

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA HIDRÁULICA



TESIS

**“EXPLORACIÓN GEOFÍSICA DE AGUA SUBTERRÁNEA UTILIZANDO
EL MÉTODO SÍSMICO PARA SU APROVECHAMIENTO EN EL FUNDO
TARTAR UNC, 2022”**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO HIDRÁULICO

AUTOR:

Bach. WENER ESPINOZA PEREYRA

ASESOR:

Dr. Ing. GASPAR VIRILO MÉNDEZ CRUZ

CAJAMARCA – PERÚ

2024

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. Investigador: **Bach. WENER ESPINOZA PEREYRA**
DNI: **47130489**
Escuela Profesional: **INGENIERÍA HIDRÁULICA**
2. Asesor: **Dr. Ing. GÁSPAR VIRILO MÉNDEZ CRUZ**
Facultad: **Ingeniería**
3. Grado académico o título profesional
 Bachiller Título profesional Segunda especialidad
 Maestro Doctor
4. Tipo de Investigación:
 Tesis Trabajo de investigación Trabajo de suficiencia profesional
 Trabajo académico
5. Título de Trabajo de Investigación: **EXPLORACIÓN GEOFÍSICA DE AGUA SUBTERRÁNEA UTILIZANDO EL MÉTODO SÍSMICO PARA SU APROVECHAMIENTO EN EL FUNDO TARTAR UNC, 2022**
6. Fecha de evaluación: **12/03/2024**
7. Software antiplagio: **TURNITIN** **URKUND (OURIGINAL) (*)**
8. Porcentaje de Informe de Similitud: **19%**
9. Código Documento: **oid: 3117:339380480**
10. Resultado de la Evaluación de Similitud:
 APROBADO **PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO**

Fecha Emisión: **12/03/2024**



FIRMA DEL ASESOR
Dr. Ing. GÁSPAR VIRILO MÉNDEZ CRUZ

DNI: 26631950



Firmado digitalmente por:
FERNANDEZ LEON Yvonne
Katherine FAU 20148258801 soft
Motivo: Soy el autor del
documento
Fecha: 13/03/2024 21:37:52-0500

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios, por permitirme lograr uno de mis más grandes objetivos en esta vida, a mi madre por ser mi ayuda incondicional en el desarrollo de esta investigación y a todas las personas que me ayudaron me motivaron e inspiraron en todo momento para lograr el resultado final.

Asimismo, quiero agradecer a todos los docentes de la escuela profesional de ingeniería hidráulica quienes compartieron día a día sus conocimientos y experiencias a lo largo de nuestra formación académica. En especial quiero agradecer a mi asesor Dr. Ing. Gaspar Virilo Méndez Cruz por su tiempo, paciencia y recomendaciones para el desarrollo de esta investigación.

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a mi madre quien con mucho esfuerzo y dedicación siempre me apoyo en toda mi vida estudiantil, me brindo consejos, confianza, paciencia y motivación para lograr cada una de mis metas.

A las hermosas personas que estaban junto a mi dándome ánimo para lograr mi sueño y que me enseñaron que todo se puede. Que Dios me los bendiga.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
ÍNDICE GENERAL	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.1.1. Contextualización	2
1.1.2. Descripción del problema.....	2
1.1.3. Formulación del problema.....	3
1.2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.2.1. Justificación Científica	3
1.2.2. Justificación Técnico – Práctica	4
1.2.3. Justificación Institucional y Personal	4
1.3. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.4. LIMITACIONES	5
1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	6
1.5.1. Objetivo general	6
1.5.2. Objetivos específicos.....	6
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	7
2.1.1 Nacionales	7
2.1.2 Locales	7
2.2 BASES TEÓRICAS	8
2.2.1 Hidrogeología	8
2.2.2 Métodos para medir el nivel freático	21
2.2.3 Geología.....	42
2.2.4 Aguas Subterráneas para uso Agrícola y Ganadero.....	44
CAPITULO III. MATERIALES Y MÉTODOS	47
3.1 UBICACIÓN.....	47
3.2 TIEMPO EN LA QUE SE REALIZÓ LA INVESTIGACIÓN	51
3.3 MATERIALES.....	52
3.3.1 Equipos y materiales utilizados en la investigación:	52

3.4 FASE PRELIMINAR DE LA INVESTIGACIÓN	53
3.5 METODOLOGÍA DE TRABAJO	54
3.5.1 Recopilación de información cartográfica y topográfica del área de estudio.....	55
3.5.2 Caracterización agropecuaria, geológica y geotécnica.....	56
3.5.3 Estimación del requerimiento de agua en el fundo Tartar.....	62
3.5.4 Construcción y calibración del sistema de adquisición de datos.....	67
3.5.5 Exploración sísmica	75
CAPITULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	89
4.1 RESULTADOS	89
4.1.1 Requerimiento de agua	89
4.1.2 Prueba de bombeo.....	89
4.1.3 Refracción sísmica: análisis de velocidades y profundidades.	90
4.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS	98
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	100
5.1 CONCLUSIONES.....	100
5.2 RECOMENDACIONES	101
CAPITULO VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
6.1 BIBLIOGRAFÍA.....	102
6.2 LINKOGRAFÍA.....	104
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Inventario de agua en o cerca de la superficie de la Tierra.	9
Tabla 2: Requerimiento de agua para ganado vacuno.	46
Tabla 3: Información climática resumida y cálculo de la evapotranspiración potencial	62
Tabla 4: Distribución de áreas en el fundo Tartar	63
Tabla 5: Calculo del (Kc) promedio mensual para los cultivos en el fundo Tartar	63
Tabla 6: Calculo de la persistencia al 75% de precipitaciones usando Weibull.....	64
Tabla 7: Precipitación al 75% de persistencia	65
Tabla 8: Cédula de cultivo y dotación de agua (Área=29.45 Ha)	66
Tabla 9: Sondeos de calibración en los pozos 1 y2	73
Tabla 10: Resultados obtenidos de la curva tiempo vs distancia.....	84
Tabla 11: Profundidades del nivel freático en el fundo tartar.....	85
Tabla 12: Parametros estadísticos de los datos obtenidos de los ensayos en el fundo tartar..	87
Tabla 13: Requerimiento de agua en el fundo tartar.....	89
Tabla 14: Prueba de bombeo con motobomba con un caudal de 0.643 l/s (12/09/2023).....	89
Tabla 15: Clasificación de los suelos geotécnicamente en función de las velocidades de ondas	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: El ciclo hidrológico.....	9
Figura 2: Acuíferos y pozos.....	10
Figura 3: Tipos de Acuíferos: Acuífero cautivo, confinado o a presión y Acuífero libre, no confinado o freático.	11
Figura 4: Acuífero libre, está en contacto con la atmosfera.	12
Figura 6: Acuífero semiconfinado no existe flujo entre acuíferos.	13
Figura 7: Acuífero colgado formado por encima del nivel freático principal en una capa de menor permeabilidad en la zona no saturada.	14
Figura 8: Aparato permeámetro para determinación de la conductividad hidráulica de material poroso saturado usando la Ley de Darcy.	17
Figura 9: Enfoque macroscópico (darciano) para el análisis del flujo de agua subterránea contrastado con el verdadero comportamiento microscópico de caminos de flujo tortuosos.....	18
Figura 10: A, B y C es una línea de flujo.	19
Figura 11: Superficies equipotenciales bajo una ladera y el correspondiente perfil con red de flujo.....	20
Figura 12: Sección de la red de flujo de un acuífero isotrópico y homogéneo.	20
Figura 13: Periodo (T) de una onda.....	23
Figura 14: Frecuencia, se muestran tres ondas con diferente frecuencia para el mismo intervalo de tiempo.....	24
Figura 15: Amplitud de una onda senoidal, refleja la intensidad de una señal.	24
Figura 16: Longitud de onda, se muestra tres diferentes ondas con la misma frecuencia, pero de diferente amplitud.	25
Figura 18: Gráfica del número de operaciones contra tamaño de la muestra de la TDF estándar y la FFT.....	29
Figura 19: Diagrama de cálculo de la descomposición completa de una FFT de 8 puntos...30	
Figura 20: Una red mariposa que representa el cálculo fundamental de una FFT.	31

Figura 21: Grafica de un filtro rechaza bandas.....	32
Figura 22: (a) Movimiento de partículas de ondas de compresión (ondas P), (b) movimiento de partículas de ondas de corte (ondas S).....	27
Figura 23: Esquema de ensayo de refracción sísmica.	33
Figura 24: Diagrama esquemático de la ley de refracción.	34
Figura 25: Esquema del modo de operación de la refracción sísmica.....	34
Figura 26: Sismograma obtenido al efectuar un tendido de 24 geófonos con un tiempo total de registro de 0.1 s.....	36
Figura 27: Trayectorias de las ondas refractadas.....	36
Figura 28: Grafico de tiempo vs distancia de onda directa y refractada.	37
Figura 29: Modelo de cuatro capas horizontales y su curva tiempo vs distancia.....	38
Figura 30: Unidad acondicionadora de señal, encargada de amplificar las señales provenientes de los geófonos.	40
Figura 31: Geófono vertical de 4.5 Hz.	41
Figura 32: Respuesta de frecuencia de geófono simulada de 4,5 Hz con un factor de amortiguación de 0,56.	42
Figura 33: Mapa de Ubicación Política	47
Figura 34: Mapa de Ubicación Administrativa	48
Figura 35: Mapa de ubicación Hidrográfica.....	49
Figura 36: Mapa de ubicación de la zona de estudio.....	50
Figura 37: Fundo Tartar-UNC.....	52
Figura 38: Diagrama de flujo de la metodología de trabajo	54
Figura 39: Levantamiento topográfico con GPS (06/05/2023)	55
Figura 40: Topografía del Fundo Tartar-UNC, zona de pozos artesanales.....	56
Figura 41: Caracterización agropecuaria del fundo tartar (06/05/2023)	57
Figura 42: Plano de uso de suelos en el fundo Tartar-UNC.....	57
Figura 43: Plano geológico del fundo tartar	59

Figura 44: Perfil geotécnico del ensayo en el estudio de mecánica de suelos del nuevo coliseo de Cajamarca.....	61
Figura 45: Esquema de bloques del Sistema de adquisición de señales sísmicas.....	68
Figura 46: PCB del sistema de adquisición de señales sísmicas	69
Figura 47: Equipo utilizado para la adquisición de información sísmica (10/07/2023).....	70
Figura 48: Calibración del equipo de adquisición de información sísmica mediante osciloscopio (25/06/2023).....	71
Figura 49: Toma de medidas del nivel freático en el fondo Tartar (16/08/2023)	72
Figura 51: Prueba de bombeo, izquierda motobomba de 2.2 lt/s, derecha tomando las medidas del nivel freático.(01/08/2023).....	75
Figura 52: Mapa de distribución de los perfiles longitudinales y transversales.....	76
Figura 53: Sondeos sísmicos en los perfiles del fondo Tartar (12/08/2023).....	77
Figura 54: Datos sin procesamiento, cada geófono está a 4 m de equidistancia.	78
Figura 55: Señal con ajuste de amplitud y centrado en cero.	79
Figura 56: Señal ajustada en amplitud y tiempo con una frecuencia de muestreo de 295 Hz.	80
Figura 57: Señal sísmica transformada al dominio de la frecuencia	80
Figura 58: En la parte superior se observa la señal sin filtro y en la parte inferior filtrada. .	81
Figura 59: Señal preprocesada lista para la obtención de la curva tiempo vs. Distancia.	82
Figura 60: Registro de datos con cuatro geófonos (canales) y señal de disparo (trigger).	83
Figura 61: Curva de tiempo (eje y) en milisegundos y distancia (eje x) en metros	84
Figura 62: Perfil del nivel freático donde se representa los estratos y sus velocidades respectivas.....	87
Figura 63: Plano de isopiezas y dirección de flujo - Zona de establos y pozos	88
Figura 64: Nos muestra el perfil transversal 1, con sus estratos determinados.	91
Figura 65: Perfil transversal 2, con sus dos estratos y velocidades	92
Figura 66: Perfil transversal 3, con sus respectivos estratos.....	93

Figura 67: Perfil transversal 4, velocidades menores a 180 m/s para el estrato 1	93
Figura 68: Perfil transversal 5, con sus dos estratos.....	94
Figura 69: Perfil transversal 6.	95
Figura 70: Perfil longitudinal 01, velocidades de onda variable des 96.1 m/s a 196.4 m/s ..	96
Figura 71: Sección longitudinal 2 con dos horizontes, velocidades de 107.63 m/s a 219.48 m/s	96
Figura 72: Perfil longitudinal 3	97
Figura 73: Perfil longitudinal 4, velocidades de 108.01 m/s a 345.20 m/s	98

RESUMEN

La finalidad de esta investigación fue estimar la profundidad del nivel freático mediante el método de refracción sísmica en el fundo Tartar. La recolección de datos se realizó durante la época de estiaje, entre los meses de junio y octubre de 2023. Para lograr este propósito, se diseñó y construyó el equipo necesario, que incluyó la instalación de geófonos y una unidad de almacenamiento de datos.

Se llevó a cabo la caracterización agropecuaria, geológica y geotécnica, junto con el levantamiento topográfico del área de estudio. Se ubicaron pozos de calibración (pozo 1 y pozo 2) y puntos de sondeo en toda el área, totalizando veinte puntos. Los sondeos se realizaron con diferentes distancias entre geófonos (3 m, 4 m y 5 m). Posteriormente, se realizó un procesamiento de datos utilizando software Matlab, que incluyó la aplicación de la transformada rápida de Fourier, filtros de rechazo de bandas y suavizado de curvas. Lo que permitió calcular las profundidades desde la superficie del terreno hasta el nivel freático. Los datos de calibración en los pozos revelaron que el nivel freático se encuentra en el primer estrato, a una profundidad aproximada de 2.41 m para el pozo 1 y 2.71 m para el pozo 2. Las mediciones directas con wincha arrojaron valores de 2.43 m para el pozo 1 y 2.65 m para el pozo 2. Las diferencias entre las mediciones directas y las obtenidas mediante refracción sísmica fueron de solo 2 cm para el pozo 1 y 6 cm para el pozo 2 que es el 0.82 % y 2.64% respectivamente.

finalmente se estima que la profundidad máxima del nivel freático desde la superficie terrestre es de 3.51 m, con una profundidad mínima de 2.03 m y un promedio de 2.66 m. Se generó un plano de isopiezas y dirección de flujo, donde se observó que el flujo de agua se dirige hacia los ríos Mashcon y Chonta.

Palabras clave:

Refracción sísmica, es un método que utiliza ondas sísmicas para investigar la estructura geológica, geotécnica e hidrológica subterránea de la tierra.

Estudio Geofísico, es la aplicación de principios físicos para investigar la composición de la Tierra, como la sísmica, la gravimetría, la magnetometría entre otros.

Geófonos, son dispositivos para detectar ondas sísmicas.

Sondeos, son actividades de exploración para obtener información sobre la tierra.

Trigger, es una señal que inicia un proceso en un sistema.

Isopiezas, representan el nivel freático o nivel piezométrico del agua subterránea.

ABSTRACT

The purpose of this research was to estimate the depth of the water table using the seismic refraction method in the Tartar farm. Data collection took place during the dry season, between June and October 2023. To achieve this goal, the necessary equipment was designed and built, including the installation of geophones and a data storage unit.

Agricultural, geological, and geotechnical characterization, along with topographic surveying of the study area, were conducted. Calibration wells (well 1 and well 2) and survey points were located throughout the area, totaling twenty points. Surveys were conducted with different distances between geophones (3 m, 4 m, and 5 m). Subsequently, data processing was performed using Matlab software, which included the application of fast Fourier transform, band rejection filters, and curve smoothing. This allowed for the calculation of depths from the ground surface to the water table. Calibration data in the wells revealed that the water table is located in the first stratum, at an approximate depth of 2.41 m for well 1 and 2.71 m for well 2. Direct measurements with a tape measure yielded values of 2.43 m for well 1 and 2.65 m for well 2. The differences between direct measurements and those obtained by seismic refraction were only 2 cm for well 1 and 6 cm for well 2, which is 0.82% and 2.64%, respectively.

Finally, it is estimated that the maximum depth of the water table from the land surface is 3.51 m, with a minimum depth of 2.03 m and an average of 2.66 m. A contour map and flow direction were generated, showing that the water flow is directed towards the Mashcon and Chonta rivers.

Keywords:

Seismic Refraction, a method that uses seismic waves to investigate the underground geological, geotechnical, and hydrological structure of the earth.

Geophysical Study, the application of physical principles to investigate the composition of the Earth, such as seismic, gravimetric, and magnetometric methods, among others.

Geophones, devices used to detect seismic waves.

Surveys, exploration activities to obtain information about the Earth.

Trigger, a signal that initiates a process in a system.

Isopiezas, represent the water table or piezometric level of groundwater.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

El 97,5% del agua natural es agua salada en los océanos y algunos lagos. Solo el 2.5% restante del agua dulce se almacena en forma de vapor en las rocas, en casquetes polares y glaciares, ríos, lagos biomasa y en la atmosfera. El 30.1 % de ese 2.5 % se compone de agua subterránea. (Martines C, 2006).

