no homogéneos y anisotrópicos (José, 1987).

Tabla 1: Resistividades de algunas rocas y agua. Tomada de (Castrechin, 2019)

Agua o Roca	Resistividad (ohm.m)
Agua de mar	0.2
Agua de acuíferos aluviales	10-30
Agua de fuentes	50-100
Arenas y gravas secas	1000-10000
Arenas y gravas con agua dulce	50-500
Arenas y gravas con agua salada	0.5-5
Arcillas	2-20
Margas	20-100
calizas	300-10000
Areniscas arcillosas	50-300
Areniscas cuarcitas	300-10000
Cineritas y tobas volcánicas	20-100
Lavas	300-10000
Esquistos grafitosos	0.5-5
Esquistos arcillosos o alterados	100-300
Esquistos sanos	300-3000
Gneis, granito alterado	100-1000
Gneis, granito sano	1000-10000
Arcilla y limo saturado	0-100

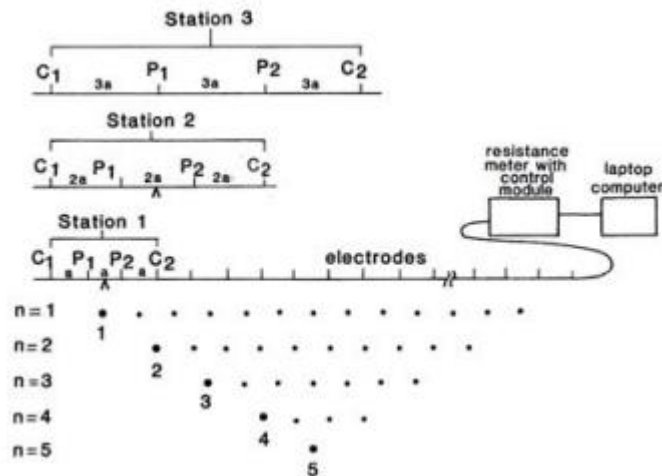


Ilustración 8: Secuencia de medidas con dispositivo Wenner. Tomado de (Crio, 2009).

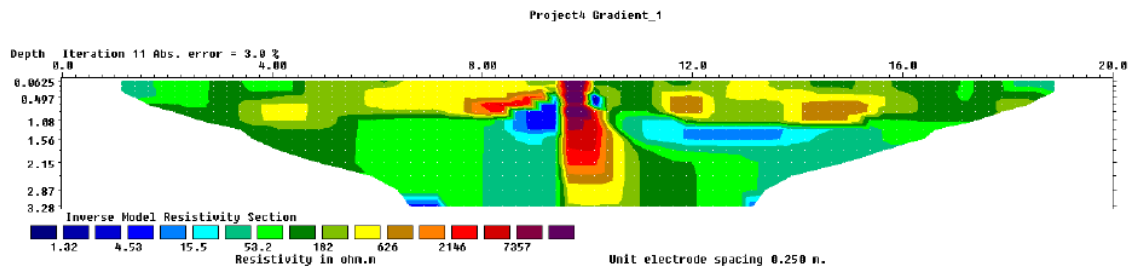


Ilustración 9: Distribución de resistividades reales tras la inversión. Tomado de (Muñoz, 2021)

4.4 Piezometría

“Una superficie piezométrica es el lugar geométrico de los puntos que indican la altura piezométrica de cada una de las porciones de un acuífero, referidas a una determinada profundidad” (Escuder, y otros, 2009).

4.4.1 Trazado de las isopiezas

“Las isopiezas son líneas que conectan en un mapa los puntos con igual nivel piezométrico, es decir, representan la misma altura a cierta profundidad” (García, 2016, pág. 55). Para realizar las curvas isofreáticas con los niveles piezométricos se debe interpolar los valores de los puntos más cercanos después se trazan líneas que unan puntos de igual piezometría, con la finalidad de obtener la geometría de la superficie que une los puntos. Con respecto a la dirección del flujo de agua es desde la línea de mayor altura piezométrica hacia la línea de menor altura en la dirección de máxima pendiente, es decir, perpendicular a ellas, por lo que se puede dibujar un vector que representa la dirección del flujo de agua (García, 2016).

Para dibujar isopiezas, interpole los valores entre puntos cercanos, luego dibuje líneas que conecten los mismos puntos piezométricos, donde cada línea de isopieza debe mostrar su valor. Las isopiezas representan la topografía de la piezometría o nivel piezométrico del lugar a evaluar. Las líneas del flujo del agua deben de trazarse perpendiculares a las líneas de la isopiezometria. Es importante tener en cuenta al momento de trazar las isopiezas las condiciones de borde, hay que distinguir si es un borde impermeable o permeable como se describe a continuación:

Borde impermeable:

“Un borde impermeable se considera como una línea de flujo” (Escuder, et al., 2009).

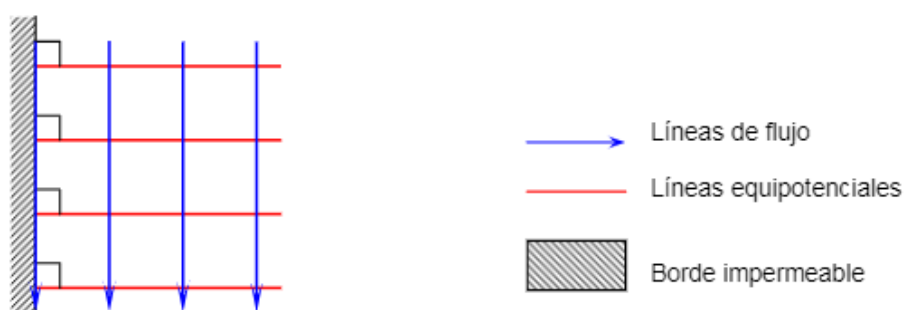


Ilustración 10: Borde impermeable. Tomado de (Escuder, et al., 2009)

Borde Permeable: “ Un borde permeable se considera como una línea de potencial hidráulico constante” (Escuder, et al., 2009).

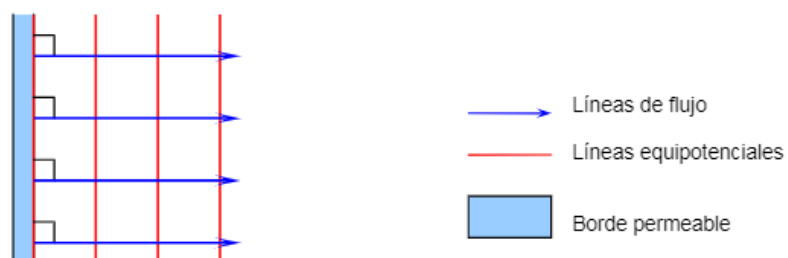


Ilustración 11: Borde Permeable. Tomado de (Escuder, et al., 2009)

4.5 Hidrogeoquímica

La hidrogeoquímica es una gran herramienta para los estudios hidrogeológicos muy complejos, con su investigación se pueden lograr detectar fuentes de contaminación, estimación de periodos de recarga, así como el flujo de agua subterránea y su evolución. Para ello, se realiza el análisis mediante características fisicoquímicas e isotópicas. La hidrogeoquímica brinda la siguiente información al modelo hidrogeológico conceptual: determina las zonas de recarga y descarga, así como la dirección del flujo e interconexión de aguas superficiales y subterráneas.

La información de los parámetros que se detallan a continuación se extrae de las siguientes fuentes: (E Custodio; Llamas, 2001), (Fetter, 2000), (porras, y otros, 1985).

4.5.1 Características físicas

4.5.1.1 Temperatura

La temperatura es un potencial calorífico que se representa en unidades de grados centígrados (°C), aunque en países anglosajones se representa en grados Fahrenheit (°F). La temperatura del agua subterránea cambia muy poco porque responde a la temperatura media anual del lugar (porras, y otros, 1985).

Las mediciones de temperatura deben tomarse en el sitio lo antes posible para evitar el calentamiento o enfriamiento. Debe asegurarse que la muestra represente la temperatura del agua en el acuífero y no la temperatura del agua dentro de la tubería colectora.

La distribución espacial de la temperatura en el acuífero depende la conductividad térmica e hidráulica del medio, relación longitud/profundidad, nivel freático y de la relación de temperatura ambiente en relación con el área de recarga y descarga, y otro.

4.5.1.2 Conductividad

La conductividad es la que tiene la capacidad del agua para conducir electricidad. A medida que aumenta la concentración de iones, también aumenta, hasta cierto punto, la conductividad, limitando la capacidad del agua de conducir la corriente eléctrica. Las unidades están dadas en $\mu\text{S}/\text{cm}$ o $\mu\text{mhos}/\text{cm}$. El cambio en la temperatura cambia significativamente la conductividad. Para aguas dulces, la conductividad oscila entre los valores de 100 a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a 18°C, y en salmueras puede alcanzar valores de 100000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Como la conductividad aumenta con la temperatura se puede tomar como valores de referencia, una temperatura de 18°C o una de 25°C y esta crece 2% por cada °C que aumente la temperatura (E Custodio; Llamas, 2001).

A continuación, se muestran algunos valores de conductividad para diferentes tipos de aguas (Tabla 2).

Tabla 2: valores de conductividad eléctrica para diferentes tipos de agua. Tomado de (Gómez, 2009).

Muestra	$\mu\text{S/cm}$
Agua pura	0.055
Agua destilada	0.5-5
Agua lluvia	15-30
Agua subterránea potable	30-2000
Salmuera	> 100000

4.5.1.3 Turbidez o turbiedad

La turbidez es la dificultad que tiene el agua para transmitir la luz. Puede medir el contenido de sustancias coloidales muy finas en la suspensión que son difíciles de sedimentar y filtrar (porras, y otros, 1985).

4.5.1.4 PH

El parámetro que se toma para medir la acidez del agua es el pH, para agua neutra, el valor de pH = 7, para agua ácida es pH <7 y para aguas básicas el valor de PH debe ser mayor que 7. El pH es de mucha importancia en procesos químicos y biológicos en el agua subterránea. Es fácil de modificar, por lo que debe determinarse en el muestreo (E Custodio; Llamas, 2001).

El valor de pH aumenta hasta un 8% con el aumento de temperatura, por lo que debe consultar la medición de la temperatura in situ. En términos generales, el pH del agua es el valor natural que está entre 6,5 y 8, pero la excepción es que varíe entre 3 y 11 (Custodio E., 2001).

Hay efectos agresivos cuando el pH del agua es menor de 7 y cuando el valor es mayor de 9, puede causar inconvenientes en plantas y animales como los peces. En la tabla 3 se presentan valores más comunes de pH.

Tabla 3: Valores más comunes de pH. Tomado de (Gómez, 2009).

Sustancia/Disolución pH	pH
Disolución de HCl 1 M	0
Jugo gástrico	1.5
Jugo de limón	2.4
Refresco de cola	2.5
Vinagre	2.9
Jugo de naranja o manzana	3.0
Cerveza	4.5
Café	5.0
Té	5.5
Lluvia ácida	<5.6
Saliva (pacientes con cáncer)	4.5 a 5.7
Orina	5.5-6.5
Leche	6.5
Agua pura	7.0
Saliva humana	6.5 a 7.4
Sangre	7.35 a 7.45
Agua de mar	8.0
Jabón de manos	9.0 a 10
Amoníaco	11.5
Hipoclorito de sodio	12.5
Hidróxido sódico	5.5 a 1

4.5.1.5 Color

Se puede definir el color del agua como la capacidad de absorber cierta radiación del espectro visible. El color puede estar asociado a sustancias en solución y sustancias en suspensión. Las aguas con un color rojizo son debidas a la presencia de hierro (Fe) en ellas, si se encuentran contenidos de manganeso (Mn) el color del agua se torna de un color negro y se pone amarilla cuando con ácidos húmicos. Cuando el agua se torna de estos colores, el efecto es desagradable e indica contaminación orgánica (E Custodio; Llamas, 2001).

4.5.1.6 Dureza del agua

“Él término dureza del agua se refiere a la cantidad de sales de calcio y magnesio disueltas en el agua” (Rodríguez, 2010, p.6). En el agua subterránea la dureza del agua anda en valores entre 10 a 300 mg/l de CaCO_3 , esto puede llegar hasta 2000 o más. Actualmente, la dureza se define en términos de contenido en

Ca y Mg como dureza total. El agua se puede clasificar según su dureza, pero esta clasificación varía con la ubicación.

Las aguas con menos de 50 ppm en CO_3Ca se llaman aguas blandas, con un contenido de 100 ppm son ligeramente duras, con 200 ppm se clasifican como moderadamente duras y por encima de ese valor las aguas son muy duras (porras, y otros, 1985).

4.5.1.7 Alcalinidad

Custodio determina la alcalinidad como la capacidad que tiene el agua para neutralizar ácidos (E Custodio; Llamas, 2001). El agua, al bajar su pH cuando se le añade ácido, nos proporciona un índice de la resistencia. La alcalinidad en la mayoría de las aguas naturales es producida por iones de carbonato y bicarbonato.

Existen otros ácidos raquíuticos como el ácido silícico fosforescente, el ácido bórico y los ácidos orgánicos que pueden también favorecer significativamente el desarrollo de la alcalinidad del agua, pero en las aguas subterráneas el ácido bórico y los ácidos orgánicos aportan poco.

4.5.2 Composición química de las aguas subterráneas

Se puede decir que la composición química del agua es causada por sustancias (generalmente una sustancia inorgánica) incorporada a través de procesos naturales. Aunque las sustancias orgánicas disueltas en agua son muy comunes, su concentración es muy alta, y suele ser mucho más baja que el contenido inorgánico.

En el agua subterránea natural, la mayoría de las sustancias disueltas se encuentran en estado iónico. A continuación, describiremos las características químicas de los iones y sus sustancias disueltas más importantes.

1. Ion cloruro (Cl^-)

Las rocas, por lo común, presentan pocas proporciones de cloruro, excluyendo las evaporíticas y las de origen marino. El agua de lluvia puede ser una fuente importante de iones de Cl^- , especialmente en áreas cercanas a la costa. Las concentraciones de cloruro en el agua son de 10 a 250 ppm en aguas dulces y en agua de mar de 18000 a 21000 ppm. En las aguas subterráneas la concentración de cloruro es muy variable de 10 ppm a 3000 ppm (porras, y otros, 1985).

2. Ion sulfato (SO_4^{2-})

Proviene del lavado del suelo formado en el medio marino, la oxidación del sulfato está ampliamente distribuida en rocas ígneas y sedimentarias, y en la descomposición de materia orgánica. El aporte más

significativo que presenta este ion al agua subterránea es la disolución de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y anhidrita (CaSO_4) (E Custodio; Llamas, 2001).

El sulfato en agua dulce puede variar entre 2 y 150 ppm, en aguas saladas, su concentración puede llegar a 5000 ppm si existe Ca y hasta 200000 si esté asociado a Mg y Na en ciertas salmueras, en el agua de mar contiene 3000 ppm de soluto.

3. Ion bicarbonato y carbonato

Las características químicas que este presenta una relación CO_2 gas, y CO_2 disuelto, es que los iones no son oxidables ni reducibles en aguas naturales. En agua dulce, el bicarbonato varía entre 50 y 350 ppm, en el agua de mar tiene 100 ppm. En cuanto al ion carbonato, tiene una concentración de 50 ppm en aguas naturales y en agua de mar un valor de 1 ppm (Custodio E., 2001).

4. Ion nitrato (NO_3^-)

Los compuestos de nitrógeno en el agua natural están estrechamente relacionados con el ciclo del nitrógeno. La mayor parte del nitrógeno aparece en forma gaseosa en la atmósfera. En las rocas se presenta en menor cantidad, y una parte importante de este ion está en los suelos y sustancias orgánicas (porras, y otros, 1985).

5. Ion sílice (SiO_2)

Se cree que la mayoría de sílice está como SiO_4H_4 , en parte disuelta y en parte coloidal y solo una pequeña parte está ionizada. En aguas naturales, la sílice se encuentra en concentraciones de 1 a 40 ppm; en aguas bicarbonatadas sódicas tiene un valor de 100 ppm; en aguas básicas puede llegar a 1000 ppm y en aguas subterráneas pasa de 2 a 8 ppm (Custodio E., 2001).

6. Ion sodio (Na^+)

Las sales de Na^+ son muy solubles y tienden a permanecer en solución, ya que no se producen entre ellas reacciones de precipitación, como ocurre en el caso del Ca^{+2} . Sin embargo, el Na^+ puede ser absorbido en arcillas de elevada capacidad de cambio catiónico y puede ser intercambiado por Ca^{+2} , provocando una disminución de la dureza de las aguas (ablandamiento natural). El sodio contribuye mucho en la intrusión marina en acuíferos costeros. Se encuentra en concentraciones de 1 a 150 ppm en agua dulce, 10000 ppm en agua de mar y 100000 ppm en salmueras (E Custodio; Llamas, 2001).

7. Ion potasio (k)

El contenido de K^+ en las aguas subterráneas no suele sobrepasar 10 ppm, aunque en casos excepcionales puede alcanzar 100000 ppm (salmueras). Cantidades de K^+ por encima de 10 ppm, en ocasiones puede, ser indicio de contaminación por vertidos de aguas residuales (E Custodio; Llamas, 2001).

8. Ion calcio (Ca^{++})

El calcio suele ser el catión principal en la mayoría de las aguas naturales debido a la amplia gama de este en las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Un ejemplo de esas rocas son el yeso, silicato, dolomitas, calcitas, aragonita y anhidrita.

Las concentraciones de este ion en agua dulce son de 10 a 250 ppm, en el agua de mar, el contenido es de alrededor de 400 ppm, y en salmueras puede tener una concentración de calcio de 50000 ppm (porras, y otros, 1985).

9. Ion magnesio (Mg^{++})

Las características de este ion son similares a las del calcio con la diferencia que el magnesio es más soluble y se precipita menos. Tiene una concentración en agua dulce de 1 a 100 ppm y en agua de mar alrededor de 1200 ppm (E Custodio; Llamas, 2001).

Entre algunos constituyentes minoritarios entre los iones se encuentran el bromo, el flúor, manganeso, fosfato, sulfato, amonio, estroncio, litio.

4.5.3 Clasificación de iones dominantes

La clasificación por iones dominantes utiliza herramientas gráficas como por ejemplo del diagrama de Stiff, o el diagrama de Piper para su representación. El manejo y estudio de análisis químicos puede simplificarse con el empleo de gráficos y diagramas, en especial cuando se trata de hacer comparaciones entre varios análisis de aguas de un mismo lugar en épocas diferentes o de lugares diferentes. A continuación, se muestra el diagrama de Piper y Stiff.

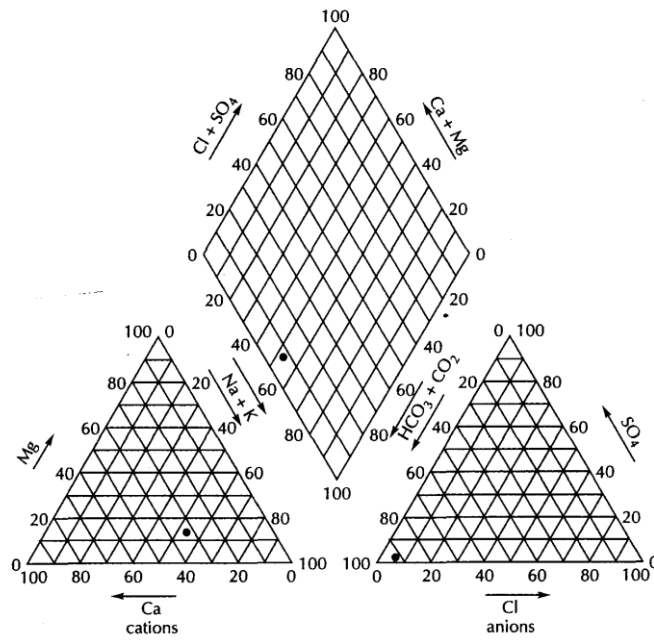


Ilustración 12: Diagrama de Piper. Tomado de (Fetter, 2000)

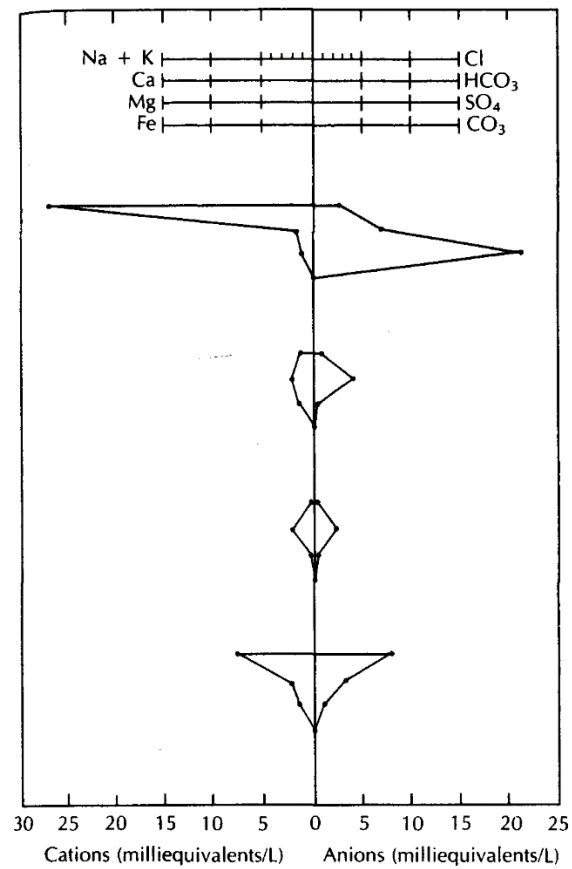


Ilustración 13: Diagrama de Stiff. Tomado de (Fetter, 2000)

4.6 Balance hídrico

“Los balances hídricos anuales permiten medir los diversos fenómenos hidrológicos en una cuenca, como la precipitación, la evapotranspiración y la escorrentía” (José Vargas, Balance hídrico mensual de una cuenca Patagónica de Chile: Aplicación de un modelo parsimonioso, 2012, pág. 32).

La ecuación del balance hídrico muestra los valores de entrada y salida de flujo, así como la variación en el volumen de agua almacenada en una zona.

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = P + Q_I - E - ETR - Q_s$$

P= precipitación

QI= aguas superficiales y subterráneas

QS= salida de agua superficial y subterránea desde la cuenca

E= evaporación desde la superficie de la masa de agua

ETR= la evapotranspiración desde el suelo y la vegetación

4.6.1 Parámetros que intervienen en el Balance Hídrico

a) Precipitación:

La precipitación es toda agua que cae de la atmósfera a la superficie terrestre. El pluviógrafo mide la cantidad, la intensidad y la duración de la precipitación, y el pluviómetro mide la cantidad de lluvia (Enmer Treminio, Balance Hidrológico de la cuenca del Río Ochomogo, 2016).

b) Evapotranspiración:

La evapotranspiración tiene en cuenta dos procesos diferentes: la evaporación y la transpiración.

“El proceso de evaporación es la conversión de agua líquida en vapor de agua. La transpiración es la exhalación del agua líquida de las plantas y el vapor liberado a la atmósfera” (Enmer Treminio, Balance Hidrológico de la cuenca del Río Ochomogo, 2016, pág. 44).

c) Temperatura:

“La temperatura es la cantidad de energía solar retenida por el aire en un momento dado. La radiación solar es el principal factor que determina la temperatura” (GWP, Balance Hídrico Superficial, 2021, pág. 11).

d) Caudal

“El caudal es el volumen de agua que fluye a través de un segmento transversal de un río o canal en la unidad de tiempo” (Enmer Treminio, Balance Hídrológico de la cuenca del Río Ochomogo, 2016, pág. 46).

Existe una variedad de métodos para calcular la Evapotranspiración, incluido el Método de George Hargreaves, el Método de Thorthwaite-Mather, el Método de García B, el Método Turco, el Método Blakney y el Método Pennman modificado. El de Thorthwaite-Mather se utilizó para esta investigación (Montaner, Aproximación por el método de Thorthwite, al calculo de infiltración de agua lluvia util, 2021).

e) El método Thorthwaite-Mather

“El método Thorthwaite-Mather se basa en el uso de fórmulas que relacionan la evapotranspiración potencial con factores del clima como la temperatura, la precipitación, la radiación solar incidente y la velocidad del viento, entre otros.” (Montaner, Aproximación por el método de Thorthwite, al calculo de infiltración de agua lluvia util, 2021, pág. 225).

Formulas

$$ETP_o = 16LA \left(\frac{10\bar{T}}{I} \right)^a$$

$$I = \sum \left(\frac{\bar{T}}{5} \right)^{1.514}$$

$$a = 6.75 * 10^{-7} * I^3 - 7.71 * 10^{-5} * I^2 + 1.79 * 10^{-2} * I + 0.4923$$

Donde:

T: temperatura media mensual en °C

I: Índice térmico mensual

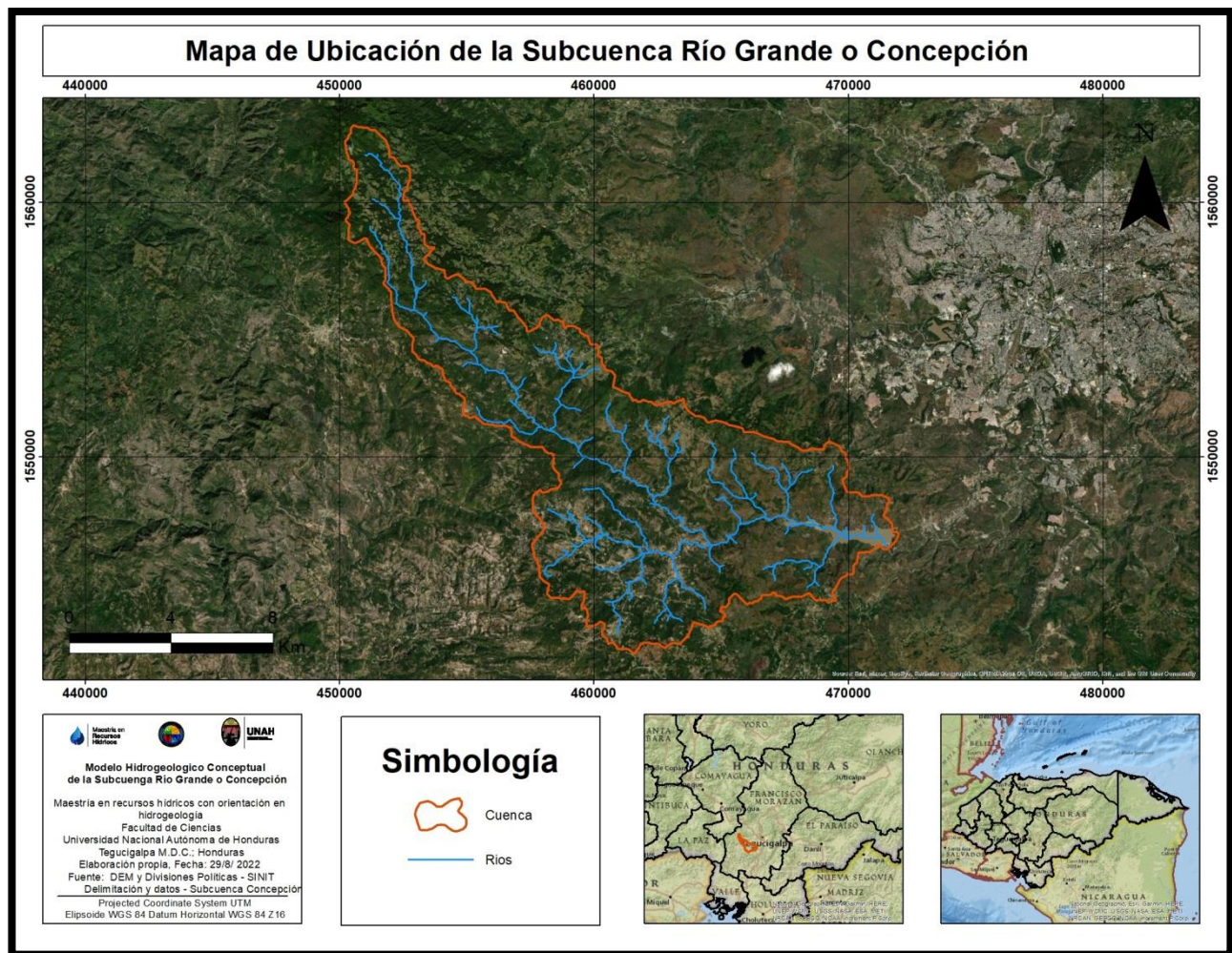
LA=coeficiente de ajuste por hora de sol de acuerdo con latitud de la estación.

5. CAPITULO IV: Descripción del medio

5.1 Situación Geográfica.

a) Ubicación

La Subcuenca del Río Grande o Concepción (según la división de subcuencas del Distrito Central) está ubicada al suroeste de Tegucigalpa, forma parte de la Cuenca del Río Choluteca con código (19) la cual desembocan en el Golfo de Fonseca, tiene elevaciones de 900 a 2248 msnm, con un área de 140.97 km² y un perímetro de 80.06 km. Dentro de la subcuenca se encuentran los municipios de Distrito Central, Lepaterique, y Ojojona.



Mapa 1: Mapa de Ubicación de Subcuenca de Río Grande o Concepción. Elaborado con el modelo de elevación digital de honduras y con la distribución cuencas del SANAA del DC en el programa ArcGIS.

El área de estudio incluye los municipios de Distrito Central, Lepaterique y Ojojona. Estos municipios se dedican a actividades económicas como la agricultura, especialmente productos de maíz, frijol, maicillo, café, verduras y legumbres, ganadería, turismo, comercio, producción artesanal y servicios. (Ricardo Matamoros, 2022).

b) Población

Dentro del área de estudio se encuentran los municipios de Lepaterique con un 34% de área el cual cuenta con aldeas Hierba Buena, La Brea, el Llano, Ojojona con un 36% el Aguacatal, Surcos de Caña, Güerisne, Circulo y Distrito Central con un 30% con aldeas la Sabana, Mateo, Concepción de Río Grande, Yaguacire, la Calera.

