



UNIVERSIDAD NACIONAL “PEDRO RUIZ GALLO”



**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y
MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE FÍSICA**

**“APLICACIÓN DEL MÉTODO GEOFÍSICO-PROSPECCIÓN
ELÉCTRICA ACTIVO PARA DETERMINAR LA PROFUNDIDAD DE
ACUÍFEROS SUBTERRÁNEOS EN LA LOCALIDAD EL VIRREY-
OLMOS- LAMBAYEQUE.”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN FÍSICA**

PRESENTADO POR:

**Bach. Fís. COBEÑAS SÁNCHEZ, Angel Alfonso
Autor**

**M. Sc. Justo Vladimir Tuñoque Gutiérrez.
Asesor**

Lambayeque – Perú

2017

UNIVERSIDAD NACIONAL "PEDRO RUIZ GALLO"

Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Escuela Profesional de Física

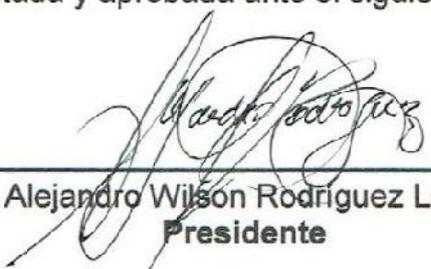
Tesis

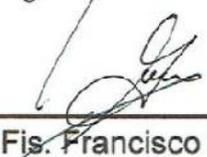
***"Aplicación del Método Geofísico-Prospección Eléctrica Activo para
determinar la profundidad de acuíferos subterráneos en la localidad El Virrey-
Olmos- Lambayeque."***

Para optar el Título Profesional de:

LICENCIADO EN FÍSICA

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:


M.Sc. Alejandro Wilson Rodríguez La Barrera.
Presidente


Lic. Fis. Francisco García Roque.
Secretario


Lic. Fis. Francisco Solano Salazar Ordinola.
Vocal

Fecha de sustentación, 02 de Mayo del 2017

UNIVERSIDAD NACIONAL "PEDRO RUIZ GALLO"

**Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Escuela Profesional de Física**

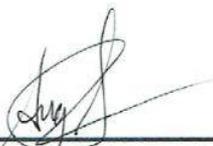
Tesis

***"Aplicación del Método Geofísico-Prospección Eléctrica Activo para
determinar la profundidad de acuíferos subterráneos en la localidad El
Virrey-Olmos- Lambayeque."***

Para optar el Título Profesional de:

LICENCIADO EN FÍSICA

Sustentada por:



**Bach. Fís. Angel Alfonso Cobeñas Sánchez.
Tesisista**

Asesorado por:



**M. Sc. Justo Vladimir Tuñoque Gutiérrez.
Asesor**

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de investigación a mis padres, Pedro y María.

A mis hermanos América, Jesús, Miguel, porque nos une un mismo sentimiento.

A la memoria de mi madre, mi hermano Santos Armando y a mis abuelos Casimiro y Pablo.

Angel A. Cobeñas S.

AGRADECIMIENTO

Al finalizar este trabajo de investigación de tesis de pre grado, me ha brindado una gran satisfacción la cual me permite aportar en el campo de las ciencias físicas, a pesar de ello tengo que agradecer a las personas y a la institución que estuvo detrás mío apoyándome durante todo el desarrollo de mi tesis de los cuales mencionare líneas abajo:

A DIOS por darme la vida y las facultades necesarias para estudiar, llevar a cabo este proyecto y seguir cada día adelante a pesar de todas las dificultades.

A mi padre Pedro por su apoyo incondicional durante mi formación profesional. A mi hermana América ya que sin su fortaleza y apoyo no sería la persona que hoy en día soy. Al licenciado y amigo Vladimir Tuñoque Gutiérrez por el apoyo y asesoramiento durante el desarrollo de mi proyecto de tesis, también quiero agradecer de manera muy especial a AgroGer Rubio E.I.R.L por haberme ayudado en la toma de datos. A la Magister, ingeniera química Mirtha Culqui Lozada por los datos proporcionados de los pozos en todo el distrito de Olmos y al Técnico en geotecnia Gerardo Díaz Sandoval por las enseñanzas impartidas en el uso del programa IPI2WIN.

A mis amigos incondicionales Julio Chapoñán e Isaúl Llamo Torres por sus consejos y apoyo.

A todos docentes de la escuela profesional de Física de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo

Muchas gracias a todos.

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación presenta. En primer lugar, los conceptos básicos de la hidrogeología o hidrología subterránea que explica lo necesario sobre la formación de acuíferos mediante el ciclo hidrológico del agua y los procesos de ganancia y pérdida en cada ciclo. Geofísica, la cual es una ciencia que estudia los fenómenos físicos que ocurren en nuestro planeta y que involucra a la física y geología para estudiar las propiedades de los materiales mediante métodos de prospección. En segundo lugar, usando el método de prospección eléctrica activo, que consiste en la inyección de corriente continua al terreno, en su modalidad de SEV con el dispositivo de schlumberger. El cual por su metodología permite conocer la resistividad aparente del subsuelo a diferentes profundidades (las cuales son la mitad del espaciamiento de los electrodos de corriente movibles "AB"). En tercer lugar, el procesamiento de los datos de resistividad aparente tomados en la localidad de El Virrey el Olmos a través del programa IPI2WIN que pertenece a GEOSCAN-M LTD., donde se trata mediante la superposición de las curvas de relación entre la resistividad aparente del modelo y la profundidad (color rojo y color azul) con la curva de resistividad de campo (negro) que representa los valores tomados. Finalmente, como resultado se muestra el número de capas (estratos) con su respectiva resistividad real (corte geoelectrico) el cual se traduce en la ubicación del acuífero y su profundidad.

Palabras claves: Acuífero, prospección eléctrica, SEV's, resistividad aparente, resistividad real.

ABSTRACT

This research shows the following points. First, the basic concepts about hydrogeology or underground hydrology which explains all of the sufficient about aquifer forming through the hydrological cycle and process of gaining and losing in each cycle. Geophysics, which is a science that study the physics phenomena that occur in our planet, and it involves to physics and geology for studying the material properties through prospecting methods. Second, using the method of electrical active prospecting, which usually means the injection of direct current to the ground, in its manner of SEV with the use of Schlumberger device. Schlumberger device methodology allows to know the apparent resistivity of underground to different depth (which are the half distance between the moveable electrode conductor of current). Third, processing the data of apparent resistivity taken in El Virrey- Olmos through IPI2WIN software that belongs to GEOSCAN-M LTD. The process basically consists about overlapping of relation curve between the apparent resistivity and depth (red color and blue color) with resistivity field curve (black color) that are the data taken. Finally, the outcome shows the number of layers (strata) with each real resistivity (resistivity cross-section). This cross-section displays the place and the depth of the aquifer.

Key words: Aquifer, electrical prospecting, SEV's, apparent resistivity, real resistivity.

INDICE

DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO	V
RESUMEN.....	VI
ABSTRACT.....	VII
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABLAS.....	XII
CAPITULO I	1
INTRODUCCION	1
1 INTRODUCCIÓN.....	2
1.1. INTRODUCCIÓN	2
1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DE PROBLEMÁTICA.....	5
1.3. OBJETIVOS.....	5
1.3.1. <i>Objetivo general</i>	5
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i>	5
1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.5. HIPÓTESIS	6
CAPITULO II	7
MARCO TEORICO	7
2 MARCO TEÓRICO.....	8
2.1. ANTECEDENTES.....	8
2.1.1. <i>Internacional</i>	8
2.1.2. <i>Nacional</i>	9
2.2. BASE TEÓRICA.....	11
2.2.1. <i>Hidrogeología</i>	11
2.2.2. <i>Agua subterránea</i>	11
2.2.3. <i>Nivel freático</i>	14
2.2.4. <i>Acuífero</i>	15
2.2.5. <i>Geofísica</i>	19

2.2.6.	<i>Prospección Geofísica</i>	20
2.2.7.	<i>Método de Prospección eléctrica</i>	20
2.2.8.	<i>Sondeo eléctrico vertical (SEV)</i>	21
2.2.9.	<i>Potencial eléctrico en un espacio homogéneo producido por una corriente</i>	23
CAPITULO III		32
MATERIALES Y METODOS		32
3	MATERIALES Y METODOS	33
3.1.	MATERIALES	33
3.1.1.	<i>Equipo</i>	33
3.1.2.	<i>Especificaciones técnicas de los equipos</i>	34
3.1.3.	<i>Datos Shapes y Excel</i>	35
3.1.4.	<i>ArcMap y ArcCatalog</i>	35
3.1.5.	<i>IPI2Win</i>	36
3.2.	METODOLOGÍA.....	36
CAPITULO IV		41
RESULTADOS		41
4	RESULTADOS	42
4.1.	ANÁLISIS DE LAS CURVAS DE RESISTIVIDADES APARENTES O DE CAMPO.....	42
4.2.	CURVA DE RESISTIVIDADES DE LAS CAPAS DEL SUBSUELO (ESPESORES Y PROFUNDIDAD)	44
4.3.	SECCIÓN DE RESISTIVIDADES APARENTES ENTRE LOS PUNTOS DE MONITOREOS Y SECCIÓN RESISTIVIDADES VERDADERAS DE CADA ESTRATO RESPECTO A LA PROFUNDIDAD Y A LA ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR.	52
CAPITULO V		55
CONCLUSIONES Y		55
RECOMENDACIONES		55
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	56
5.1.	CONCLUSIONES.....	56
5.2.	RECOMENDACIONES.....	58
CAPITULO VI		59

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	59
6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	60
CAPITULO VII	63
ANEXOS	63
7 ANEXOS	64

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: MAPA DE OBRAS DEL PROYECTO HIDROENERGÉTICO E IRRIGACIÓN PEOT.	2
FIGURA 2: MAPA DE OBRAS Y TIERRAS DE IRRIGABLES.	3
FIGURA 3: REPRESENTACIÓN DEL CICLO HIDROLÓGICO.....	13
FIGURA 4: NIVEL FREÁTICO Y ZONAS SATURADAS Y NO SATURADAS	15
FIGURA 5: ACUÍFERO	16
FIGURA 6: TIPOS DE ACUÍFEROS SEGÚN SU ESTRUCTURA CON ACUIFUGO.	18
FIGURA 7: TIPOS DE ACUÍFEROS SEGÚN SU ESTRUCTURA CON ACUITARDO.	18
FIGURA 8: TIPOS DE ACUÍFEROS SEGÚN SU POROSIDAD.....	19
FIGURA 9: DISPOSICIÓN DE ELECTRODOS DE CORRIENTE Y TENSIÓN Y SUS DESPLAZAMIENTOS CRECIENTES.	23
FIGURA 10: CIRCUITO DE ENTRADA Y SALIDA DE CORRIENTE EN EL SUELO.....	24
FIGURA 11: INYECCIÓN DE CORRIENTE EN EL SUELO, LAS LÍNEAS DE CAMPO GENERAN SUPERFICIES EQUIPOTENCIALES ESFÉRICAS.	26
FIGURA 12: INYECCIÓN DE CORRIENTE MEDIANTE EL ELECTRODO A Y ELECTRODO DE SALIDA B GENERANDO EL POTENCIAL EN M.	27
FIGURA 13: MEDICIÓN DE POTENCIAL ENTRE DOS PUNTOS.	27
FIGURA 14: DISPOSICIÓN DEL DISPOSITIVO DE SCHLUMBERGER EN CAMPO.	29
FIGURA 15: EQUIPO DE PROSPECCIÓN ELÉCTRICA ENSAMBLADO POR AGROGER RUBIO E.I.R.L.....	33
FIGURA 16: GEOLOGÍA SEGÚN SU ERA, PROCESADO EN ARCGIS.	37
FIGURA 17: GEOLOGÍA SEGÚN SU UNIDAD LITOGRAFICA, PROCESADO EN ARCGIS.....	38
FIGURA 18: UBICACIÓN DE LOS MONITOREOS (SEV's)	39
FIGURA 19: CURVA DE RESISTIVIDADES APARENTES. SEV_A.....	42
FIGURA 20: CURVA DE RESISTIVIDADES APARENTES. SEV_B	43
FIGURA 21: CURVA DE RESISTIVIDADES APARENTES. SEV_C	43
FIGURA 22: CURVA DE RESISTIVIDADES APARENTES. SEV_D.....	44
FIGURA 23: CURVAS DE RESISTIVIDADES VERDADERAS DE CADA ESTRATO, ESPESOR DE CADA ESTRATO Y LA PROFUNDIDAD DE QUE SE ENCUENTRAN-“SEV_A”.	45
FIGURA 24: CURVAS DE RESISTIVIDADES VERDADERAS DE CADA ESTRATO, ESPESOR DE CADA ESTRATO Y LA PROFUNDIDAD DE QUE SE ENCUENTRAN-“SEV_B”.	47
FIGURA 25: CURVAS DE RESISTIVIDADES VERDADERAS DE CADA ESTRATO, ESPESOR DE CADA ESTRATO Y LA PROFUNDIDAD DE QUE SE ENCUENTRAN-“SEV_C”.....	48
FIGURA 26: CURVAS DE RESISTIVIDADES VERDADERAS DE CADA ESTRATO, ESPESOR DE CADA ESTRATO Y LA PROFUNDIDAD DE QUE SE ENCUENTRAN-“SEV_D”.	50
FIGURA 27: PUNTOS DE MONITOREO, DISTANCIAS ENTRE ELLOS EN LÍNEA RECTA (X) Y ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR (Z).	52

<i>FIGURA 28: SECCIÓN DE RESISTIVIDADES APARENTES Y RESISTIVIDADES (SECCIÓN GEOELÉCTRICA) VERDADERAS A PROFUNDIDAD.....</i>	<i>53</i>
<i>FIGURA C- 1: INTERPOLACIÓN DE LA PROFUNDIDAD QUE SE ENCUENTRAN ACUÍFEROS</i>	<i>69</i>
<i>FIGURA C- 2: CORTE DE LA SECCIÓN DE ESTUDIO – CENTRO POBLADO EL VIRREY- OLMOS.....</i>	<i>69</i>
<i>FIGURA C- 3: TABLA DE CONTENIDO ARCMAP. MUESTRA LOS NOMBRES DE LOS POZOS EN TODO EL DISTRITO DE OLMOS, LA PROFUNDIDAD Y LOCALIZACIÓN</i>	<i>70</i>

LISTA DE TABLAS

<i>TABLA 1: CUADRO DE MÉTODOS GEOELÉCTRICOS PARA PROSPECCIÓN HIDROGEOLÓGICA.</i>	<i>21</i>
<i>TABLA 2: RESISTIVIDADES CARACTERÍSTICAS DE DISTINTOS MATERIALES.</i>	<i>31</i>
<i>TABLA 3: ESPECIFICACIONES DEL MULTÍMETRO SANWA CD 771.....</i>	<i>34</i>
<i>TABLA 4: UBICACIÓN DEL CENTRO POBLADO EL VIRREY EN COORDENADAS UTM Y POBLACIÓN (INEI, 2007)</i>	<i>36</i>
<i>TABLA 5: COORDENADAS Y ALTITUD SOBRE EL NIVEL DEL MAR DE LOS PUNTOS DE MONITOREO SEV.</i>	<i>39</i>
<i>TABLA 6: DISTANCIA ENTRE PUNTO DE MONITOREO SEV CON RESPECTO AL PUNTO D.</i>	<i>40</i>
<i>TABLA A- 1: RECORD DE PRECIPITACIÓN DESDE EL PERIODO 1998 - 2016</i>	<i>64</i>
<i>TABLA B- 1: VALORES DE RESISTIVIDADES PROMEDIO DEL SEV_A.....</i>	<i>65</i>
<i>TABLA B- 2: VALORES DE RESISTIVIDADES PROMEDIO DEL SEV_B.....</i>	<i>66</i>
<i>TABLA B- 3: VALORES DE RESISTIVIDADES PROMEDIO DEL SEV_C.....</i>	<i>67</i>
<i>TABLA B- 4: VALORES DE RESISTIVIDADES PROMEDIO DEL SEV_D.....</i>	<i>68</i>

CAPITULO I

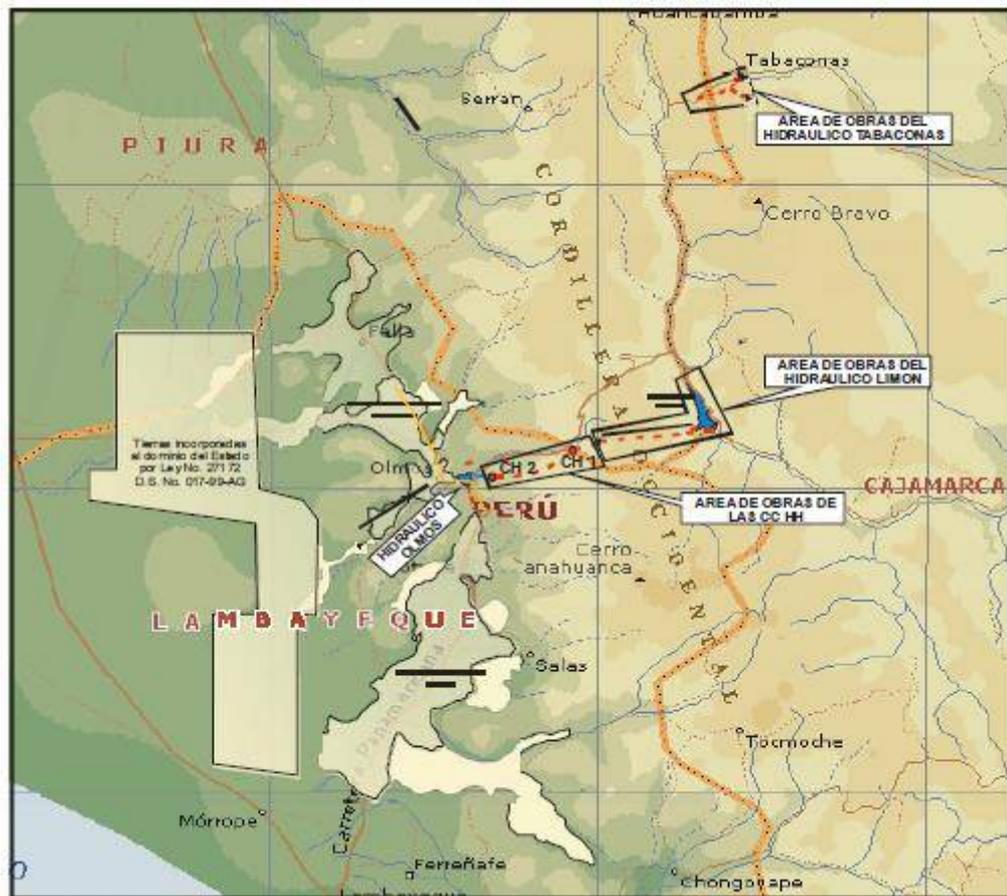
INTRODUCCION

1 INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

El departamento de Lambayeque en estos días en un referente de interconexión vial con el sur, el norte y el oriente del país; además de serlo culturalmente y económicamente enfatizando en este campo se desarrolla la agricultura, más aún con la finalización del Proyecto Olmos Tinajones, el cual irriga campos de la zona norte del departamento y provincia de Lambayeque.