Las aguas subterráneas tienen una importancia muy grande en la vida de los seres vivos y en la comunidad de la Nación, Importancia que con frecuencia no es apreciada o desconocida por la sociedad. (Sahuquillo, 2019).

Esto se debe que la el agua que consumimos se encuentra en la mayoría en la superficie, pero con el crecimiento poblacional ya no es suficiente por esta razón se recurre a métodos de exploración del agua subterránea.

Debido a su alta resolución y precisión, los métodos sísmicos de refracción son una alternativa viable para la exploración somera (decenas de metros) del subsuelo. La principal limitación de los estudios sísmicos someros es la velocidad de recopilación de datos en campo, que depende en gran medida del tipo de fuente sísmica utilizada. (Herrera, 2013).

Por otro lado, La utilización de caídas de peso o disparos de escopeta que no requieren excavaciones como en el caso de los explosivos ha llevado a la optimización de tiempo y menos trabajo al crear señales útiles a partir de impactos mecánicos y fuentes similares de baja energía mediante la correcta y sincronizada adición de impactos individuales. En ocasiones, el uso y traslado de equipos de caída de peso puede resultar difícil, especialmente en áreas accidentadas o con accesos limitados. Además, el precio de estas herramientas es alto. (Herrera, 2013).

La necesidad de encontrar nuevas fuentes de agua subterránea en el fondo tartar de la UNC para su aprovechamiento nos conlleva a aplicar técnicas de exploración indirecta que en la actualidad hay muchos en el campo de la geofísica de los cuales el método sísmico es uno de los más confiables y fáciles de aplicar ya que los datos obtenidos son de alta calidad y resolución.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.1. Contextualización

La situación del abastecimiento de agua en el Fundo Tartar de la Universidad Nacional de Cajamarca presenta diversas deficiencias. No cuenta con agua superficial para irrigar las 31.130 hectáreas en las que se cultivan pasto rye grass, hortalizas, alfalfa y papa, así como para el consumo ganadero. Estas actividades agropecuarias no pueden ser abastecidos adecuadamente mediante agua superficial. Para abordar esta problemática, se requiere disponer de agua apta para estos fines, la cual actualmente proviene de un pozo de agua subterránea. Sin embargo, este pozo no logra satisfacer las necesidades tanto para el consumo agropecuario. Por lo tanto, el estudio de sondeo de aguas subterráneas resulta fundamental para resolver esta deficiencia en el abastecimiento del recurso hídrico.

Por otro lado, la investigación tiene como objetivo servir como punto de partida para futuras investigaciones, utilizando la metodología desarrollada en este estudio.

1.1.2. Descripción del problema

Existen gran cantidad de terrenos fértiles, pero con una gran problemática en su mayoría, debido a la falta de agua para aprovechamiento. Por tal motivo, se buscan una serie de alternativas tales como: represas artificiales, reservorios, quebradas, lagunas, canales de irrigación entre otros y al no poder contar con estas soluciones se plantea inclusive ver la posibilidad de aprovechar el agua subterránea mediante una explotación adecuada.

La Universidad Nacional de Cajamarca dentro de sus propiedades tiene distintos fundos considerados como áreas productivas las cuales se encuentran sin abastecimiento de agua, estos terrenos no cuentan con irrigación todo el año ni tienen acceso a pozos ni ríos, este problema representa una gran pérdida de territorio aprovechable para la universidad.

Una de sus propiedades identificadas es el fundo tartar con una extensión de 31.130 Ha, ubicado en el distrito de Baños del Inca, provincia y departamento de Cajamarca. Siendo este un centro experimental para las carreras de Agronomía y Veterinaria cuyo terreno es muy fértil, pero sin abastecimiento de agua por lo cual el motivo de preocupación para las autoridades de la entidad y sobre todo para la carrera de Ingeniería Hidráulica es dar solución a este problema a fin de convertir el lugar en un terreno aprovechable para uso agrícola y ganadero.

A pesar de varios intentos de solución mediante canales de irrigación y otras alternativas de agua superficial, la problemática persiste. Además, es necesario abordar no solo la falta de información sobre las profundidades del nivel freático a lo largo del año, sino también comprender que estas profundidades varían debido a factores climatológicos, topográficos, geológicos y geotécnicos. Las precipitaciones varían significativamente a lo largo del año, lo que influye en el nivel freático: aumenta en épocas de abundantes precipitaciones y disminuye durante periodos de estiaje. Dado que la investigación se lleva a cabo en una época en la que el nivel freático estará más profundo en relación con el terreno, esta información es crucial para identificar las posibles ubicaciones de pozos a construir.

Por lo tanto, se propone realizar un estudio de investigación para determinar la profundidad del nivel freático en el Fundo Tartar y sugerir puntos estratégicos para la construcción de pozos, considerando estas variaciones. Se utilizará el método sísmico como herramienta para obtener información precisa sobre el nivel freático y así contribuir a la resolución del problema de abastecimiento de agua en el terreno.

1.1.3. Formulación del problema

¿Cuál es la profundidad del nivel freático de las aguas subterráneas en el Fundo Tartar para el aprovechamiento agropecuario?

1.2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1. Justificación Científica

La justificación científica de esta investigación radica en la necesidad de abordar la problemática de la falta de agua en terrenos fértiles, especialmente en el Fundo Tartar de la Universidad Nacional de Cajamarca. A pesar de varios intentos de solución, incluyendo alternativas de agua superficial, la problemática persiste debido a la falta de información sobre las profundidades del nivel freático y su variabilidad a lo largo del año. Dado que las precipitaciones afectan el nivel freático, es crucial comprender estas variaciones para identificar ubicaciones óptimas para la construcción de pozos. Por lo tanto, la investigación propuesta busca determinar la profundidad del nivel freático y sugerir puntos estratégicos para la construcción de pozos utilizando el método sísmico, con el objetivo de contribuir a resolver el problema de abastecimiento de agua en el Fundo Tartar.

1.2.2. Justificación Técnico – Práctica

La justificación técnico-práctica de esta investigación se fundamenta en la necesidad de encontrar soluciones prácticas y técnicas para abordar la falta de agua en el Fundo Tartar y otros terrenos fértiles similares. Dada la importancia de estos terrenos para la producción agrícola y ganadera, es fundamental desarrollar métodos precisos para determinar la profundidad del nivel freático y encontrar ubicaciones óptimas para la construcción de pozos. En este contexto, se propone utilizar el método sísmico como herramienta técnica para obtener información precisa sobre el nivel freático. Al identificar puntos estratégicos para la construcción de pozos, esta investigación tiene el potencial de proporcionar soluciones prácticas que mejoren el abastecimiento de agua en el Fundo Tartar y contribuyan al desarrollo agrícola y ganadero en la región.

1.2.3. Justificación Institucional y Personal

La justificación institucional y personal para esta investigación se basa en el compromiso de la Universidad Nacional de Cajamarca con el desarrollo integral de la región y la formación de profesionales capacitados en áreas clave como la ingeniería hidráulica y la agronomía. El Fundo Tartar, como centro experimental de la universidad, representa un activo importante para la investigación y la enseñanza en estas áreas. Abordar la problemática del abastecimiento de agua en el Fundo Tartar no solo beneficiará a la institución en términos de su capacidad para llevar a cabo investigaciones y proyectos agrícolas y ganaderos, sino que también contribuirá al desarrollo socioeconómico de la región al mejorar la productividad de estas tierras fértiles. Desde una perspectiva personal, esta investigación ofrece la oportunidad de contribuir al avance del conocimiento en el campo de la hidrología subterránea y de aplicar habilidades y conocimientos adquiridos en el ámbito académico en un contexto práctico y relevante. Además, la importancia de los métodos geofísicos, especialmente el método sísmico, radica en su capacidad para proporcionar información detallada y precisa sobre la estructura hidrogeológica y la distribución de los recursos hídricos subterráneos, lo que facilita la toma de decisiones en la gestión del agua y la planificación de proyectos de desarrollo.

1.3. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación se llevó a cabo en el Fundo Tartar de la Universidad Nacional de Cajamarca durante los años 2022 y 2023, con el objetivo de estimar el nivel freático. Para ello, se empleó el método sísmico indirecto de refracción, utilizando una masa de 20 lb como fuente

de vibración sísmica. Este método ha demostrado ser efectivo para obtener resultados precisos a profundidades de hasta 40 metros. En el área de estudio, el nivel freático se encuentra por encima de estas profundidades, se sabe esto por la presencia de pozos artesanales ubicados en el área de estudio. El propósito principal de la investigación fue abordar la falta de abastecimiento de agua en el Fundo Tartar, especialmente para uso agrícola y ganadero.

1.4. LIMITACIONES

Acceso restringido al área de estudio: La necesidad de obtener permisos escritos de las escuelas profesionales de agronomía y veterinaria para acceder al área de estudio ha generado retrasos y limitaciones en la investigación. La burocracia asociada con la obtención de estos permisos ha complicado el proceso y ha causado demoras significativas en el inicio y la ejecución del estudio.

Demoras en la materialización del equipo necesario: El diseño y análisis del circuito adaptador de señales y el convertidor analógico-digital se enfrentan a desafíos adicionales, ya que estos componentes deben ser ensamblados fuera del país. Esta dependencia de proveedores extranjeros ha resultado en demoras en la adquisición y puesta en funcionamiento del equipo, lo que ha afectado el progreso de la investigación.

La intensidad del golpe utilizado en el método sísmico debe ser lo suficientemente fuerte y preciso para evitar errores o lecturas nulas en el equipo de almacenamiento de información. Garantizar la precisión y la consistencia en la generación de señales sísmicas representa un desafío técnico adicional que debe abordarse para obtener resultados confiables y precisos.

Necesidad de más geófonos: Para lograr una mayor resolución de datos y una mejor interpretación de las curvas de tiempo versus distancia, se requiere un mayor número de geófonos. La limitación en la cantidad de geófonos disponibles ha afectado la calidad y la cantidad de datos recopilados durante el estudio, lo que dificulta la obtención de conclusiones claras y significativas.

1.5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Objetivo general

Estimar la profundidad del nivel freático del agua subterránea en el fundo Tartar de la Universidad Nacional de Cajamarca.

1.5.2. Objetivos específicos

- Recopilar información cartográfica de la zona de estudio.
- Caracterizar el fundo tartar desde el punto de vista agrícola y geológico
- Estimar el requerimiento actual de agua para uso agrícola y ganadero en el fundo tartar-UNC.
- Construir y calibrar el equipo sismógrafo para el registro de las vibraciones sísmicas.
- Aplicar el método sísmico utilizando técnicas de adquisición y procesamiento de datos sísmicos adecuadas al área de estudio.
- Interpretar los datos sísmicos para estimar la profundidad del nivel freático.

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1 Nacionales

(Cortez, 2020), en su tesis “Exploración geológica y geofísica para la búsqueda de recursos hídricos subterráneos en el caserío Guadarrema, Distrito de Motupe, Provincia y departamento de Lambayeque -Perú” llego a la conclusión que el área de estudio presenta básicamente una estructura geológica constituida por 04 capas que presentan continuidad horizontal. Entre estas capas destaca la denominada capa N°3, cuyos indicadores de resistividad y espesor son compatibles. La capa presenta una resistividad promedio de 112.04 ohm- m. y un espesor promedio de 35.83 m., y está saturada con agua de bajo grado de mineralización.

(Ticona, 2019) en su tesis “Características de los suelos del instituto geofísico de la UNSA, a través de metodologías sísmicas y eléctricas” Para el método de refracción sísmica, se utilizaron dos líneas paralelas y tres transversales, con geófonos a 14 Hz y una distancia de 3 metros entre ellos. El método MASW1D utilizó puntos de tiro de -20 m, -10 m, -5 m, +5 m, +10 m y +20 m al inicio y al final de cada línea sísmica, con geófonos de 4,5 Hz y un espaciamiento de 3 m. El método MASW2D utilizó geófonos de 4,5 Hz. Los resultados de los métodos sísmicos han demostrado que existen materiales en la superficie con velocidades de onda Vp de 300 m/s para la primera estructura, 1000 m/s para el segundo horizonte refractor y 2000 m/s para el tercer horizonte refractor, mientras que los métodos MASW1D y MASW2D reportan velocidades de onda Vs de 380 m/s para los primeros horizontes y aumentan en profundidad llegando hasta los 1000 m/s, relacionándolo con suelos muy compactos.

2.1.2 Locales

Dentro de estos estudios destaca la Exploración Geofísica Mediante el Método de Análisis Multicanal de Onda de Superficie (MASW) para llevar a cabo dicho estudio Se realizaron 21 líneas sísmicas de 53 m para la ejecución de ensayo MASW, acumulando un total de 1113 metros. el cual muestra la presencia de tres estratos. El primer estrato presenta valores de velocidad de propagación de ondas Vs entre 180 a 260 m/s, hasta una profundidad de 3.0 m, estratigráficamente este material correspondería a un suelo de cobertura conformado por material blando. El segundo estrato presenta valores de velocidad entre 200 a 370 m/s que

correspondería a un material arcilloso blando a medianamente compacto, hasta la profundidad de 10.0 m. El tercer estrato presenta velocidades Vs de 270 a 540 m/s que indicarían la existencia de un material arcilloso medianamente compacto. (Estudio de mecánica de suelos del nuevo coliseo de Cajamarca, 2008)

(Romero, 2019) en su tesis determino la resistividad eléctrica de los estratos geológicos y el planteamiento de exploración de aguas subterráneas en el fundo la victoria propiedad de la Universidad Nacional de Cajamarca” aplicando para ello la prospección geofísica (Sondeos Eléctricos Verticales). De los resultados se ha obtenido que la resistividad del suelo varía en el rango $(5.21-126.33)\Omega-m$, tratándose de suelos arcillosos, limosos, arenosos, gravosos y la combinación de ellos, el nivel freático se encuentra a una profundidad que varía desde los 1.05 m hasta los 5.28 m, llegó a la conclusión que estamos frente a un acuífero libre del cual podemos extraer agua en cantidad suficiente para abastecer al Fundo La Victoria; también encontramos un acuitardo, es decir un horizonte formado por arcillas saturadas. Para la explotación del agua subterránea se ubicaron 2 puntos donde sería más favorable la perforación de pozos tubulares para la extracción de agua subterránea.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 Hidrogeología

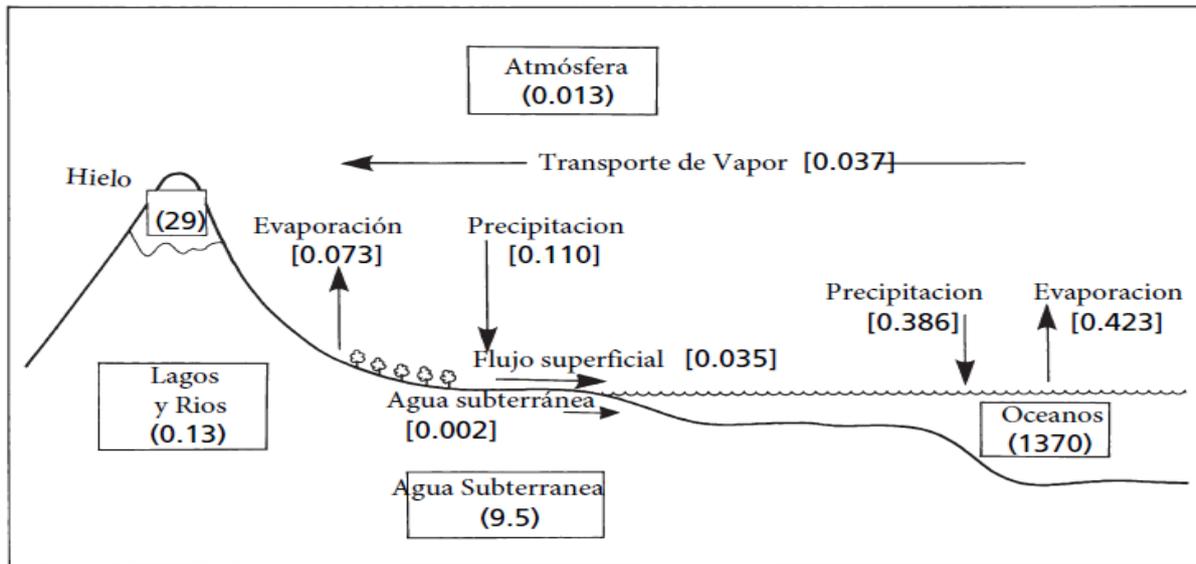
La hidrogeología es una rama de la geología aplicada a la geodinámica externa que estudia las aguas subterráneas en términos de su origen, circulación, acondicionamiento geológico e interacción con suelos, rocas y humedales (producción de vapor de agua). su estado (líquido, sólido, gaseoso) y sus propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas, radiactivas) y su absorción (Mijailov, 1985).