Según (INE, 2018), la población del municipio de Lepaterique es de 19,809 habitantes, de las cuales solo 3,852 están dentro de nuestra zona de estudio lo que representa el 19% de la población de este municipio. De los 11,167 de personas del municipio de Ojojona solo 3773 lo cual es el 34% pertenecen al área de estudio, en el Distrito Central la población se compone 43 aldeas y 538 caseríos, y sólo el 1% de los 1,259,646 habitantes se encuentran en la subcuenca.

Tabla 4:Aldeas dentro del área de estudio.

N°	Municipio	Aldea	Población
	Distrito Central		
1		La Calera	1453
2		Mateo	3778
3		La Sabana	836
4		Concepción de Río Grande	983
5		Yaguacire	6249
	Ojojona		
6		El Aguacatal	1239
7		Surcos de Caña	546
8		Güerisne	1178
9		Círculo	810
	Lepaterique		
10		Hierba buena	2377
11		La Brea	779
12		El Llano	696
TOTAL			20924

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

5.2 Descripción Biofísica

a) Clima de la región

El clima en la Subcuenca Río Grande o Concepción es tropical, al igual que en todo el territorio de Honduras y tiene un régimen de precipitación que presenta dos estaciones bien marcadas, una estación lluviosa y la otra es la estación seca. La estación lluviosa se rige en los meses de mayo a octubre, y la estación seca en los meses de noviembre hasta abril. (Argeñal, 2015, p.9)

Dentro de la Subcuenca de Río Grande cuenta con las estaciones meteorológicas La Brea instalada y operada por el SANAA desde el año 1973 y Concepción en el año 1990, las cuales se describe en la tabla 4 a continuación:

Nombre	Tipo	Código Institución	Registro de años
La Brea	PV	56901	1990-2015
La Concepción	HMO	560106	1990-2015

Tabla 5: Estaciones meteorológicas dentro de la Subcuenca de Río Grande. Tomado de SANAA.

Según los datos del SANAA la precipitación media anual en el área de la Subcuenca Río Grande es de 1,275.39 mm de acuerdo con los datos tomados en la estación meteorológica de La Brea y Concepción. La temperatura media del área de estudio es 22.8 °C, tomado de un registro de datos de la estación Concepción (SANAA, 2015).

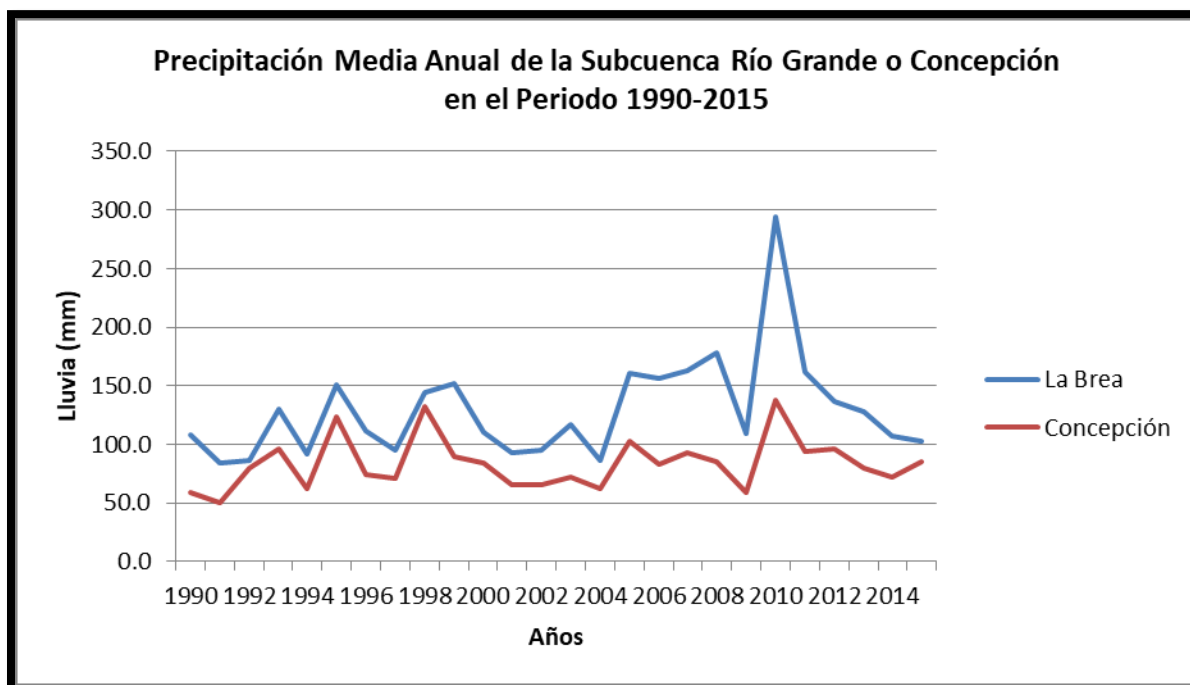


Gráfico 1: Precipitación Media Anual de la Subcuenca Río Grande o Concepción con base en datos de las estaciones de la Brea y Concepción en la serie de años de 1990-2015. Tomado del SANAA.

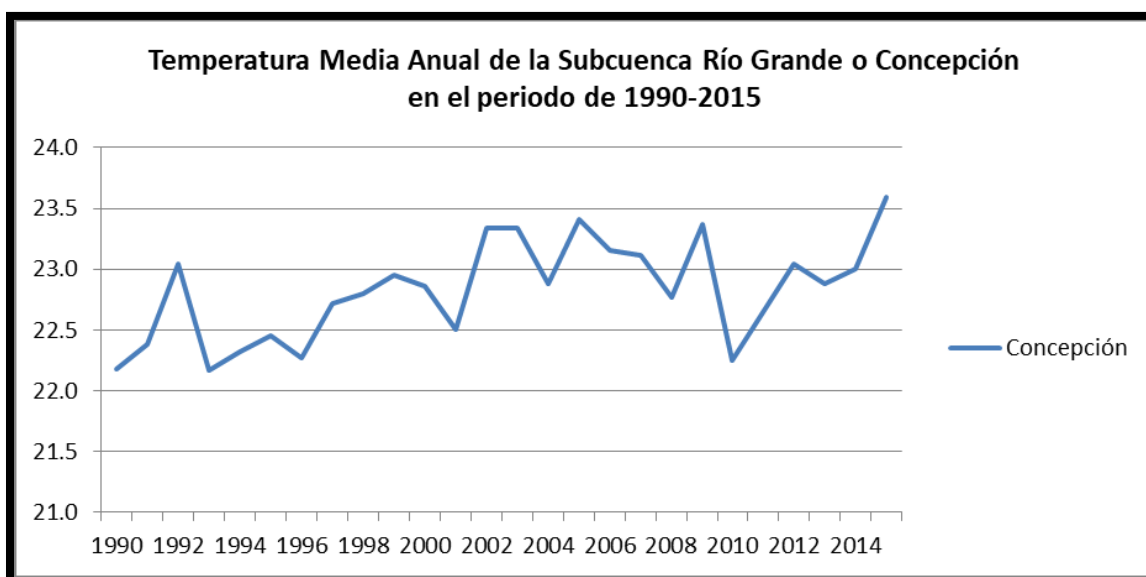
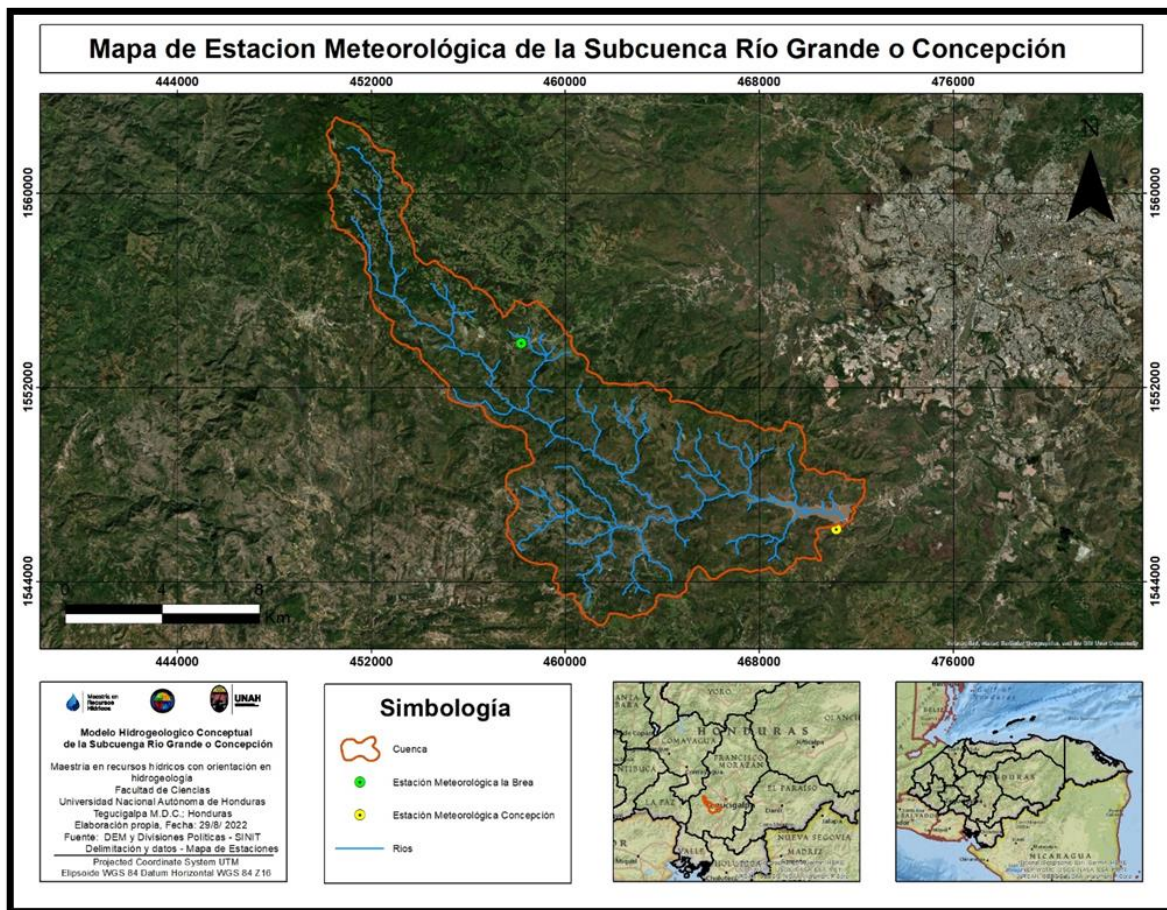


Gráfico 2: Temperatura Media Anual de la Subcuenca Río Grande o Concepción con base en datos de la estación Concepción en los años de 1990-2015. Tomado de SANAA.

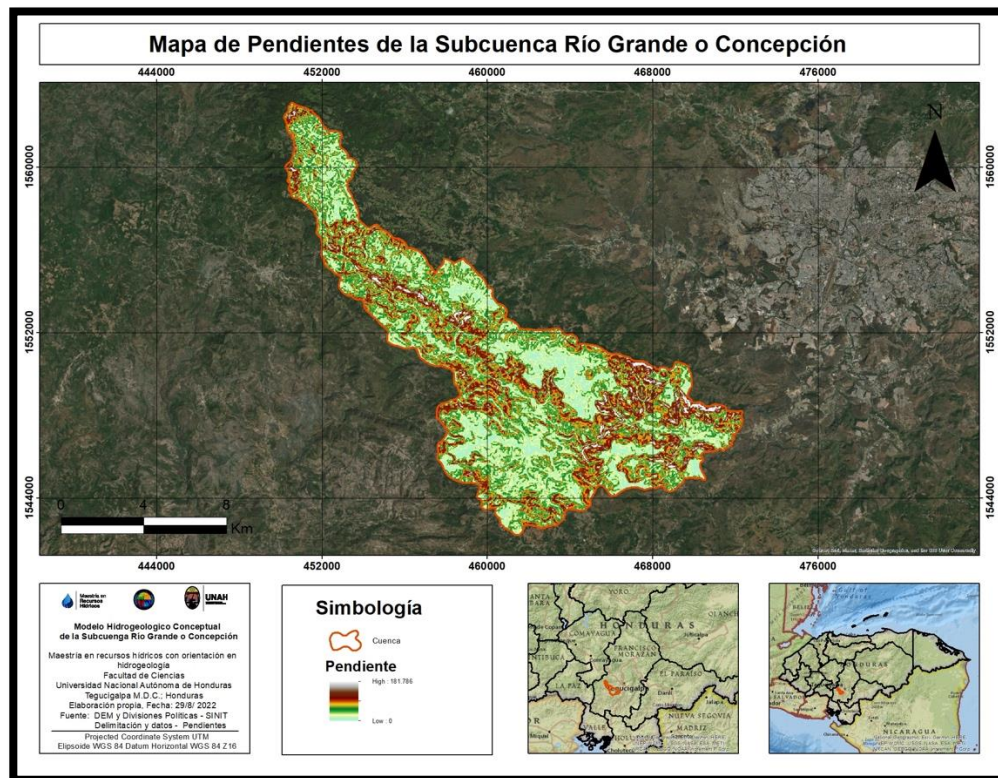


Mapa 2: Mapa de Ubicación de Estaciones Meteorológicas de la Subcuenca Río Grande o Concepción. Tomado del SANAA

b) Topografía

La topografía del área de estudio es muy accidentada, con pendientes de hasta 181% y elevaciones superiores a los 900 msnm, llegando a su parte más alta aproximadamente a los 2248 m.s.n.m. La pendiente varía de 0 a 181%, presentándose pendientes de 61 a 76% en conos basáltico y la pendiente promedio de la subcuenca es de 23.61%. Las montañas y cerros que se encuentran dentro de la subcuenca Río Grande o Concepción son:

- Montaña de la Galera
- Cerro Zacate Colorado
- Cerro Quebrada Honda
- Montaña Hierba Buena



Mapa 3: Pendientes en porcentajes

Fuente: Elaboración propia a partir de DEM y divisiones políticas SINIT.

c) Geología

Dentro de la Subcuenca de Río Grande o Concepción se encuentran Grupo Padre Miguel (Tpm), como tobas riolíticas volcánicas, capas sedimentarias de composición volcánica, lavas riolíticas y la formación Volcánicos del Cuaternario (Qv). “El Grupo Padre Miguel, están principalmente compuestos por piedras volcánicas compactadas, duras y prácticamente impermeables con poca porosidad. Se considera que estas formaciones son capas de rocas base desde el punto de vista hidrogeológico” (Jica, Informe de Apoyo-A Estudio Geológico, 2001, pag.2).

A continuación, se describe las formaciones encontradas en el área de estudio:

Las características litológicas identificadas en las Subcuenca Río Grande o Concepción corresponde a formaciones geológicas de Basalto Cuaternario, Formaciones geológicas Miembro Nueva Aldea, Las formaciones geológicas rocas volcánicas más jóvenes Y las formaciones geológicas Padre Miguel Inferior y superior. Estas formaciones geológicas forman acuíferos de fisuras con poca o moderada productividad de agua subterránea.

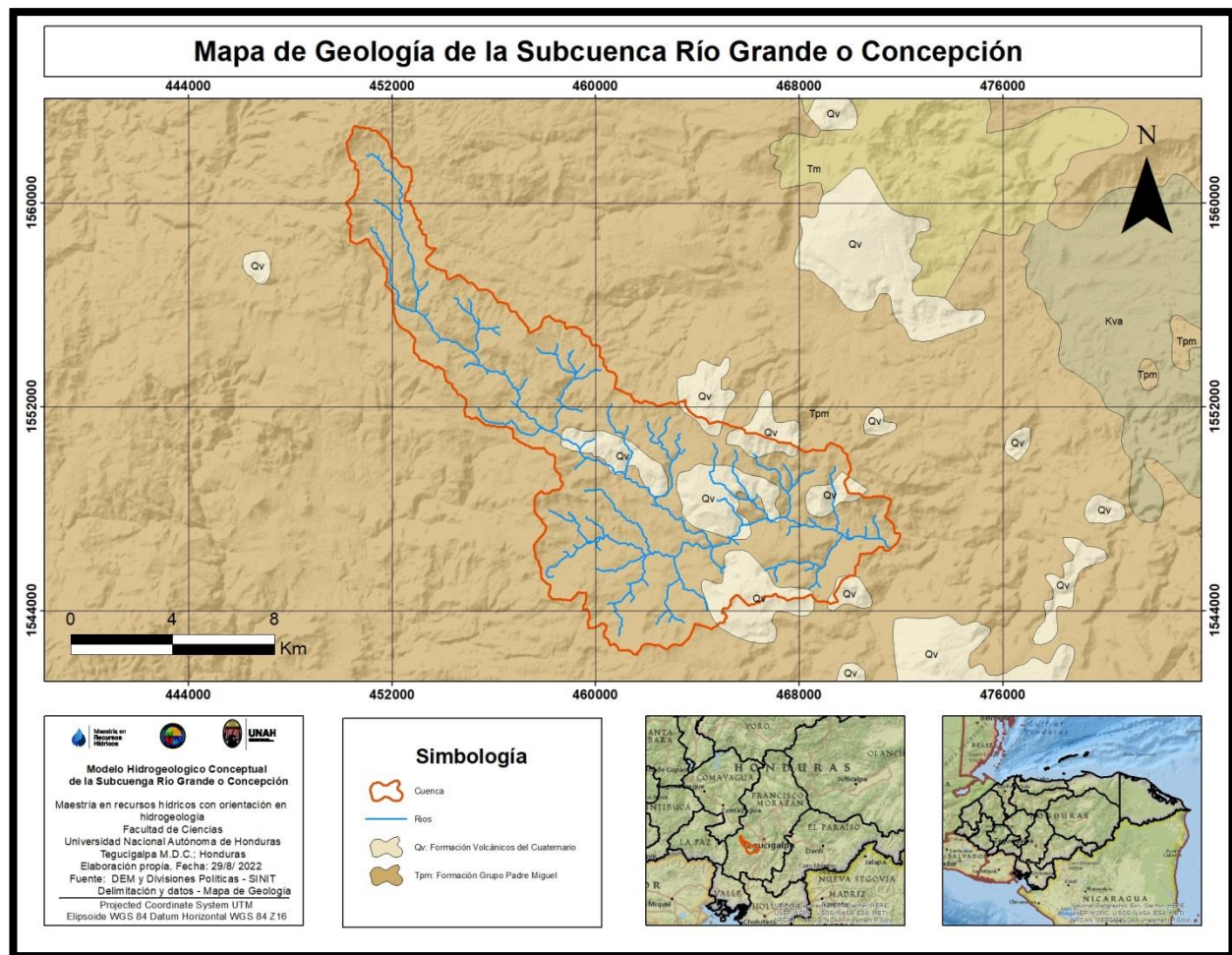
a) Grupo Padre Miguel

El Grupo Padre Miguel se caracteriza por estar formada por depósitos volcánicos de ignimbrita en su parte superior, y constituida a su vez por rocas volcánicas ácidas con escasa presencia de andesita y basalto. La formación Padre Miguel está constituida principalmente por capas de tobas e ignimbritas de color verde claro. En áreas de alta pendiente, aflora la roca poco alterada y pueden aparecer fenómenos de caída de roca, esto debido a la existencia de diaclasas en estas zonas de pendientes altas (Chirinos, Hernández, Rivera, & Valerio, 2021).

b) Volcánicos del Cuaternario

La formación Volcánicos del cuaternario se describe como “las rocas volcánicas por erupciones inmediatamente al oeste y noroeste de Tegucigalpa depositaron y dispersaron grandes cantidades de lavas basálticas de tholeiítica, donde hay olivino” (Jica, Informe de Apoyo-A Estudio Geológico, 2001, pag.10).

Según (IHCIT, 2014) los “Basaltos Cuaternarios son Coladas de basalto oscuro que presentan pequeños cristales de olivino y plagioclasa y pocas escorias piroclásticas con aspecto vesicular y vítrico (p.20)”.



Mapa 4: Mapa de geología de Subcuenca Río Grande o Concepción. Tomado de Mapa Geológico de Honduras.

c) Suelos

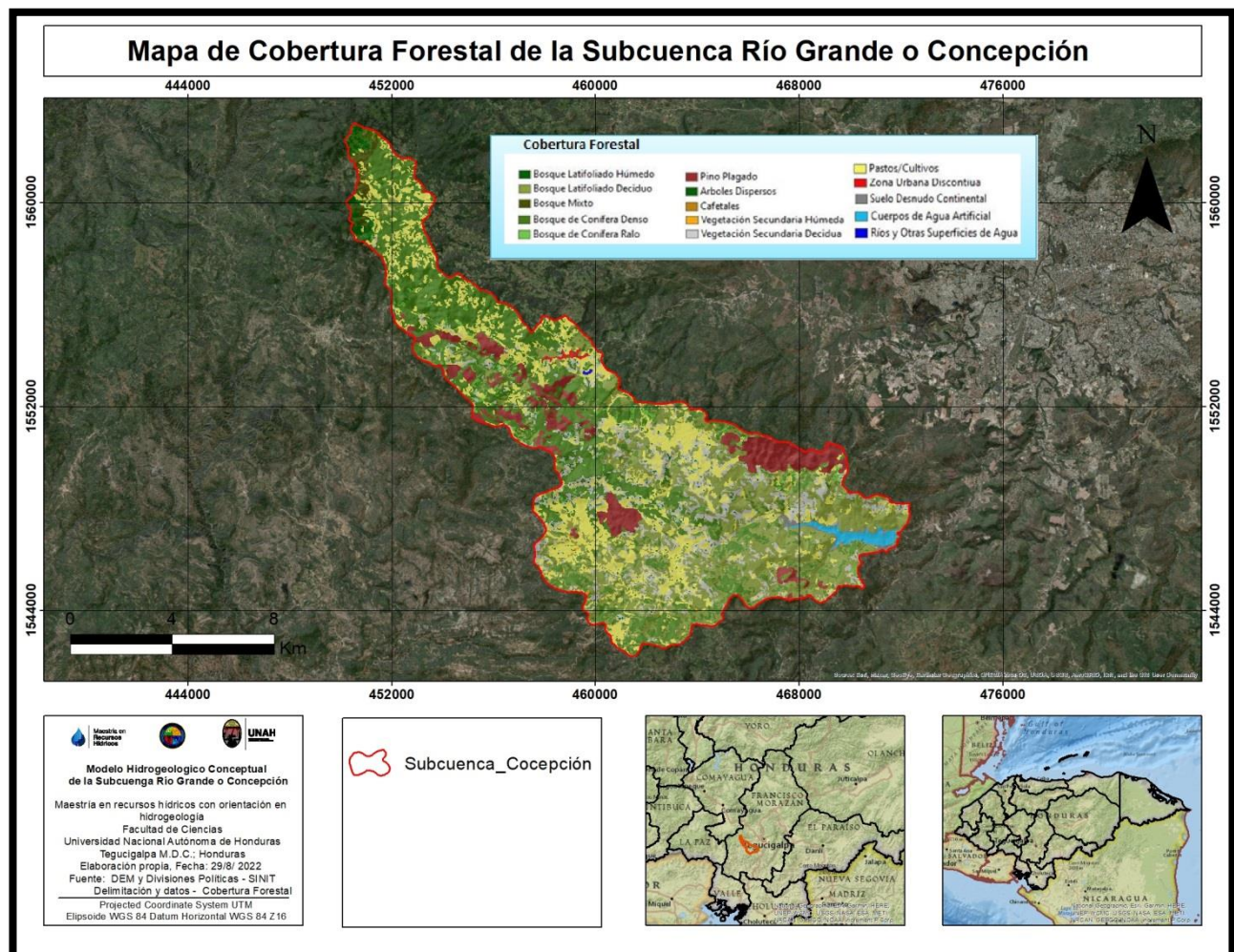
En cuanto a los suelos (Simmons, 1969), el área de estudio incluye Suelos de los Valles, los cuales comprenden la mayor parte de la superficie de Honduras y estos son aptos para el cultivo intensivo. El Cocona estos son suelos bien avenados y poco profundos formados sobre ignimbritas de grano grueso. Los Suelos Milile, estos son profundos, formados sobre cenizas volcánicas, y los Salalica al igual que los Cocona son suelos bien avenados, formados sobre rocas máficas e ignimbritas.

La subcuenca presenta suelos Litosol, Andosoles e Inceptisol con un drenaje bueno, pH de 5.5 a 6, lo cual hace que sean suelos ácidos de color café oscuro y rojizo, con pendientes menores a 15% e igual a 50%, estos suelos presentan un relieve muy ondulado y colinoso hasta escarpado, y en su mayoría llano, en cuanto la textura son de limo-arena, franco limoso y franco- arcilloso limoso.

Cabe recalcar que en el área de estudio predomina mayormente el suelo Cocona y, por ende, el suelo es Litosol.

d) Cobertura forestal de suelos

Muchos procesos físicos, químicos y biológicos tienen lugar en el suelo, lo cual es muy importante porque es el mayor reservorio de agua dulce. La cobertura forestal que comprende la Subcuenca Concepción son zona urbana discontinua, vegetación secundaria húmeda, vegetación secundaria decidua, suelo desnudo continental, ríos y otras superficies de agua, pino plagado, pastos, cultivos, cuerpos de agua artificial, cafetales, bosque mixto, bosque latifoliado húmedo, bosque latifoliado deciduo, bosque de coníferas ralo, bosque de conífera denso, y arboles dispersos (ICF,2018).



Mapa 5: Cobertura del suelo de la Subcuenca Río Grande o Concepción. Tomado del Mapa de Cobertura Forestal 2018.

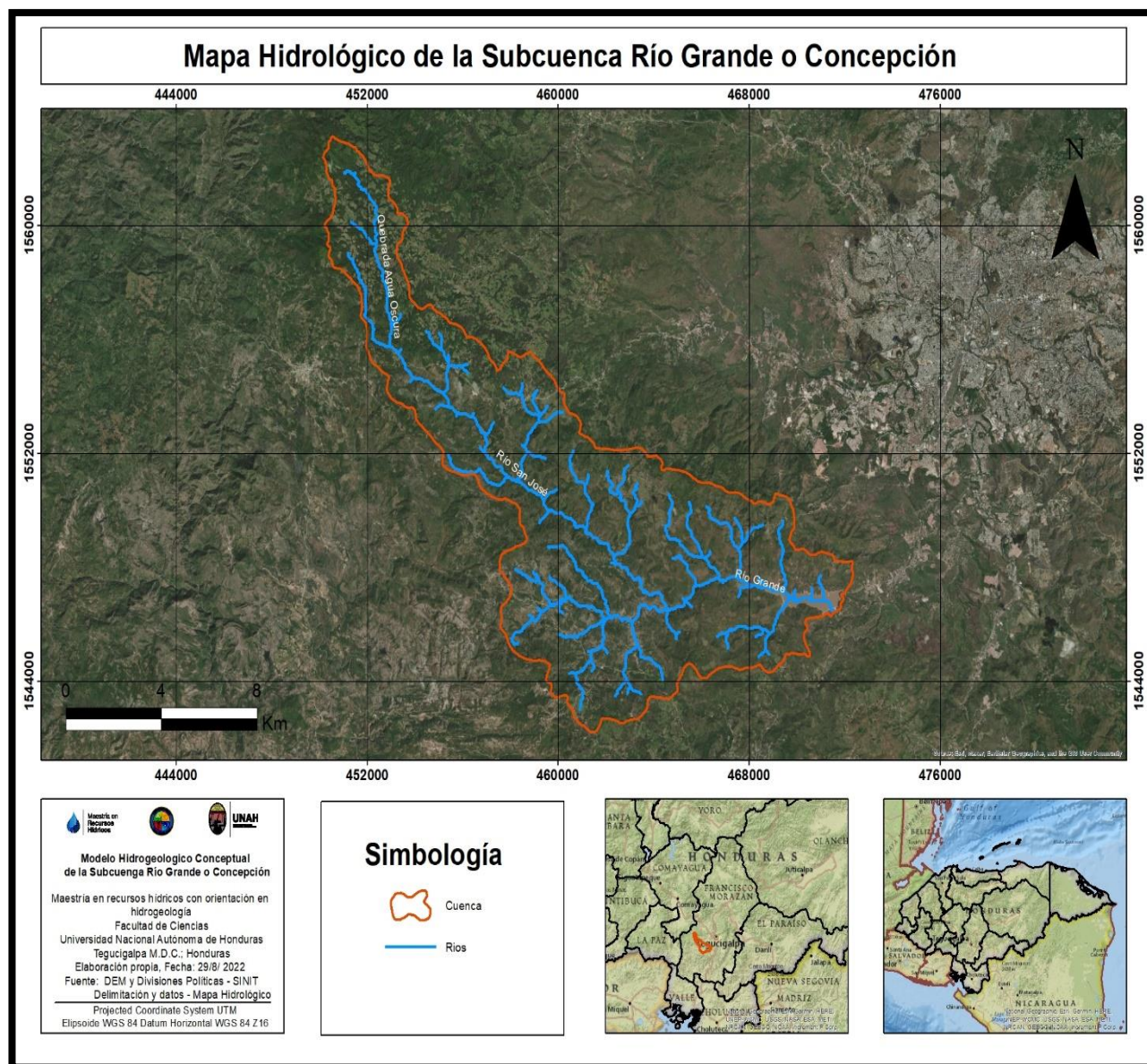
Los tipos de cobertura de suelo que abarcan mayor área en la subcuenca Río Grande o Concepción son bosque latifoliado húmedo, bosque latifoliado deciduo, bosque conífero denso y pasto y cultivo (tabla 5).