Figura 1: Mapa De Obras Del Proyecto Hidroenergético E Irrigación PEOT.



Fuente: www.monografias.com

Figura 2: Mapa de obras y tierras de Irrigables.



Fuente: www.monografias.com

Sin embargo, hay partes de distritos que se ven afectados ya que esta fuente de agua no llega a esos lugares. Un claro ejemplo se puede ver en el distrito de Olmos (26 788 habitantes hasta el 2007, INEI). Aunque en la parte baja esta fuente de agua proporciona el acceso al líquido vital, las localidades o centros poblados en la parte superior norte debido al relieve se ven afectados como es el caso del centro poblado el virrey que no cuenta con una fuente cerca de agua para satisfacer las actividades cotidianas e industriales.

La sequía y la falta de precipitaciones influyen mucho en este tipo de centros poblados lejanos, en actividades de la vida diaria (salud, construcción agricultura etc.). Según la Autoridad Nacional del Agua (ANA) el distrito de El Virrey, no ha sido sujeto de precipitaciones desde el periodo de 2007 hasta el 2016, que por resultado hace que los habitantes busquen maneras de obtener el recurso vital trayendo de otros centros poblados que tienen fácil acceso a este.

Con la llegada de fondos al Distrito De Olmos, la necesidad de estos por obtener agua subterránea, hizo crecer la aplicación del sondeo eléctrico vertical para explorar acuíferos que proveen de agua subterránea; interpretando patrones físicos que se convierten en condiciones necesarias para futuras captaciones de agua para uso en el campo de la agricultura, ganadería y cotidiano.

Es por eso que el presente trabajo de investigación consistió en determinar la ubicación de acuíferos aplicando el SEV- método de prospección activo mediante la inyección de corriente continua y con ayuda del programa IPI2WIN para medir, determinar e interpretar la propiedad física de cada estrato del terreno, la cual ayudara a la población a tener fácil acceso a una fuente de agua que les ayude a mejorar su calidad de vida y ahorrar en su economía.

Obteniéndose como resultado dos acuíferos con las condiciones necesarias para ser explorados y aprovechados. El primero SEV_A ubicado con coordenadas UTM (Norte: 611844, Este: 9387719 y Altitud: 226 m), con una profundidad a de 60 metros un espesor de 23.5 metros, una resistividad de 38.4 oh-m y un error de 4.46% en el modelo de capas. El segundo SEV_D ubicado con coordenadas UTM (Norte: 611407, Este: 9387439 y Altitud: 226 m), con una profundidad a 56.3 metros, un espesor de 33.9 metros y una resistividad de 34.7 oh-m.

1.2. Planteamiento y formulación de problemática

La falta de acceso a fuentes de agua superficiales hace que los habitantes que la población se apoye en nuevos avances y técnicas no costosas para ubicar fuentes de agua subterránea para el aprovechamiento. Por lo tanto, surge la siguiente pregunta al problema.

¿De qué manera el método de prospección eléctrica activo determina la ubicación de acuíferos subterráneos en la localidad de El Virrey- Olmos- Lambayeque?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Determinar la ubicación de un acuífero subterráneo en la localidad de El Virrey- Olmos- Lambayeque

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar la zona en que se encuentra el acuífero subterráneo.
- Determinar la profundidad a la que se encuentra el acuífero.
- Analizar las resistividades aparentes.

1.4. Justificación e importancia de la investigación

El método geofísico – prospección eléctrica activo es ampliamente empleado en la determinación de acuíferos subterráneos además de la exploración de yacimientos con fines de explotación sean minerales como petróleo, cobre, oro, agua, etc. Es muy importante ya que le brindara a la población determinar un acuífero para el aprovechamiento en las actividades diarias.

1.5. Hipótesis

Mediante el método geofísico- prospección eléctrica activo se obtendrá valores de la propiedad física de resistividad a profundidad la cual proporcionará información sobre los estratos del terreno y la presencia de acuíferos subterráneos, lo cual, brindará a la población una ubicación de un acuífero subterráneo para su aprovechamiento en sus actividades cotidianas.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2 MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacional

Gil J., (España, 2008), en su trabajo de “Recursos Hidrogeológicos”, trata de dar a conocer que estudia la hidrogeología, la distribución de agua, el ciclo y balance hídrico, nivel freático, además de los acuíferos y la clasificación de aguas subterráneas y su movimiento, y la relación de las escorrentías superficiales y subterráneas.

Auge M., (Argentina, 2008), en su trabajo de investigación de “Métodos Geoeléctricos para la Prospección de Agua Subterránea”, da a conocer los métodos de prospección y dispositivos da una idea clara del fundamento teórico.

Estrada L., (Argentina, 2012), en su publicación “Geoeléctrica Para Geólogos”, menciona los métodos de la prospección y la definición de la resistividad para algunos materiales como la resistividad aparente del suelo, además de una pequeña definición de algunos dispositivos, y una pequeña explicación del fundamento físico, además de las curvas de los cortes geoeléctrico y su interpretación, haciendo uso de software.

2.1.2. Nacional

Ivan Santos Paredes (Perú, 2007), en su obra prospección geofísica métodos, explica ampliamente sobre los métodos más utilizados en la prospección y sus visibles ventajas.

El Ministerio De Agricultura a través de la ANA, presenta varios informes sobre estudios hidrogeológicos da a conocer las características geomorfológicas y geológicas, la interpretación de los sondeos eléctricos verticales “SEV”, la metodología de trabajo. Los trabajos realizados; Estudio Hidrogeológico Del Valle Motupe -Lambayeque (2001); Estudio Hidrogeológico De La Quebrada Casitas-Tumbes (2006) Y Estudio Hidrogeológico Del Valle Zaña-Lambayeque (2006).

El Ministerio De Vivienda, Construcción Y Saneamiento (2012), en la publicación “Plan De Gestión De La Oferta De Agua En Las Cuencas De Los Proyectos Hidráulicos De La Costa De INADE”, “Plan De Gestión De La Oferta De Agua En Las Cuencas Del Ámbito Del Proyecto Tinajones” Vol. II, Tomo2.3 “Aspectos Hidrogeológicos” presenta lo referente a: La hidrogeología del valle Chancay-Lambayeque, como objetivos en general, explotación, utilización y presentar la situación actual de la profundidad del nivel freático.

Agrícola Pampa Baja S.A.C. (Peru, 2012) encargo el estudio de “Prospección Geoeléctrica Con Fines De Evaluación De Las Condiciones Hidrogeológicas En El Sector De La Poligonal Del Proyecto Olmos, Lotes C-8 Y B-11a”, en donde da cuenta del estudio hecho en la margen del rio olmos, con fines de captación de agua subterránea en el cual da una caracterización del subsuelo, compuesto por arena, grava y estratos de arcillas. El cual utiliza el método de resistividades SEV, con la

configuración del dispositivo Schlumberger con una longitud máxima de transmisión $AB = 928$ metros la que permitió determinar el corte geoelectrico del subsuelo hasta por debajo de los 410 metros de profundidad. Además de la técnica se menciona los instrumentos, análisis, e interpretación de los resultados.

Silva L. & Mendoza J., (Perú, 2014) en su trabajo de investigación “Modelación Geoelectrica del Subsuelo con Medidas de Resistividad Aparente” presentan una serie de rutinas en el programa Matlab para la reconstrucción de un modelo geoelectrico, comparando, los resultados con los procesados en el programa IPI2win.

2.2. Base teórica

2.2.1. Hidrogeología

Según (Gil, 2008), La Hidrogeología o Hidrología subterránea puede definirse como “el estudio geológico de las aguas subterráneas”, o bien, “aquella parte de la Hidrología que estudia el almacenamiento, circulación y distribución de las aguas subterráneas en el interior de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones, sus reacciones a la acción antrópica, etc.”

La hidrogeología abarca lo que es la ciencia y sus aplicaciones prácticas en los problemas que involucra el agua en diferentes campos como la ingeniería, agricultura, captaciones, medio ambiente y salud pública, etc.

La distribución del agua en la Tierra se da en los océanos 97,2%, casquetes polares y glaciares 2,15%, aguas subterráneas 0,6%, aguas superficiales (ríos y lagos) 0,04%, atmosfera 0,001% y seres vivos 0,009%. Según estos datos el agua subterránea constituye la fuente de agua de mayor aprovechamiento en nuestros días.

2.2.2. Agua subterránea

Es el agua que se localiza debajo de la superficie terrestre y se capta mediante perforaciones.

Según (Ordoñez, 2011), es aquella parte del agua existente bajo la superficie terrestre que puede ser colectada mediante perforaciones, túneles o galerías de drenaje o la que fluye naturalmente hacia la superficie a través de manantiales o filtraciones a los cursos fluviales.

La importancia del agua subterránea en la actualidad es que es de menor costo en el mundo, aunque el agua superficial (ríos y lagos) es la más aprovechada. De este modo (Gil, 2008) menciona que el agua subterránea presenta muchos motivos para ser la preferida y las razones son las siguientes.

- ✓ *El agua subterránea no posee organismos patógenos y por ello no necesita ser tratada previamente, con el consiguiente menor coste al no pasar por depuradoras.*
- ✓ *No posee ni turbidez ni color.*
- ✓ *Su composición química es generalmente constante.*
- ✓ *Los volúmenes de agua subterránea almacenada son por lo general mayores que los volúmenes almacenados en superficie, por lo que el abastecimiento a partir de aguas subterráneas no suele verse afectado por las sequías prolongadas.*
- ✓ *La contaminación de la mayor parte de las aguas subterráneas es difícil, por actuar de filtro las mismas rocas del subsuelo.*
- ✓ *El agua subterránea, acumulada durante largas series de años de recarga, constituye el único recurso en muchas regiones donde no es posible asegurar su abastecimiento a partir de la explotación de las aguas superficiales.*

Así como presenta razones para ser preferida y de fácil acceso también tiene inconvenientes, según (Gil, 2008), para no contar con ella.

- ✓ *El hecho de que muchas regiones están emplazadas sobre un subsuelo rocoso cuya porosidad o permeabilidad son insuficientes para proporcionar grandes caudales de agua en las captaciones.*

- ✓ *El coste de explotación mediante pozos de bombeo es generalmente mayor que el coste de explotación de las aguas superficiales de los ríos próximos a las zonas de consumo; sobre todo en regiones de pluviometría elevada o moderada.*

Las aguas subterráneas son una parte del ciclo hidrológico global, en el cual el océano provee la inmensa fuente de agua para que se produzca el ciclo y regrese al mismo. Así mismo cada fenómeno cíclico presenta igualdades en pérdidas y ganancias, de entradas y salidas en los sistemas. Estas pérdidas y ganancias se denominan balance, a lo cual en el ciclo hidrológico del agua se llama balance hidrológico, el cual se muestra en la siguiente ecuación según (Montes, 2008):

$$P = Ev + R + I \dots (1)$$

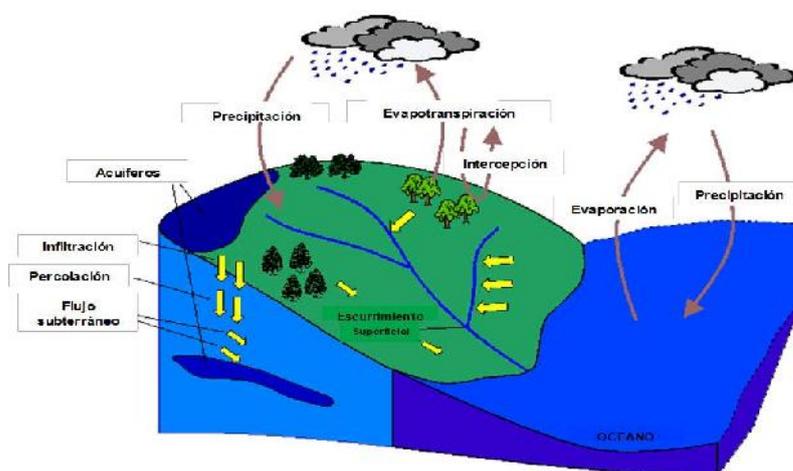
P = Totalidad de las precipitaciones

Ev = Evapotranspiración

R = Escorrentía superficial

I = Infiltración

Figura 3: Representación del Ciclo Hidrológico



Fuente: Ordoñez, 2011 Cartilla técnica, aguas subterráneas- acuíferos,

La infiltración representa la cantidad de agua que atraviesa el subsuelo, la cual incrementa la cantidad de agua subterránea. Puede ser directa o indirecta.

Directa: la que se da a partir de las mismas precipitaciones.

Indirecta: la que se da a partir de los ríos, embalses y de otras aguas superficiales.

Este proceso de infiltración está condicionado por diferentes factores:

- ✓ Tipo de rocas: dependerá de la permeabilidad y estructura de los acuíferos.
- ✓ El clima de la región
- ✓ topografía
- ✓ Vegetación
- ✓ Extensión de la cuenca receptora o de recarga

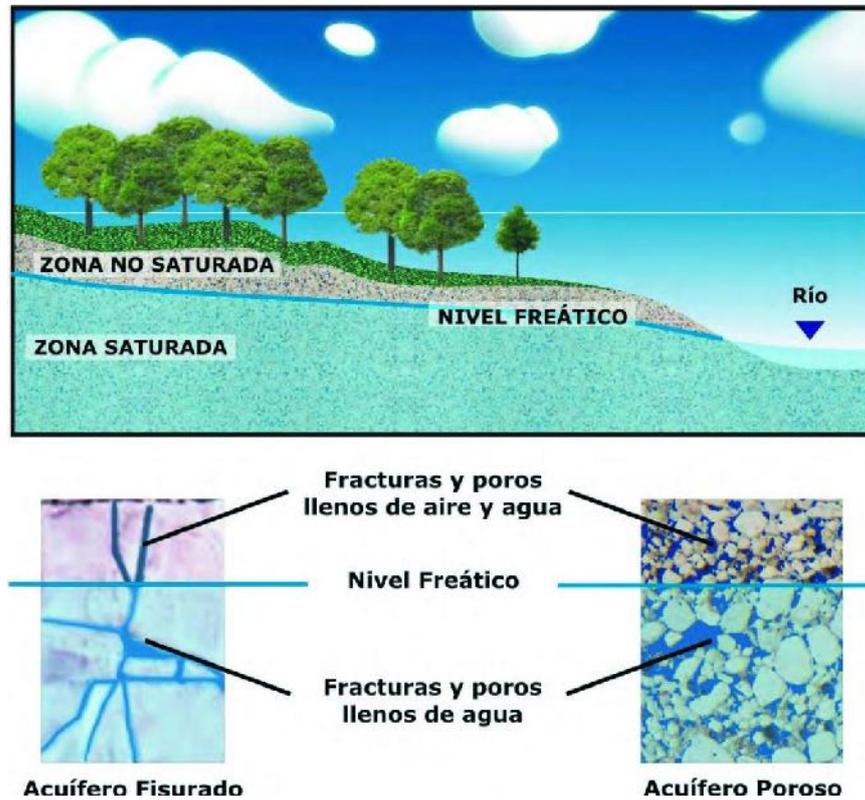
El subsuelo, para que el agua se infiltre, tiene que tener como condición indispensable que las rocas sean permeables. Estas rocas permitirán al agua infiltrarse y alcanzar una gran profundidad, la cual dependerá de su espesor y estructura, como resultado se forma un acuífero o embalse subterráneo donde sus aguas quedan retenidas, por rocas no permeables que no permiten la infiltración a otras capas más profundas y el movimiento hacia los laterales.