2.2.1.1 El ciclo hidrológico

Un buen punto de partida para promover un enfoque integral en la conexión entre las aguas subterráneas y superficiales es adoptar el ciclo hidrológico como un marco fundamental. El ciclo hidrológico, representado en la **Figura 1**, puede ser visto como el constante movimiento del agua en la cercanía de la superficie terrestre, desde los océanos hasta la atmósfera, y luego de nuevo hacia los océanos a través de procesos como la evaporación solar que calienta el océano, convirtiendo el agua en vapor que se eleva a la atmósfera y es transportado por los vientos hacia las áreas continentales, donde se condensa y cae como

precipitación. Esta precipitación puede retornar directamente a los océanos, ser interceptada por áreas con vegetación y devuelta a la atmósfera mediante la evapotranspiración, recolectarse para formar escorrentía superficial, o infiltrarse en el suelo y las rocas subyacentes para convertirse en agua subterránea. (Hiscock B, 2014)

Figura 1: El ciclo hidrológico.



Fuente: (Hiscock B, 2014)

De acuerdo con la **Tabla 1**, del total el agua en el ciclo global, la gran mayoría (97.25%) se encuentra en los océanos como agua salada. Solo un pequeño porcentaje (2.75%) está distribuido en la tierra y la atmósfera. De esta fracción, los casquetes polares, glaciares y agua subterránea representan la mayor parte. Las aguas subterráneas son especialmente importantes y constituyen casi el 98% del agua terrestre disponible en áreas terrestres. En el ciclo del agua, la evaporación debe igualar la precipitación a nivel global, pero esto no ocurre en todas las regiones. Las diferencias incluyen el transporte de agua desde los océanos hacia la tierra en forma de vapor de agua atmosférico y su retorno a los océanos a través de ríos, además de una pequeña cantidad de agua subterránea que fluye directamente hacia los océanos (alrededor del 6%). (Zektser I, 1993).

Tabla 1: Inventario de agua en o cerca de la superficie de la Tierra.

Reservorio	Volumen (x10 ⁶ km ³)	Porcentaje del total
Océanos	1370	97.25
Casquetes polares y glaciares	29	2.05

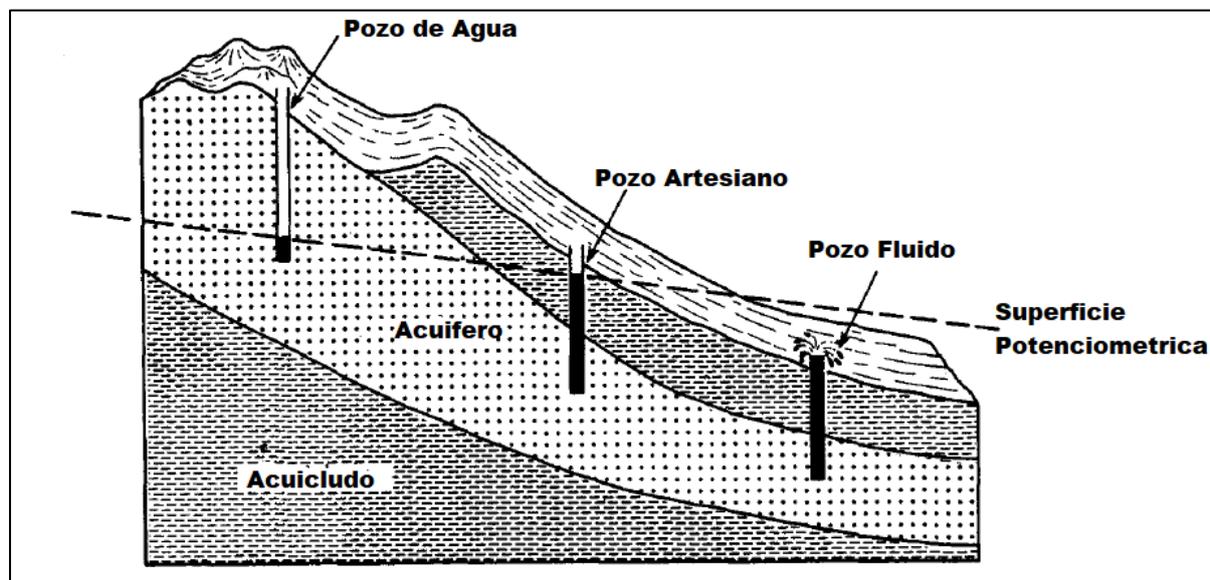
Agua subterránea profunda	5.3	0.38
Agua subterránea poco profunda	4.2	0.3
Lagos	0.125	0.01
Humedad del suelo	0.065	0.005
Ambiente	0.013	0.001
Ríos	0.0017	0.0001
Biosfera	0.0006	0.00004
Total	1408.7	100

Fuente: (Hiscock B, 2014)

2.2.1.2 Acuíferos

Un acuífero se refiere a una estructura geológica capaz de almacenar y conducir agua a una velocidad suficientemente rápida y efectiva como para abastecer pozos. Estos acuíferos pueden estar compuestos por diversos tipos de rocas, como arenas, gravas, areniscas, calizas, dolomitas, basalto, así como rocas plutónicas y metamórficas fracturadas. A veces, las capas que confinan el agua se subdividen en acuitardos, que son capas de baja permeabilidad que retienen y transmiten agua lentamente, y acuífugos, que son completamente impermeables.

Figura 2: Acuíferos y pozos.



Fuente: (Fetter, 2001)

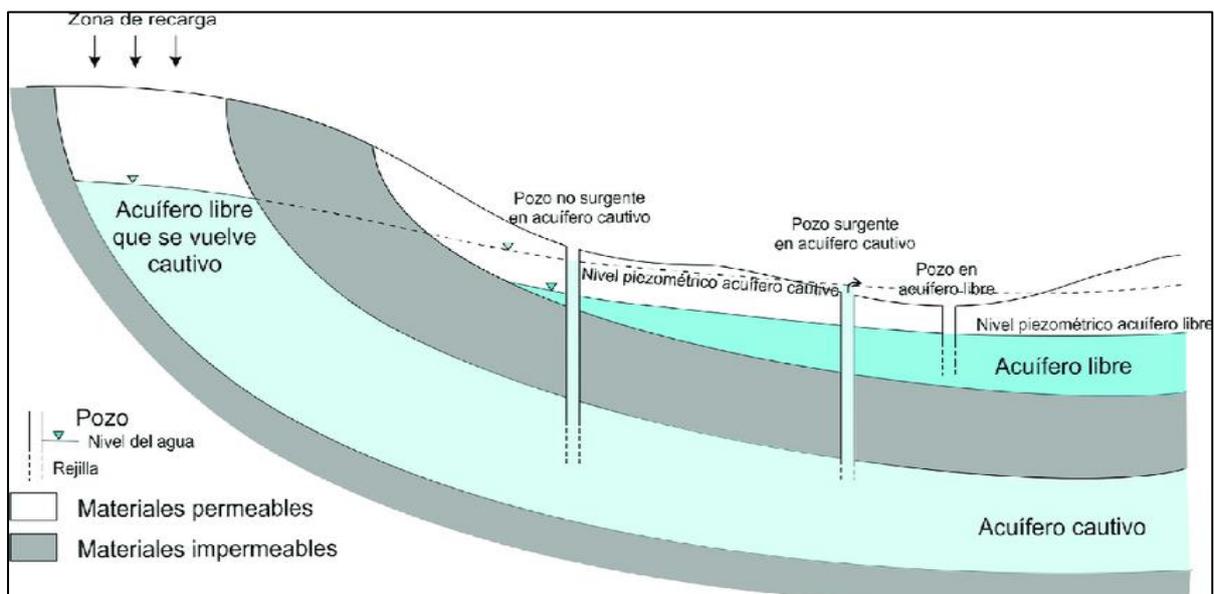
Actualmente, la mayoría de los expertos utilizan los términos "capa de confinamiento" y "capa de confinamiento con fugas" en lugar de acuitardos y acuífugos. Los acuíferos pueden

encontrarse cerca de la superficie, conocidos como acuíferos de nivel freático, o más profundos, con capas de alta permeabilidad que se extienden desde la superficie hasta la base del acuífero. (Fetter, 2001)

2.2.1.3 Tipos de acuíferos

Las diversas formaciones geológicas presentan distintas características en cuanto a su porosidad y a su permeabilidad. Es así como unas tendrán una porosidad relativamente alta y a su vez permiten un fácil movimiento del agua, es el caso, por ejemplo, de los aluviones, las arenas, etc. De lo anterior, se pueden definir los siguientes conceptos, en la **Figura 3**, podemos observar los tipos de acuíferos.

Figura 3: Tipos de Acuíferos: Acuífero cautivo, confinado o a presión y Acuífero libre, no confinado o freático.



Fuente: (Cabrera C, 2013)

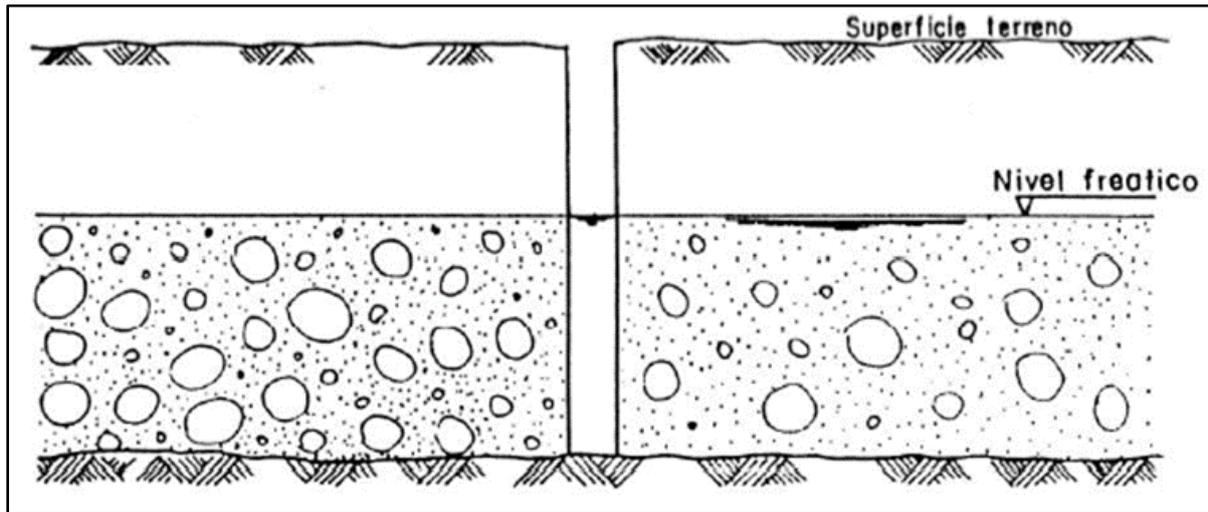
Los acuíferos pueden clasificarse de acuerdo con las condiciones de presión hidrostática a las que está sometida el agua almacenada por ellos, condiciones que varían según la posición estratigráfica de la formación. De esta manera, puede hablarse de los siguientes tipos:

1) Acuífero no confinado o libre

Según (Fetter, 2001), los acuíferos pueden estar cerca de la superficie terrestre, con capas continuas de materiales de alta permeabilidad intrínseca que se extienden desde la

superficie terrestre hasta la base del acuífero. Tal acuífero se denomina acuífero de nivel freático o acuífero no confinado. La recarga del acuífero se debe a la filtración hacia abajo a través de la zona no saturada **Figura 4**. La recarga también puede ocurrir a través del flujo lateral de agua subterránea o la filtración hacia arriba desde los estratos subyacentes.

Figura 4: Acuífero libre, está en contacto con la atmósfera.

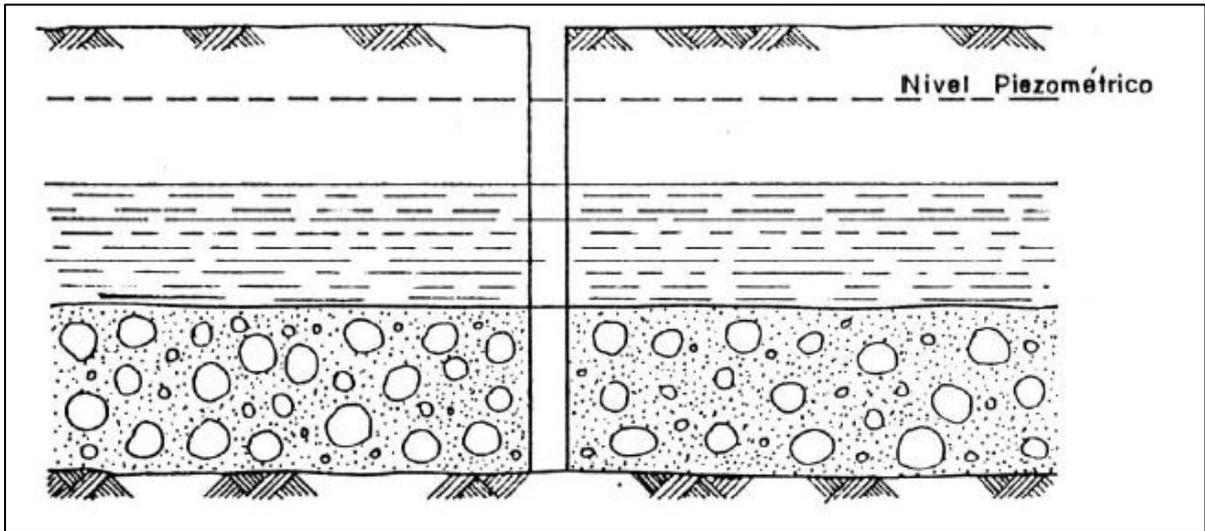


Fuente:(Vélez, 1999)

2) Acuífero confinado o artesianos

En estos acuíferos, el agua se encuentra bajo una presión superior a la atmosférica y son formaciones permeables que están delimitadas por capas impermeables, como se menciona en el estudio de (Vélez, 1999). Los acuíferos se recargan de dos formas: cuando emergen en ciertas áreas o por filtración lenta a través de una capa de confinamiento con fugas. Al perforar un pozo sellado herméticamente a través de esta capa, el agua puede elevarse por encima del acuífero, demostrando que está bajo presión (Fetter, 2001).

Figura 5: Acuífero confinado o artesiano: el nivel piezométrico está por encima del acuífero, ocurriendo un pozo artesiano fluyente.

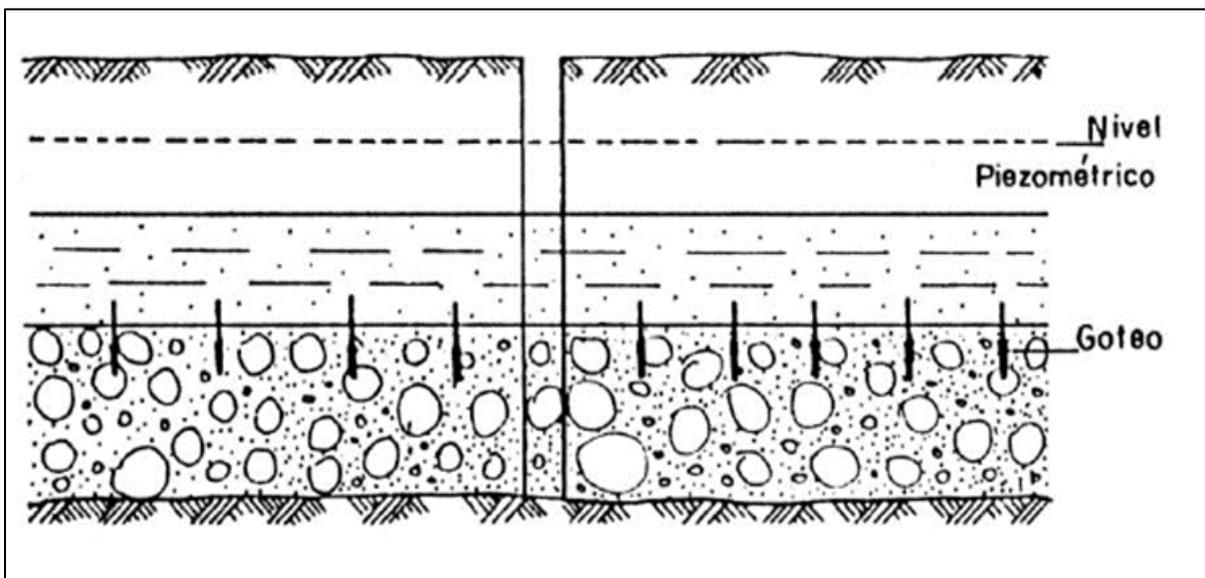


Fuente: (Vélez, 1999)

3) Acuífero semiconfinado

Son acuíferos que se encuentran completamente saturados de agua y están limitados ya sea por su base o por el techo, o por ambos, por una capa o formación semipermeable (acuitardo) (Vélez, 1999).

Figura 6: Acuífero semiconfinado no existe flujo entre acuíferos.