Cobertura de Suelo	ÁREA (km ²)	%
Bosque Latifoliado Húmedo	2.8	27.68
Bosque Latifoliado Deciduo	1.16	11.51
Bosque Mixto	0.24	2.37
Bosque de Conífera Denso	1.13	11.15
Bosque de Conífera Ralo	0.61	6.03
Pino Plagado	0.22	2.15
Arboles Dispersos	0.07	0.74
Cafetales	0.41	4.10
Vegetación Secundaria Húmeda	0.24	2.39
Vegetación Secundaria Decidua	0.40	4.00
Pastos/Cultivos	2.68	26.57
Zona Urbana Discontinúa	0.02	0.23
Suelo Desnudo Continental	0.04	0.39
Cuerpos de Agua Artificial	0.01	0.10
Ríos y Otras Superficies de Agua	0.06	0.59

Tabla 6: Tabla de cobertura de suelo de Subcuenca Río Grande o Concepción

e) Hidrología

El Río Grande se origina en varios afluentes de las Montañas Yerba Buena y tiene un área total de drenaje de 140.97 Km². Después de la confluencia de sus afluentes: Quebrada Agua Oscura y Quebrada Agua Helada, el río se denomina Río San José. El río fluye hacia el este hacia la represa la Concepción a la mitad de su recorrido y retoma su nombre después de la represa ((JICA), 2002).

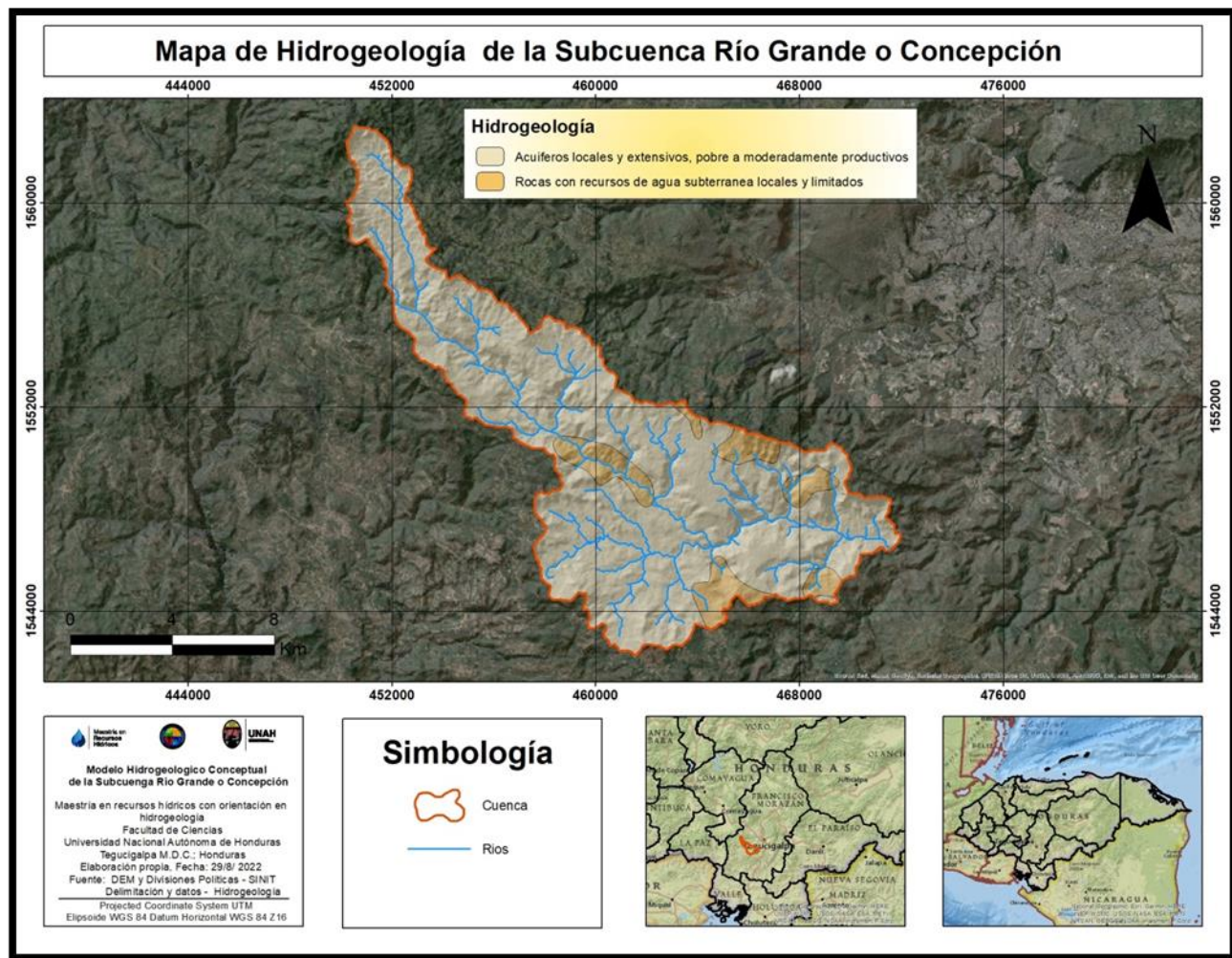


Mapa 6: Red de drenaje de la Subcuenca de Río Grande. Tomado de mapa del portal de ICF

f) Hidrogeología

La hidrogeología del área de estudio está compuesta por acuíferos locales y extensivos, pobres o moderadamente productivos, rocas con recursos de agua subterránea locales y limitados.

De acuerdo con (IHCIT, 2014) “generalmente, las tobas del Grupo Padre Miguel tienen buena porosidad, pero la poca permeabilidad que tiene resulta en una acuífera de potencial limitada (p.23)”.



Mapa 7: Mapa hidrogeológico de la Subcuenca Río Grande o Concepción. Tomado del mapa hidrogeológico de Honduras.

6. CAPITULO V: Metodología

6.1 Tipo de investigación

El presente estudio se centra en un enfoque cuantitativo y de alcance descriptivo, ya que se busca elaborar un modelo hidrogeológico conceptual con recopilación de información del área de estudio y realización de sondeos geofísicos para caracterizar el comportamiento del agua subterránea. Los estudios descriptivos evalúan o recolectan datos sobre diversos conceptos, aspectos, dimensiones o componentes del fenómeno a investigar. Según Sampieri (2014) los estudios descriptivos únicamente pretenden medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o las variables a las que se refieren; su objetivo no es indicar cómo se relacionan las variables medidas, sino, mostrar con precisión las dimensiones de un fenómeno, suceso, comunidad, contexto o situación, y ofrecen la posibilidad de hacer proyecciones, aunque sea incipientes.

6.2 Diseño de la investigación

El tipo de diseño de investigación que se utilizó en el estudio es no experimental, ya que no se pretende la manipulación de las variables. Como afirma Hernández Sampieri (2014), “En las investigaciones no experimentales las variables independientes ocurren y no es posible manipularlas, no se tiene control directo sobre las variables y no se puede influir sobre ellas, porque ya sucedieron, al igual que sus efectos”

6.3 Determinación de la muestra

Esta investigación surge de un interés en la geología y una ayuda para la gestión integrada del recurso hídrico, en este caso subterráneo en la Subcuenca del Río Grande o Concepción, para la cual se delimitó con precisión la zona de estudio y seguidamente se realizó una revisión de los antecedentes del sector, que pudieran establecer el dominio del modelo hidrogeológico conceptual para dicha área determinada.

“Un modelo hidrogeológico conceptual es una representación gráfica del sistema de flujo del agua subterránea que se realiza incorporando toda la información geológica e hidrogeológica disponible en un simple esquema del modelo a realizar (Córdoba, 2012). La realización del modelo hidrogeológico conceptual en la Subcuenca de Río Grande o Concepción se lleva a cabo mediante el análisis e integración de la información geológica, geofísica, e hidrogeoquímica.

A continuación, se mencionan las actividades a desarrollar para la creación de un modelo hidrogeológico conceptual (ver ilustración 14).

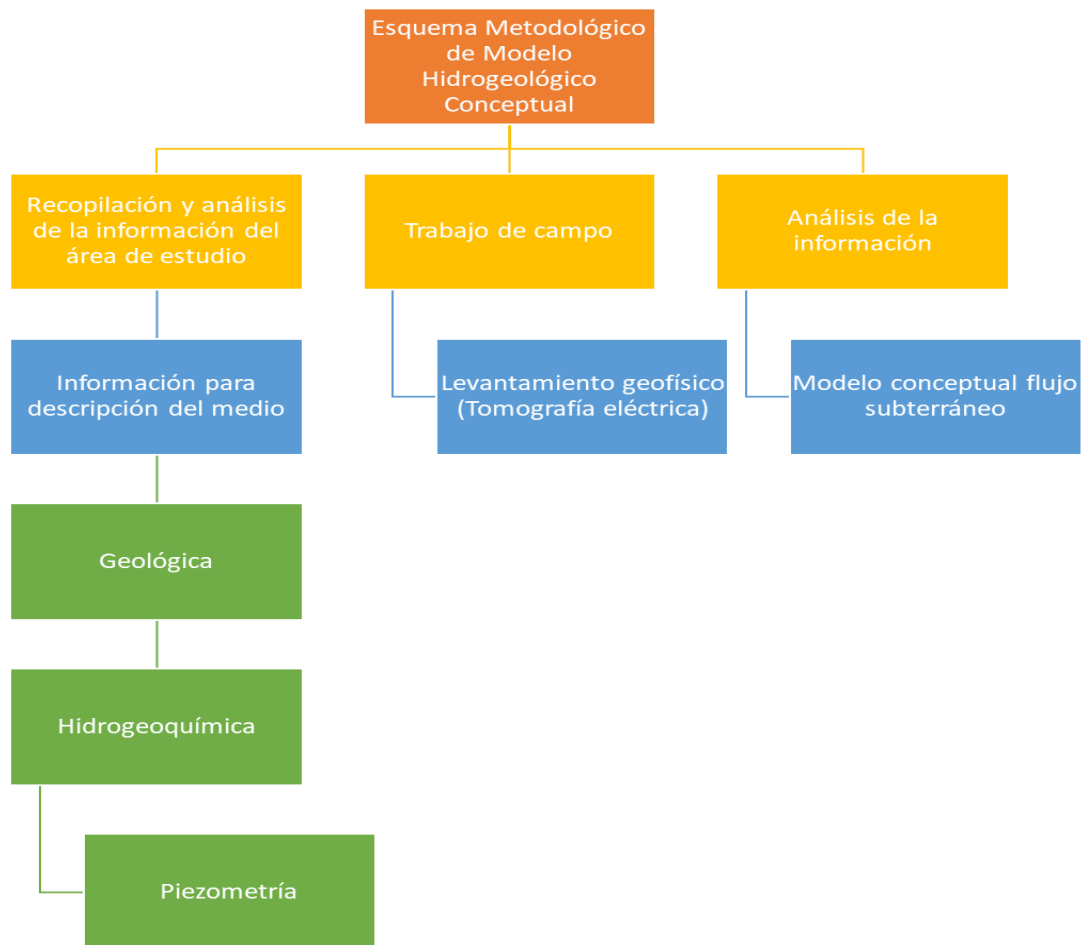


Ilustración 14: Descripción de las actividades a desarrollar en el modelo conceptual.

6.4. Recopilación y análisis de la información del área de estudio

6.4.1 Información para descripción del medio

Como primer paso se identificó espacialmente el área de las Subcuenca Río Grande o Concepción con la ayuda del modelo de elevación del país, y posteriormente se recopiló la siguiente información para la descripción del medio:

Geografía: Se describe la ubicación del área de estudio, el área, perímetro y elevación en que se ubica.

Climatología: se recopiló series mensuales de datos de precipitación y temperatura de los años 1990 a 2016 del área de estudio, de las estaciones meteorológicas La Brea y Concepción obtenidas de la institución El SANAA.

Hidrología y cobertura forestal: densidad de drenaje, afluentes, obtenido de análisis hidrológico del estudio para el Control de Inundaciones y Prevención de Deslizamientos de Tierra en el Área Metropolitana de Tegucigalpa, en la República de Honduras y de la página Aguas de Honduras, cobertura de suelos que abarca el área de estudio obtenida del portal del ICF utilizando el mapa de cobertura forestal del año 2018.

Geología e hidrogeología: unidades geológicas principales estructura, características hidráulicas de las rocas, obtenidos de los mapas geológicos de Honduras y el mapa hidrogeológicos de Honduras.

6.4.2. Información Geológica

Este estudio hace énfasis en la descripción geológica de la Subcuenca Río Grande o Concepción, para ello se cuenta con información geológica tomada del mapa geológico de la Universidad de Austin Texas. De acuerdo con dicha información, el objetivo es identificar las formaciones geológicas, fallas, fracturas, pliegues, discordancias y alteraciones de las rocas que se encuentren en el área de estudio.

6.4.3. Información Hidrogeoquímica

Toda la información hidrogeoquímica utilizada para esta investigación fue proporcionada por el Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra, la cual se llevó a cabo por medio de muestreos en la época lluviosa de julio de 2021.

6.4.4. Información piezométrica

Para esta investigación se dibujó un mapa de isopiezas en el que se utilizaron los niveles de agua de los 17 pozos que se ubican el área de estudio. Para elaborar las líneas equipotenciales se calculó los niveles en cada pozo y se resta la cota estimada, menos la profundidad del nivel freático (ver ilustración 15), esto dio como resultado el nivel piezométrico. A partir de estos datos se trazaron las equipotenciales, después se trazaron las líneas de flujo perpendiculares a las isopiezas y va desde el valor mayor al valor menor. Las isopiezas se realizaron a través del programa de interpolación Kriging en ArcGIS. La información para realizar esta actividad fue obtenida del Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra (ver Anexos).

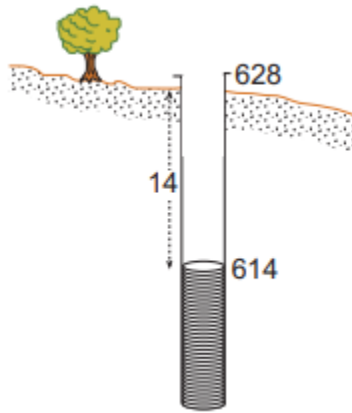


Ilustración 15: Cota del Nivel del Agua. Tomado de Sánchez, 2015.

6.4.5 Balance hídrico

Para la elaboración del balance hídrico fue utilizada las estaciones meteorológicas de la concepción y la brea, las cuales cuentan con un registro de 25 años.

El balance hídrico se calculó utilizando datos de las estaciones meteorológicas, la Brea y Concepción del Sanaa durante un período de 25 años. Se introdujeron los datos en una hoja de Excel para calcular el almacenamiento y el exceso de agua en el suelo, asumiendo que la recarga ocurre en el primer metro de suelo, utilizando la temperatura y las horas de radiación ETPm. Posteriormente, se hace una corrección para obtener la ETP, para ello se multiplica ETPm por el factor de infiltración de suelos, obteniéndose un ETP corregida. Con estos datos y datos de precipitación se calcula: almacenamiento de agua en el suelo, exceso de agua en el suelo (escorrentía) y déficit de almacenamiento.

6.5. Trabajo de campo

La parte de geofísica se llevó a cabo mediante sondeos de tomografía eléctrica realizados en la zona de estudio.

Los métodos geofísicos pueden ser utilizados para la solución de problemas geológicos que estén conectados con la hidrogeología y es de gran importancia conocer los límites de cada método geofísico, así como también, tener el conocimiento de cómo se utiliza para poder obtener resultados asertivos. Gran parte de los problemas que se proyectan en hidrogeología requieren de un conocimiento del subsuelo en una interpretación vertical, unido al rol que toma el agua con la resistividad de las rocas, por lo cual podemos considerar que el método de resistividad eléctrica es uno de los métodos más utilizados para la resolución de problemas relacionados con la hidrogeología.

Para el trabajo de campo en nuestra área de estudio se utilizó el método de tomografía eléctrica, se llevó a cabo siete sondeos en época Lluviosa, a una profundidad de 30 m; se utilizó el Resistivímetro Terrameter ABEM SAS 4000 / SAS 1000. A continuación, se describe de manera más detallada el método.

6.5.1 Tomografía Eléctrica

El proceso se lleva a cabo colocando cuatro electrodos alineados a igual distancia entre sí, luego se conecta a una batería de 12v a los electrodos exteriores, midiendo la intensidad que circula entre ellos, así como el voltaje entre los electrodos intermedios. En esta investigación se ha utilizado el arreglo de Wenner. El Resistivímetro Terrameter ABEM SAS 4000 / SAS 1000, utilizado, cuenta con una unidad central de recolección de datos de hasta 62 electrodos, utilizando hasta cuatro cables para electrodos de 21 canales, cada uno con separación máxima entre electrodos de cinco metros. (Ver ilustración 16).

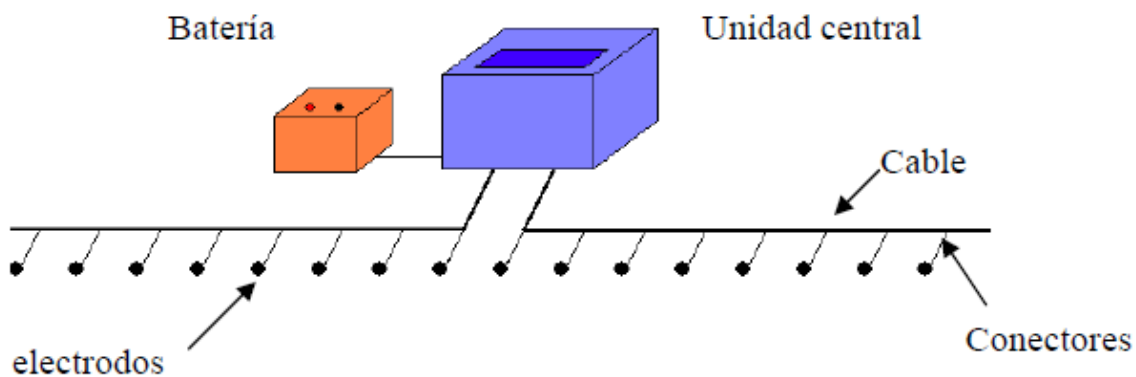


Ilustración 16: Esquema del dispositivo requerido en el método tomografía eléctrica. Tomado de (Crio, 2009)

6.5.2. Programas para la interpretación tomografía eléctrica.

Para la interpretación de los sondeos por el método de tomografía eléctrica, se utilizó el software SAS4000UTILITIES para descargar los archivos a la computadora y el software RES2DINV para el procesamiento de los datos. La interpretación de los sondeos requiere de personal especializado, por lo que se llevó a cabo por el M.Sc. En geofísica, Manuel Rodríguez, una vez procesado los datos, arrojó valores de resistividad para cada uno de los materiales que conforman el subsuelo de la Subcuenca.

6.5.3. Equipo geofísico:

Equipo del método Tomografía Eléctrica. (Ver ilustración 17)

- Resistivímetro Terrameter ABEM SAS 1000
- Rollo de cable para electrodos y equipo de medición
- Electrodos

- Metro
- Batería 12v
- Martillo o mazo
- Conectores para conexión de electrodos



Ilustración 17: Equipo Geofísico utilizado en campo para la elaboración de sondeos geofísicos.

6.6. Construcción del Modelo Conceptual Hidrogeológico

Basándose en los resultados obtenidos de la información anterior, se desarrolló un modelo conceptual hidrogeológico que contempla áreas como, litología, dirección de flujo, Isopiezas, descarga, información hidrogeoquímica. A partir de estos resultados, se generan los perfiles geológicos, mapas y bloques diagramáticos que muestran la información en un solo conjunto.

7. CAPITULO VI: Análisis e interpretación de los datos

7.1 Geología

7.1.1 Estratigrafía

Para describir la litología de las formaciones que aparecen en la Subcuenca Rio Grande o Concepción se han tomado del mapa geológico de la Universidad de Austin Texas, donde prevalecen Basaltos Cuaternarios, Miembro Nueva Aldea, Rocas volcánicas más jóvenes (ignimbritas riolíticas, vítrica cristalina soldada, lahares, coladas), Padre Miguel Inferior (Texas, 2022).

i. Cuaternario

A) Basaltos del Cuaternario (Qb)

Son llamados el campo volcánico de Tegucigalpa, tienen características químicas similares y se estima una edad entre 2 a 0.5 millones de años. Los basaltos del cuaternario están compuestos de coladas basálticas de pahoehoe y aa, diques, volcanes tipo escudo, cono de lava, fenocristales de plagioclasa, olivino, piroxena y óxidos. El color de las rocas son negro, gris oscuro, gris, gris claro y morado. Los depósitos cuentan con las siguientes texturas: porfídica a afanítica; vesicular a no-vesicular; traquitica a pilotaxitica; masivo a bloques (Harwood, 2018).

ii. Mioceno Medio- Plioceno

A) Miembro Nueva Aldea (Tpmn)

Este depósito fue descrito por Anderson (1985), están compuestos de capas delgadas piroclásticas depositadas en agua, como lagos y ríos, ignimbrita no-soldada, tobas, estratos lacustrinos y sedimentos finos, lahares interestratificados, frecuentemente con abundante pómez. Las rocas son de color blanco, tostado, rosado y rojo. La textura de los depósitos es la siguiente: cristales y origen, este miembro es muy similar al superior, pero generalmente las capas son más delgadas, de tres o menos metros de grosor (Harwood, 2018).

B) Padre Miguel Inferior (Tpmi)

El Padre Miguel Inferior está formado por ignimbritas Unidades alteradas y fracturadas de ignimbritas, tobas, lahares y sedimentos. Su textura está compuesta por depósitos que varían de porfídica a afanítica a vítrica; masivo con piroclásticos separados y no separados; no consolidado a consolidado a soldada a muy soldada a eutaxítica, desvitrificación, cristales rotos, pómez friamme y vidrio axiolítico. El color de las rocas tostado, blanco, rosado, rojo, gris y café (Harwood, 2018).

C) Rocas Volcánicas más jóvenes (Tpmy)

Este depósito está formado por ignimbritas riolíticas, vítrica cristalina soldada, con extensión de lahares asociados, domos riolíticos pobres en cristales y colada dacítica vítrica (Texas, 2022).

D) Padre Miguel Superior (Tpms)

Este consiste en unidades de ignimbritas, tobas, lahares y sedimentos. Las capas de lahares y sedimentos son raras y no tienen mucha extensión lateral, el color de las rocas es blanco, tostado, rosado y rojo. Las texturas son porfirítica a afanítica y vítrea; masivo, con piroclásticos, separadas y no separadas; no consolidada a soldada a eutaxítica. Composiciones son de riolita (Richard, 2018).

Algunos de los materiales geológicos encontrados en el área de estudio se muestran a continuación:



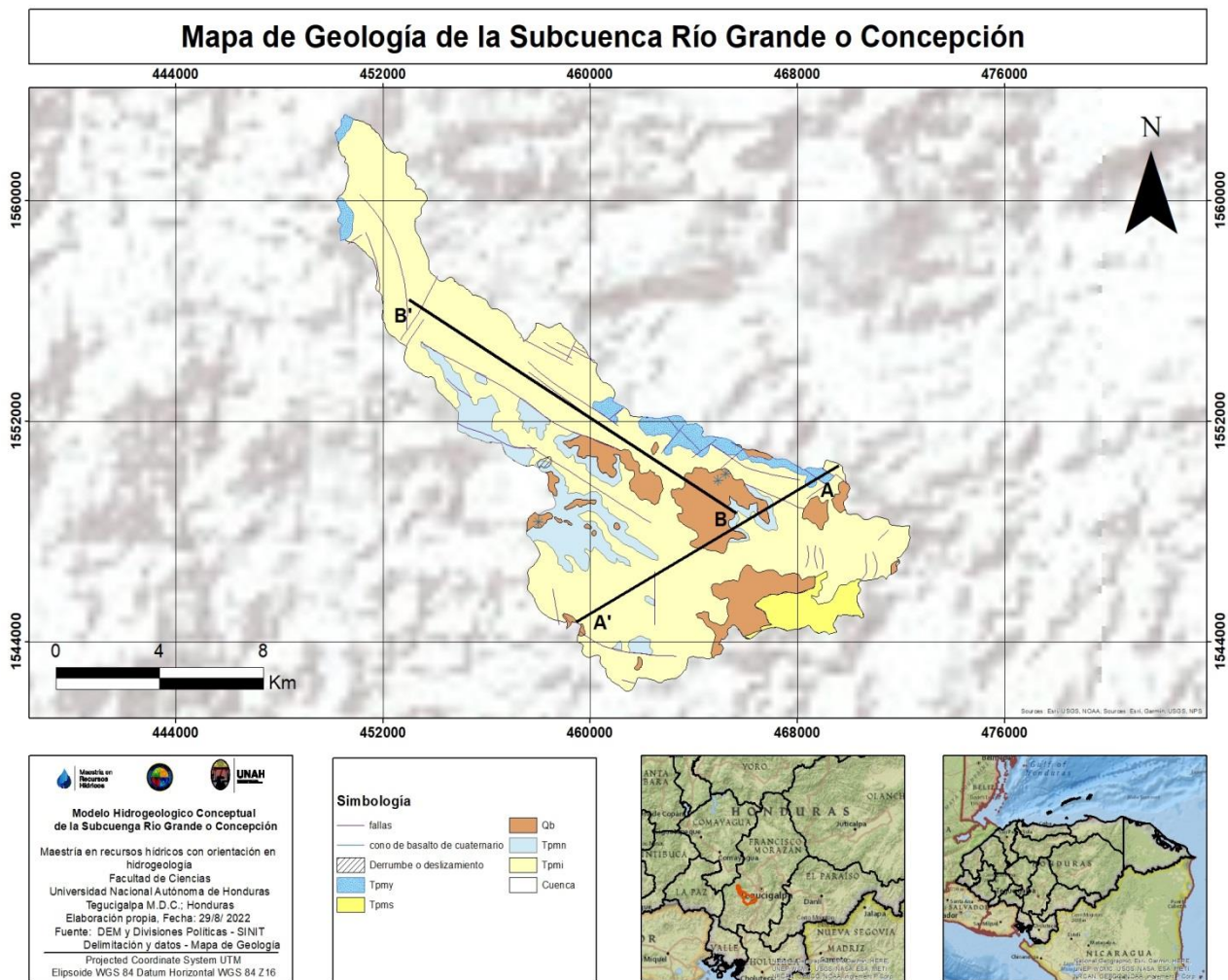
Ilustración 18: Toba volcánica en la represa concepción. Ilustración 19: Coladas basálticas de pahoehoe en La Brea Lepaterique.



Ilustración 20: Ignimbritas en El Aguacatal Ojojona. Ilustración 21: Basaltos en El Aguacatal Ojojona

7.1.2 Estructura geológica

La geología estructural de la Subcuenca de Río Grande o Concepción está formada por fallas indicando respectivamente el desplazamiento relativo (superior o inferior) de la superficie, restos de conos volcánicos, rumbo y echado de capas, derrumbe o deslizamientos, contacto o trazos donde está inferido o aproximadamente localizado, fotolineamiento de una probable falla, esto lo podemos apreciar en el mapa 7. En el mapa 7 se puede apreciar dos cortes de los cuales se obtuvo dos perfiles de estructura geológica, el perfil A-A 'y el perfil B-B'. En estos perfiles se ilustran depósitos tales como Basaltos del Cuaternario (Qb), Rocas Volcánicas más jóvenes (Tpmy), Padre Miguel Inferior (Tpmi), Miembro Nueva Aldea (Tpmn).



Mapa 8: Mapa geológico de la subcuenca Concepción. Tomado del Mapa Geológico de La Universidad de Austin Texas.

El mapa 8 muestra la geología de la subcuenca del Río Grande o Concepción, incluyendo formaciones geológicas, deslizamientos de tierra, fallas y conos de basalto. En el mapa se muestran dos cortes para realizar los tramos A-A' y B-B'.

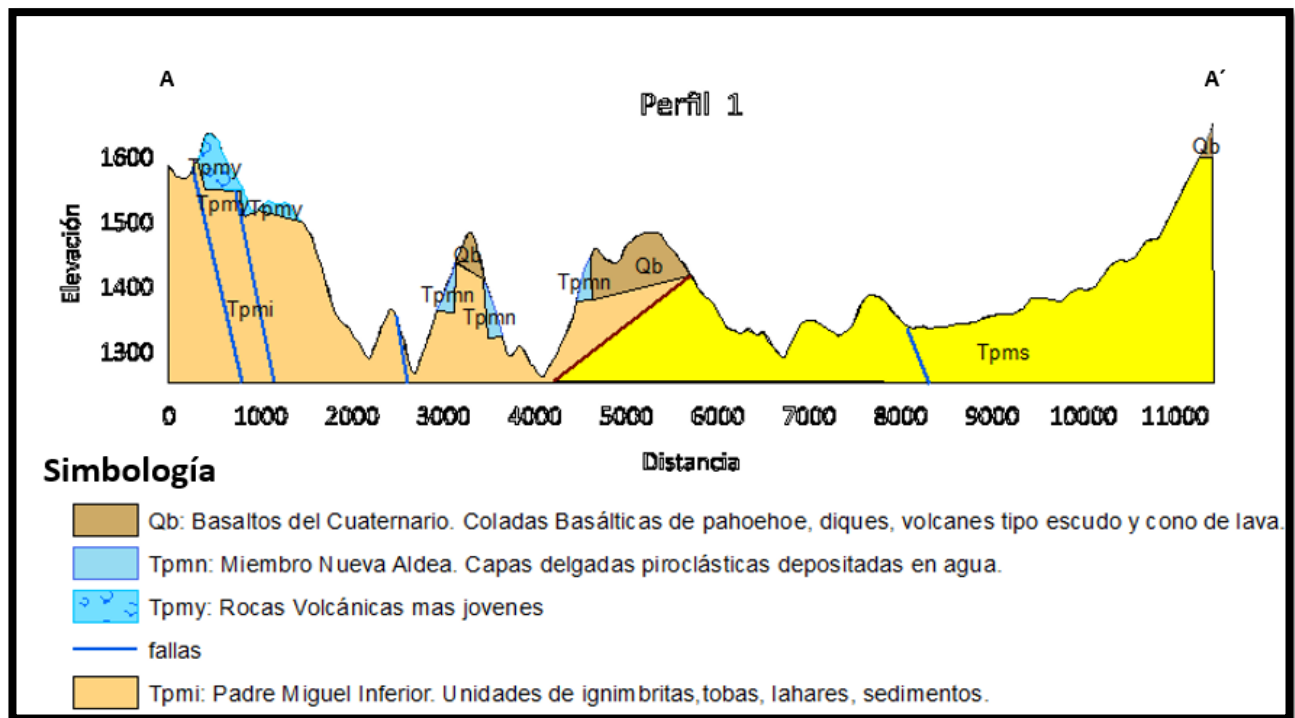


Ilustración 22: Perfil A-A' de la Subcuenca Río Grande o Concepción. Tomado del Mapa Geológico de La Universidad de Austin Texas

En la sección A-A' muestra las formaciones geológicas Basaltos del Cuaternario (Qb), Miembro Nueva Aldea (Tpmn), Rocas Volcánicas más jóvenes (Tpmy), Padre Miguel Inferior (Tpmi), y fallas. Esta sección fue creada a partir de información de mapas geológicos de la Universidad de Texas en Austin.