2.2.3. Nivel freático

Es la zona de saturación de agua próxima a la superficie, donde las corrientes de agua subterránea circulan a través de los orificios de las rocas permeables, con una rapidez proporcional al tamaño de los conductos y presión que se encuentra sometida. Según (Gil, 2008) *el nivel freático está sujeto a oscilaciones de acuerdo con la recarga del acuífero, descendiendo durante las épocas de sequía o de máximo*

estiaje, por efecto de la evaporación, mientras que cuando la pluviometría es abundante asciende llegando incluso hasta la superficie, al relieve topográfico que origina localmente surgencias de agua que constituyen las fuentes o manantiales.

Figura 4: Nivel freático y zonas saturadas y no saturadas



Fuente: Collazo, 2012 Manual de agua subterránea.

2.2.4. Acuífero

Es una formación geológica que contiene y transmite agua, la misma que es de carácter móvil y renovable Según (Gil, 2008) define a un acuífero como aquellas formaciones geológicas que almacenan y liberan agua, con la particularidad, del carácter móvil y renovable de las aguas que llegan y saturan el medio permeable, permitiendo que el hombre pueda extraerla y aprovecharla en cantidades económicamente apreciables para sus necesidades. y muy beneficioso para la actividad de las personas.

Así mismo (Ordoñez, 2011) lo define como un volumen subterráneo de roca y arena que contiene agua. El agua subterránea que se halla almacenada en los acuíferos es una parte importante del ciclo hidrológico.

Figura 5: Acuífero



Fuente: Ordoñez, 2011 Cartilla técnica, aguas subterráneas- acuíferos.

2.2.4.1. Clases de acuíferos

Como se ha definido los acuíferos son formaciones geológicas, pero no todas las formaciones geológicas poseen la capacidad de almacenar y transmitir el agua. Según (Collazo, 2012) entre estas tenemos:

- **Acuicludos**, pueden contener agua, pero no la transmiten (arcillas).
- **Acuifugos**, formaciones impermeables, no son capaces de almacenar ni transmitir el agua subterránea (granitos, gneiss).
- **Acuitardos**, formaciones semipermeables, que transmiten el agua muy lentamente. Estas sirven de recarga para acuíferos subyacentes (limos, limos arenosos)

2.2.4.2. Tipos de acuíferos

Los acuíferos se clasifican en función de la estructura y de la porosidad de los materiales que los conforman.

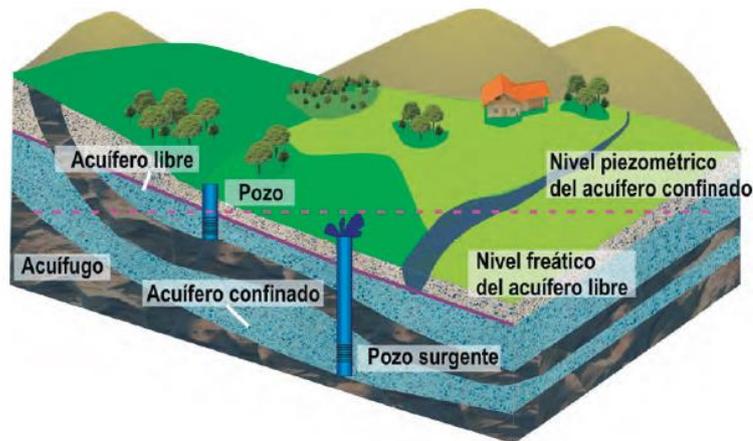
2.2.4.2.1. En función a su estructura

- **Acuífero libre:** Se encuentra libre a la presión atmosférica y cuyo piso es impermeable. Su recarga de este tipo de acuífero es directamente por infiltración de agua de lluvias a través de la zona no saturada o por infiltración de fuentes fijas como ríos y lagos. Además, se ven afectados en épocas de sequía ya que el nivel freático varia (desciende).

- **Acuífero confinado o cautivo:** Son los que están cubiertos por una capa impermeable en el techo superior e inferior. Según *(Collazo, 2012)* están limitados en su parte superior por una formación de baja a muy baja permeabilidad. La presión hidrostática a nivel del techo del acuífero es superior a la atmosférica y la recarga es lateral.

- **Acuífero semiconfinado:** Es considerado un caso particular de los acuíferos cautivos, en donde el techo y el piso están formado por capas de baja permeabilidad, la cual permite la circulación de agua en dirección vertical. Según *(Collazo, 2012)*, para que ocurra la circulación vertical, además de la permeabilidad deben existir diferencias de carga o potencial hidráulico entre el acuífero semiconfinado y otro superior o inferior. Los acuíferos semiconfinados se recargan y descargan a través de las unidades de baja permeabilidad denominadas semiconfinantes, filtrantes o acuitardos.

Figura 6: Tipos de Acuíferos según su estructura con acuífugo.



Fuente: Collazo, 2012 Manual de agua subterránea.

Figura 7: Tipos de Acuíferos según su estructura con acuitardo.



Fuente: Ordoñez, 2011 Cartilla técnica, aguas subterráneas- acuíferos.

2.2.4.2.2. En función a la porosidad (composición geológica)

- **Acuíferos porosos:** también llamados de porosidad primaria, constituidos por formaciones geológicas sedimentarias, las cuales frecuentemente son gravas y principalmente arenas. Estas varían su composición y su tamaño en función de su origen geológico como fluvial, eólico, lacustre, glacial, etc. Los cuales pueden estar consolidados o no consolidados, generalmente de edad cuaternaria denominada formación reciente.

- **Acuíferos fisurados:** También conocidos como de porosidad secundaria. Constituidos por rocas de origen ígneo o metamórfico. Donde la porosidad se debe a las zonas alteradas, fracturas o fallas que se intercomunican entre sí, la cual es la única forma de que el agua se almacene y que circule. Según (Collazo, 2012) , se debe tener en cuenta que para que el agua pueda circular, estas fracturas tienen que estar abiertas y comunicadas.

- **Acuíferos kársticos por disolución:** Este tipo de acuífero es formado por rocas carbonáticas como las calizas, margas, etc. Donde el agua circula dentro de los huecos, creados por la disolución del carbonato, a una velocidad mayor que en los acuíferos porosos o fisurados.

Figura 8: Tipos de Acuíferos según su porosidad.



Fuente: Collazo, 2012 Manual de agua subterránea

2.2.5. Geofísica

Es la ciencia por general que estudia los fenómenos físicos que ocurren en nuestro planeta como el electromagnetismo, las ondas mecánicas en la corteza terrestre y la gravedad. Según (Geofísica CL, 2016), es la aplicación de la física y la geología al estudio de materiales que componen la corteza terrestre, además de los campos fuerza que emite y su influencia en el exterior.

2.2.6. Prospección Geofísica

Es la aplicación de un conjunto de técnicas físicas y que involucra a las matemáticas con la única finalidad de explorar el subsuelo, búsqueda y estudio de yacimientos de sustancias útiles para su extracción y aprovechamiento. Según *(Chunga, 2010)*, las sustancias útiles son el petróleo, aguas subterráneas, minerales, etc...

2.2.7. Método de Prospección eléctrica

Consiste en el estudio de la propiedad física de los materiales y rocas, mediante la inyección de corriente inducida sea alterna o directa. El cual utiliza electrodos para las mediciones de potencial eléctrico y corriente con la finalidad de determinar la resistividad de los materiales que yacen en el subsuelo. Según *(Chunga, 2010)*, la *prospección eléctrica*, es el estudio de corrientes telúricas como resultado de las variaciones magnéticas terrestres o las corrientes inducidas artificialmente en la tierra sean alternas o directas para medir las propiedades físicas del estrato (distribución del suelo). Según *(Auge, 2008)*, existen 2 métodos de prospección eléctrica para la exploración de agua subterránea. La inyección de corriente, el cual se divide en sondeos verticales, calicatas eléctricas y polarización inducida. El campo de corriente natural es la medición del potencial espontáneo. Además, según *(Geofísica CL, 2016)*, el método de prospección eléctrica puede ser pasivo o activo. Pasivo cuando se estudian los potenciales espontáneos producidos por reacciones químicas naturales que ocurren en el subsuelo. Activo cuando se estudia el potencial eléctrico producido por la inyección de corriente al suelo.

Tabla 1: Cuadro de métodos Geoeléctricos para Prospección Hidrogeológica.

Métodos Geoeléctricos para prospección hidrogeológica	Inyección de corriente (Activo)	Sondeo eléctrico vertical (SEV)	Dispositivo schlumberger
		Calicatas eléctricas (CE)	Dispositivo Wenner
		Polarización Inducida (PI)	Dipolo-dipolo
	Campo de corriente natural (Pasivo)	Potencial espontaneo (PE)	-----

Fuente: Elaboración propia.

2.2.8. Sondeo eléctrico vertical (SEV)

Es una modalidad del método de prospección eléctrica el cual se inyecta corriente continua, generado por una fuente de corriente DC, por el par de electrodos AB y se receptiona la diferencia de potencial generado en los electrodos MN. Donde la disposición horizontal y la distancia entre electrodos van variando dependiendo la profundidad del estudio el cual se decide realizar. De las medidas de corriente y potencial se obtiene el valor de la resistividad aparente.

Para los SEV's, hay diferentes configuraciones como Schlumberger, Wenner, Dipolo,,etc. Pero el que más es utilizado para la exploración de acuíferos es el Schlumberger. Según (Cosenza, 2006), señala que la configuración Schlumberger se trata de un dispositivo límite que, aunque en la práctica es irrealizable de modo riguroso, presenta grandes ventajas teóricas y puede llevarse a cabo con suficiente aproximación.

La metodología de esta configuración se basa mediante el incremento de la distancia de los electrodos de corriente AB, mientras que los electrodos de potencial permanecen inmóviles. Sin embargo, cuando el voltaje medido es demasiado bajo, los electrodos de potencia MN aumenta la separación entre si y se vuelve a realizar

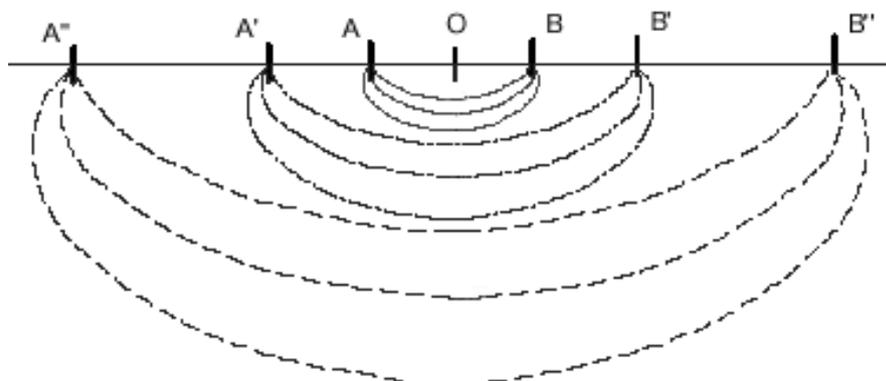
la medición a esto se le denomina empalme. Según (Estrada, 2012), los SEV se basan en determinar la variación de resistividad del subsuelo a profundidad respecto a un punto de ubicación llamado centro "O" respecto a los segmentos AB y MN. Donde AB son la ubicación de los electrodos de inyección de corriente que se desplazan y MN son los electrodos de medición de voltaje o tensión que se mantienen fijos, hasta que la tensión sea muy pequeña debida la distancia de los electrodos de corriente, luego desplazarán y se realizarán dos medidas con la última posición de AB, para asegurar el ensamble del tramo o los tramos. Los valores de resistividad determinados corresponden a distintas profundidades, bajo el punto central.

Teóricamente, la resistividad que se obtiene es la del material entre **A** y **B** hasta una profundidad $AB/2$, ya que consideramos una media esfera de ese radio. Pero en la práctica, por las inhomogeneidades del subsuelo, la profundidad efectiva es la mitad ($AB/4$), siempre que no exista un estrato muy buen conductor que absorba toda la corriente y no permita que pase más abajo. Por otro lado (Auge, 2008), define que los SEV se basan en determinar un conjunto de resistividades aparentes realizadas con un mismo dispositivo línea y de separación creciente entre los electrodos de corriente y tensión. Para el dispositivo de Schlumberger clasifica en función de la separación AB de la siguiente manera:

- **Corto:** AB hasta 250m → geotecnia y arqueología
- **Normal:** $250m < AB < 2500m$ → hidrogeología
- **Largo:** $2500m < AB < 25000m$ → prospección petrolera
- **Muy largo:** AB hasta 1.2km → investigación geofísica

Además (Orellana, 1982), afirma que la profundidad de penetración de la corriente eléctrica inyectada depende de la distancia de separación de los electrodos de inyección AB, a medida que la separación entre los electrodos AB aumenta, el 50% de la corriente circula por encima de la profundidad $AB/2$ y el 70.6% por encima de una profundidad AB.

Figura 9: Disposición de electrodos de corriente y tensión y sus desplazamientos crecientes.



Fuente: Estrada, 2012. *Apuntes de Prospección Geoeléctrica.*

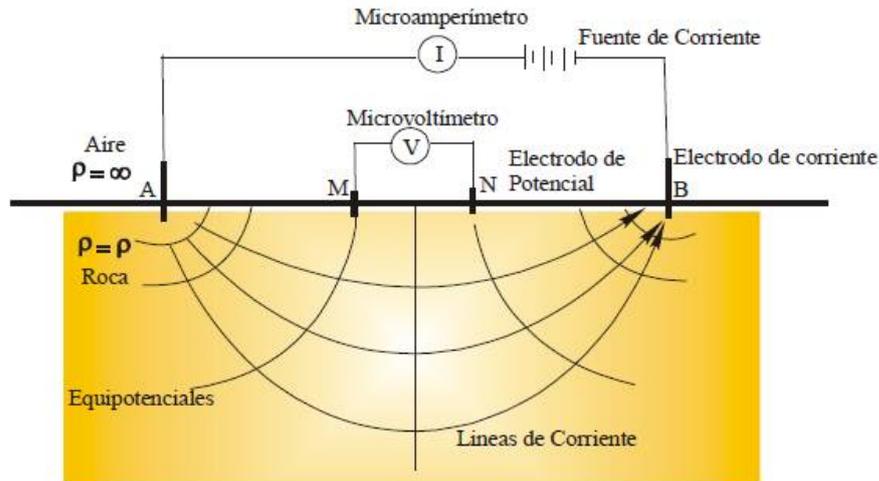
2.2.9. Potencial eléctrico en un espacio homogéneo producido por una corriente.

Para evaluar el potencial eléctrico en espacios homogéneos se tiene que asumir las siguientes condiciones que (Silva L., & Mendoza J., 2014) propone:

- *El subsuelo consiste en un número finito de capas de extensión lateral infinita separadas por una frontera plana y horizontal. Todas las capas poseen un espesor finito, salvo la última, que se considera de espesor infinito.*
- *Todas las capas son homogéneas e isotropas desde el punto de vista de su resistividad.*
- *Todas las inyecciones de corriente son puntuales. Los únicos puntos de entrada de corriente al subsuelo son los electrodos habilitados para tal fin, cuyas dimensiones son despreciables a la escala de la experiencia.*
- *La corriente es continua.*

La corriente inyectada por el electrodo A en la superficie del subsuelo retorna al electrodo B, siendo la corriente inyectada estacionaria, se cumple:

Figura 10: Circuito de entrada y salida de corriente en el suelo.