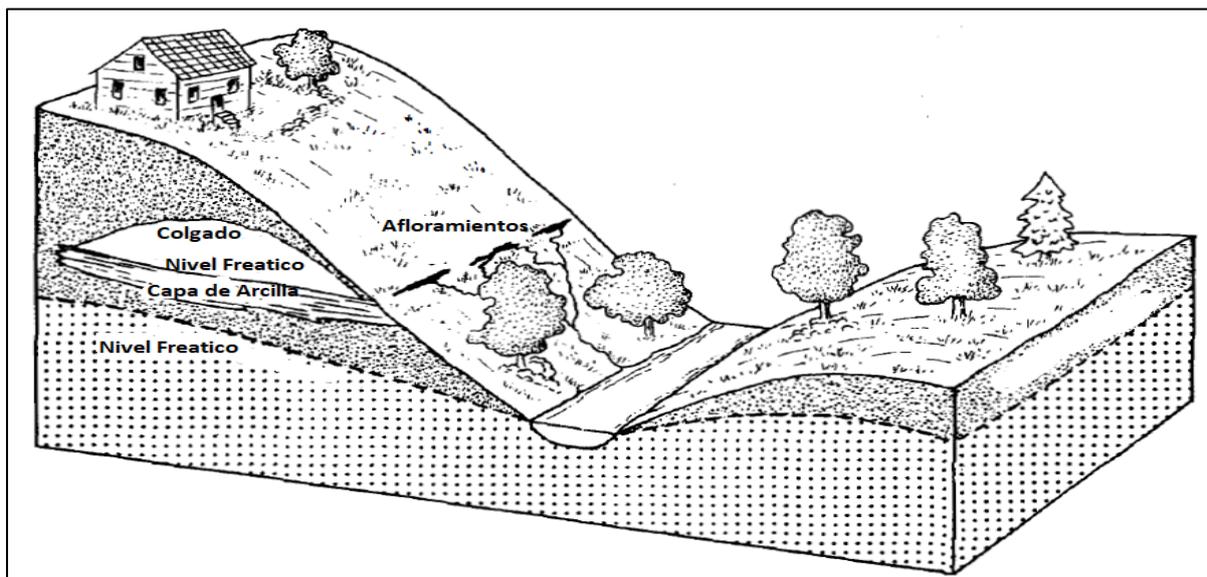


Fuente: (Vélez, 1999).

4) Acuífero colgado o suspendido

En algunos casos, una capa de material de baja permeabilidad se encontrará suspendido entre materiales más permeables. El agua que se mueve hacia abajo a través de la zona no saturada será interceptada por esta capa y se acumulará en la parte superior. Se formará una capa de suelo saturado sobre el nivel freático principal, denominado acuífero suspendido **Figura 7**. Estos acuíferos son comunes en áreas de deshielo glacial, donde se desarrollan capas de arcilla en antiguos lagos glaciares. Además, se encuentran en terrenos volcánicos, donde se pueden observar zonas de ceniza erosionada de baja permeabilidad intercaladas entre capas de basalto de alta permeabilidad.

Figura 7: Acuífero colgado formado por encima del nivel freático principal en una capa de menor permeabilidad en la zona no saturada.



Fuente: (Fetter, 2001)

2.2.1.4 Características de los acuíferos

Hay seis propiedades físicas básicas de los medios fluidos y porosos que deben conocerse para describir los aspectos hidráulicos del flujo de agua subterránea saturada. Estos seis son, para el agua, la densidad ρ , la viscosidad μ y la compresibilidad β ; y para los medios, porosidad n (o relación de vacíos e), permeabilidad k y compresibilidad α . Todos los demás parámetros que se utilizan para describir las propiedades hidrogeológicas de las formaciones geológicas se pueden derivar de estos seis (Freeze, 1979).

➤ **Transmisividad**

La transmisividad del acuífero, que es una medida de la cantidad de agua que se puede transmitir horizontalmente a través de una unidad de ancho por el espesor total saturado del acuífero bajo un gradiente hidráulico de 1. (Fetter, 2001)

La transmisividad es el producto de la conductividad hidráulica y el espesor saturado del acuífero:

$$T = bK \quad (1)$$

Donde:

T Es la transmisividad (L^2/T ; ft^2/d o m^2/d).

b Es el espesor saturado del acuífero (L; ft o m).

K Es la conductividad hidráulica (L/T ; ft/d o m/d).

En un acuífero multicapa, la transmisividad total es la suma de la transmisividad de cada una de las capas.

$$T = \sum_{i=1}^n T_i \quad (2)$$

➤ **Almacenamiento Específico**

El almacenamiento específico S_s es la cantidad de agua por unidad de volumen de una formación saturada que se almacena o se expulsa del almacenamiento debido a la compresibilidad del esqueleto mineral y el agua intersticial por unidad de cambio de cabeza hidráulica. También se le llama coeficiente de almacenamiento elástico. (Fetter, 2001).

$$S_s = \rho_w g (\alpha + n\beta) \quad (3)$$

Donde:

ρ_w Es la densidad del agua (M/L^3 ; $slug/ft^3$ o kg/m^3).

g Es la aceleración de la gravedad (L/T^2 ; ft/s^2 o m/s^2).

α Es la compresibilidad de la estructura del acuífero $1/(M/LT^2)$; $1/(lb/ft^2)$ o $1/(N/m^2)$.

n Es la porosidad (L^3/L^3).

β Es la compresibilidad del agua [$1/(M/LT^2)$; $1/(lb/ft^2)$ o $1/(N/m^2)$].

➤ Almacenamiento de un acuífero

En una unidad no confinada, el nivel de saturación sube o baja con los cambios en la cantidad de agua almacenada. A medida que desciende el nivel del agua, el agua se drena de los espacios de la pared. Este almacenamiento o liberación se debe al rendimiento específico S y de la unidad. El agua también se almacena o se expulsa dependiendo del almacenamiento específico de la unidad. (Fetter, 2001).

$$S = bS_s \quad (4)$$

Donde:

S_s Es el almacenamiento específico ($1/L$; $1/ft$ o $1/m$).

b Es el espesor saturado del acuífero (L ; ft o m).

S Almacenamiento (adimensional).

La capacidad de almacenamiento de un acuífero confinado saturado de espesor b se puede definir en palabras como el volumen de agua que un acuífero libera del almacenamiento por unidad de superficie del acuífero por unidad de disminución en el componente de carga hidráulica normal a esa superficie.

2.2.1.5 Ley de Darcy

Las leyes que gobiernan el comportamiento del flujo de agua subterránea en material saturado es la formulada empíricamente por el ingeniero francés Henry Darcy, en 1856. (Hiscock, 2014)

Usando el aparato experimental que se muestra en la **Figura 8**, Darcy estudió el flujo de agua a través del material poroso contenido en una columna y encontró que el flujo total, Q , es proporcional a la diferencia en el nivel del agua, $h_1 - h_2$, medido en tubos manométricos en cada extremo de la columna y el área de la sección transversal del flujo, A , e inversamente

proporcional a la columna longitud, L . Cuando se combina con la constante de proporcionalidad, K , Darcy obtuvo:

$$Q = KA \frac{(h_1 - h_2)}{L} \quad (5)$$

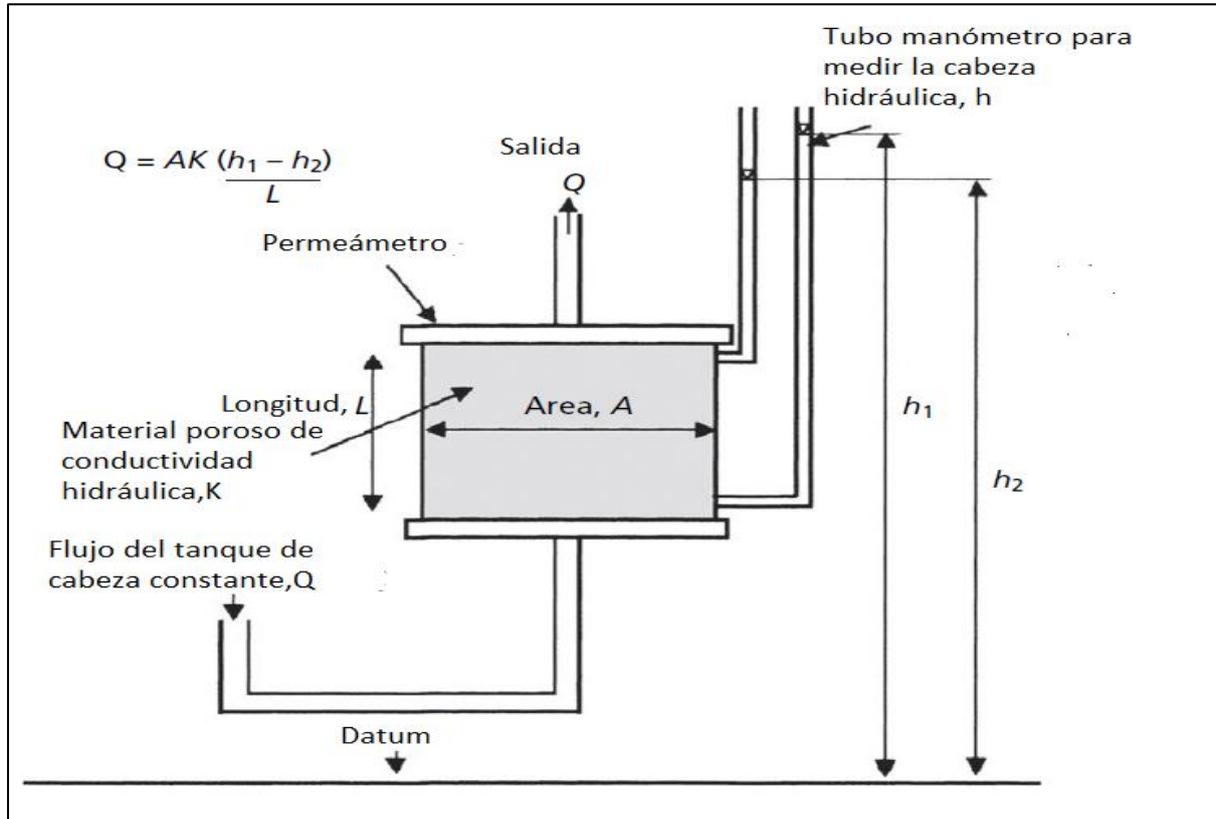
En términos generales, la Ley de Darcy, como se la conoce, puede ser escrito como:

$$Q = -KA \frac{dh}{dl} \quad (6)$$

Donde dh/dl representa el gradiente hidráulico, con el signo negativo indica flujo en la dirección de disminución de la cabeza hidráulica. K es la conductividad hidráulica del material poroso. Adoptando la abreviatura de dh/dl igual a i , entonces la ecuación puede ser escrito como:

$$Q = -AiK \quad (7)$$

Figura 8: Aparato permeámetro para determinación de la conductividad hidráulica de material poroso saturado usando la Ley de Darcy.



Fuente: (Hiscock B, 2014)

Ahora, la combinación de las ecuaciones 1, 2 y 3 da un resultado completo expresión del flujo a través de un material poroso como:

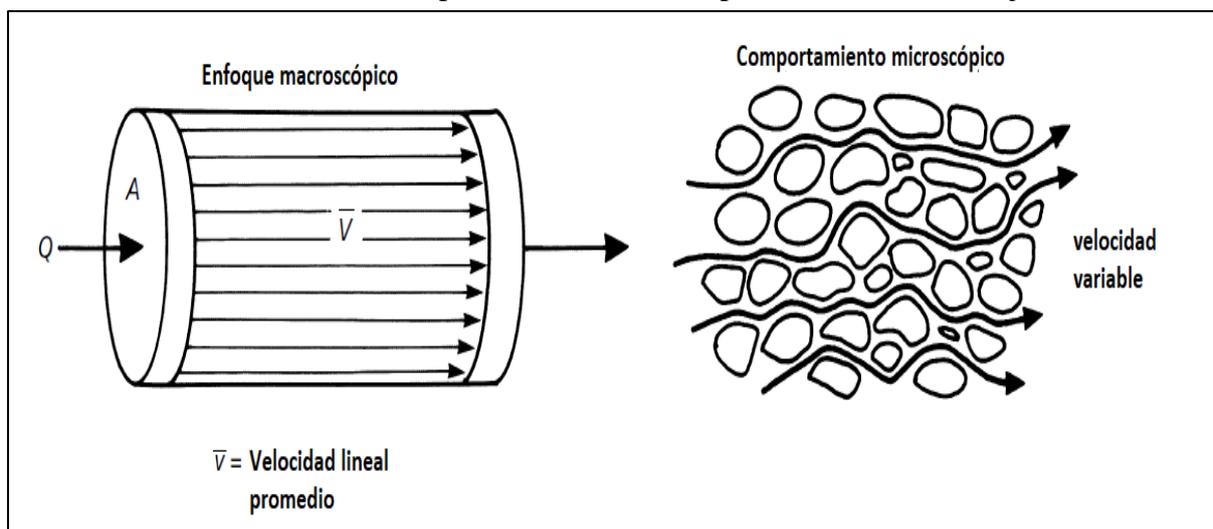
$$\frac{Q}{A} = q = -K \frac{dh}{dl} = -\frac{Cd^2 \rho g}{\mu} \frac{dh}{dl} \quad (8)$$

El cociente Q/A , o q , indica el caudal por unidad de área transversal de material poroso saturado. El término q , denominado descarga específica, tiene las dimensiones de la velocidad $[L T^{-1}]$ y también se conoce como la velocidad de Darcy o el flujo de Darcy. Es importante recordar que la velocidad de Darcy no es la verdadera, velocidad microscópica del agua moviéndose a lo largo de caminos de flujo sinuosos dentro del suelo o la roca. Dividiendo el caudal específico por la fracción de espacio abierto (en otras palabras, porosidad efectiva, n_e) a través del cual fluye el agua subterránea a través de una determinada área seccional, esto proporciona una medida promedio de velocidad del agua subterránea tal que:

$$\frac{Q}{An_e} = \frac{q}{n_e} = V \quad (9)$$

Donde V es la velocidad lineal promedio **Figura 9**. La aplicación de las ecuaciones 2 y 5 a situaciones hidrogeológicas simples permite primeras estimaciones que se obtienen para el flujo de agua subterránea velocidad Cálculos más precisos requieren el uso de técnicas más avanzadas como la red de flujo.

Figura 9: Enfoque macroscópico (darciano) para el análisis del flujo de agua subterránea contrastado con el verdadero comportamiento microscópico de caminos de flujo tortuosos.



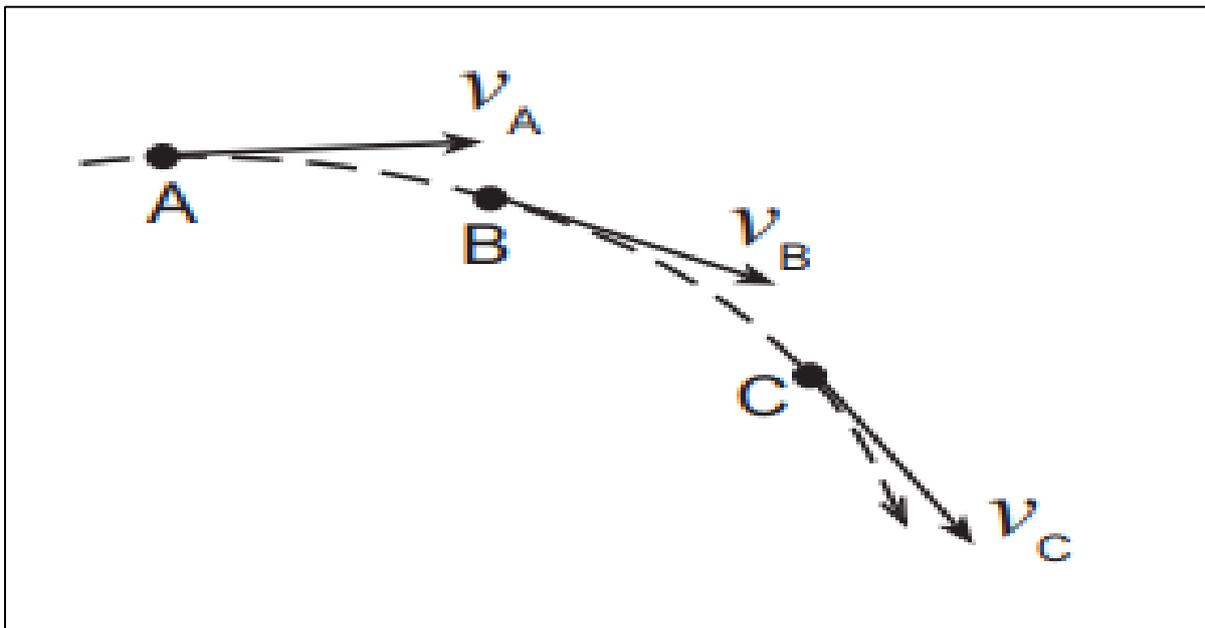
Fuente: (Hiscock B, 2014)

2.2.1.6 Redes de flujo

El en medios porosos lo constituye la infiltración a través de medios permeables en el que dominan la acción viscosa y una clara irracionalidad. Los casos más comunes comprenden el flujo de agua, aceite u otros fluidos, que se produce a través de suelos o rocas permeables. (Sotelo, 1997)

Una línea de flujo es la envolvente de los vectores velocidad en un instante determinado **Figura 10.** trayectorias son los caminos seguidos por las partículas de agua en su recorrido. En régimen permanente las trayectorias coinciden con las líneas flujo, en régimen variable pueden no coincidir (Sánchez, 2012).