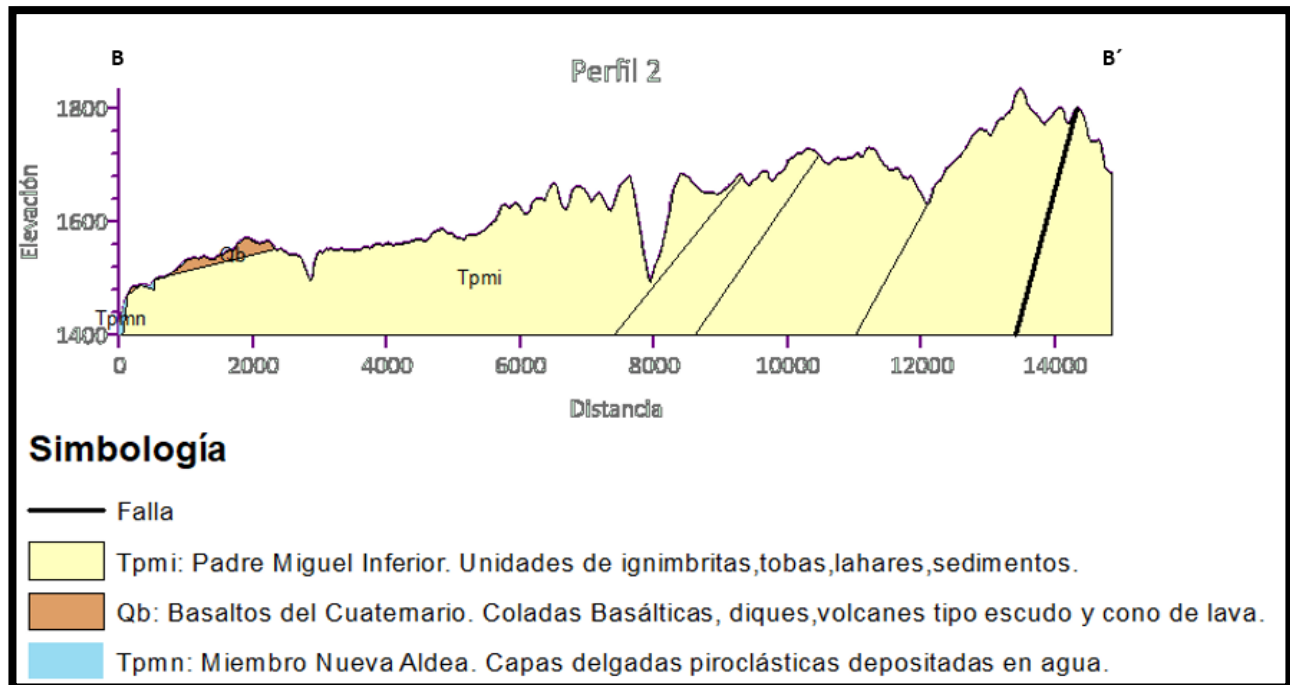


Ilustración 23: Perfil B-B' de la Subcuenca de Río Grande o Concepción. Tomado del Mapa Geológico de La Universidad de Austin Texas.

En la sección B-B' muestra las formaciones geológicas Basaltos del Cuaternario (Qb), Miembro Nueva Aldea (Tpmn), Padre Miguel Inferior (Tpmi), y fallas. Fue creada a partir de información de mapas geológicos de la Universidad de Texas en Austin.

7.2 Geofísica

Al seleccionar el sitio para el estudio geofísico, se tomó en cuenta la accesibilidad del sitio y la importancia de caracterizar la parte alta y baja de la cuenca.



Mapa 9: Distribución espacial de las líneas de tomografía eléctrica realizadas en el área de estudio.

7.2.1 Tomografía No. 1:

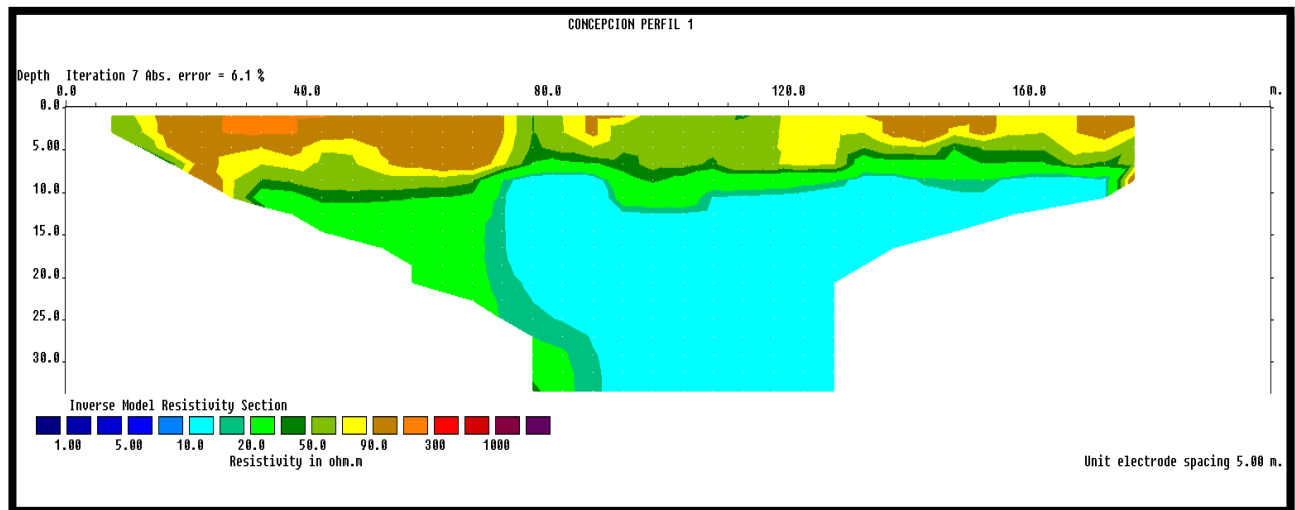


Ilustración 24: Tomografía 1 ubicada en la represa Concepción. Obtenido del Resistivímetro Terrameter ABEM SAS 1000.

En el tramo No. uno el cual está ubicado en la represa Concepción se observó un rango de valores de resistividad de (10 a 300 Ω m), la geología que se encuentra en el lugar es Grupo Padre Miguel Inferior (Tpmi), que consiste en unidades alteradas y fracturadas de roca ígnea, toba, lodo volcánico y sedimentos. A una resistividad de 10 Ω m, se obtuvo una capa de arcilla y limo saturada de agua desde 10 hasta 30 metros de profundidad, en la parte superior con resistividades de 20 a 300 Ω m, se obtuvo otra capa de toba volcánica, con base en los valores de resistividad mencionados, y los resultados se pueden visualizar en el siguiente perfil.

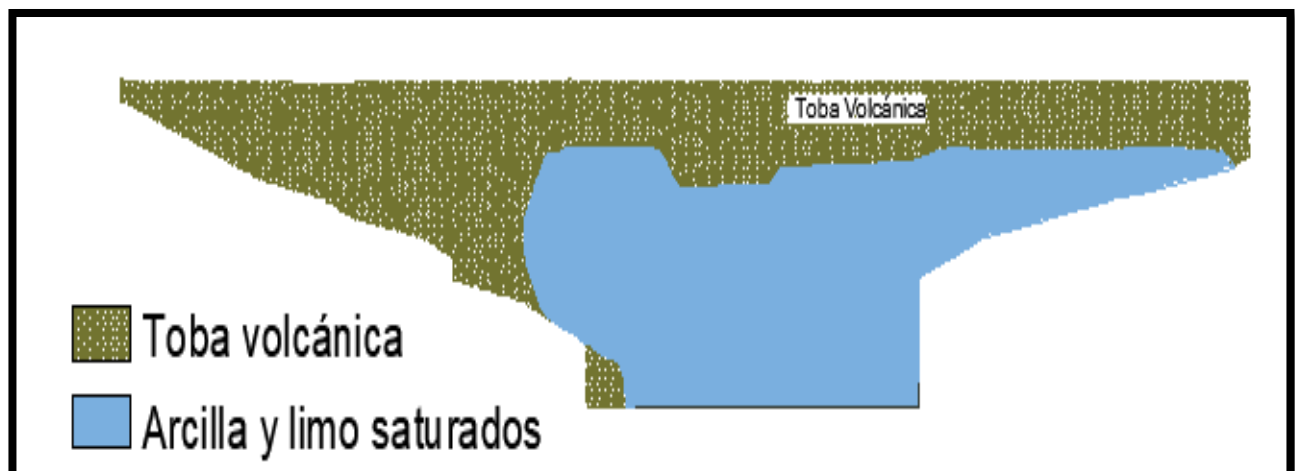


Ilustración 25: Resultados de tomografía 1 en donde se puede apreciar dos capas de material, toba y arcilla con limo saturado. Este análisis se logró con ayuda de tablas de resistividad y programas CAD.

7.2.2 Tomografía eléctrica No. 2:

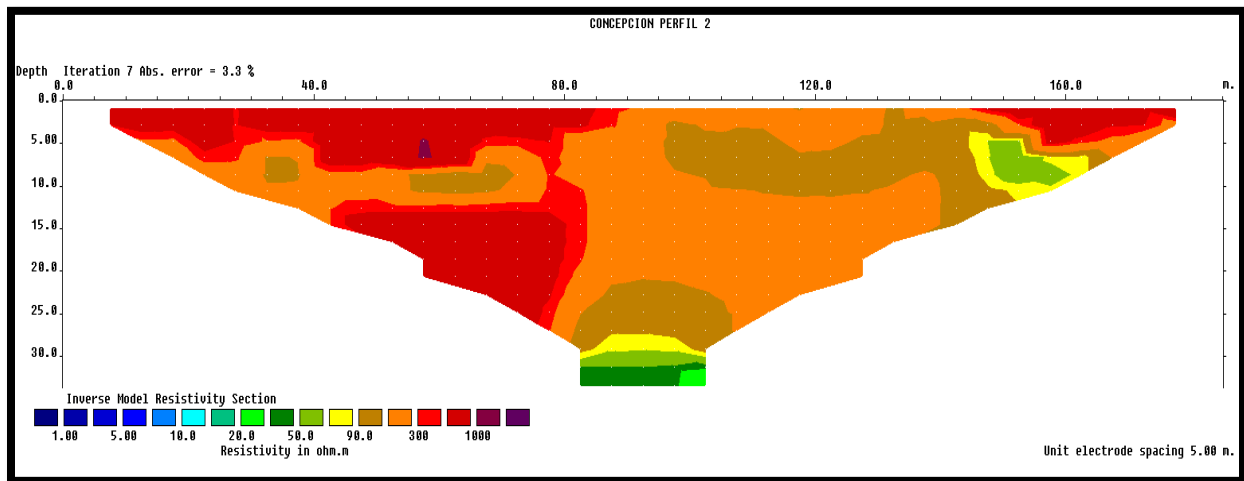


Ilustración 26: Tomografía 2 ubicada en El Aguacatal Ojojona. Obtenido del Resistímetro Terrameter ABEM SAS 1000.

El tramo No. dos se llevó a cabo en el Aguacatal Ojojona y el mapa geológico describe la zona con la unidad estratigráfica Miembro Nueva Aldea (Tpmn), la cual consiste en capas delgadas piroclásticas depositadas en agua (lagos y ríos); ignimbrita no-soldada, tobas, estratos lacustrinos y sedimentos finos. Los valores de resistividad entre 20 Ω m y 90 Ω m constituyen una capa de tobas volcánicas, la capa de 300 Ω m consiste en ignimbritas y las superiores a 1000 Ω m son lavas.

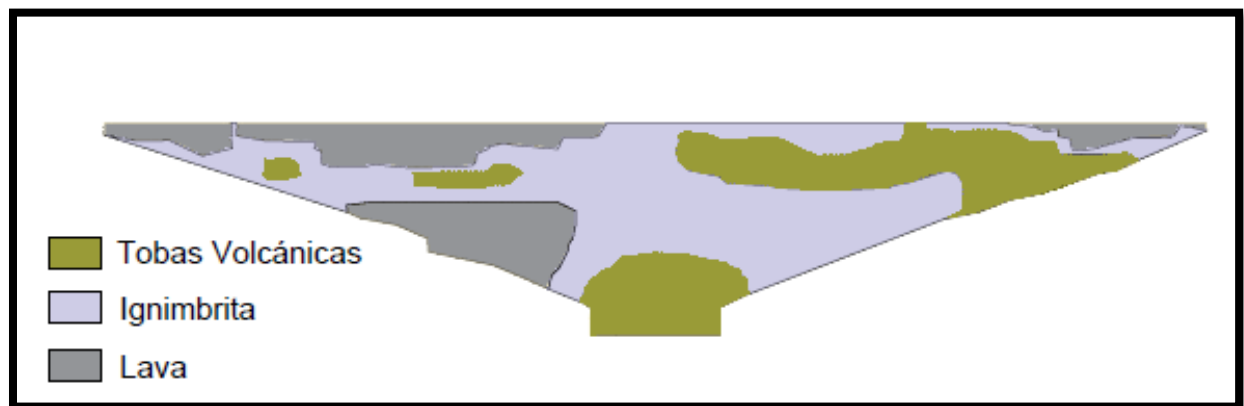


Ilustración 27: Resultados de tomografía 2 en donde se puede apreciar tres capas de material, toba, ignimbrita y lava. Este análisis se logró con ayuda de tablas de resistividad y programas CAD.

7.2.3 Tomografía Eléctrica No.3

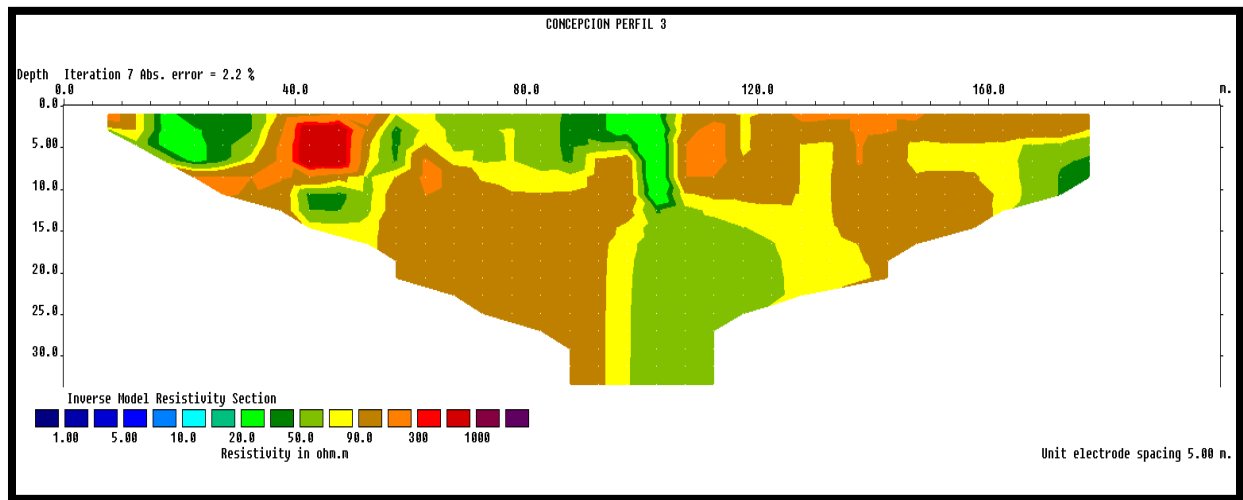


Ilustración 28: Tomografía 3 ubicada en Aldea Surcos de Caña Ojojona. Realizada con Resistivímetro Terrameter ABEM SAS 1000.

El tramo No. tres se ubica en Aldea Surcos de Caña Ojojona y el mapa geológico muestra un área con las mismas unidades estratigráficas que la sección 2, constituida por capas delgadas piroclásticas depositadas en agua (lagos y ríos); ignimbrita no-soldada, tobas estratos lacustrinos y sedimentos finos. Los valores de resistividad entre 20 Ω m y 90 Ω m forman una capa de toba volcánica, según las tablas de resistividad de rocas, las capas con una resistividad de 300 Ω m consisten en ignimbritas y las capas con una resistividad superior a 1000 Ω m son lava.

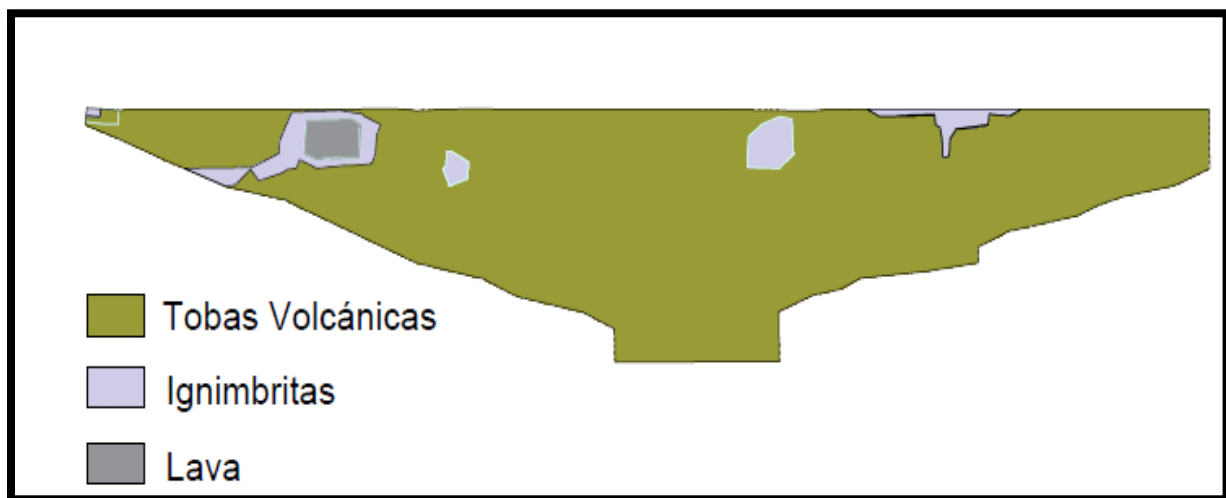


Ilustración 29: Resultados de tomografía 3 en donde se puede apreciar tres capas de material, toba, ignimbrita y lava. Este análisis se logró con ayuda de tablas de resistividad y programas CAD.

7.2.4 Tomografía Eléctrica No.4

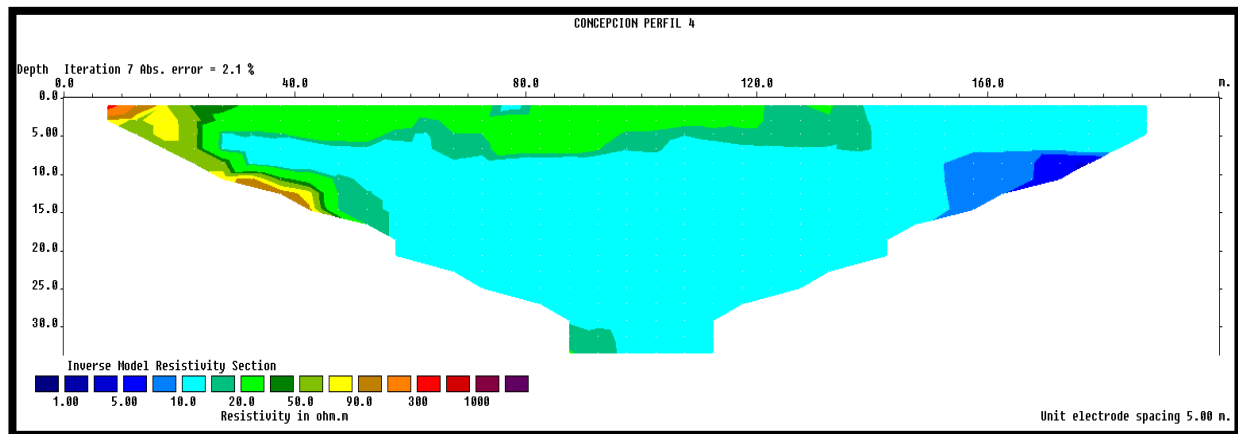


Ilustración 30: Tomografía 4 ubicada en la Brea Lepaterique. Realizada con Resistímetro Terrameter ABEM SAS 1000.

La sección No. cuatro se llevó a cabo en La Brea Lepaterique, el mapa geológico describe la zona con la unidad estratigráfica Padre Miguel Inferior (Tpmi), y se compone de unidades alteradas y fracturadas de ignimbritas, tobas, lahares y sedimentos. A partir de la resistividad obtenida por tomografía eléctrica, obtuvimos la siguiente estratigrafía. De acuerdo con la tabla de resistividad, 5 Ωm es agua subterránea, la capa con resistividad de 10 Ωm es una capa de suelos saturados con agua, y las resistividades entre 20 y 300 Ωm son tobas volcánicas.

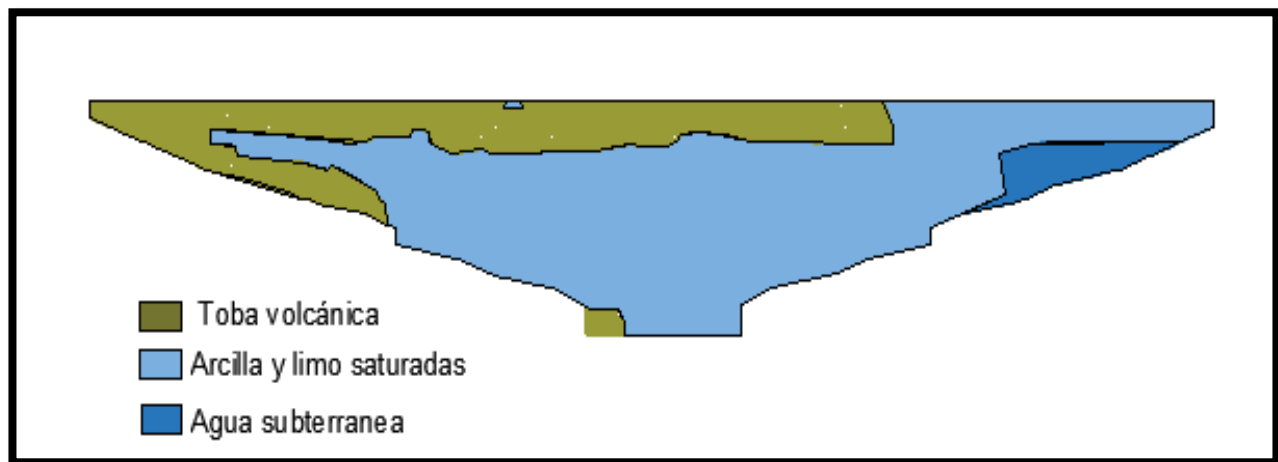


Ilustración 31: Resultados de tomografía 4 en donde se puede apreciar tres capas de material, toba, aguas subterráneas, arcilla y limo saturadas. Este análisis se logró con ayuda de tablas de resistividad y programas CAD.

7.2.5 Tomografía Eléctrica No.5

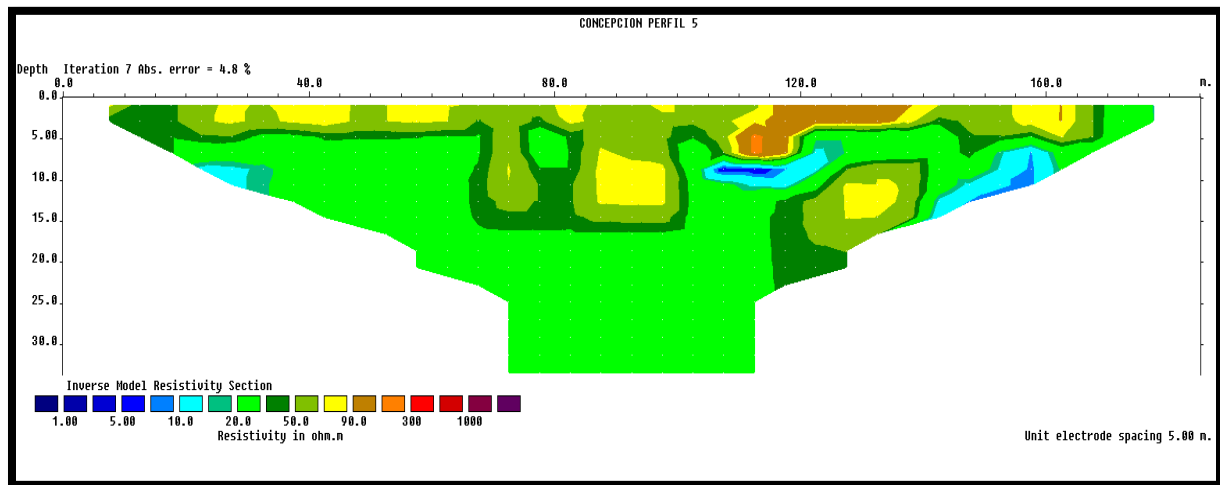


Ilustración 32: Tomografía 5 ubicada en Las Tablas Lepaterique. Realizada con Resistivímetro Terrameter ABEM SAS 1000.

La sección No. Cinco se llevó a cabo en Las Tablas Lepaterique, se compone de la misma unidad geológica que la sección 4, que consta de unidades alteradas y fracturadas de ignimbritas, tobas, lahares y sedimentos. A partir de la resistividad obtenida por tomografía eléctrica, obtuvimos los valores de resistividad de 5 Ωm hasta 1000 Ωm , obteniendo materiales como toba volcánica, arcilla y limo saturado, lava y agua subterránea.

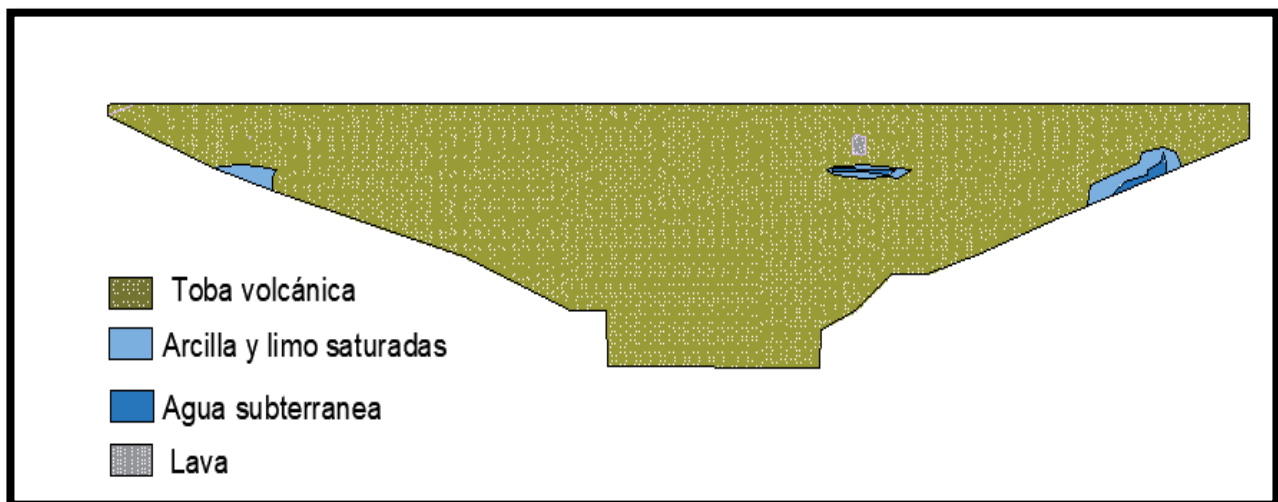


Ilustración 33: Resultados de tomografía 5 en donde se puede apreciar cuatro capas de material, toba, aguas subterráneas, lava, arcilla y limo saturadas. Este análisis se logró con ayuda de tablas de resistividad y programas CAD.