Fuente: Elaboración propia

$$I_a + I_b = 0 \dots (1)$$

Para el fenómeno de la distribución de la corriente en un medio homogéneo se fundamenta en la teoría electromagnética clásica y por medio de las ecuaciones de Maxwell:

$$\nabla \times E = 0 \dots (2)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{dD}{dt} \dots (3)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \dots (4)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \dots (5)$$

Para este caso definiremos la corriente y la densidad de corriente como variables independientes y que no varían en el tiempo. El campo eléctrico y magnético son también constantes en el tiempo. Así definiendo el potencial escalar V , la cual se relaciona con el campo eléctrico:

$$\vec{E} = -\nabla V \dots (6)$$

Las corrientes son el resultado del movimiento de los portadores de carga bajo la influencia de un campo eléctrico aplicado, en tanto la densidad de corriente es directamente proporcional al campo eléctrico. Donde la constante de proporcionalidad es la conductividad eléctrica del material.

$$J = \sigma E \dots (7)$$

Donde su inversa de la conductividad es la resistividad. ρ

Considerando el suelo un medio homogéneo, el flujo de corriente es el mismo en todos los puntos lo cual satisface la ecuación de continuidad.

$$\nabla \cdot J = \frac{d\rho}{dt} \dots (8)$$

Como la densidad corriente es proporcional al campo eléctrico y que el campo eléctrico es el negativo de la gradiente de la función potencial y además que en cada medio la conductividad o resistividad es constante, se tiene que:

Ecuación de Laplace:

$$\nabla^2 V = 0 \dots (9)$$

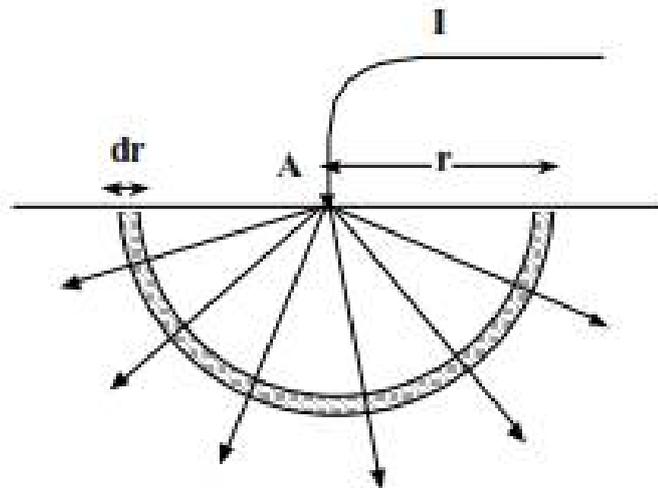
Según (Estrada, 2012), se tiene que considerar que la corriente se distribuye en todas las direcciones, si el medio o el suelo son homogéneo e isotrópico, por lo cual se asume que la intensidad de corriente se propaga radialmente. Como resultado a una distancia r tendremos una semiesfera, ya que su otra mitad es el aire, que es el área que atraviesa las líneas de corriente:

$$S = 2\pi r^2 \dots (10)$$

El potencial que es producido en un electrodo por la inyección de corriente en la superficie esférica, se define mediante la ecuación 6 en la propagación radial:

$$dV = -E \cdot dr \dots (11)$$

Figura 11: Inyección de corriente en el suelo, las líneas de campo generan superficies equipotenciales esféricas.



Fuente: Javier Sánchez (1985), *Prospección geofísica: SEVs*.
<http://web.usal.es/javisan/hidro>.

Al resolver en función de la corriente inyectada, se obtiene la siguiente ecuación:

$$- \int dV = \rho I \int \frac{dr}{A} \dots (12)$$

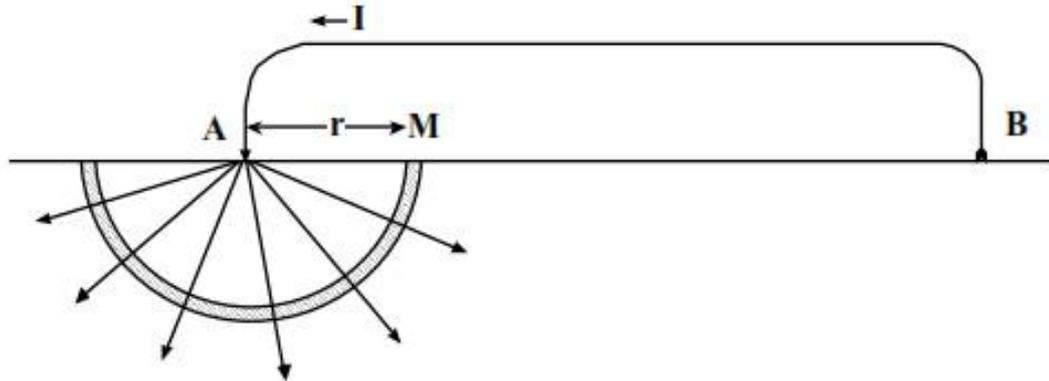
Teniendo límites desde 0 a r , el potencial es igual:

$$V = \frac{\rho}{2\pi r} \cdot I \dots (13)$$

Teniendo en cuenta que a introducir corriente mediante un electrodo A en el suelo debe haber un segundo electrodo que permita cerrar el circuito. Como resultado

se tendrá el potencial generado en un punto M, que es igual diferencia de los valores producidos en A y B.

Figura 12: Inyección de corriente mediante el electrodo A y electrodo de salida B generando el potencial en M.



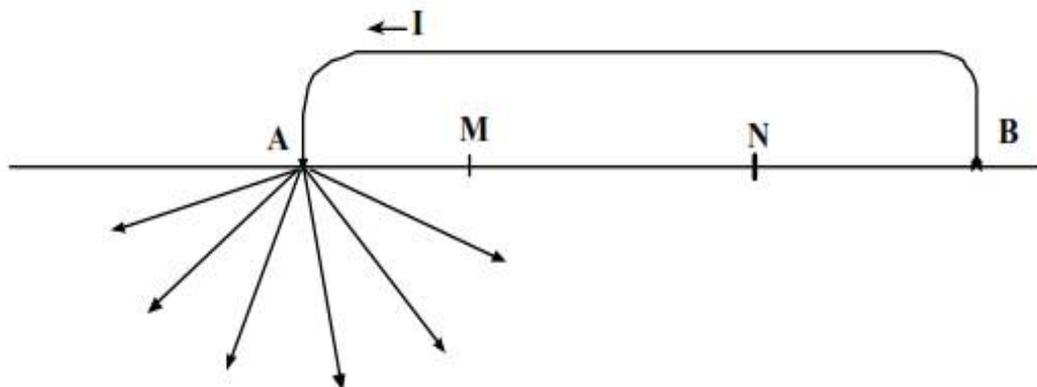
Fuente: Fuente: Javier Sánchez (1985), *Prospección geofísica:SEVs*.
<http://web.usal.es/javisan/hidro>.

Donde la ecuación del potencial en M, es la siguiente:

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \dots \quad (14)$$

En la práctica lo que se mide es la variación de potencial entre dos puntos, donde los dos polos del voltímetro están presentes, por lo tanto, el potencial en otro punto N queda determinado aplicando la ecuación 13.

Figura 13: Medición de potencial entre dos puntos.



Fuente: Javier Sánchez (1985), *Prospección geofísica:SEVs*.
<http://web.usal.es/javisan/hidro>.

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \dots \quad (15)$$

Por consecuencia, la variación de potencial entre los puntos M y N es:

$$V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \dots \quad (16)$$

Despejando la resistividad en función de la diferencia de potencial y la corriente.

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \dots \quad (17)$$

Simplificando la ecuación 16, tenemos que la resistividad se reduce a los parámetros que el método geofísico de prospección eléctrica utiliza para el estudio.

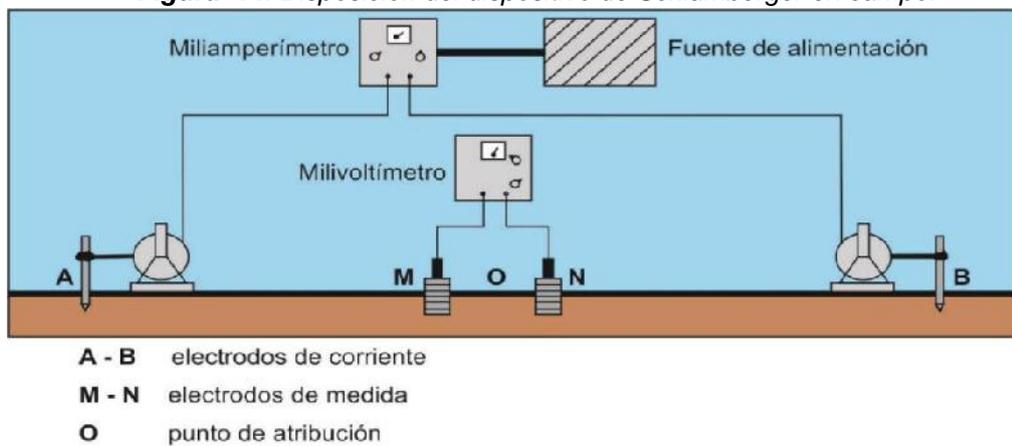
$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot K \dots \quad (18)$$

Según (Sánchez, 1985), el valor de resistividad obtenido, al hacer la operación del producto entre la constante geométrica del dispositivo y la relación de la diferencia de potencial y la corriente, sería la resistividad real del terreno si este fuera homogéneo, pero es habitual que la resistividad sea una mezcla de las resistividades de diversos materiales. Por tanto, se denomina resistividad aparente.

Donde K es el coeficiente geométrico del dispositivo a utilizarse porque depende de las distancias entre los electrodos que se encuentran aleatoriamente espaciados.

Para este caso la configuración del dispositivo a utilizarse es el de Schlumberger, el cual la disposición de los 4 electrodos es lineal en el suelo (terreno de estudio). Los electrodos de inyección (2) de corriente se sitúan en los extremos y los que miden la variación de potencial se sitúan entre estos, los cuales son móviles mientras que los que miden potencial (2) se mantienen fijos hasta que el valor del potencial tiende a cero y se modifica su posición haciendo un empalme. Cada incremento de los electrodos de corriente incrementa la profundidad de investigación.

Figura 14: Disposición del dispositivo de Schlumberger en campo.



Fuente: Alex Brea-Iglesias (2012) *Aplicación De Parámetros Geoeléctricos En El Estudio De Las Aguas Subterráneas.*

La constante geométrica para el dispositivo es el resultado de la solución de la ecuación 16, dando valores:

$$AM = BN = b$$

$$MN = a$$

$$L = b + \frac{a}{2} \dots (19)$$

$$K = \pi \cdot \frac{b^2}{a} + \pi \cdot b \dots (20)$$

Reemplazando b en función de " L " se obtiene " K ", " L " es la distancia desde el punto O hasta un extremo teniendo en cuenta que " a " tiende a ser muy pequeño.

$$K = \frac{\pi L^2}{a} \dots (21)$$

Por lo tanto, la ecuación para la resistividad usando el dispositivo de Schlumberger se reduce a la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{\pi L^2}{a} \dots (22)$$

El subsuelo está compuesto por estratos los cuales presentan diferentes tipos de materiales, además de estar caracterizados de acuerdo a la resistividad que presentan. (Luis Silva Alcántara; Juan Mendoza Carlos, 2014), presentan una tabla de resistividades de diferentes materiales recolectada del autor (Luke, 2000. Pag 4)

Tabla 2: Resistividades características de distintos materiales.

MATERIAL	RESISTIVIDAD (Ohm-m)	CONDUCTIVIDAD (Siemens/m)
Rocas ígneas y metamórficas		
Granito	$5 \times 10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 2 \times 10^{-4}$
Basalto	$10^3 - 10^6$	$10^{-6} - 10^{-4}$
Esquistos	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$	$2.5 \times 10^{-8} - 1.7 \times 10^{-3}$
Mármol	$10^2 - 2.5 \times 10^8$	$4 \times 10^{-9} - 10^{-2}$
Cuarcitas	$10^2 - 2 \times 10^8$	$5 \times 10^{-9} - 10^{-2} - 10^{-2}$
Rocas sedimentarias		
Areniscas	$8 - 4 \times 10^3$	$2.5 \times 10^{-4} - 0.125$
Pizarras	$20 - 2 \times 10^3$	$5 \times 10^{-4} - 0.05$
Calizas	$50 - 4 \times 10^2$	$2.5 \times 10^{-3} - 0.02$
Suelos y agua		
Arcillas	1-100	0.01-1
Aluvial	10-800	$1.25 \times 10^{-3} - 0.1$
Agua subterránea (dulce)	10-100	0.01-0.1
Agua de mar	0.2	5
Compuestos químicos		
Hierro	9.074×10^{-8}	1.102×10^7
Cloruro potásico 0.01M	0.708	1.413
Cloruro sódico 0.01M	0.843	1.185
Ácido acético 0.01M	6.13	0.163
Xyleno	6.998×10^{16}	1.429×10^{-17}

Fuente: Silva L. & Mendoza J., (2014), *Modelización Geoeléctrica Del Subsuelo Con Medidas De Resistividad Aparente*.

CAPITULO III

MATERIALES Y METODOS

3 MATERIALES Y METODOS

En este capítulo se presenta los materiales métodos que se han utilizado en el desarrollo de la investigación.

3.1. Materiales

3.1.1. Equipo

AgroGer Rubio E.I.R.L. puso a disposición el equipo de prospección eléctrica (figura 15) que ellos mismos han ensamblado para realizar SEV, el cual consta de dos multímetros digitales marca Sanwa modelo CD771, un bloque conmutable de batería secas de 500V, cable emisor y receptor de corriente, cable para medición de potencial y electrodos. Adicional a estos elementos, un GPS de 12 canales marca Garmin.

Figura 15: Equipo de prospección eléctrica ensamblado por AgroGer Rubio E.I.R.L



Fuente: AgroGer Rubio E.I.R.L

3.1.2. Especificaciones técnicas de los equipos

- Precisión: $\pm(\% rdg + dgt)$
- rgd (lectura): valor leído
- dgt : dígito menos significativo
- temperatura: $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
- humedad $<80\%$ HR

Tabla 3: Especificaciones del multímetro Sanwa CD 771

Voltaje VCD		
Rango	Precisión	Resistencia de entrada
400.0 mV	$\pm(0.5\% rdg + 2dgt)$	\geq Aprox. 100 M Ω
4.000 V	$\pm(0.9\% rdg + 2dgt)$	Aprox. 11 M Ω
40.00 V		Aprox. 10 M Ω
400.0 V		
1000 V		
ACD		
Rango	Precisión	Resistencia de entrada
400.0 μA	$\pm(1.4\% rdg + 3dgt)$	Aprox. 100 M
4000 μA		Aprox. 1 Ω
40.00 mA		
400.0 mA		
4.000 A	$\pm(2.0\% rdg + 3dgt)$	Aprox. 0.01 Ω
10.00 A		

Fuente: Manual Sanwa CD771

3.1.3. Datos Shapes y Excel

Los datos shapes son proporcionados por el gobierno regional de Lambayeque (GORELA) a través de la oficina de planificación y ordenamiento territorial. Estos fueron los siguientes en forma shape que luego se procesaran mediante el ArcMap 10.4 perteneciente a ArcGis.

- ✓ Centros poblados de Lambayeque
- ✓ Distritos de Lambayeque
- ✓ Elementos fijos de Lambayeque (ríos, quebradas y reservorios)
- ✓ Geología de Lambayeque
- ✓ Hidrogeología

Por medio del instituto nacional de recursos naturales (INRENA) se logró recolectar el inventario de pozos de captación de agua subterránea que se encuentran en todo el distrito de Olmos.

3.1.4. ArcMap y ArcCatalog

Pertenecientes al paquete de ArcGis for desktop, permiten recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. ArcMap permite crear mapas temáticos o mapas en general utilizando herramientas de análisis espacial, las cuales contribuyen para realizar un buen estudio científico. Mientras que ArcCatalog permite la creación de archivos shapes, los que guardan toda la data y pueden ser en forma de polígono, punto y línea. *(Esri, 2016) define a ArcMap como una aplicación central utilizada en ArcGIS. ArcMap es el lugar donde visualiza y explora los dataset SIG de su área de estudio, donde asigna símbolos y donde crea los diseños de mapa para imprimir o publicar. Es también la aplicación que utiliza para crear y editar los dataset.*

3.1.5. IPI2Win

Es un software que permite analizar con un mínimo error la resistividad aparente obtenida mediante sondeos eléctricos que se han hecho mediante configuración de dispositivos como Wenner, Schlumberger y otros.

3.2. Metodología

La localidad de El Virrey, se encuentra localizada en el distrito de olmos, provincia de Lambayeque y departamento de Lambayeque. Con una población de 467 habitantes (INEI, 2007) y records de precipitación (ANA, 2017) que se mostraran en el **Anexo A**.