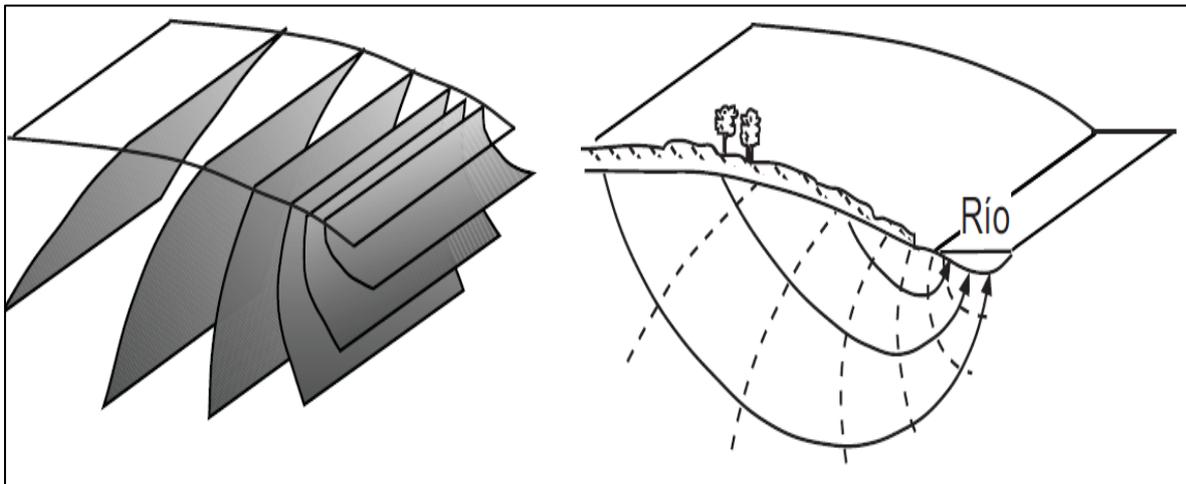
Figura 10: A, B y C es una línea de flujo.



Fuente: (Sánchez, 2012).

Una superficie equipotencial es el lugar geométrico de los puntos del espacio que tienen un mismo potencial hidráulico. Por tanto, el flujo se producirá perpendicularmente a las superficies equipotenciales, buscando el máximo gradiente **Figura 11.** El perfil de flujo de este tipo de representaciones en tres dimensiones puede ser didácticas pero imposibles de manejar en casos reales. Se hace necesario utilizar representaciones en dos dimensiones: redes de flujo, frecuentemente en perfiles verticales y mapas de isopiezas. (Sánchez, 2012).

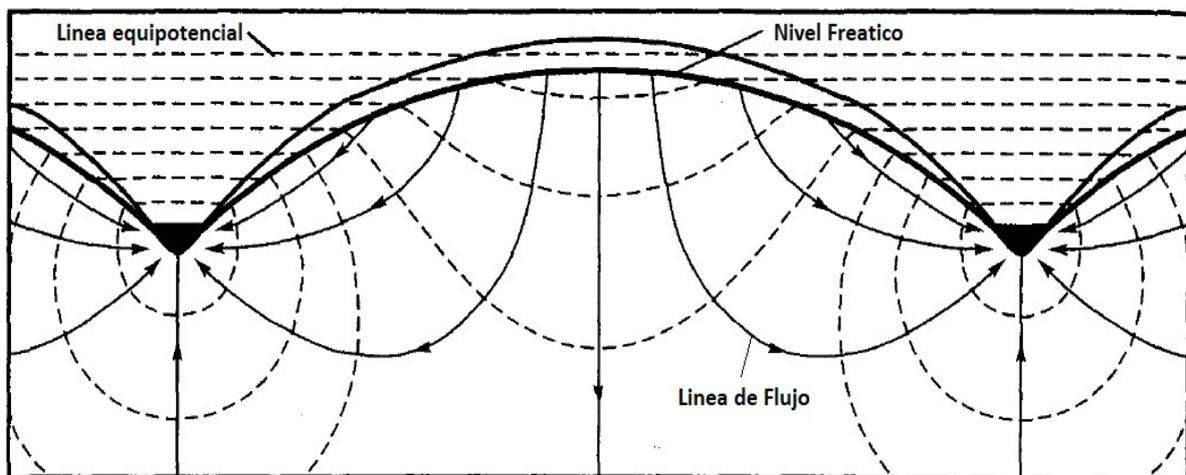
Figura 11: Superficies equipotenciales bajo una ladera y el correspondiente perfil con red de flujo.



Fuente: (Sánchez, 2012).

Patrones de flujo de agua subterránea en acuíferos homogéneos, un modelo descriptivo del flujo regional de agua subterránea en estado estacionario en un acuífero no confinado se muestra en la **Figura 12** que es una sección transversal de un acuífero homogéneo con el nivel freático aumentando en una colina entre dos valles. Las líneas equipotenciales se muestran como líneas discontinuas y las líneas de flujo son continuas. Debajo del nivel freático, las líneas equipotenciales son curvilíneas, reflejando la suma de las cabezas de elevación y presión. (Fetter, 2001).

Figura 12: Sección de la red de flujo de un acuífero isotrópico y homogéneo.



Fuente: (Fetter, 2001).

2.2.2 Métodos para medir el nivel freático

2.2.2.1 Pozo de observación

Un pozo de observación es una estructura perforada en el suelo utilizada para monitorear el agua subterránea. A diferencia de los pozos de agua comunes, su objetivo principal es observar y medir el nivel freático, la calidad del agua y otros parámetros hidrogeológicos. Se perfora con maquinaria especializada, se reviste para evitar derrumbes y se sella para proteger el agua. En la parte superior se instalan equipos de medición para recopilar datos como nivel, presión y temperatura del agua. Estos datos ayudan a comprender el comportamiento del acuífero, evaluar la calidad del agua y tomar decisiones sobre su gestión. Los pozos de observación son cruciales en estudios hidrogeológicos, monitoreo ambiental y gestión de recursos hídricos. (Freeze, 1979).

2.2.2.2 Piezómetros

Los piezómetros son dispositivos utilizados para medir la presión y el nivel del agua en un acuífero confinado o semiconfinado. Consisten en un tubo perforado instalado en un pozo excavado en el suelo hasta llegar al acuífero deseado, sellado en la parte inferior para evitar la entrada de agua desde niveles más profundos y equipado con un dispositivo de medición en la parte superior. La presión del agua empuja el agua hacia arriba dentro del tubo, lo que se puede medir con un manómetro y está relacionado con la profundidad del nivel freático. Existen diferentes tipos de piezómetros, cada uno con sus propias características y aplicaciones específicas. Se utilizan en estudios hidrogeológicos para monitorear cambios en el nivel freático, evaluar la presión en acuíferos confinados, determinar la dirección y velocidad del flujo del agua subterránea, y calcular la permeabilidad y capacidad de almacenamiento del acuífero. Aunque son precisos y proporcionan datos a largo plazo, requieren instalación profesional y mantenimiento periódico, y pueden obstruirse con sedimentos o bioincrustaciones. (Todd, 2005).

2.2.2.3 Métodos geofísicos

Incluyen la tomografía eléctrica, la sísmica de refracción, electromagnético, gravimétrico, entre otros. Estos métodos utilizan mediciones indirectas para estimar el nivel freático basándose en propiedades físicas del suelo y las rocas. Los métodos geofísicos son fundamentales para las geociencias y la geotecnia al proporcionar interpretaciones globales de

fenómenos geológicos. Integrar estos métodos en la investigación es esencial para determinar las propiedades geológicas y geotécnicas de un terreno, lo que contribuye al progreso de estas disciplinas. (Dranichnikov N, 2012)

a. Método sísmico

El método sísmico consiste en emitir ondas sísmicas artificiales desde la superficie las cuales recorren hacia dentro del subsuelo y al chocar las ondas elásticas con los sedimentos rebotan enviando la velocidad de propagación de las ondas las mismas que permitirán caracterizar el terreno, detectar las formas de las estructuras geológicas y sus profundidades. (Toalombo, 2010)

La razón principal para elegir el método sísmico en esta investigación es su capacidad para proporcionar información detallada sobre la estructura del subsuelo y la ubicación del agua subterránea. El método sísmico utiliza ondas sísmicas que viajan a través del suelo y se reflejan en las capas de roca y agua subterránea, lo que permite determinar la profundidad y la distribución del nivel freático. Además, este método es relativamente rápido y no invasivo, lo que significa que no requiere excavar pozos o instalar equipos costosos. Esto lo hace especialmente útil para estudios de gran escala y áreas extensas donde se necesita información detallada sobre el agua subterránea.

b. Ondas sísmicas

El movimiento ondulatorio puede considerarse como un transporte de energía y cantidad de movimiento, desde un punto del espacio en donde se genera el movimiento hacia otro donde se registra en un equipo, sin transporte de materia. (Ticona, 2019)

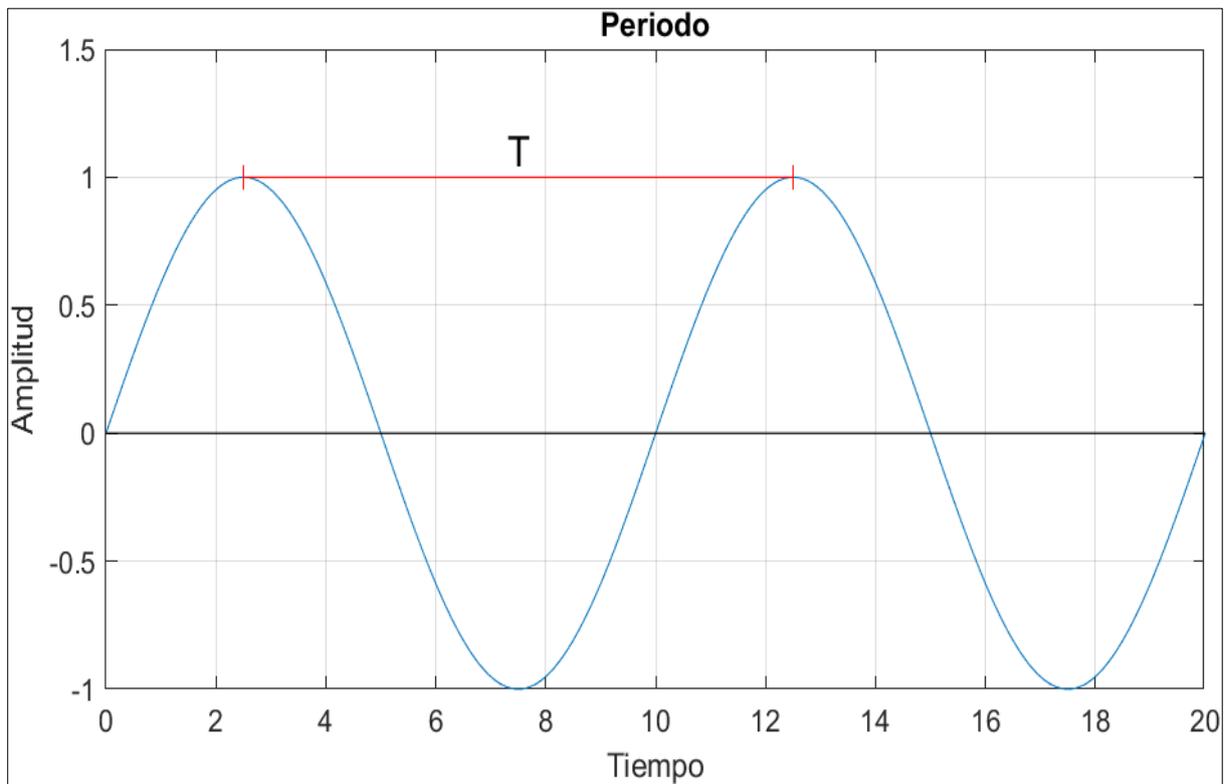
1) Parámetros de las ondas sísmicas

Los parámetros que se usan para describir una onda son: el periodo, frecuencia y el número de onda $k = 2\pi/\lambda$, donde λ es la longitud de la onda (Ticona, 2019).

➤ **Periodo** es el intervalo de tiempo requerido para que la partícula pase a través de un ciclo completo de su movimiento.

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (10)$$

Figura 13: Periodo (T) de una onda.



Fuente: (Ticona, 2019).

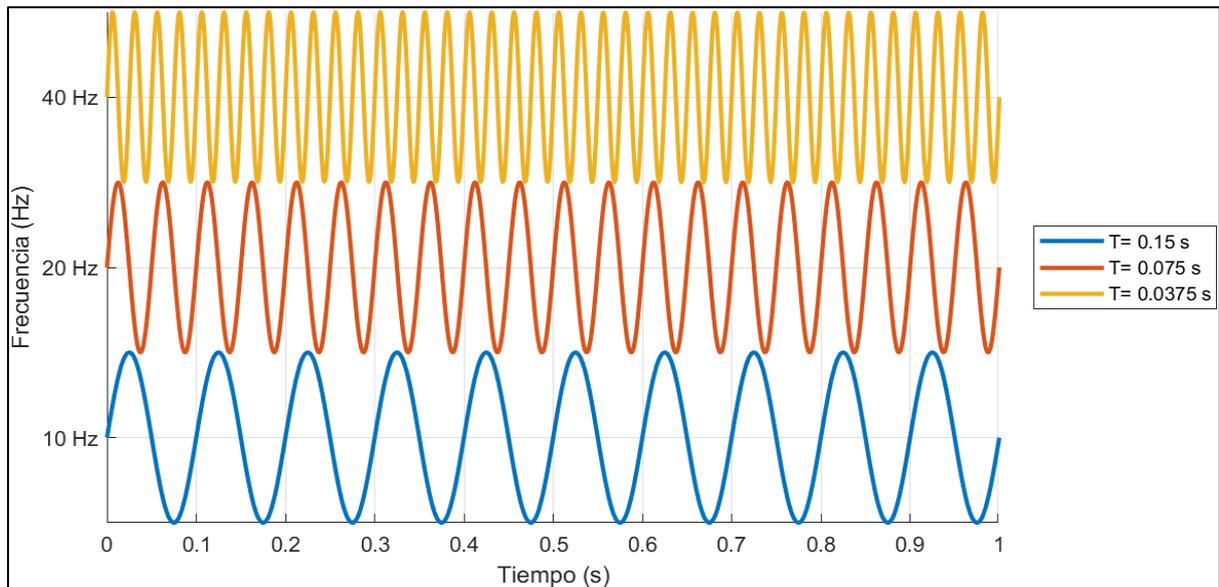
La constante ω se llama frecuencia angular y tiene como unidades rad/s . Es una medida de qué tan rápido se presentan las oscilaciones.

➤ **Frecuencia** La frecuencia se refiere a la cantidad de veces que la partícula realiza oscilaciones dentro de un cierto período de tiempo.

$$f = \frac{1}{T} \quad (11)$$

Las unidades de la frecuencia son el Hz (Hertz), T es el periodo en segundos.

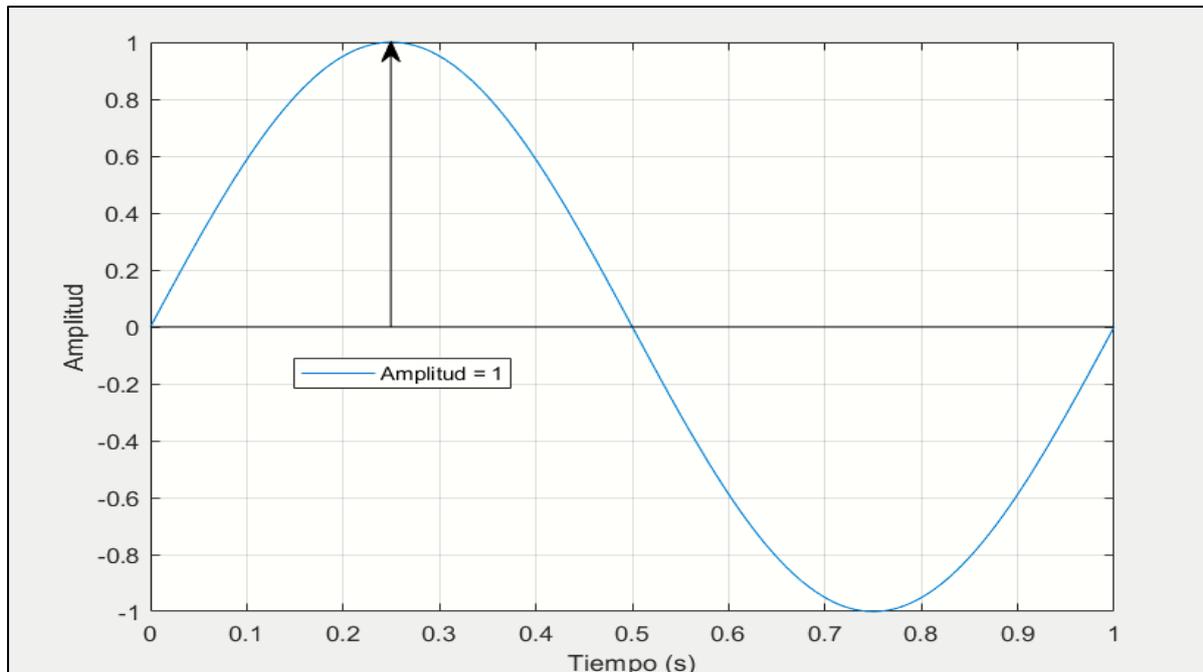
Figura 14: Frecuencia, se muestran tres ondas con diferente frecuencia para el mismo intervalo de tiempo.