7.2.6 Tomografía Eléctrica No.6

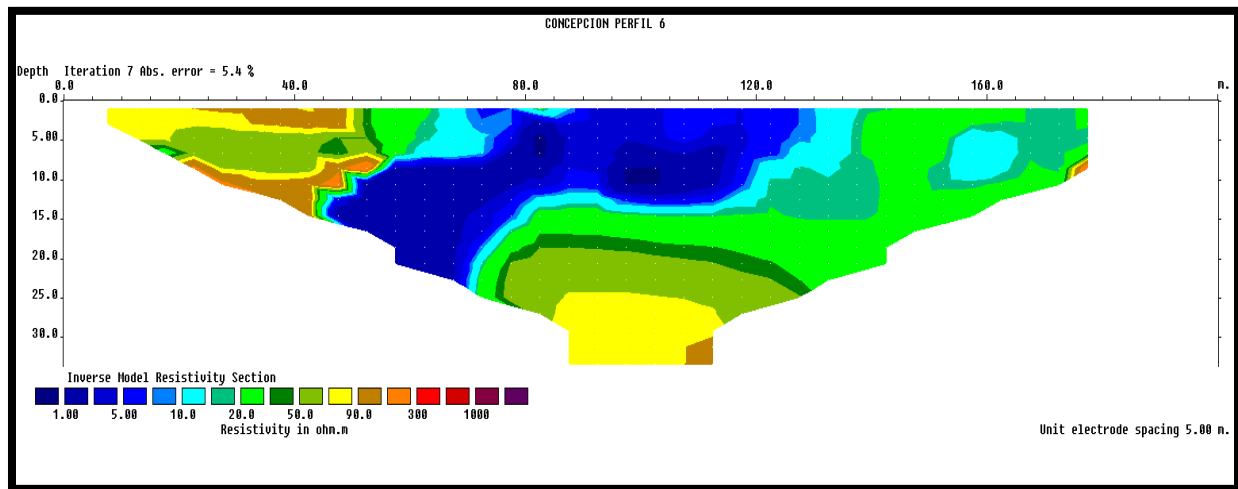


Ilustración 34: Tomografía 6 ubicada en Aldea Las Tablas Lepaterique. Realizada con Resistímetro Terrameter ABEM SAS 1000.

La sección No. Seis se llevó a cabo en la Aldea las Tablas localizadas a 10 min del centro de Lepaterique, según la geología describe la zona con la unidad estratigráfica unidad Padre Miguel Inferior (Tpmi) al igual que en la sección 4 y 5. Se obtuvieron valores de resistividad entre 5 Ω m y 1000 Ω m con capas de materiales como agua subterránea a profundidades entre 5 m y 25 m, una capa de arcilla y limo satura y una capa de toba volcánica visible en la parte superior como inferior.

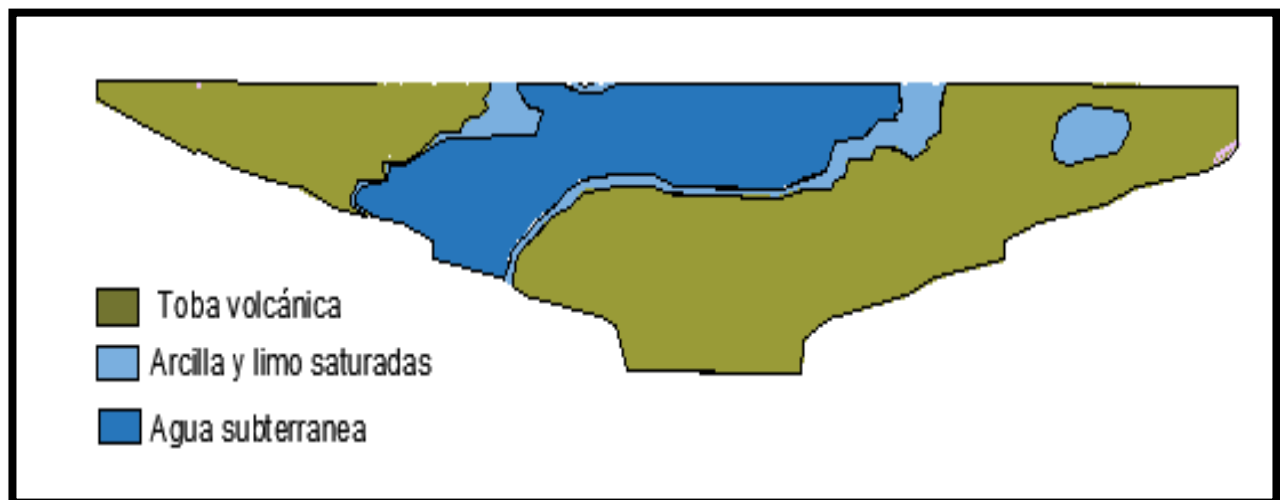


Ilustración 35: Resultados de tomografía 6 en donde se puede apreciar tres capas de material toba, aguas subterráneas, arcilla y limo saturadas. Este análisis se logró con ayuda de tablas de resistividad y programas CAD.

7.2.7 Tomografía Eléctrica No.7

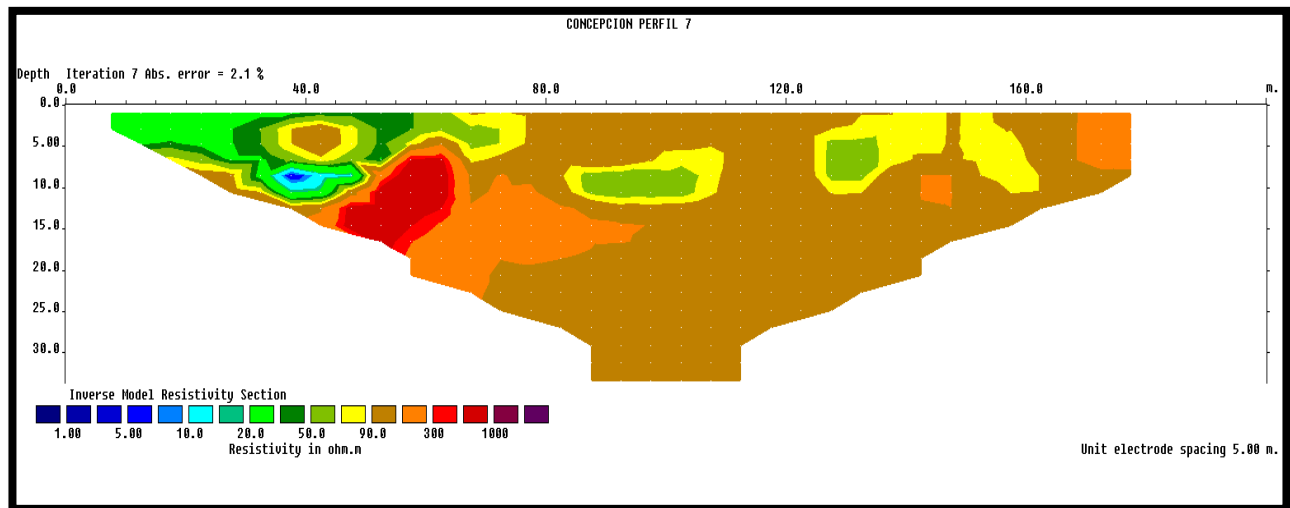


Ilustración 36: Tomografía 7 ubicada en El Llano Ojojona. Realizada con Resistivímetro Terrameter ABEM SAS 1000.

El perfil No. Siete se realizó en El Llano Ojojona, la geología de la zona está compuesta por Miembro Nueva Aldea (Tpmn). Obteniendo valores de resistividad entre 5 Ω m y 1000 Ω m, para materiales como agua subterránea, tobas volcánicas, ignimbritas, lavas y arcillas y limos saturados.

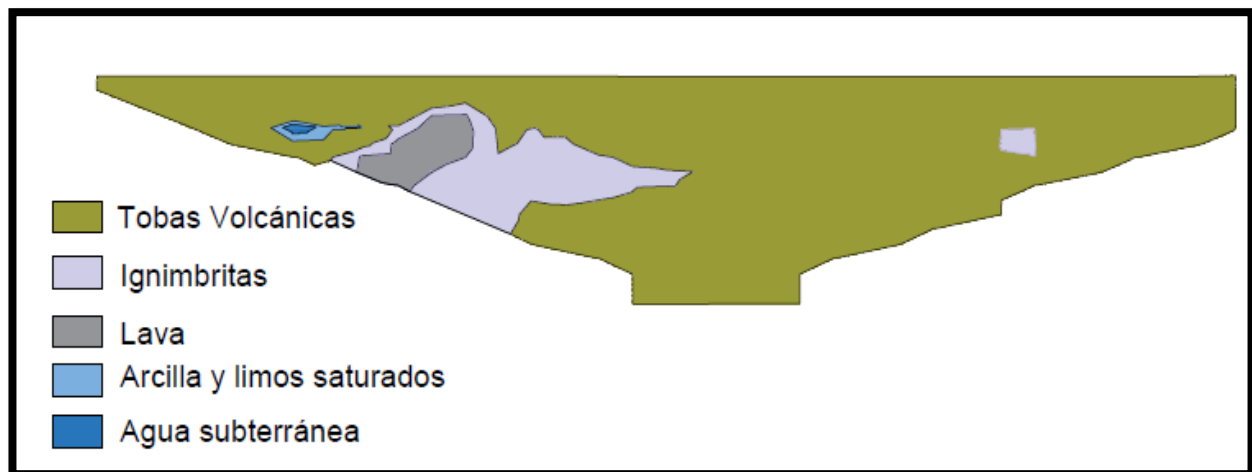
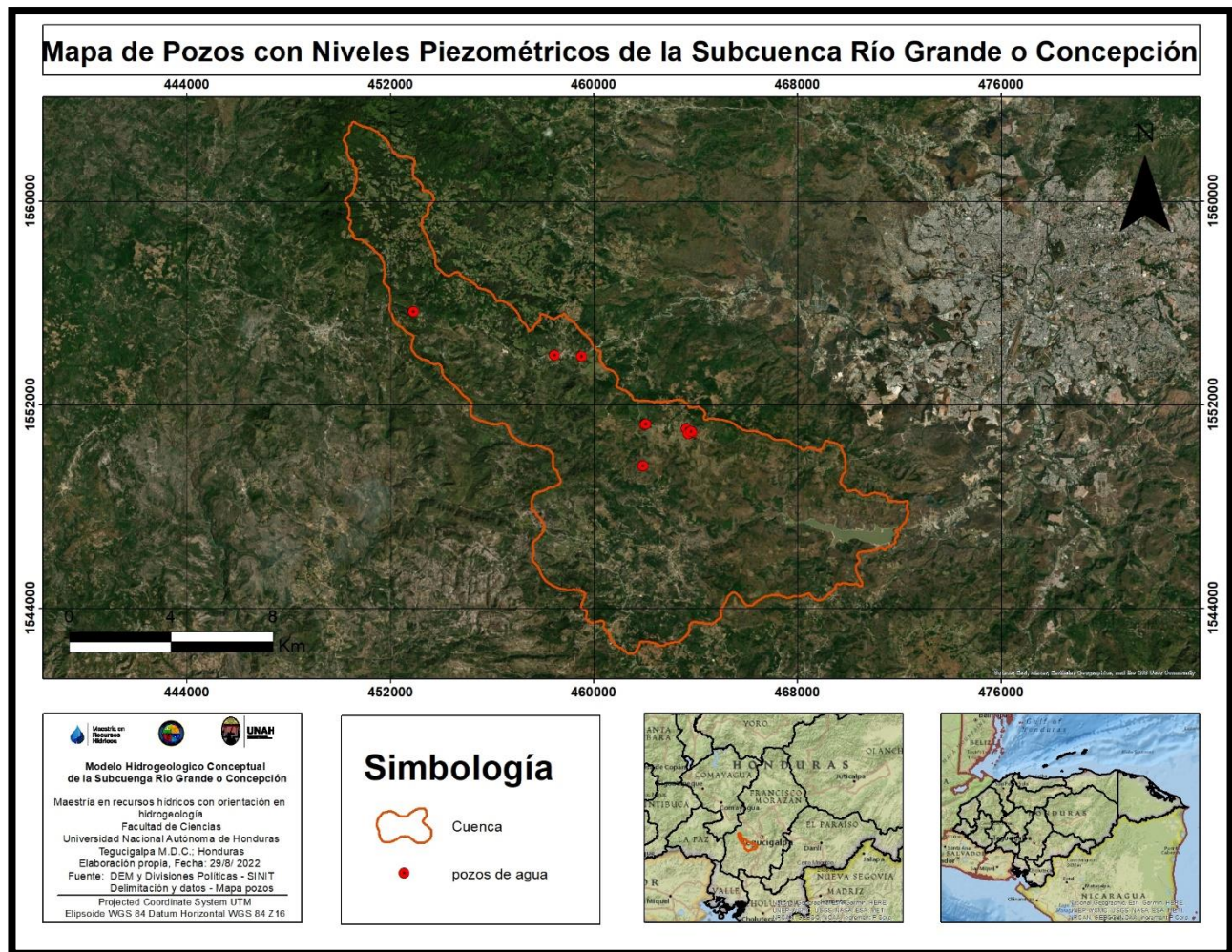


Ilustración 37: Resultados de tomografía 7 en donde se puede apreciar cinco capas de material toba, aguas subterráneas, lava, ignimbritas, arcilla y limo saturadas. Este análisis se logró con ayuda de tablas de resistividad y programas CAD.

7.3 Piezometría

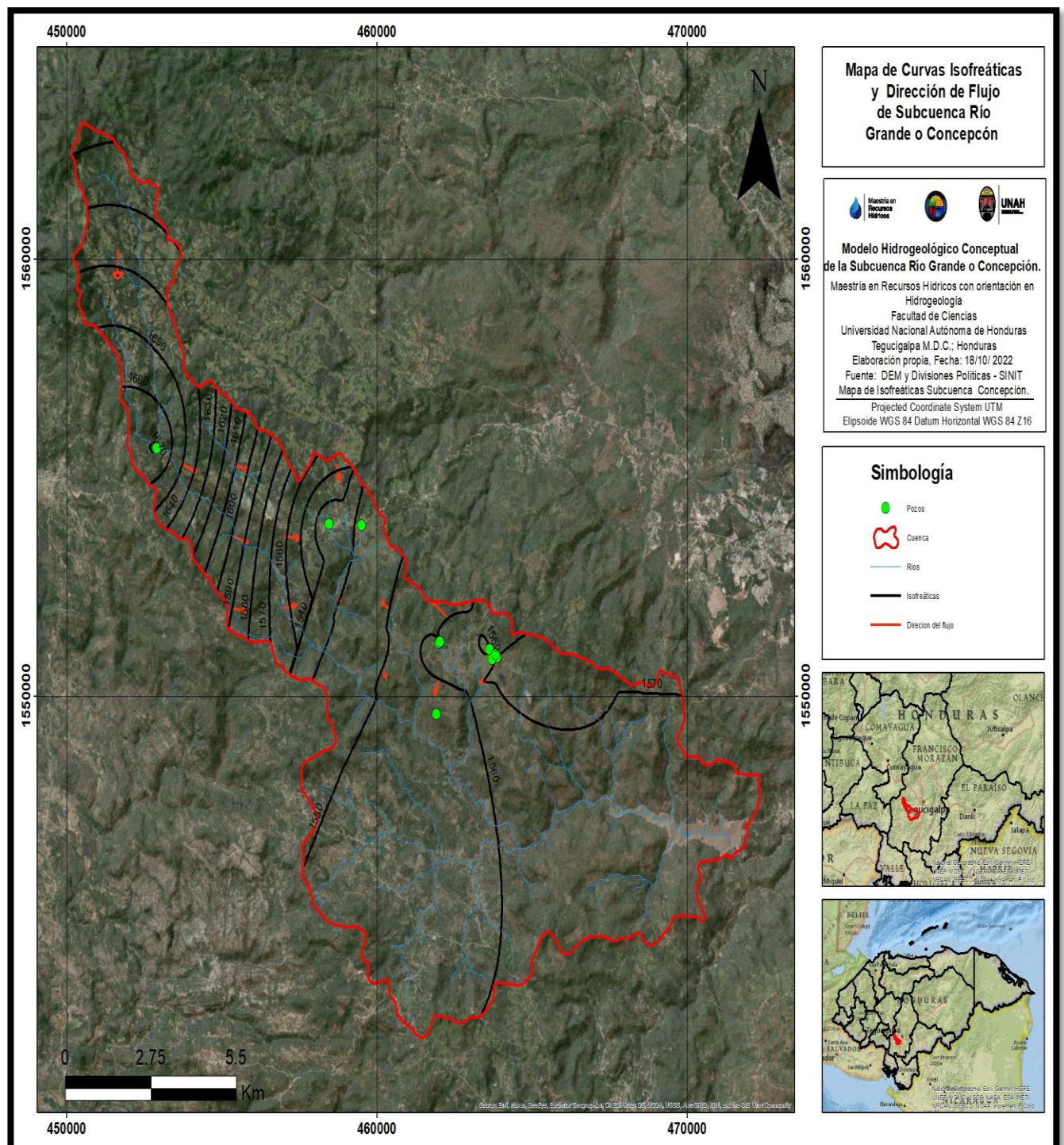
Para elaborar las curvas isofreáticas se obtuvo los niveles piezométricos de 17 pozos de los cuales, 15 son malacate y dos son perforados, los cuales son señalados en el mapa 10, con puntos rojos. Los datos piezométricos fueron proporcionados por el Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras. Ver Anexo 2.



Mapa 10: Pozos con niveles piezométricos de Subcuenca Río Grande o Concepción.

Las curvas isofreáticas que se realizaron en la subcuenca Río Grande o Concepción, se reflejan en el mapa 11, en color en negro, la dirección del flujo se identifica con las flechas en color rojo y los pozos en color verde. Los datos de los niveles de pozos fueron medidos en época lluviosa, información que fue obtenida del Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra. A partir de los resultados, podemos inferir que la dirección de flujo se mueve en dirección Suroeste en la parte alta de la Subcuenca y en la parte baja se invierte la dirección al noroeste, esto se puede estar dando debido a que los pozos de la parte baja son pozos

malacate. Los pozos con los que se realizó el mapa son malacate, en su mayoría con los cuales se puede obtener un flujo subsuperficial que podría estar alimentando a los ríos y quebradas cercanas.



Mapa 11: Curvas Isofreáticas de la subcuenca Río Grande o Concepción. Elaboración propia, utilizando el método de interpolación de Kriging en el programa ArcGIS.

7.4 Hidrogeoquímica

La información recopilada para las características hidrogeoquímica del área de estudio fue proporcionada por el Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra, la cual se llevó a cabo por medio de muestreos en la época lluviosa de julio de 2021.

El Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra (2021), realizó el muestreo de la composición química del agua, en siete fuentes subterráneas y en tres fuentes superficiales.

Para realizar la comparación de los resultados del análisis fisicoquímico y químico del agua se ha tomado en cuenta los valores de los parámetros que permita comparar con la Norma Técnica de Calidad de Agua Potable para Consumo de Honduras (NCAPH), y aquellos que no están definidos se tomaron de la Organización Mundial de la Salud (OMS) descritas en el informe del Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra, realizado en el 2014. (IHCIT, 2014)

Los parámetros fisicoquímicos de las fuentes subterráneas y superficiales se detallan a continuación:

Resultados de las muestras				Agua para Consumo Humano	
Parámetro	SJ-MA-01	SJ-RQ-03	SJ-MA-05	Valor Recomendado	Valor Máximo Admisible
Cloruros	1.30	2.56	6.08	25 mg/l	250 mg/l
Sulfatos	0.00	1.00	0.00	25 mg/l	250 mg/l
Bicarbonatos	12.00	30.00	84.00	400 mg/l	-
Calcio	0.69	2.30	10.66	100 mg/l	-
Magnesio	0.22	0.61	1.99	30 mg/l	50 mg/l
Potasio	1.30	3.41	3.36	-	10 mg/l
Sodio	6.62	6.91	9.40	25 mg/l	200 mg/l
Nitritos	0.010	0.010	0.000		0.1-3 mg/l
Nitratos	5.31	0.00	3.10	25 mg/l	50 mg/l
Amonio	0.05	0.21	0.21	0.05 mg/l	0.5 mg/l
Hierro	0.31	1.09	0.69	-	0.3 mg/l
Manganeso	0.14	0.15	0.04	0.01 mg/l	0.5 mg/l
Cobre	0.00	0.00	0.01	1 mg/l	2 mg/l
Zinc	0.01	0.00	0.00	-	3 mg/l
pH	7.02	7.65	7.12	7.0-8.5 ²	6.5-9.2
Conductividad	34.40	47.85	116.30	400	-

Tabla 7: Tabla comparativa de resultados de las muestras con valores de los parámetros de la Norma Técnica de Calidad de Agua Potable para Consumo de Honduras y Organización Mundial de la Salud (OMS). ver en anexos los demás resultados. Elaboración propia.

7.4.1 Conductividad eléctrica y PH

Los resultados de la conductividad eléctrica en la época lluviosa de agua subterránea oscilaron entre 34.40 y 324.30 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los resultados para el agua superficial en la estación lluviosa oscilaron entre 37.60 y 54.30 $\mu\text{S}/\text{cm}$, los cuales se encuentran dentro de valores recomendados según la norma (NCAPH), (OMS), que es 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, estos valores de conductividad nos indica que son aguas dulces, de acuerdo con (Custodio E., 2001) . Se determinó en época lluviosa que el pH de las aguas subterráneas es de 6.06 a 7.30 y el pH en las aguas superficiales presentan valores de 7.07 a 8.12, dichos valores se consideran recomendados para el consumo humano.

7.4.2 Cationes y Aniones

El valor de calcio encontrado en las aguas subterráneas es de 0.69 a 43.60 mg/l y para las aguas superficiales de 1.02 a 3.16 mg/l; y valores que se consideran dentro del rango admisible para el consumo según la Norma Técnica de Calidad de Agua Potable para Consumo de Honduras (NCAPH) y la Organización Mundial de la Salud, es de 100 mg/l. El potasio en aguas subterráneas presenta valores de 7.90 a 1.30 mg/l y las aguas superficiales presentan valores 2.76 a 3.41 mg/l, siempre en época de lluvias, los cuales según la norma (NCAPH), están dentro del valor máximo admisible de 10 mg/l. El valor de sodio en el agua subterránea es de 6.62 a 17.54 mg/l y en aguas superficiales es de 6.56 a 7.44 mg/l, lo cual indica que es inferior a 25 mg/l establecidos como valores aptos para el consumo.

El magnesio en el agua subterránea es de 0.05 a 1.99 mg/l y en aguas superficiales es de 0.26 a 0.84 mg/l, y, por lo tanto, están dentro del rango admisible permitido de 30 mg/l. Los iones de cloruro presentan valores de 0.37 a 16.20 mg/l para aguas subterráneas y de 1.90 a 3.45 mg/l en aguas superficiales, los valores de sulfato son de 3 a 7 mg/l para aguas subterráneas y de 1.00 mg/l para aguas superficiales. Los valores de bicarbonatos son de 12.00 a 273 mg/l para aguas subterráneas y de 22 a 34 mg/l para aguas superficiales. Tanto los valores en aguas subterráneas y superficiales para los iones de cloruro y sulfato están dentro de los valores recomendados, ya que según la norma corresponden a valores de 25 mg/l, y para el bicarbonato es de 400 mg/l.

7.4.3 Nutrientes

Los valores de nitratos encontrados en aguas subterráneas corresponden a valores de 3.10 a 33.20 Mg/l, así mismo los valores encontrados en las aguas superficiales, lo cuales corresponden a valores de 2.66 a 6.20 mg/l, considerados admisibles, ya que se encuentran dentro de la norma de 50 mg/l. Los nitritos en agua subterránea son valores de 0.010 a 0.066 mg/l y en agua superficial de 0.010 a 0.026 mg/l los cuales están dentro de los valores máximos admisibles de 0.1 a 3 mg/l. El amonio presenta valores en agua

subterránea de 0.05 a 0.34 mg/l y en aguas superficiales de 0.19 a 0.21 mg/l, con valores inferiores a 0.5 mg/l recomendados para el consumo humano.

7.4.4 Metales Pesados

En cuanto a los metales pesados, el manganeso (Mn) tiene valores de 0.03 a 0.14 mg/l para aguas subterráneas y de 0.15 a 0.16 mg/l para aguas superficiales ambos dentro de la normativa permitida (0.01 a 0.5 mg/l). El cobre (Cu) presenta un valor de 0.01 tanto aguas subterráneas como para las superficiales cumpliendo el rango de la normativa que oscila entre 1 a 2 mg/l, los valores de zinc (Zn) corresponden a 0.01 mg/l, no representa un riesgo para las aguas subterráneas o superficiales porque la norma refiere rangos de 3 mg/l, el hierro (Fe), por otro lado, presentó una concentración pequeña 1.09 mg/l en fuentes de aguas superficiales lo cuales superan el rango admisible de la normativa, el cual corresponde a 0.3 mg/l.

La subcuenca de Río Grande o Concepción muestra una clasificación de sus aguas con tendencia bicarbonatadas sódicas y bicarbonatadas cálcicas o magnésicas. A continuación, se muestra el diagrama de Piper y el diagrama de Stiff.

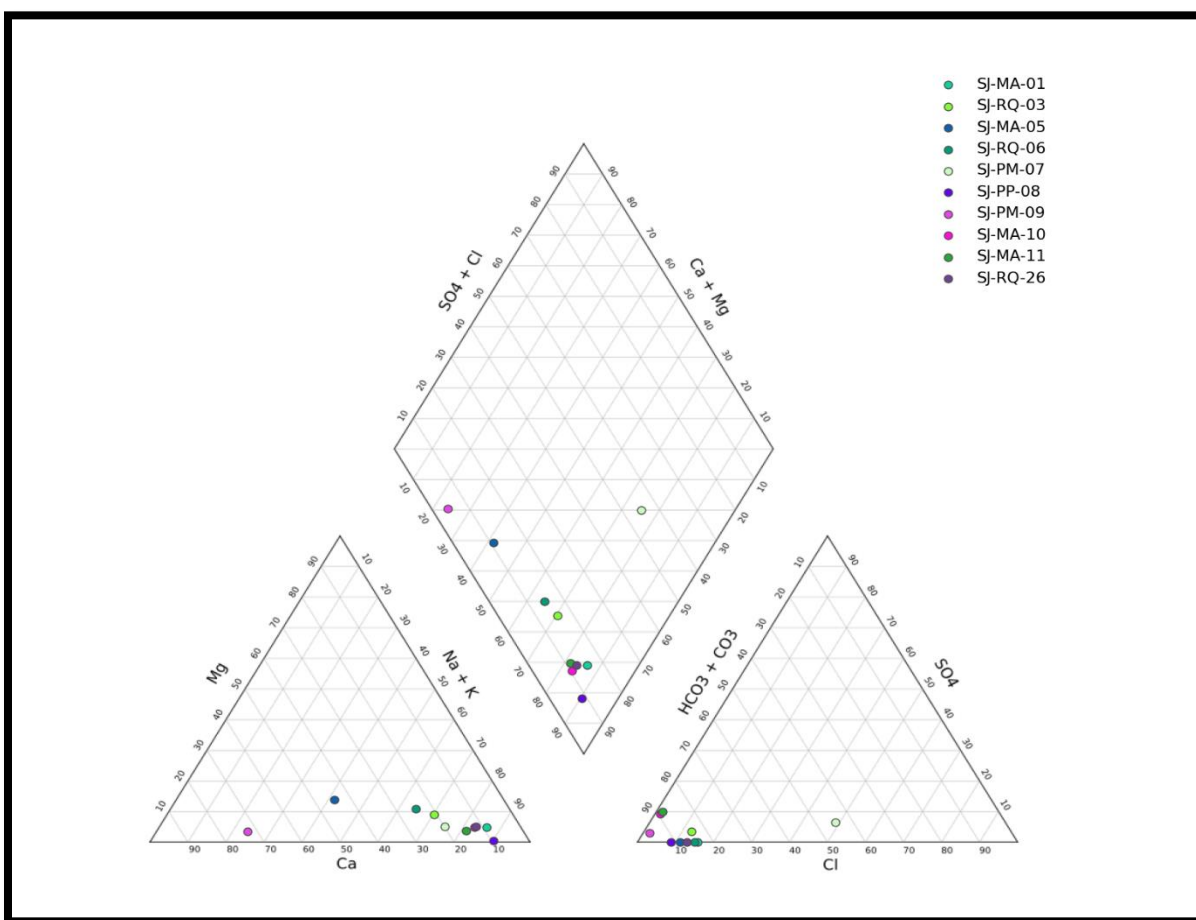


Gráfico 3: Diagrama de Piper de la Subcuenca Río Grande. Creación propia con utilizando datos hidrogeoquímicos del Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra. Tomado (IHCIT, 2021).