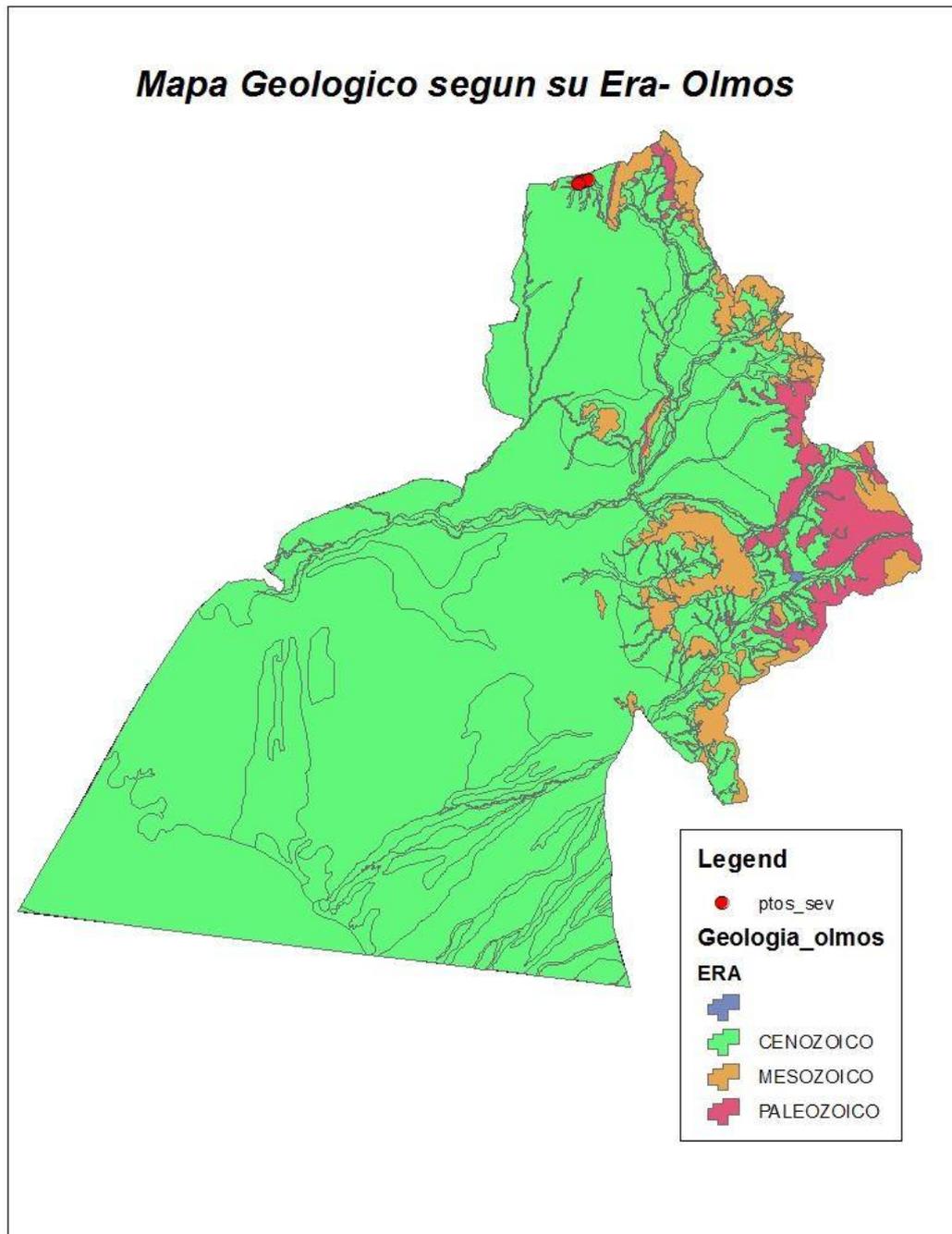
Tabla 4: Ubicación Del Centro Poblado El Virrey En Coordenadas UTM Y Población (INEI, 2007)

Coordenadas UTM		Población
Norte	Este	467
9388205	612817	

Fuente: Gobierno Regional de Lambayeque (GORELA)

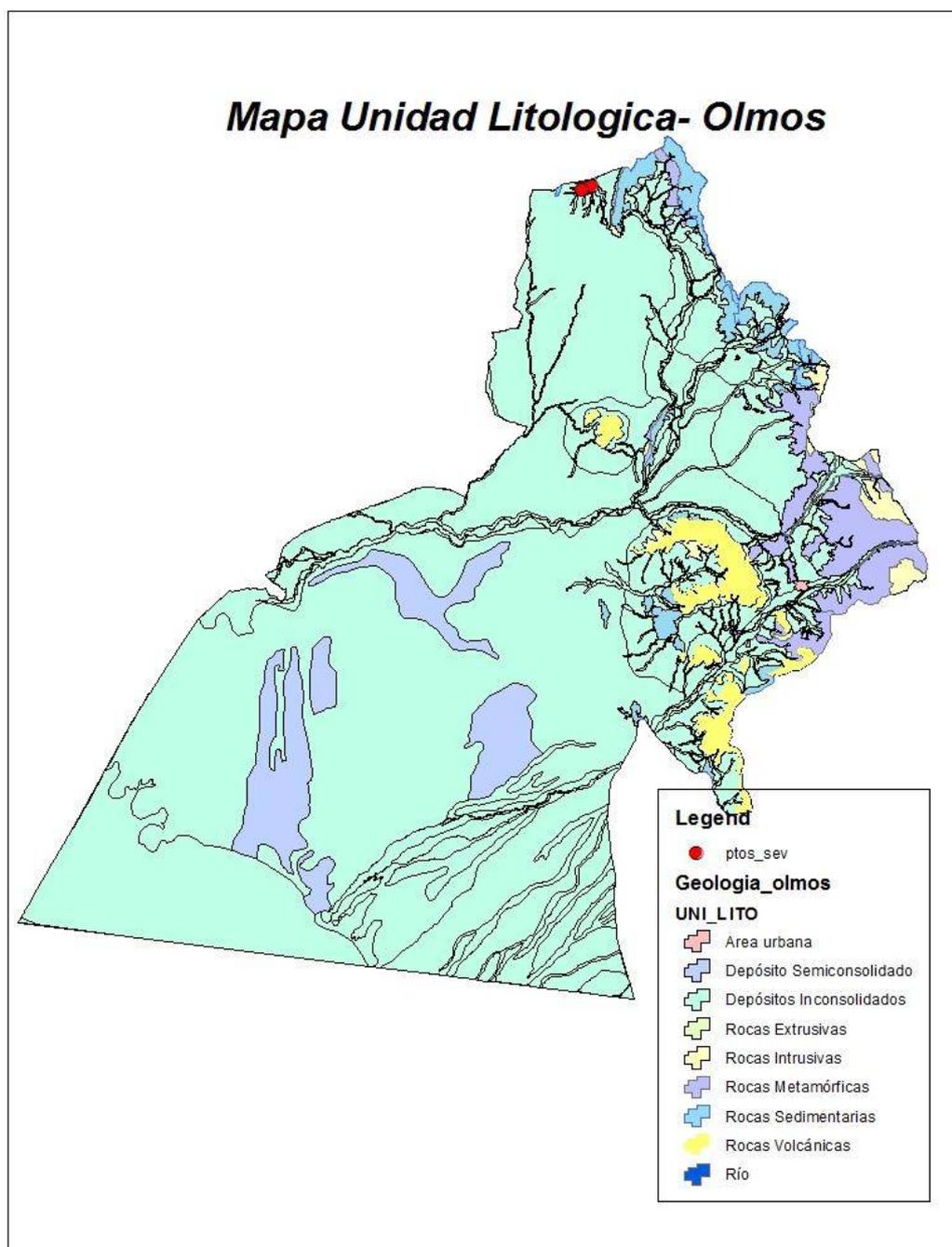
El distrito de olmos presenta una geológica que se puede diferenciar según su era y según su unidad litográfica.

Figura 16: Geología según su era, procesado en ArcGis.



Fuente: Gobierno Regional de Lambayeque, formato shape. Representado en ArcMap.

Figura 17: Geología según su unidad litográfica, procesado en ArcGis.

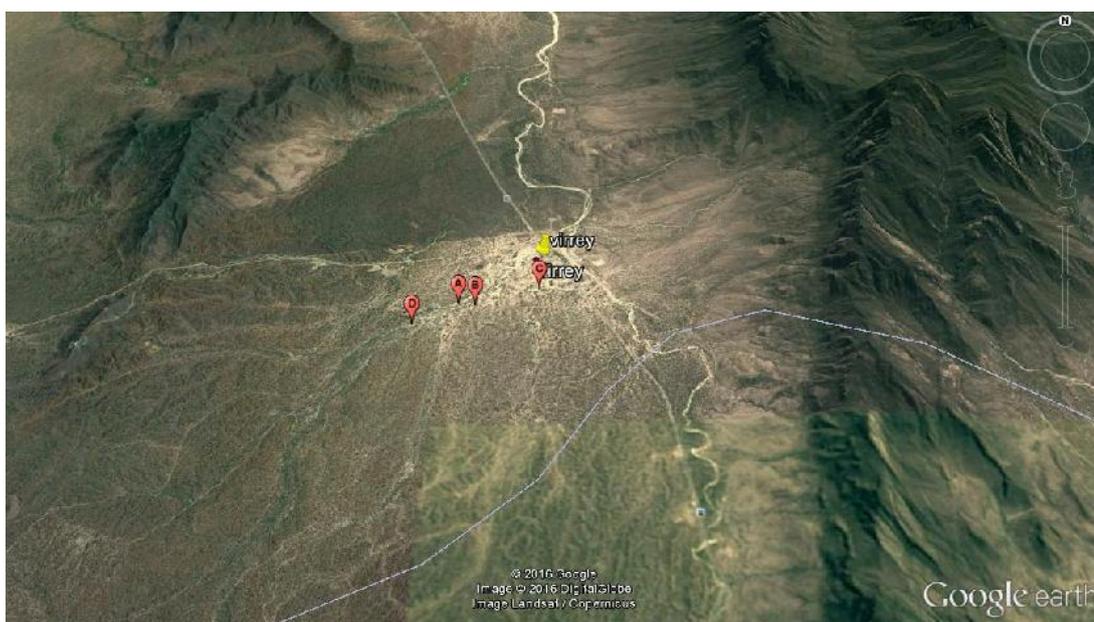


Fuente: Gobierno Regional de Lambayeque, formato shape. Representado en ArcMap.

Los datos de los SEV pertenecientes al presente trabajo de investigación fueron conjuntamente tomados con el equipo de la empresa AgroGer S.A en el mes de diciembre del 2016 (estación de verano). Aplicando el método mencionado, el cual consiste en la medición de los parámetros de corriente inyectada y voltaje receptado.

Se eligió 4 puntos llamemos de monitoreo, 2 SEV's por cada punto, haciendo un total de 8 SEV's con 34 mediciones. Considerando ubicación, accesibilidad, representatividad. Los mismo que fueron georreferenciados utilizando un sistema de posicionamiento satelital (GPS), registrándolos en coordenadas UTM-WGS 84, zona 17M.

Figura 18: Ubicación de los monitoreos (SEV's)



Fuente: Google Earth Pro

Tabla 5: Coordenadas y altitud sobre el nivel del mar de los puntos de monitoreo SEV.

	Coordenadas UTM		Altitud sobre el nivel del mar (m)
	Norte	Este	
SEV_A	611844	9387719	226
SEV_B	612012	9387700	213
SEV_C	612648	9387938	208
SEV_D	611407	9387439	226

Fuente: Google Earth Pro

Tabla 6: Distancia entre punto de monitoreo SEV con respecto al punto D.

Distancia con respecto al punto D (m)			
	SEV_A	SEV_B	SEV_C
SEV_D	519	659	1337

Fuente: Google Earth Pro

Para las resistividades aparentes de cada monitoreo se obtendrá el promedio y error porcentual.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n x_n \dots (23)$$

$$e = \frac{|valor\ medido - valor\ promedio|}{valor\ promedio} * 100\% \dots (24)$$

Además, se utilizó el programa IPI2WIN el cual permite calcular la constante geométrica del dispositivo Schlumberger, resistividad aparente e interpretar las curvas de sondeo eléctrico vertical a lo largo de un perfil; agregando a esto también determina la resistividad de cada estrato el subsuelo, la profundidad, el espesor del estrato.

En la investigación aparte aplicar las herramientas del IPI2WIN como inversión (que permite ajustar las curvas) y edit curve (que permite editar puntos si se conoce una profundidad de referencia a la cual se puede posiblemente encontrar un acuífero), se ha empleado algunas herramientas como del ArcMap (ArcGis) y Google Earth Pro como ayuda complementaria. Para georreferenciar puntos, determinar profundidades de referencias interpolando y como resultado obtener mapas de cada uno.

CAPITULO IV

RESULTADOS

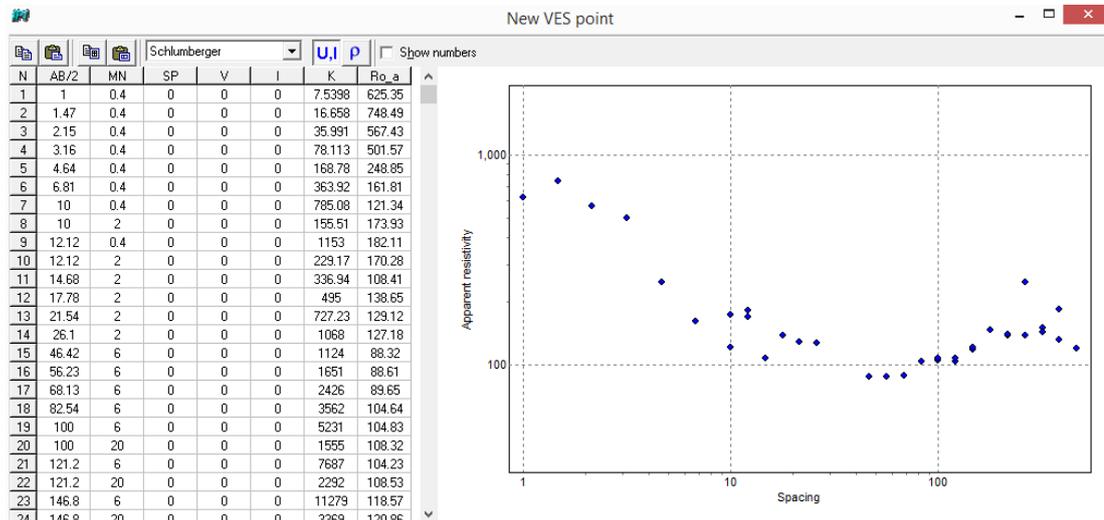
4 RESULTADOS

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos del análisis de las resistividades aparentes, curvas de resistividades aparentes de campo, valores de resistividades de los estratos (espesores y profundidad), pseudo sección de resistividades aparentes entre los puntos y sección de resistividades de los sondeos. Para ver todos los valores de resistividades aparentes (Anexo C).

4.1. Análisis de las curvas de resistividades aparentes o de campo

SEV_A

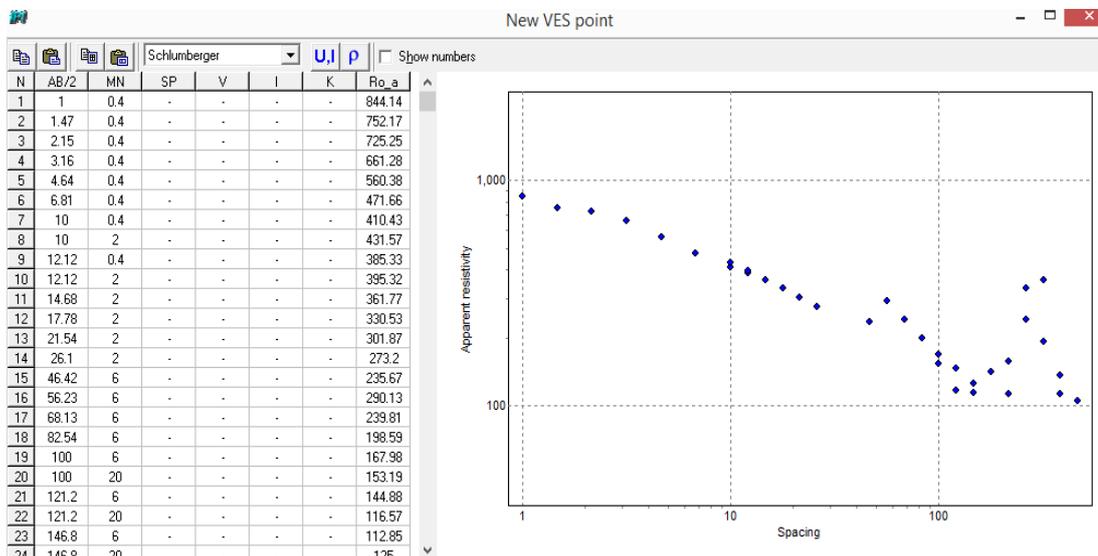
Figura 19: Curva de resistividades aparentes. SEV_A



Fuente: Elaboración propia. IPI2WIN.

SEV_B

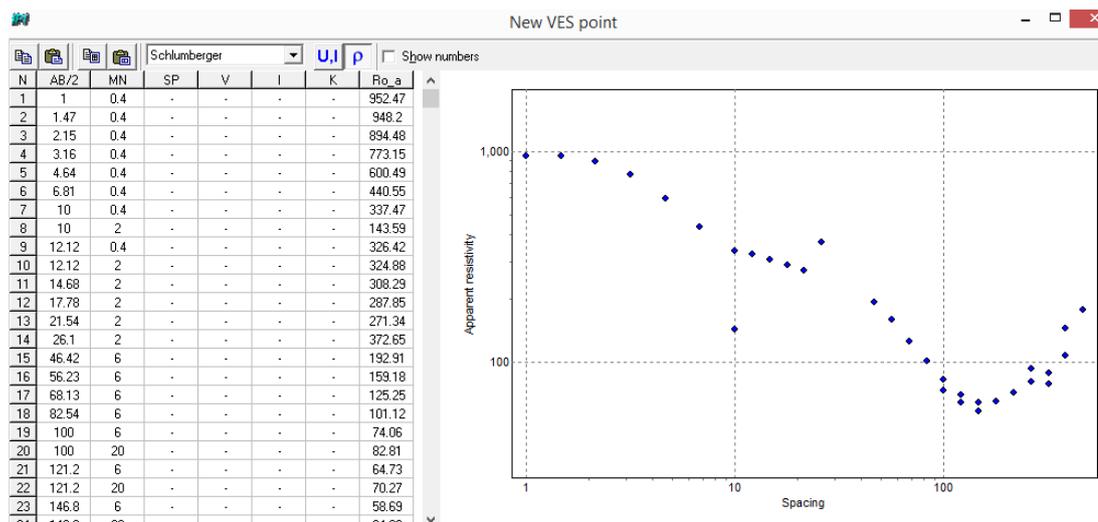
Figura 20: Curva de resistividades aparentes. SEV_B



Fuente: Elaboración propia. IPI2WIN.