Fuente: (Ticona, 2019).

- **Amplitud** Al desplazamiento máximo de un cuerpo vibratorio a partir de su posición de equilibrio se le llama amplitud de vibración (Singiresu, 2012).

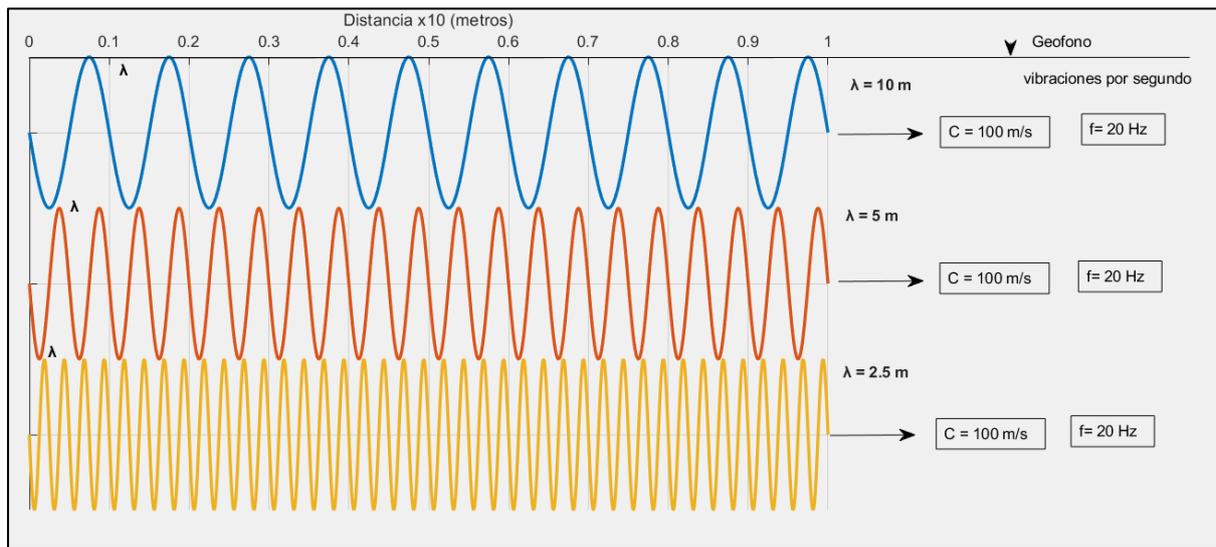
Figura 15: Amplitud de una onda senoidal, refleja la intensidad de una señal.



Fuente: (Ticona, 2019).

- **Longitud de onda** En el contexto de una onda sinusoidal, la longitud de onda se define como la distancia espacial entre dos puntos consecutivos que están en fase, es decir, que experimentan el mismo estado de oscilación en el mismo punto del ciclo de la onda. Se representa típicamente por la letra griega lambda (λ) y se mide en unidades de longitud, como metros (m) o nanómetros (nm), dependiendo del tipo de onda y del medio en el que se propaga.

Figura 16: Longitud de onda, se muestra tres diferentes ondas con la misma frecuencia, pero de diferente amplitud.



Fuente: (Ticona, 2019).

c. Tipos de ondas sísmicas

Las ondas sísmicas se clasifican en ondas internas y ondas superficiales. Las ondas internas son aquellas que se propagan desde su origen hasta la superficie de la Tierra, que se subdividen en ondas P y ondas S. Por otra parte, las ondas superficiales son las que se propagan sobre la superficie de la Tierra, que a su vez se subdividen en ondas Rayleigh y ondas Love, después de la llegada de las ondas P y S a la superficie de la Tierra. (Zafra, 2017)

1) Ondas tipo p

Las ondas longitudinales, irrotacionales, de compresión u ondas P, este último nombre se le da porque este tipo suele ser el primer evento (primario) en llegar a la superficie terrestre. (Sheriff, 1995).

Su velocidad de propagación es de aproximadamente unos 7,5 kilómetros por segundo, aunque ésta puede cambiar dependiendo de la densidad del medio en el que se transmiten. Las ondas P son ondas longitudinales que se propagan produciendo oscilaciones del material con el que se encuentran en el mismo sentido en el cual se propagan. (Zafra, 2017).

$$v_p = \sqrt{\frac{k + \frac{3}{4}\mu}{\rho}} \quad (12)$$

La velocidad de propagación de las ondas P en un medio isótropo y homogéneo.

Donde:

- K Es el módulo de compresibilidad.
- μ Es el módulo de corte o rigidez.
- ρ Es la densidad del material a través del cual se propaga la onda mecánica.

2) Onda tipo S

El segundo tipo se conoce como cortante, transversal, rotacional u onda S (porque suele ser el segundo evento importante registrado después de la onda P. (Sheriff, 1995)

Las ondas S tienen una velocidad de propagación de alrededor de 4,2 kilómetros por segundo, aunque al igual que las P, estas también varían de acuerdo al material en el que se propagan. Las ondas S son ondas transversales que se propagan produciendo movimientos perpendiculares a la dirección en que se propagan, a través del material en que se transmiten. (Zafra, 2017).

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (13)$$

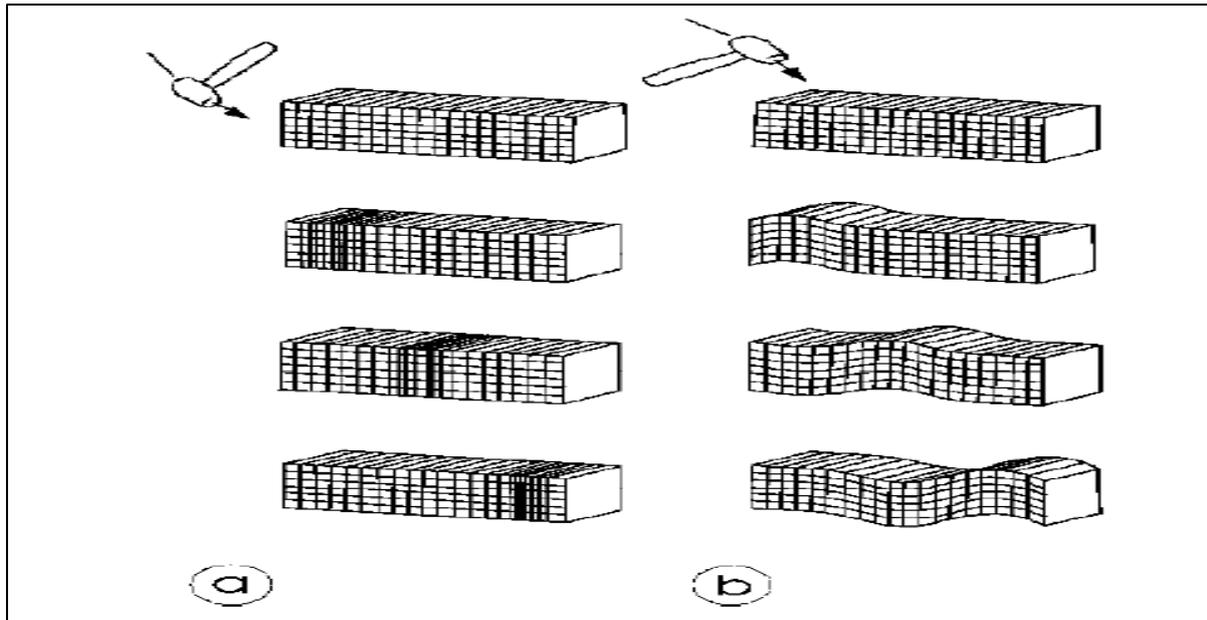
La velocidad de propagación de las ondas S en medios isótropos y homogéneos.

Donde:

μ Es el módulo de corte.

ρ Es la densidad del material.

Figura 17: (a) Movimiento de partículas de ondas de compresión (ondas P), (b) movimiento de partículas de ondas de corte (ondas S).



Fuente: (Kirsch, 2006).

2.2.2.4 Transformada de Fourier

La Transformada de Fourier es una herramienta matemática fundamental utilizada en el análisis de señales y sistemas. Permite descomponer una señal en sus componentes de frecuencia, lo que es crucial en campos como el procesamiento de señales. La definición matemática de la transformada de Fourier es la siguiente: (Chapra, 2010)

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(i\omega) \cdot e^{-i\omega t} d\omega \quad (14)$$

$$F(i\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (15)$$

La función $F(i\omega)$ se llama integral de Fourier de $f(t)$. Las ecuaciones 14 y 15 se conocen como el par de transformadas de Fourier.

a. **Transformada discreta de Fourier (TDF)** Los datos con frecuencia se obtienen de, o convierten a, una forma discreta. Como se muestra en la **figura 18**, se puede dividir un intervalo de 0 a t en N subintervalos de igual tamaño $\Delta t = T/N$. El subíndice n se emplea para designar los tiempos discretos a los cuales se toman las muestras.

Las ecuaciones para calcular la transformada discreta directa e inversa derivan de las ecuaciones 14 y 15 y se emplean para calcular tanto la transformada directa como la inversa de Fourier, para datos discretos. la TDF requiere N^2 operaciones complejas, se escriben como.

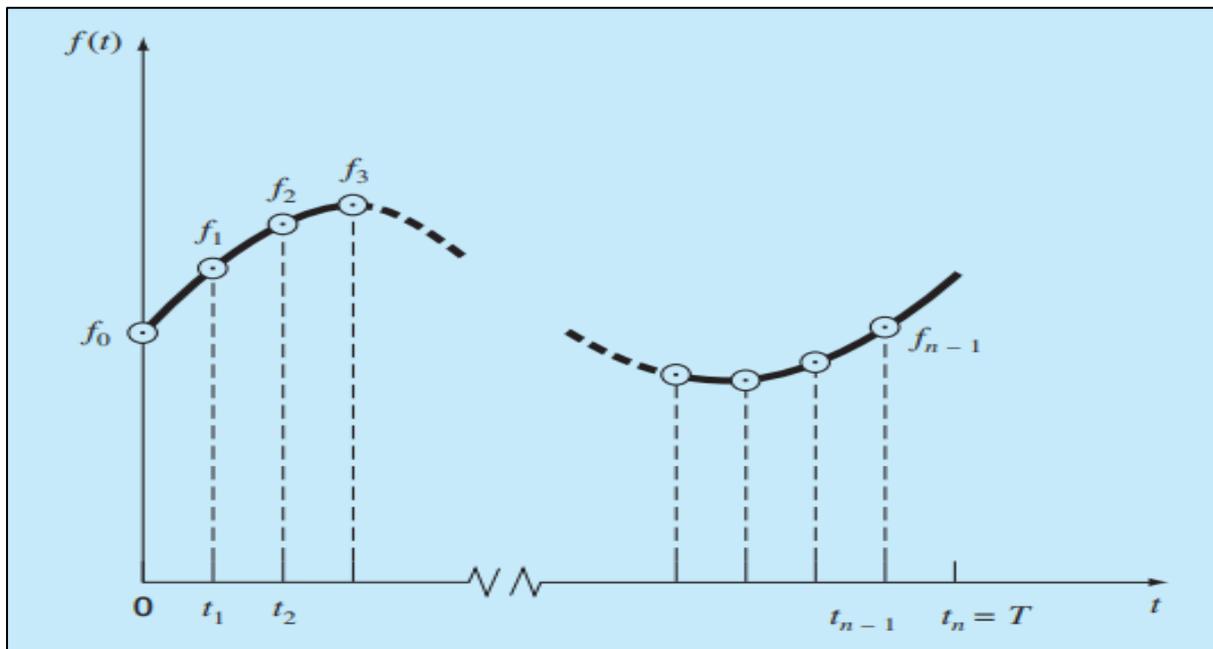
$$F_k = \sum_{n=0}^{N-1} f_n e^{i\omega n} \quad \text{para } k = 0 \text{ a } N - 1 \quad (16)$$

y la transformada inversa es

$$f_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f_n e^{-i\omega n} \quad \text{para } n = 0 \text{ a } N - 1 \quad (17)$$

Donde $\omega = 2\pi/N$.

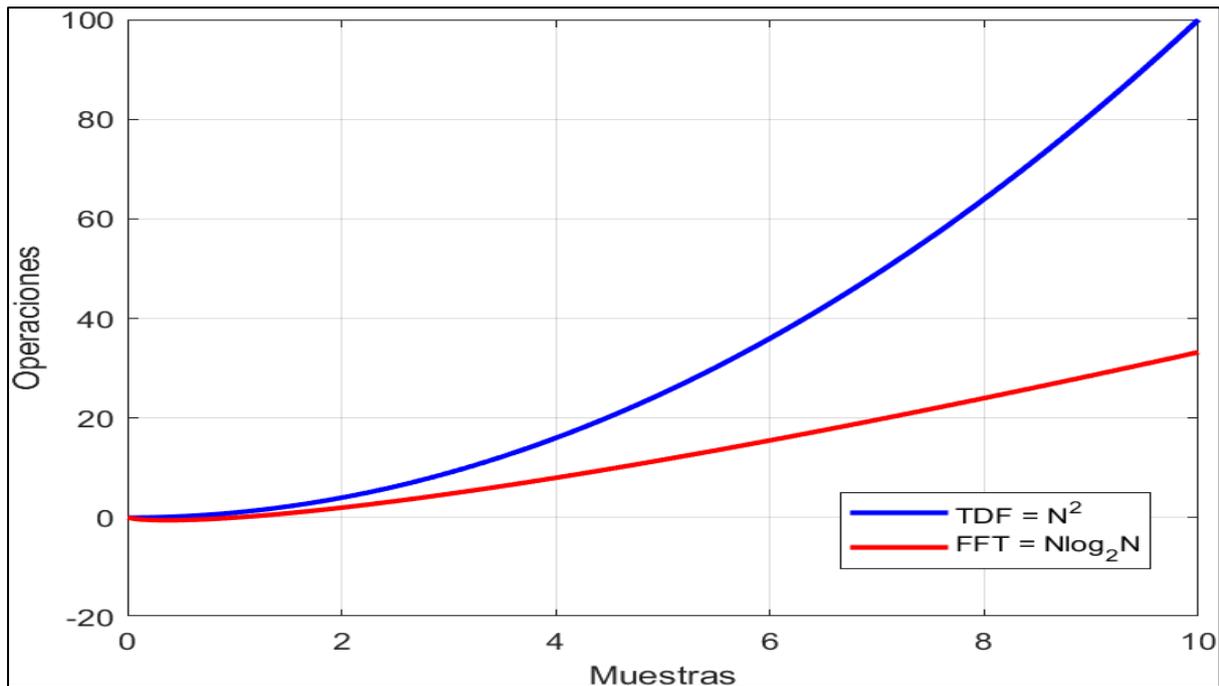
Figura 18: Puntos muestrales de la serie discreta de Fourier.



Fuente: (Chapra, 2010).

b. La Transformada Rápida de Fourier (FFT) Es un algoritmo eficiente que se utiliza para calcular la Transformada de Fourier de una señal de manera rápida. aprovecha la periodicidad y simetría de las funciones trigonométricas para calcular la transformada con aproximadamente $N \log_2 N$ operaciones (Chapra, 2010).

Figura 19: Gráfica del número de operaciones contra tamaño de la muestra de la TDF estándar y la FFT.



Fuente: (Chapra, 2010).

En la **figura 19** se observa que la TDF (Transformada Discreta de Fourier) necesita más cálculos que la FFT (Transformada Rápida de Fourier) para la misma cantidad de muestras.