En el diagrama de Piper se observa que el tipo de agua para las muestras es bicarbonatadas sódicas y bicarbonatadas cálcicas o magnésicas

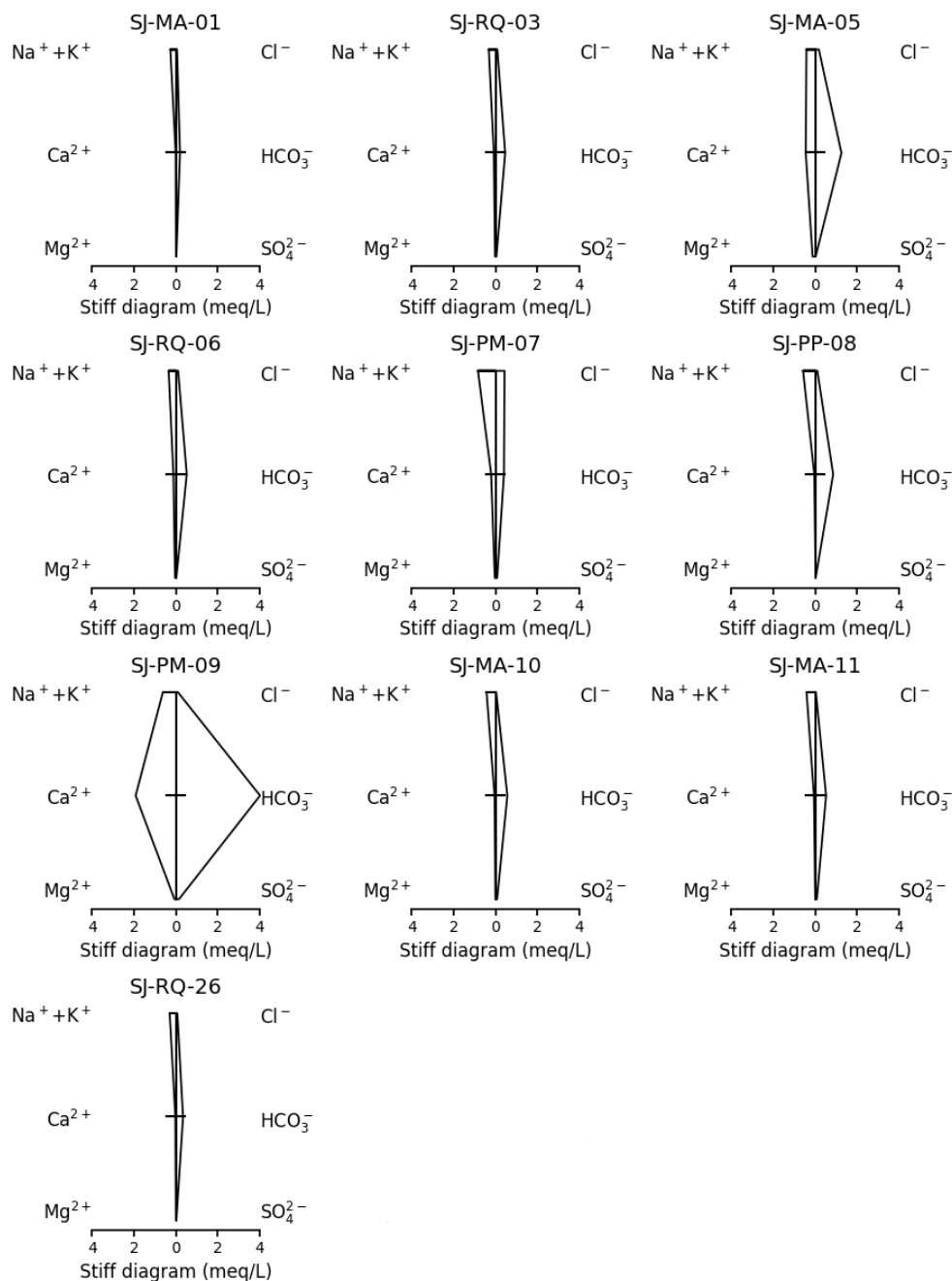
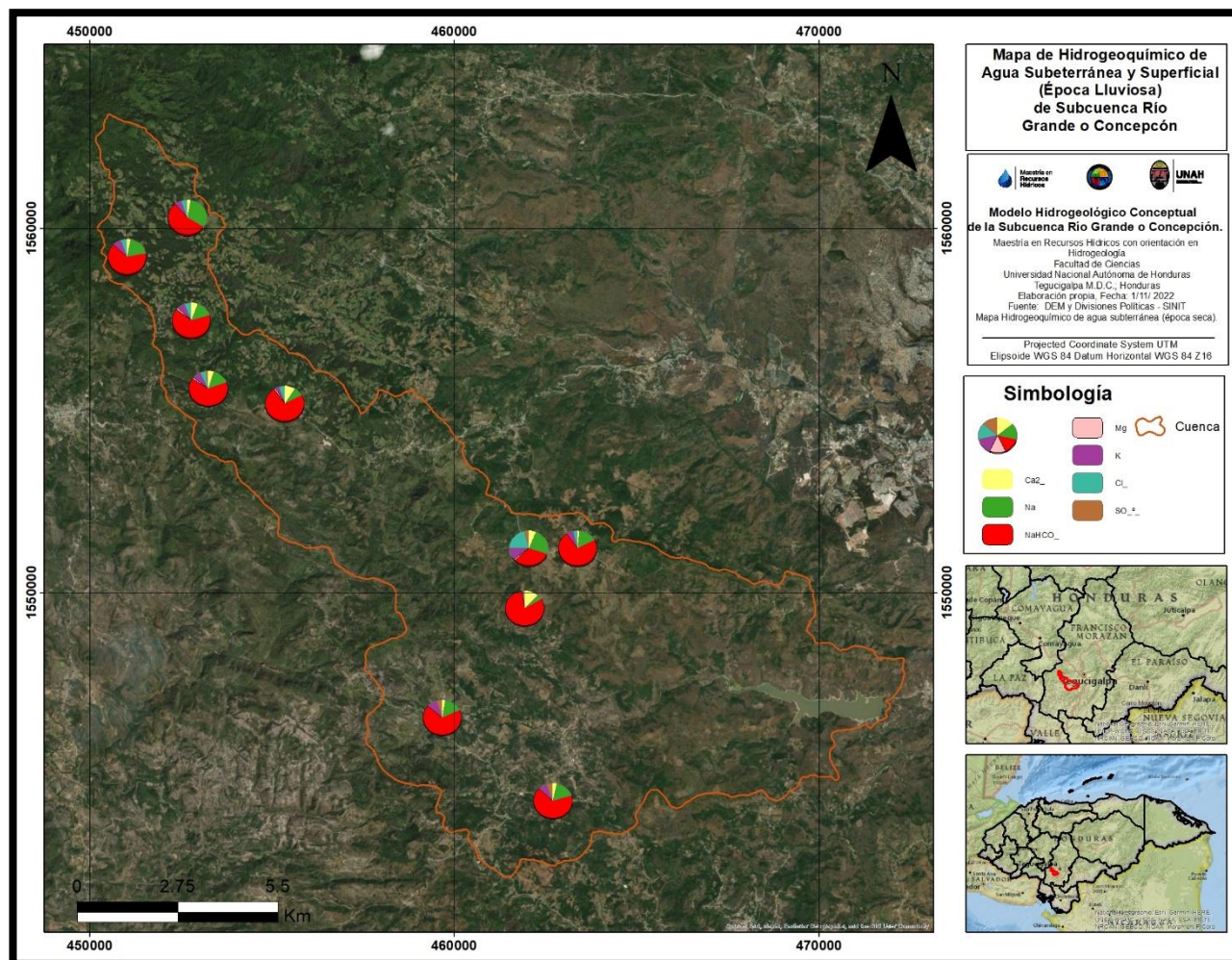


Gráfico 4: Diagrama de Stiff de la Subcuenca Río Grande o Concepción. Creación propia utilizando datos hidrogeoquímicos del Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra. Tomado (IHCIT, 2021).

En el diagrama de Stiff se evidencia claramente que el tipo de agua para las muestras es bicarbonatadas sódicas y cálcicas.



Mapa 11: Mapa Hidrogeoquímico de fuentes superficiales y subterráneas en época Lluviosa. Tomado de (IHCIT, 2021).

7.5 Balance hídrico

7.5.1 Elementos generales balance hidrometeorológico

a) Precipitación

La precipitación máxima se registró en mayo, junio, septiembre y octubre con 197.32 mm, 218.7 mm, 237.15 mm y 201.86 mm, respectivamente, durante la época lluviosa, según los datos de precipitación media mensual de las estaciones La Brea y Concepción (SANAA, 2015). Ver Tabla 8.

ESTACION	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
Concepción	171.65	174.2	89.25	127.01	180.8	160.42	28.97	7.25	3.5	3.4	12.29	44.35
La Brea	223	263.2	146.2	189.6	291.5	243.3	48.7	21.7	13.1	9.1	17.1	81.4
Promedio	197.325	218.7	117.725	158.305	236.15	201.86	38.835	14.475	8.3	6.25	14.695	62.875

Tabla 8: precipitación media mensual de las estaciones meteorológicas la Brea y Concepción. Tomada de SANAA.

El período lluvioso se define de mayo a diciembre, presentándose dos máximos de precipitación, en julio con 218.7 mm y en septiembre con 236.15 mm. El periodo seco inicia en el mes de febrero, donde se observan que las precipitaciones disminuyen desde 6.25 mm en febrero a 62.87 mm en abril.

b) Temperatura

Con respecto a los datos de temperatura, el área de estudio presenta una temperatura media anual de 22.8 °C, para el período de 1990-2015, siendo el valor máximo de 24.2 °C en el mes de mayo y la temperatura más baja de 20.72 °C en enero (Tabla 9).

A partir del mes de octubre existe una reducción en la temperatura (21.98 °C) que coincide con la estación invernal de los países situados en el hemisferio norte y con las incursiones de masas de aire frío de procedencia polar, propias de la época.

ESTACION	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
Concepción	24.15	23.4	23.13	23.6	23.21	22.68	21.35	20.88	20.72	21.97	23.31	24.66
Promedio	24.2	23.4	23.13	23.6	23.21	22.68	21.35	20.88	20.72	21.97	23.31	24.66

Tabla 9: Temperatura promedio de la estación meteorológica Concepción. Tomado de SANAA.

c) Suelos

La subcuenca presenta suelos Litosol, Andosoles e Inseptisol con un drenaje bueno, con pendientes menores a 15% e igual a 50%, estos suelos presentan un relieve muy ondulado y colinoso hasta escarpado, y en su mayoría llano, en cuanto la textura son de limo-arena, franco limoso y franco- arcilloso limoso.

d) Recarga potencial al acuífero

Para cada uno de los tipos de suelo dominantes en la subcuenca, se calculó la lámina de lluvia excedente para determinar el volumen neto de aportación mensual y anual sobre el área de recarga, con el objetivo de determinar el potencial de recarga hacia el acuífero producto de la precipitación directa. El resultado promedio se muestra en las tablas y gráficas correspondientes.

Tabla 10: Tabla Calculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP), por el Método de Thornthwaite and Matter (1986) para suelos Litosol-Cocona.

	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	TOTAL
T	24.2	23.4	23.1	23.6	23.2	22.7	21.4	20.9	20.7	22.0	23.3	24.7 	22.76
i	10.9	10.3	10.2	10.5	10.2	9.9	9.0	8.7	8.6	9.4	10.3	11.2	119.13
ETPm	106	97	94	99	95	89	76	72	70	82	96	112	1089
Fc	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	
ETP	63	58	57	60	57	54	46	43	42	49	58	67	653

Tabla 11: Tabla Calculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP), por el Método de Thornthwaite and Matter (1986) para suelos Andosol-Milile.

	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	TOTAL
T	24.2	23.4	23.1	23.6	23.2	22.7	21.4	20.9	20.7	22.0	23.3	24.7 	22.76
i	10.9	10.3	10.2	10.5	10.2	9.9	9.0	8.7	8.6	9.4	10.3	11.2	119.13
ETPm	106	97	94	99	95	89	76	72	70	82	96	112	1089
Fc	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	
ETP	58	53	52	55	52	49	42	39	39	45	53	61	599

Tabla 12: Tabla Calculo de la Evapotranspiración Potencial (ETP), por el Método de Thornthwaite and Matter (1986) para suelos Alfisol-Salalica.

	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	TOTAL
T	24.2	23.4	23.1	23.6	23.2	22.7	21.4	20.9	20.7	22.0	23.3	24.7 	22.76
i	10.9	10.3	10.2	10.5	10.2	9.9	9.0	8.7	8.6	9.4	10.3	11.2	119.13
ETPm	106	97	94	99	95	89	76	72	70	82	96	112	1089
Fc	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	
ETP	53	49	47	50	48	45	38	36	35	41	48	56	544

Tabla 13: Recarga potencial según los valores obtenidos con el Balance Hidrometeorológico, Thornthwaite and Matter (1986) para Suelo Cocona.

	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	TOTAL
ETP(mm)	63.4	58.3	56.5	59.6	57.0	53.6	45.6	43.0	42.1	49.3	57.7	67.1	653.3
P(mm)	197.3	218.7	117.7	158.3	236.2	201.9	38.8	14.5	8.3	6.3	14.7	62.9	1,275.5
P-ETP(mm)	133.9	160.4	61.2	98.7	179.1	148.2	-6.8	-28.5	-33.8	-43.0	-43.0	-4.2	622.2
ALMA(mm)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	93.2	64.7	30.9	0.0	0.0	0.0	788.8
D.ALMA(mm)	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-6.8	-28.5	-33.8	-30.9	0.0	0.0	
ETR(mm)	63.4	58.3	56.5	59.6	57.0	53.6	45.6	43.0	42.1	37.1	14.7	62.9	593.9
EXCESO(mm)	133.9	160.4	61.2	98.7	179.1	148.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	781.6
DEFICIT(mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	12.1	43.0	4.2	59.3

Tabla 14: Recarga potencial según los valores obtenidos con el Balance Hidrometeorológico, Thornthwaite and Matter (1986) para Suelo Milile.

	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	TOTAL
ETP(mm)	58.1	53.4	51.8	54.7	52.3	49.2	41.8	39.4	38.6	45.1	52.9	61.5	598.8
P(mm)	197.3	218.7	117.7	158.3	236.2	201.9	38.8	14.5	8.3	6.3	14.7	62.9	1,275.5
P-ETP(mm)	139.2	165.3	65.9	103.6	183.9	152.7	-3.0	-24.9	-30.3	-38.9	-38.2	1.4	676.7
ALMA(mm)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	97.0	72.1	41.8	2.9	0.0	1.4	815.1
D.ALMA(mm)	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-3.0	-24.9	-30.3	-38.9	-2.9	1.4	
ETR(mm)	58.1	53.4	51.8	54.7	52.3	49.2	41.8	39.4	38.6	45.1	17.6	61.5	563.5
EXCESO(mm)	139.2	165.3	65.9	103.6	183.9	152.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	810.6
DEFICIT(mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	35.3	0.0	35.3

Tabla 15: Recarga potencial según los valores obtenidos con el Balance Hidrometeorológico, Thornthwaite and Matter (1986) para Suelo Salalica.

	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	TOTAL
ETP(mm)	52.8	48.6	47.1	49.7	47.5	44.7	38.0	35.8	35.1	41.0	48.1	55.9	544.4
P(mm)	197.3	218.7	117.7	158.3	236.2	201.9	38.8	14.5	8.3	6.3	14.7	62.9	1,275.5
P-ETP(mm)	144.5	170.1	70.6	108.6	188.6	157.2	0.8	-21.4	-26.8	-34.8	-33.4	7.0	731.1
ALMA(mm)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	78.6	51.9	17.1	0.0	7.0	854.5
D.ALMA(mm)	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-21.4	-26.8	-34.8	-17.1	7.0	
ETR(mm)	52.8	48.6	47.1	49.7	47.5	44.7	38.0	35.8	35.1	41.0	31.8	55.9	528.1
EXCESO(mm)	144.5	170.1	70.6	108.6	188.6	157.2	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	840.5
DEFICIT(mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	16.3	0.0	16.3

Se ha calculado un promedio de almacenamiento subterráneo y subsuperficial de 788.8 mm, 815.1 mm y 854.5 mm de Cocona, Milile y Salalica en la Subcuenca Río Grande o Concepción correspondiente a un 61.8%, 63.9% y 66.9% del total de precipitación media.

Según Thornthwaite and Matter, el almacenamiento se distribuye en un 50% como escorrentía superficial después de que el suelo se satura. El resto se infiltra y percola como una posible recarga en el acuífero. Para los cálculos de recarga, el excedente de 788.8 mm, 815.1 mm y 854.5 mm se considerará el 50% como percolación efectiva, es decir, 394.4 mm, 407.55 mm y 427.25 mm.

La respuesta del balance hídrico durante un año hidrológico se muestra en las gráficas, así como el comportamiento de la infiltración durante cada uno de esos meses. Posteriormente, de febrero a abril, el suelo muestra una falta de humedad y agua, lo que significa que los ETP son más altos que las precipitaciones. Durante los meses de mayo a noviembre, cuando llueve mucho, el suelo se llena de agua y ocurre la escorrentía.

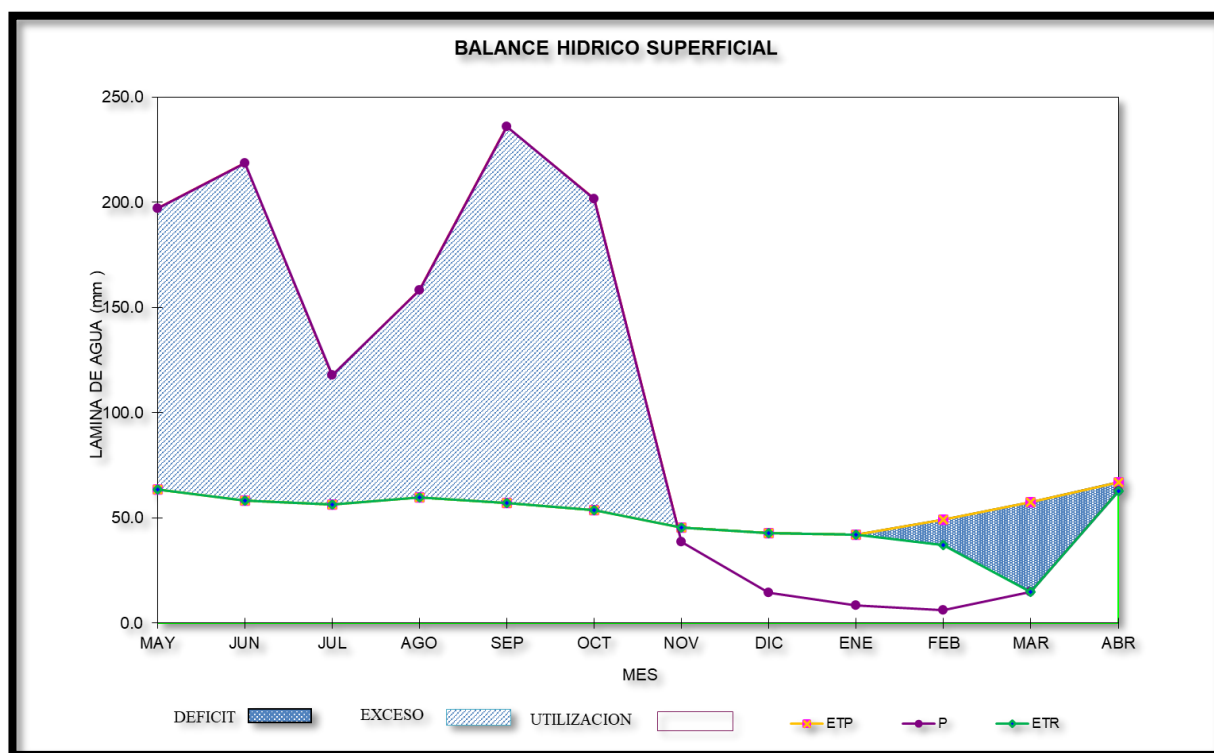
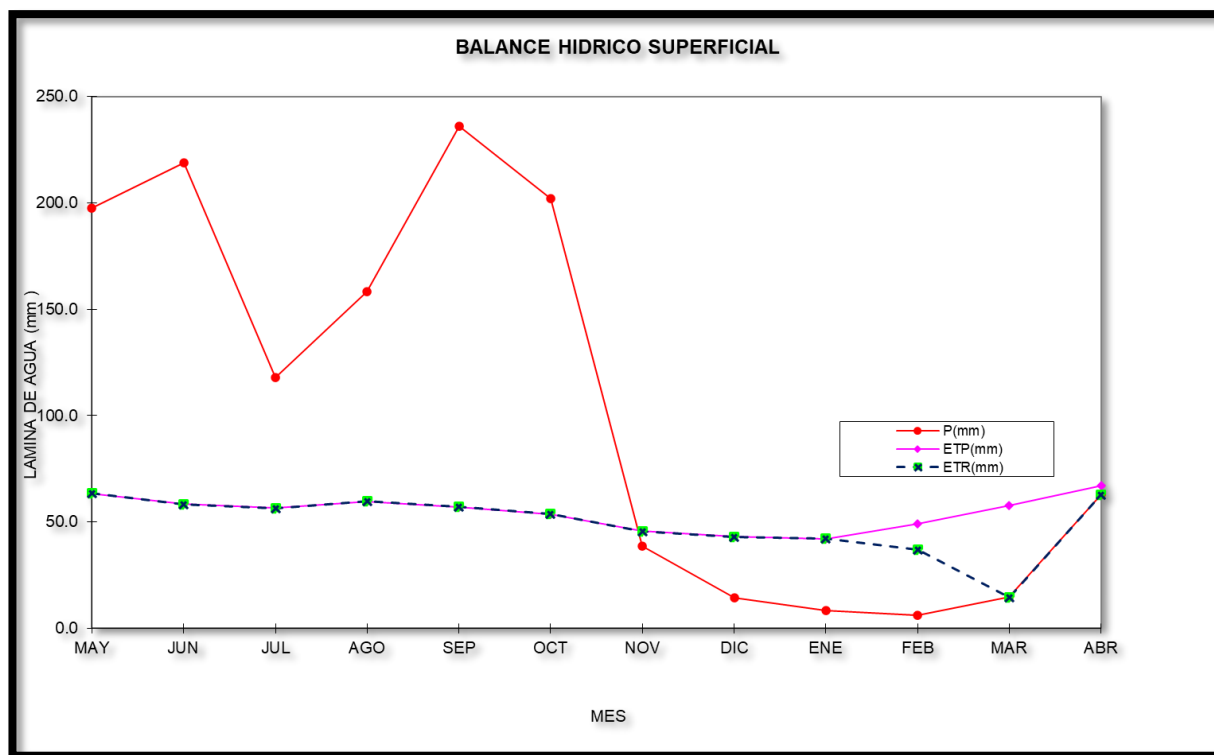


Gráfico 5: Comportamiento mensual de los principales componentes del Balance Hidrometeorológico, en la zona de recarga del área de estudio para Suelos Cocona. Elaboración Propia.

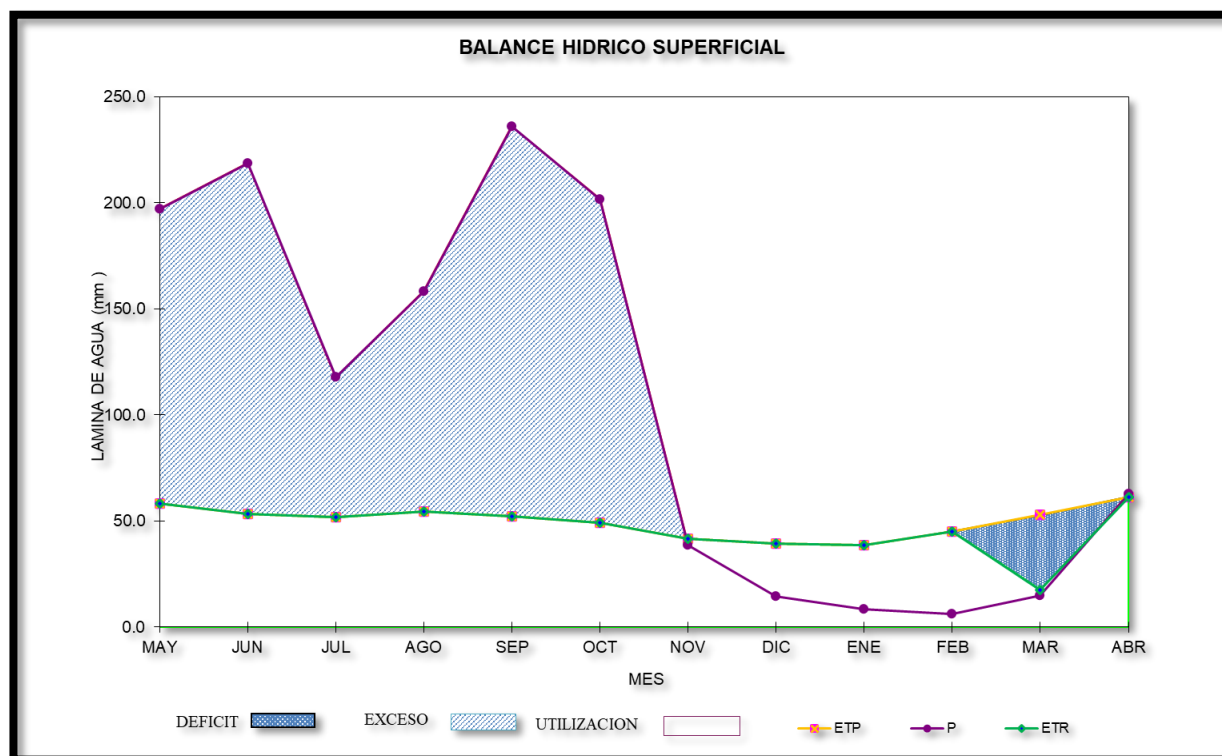
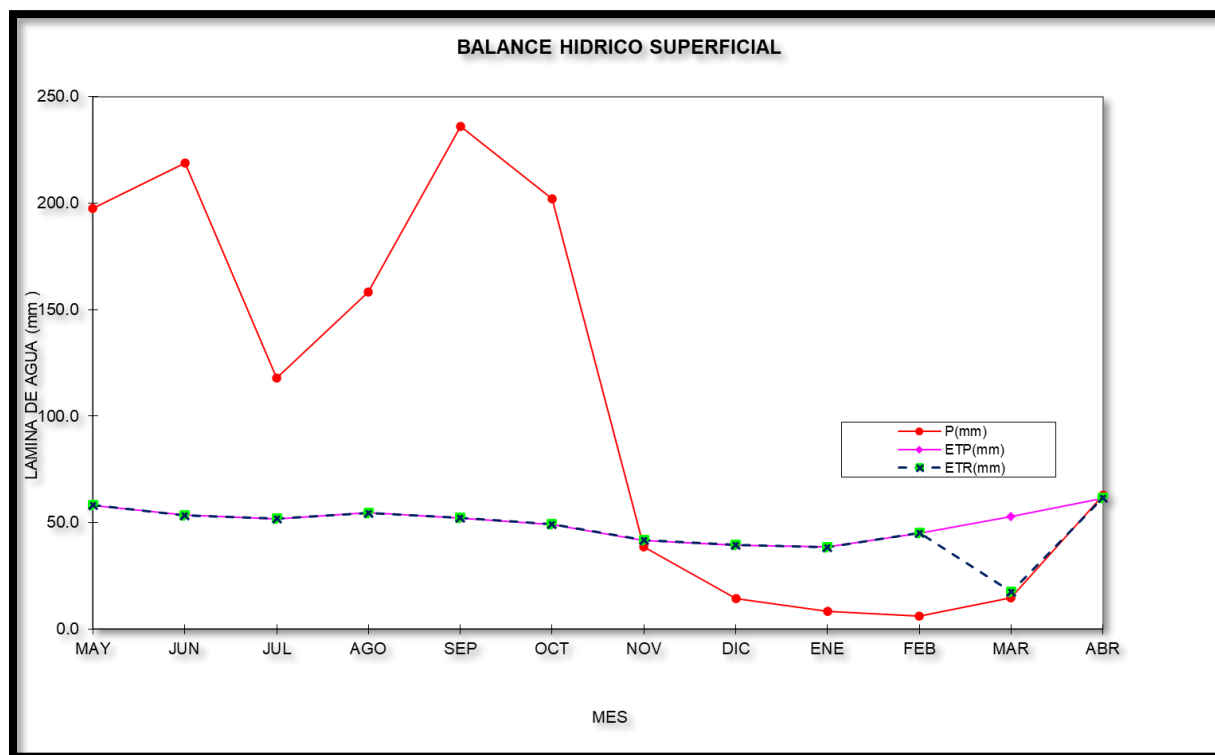


Gráfico 6 Comportamiento mensual de los principales componentes del Balance Hidrometeorológico, en la zona de recarga del área de estudio para Suelos Milile.