SEV_C

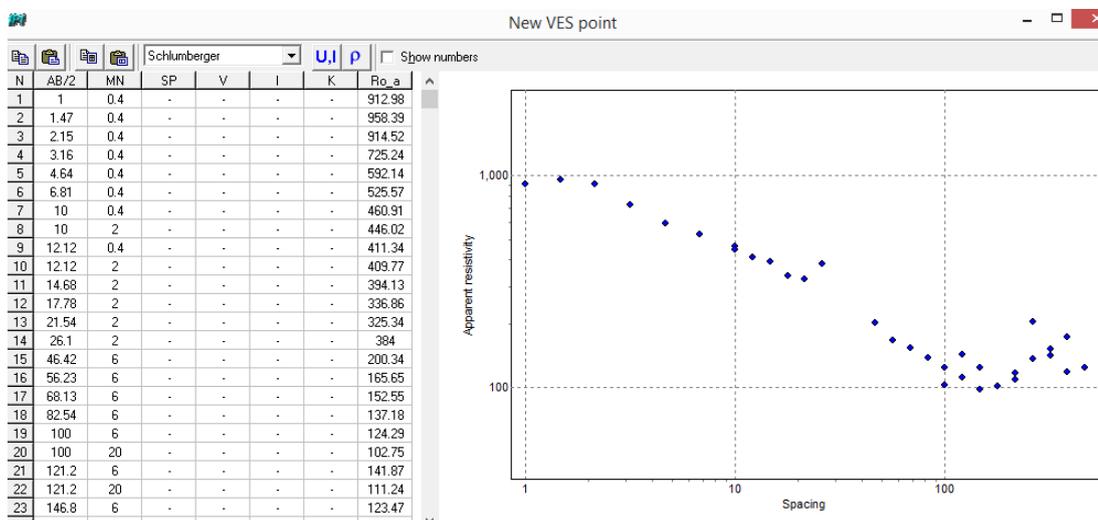
Figura 21: Curva de resistividades aparentes. SEV_C



Fuente: Elaboración propia. IPI2WIN.

SEV_D

Figura 22: Curva de resistividades aparentes. SEV_D



Fuente: Elaboración propia. IPI2WIN.

Del análisis de la información tomada en cada punto de monitoreo SEV muestra los datos, de cada SEV's se aprecia la curva promedio de las resistividades aparentes que tiende a decrecer a medida que la profundidad aumenta, los empalmes de igual manera siguiendo el mismo patrón.

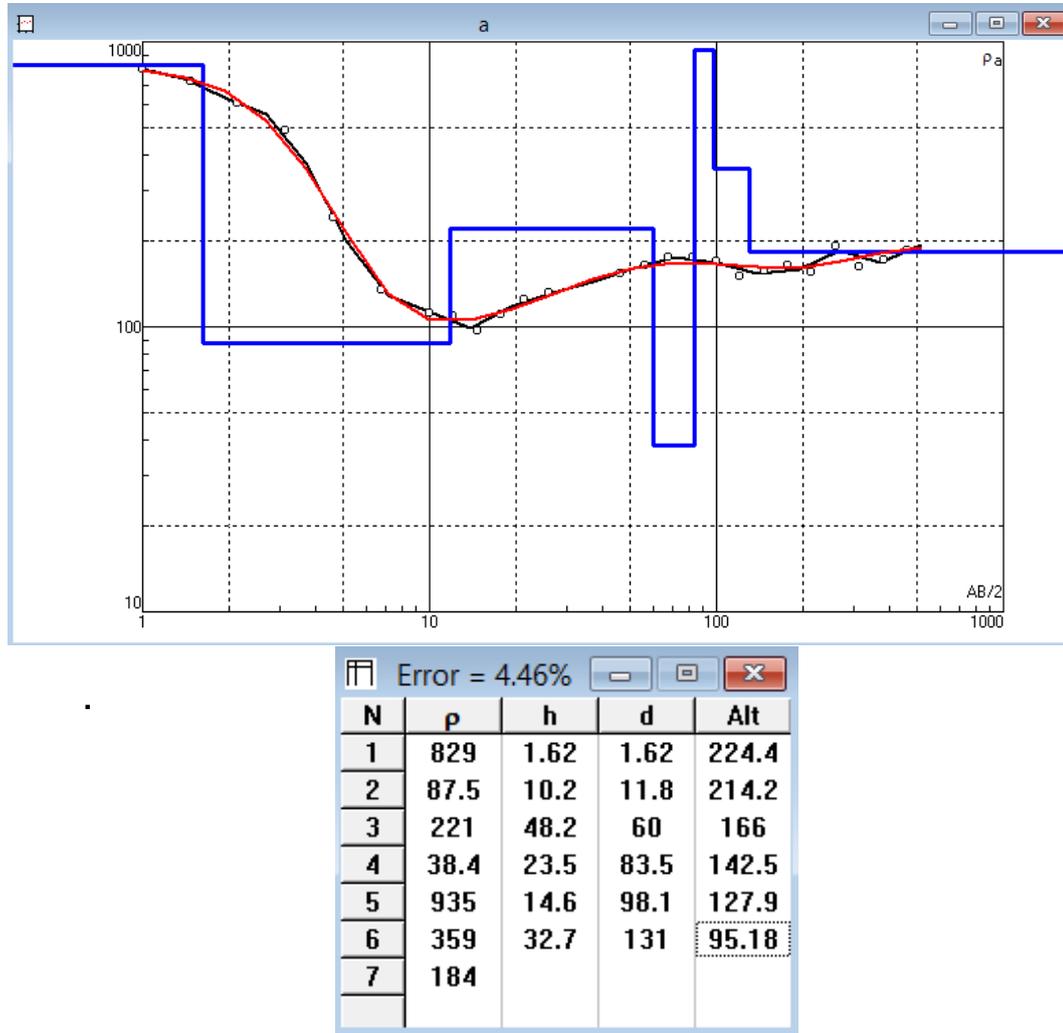
4.2. Curva de resistividades de las capas del subsuelo (espesores y profundidad)

Al procesar los datos de cada SEV en el software IPI2WIN, se aprecian tres tipos de líneas las cuales se describen de la siguiente manera:

- Curva de campo: Curva de color negro
- Curva de relación entre la resistividad aparente y la profundidad: de color roja y de color azul las cuales permite el ajuste para la determinación de la resistividad verdadera y los espesores.

SEV_A

Figura 23: Curvas de resistividades verdaderas de cada estrato, espesor de cada estrato y la profundidad de que se encuentran-“SEV_A”.



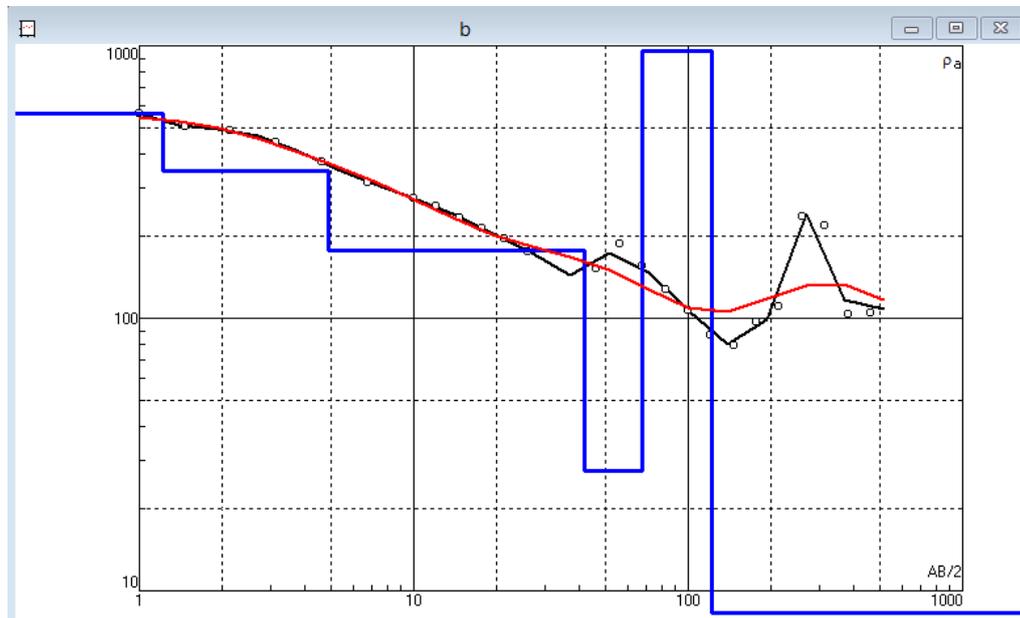
Fuente: Elaboración propia. IPI2WIN.

Hecho el análisis de las resistividades aparentes para el SEV_A, se procedió al análisis de la curva de campo, junto con las curvas de relación de la profundidad AB/2 y las resistividades aparentes, la cual da el resultado de 7 capas con un error de 4.46% de fiabilidad del modelo de capas. Presentando en las capas 1, 3, 5,6 y 7, las cuales presentan resistividades superiores a los rangos para un acuífero (agua subterránea) vistos en la tabla de *Resistividades características de distintos materiales (tabla 2)*, siendo la capa número 7 la que se considera infinita. En cambio,

las capas 2 y 4 presentan resistividades en el rango para ser acuífero. La capa número 2 presenta un espesor de 10.2 metros con un techo superior a 1.62 metros y un techo basal a 11.8 metros sobre la superficie, lo cual no se puede afirmar que sea un acuífero ya que se encuentra sobre el nivel de la capa freática de la zona (**ver anexo C pozos perforados hasta el años 1999 y otros perforados hasta el 2005, pero con el pasar el tiempo hasta el 2016 se concluye que la capa freática está a una profundidad entre 50 y 60 metros por debajo de la superficie, debido a que no hubo precipitación en esos periodos por falta de precipitación**); en cambio la capa 4, presenta las condiciones necesarias para ser un acuífero, debido a que presenta una resistividad de 38.4 oh-m., con un espesor de 23.5 metros, un techo superior a 60 metros de profundidad y un techo basal a 83.5 metros sobre la superficie; además de estar bajo el nivel de la capa freática.

SEV_B

Figura 24: Curvas de resistividades verdaderas de cada estrato, espesor de cada estrato y la profundidad de que se encuentran-“SEV_B”.



N	p	h	d	Alt
1	562	1.22	1.22	211.8
2	349	3.68	4.9	208.1
3	177	36.8	41.7	171.3
4	27.5	26.3	68	145
5	952	53.7	122	91.3
6	1.7			

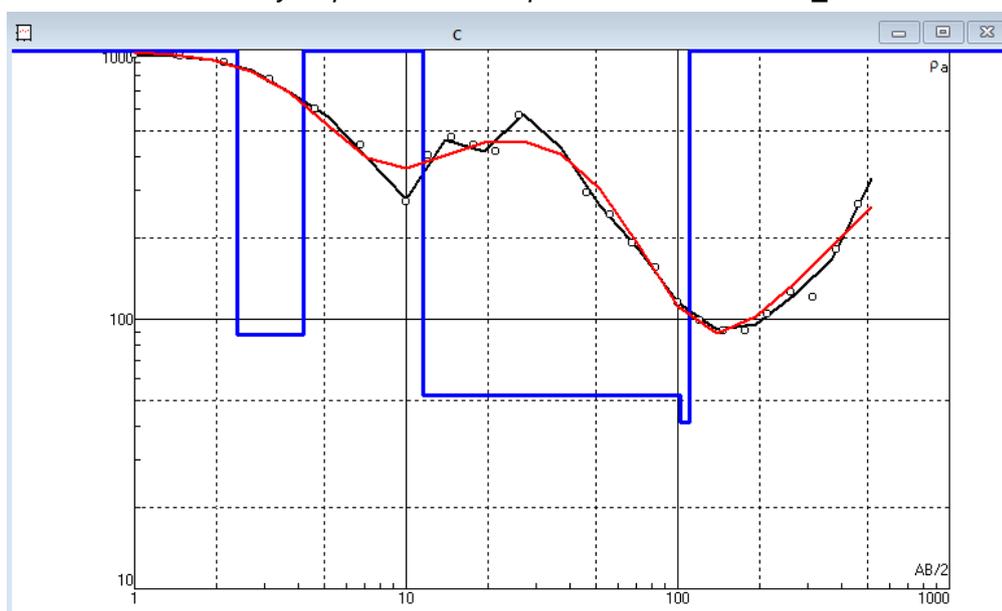
Fuente: Elaboración propia. IPI2WIN.

Hecho el análisis de resistividades aparentes del punto de monitoreo SEV_B, el cual, al analizar la curva de campo, junto con las curvas de relación de la profundidad AB/2 y las resistividades aparentes, la cual da el resultado de 6 capas con un error de 17% de fiabilidad del modelo de capas. Presentando en las capas 1, 2,3 y 5 resistividades superiores a los rangos para un acuífero (agua subterránea)

vistos en la tabla de Resistividades *características de distintos materiales (tabla 2)*. En cambio, las capas 4 y 6 presentan resistividades en el rango para agua subterránea. La capa número 4 presenta las condiciones necesarias para ser un acuífero, debido a que presenta una resistividad de 27.5 oh-m., con un espesor de 26.3 metros, un techo superior a 41.7 metros y un techo basal a 68 metros sobre la superficie; además de estar bajo o al mismo nivel de la capa freática; en cambio la capa número 6 es la capa infinita.

SEV_C

Figura 25: Curvas de resistividades verdaderas de cada estrato, espesor de cada estrato y la profundidad de que se encuentran-“SEV_C”.



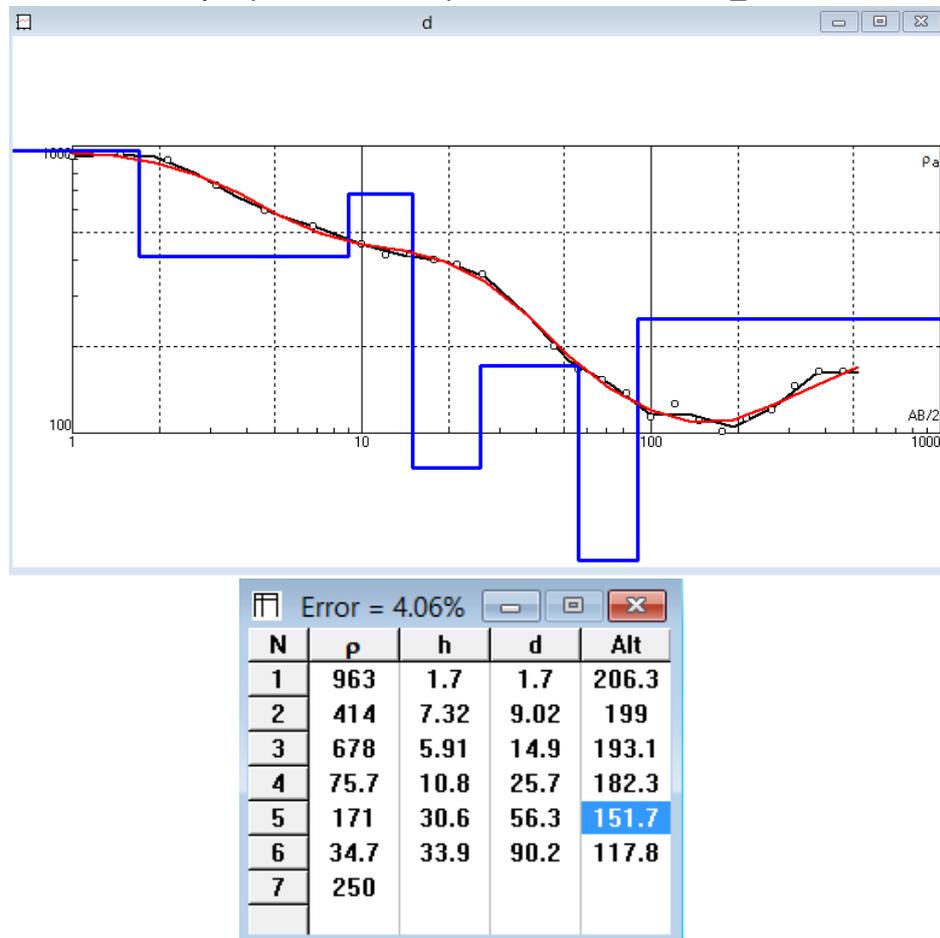
N	p	h	d	Alt
1	992	2.39	2.39	205.6
2	87.8	1.81	4.2	203.8
3	1612	7.32	11.5	196.5
4	52.4	90.4	102	106.1
5	41.4	8.56	110	97.52
6	16114			

Fuente: Elaboración propia. IPI2WIN.