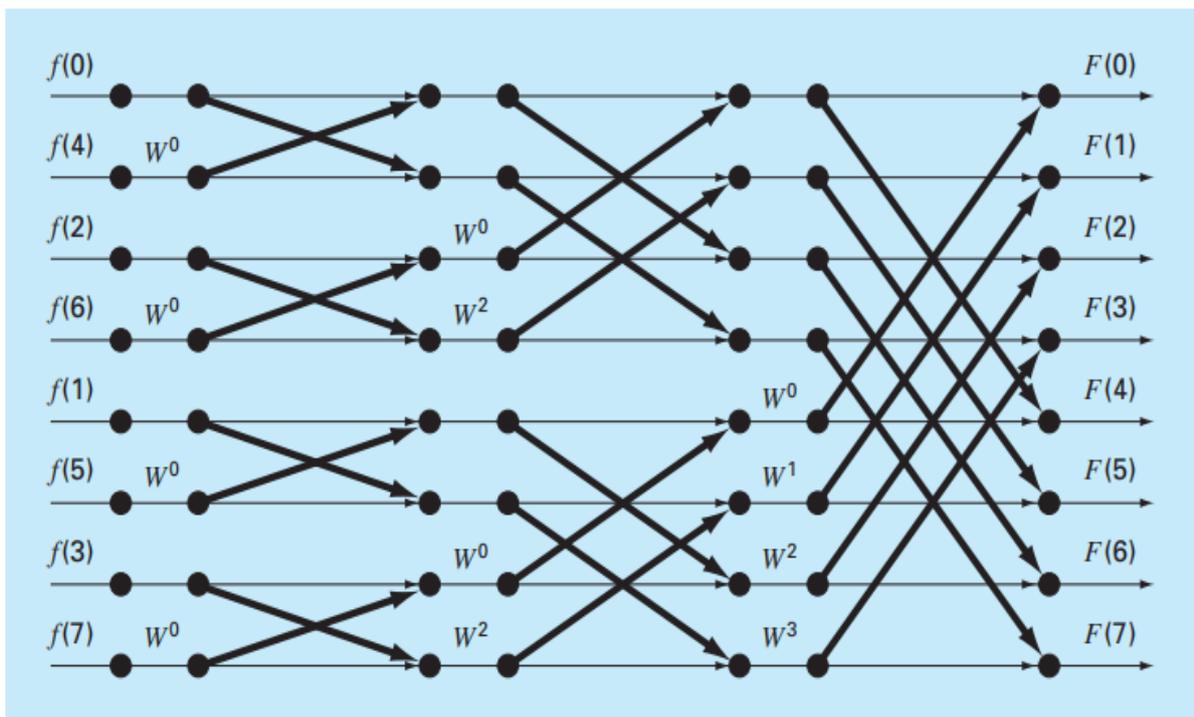
Algoritmo de la FFT usando Sande-Tukey que se describe de la siguiente manera:

Dada una secuencia de datos $x = \{x_0, x_1, \dots, x_{N-1}\}$, donde N es una potencia de 2 para simplificar el proceso de división.

- 1. División de la secuencia de datos:** Se divide la secuencia x en dos subsecuencias, una que contiene los elementos pares x_{2k} y otra que contiene los elementos impares x_{2k+1} donde k varía desde 0 hasta $N/2-1$. Esto se repite recursivamente hasta que cada subsecuencia tiene un solo elemento.

2. **Cálculo de las Transformadas de Fourier de las subsecuencias:** Se calculan las Transformadas de Fourier de cada subsecuencia. Si una subsecuencia tiene solo un elemento, su Transformada de Fourier es igual a ese elemento. Si una subsecuencia tiene más de un elemento, se calcula su Transformada de Fourier utilizando la misma técnica recursiva.
3. **Combinación de las Transformadas de Fourier de las subsecuencias:** Las Transformadas de Fourier de las subsecuencias se combinan para obtener la Transformada de Fourier completa de la secuencia original. Esto se hace utilizando la técnica de "mariposa" (butterfly), donde las transformadas de las subsecuencias se combinan de manera iterativa.

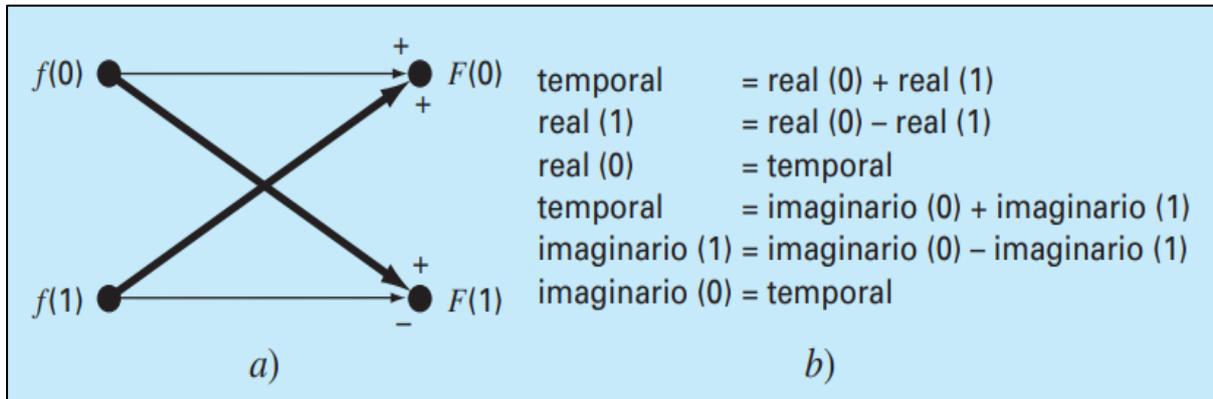
Figura 20: Diagrama de cálculo de la descomposición completa de una FFT de ocho puntos.



Fuente: (Chapra, 2010).

Un examen detallado de la **figura 20** revela que la molécula computacional básica representada en ella es la conocida como red mariposa, tal como se ilustra en la **figura 21**.

Figura 21: Una red mariposa que representa el cálculo fundamental de una FFT.



Fuente: (Chapra,2010).

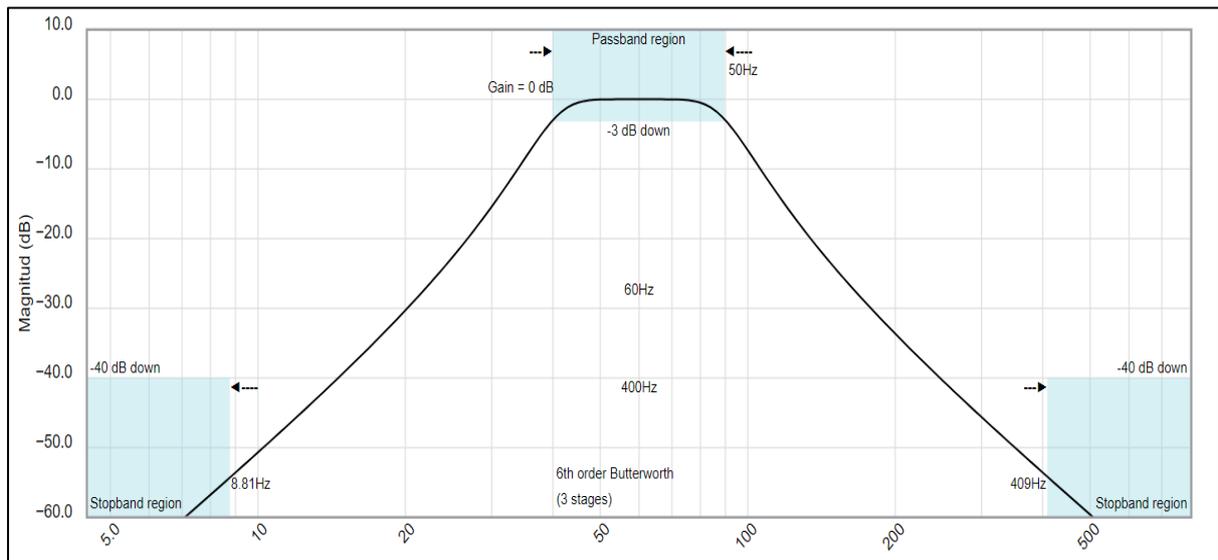
2.2.2.5 Filtro rechaza bandas

Los filtros rechazan bandas se caracterizan por tener una banda de rechazo estrecha y una banda de paso amplia. Utilizan una combinación de componentes activos, como amplificadores operacionales, y componentes pasivos, como resistencias y capacitores, para lograr su función de rechazo selectivo de frecuencias.

Según (Schaumann, 2009), el diseño de filtros rechaza bandas implica la selección adecuada de los componentes para lograr la frecuencia central de rechazo deseada, así como la determinación de la anchura de banda de rechazo y la profundidad de atenuación requerida. Además, el ajuste preciso de los parámetros del filtro, como la frecuencia de resonancia y la Q (factor de calidad), es crucial para obtener un rendimiento óptimo del filtro.

Los filtros rechazan bandas se pueden implementar utilizando diferentes topologías, como filtros activos (utilizando amplificadores operacionales) o filtros pasivos (utilizando solo componentes pasivos). Cada topología tiene sus propias ventajas y desventajas en términos de costo, complejidad y rendimiento.

Figura 22: Grafica de un filtro rechaza bandas



2.2.2.6 Suavizado de curvas

El suavizado de curvas tiene como objetivo principal obtener una representación más clara y simplificada de los datos, lo que facilita su interpretación y análisis. Esto se logra mediante la eliminación o reducción de fluctuaciones o irregularidades en la curva original, sin perder información importante o alterar significativamente la forma general de la misma (Smith, 2021).

Algunos de los métodos comunes utilizados para el suavizado de curvas incluyen:

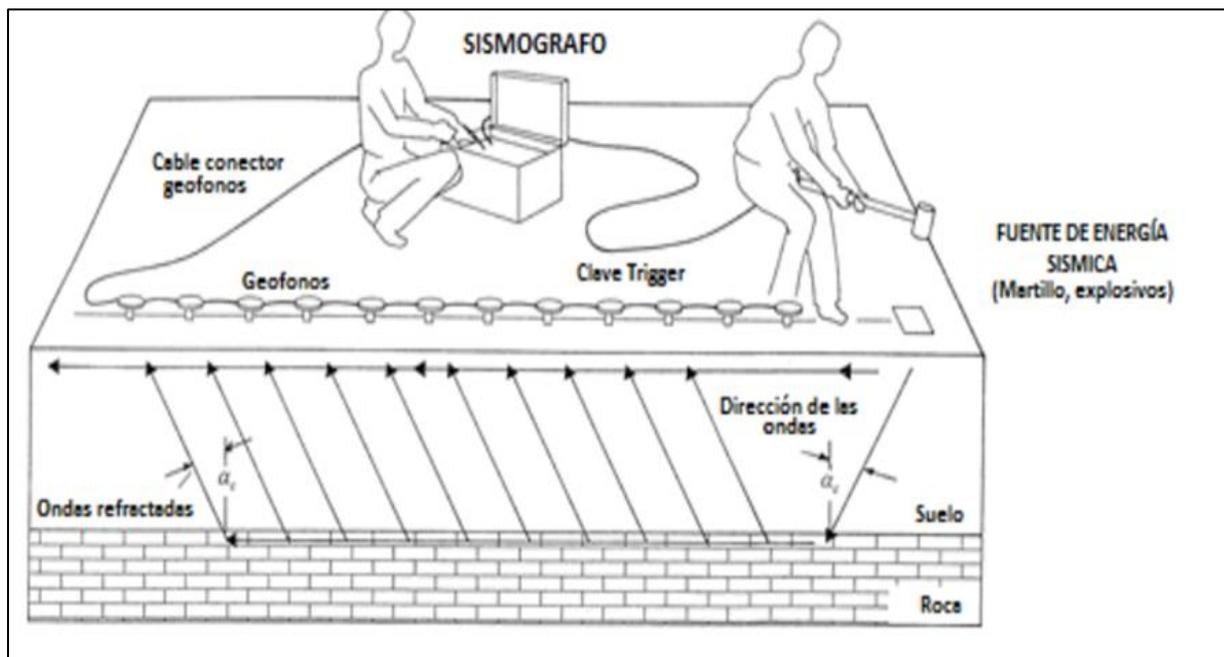
1. Promedio móvil: Consiste en calcular el promedio de un conjunto de puntos adyacentes a lo largo de la curva, lo que ayuda a reducir el ruido aleatorio.
2. Suavizado polinómico: Se ajusta un polinomio a los datos y se utiliza para generar una curva suavizada. Este método puede variar en complejidad, desde ajustes lineales hasta polinomios de mayor grado.
3. Suavizado exponencial: Este método asigna más peso a los puntos más recientes en la curva, lo que permite seguir tendencias recientes mientras suaviza variaciones a corto plazo.
4. Splines: Utiliza funciones polinómicas suaves para conectar segmentos de la curva, proporcionando una representación suavizada y continua de los datos.
5. Filtros de Kalman: Son utilizados para estimar el estado de un sistema dinámico a partir de una serie de mediciones ruidosas, lo que puede aplicarse al suavizado de curvas en tiempo real.

2.2.2.7 Método de refracción sísmica

El método de Refracción Sísmica consiste en la medición de los tiempos de recorrido de ondas compresionales generadas por una fuente de energía impulsiva. La fuente de energía es generalmente una pequeña carga explosiva o generada a través de un golpe que podría ser la caída de peso o el golpe de un martillo y que esta energía es detectada, amplificada y registrada por un equipo especialmente diseñado para el propósito (Ticona, 2019).

La obtención de interfaces de medios con propiedades físicas diferentes a través de la refracción se basa por el fundamento del tiempo de viaje de las ondas de compresión (Ondas P) que se producen por una fuente impulsiva a unos puntos colocados a distancias conocidas a lo largo de un eje sobre la superficie del terreno. Por lo tanto, se obtienen estos resultados por medio del estudio de los tiempos de viaje bajo ciertas hipótesis definidas, y siguiendo las leyes de propagación de onda. (Redpath, 1973)

Figura 23: Esquema de ensayo de refracción sísmica.

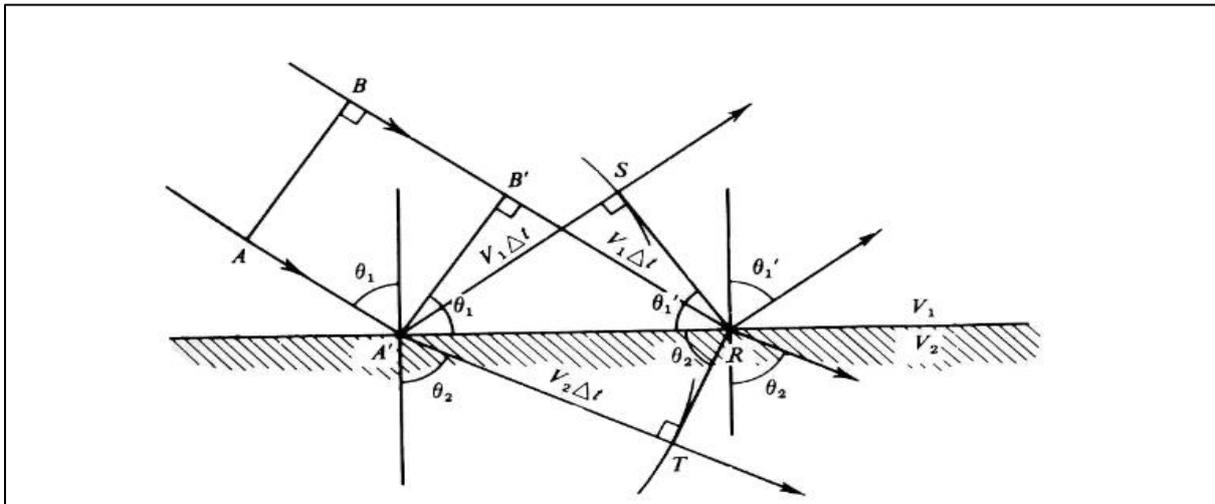


Fuente: (ASTMD5777, 2011)

a. Ley de refracción

Tal como se ha señalado previamente, cuando un rayo de luz encuentra una frontera entre dos medios con propiedades elásticas diferentes, parte de la energía del rayo se refleja y permanece en el primer medio, mientras que la restante energía se transmite hacia el segundo medio, cambiando su dirección en el proceso **figura 24**. (Herrera, 2013)

Figura 24: Diagrama esquemático de la ley de refracción.