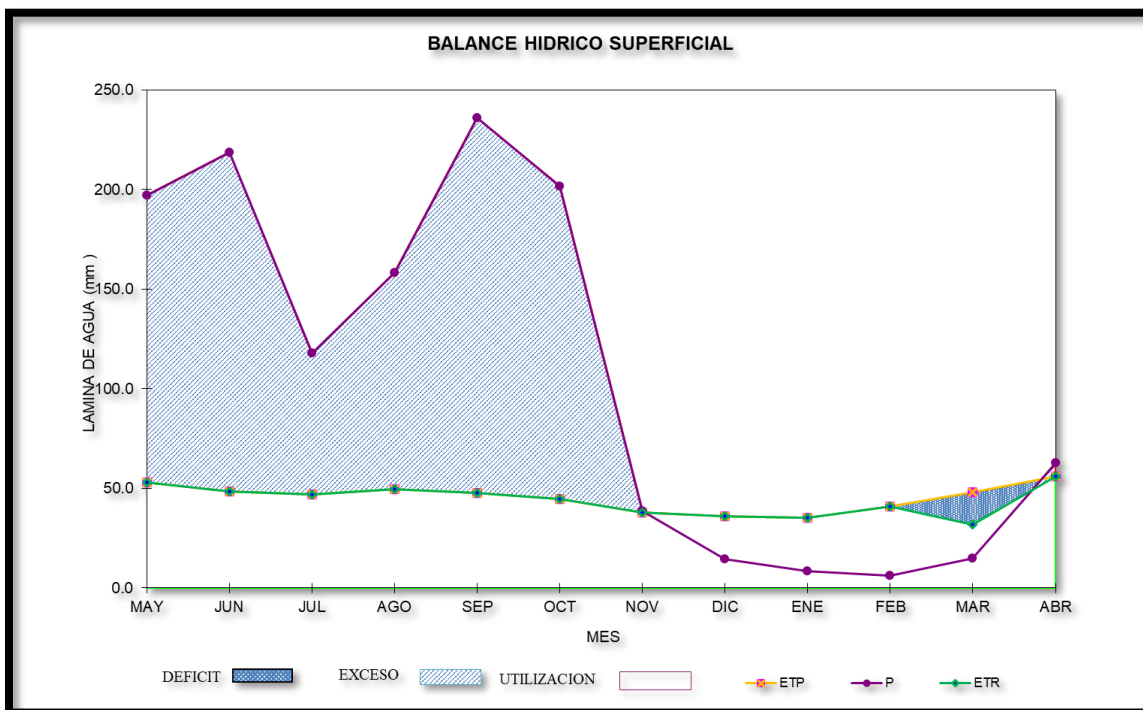
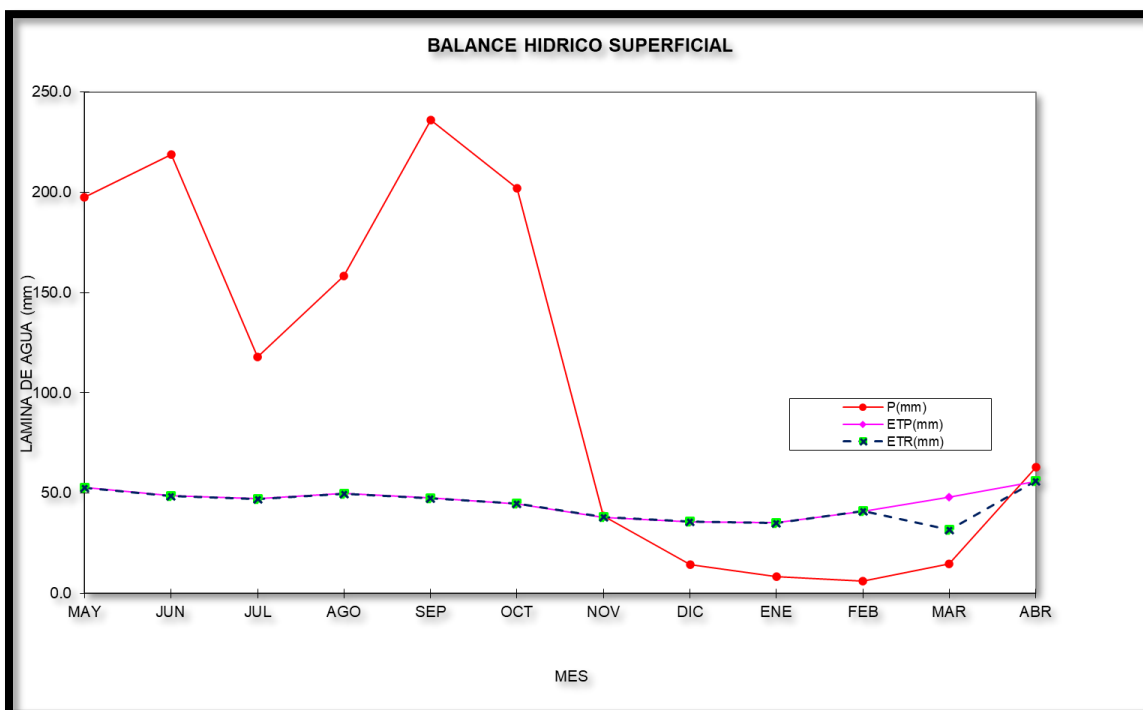


Gráfico 7: Comportamiento mensual de los principales componentes del Balance Hidrometeorológico, en la zona de recarga del área de estudio para Suelos Salalica.

7.6 Modelo Conceptual Hidrogeológico

“El modelo hidrogeológico conceptual es una simplificación esquemática de la naturaleza, en la que se busca describir el funcionamiento y características del sistema hidrogeológico” (Melo, 2017, pág. 61).

En la ilustración 35 muestra el modelo en 3D de la subcuenca concepción donde se representa la dirección del flujo, las líneas equipotenciales que se construyeron con las diferencias de los niveles piezométricos de los pozos de agua, que están ubicados dentro de la cuenca. El modelo en 3D fue realizado introduciendo toda la información antes descrita en los resultados. En la ilustración 39 se ve la sección #4 de una tomografía electrónica realizada en el área, donde se identifican las capas de toba volcánica, material saturado y agua subterránea.

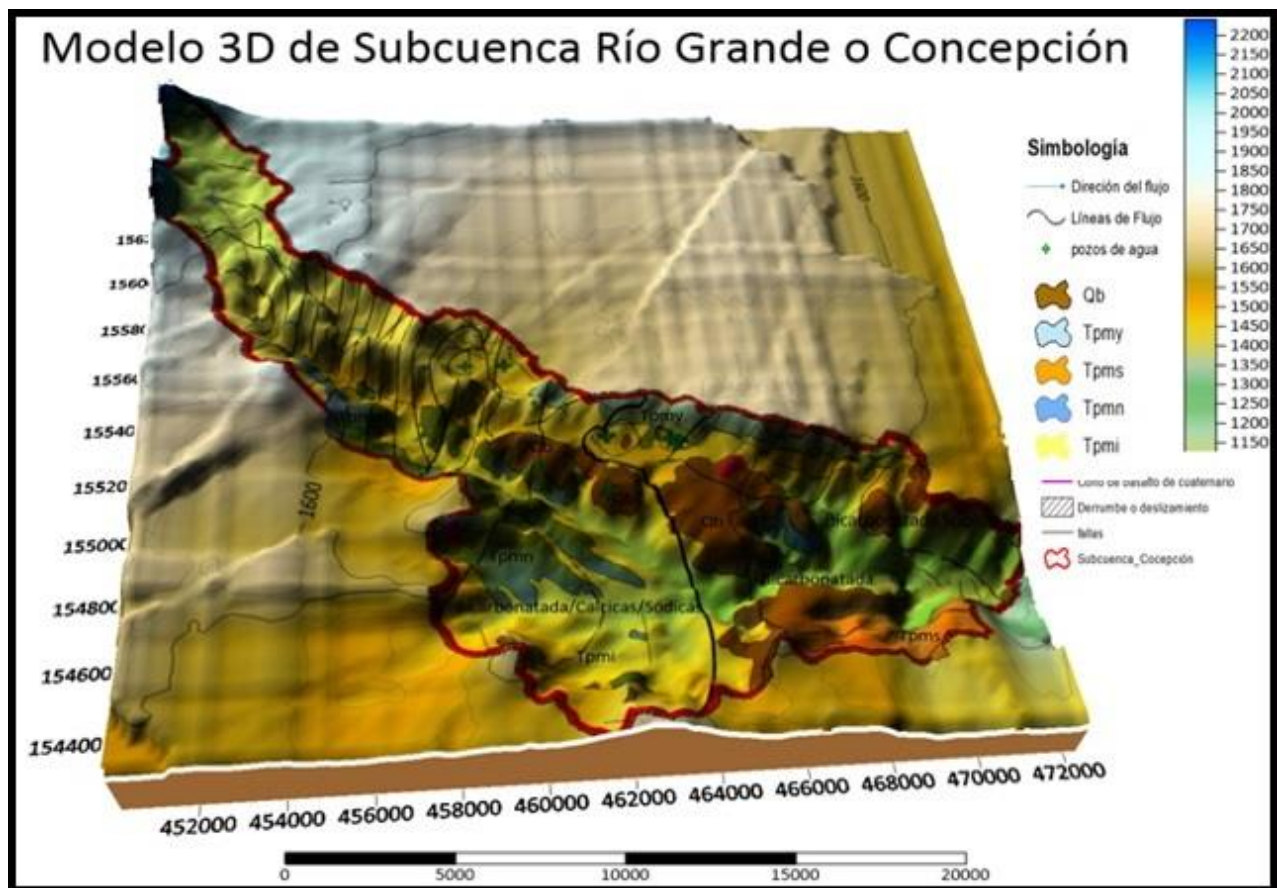


Ilustración 38: Modelo Conceptual Hidrogeológico de la Subcuenca Río Grande o Concepción

El modelo en 3D contiene información geológica, piezométrica, ubicación de pozos de agua, mapa Hidrogeoquímico y dirección de flujo.

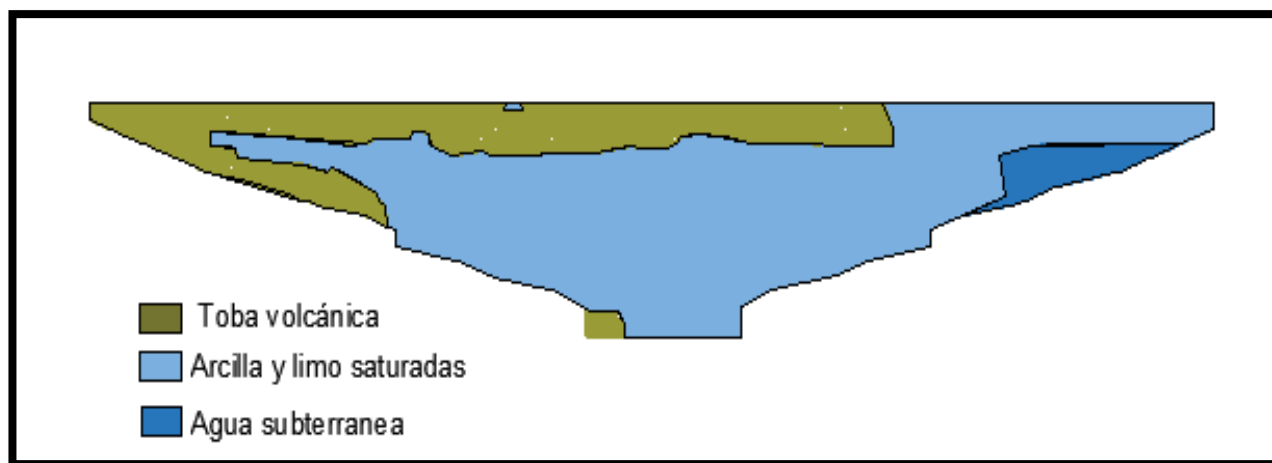


Ilustración 39: Perfil de tomografía eléctrica #4 realizada en La Brea municipio de Lepaterique.

El modelo en 2D obtenido con la tomografía eléctrica que se muestra en la ilustración 39 contiene tres capas tobas volcánicas, arcilla y limo saturados y aguas subterráneas.

8. CAPITULO VII: Discusión

8.0 Discusión

Para realizar un modelo hidrogeológico conceptual se analizó información geológica, geofísica, piezométrica e hidrogeoquímica. Para comentar los resultados obtenidos de la elaboración de un modelo conceptual, debemos mencionar que el modelo solo nos permite realizar estimaciones o análisis de comportamiento posibles, es decir, que no produce la realidad. El alcance de los objetivos propuestos en este estudio que conllevan a la realización del modelo hidrogeológico conceptual de la zona estuvo limitada a la información disponible.

8.1 Geología de la subcuenca Río Grande o Concepción

Las formas geológicas de la subcuenca Río Grande o Concepción son principalmente basaltos cuaternarios en 13.2% ocurre como extensiones de flujos de lava y el grupo Padre Miguel en 86.8% constituida por rocas volcánicas, que se encuentran en la parte alta y entre la parte media y baja de la subcuenca.

Con respecto a los resultados obtenidos en el mapa 8, representa la distribución espacial de la geología del área de estudio, la cual está compuesta por Miembro Nueva Aldea, Padre Miguel Superior, Padre Miguel Inferior, basaltos cuaternarios con rocas ignimbritas, lahares, tobas volcánicas, cono de lava, coladas basálticas, sedimentos. Con características hidrogeológicas de acuíferos de fisuras.

Según el mapa geológico proporcionado por la Universidad de Austin, Texas, en la subcuenca prevalece la formación Padre Miguel Inferior y Miembro Nueva Aldea, donde las rocas más destacadas son las ignimbritas y tobas. También está la formación geológica de los basaltos cuaternarios, donde se encuentran rocas de coladas basálticas de pahoehoe y flujos de lava. Este tipo de material geológico coincide con el encontrado en los siete sondeos geofísicos realizados en esta investigación, como tobas, lava e ignimbritas.

8.2 Identificación del material del subsuelo mediante sondeos geofísicos

De acuerdo con los resultados obtenidos en las 7 tomografías eléctricas o modelos en 2D en el área de estudio, se logran identificar materiales como tobas con valores de resistividad de 20 a 300 Ωm , lavas 1000 Ωm , ignimbritas 300 Ωm , arcillas y limos saturados con resistividad de 10 Ωm . Las tomografías que se realizaron en El Llano Ojojona, Aldea las Tablas y La Brea en Lepaterique se encontró presencia de agua subterránea con resistividad de 5 Ωm a una profundidad de 10 a 20 m. Esta información es esencial para la gestión sostenible de los recursos hídricos en la región.

En los puntos donde se llevó a cabo los sondeos según el mapa geológico predomina las siguientes unidades geológicas el perfil 1, 6, 5, 4 se encuentra en la unidad Padre Miguel Inferior (Tp_{mi}), y en los perfiles 2, 3, y 7 Miembro Nueva Aldea (Tp_{mn}).

Con todo lo anterior Según los datos proporcionados por el Instituto Honduras de Ciencias de la Tierra, los niveles de agua en la formación Padre Miguel Inferior oscilan entre los 4 m y los 30 m, mientras que las Rocas Volcánicas más jóvenes (Tp_{my}) alcanzan una profundidad de 8 a 10 m y los basaltos cuaternarios tienen una profundidad de 8 m. En contraste con los hallazgos de los sondeos geofísicos realizado en este estudio, se descubrió que las aguas subterráneas se encuentran a profundidades de 5 a 25 metros en las formaciones de Padre Miguel Inferior (Tp_{mi}) y Miembro Nueva Aldea (Tp_{mn}), lo que tiene similitud con las fuentes subterráneas existentes.

8.3 Construcción del mapa de curvas isofreáticas a partir de los datos de nivel freático de inventario de fuentes de agua de la zona de estudio.

Este análisis presenta un comportamiento del flujo subterráneo donde se presenta el mapa piezométrico en el cual se utilizó el registro de 17 pozos que se encuentran dentro de la subcuenca Río Grande o Concepción, el flujo se mueve en dirección suroeste en la parte alta de la subcuenca y en la parte baja se invierte la dirección al noroeste.

Con respecto a la dirección del flujo en la parte baja de la cuenca entre los caseríos de la Sabana y Las Olominas se puede observar que las líneas de flujo está divergiendo al grupo de pozos que se encuentra allí esto nos indica que en esa parte hay pozos de recarga que podría estar alimentando a los ríos y quebradas cercanas. En la parte de la Brea y Monte Redondo se encuentran dos pozos en los cuales la dirección de flujo converge son pozos que bombean.

Las curvas isofreáticas establecen una base para futuras iniciativas relacionadas con el estudio de las aguas subterráneas en el país, ya que proporcionan una representación preliminar del movimiento del agua subterránea en el área de estudio y esto las hace una herramienta en la gestión de los recursos hídrico.

8.4 Análisis Hidrogeoquímico de las fuentes de agua subterránea y superficial proporcionadas por el instituto de ciencias de la tierra en el 2021.

De acuerdo con los resultados del Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra (IHCIT, 2021), las aguas subterráneas de la subcuenca muestran una clasificación de sus aguas con tendencia bicarbonatadas sódicas y bicarbonatadas cálcicas o magnésicas. Los metales pesados no presentan ningún riesgo para las aguas tanto subterráneas como superficiales. El pH en época lluviosa es de 6.06 a 8.12, lo que indica que

son valores recomendados para el consumo humano. La conductividad anda en valores de 34.40 y 324.30 $\mu\text{s}/\text{cm}$, los cuales se encuentran dentro de los valores recomendados de 400 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

De acuerdo con los resultados obtenidos de las 10 fuentes analizadas, dentro de las cuales se encuentran siete fuentes subterráneas y tres fuentes superficiales se puede comprender que no presentan ningún riesgo para el consumo humano ya que están dentro de las normas establecidas por el país.

De acuerdo con la clasificación de sus aguas las fuentes hay cuatro fuentes subterráneas y una superficial (SJ-MA-01, SJ-MA-10, SJ-MA-11, SJ-PP-08, SJ-RQ-26) caen dentro del vértice de intercambio iónico en el diagrama de piper esto significa que el agua arranca a la roca constituyente son muestras que llevan mucho tiempo en el subsuelo y presentan un incremento de sodio, esto concuerda ya que hay una tendencia de bicarbonatadas sódicas en el agua.

8.5 Análisis del balance hídrico en el área de estudio

Los resultados del balance hídrico presenta dos estaciones bien marcadas, una estación lluviosa y la otra es la estación seca. La estación lluviosa se rige en los meses de mayo a octubre, y la estación seca en los meses de noviembre hasta abril. Con precipitación media anual en el área de la Subcuenca de 1,275.39 mm de acuerdo con los datos tomados en la estación meteorológica de La Brea y Concepción y la temperatura media de 22.8 °C, tomado de un registro de datos de la estación Concepción.

Al analizar los datos de precipitación y temperatura, se encuentra una infiltración potencial en la parte baja de la subcuenca de 394 mm, 407.5 mm y 427.25 mm, La cual se encuentra entre las aldeas de Sabana y Surcos de Caña, donde hay varios pozos, por lo que se considera una zona potencial de recarga.

Además, se pudo observar en los gráficos que, durante los meses secos, de diciembre a enero, el suelo utiliza las reservas de agua del subsuelo para proporcionar agua a la vegetación y los valores de ETP son los más altos durante este período del año. Posteriormente, de febrero a abril, el suelo muestra una falta de humedad y agua, lo que indica que los ETP son más altos que las precipitaciones.

9. Conclusiones

Al realizar el modelo conceptual, se evidencia fuentes adicionales de agua subterránea obtenidas a través de sondeos eléctricos y mapa de isopiezas, el cual dicta la dirección de flujo donde se puede visualizar una posible zona de descarga, contribuyendo estos hallazgos a las alternativas de la problemática de la escasez de agua.

Las características litológicas identificadas en las Subcuenca Río Grande o Concepción corresponde a formaciones geológicas de Basalto Cuaternario, con rocas de color negro, gris oscuro, gris, gris claro y morado, con texturas porfídica a afanítica. Formaciones geológicas Miembro Nueva Aldea, con rocas de color blanco, tostado, rosado y rojo, con textura de cristales y origen. Las formaciones geológicas rocas volcánicas más jóvenes poseen rocas ignimbritas riolíticas, vítrica cristalina soldada. Y las formaciones geológicas Padre Miguel Inferior corresponde a rocas de color tostado, blanco, rosado, rojo, gris y café, y su textura está compuesta por depósitos que varían de porfídica a afanítica a vítrica y en la superior las rocas son de color blanco, tostado, rosado y rojo, con texturas porfirítica a afanítica y vítrea. Estas formaciones geológicas forman acuíferos de fisuras con poca o moderada productividad de agua subterránea.

Los puntos de localización del agua subterránea, mediante el método de tomografía eléctrica en la Subcuenca Río Grande o Concepción, se determinaron en los sondeos que se realizaron en La Brea Lepaterique, en la Aldea Las Tablas ubicadas en Lepaterique, se encontró a una profundidad de cinco metros y la tercera localización en El Llano Ojojona. En todos los puntos se identifican materiales, como tobas con valores de resistividad de 20 a 300 Ωm , lavas 1000 Ωm , ignimbritas de 300 Ωm , arcillas y limos saturados con resistividad de 10 Ωm y agua subterránea con valores de resistividad de 5 Ωm .

Las características hidrogeoquímicas encontradas en las fuentes superficiales y subterráneas de la Subcuenca de Río Grande o Concepción son valores de conductividad eléctrica del agua subterránea de 34.40 y 324.30 $\mu\text{S}/\text{cm}$, los resultados para el agua superficial en la estación lluviosa oscilaron entre 37.60 y 54.30 $\mu\text{S}/\text{cm}$, los valores de pH se encuentran entre 6.06 a 8.12, los valores de metales pesados encontrados, nutrientes, cationes y aniones también se encuentran dentro de los valores recomendados que dicta la Norma Técnica de Calidad de Agua Potable y la Organización Mundial de la Salud para el consumo humano, así mismo la clasificación de sus aguas, ya que es bastante homogénea con tendencia de bicarbonatadas sódicas, cálcicas o magnésicas.

Finalmente, se determina que la dirección de flujo se mueve al suroeste en la parte alta de la Subcuenca y en la parte baja se invierte la dirección al noroeste, este flujo puede darse debido a que los pozos de la parte bajan de la Subcuenca son pozos malacate.

El área de estudio produce aproximadamente 4.2 millones de metros cúbicos por año, lo que resulta en una pérdida de aproximadamente 739 mil metros cúbicos de escorrentía por año, y se han identificado infiltraciones potenciales para las áreas de recarga de 394 mm, 407.5 mm y 427.25 mm.

El cálculo promedio de almacenamiento subterráneo y subsuperficial es de 788.8 mm, 815.1 mm y 854.5 mm de suelo Cocona, Milile y Salalica en la subcuenca Río Grande o Concepción, correspondiente a un 61.8%, 63.9% y 66.9% de la precipitación media total.

10. Recomendaciones

- Continuar con las mediciones de niveles freáticos en los pozos perforados de la Subcuenca Río Grande o Concepción para obtener un registro de datos más extenso y crear así una nueva interpretación de los datos a través de mapas piezométricos.
- Realizar levantamientos en el área de estudio utilizando técnicas geofísicas como la tomografía eléctrica, sondeos eléctricos verticales entre otros para comprender mejor los tipos de materiales geológicos presentes en el área y ubicar los depósitos de agua subterránea para su uso y comprensión.
- Seguir realizando censos para obtener un buen registro de fuentes de agua superficial y subterránea para evaluar las descargas de acuíferos y lo que ocurre en estas fuentes, con el fin de identificar sistemas de importancia para su protección.
- Evaluar la calidad de las aguas superficiales y subterráneas de la subcuenca, así como los valores de pH, conductividad y temperatura de campo usando equipo debidamente calibrado.
- Evaluación mediante modelos geoquímicos como PHREEQC el proceso de precipitación y disolución de iones y su efecto sobre su concentración en las aguas en la Subcuenca Río Grande o Concepción.
- Seguir recolectando información geológica que puede ser valiosa para la comprensión de las aguas subterráneas, así como para evaluar los riesgos de deslizamiento en la subcuenca, facilitado por aquellos considerados bien capacitados en el área.

11. Bibliografía

- (JICA), A. d. (18 de Junio de 2002). *Informe de Apoyo C Analisis Hidrologico*. Recuperado el 31 de Agosto de 2022, de https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11688488_06.pdf
- Abiente, M. (21 de Octubre de 2020). *Plan Nacional de Reducción de Riesgos por Sequía 2020 - 2038*. Recuperado el 25 de Marzo de 2021, de Mi Abiente: <http://www.miambiente.gob.hn/static/documentos/PropuestaPNRRS.pdf>
- Argeñal, F. (13 de Octubre de 2015). *Variabilidad Climática y Cambio Climático en Honduras*. Obtenido de Proyecto del Fondo de Adaptación: <https://acchonduras.files.wordpress.com/2014/10/variabilidad-y-cambio-climatico-honduras2010.pdf>
- Auge, D. (2008). *Tierra:Red Temática de Ciencias de la Tierra*. Recuperado el 18 de Marzo de 2022, de Métodos Geoelectricos para la Prospección de Agua Subterránea: <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/ProspeccGoelec.pdf>
- Auge, D. G. (2008). *TIERRA: Red Temática de Ciencias de la Tierra*. Recuperado el 18 de Marzo de 2022, de Métodos Geoelectricos para la Prospección de Agua Subterránea: <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/ProspeccGoelec.pdf>
- Berrios, S. P. (2014). Protección legal de las fuentes de agua en la ciudad de Tegucigalpa. *Revista de Derecho*, 35(1), 75-91.
- Burger. (1992). Electrical Resistivity. En R. H. Burger, *Exploration Geophysisc of the Shallow Subsurface* (págs. 265-347). Prentice Hall.
- Castrechin, A. (Enero de 2019). *ResearchGate*. Recuperado el 12 de Septiembre de 2022, de Caracterización hidrogeológica del complejo de morrena glacial usando mediciones ERT y perfiles TD: un estudio de caso en el área de Veluwe, Países Bajos: https://www.researchgate.net/figure/Figura-29-Resistividad-de-agua-y-algunas-rocas-Astier-1975_fig5_330715923
- CATIE-GIZ, A. h. (2016). *Diagnostico de la cuenca Manchaguala, con enfoque de riesgo hídrico, SPS - Honduras*. San Pedro Sula: CATIE - GIZ.

- Chirinos, M., Hernández, J., Rivera, L., & Valerio, L. (2021). *Análisis de la calidad del agua subterránea y superficial en la microcuenca del Río Chiquito, considerando variaciones estacionales en los años 2012 y 2013*. Tegucigalpa: Universidad Nacional Autónoma de Honduras.
- COPECO. (Mayo de 2010). *COPECO*. Recuperado el 1 de Marzo de 2022, de Manual para el Diseño, Instalación, Operación y Mantenimiento de Sistemas Comunitarios de Alerta Temprana ante Inundaciones.: <http://copeco.gob.hn/documents/Manual-SATI-21-07-2015.pdf>
- Cordoba, D. (2012). *Centro para el conocimiento del paisaje*. Recuperado el 12 de Noviembre de 2021, de Metodología para el desarrollo de un modelo hidrogeológico mediante herramientas de información geográfica: http://www.cpaisaje.org/geomatica_agua/Metodologia_desarrollo_mod_%20hidrogeologico.pdf
- Crio, R. A. (1 de Enero de 2009). *Tomografía eléctrica*. Recuperado el 30 de Agosto de 2022, de Universidad Politécnica de Catalunya: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6231/07.pdf?sequence=8>
- Cruz, G. O. (26 de Agosto de 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, Vol 55(1): 118-142*, 118-136. Recuperado el 29 de Agosto de 2022, de Escasez de agua en Tegucigalpa, Honduras: ¿Está siendo afectada la subcuenca Guacerique por la variabilidad climática y el arrastre de sedimentos?
- Custodio E. (2001). Hidrología Subterránea, Tomo I, Capítulo 10.2 Hidrogeoquímica. En E. Custodio, & L. M.R.. Madrid: Segunda Edición - Omega.
- Custodio E. (2001). Hidrogeología Subterránea, Tomo 1, Capítulo 4.5 Diaclasas. Naturaleza. En E. Custodio, & L. M.R.. Madrid : Segunda Edición-Omega.
- Custodio, E.; Llamas, M. R. (2001). *Hidrología subterránea, Tomo I, Capítulo 1 Introducción General de la Sección*. Barcelona, España: Ediciones omega, S.A, Segunda Edición.
- E Custodio; Llamas. (2001). Hidrología Subterránea, Tomo 1, Capítulo 4.2 Composición de las aguas subterráneas. En E. Custodio, & L. M.R.. Madrid: Segunda Edición - Omega.
- Enmer Treminio, W. M. (Diciembre de 2016). *Balance Hidrológico de la cuenca del Río Ochomogo*. Obtenido de CORE: <https://core.ac.uk/download/pdf/336876972.pdf>

- Escuder, R., Fraile, J., Jordana, S., Ribera, F., Sánchez, X., & Vázquez, E. (2009). *Hidrogeología: Conceptos Básicos de Hidrología Subterránea* (Primera Edición ed.). Barcelona: Fundacion Centro Internacional de Hidrología Subterránea.
- FAO - Simmons, O. d. (1969). *Informe al gobierno de Honduras, Los Suelos de Honduras*. Roma: FAO, N AT 2630.
- Fernandez, R. S. (8 de Diciembre de 2005). *Tribunal Superior de Cuentas*. Recuperado el 8 de Agosto de 2022, de Auditoria de Gestión Ambiental Practicada a la Division Metropolitana del Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados(SANAA): https://www.tsc.gob.hn/web/Auditorias/Informes_de_Auditoria/Sector_Recursos_Naturales_Ambiente/2005/03-2005-DARNA.PDF
- Fernández, R. S. (8 de Diciembre de 2005). *Tribunal Superior de Cuentas*. Recuperado el 8 de Agosto de 2022, de Auditoria de Gestión Ambiental Practicada a la Division Metropolitana del Servicio Autónomo Nacional de Acueductos y Alcantarillados(SANAA): https://www.tsc.gob.hn/web/Auditorias/Informes_de_Auditoria/Sector_Recursos_Naturales_Ambiente/2005/03-2005-DARNA.PDF
- Fetter, C. (2000). *Applied Hydrogeology*. Wisconsin: Prentice Hall.
- Gabiels, D., Lobo, D., & Pulido, M. (22 de Julio de 2014). *Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada de los suelos*. Recuperado el 27 de Marzo de 2021, de Slideshare: <https://es.slideshare.net/renanfernandezgalvez/980-18911sm>
- Gálvez, J. J. (2011). *Global Water Partnership*. Recuperado el 8 de Agosto de 2022, de Ciclo Hidrológico: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/ciclo_hidrologico.pdf
- García, V. B. (22 de Octubre de 2016). *Ecuador Documents*. Recuperado el 20 de Octubre de 2022, de Monitoreo de la pluma de agua tratada que se descarga en una zona costera del acuífero del Valle de Maneadero, Baja California, mediante métodos eléctricos: <https://fddocuments.ec/download/programa-de-posgrado-en-ciencias-en-ciencias-de-la-tierra-con-para-cubrir>
- Gasulla, M. (Febrero de 1999). *OBTENCIÓN DE IMÁGENES DE LA DISTRIBUCIÓN DE IMPEDANCIA ELÉCTRICA EN EL SUBSUELO. APLICACIÓN A LA DETECCIÓN DE OBJETOS LOCALES*. Recuperado el 25

de Marzo de 2021, de UPCommons: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93628?locale-attribute=en>

- Ghiglione, M. (4 de Abril de 2019). *Geología Estructural*. Recuperado el 4 de Noviembre de 2020, de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/332354298_GEOLOGIA_ESTRUCTURAL_INTRODUCCION/link/5cafda8b4585156cd7916114/download
- Gomez, J. (4 de Julio de 2009). *GEOLOGÍA, GEOFÍSICA, HIDROGEOQUÍMICA E ISÓTOPOS, COMO HERRAMIENTAS PARA DEFINIR UN MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO, CASO DE APLICACIÓN: ACUÍFERO COSTERO DEL MUNICIPIO DE TURBO*. Recuperado el 26 de Marzo de 2021, de Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Colombia: https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/70222/71787208.2009_1.pdf?sequence=6&isAllowed=y
- Griem-Klee, S. (9 de Marzo de 2016). *Métodos eléctricos: Resistividad - electrodos*. Recuperado el 1 de Septiembre de 2022, de Apuntes Geología: <https://www.geovirtual2.cl/EXPLORAC/TEXT/070-electrico-resistividad-configuracion-electrodos.htm>
- Gutiérrez, B., Lanza, R., Garcia, N., & Garcia, M. (2017). *EVALUACIÓN DEL RIESGO HÍDRICO EN LA Tegucigalpa : UNAH - IHCIT*.
- GWP. (2021). *Balance Hídrico superficial*. Obtenido de GWP: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/balance_hidrico.pdf
- Harwood, R. (1 de Octubre de 2018). *Richard Harwood's Earth Sciences*. Obtenido de Geología del Cuadrangulo Ojojona, Francisco Morazan,: <http://profharwood.x10host.com/RHWEB/Publications/1991OjojonaReport.pdf>
- Huitzil, E. V. (Septiembre de 2015). *Tomografía eléctrica aplicada a caracterizar la cantera La Joya ubicada en el municipio de Ixtacuixtla, Tlaxcala*. Recuperado el 30 de Agosto de 2022, de Benemérita Universidad Autónoma de Puebla: <https://repositorioinstitucional.buap.mx/bitstream/handle/20.500.12371/8465/579415T.pdf?sequence=1#:~:text=Introducci%C3%B3n%20La%20tomograf%C3%ADa%20el%C3%A9ctrica%20es,tipo%20de%20recursos%20de%20inter%C3%A9s>.