Se hizo el análisis de las resistividades aparentes del punto de monitoreo SEV_C, el cual, al analizar la curva de campo, junto con las curvas de relación de la profundidad AB/2 y las resistividades aparentes, tenemos como resultado 6 capas con un error de 11.6 % de fiabilidad del modelo. Las capas 1, 3 y 6 presentan resistividades superiores a los rangos para un acuífero. (Agua subterránea) vistos en la tabla de *Resistividades características de distintos materiales (tabla 2)*. Siendo la capa número 6 la que se considera de espesor infinito. Mientras que las capas número 2, 4 y 5 presentan resistividades dentro de los rangos para un acuífero. Sin embargo la capa 2 presenta una resistividad de 87.1 oh-m, con un espesor de 1.81 metros, con un techo superior a 2.39 metros y un techo basal a 4.2 metros por debajo de la superficie, el cual no se considera un acuífero por estar sobre el nivel de la capa freática; además las capas 4 y 5, con resistividades 52.4 y 41.4 oh-m, forman un espesor de 92 metros, con un techo superior a 11.5 metros y un techo basal a 110 metros por debajo de la superficie; estas dos capas muestran condiciones necesarias para ser un acuífero pero por el error de fiabilidad del modelo se descarta.

SEV_D

Figura 26: Curvas de resistividades verdaderas de cada estrato, espesor de cada estrato y la profundidad de que se encuentran-“SEV_D”.



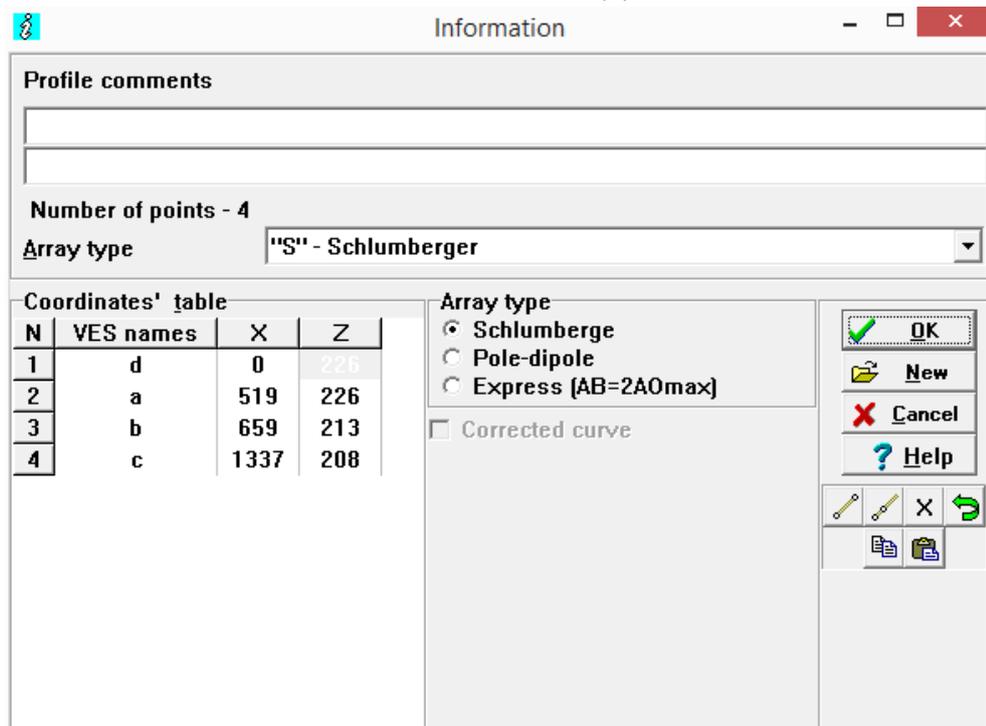
Fuente: Elaboración propia. IPI2WIN.

La figura muestra el análisis de las resistividades aparentes del punto de monitoreo SEV_D, el cual, al analizar la curva de campo, junto con las curvas de relación de la profundidad AB/2 y las resistividades aparentes, tenemos como resultado 7 capas con un error de fiabilidad de 4.06% del modelo de capas. Las capas 1, 2, 3, 5 y 7 presentan resistividades superiores a los rangos para un acuífero vistos en la tabla de *Resistividades características de distintos materiales (tabla 2)*, siendo la capa número 7 la que se considera infinita. En cambio, las capas 4 y 6 presentan resistividades en el rango para un acuífero, pero cada una presenta un espesor diferente. La capa 4 presenta una resistividad de 75.7 oh-m, con un espesor de 10.8

metros, con un techo basal a 25.7 metros y un techo superior a 14.9 metros sobre la superficie, no se puede afirmar que es un acuífero ya que el espesor es de 10 metros y se encuentra sobre el nivel de la napa freática; en cambio, la capa 6 presenta las condiciones necesarias para ser un acuífero con un valor de resistividad de 34.7 oh-m, con un espesor de 33.9 metros, con un techo basal a 90.2 metros y un techo superior a 56.3 metros sobre la superficie, se afirma que en este punto monitoreo se encuentra un acuífero porque está por debajo del nivel de la napa freática y a resistividad está en el rango.

4.3. Sección de resistividades aparentes entre los puntos de monitoreos y sección resistividades verdaderas de cada estrato respecto a la profundidad y a la altura sobre el nivel del mar.

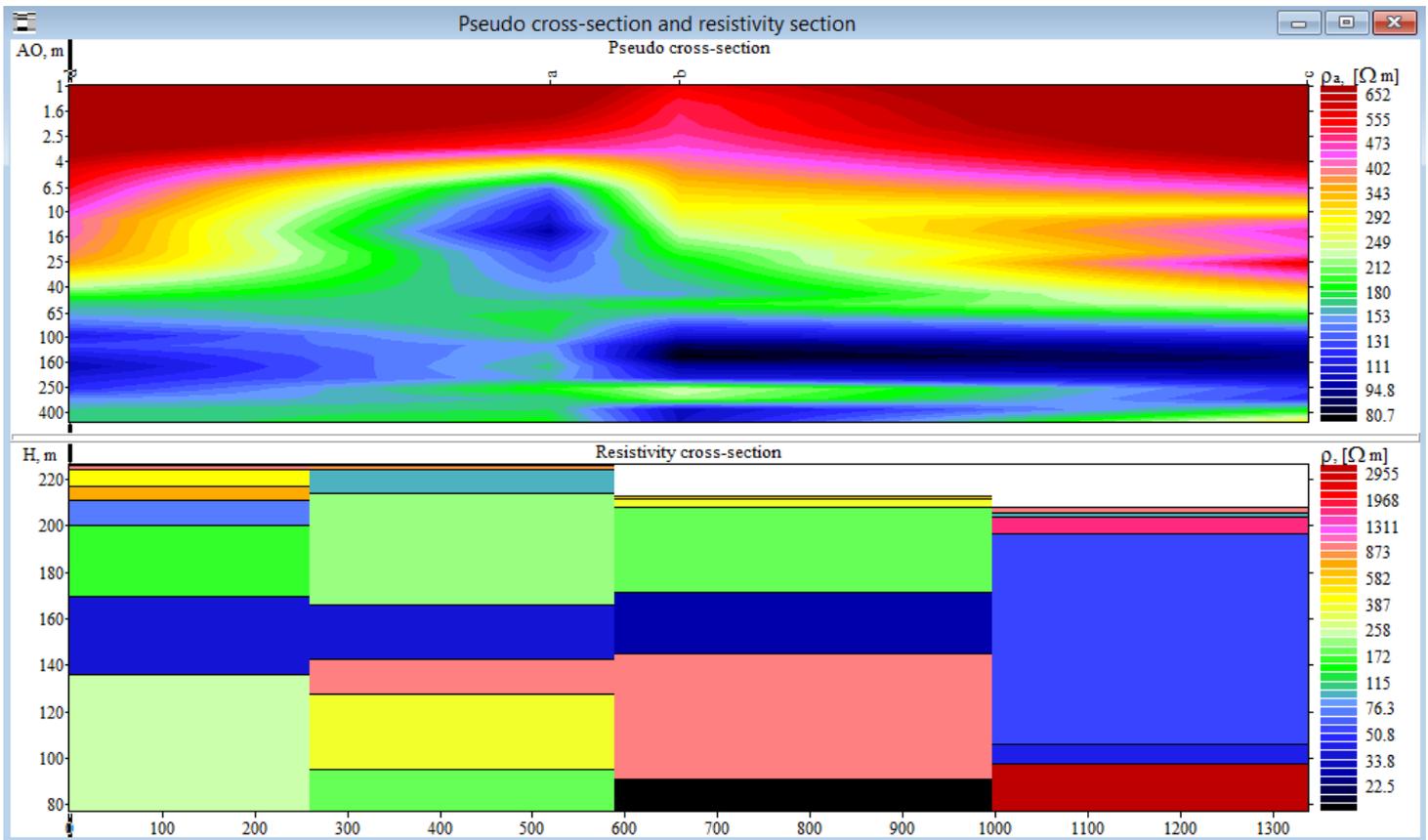
Figura 27: Puntos de monitoreo, distancias entre ellos en línea recta (X) y altura sobre el nivel del mar (Z).



Fuente: Elaboración propia. IPI2WIN.

La figura muestra los puntos de monitoreo SEV's la distancia entre ellos "X" y la altura sobre el nivel mar "Z". Esto dará como resultado la interpolación de las resistividades aparentes en toda la línea de los SEV's.

Figura 28: Sección de resistividades aparentes y resistividades (sección geoelectrica) verdaderas a profundidad



Fuente: Elaboración propia. IPI2WIN.

La figura muestra dos campos, la parte superior de pseudo-cross section (resistividades aparentes) interpolada entre los puntos de monitores SEV's en función de $AB/2$ (AO) y la parte inferior que muestra las resistividades verdaderas, con su respectivo espesor y profundidad respecto a la superficie que se encuentra a la altura sobre el nivel del mar.

La parte superior muestra la interpolación, entre las distancias de los puntos, de la resistividad medida en campo (resistividad aparente) que varía a medida que se mueven los electrodos de corriente abarcando una mayor profundidad. La parte inferior muestra los valores que se han obtenido, como el número de capas, el espesor y sus resistividades verdaderas y la profundidad a la que se encuentra el acuífero, al hacer el análisis mediante las curvas.

CAPITULO V
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se concluye que el SEV_A, ubicado con coordenadas UTM (norte: 611844; este: 9387719 y altitud: 226 m). Presenta siete capas, donde la capa número 4 muestra un acuífero confinado con presencia de arcillas, depósitos aluviales y agua subterránea que se encuentra entre dos capas de alta resistividad. Con un techo superior a 60 metros y su techo basal se encuentra a 83.5 metros por debajo de la superficie, con un error de 4.46%.
- Se concluye que el SEV_B, ubicado con coordenadas UTM (norte: 612012; este: 9387700 y altitud: 213 m), presenta seis capas donde la capa número 4 muestra un acuífero confinado ya que se encuentre entre dos capas con alta resistividad con un techo superior a 41.7 metros y su techo basal se encuentra a 68 metros por debajo de la superficie, pero debido al error de 17% que presenta se descarta que sea un acuífero.
- Se concluye que el SEV_C, ubicado con coordenadas UTM (norte: 612648; este: 9387938 y altitud: 208 m), presenta seis capas donde las capas 2,4 y 5 muestra resistividades ideales para ser un acuífero con un error de 11.6%; sin embargo, debido a que en la localidad de el virrey hay una formación geológica montañosa y por encontrarse sobre el nivel de la napa freática este punto no puede ser considerado como acuífero, aunque presente resistividad baja. Las resistividades bajas pueden ser debido a metales debido a las construcciones hechas o a rocas con minerales de baja conductividad.

- Se concluye que el SEV_D, ubicado con coordenadas UTM (norte: 611407; este: 9387439 y altitud: 226 m), presenta siete capas, donde la capa número 6 muestra un acuífero confinado con presencia de arcillas, depósitos aluviales y agua subterránea. Con resistividad de 34.7 oh-m, un espesor de 33.9 metros, un techo superior a 56.3 metros y un techo basal a 90. metros, con un error de 4.06%.
- Se concluye que el corte geoelectrico muestra un acuífero confinado a una profundidad media de 58 metros de profundidad con respecto a la superficie del suelo, con condiciones necesarias (resistividad, por debajo del nivel de napa freática y con un espesor considerado).

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda la perforación en el punto D además de complementarse haciendo un estudio de calicatas, para identificar el tipo de material se encuentra.
- Después de la perforación se recomienda hacer un estudio de diagrafía para precisar los límites de las diferentes capas del subsuelo, caracterizándolas de acuerdo a su litología, evaluar capas de permeabilidad y evaluar la calidad de agua.
- En caso de llevarse a cabo la perforación y después de la diagrafía, se recomienda aislarse adecuadamente los estratos salobres.
- Se recomienda hacer un nuevo estudio de prospección eléctrica SEV después de alguna precipitación de lluvia, con la finalidad de ver alguna variación de la profundidad de los acuíferos.
- Se recomienda hacer un estudio de prospección eléctrica-calicatas eléctricas en el punto C con la finalidad de verificar los datos de obtenidos en el SEV_C. Ya que este tipo de prospección permite conocer las características del subsuelo a una profundidad determinada.

CAPITULO VI

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ✓ GeoScan-M Ltd. & Universidad Estatal de Moscú, IPI2Win Guía de Usuario, Moscú 2000.
- ✓ Zenteno E, & Sifuentes J., (2006), Informe de Estudio Hidrogeológico de la Quebrada Casitas para el Ministerio de Agricultura. Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA).
- ✓ Auge M., Métodos Geoeléctricos para la Prospección de Agua Subterránea, ediciones de la Universidad de Buenos Aires, Argentina 2008.
- ✓ Chunga S., Prospección Geofísica Métodos, ediciones de la Universidad de Ingeniería (UNI), Perú 2010.
- ✓ Gil J., Recursos Hidrogeológicos, ediciones Instituto de Ciencias de la Tierra, España 2010.
- ✓ Ordoñez J., Aguas Subterráneas- Acuíferos, Sociedad Geográfica de Lima, Perú 2011.
- ✓ Estrada L., Apuntes de Prospección Geoeléctrica, ediciones de la Universidad de Tucumán, Argentina 2012.
- ✓ Collazo M. & Montaña J., Manual de Aguas Subterráneas, ediciones del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Uruguay 2012.
- ✓ Otero A., (2012), Estudio Realizado para Establecer la Existencia de Recursos de Agua en el Subsuelo. Municipalidad de la Mesa (Cundinamarca)-Colombia.

HEMEROGRAFIA

- ✓ Cárdenas J., Galvis E, (2011), Manual para la Interpretación del Perfil de Resistividad, Obtenido al Realizar el Estudio de la Resistividad del suelo a partir de las Configuraciones del Método de Wenner, tesis para optar el título de Tecnólogo Eléctrico, Universidad Tecnológica de Pereira.
- ✓ Eduardo D., (2011), Exploración Geotecnia- Relaciones Geoeléctricas, tesis para optar el grado de maestría en ingeniería geotecnia, universidad nacional de Colombia.
- ✓ Muñoz A., (2011), Exploración de Aguas Termales Usando Métodos Eléctricos Resistivos de Prospección Geofísica: Termas de Menetúe y Pellaifa, Universidad de Concepción-Chile.
- ✓ Sendrós A., (2012), Aplicación de Parámetros Geoeléctricos en el Estudio de las Aguas Subterráneas (Cuenca de Valls, Tarragona), tesis para optar el grado de maestría en Agua, Análisis Interdisciplinario y Gestión Sostenible, Universidad de Barcelona.
- ✓ Duran J., (2012), Aplicación de las Ecuaciones de Maxwell en el Dominio de la Frecuencia al Análisis Electromagnético de un Medio Rocoso, tesis para optar el grado de Físico, Universidad Nacional de Colombia.
- ✓ Cosenza A., (2016), El sondeo eléctrico vertical como metodología geofísica en el estudio de capas acuíferas en la finca El Baúl, Santa Lucia de Cotzumalguapa. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- ✓ Silva L. &Mendoza J., (2014), Modelación Geoeléctrica del Subsuelo con Medidas de Resistividad Aparente, tesis para optar el grado de Licenciado en Física, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

LINCOGRAFIA

- ✓ <http://catedras.fcaglp.unlp.edu.ar/geofisica/metodos-electricos-de-prospeccion/teoria-1/practica-del-sev>
- ✓ <http://www.pnuma.org/agua-miaac/CODIA%20HIDROGEOLOGIA/MATERIAL%20ADICIONAL/PONENCIAS%20HIDROGEOLOGIA/PONENTES/TEMA%206%20Geofisica/METODOS%20ELECTRICOS.pdf>
- ✓ <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:HHvqLRTUloEJ:www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/145/A5.pdf%3Fsequence%3D5+%&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=pe>
- ✓ <http://hidrologia.usal.es/temas/SEV.pdf>
- ✓ http://geophys.geol.msu.ru/Basic_IP2_Win_Tutorial.pdf
- ✓ <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7p.html>
- ✓ http://www.geofisica.cl/English/pics6/Introduccion_a_la_Geofisica.pdf
- ✓ <http://www.monografias.com>