- IHCIT. (7 de Agosto de 2014). *Estudio Hidrogeoquímico de la parte alta de la cuenca del Río Choluteca*. Obtenido de Proyecto del Fondo de Adaptación: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://acchonduras.files.wordpress.com/2014/08/actualizacion-del-inventario-de-recursos-de-aguas-subterr3a1neas-ihcit-unah-2014.pdf
- IMPRES. (8 de Mayo de 2014). *FALLAS GEOLÓGICAS*. Recuperado el 26 de Marzo de 2021, de IMPRES: <http://contenidos.inpres.gov.ar/docs/Fallas%20Geol%C3%B3gicas.pdf>
- INE. (15 de Septiembre de 2018). *Santa Lucia, Francisco Morazán*. Recuperado el 15 de Marzo de 2021, de INE: <https://www.ine.gob.hn/V3/imag-doc/2019/08/Santa-Lucia-FM.pdf>
- INE. (21 de Agosto de 2019). *Distrito Central*. Recuperado el 25 de Marzo de 2021, de INE: <https://www.ine.gob.hn/V3/imag-doc/2019/08/Distrito-central.pdf>
- INE, I. N. (2013). *XVII Censo Nacional de Población y VI de Vivienda*. Informe de País, Instituto Nacional de Estadística, Francisco Morazan, Tegucigalpa. Recuperado el 15 de Enero de 2018, de <http://www.redatam.org/binhnd/RpWebEngine.exe/Portal?BASE=MUNDEP11&lang=ESP>
- Ing. Agr. MSc. Agustín Sanzano. (Sin Año). *El Potasio del Suelo*. Recuperado el 22 de Octubre de 2013, de <http://www.edafo.com.ar/Descargas/Cartillas/El%20Potasio%20del%20Suelo.pdf>
- Instituto Geológico Y minero de España (IGME). (1985). LA COMPOSICION QUIMICA DE LAS AGAS SUBTERRANEAS. En P. N.-G.-F. J. Porras Martin, *CALIDAD Y CONTAMINACION DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS EN ESPAÑA* (págs. pag 17-33).
- Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (1985). LA COMPOSICION QUIMICA DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS. En J. Porras Martín, P. Nieto López-Guerrero, C. r. EPTISA: Alvarez-Fernández, A. Fernández Uría, & M. V. Gimeno, *CALIDAD Y CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ESPAÑA* (págs. 17-33).
- Isabel Bernal, F. R. (Noviembre de 2019). *Sistema de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres(SIGRID)*. Recuperado el 30 de Agosto de 2022, de Estudios de tomografía de resistividad eléctrica en la comunidad de Record: igrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//8080_estudio-de-tomografia-electrica-en-la-comunidad-de-record-cconccacca.pdf#:~:text=Uno%20de%20los%20ensayos%20geofísicos,freáticas%2C%20es%20la%20tomografía%20

- Javier, F. (Septiembre de 2012). *Universidad de Salamanca*. Recuperado el 19 de Octubre de 2022, de Hidráulica Subterránea: Principios Básicos: https://hidrologia.usal.es/temas/Hidraulica_Subt.pdf
- Jica. (23 de Marzo de 2001). *Informe de Apoyo-A Estudio Geológico*. Recuperado el 31 de Agosto de 2022, de Jica: https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11617651_02.PDF
- JICA. (18 de junio de 2002). *INFORME DE APOYO I ADMINISTRACION DE CUENCA*. Recuperado el 25 de Marzo de 2021, de Jica: https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11688488_16.pdf
- Jica. (13 de Abril de 2005). *Jica*. Obtenido de Informe de Apoyo-A Estudio Geológico: https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11617651_02.PDF
- JICA. (Diciembre de 2021). *ESTUDIO DE RECOLECCIÓN DE DATOS SOBRE EL ABASTECIMIENTO DE AGUA EN TEGUCIGALPA EN LA REPÚBLICA DE HONDURAS*. Obtenido de JICA.
- José Vargas, L. D. (2012). Balance hídrico mensual de una cuenca Patagónica de Chile: Aplicación de un modelo parsimonioso. *SciELO*, 32-41. Obtenido de <https://www.scielo.cl/pdf/oyp/n12/art03.pdf>
- José Vargas, L. D. (2012). Balance hídrico mensual de una cuenca Patagónica de Chile: Aplicación de un modelo parsimonioso. *SciELO*, 32-41. Obtenido de <https://www.scielo.cl/pdf/oyp/n12/art03.pdf>
- José, H. (1987). *Interpretacion de Curvas de Sondeos Electricos Verticales*. Madrid: Tecnología.
- Llamas, A. G. (2001). *Hidrología subterranea, tomo II - Capitulo 5 Conceptos basicos y definiciones*. Barcelona: Omega.
- Llamas, M.R. (1998). *Over-exploitation of groundwater (including fossil aquifers)*. Paris: UNESCO, Water: a looming crisis.
- Martel, Quím. Ada Barrenechea. (Sin Año). *CAPÍTULO 1; ASPECTOS FISICOQUÍMICOS DE LA CALIDAD DEL AGUA*. Recuperado el Octubre de 2013, de <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manualI/tomol/uno.pdf>
- Martínez, L. (Diciembre de 2004). *Metodología para la modelación hidrogeológica de medios fracturados*. Obtenido de Dialnet: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=6716>
- Melo, V. M. (Diciembre de 2017). *Universidad Catolica de Colombia*. Obtenido de Modelo Hidrogeológico Conceptual a partir de Información Secundaria, en los Alrededores del Centro Urbano del Municipio de Chiquinquirá.:

https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15317/1/MODELO_HIDROGEOLOGICO%20CONCEPTUAL_MUNICIPIO_CHIQUINQUIRA.pdf

- Monkhouse, F. J. (9 de Mayo de 2022). *Wikipedia*. Recuperado el 19 de Octubre de 2022, de Efluente: https://es.wikipedia.org/wiki/Efluente#cite_ref-1
- Montaner, M. (2021). Aproximación por el método de Thorthwite, al calculo de infiltración de agua lluvia util. *Dialnet*, 223-235. Obtenido de <file:///C:/Users/xarah/Downloads/Dialnet-AproximacionPorElMetodoDeThornthwaiteAlCalculoDeln-105434.pdf>
- Montaner, M. (2021). Aproximación por el método de Thorthwite, al calculo de infiltración de agua lluvia util. *Dialnet*, 223-235. Obtenido de <file:///C:/Users/xarah/Downloads/Dialnet-AproximacionPorElMetodoDeThornthwaiteAlCalculoDeln-105434.pdf>
- Muñoz, M. C. (23 de Febrero de 2021). *Centro Universitario de Merida*. Recuperado el 30 de Agosto de 2022, de Tomografía eléctrica Fundamentos y Aplicaciones : https://dehesa.unex.es/bitstream/10662/11842/1/2021_Tomografia_electrica.pdf
- Ordoñez, J. (Septiembre de 2012). *CICLO HIDROLÓGICO*. Recuperado el 22 de Marzo de 2021, de Global Water Partnership: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/ciclo_hidrologico.pdf
- Organizacion Mundial de la Salud. (2006). *Guías Para la Calidad del Agua Potable, Primer Apendice a la Tercera Edicion, Volumen I*. Recuperado el Septiembre de 2013, de http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_intro.pdf
- Ortega, G. (28 de agosto de 2018). *ABC*. Obtenido de Deformaciones de la Corteza Terrestre: <https://www.abc.com.py/edicion-impres/suplementos/escolar/deformaciones-de-la-corteza-terrestre-1735278.html>
- Osorio, M. (2 de Julio de 2015). *Construcción de modelos hidrogeológicos en medios fracturados a partir de información escasa*. Recuperado el 20 de Diciembre de 2020, de Universidad Nacional de Colombia: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/54825>
- Pio, MsC. Carmen E. Barreto, Universidad Nacional del Callao. (2011). *CAPITULO IV; REGULADORES DE pH*. Recuperado el Octubre de 2013, de http://www.unac.edu.pe/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes_Finales_Investigacion/Julio_2011/IF_BARRETO_PIO_FIARN/CAP.%20IV.PDF

- porras, M., Nieto, J., López, P., EPTISA, Alvarez, C., Fernández, A., & Gimeno, M. (1985). *CALIDAD Y CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ESPAÑA*. Obtenido de Instituto Geológico y Minero de España: <http://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/lib43.htm>
- PQWT. (2 de Febrero de 2017). *Geophysical Prospecting Instrument*. Recuperado el 18 de Marzo de 2022, de Operation Manual for PQWT-TC150/TC300/TC500/TC700: <https://5.imimg.com/data5/SELLER/Doc/2021/4/II/WX/IC/123472109/water-detector.pdf>
- Quintana, A. (2013). *Aplicación de la Tomografía Eléctrica en la Caracterización del Deslizamiento de Doña Mencía*. Recuperado el 1 de Septiembre de 2022, de Junta Andalucía: https://www.juntadeandalucia.es/export/drupaljda/20130924_Tomografia_electrica_TFM_GEO MET_AQB.pdf
- Ramirez, Carlos Alberto Sierra. (2011). *CALIDAD DEL AGUA; Evaluacion y Diagnostico, 1ª Edicion*. Medellin: Universidad de Medellin.
- Rees, J. (2006). *Riesgos y Gestión Integrada de Recursos Hídricos*. El Salvador: GWP TEC Background papers N G, 58p.
- Republica de Honduras Ministerio de la Salud. (1995). *Norma Tecnica para la Calidad del agua Potable*. Recuperado el Septiembre de 2013, de <http://www.salud.gob.hn/transparencia/archivos/regulacion/leyes/NORMA%20TECNICA%20CALIDAD%20AGUA%20POTABLE%20%20Honduras.pdf>
- Richard. (8 de Octubre de 2018). *Richard Harwood's Earth Sciences*. Obtenido de Ojojona Geologic : <http://www.profarwood.x10host.com/RHWEB/Publications/Ojojona%20Geologic.pdf>
- Rodríguez, M., & Ruiz, M. (s.f.).
- Rodríguez, M., & Ruiz, M. (10 de Abril de 2021). *Revista de la Escuela de Física UNAH*. Recuperado el 15 de Marzo de 2022, de Uso del método potencial natural en la exploración de agua subterránea: caso de estudio Hospital de Olanchito: <https://fisica.unah.edu.hn/dmsdocument/11492-refunahv9i1-1-9-pdf>
- Rodríguez, M., & Ruiz, M. (10 de Abril de 2021). *Revista de la Escuela de Física UNAH*. Recuperado el 15 de Marzo de 2022, de Uso del método potencial natural en la exploración de agua subterránea: caso de estudio Hospital de Olanchito: <https://fisica.unah.edu.hn/dmsdocument/11492-refunahv9i1-1-9-pdf>

- Rodríguez, R. (9 de junio de 2011). *Geología Venesolana*. Obtenido de Estructuras Geológicas: <https://geologiavenezolana.blogspot.com/2011/06/estructuras-geologicas.html>
- Rodríguez, S. A. (2010). *Universidad Tecnológica Nacional - U.T.N.* Recuperado el 23 de Febrero de 2022, de La Dureza del Agua: http://www.edutecne.utn.edu.ar/agua/dureza_agua.pdf
- Russell, R. (19 de enero de 2010). *Ventanas al Universo* . Obtenido de Qué es una Falla Geológica: <https://www.windows2universe.org/earth/geology/fault.html&lang=sp>
- Sánchez, F. (2 de Abril de 2009). *Prospección geofísica: Sondeos Eléctricos verticales*. Recuperado el 27 de Marzo de 2021, de Hidrología: <https://hidrologia.usal.es/temas/SEV.pdf>
- Sánchez, F. J. (11 de Septiembre de 2015). *Universidad de Salamanca*. Recuperado el 19 de Marzo de 2022, de Mapa de isopiezas: https://hidrologia.usal.es/practicas/redes_flujo/isopiezas2-indicaciones.pdf
- Sánchez, F. J. (11 de Septiembre de 2015). *Universidad de Salamanca*. Recuperado el 19 de Marzo de 2022, de Mapa de Isopiezas: https://hidrologia.usal.es/practicas/redes_flujo/isopiezas2-indicaciones.pdf
- Suarez, L. (2019). *Pliegues*. Obtenido de Geomecanica.org: <http://geomecanica.org/didacticMat/pliegues/index.html>
- Texas, U. A. (s.f.). *The University of Texas at Austin, Geodata*. Recuperado el 16 de Noviembre de 2022, de Mapa geologico de Honduras, Lepaterique, hoja 2758 III G [map]: <https://geodata.lib.utexas.edu/catalog/princeton-bv73c226t>
- UNAH-Miambiente. (2014). *Evaluación de los recurso hídricos en su regimen natural potencial o nivel nacional*. Tegucigalpa: MiAmbiente.
- UNISDR. (2009). *Terminología para la reducción del riesgo* . UNISDR, Estrategia Internacional de Reducción de Riesgos a Desastres . Ginebra, Suiza : Naciones Unidas. Obtenido de https://www.unisdr.org/files/7817_UNISDRTerminologySpanish.pdf
- Universidad Nacional de Colombia. (Sin Año). *capitulo 1 Fundamentos Sobre Quimica Ambiental . El agua*. Recuperado el Octubre de 2013, de http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4090020/files/pdf/cap_1+.pdf

- USGS. (15 de Mayo de 2017). *USGS - Water Science School*. Obtenido de <https://water.usgs.gov/edu/earthwherewater.html>
- valerio, L., Hernández, J., Rivera, L., Chirinos, M., & Rodas, J. (2021). *Análisis de la calidad del agua subterránea y superficial en la microcuenca del Río Chiquito, considerando variaciones estacionales en los años 2012 y 2013*. Tegucigalpa.
- Viessman, W. J. (1993). *Water Supply and Pollution control*, 5ª. ed. New York: Harper Collins.
- Villanueva, M., & Iglesias, A. (26 de Marzo de 2002). *METODOS EN REGIMEN VARIABLE*. Recuperado el 26 de Marzo de 2021, de Igme: http://aguas.igme.es/igme/publica/libro35/pdf/lib35/in_3.pdf
- Villarroya, D. F. (2009). *JORNADAS TÉCNICAS SOBRE APROVECHAMIENTO, Tema: Tipos de acuíferos y parámetros*. Madrid, Univerdad Complutense: CENTER, Centro Nacional de Tecnología de Regadíos. Obtenido de <http://chilorg.chil.me/download-doc/86199>
- Villarroya, F., & Aldwell, C. (1998). Sustainable development and groundwater resources exploitation . *Environmental Geology*, 34, 111-115.

12. Contribuciones científicas

12.1 Sección 1: Publicaciones

Estado de la Publicación: La publicación está en revisión.

Autores: Iris Gricelda Lara Peña

Revista: Revista Universidad y Sociedad (SCOPUS)

Título del artículo: MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE LA SUBCUENCA RÍO GRANDE O CONCEPCIÓN.

Fecha de Envío: 8/7/2023

Resumen: La subcuenca Río Grande o Concepción está ubicada al suroeste de la capital de Tegucigalpa, con un área de 140.97 Km². La geología que presenta la subcuenca tiene características hidrogeológicas de acuífero de fisura. El objetivo del presente trabajo es construir un modelo conceptual hidrogeológico a base de información geológica, geofísica, piezométrica e hidrogeoquímica. Se realizaron siete sondeos geofísicos por el método de tomografía eléctrica, así como también revisión de información geológica, piezométrica para elaborar el modelo conceptual hidrogeológico. La geología está compuesta por Miembro Nueva Aldea, Padre Miguel Superior, Padre Miguel Inferior, basaltos cuaternarios con rocas ignimbritas, lahares, tobas volcánicas, cono de lava, coladas basálticas, sedimentos. A través de los sondeos geofísicos se identifican materiales con resistividad de 20 a 300 Ω m que se interpretan como tobas, 1000 Ω m lavas, 300 Ω m ignimbritas, 10 Ω m arcillas y limos saturados y con resistividad 5 Ω m agua subterránea. La dirección de flujo es de la parte alta suroeste de la Subcuenca, se invierte al noreste en la parte baja, la hidrogeoquímica de la cuenca muestran una clasificación de sus aguas bastante homogénea con tendencia de bicarbonatadas sódicas y cálcica.

ISBN: <https://orcid.org/0009-0000-7605-0475>

12.2 Sección 2: Congresos

Presentación pósteres científico

Nombre del Congreso: Taller de desarrollo con perspectiva de género para jóvenes científicas y estudiantes.

Autor(es): Iris Gricelda Lara Peña

Título de póster: MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE LA SUBCUENCA RÍO GRANDE O CONCEPCIÓN

Fecha del Evento: 15/7/2022

Resumen: El presente estudio pretende construir un modelo conceptual hidrogeológico, basado en la información geológica, geofísica, piezométrica e hidrogeoquímica de la subcuenca Río Grande o Concepción, dicha subcuenca posee una geología con características hidrogeológicas de acuífero de fisura y se encuentra ubicada al suroeste de la ciudad de Tegucigalpa con un área de 140.97 Km².

En la parte baja de la subcuenca se encuentra ubicada la represa la Concepción quien abastece el 45% de la ciudad de Tegucigalpa, características que la convierten en objeto de estudio de esta investigación. Tomando en cuenta lo anterior el presente estudio se centra en un modelo hidrogeológico conceptual, conociendo las condiciones reales del flujo subterráneo y fortaleciendo los conocimientos sobre el área de los recursos hídricos subterráneos de nuestro país.

13. ANEXOS

Anexo 1: Puntos de sondeos geofísicos

Nombre	Coordenada x	Coordenada y
Sondeo 1	472068	1546769
Sondeo 2	460620	1545541
Sondeo 3	461987	1544513
Sondeo 4	458243	1553917
Sondeo 5	456390	1554370
Sondeo 6	454874	1555161
Sondeo 7	460784	1543443

Tabla 16: Coordenadas de sondeos geofísicos.



Ilustración 40: Sondeo 1 Colonia concepción Distrito Central de Subcuenca Río Grande o Concepción.



Ilustración 41: Sondeo 2 El Aguacatal Ojojona de Subcuenca Río Grande o Concepción.



Ilustración 42: Sondeo 3 Aldea Surcos de Caña Ojojona de Subcuenca Río Grande o Concepción.



Ilustración 43: Sonde 4 La Brea Lepaterique de Subcuenca Río Grande o Concepción.



Ilustración 44: Sondeo 5 Las Tablas Lepaterique de Subcuenca Río Grande o Concepción.



Ilustración 45: Sondeo 6 Aldea las Tablas Lepaterique de Subcuenca Río Grande o Concepción.



Ilustración 46: sondeo 7 El Llano Ojojona de Subcuenca Río Grande o Concepción.

Anexos 2: Pozos de Agua utilizados para mapa de isopiezas

Nombre de Pozo	X	Y	Z	Tipo de Fuente	Elev.- N.F
Pozo malacate de Las Sabanas	461999	1551212	1576	Pozo malacate	1566
Propiedad de Familia Servellón	463863	1550894	1573	Pozo malacate	1569
Propiedad de Familia Servellón	463869	1550899	1573	Pozo malacate	1569
Propiedad de Familia Servellón	463816	1550952	1577	Pozo malacate	1570
Propiedad de Ismael Martínez	462037	1551237	1574	Pozo malacate	1568
Propiedad de Cristóbal de Jesús	463645	1551068	1575	Pozo malacate	1565
SANAA	463637	1551067	1565	Pozo malacate	1557
SANAA	463864	1550900	1562	Pozo malacate	1554
SANAA	463864	1550899	1562	Pozo malacate	1553
SANAA	463811	1550955	1567	Pozo malacate	1558
SANAA	463714	1550854	1572	Pozo malacate	1566
SANAA	462034	1551239	1566	Pozo malacate	1558
SANAA	461923	1549598	1558	Pozo malacate	1550
SANAA	452905	1555664	1676	Pozo malacate	1671
Propiedad de Evelin Servellón	463816	1550952	1577	Pozo malacate	1570
La Brea, Lepaterique	458465	1553940	1560	pozo	1530
Monte Redondo	459512	1553908	1571	pozo	1543

Tabla 17: Pozos de agua utilizados para sacar la isopiezas y dirección de flujo.

Anexos 3: Mapas Geológicos

Anexos 4: Estaciones Meteorológicas

SANA A														
DEPARTAMENTO DE PROYECTOS ESPECIALES														
UNIDAD DE HIDROLOGIA														
REGISTRO DE: LLUVIA TOTAL MENSUAL EN MILIMETROS														
					1553820	458182					Hoja Cart.2758-III			
ESTACION: LA BREA (PV) LAT: 14°03' 12"N LONG : 87° 23' 29"W ELEV: 1610.0 MSNM CODIGO: 560105														
AÑOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL	Media Anual
1990	0.0	0.0	15.8	73.3	203.7	210.6	97.8	139.5	220.1	199.4	139.0	0.0	1,299.20	108.3
1991	0.0	8.0	13.4	5.8	213.9	274.5	37.3	63.2	107.7	235.0	11.5	37.1	1,007.40	84.0
1992	18.6	2.0	12.2	63.2	55.9	241.5	132.6	47.1	300.5	80.1	62.7	15.9	1,032.30	86.0
1993	9.5	0.0	29.6	49.5	408.1	305.7	109.8	120.9	328.1	162.4	25.1	15.5	1,564.20	130.4
1994	9.3	12.5	0.0	154.4	130.0	103.0	86.4	80.2	255.3	192.0	65.3	12.8	1,101.20	91.8
1995	3.4	2.0	15.8	111.3	187.1	228.7	113.2	489.7	367.8	252.0	26.5	17.8	1,815.30	151.3
1996	8.3	7.8	14.7	2.3	258.9	74.2	198.3	245.5	198.1	279.6	47.0	6.5	1,341.20	111.8
1997	5.3	28.2	23.6	10.5	52.3	405.0	118.3	92.2	200.5	138.7	61.6	0.0	1,136.20	94.7
1998	3.5	0.0	6.4	15.4	163.9	125.5	190.8	135.1	159.0	797.9	107.7	22.0	1,727.20	143.9
1999	26.1	2.0	0.0	30.7	147.0	319.8	144.9	175.0	592.2	355.0	10.5	23.7	1,826.90	152.2
2000	14.0	6.3	0.0	70.3	241.0	152.3	91.0	174.6	421.3	145.5	8.0	5.5	1,329.80	110.8
2001	17.5	1.5	49.2	0.0	246.0	72.0	98.1	210.0	298.0	100.3	3.5	20.8	1,116.90	93.1
2002	1.5	10.5	4.0	5.0	223.1	256.5	99.0	78.9	351.6	99.0	14.0	1.0	1,144.10	95.3
2003	3.4	3.0	21.5	1.4	221.5	366.7	103.6	170.7	252.1	231.6	31.6	2.3	1,409.40	117.5
2004	6.8	16.4	3.5	127.9	109.3	116.3	198.5	59.0	125.2	197.9	50.5	18.0	1,029.30	85.8
2005	2.6	5.2	41.2	28.5	343.6	356.6	226.7	221.4	341.6	264.3	25.7	73.7	1,931.10	160.9
2006	39.0	13.7	0.7	73.0	175.8	451.1	235.5	140.6	295.8	268.0	92.9	90.8	1,876.90	156.4
2007	21.1	8.3	36.5	199.7	246.0	432.6	108.4	213.1	311.3	264.8	105.0	9.8	1,956.60	163.1
2008	15.7	36.6	13.5	169.1	302.0	250.6	229.2	334.0	358.6	387.7	15.2	24.8	2,137.00	178.1
2009	41.0	36.8	5.7	4.4	214.5	310.9	98.7	118.8	122.5	141.3	142.3	72.3	1,309.20	109.1
2010	24.0	3.6	3.2	443.5	702.7	460.2	505.1	725.7	578.1	62.0	21.5	1.0	3,530.60	294.2
2011	9.3	5.6	46.6	101.5	193.4	284.6	295.9	213.0	321.9	400.1	56.9	11.6	1,940.40	161.7
2012	10.5	14.2	13.1	225.6	255.7	239.2	46.9	293.0	145.7	335.1	17.3	36.7	1,633.00	136.1
2013	14.0	4.0	40.6	56.1	227.0	286.9	88.4	245.7	305.8	190.5	50.0	19.4	1,528.40	127.4
2014	29.9	5.9	17.0	31.2	204.3	229.2	24.8	120.1	295.1	282.7	26.2	15.9	1,282.30	106.9
2015	6.9	1.6	16.9	62.4	70.5	288.9	123.1	21.6	324.6	261.7	48.5	9.5	1,236.20	103.0
26														
PROMEDIO	13.1	9.1	17.1	81.4	223.0	263.2	146.2	189.6	291.5	243.3	48.7	21.7	1,547.78	129.0
V/ Maximo	41.0	36.8	49.2	443.5	702.7	460.2	505.1	725.7	592.2	797.9	139.0	37.1	3,530.60	
Prom. Anual													1,547.78	

Tabla 18: Estación Meteorológica la Brea.

SANA														
DEPARTAMENTO DE PROYECTOS ESPECIALES														
UNIDAD DE HIDROLOGIA														
REGISTRO DE: LLUVIA MENSUAL EN MILIMETROS														
ESTACION: CONCEPCION (HMO) LAT: 13° 59' 08"N LONG: 87° 15' 58"W ELEV:1140.0 MSNM CODIGO: 560106														

Tabla 19: Estación Meteorológica Concepción.

Anexos 5: Tablas comparativas de resultados de muestra.

Resultados de las muestras						Agua para Consumo Humano	
Parámetro	SJ-RQ-06	SJ-PM-07	SJ-PP-08	SJ-PM-09	SJ-MA-10	Valor Recomendado	Valor Máximo Admisible
Cloruros	3.45	16.20	3.19	2.83	0.37	25 mg/l	250 mg/l
Sulfatos	0.00	3.00	0.00	7.00	3.00	25 mg/l	250 mg/l
Bicarbonatos	34.00	26.00	57.00	273.00	37.00	400 mg/l	-
Calcio	3.16	5.20	1.45	43.60	1.51	100 mg/l	-
Magnesio	0.84	0.78	0.05	1.27	0.37	30 mg/l	50 mg/l
Potasio	3.41	7.90	4.78	3.50	5.00	-	10 mg/l
Sodio	7.44	17.54	12.68	14.43	8.72	25 mg/l	200 mg/l
Nitritos	0.026	0.030	0.016	0.016	0.066		0.1-3 mg/l
Nitratos	2.66	33.20	4.43	3.98	3.98	25 mg/l	50 mg/l
Amonio	0.19	0.34	0.05	0.00	0.09	0.05 mg/l	0.5 mg/l
Hierro	1.00	0.29	0.00	0.08	0.82	-	0.3 mg/l
Manganeso	0.16	0.08	0.06	0.03	0.13	0.01 mg/l	0.5 mg/l
Cobre	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	1 mg/l	2 mg/l
Zinc	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	-	3 mg/l
pH	8.12	6.06	6.45	7.30	6.31	7.0-8.5 ²	6.5-9.2
Conductividad	54.30	177.50	80.60	324.30	45.80	400	-

Tabla 20: Tabla comparativa de parámetros físicoquímicos.

Resultados de las muestras			Agua para Consumo Humano	
Parámetro	SJ-MA-11	SJ-RQ-26	Valor Recomendado	Valor Máximo Admisible
Cloruros	0.39	1.90	25 mg/l	250 mg/l
Sulfatos	3.00	0.00	25 mg/l	250 mg/l
Bicarbonatos	34.00	22.00	400 mg/l	-
Calcio	1.83	1.02	100 mg/l	-
Magnesio	0.27	0.26	30 mg/l	50 mg/l
Potasio	3.93	2.76	-	10 mg/l
Sodio	8.92	6.56	25 mg/l	200 mg/l
Nitritos	0.043	0.013		0.1-3 mg/l
Nitratos	10.18	6.20	25 mg/l	50 mg/l
Amonio	0.12	0.00	0.05 mg/l	0.5 mg/l
Hierro	0.33	0.07	-	0.3 mg/l
Manganeso	0.12	0.16	0.01 mg/l	0.5 mg/l
Cobre	0.00	0.01	1 mg/l	2 mg/l
Zinc	0.01	0.01	-	3 mg/l
pH	6.29	7.07	7.0-8.5 ²	6.5-9.2
Conductividad	48.50	37.60	400	-

Tabla 21: Tabla comparativa de parámetros fisicoquímicos.