CAPITULO VII

ANEXOS

7 ANEXOS

ANEXO A PRECIPITACIÓN EN EL CENTRO POBLADO EL VIRREY

Tabla A- 1: Record de precipitación desde el periodo 1998 - 2016

Año	Ene ro	Febre ro	Marz o	Abri l	Ma yo	Jun io	Jul io	Ago sto	Setiem bre	Octu bre	Novie mbre	Dicie mbre
1998	757.33	1,216.45	1,030.54	286.35	76.50	0.08	0.00	0.04	0.02	0.07	0.00	0.02
1999	8.16	212.72	65.21	43.61	11.07	0.91	0.01	0.02	1.51	0.01	0.70	3.76
2000	11.04	69.11	85.59	81.43	3.65	5.22	0.00	0.84	0.09	0.01	0.02	39.80
2001	51.33	65.88	538.90	43.04	3.74	0.36	0.03	0.00	0.22	1.03	2.82	1.43
2002	0.02	55.85	352.19	176.04	0.03	0.20	0.00	0.00	0.01	5.14	0.14	0.02
2003	10.14	32.11	0.14	0.02	4.32	0.02	0.00	0.01	0.04	0.03	0.01	3.01
2004	2.33	0.08	0.81	4.13	0.03	0.01	0.00	0.00	0.02	8.68	0.03	9.91
2005	1.40	6.80	87.72	0.20	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	1.72	1.02	0.00
2006	0.46	205.70	120.66	2.32	0.01	0.03	1.02	0.00	0.02	0.02	0.84	4.83
2007	10.54	0.51	29.68	1.76	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	6.03	6.75	0.00
2015		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2016		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2016)

**ANEXO B:
VALORES DE LAS RESISTIVIDADES DE CAMPO O APARENTES
DE CADA SEV**

Tabla B- 1: Valores de resistividades promedio del SEV_A

Nº	AB/2	MN	K	pro_Ro_a_B	e%
1	1	0.4	7.54	625.35	0.42
2	1.47	0.4	16.66	748.49	2.71
3	2.15	0.4	35.99	567.43	1.71
4	3.16	0.4	78.11	501.57	6.56
5	4.64	0.4	168.78	248.85	1.05
6	6.81	0.4	363.92	161.81	0.04
7	10	0.4	785.08	121.34	0.89
8	10	2	155.51	173.93	0.22
9	12.12	0.4	1153	182.11	2.32
10	12.12	2	229.17	170.28	0.44
11	14.68	2	336.94	108.41	1.19
12	17.78	2	495	138.65	0.06
13	21.54	2	727.23	129.12	0.16
14	26.1	2	1068	127.18	2.11
15	46.42	6	1124	88.32	0.79
16	56.23	6	1651	88.61	0.91
17	68.13	6	2426	89.65	1.50
18	82.54	6	3562	104.64	5.66
19	100	6	5231	104.83	0.87
20	100	20	1555	108.32	0.31
21	121.2	6	7687	104.23	0.09
22	121.2	20	2292	108.53	0.02
23	146.8	6	11279	118.57	0.32
24	146.8	20	3369	120.86	0.07
25	177	20	4905	147.74	0.39
26	215.4	20	7272	137.88	0.86
27	215.4	40	3613	139.39	0.21
28	261	20	10685	247.45	3.24
29	261	40	5319	138.29	2.47
30	316.2	20	15689	150.14	2.12
31	316.2	40	7821	144.09	0.22
32	383.1	20	23038	184.23	1.25
33	383.1	40	11496	131.51	4.90
34	464.2	40	16892	119.94	5.52

Tabla B- 2: Valores de resistividades promedio del SEV_B

Nº	AB/2	MN	K	pro_Ro_a_B	e%
1	1	0.4	7.54	844.14	0.28
2	1.47	0.4	16.66	752.17	0.22
3	2.15	0.4	35.99	725.25	0.15
4	3.16	0.4	78.11	661.28	0.05
5	4.64	0.4	168.78	560.38	0.02
6	6.81	0.4	363.92	471.66	0.49
7	10	0.4	785.08	410.43	0.24
8	10	2	155.51	431.57	0.42
9	12.12	0.4	1153	385.33	0.23
10	12.12	2	229.17	395.32	0.11
11	14.68	2	336.94	361.77	0.01
12	17.78	2	495	330.53	0.05
13	21.54	2	727.23	301.87	0.09
14	26.1	2	1068	273.20	0.11
15	46.42	6	1124	235.67	1.20
16	56.23	6	1651	290.13	1.52
17	68.13	6	2426	239.81	0.10
18	82.54	6	3562	198.59	0.51
19	100	6	5231	167.98	0.00
20	100	20	1555	153.19	1.51
21	121.2	6	7687	144.88	1.47
22	121.2	20	2292	116.57	0.09
23	146.8	6	11279	112.85	0.05
24	146.8	20	3369	125.00	2.28
25	177	20	4905	140.25	0.96
26	215.4	20	7272	156.18	1.69
27	215.4	40	3613	112.29	1.88
28	261	20	10685	331.17	0.13
29	261	40	5319	241.59	0.93
30	316.2	20	15689	360.88	0.08
31	316.2	40	7821	191.28	1.83
32	383.1	20	23038	135.90	0.16
33	383.1	40	11496	112.15	1.58
34	464.2	40	16892	104.87	2.51

Tabla B- 3: Valores de resistividades promedio del SEV_C

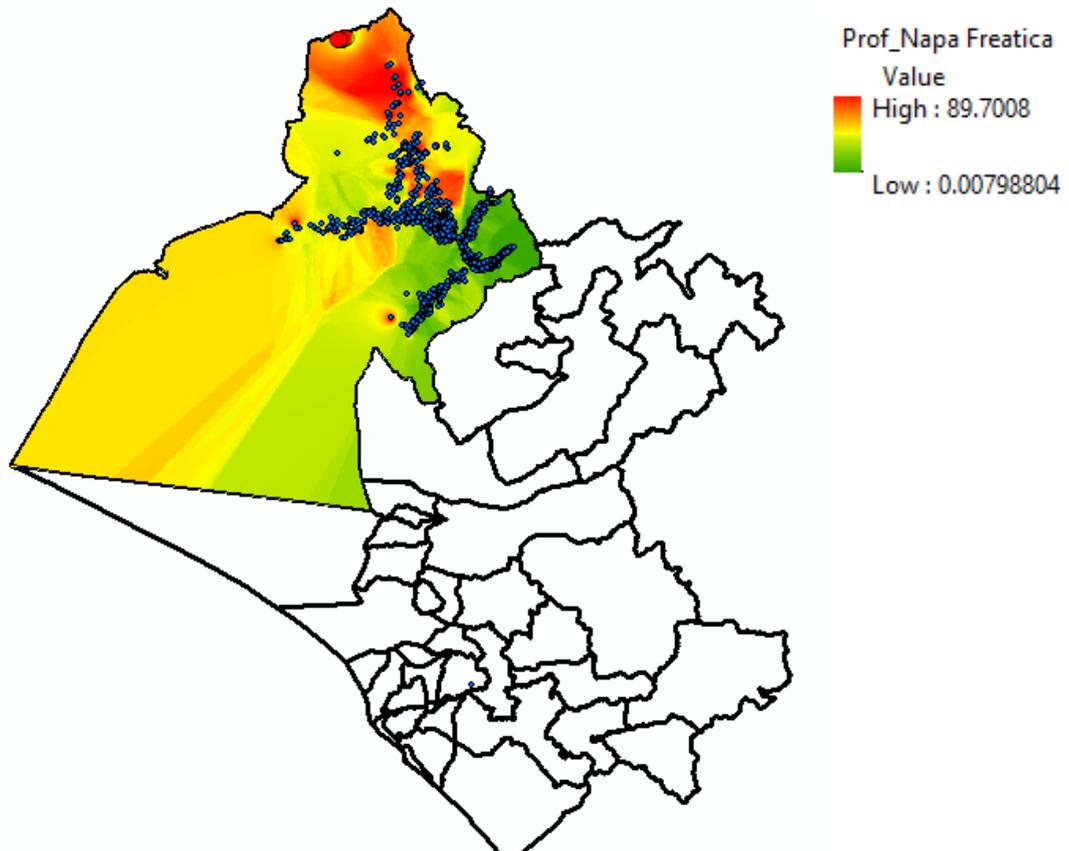
Nº	AB/2	MN	K	pro_Ro_a_C	e%
1	1	0.4	7.54	952.47	0.12
2	1.47	0.4	16.66	948.20	0.13
3	2.15	0.4	35.99	894.48	0.00
4	3.16	0.4	78.11	773.15	0.22
5	4.64	0.4	168.78	600.49	0.12
6	6.81	0.4	363.92	440.55	0.13
7	10	0.4	785.08	337.47	0.30
8	10	2	155.51	143.59	0.08
9	12.12	0.4	1153	326.42	0.96
10	12.12	2	229.17	324.88	0.16
11	14.68	2	336.94	308.29	0.48
12	17.78	2	495	287.85	1.42
13	21.54	2	727.23	271.34	0.22
14	26.1	2	1068	372.65	3.49
15	46.42	6	1124	192.91	0.71
16	56.23	6	1651	159.18	0.58
17	68.13	6	2426	125.25	0.43
18	82.54	6	3562	101.12	1.57
19	100	6	5231	74.06	2.13
20	100	20	1555	82.81	0.54
21	121.2	6	7687	64.73	2.30
22	121.2	20	2292	70.27	0.51
23	146.8	6	11279	58.69	1.14
24	146.8	20	3369	64.88	1.34
25	177	20	4905	65.16	0.15
26	215.4	20	7272	71.73	0.32
27	215.4	40	3613	72.32	0.35
28	261	20	10685	93.53	0.03
29	261	40	5319	80.99	0.15
30	316.2	20	15689	78.72	0.04
31	316.2	40	7821	89.23	1.84
32	383.1	20	23038	145.63	6.25
33	383.1	40	11496	107.79	2.64
34	464.2	40	16892	176.68	2.44

Tabla B- 4: Valores de resistividades promedio del SEV_D

Nº	AB/2	MN	K	pro_Ro_a_D	e%
1	1	0.4	7.54	912.98	1.70
2	1.47	0.4	16.66	958.39	1.34
3	2.15	0.4	35.99	914.52	0.31
4	3.16	0.4	78.11	725.24	0.79
5	4.64	0.4	168.78	592.14	0.40
6	6.81	0.4	363.92	525.57	0.02
7	10	0.4	785.08	460.91	1.44
8	10	2	155.51	446.02	0.24
9	12.12	0.4	1153	411.34	0.29
10	12.12	2	229.17	409.77	0.07
11	14.68	2	336.94	394.13	0.12
12	17.78	2	495	336.86	0.62
13	21.54	2	727.23	325.34	0.06
14	26.1	2	1068	384.00	0.43
15	46.42	6	1124	200.34	0.06
16	56.23	6	1651	165.65	1.38
17	68.13	6	2426	152.55	1.30
18	82.54	6	3562	137.18	1.25
19	100	6	5231	124.29	1.27
20	100	20	1555	102.75	0.02
21	121.2	6	7687	141.87	5.18
22	121.2	20	2292	111.24	6.65
23	146.8	6	11279	123.47	0.97
24	146.8	20	3369	97.26	0.00
25	177	20	4905	101.44	2.10
26	215.4	20	7272	116.13	1.01
27	215.4	40	3613	108.23	3.33
28	261	20	10685	204.69	0.52
29	261	40	5319	136.40	1.12
30	316.2	20	15689	140.84	0.17
31	316.2	40	7821	151.30	0.73
32	383.1	20	23038	172.65	0.95
33	383.1	40	11496	117.31	1.91
34	464.2	40	16892	123.72	2.30

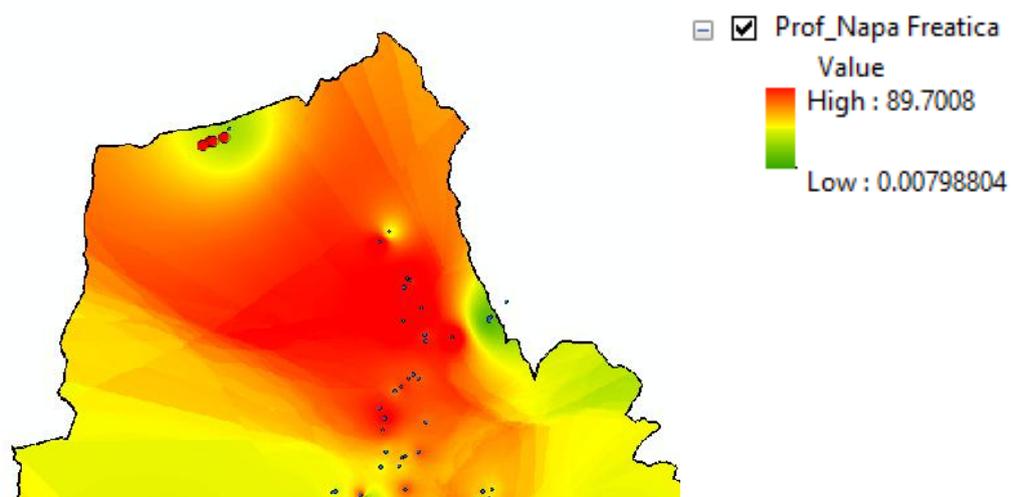
Anexo C: Mapa de la Región Lambayeque y el Distrito de Olmos.

Figura C- 1: Interpolación de la Profundidad que se Encuentran Acuíferos



Fuente: Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA)-Procesado en ARCMAP

Figura C- 2: Corte de la Sección de Estudio – Centro Poblado El Virrey- Olmos



Fuente: Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA)-Procesado en ARCMAP

Figura C- 3: Tabla de contenido ARCMAP. Muestra los nombres de los pozos en todo el Distrito de Olmos, la profundidad y localización

FID	Shape *	OID_	IRHS	NOMB_POZO	ESTE	NORTE	AÑO_PERF	TIP_PERF	PROF_ACTIV	DIAMETRO	ESTAD_POZ	USO	
0	Point	1	1	Antero Torres Maza	636420	9344830	1996	T.A	18.2	1.5	UTILIZABLE	20	
1	Point	2	2	Benjamin Torres Maza	636375	9344864	1984	T.A	20.2	1.6	UTILIZADO	AGRICOLA	20
2	Point	3	3	Asociación San Isidro	636112	9344943	1997	M.	0	1	UTILIZADO	AGRICOLA	20
3	Point	4	4	Francisco Masa Soplapuco	635940	9345402	1996	T.A	19.3	1.7	UTILIZADO	DOMESTICO	23
4	Point	5	5	Simón Benites Camacho	635870	9345496	1985	T.A	14.6	1.7	UTILIZABLE		23
5	Point	6	6	Abraham Orozco Cueva	635950	9345977	1987	T.	44	0.38	UTILIZABLE	AGRICOLA	24
6	Point	7	7	Juan Ramos Melchor	635846	9346470	2005	T.A	16.8	1.5	UTILIZABLE		24
7	Point	8	8	Miguel Cornejo Carrasco	636030	9346217	1985	T.A	22.3	1.5	UTILIZADO	AGRICOLA	24
8	Point	9	9	Gregorio Soplapuco Mio	635666	9345790	1985	T.A	18.1	1.6	UTILIZABLE		23
9	Point	10	10	Herederos More Puse	635110	9346415	1985	M.	36.5	1.5	UTILIZADO	AGRICOLA	23
10	Point	11	11	Silvia Vigil Ramos	633930	9347847	1985	T.A	22.7	1.5	UTILIZADO	AGRICOLA	14
11	Point	12	12	Pelagio Mío Chávez	633220	9348284	1985	M.	61.4	1.2	UTILIZADO	AGRICOLA	14
12	Point	13	13	Pelagio Mío Chávez	632993	9348756	1985	M.	64.6	1.2	UTILIZADO	AGRICOLA	14
13	Point	14	14	Pelagio Mío Chávez	632912	9348788	1985	T.A	7.1	1.5	UTILIZABLE		14
14	Point	15	15	Noria Comunal - La Estancia Grande	632677	9347940	1985	T.A	24.3	1.6	UTILIZADO	DOMESTICO	12
15	Point	16	16	Saturdino Maco Torres	637016	9344726	1985	T.A	12.3	1.7	UTILIZADO	DOMESTICO	20
16	Point	17	17	Valentín Torres Soplapuco	636240	9345030	1985	T.A	21.6	1.7	UTILIZABLE		20
17	Point	18	18	Noria Comunal - Playa Cascajal	636243	9344767	1985	T.A	17.5	1.6	UTILIZABLE		20
18	Point	19	19	Segundo Serrato Mío	635746	9344908	1985	M.	32	1.2	UTILIZADO	AGRICOLA	25
19	Point	20	20	Segundo Serrato Mío	635740	9344837	1985	T.A	23.5	1.7	UTILIZABLE		25
20	Point	21	21	Luis Odar Pacherez	635447	9344805	1985	T.	49	0.4	UTILIZADO	AGRICOLA	25
21	Point	22	22	Pedro Soplapuco Pupucho	635427	9344950	1985	M.	30	1.2	UTILIZADO	AGRICOLA	25
22	Point	23	23	Simeón Benites Eloreaga	635406	9345264	1985	M.	37.3	1.2	UTILIZADO	AGRICOLA	26
23	Point	24	24	Cristina Soplapuco Chuzón	635136	9344927	1985	T.A	24	1.7	UTILIZADO	AGRICOLA	26

Fuente: Instituto Nacional de Recursos Naturales (INRENA)-Procesado en ARCMAP