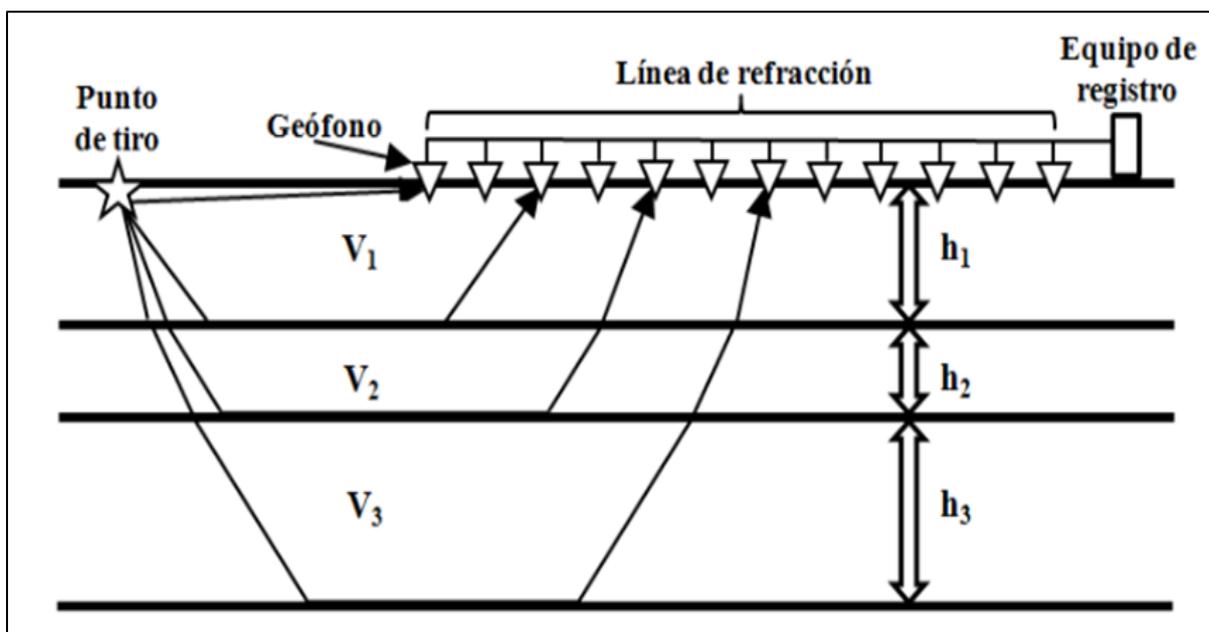
Fuente: (Herrera, 2013)

b. Metodología usada en el método de refracción sísmica

El modo básico en el que opera el método de refracción sísmica se ilustra en la **figura 25** y se explica a continuación:

1. Se coloca un tendido sísmico o línea de refracción, dicha línea consiste en sensores enterrados en el suelo denominados geófonos.

Figura 25: Esquema del modo de operación de la refracción sísmica.



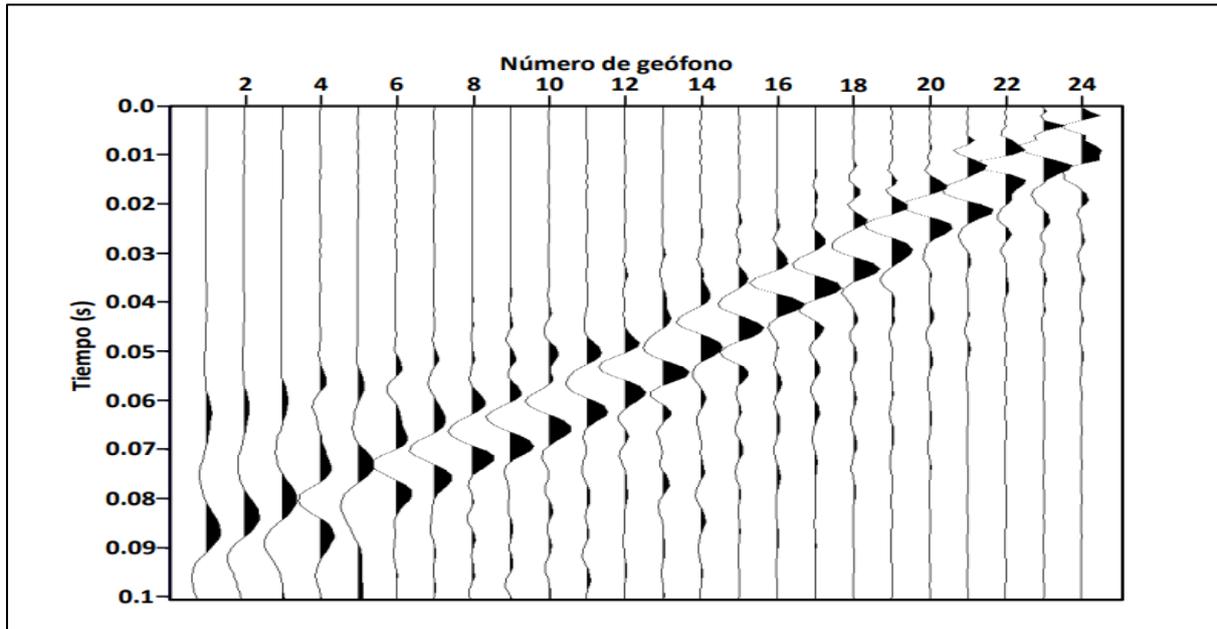
Fuente: (Castro, 2016)

2. En un extremo del tendido se ubica el punto de disparo y mediante el uso de alguna fuente (marro, caídas de peso, detonación de explosivos o vibradores), se generan ondas sísmicas de manera artificial, a esto se le conocerá como tiro directo.
3. Las ondas generadas se propagan por el subsuelo hasta encontrar interfaces en las cuales la energía es refractada de forma crítica y regresa a superficie.
4. Cuando la energía regresa a la superficie, los geófonos son los responsables de registrar los tiempos de arribo, es decir, el tiempo que demoran las ondas en viajar del punto de disparo a cada punto de la línea de refracción.
5. Finalmente, los tiempos de arribo son enviados de los geófonos a una unidad de almacenamiento denominada sismógrafo, la cual está constituida por varios elementos que tienen por función amplificar los pequeños impulsos eléctricos que llega a los sismo detectores; eliminar perturbaciones que enmascaran los impulsos útiles mediante dispositivos; usualmente llamados filtros; graficar los impulsos recibidos por lo geófonos y, mediante un sistema de marcado del tiempo, determinar el que ha transcurrido desde el instante de generación de la onda hasta su recepción por el sismo detector o geófono.(Castro, 2016)

Los tiempos de arribo obtenidos y las distancias conocidas constituirán los datos crudos **figura 26**, los cuales posteriormente son procesados para obtener información de las variaciones de la velocidad con la profundidad, para finalmente realizar interpretaciones. (Herrera, 2013)

La suposición principal del método de refracción sísmica es que la velocidad de las capas aumenta con la profundidad, de lo contrario, el método no permitirá identificar tales capas. Generalmente la presencia de capas muy delgadas conlleva a malas interpretaciones, ya que no alcanzan a producir primeros arribos; además, en el caso de que una capa posea velocidad menor a la del estrato superior, no habrá refracción sísmica; por tanto, no habrá indicios de su presencia. (Herrera, 2013)

Figura 26: Sismograma obtenido al efectuar un tendido de 24 geófonos con un tiempo total de registro de 0.1 s

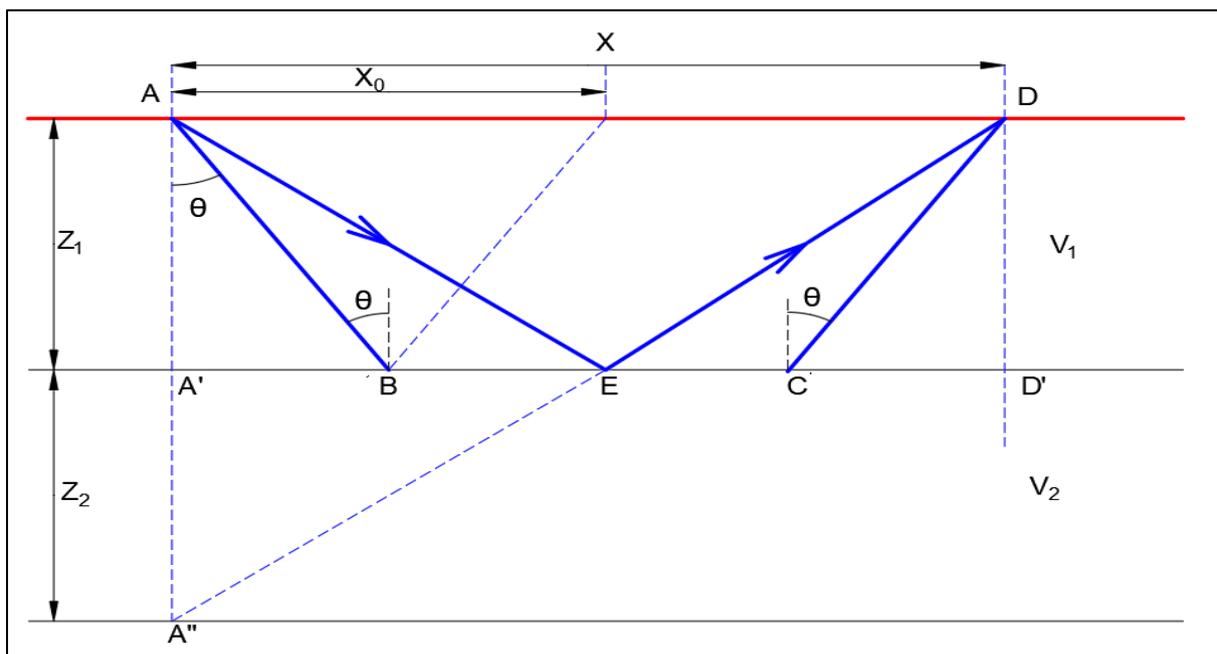


Fuente: (Herrera, 2013)

2.2.2.8 Modelo de dos capas planas

A partir de la **figura 27** se definen las siguientes ecuaciones para el cálculo del modelo de dos capas planas aplicadas a al cálculo mediante el método de refracción.

Figura 27: Trayectorias de las ondas refractadas



Fuente: (Ticona, 2019)

$$T_1 = \frac{x}{V_1} \quad (18)$$

Donde:

- T1 Es el tiempo de la onda de refracción en, segundos.
- X Distancia desde la fuente hasta el último geófono en, metros.
- V1 Velocidad de la onda refractada en, m/s.

Utilizando conceptos trigonométricos y empleando la ley de Snell, es posible determinar el tiempo en el cual llega el rayo refractado siguiendo la ruta ABCD en la **figura 27**, a través de cálculos.

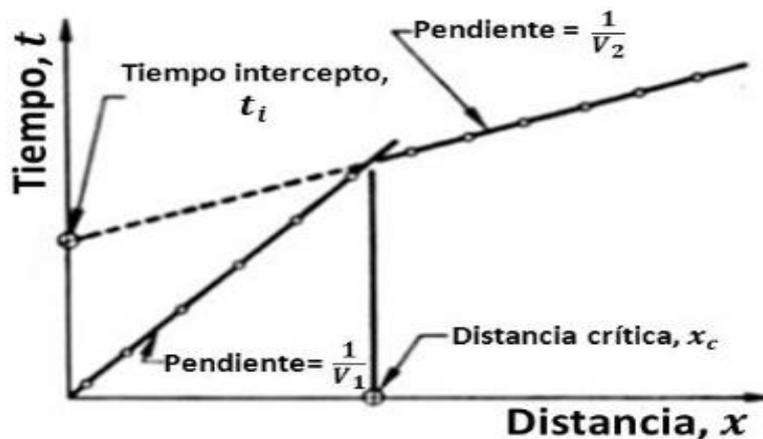
$$T = \frac{2z_1 \cos \theta}{V_1} + \frac{x}{V_2} \quad (19)$$

Donde:

- T Es el tiempo de arribo en, segundos.
- Z1 Es la longitud del estrato, en metros.
- V1 es la velocidad en el medio uno, en m/s.
- V2 es la velocidad en el medio dos, en m/s.

En la **figura 28** se plasma gráficamente la ecuación del tiempo de arribo en donde se observa la prolongación de la gráfica con pendiente $1/V_2$ al eje del tiempo, da lugar al tiempo de intercepto t_i y la prolongación al eje de la distancia, se obtiene la distancia crítica x_c , que es el encuentro de la onda directa y la onda refractada.

Figura 28: Grafico de tiempo vs distancia de onda directa y refractada.



Fuente: (Castro,2016)

La ecuación anterior en función del tiempo de intercepto t_i cuando $x = 0$ es la siguiente.

$$Z_1 = \frac{t_i V_1}{2 \cos [\text{sen}^{-1}(\frac{V_1}{V_2})]} \quad (20)$$

También se puede escribir de la siguiente forma

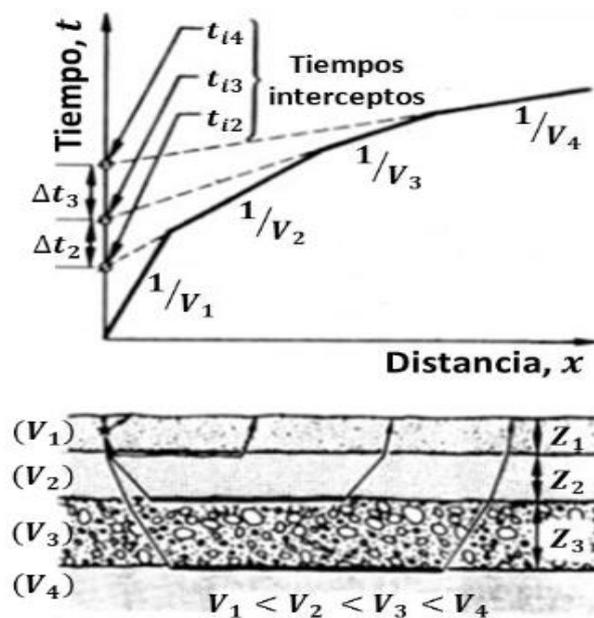
$$t_i = \frac{2Z_1(V_2^2 - V_1^2)^{1/2}}{V_1 V_2} \quad (21)$$

Dado que los datos esenciales se derivan de la gráfica que relaciona el tiempo y la distancia, es factible estimar el grosor de la capa inicial utilizando la ecuación 19 y 20.

2.2.2.9 Modelo de múltiples capas planas

La técnica de la medición de tiempos de interceptación puede aplicarse también a situaciones que involucran varias capas, tal como se ilustra en la representación visual de la figura.

Figura 29: Modelo de cuatro capas horizontales y su curva tiempo vs distancia.



Fuente: (Castro,2016)

Aquí se proporcionan las ecuaciones requeridas para determinar los grosores de las capas que se observan en la **figura 29**. Debido a que el proceso de obtención de estas fórmulas es idéntico al del escenario con dos capas, se muestran únicamente los resultados correspondientes.

$$Z_1 = \frac{t_{i2}V_1}{2 \cos \left[\text{sen}^{-1} \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \right]} \quad (22)$$

$$Z_2 = \frac{V_2 \left\{ t_{i3} - t_{i2} \frac{\cos \left[\text{sen}^{-1} \left(\frac{V_1}{V_3} \right) \right]}{\cos \left[\text{sen}^{-1} \left(\frac{V_1}{V_2} \right) \right]} \right\}}{2 \cos \left[\text{sen}^{-1} (V_2/V_3) \right]} \quad (23)$$

$$Z_3 = \frac{V_3 \left\{ t_{i4} - t_{i2} \frac{\cos \left[\text{sen}^{-1} \left(\frac{V_1}{V_4} \right) \right]}{\cos \left[\frac{\text{sen}^{-1} V_1}{V_2} \right]} - \frac{2Z_2 \cos \left[\text{sen}^{-1} \left(\frac{V_2}{V_4} \right) \right]}{V_2} \right\}}{2 \cos \left(\frac{\text{sen}^{-1} V_3}{V_4} \right)} \quad (24)$$

Utilizando la gráfica que relaciona el tiempo y la distancia, junto con las fórmulas 22, 23 y 24, es viable determinar tanto la velocidad como el espesor de cada capa, excepto en el caso de la última capa. En esta última capa, solo se puede calcular la velocidad, ya que la onda se refracta críticamente a lo largo de la interfaz.

2.2.2.10 Método sísmico (MASW)

El método MASW, conocido como Análisis Multicanal de Ondas Superficiales, se utiliza para identificar la estratigrafía de las capas subterráneas del suelo debajo de un punto en la superficie de manera indirecta. Este enfoque se basa en el cambio en las propiedades dinámicas de los materiales que componen el suelo. En este método, se analizan las ondas superficiales, específicamente las ondas Rayleigh, que se generan a partir de una fuente de energía, como un golpe de martillo u otro dispositivo que crea una onda en la superficie. Esto proporciona información sobre la velocidad de las ondas de corte (V_s) en el punto central de la ubicación estudiada. El método se utiliza con frecuencia en estudios geotécnicos para la planificación de cimentaciones de diversas obras civiles, como edificios, puentes, carreteras, presas de tierra, presas de relaves, pads de lixiviación, entre otros. Se ha observado que este método presenta una buena correlación con los perfiles estratigráficos del suelo, los resultados de perforaciones con diamantina y los ensayos de penetración estándar (SPT), lo que lo convierte en una opción confiable y económica para evaluar los parámetros dinámicos del suelo de la fundación. (Ticona, 2019)

2.2.2.11 Equipo

Es el equipo responsable de digitalizar y almacenar la información que los geófonos han detectado; tiempos de arribo, frecuencias y amplitudes con que las ondas viajan desde la fuente hasta los sensores. La información es enviada desde los geófonos hasta la unidad de almacenamiento mediante un cable al cual están conectados tanto los sensores como la unidad almacenadora. Este equipo es un sismógrafo basado en microcontroladores, pantalla LCD y demás componentes, también una unidad acondicionadora de señales el cual se muestra en la figura 30.

Figura 30: Unidad acondicionadora de señal, encargada de amplificar las señales provenientes de los geófonos.



2.2.2.12 Geófonos

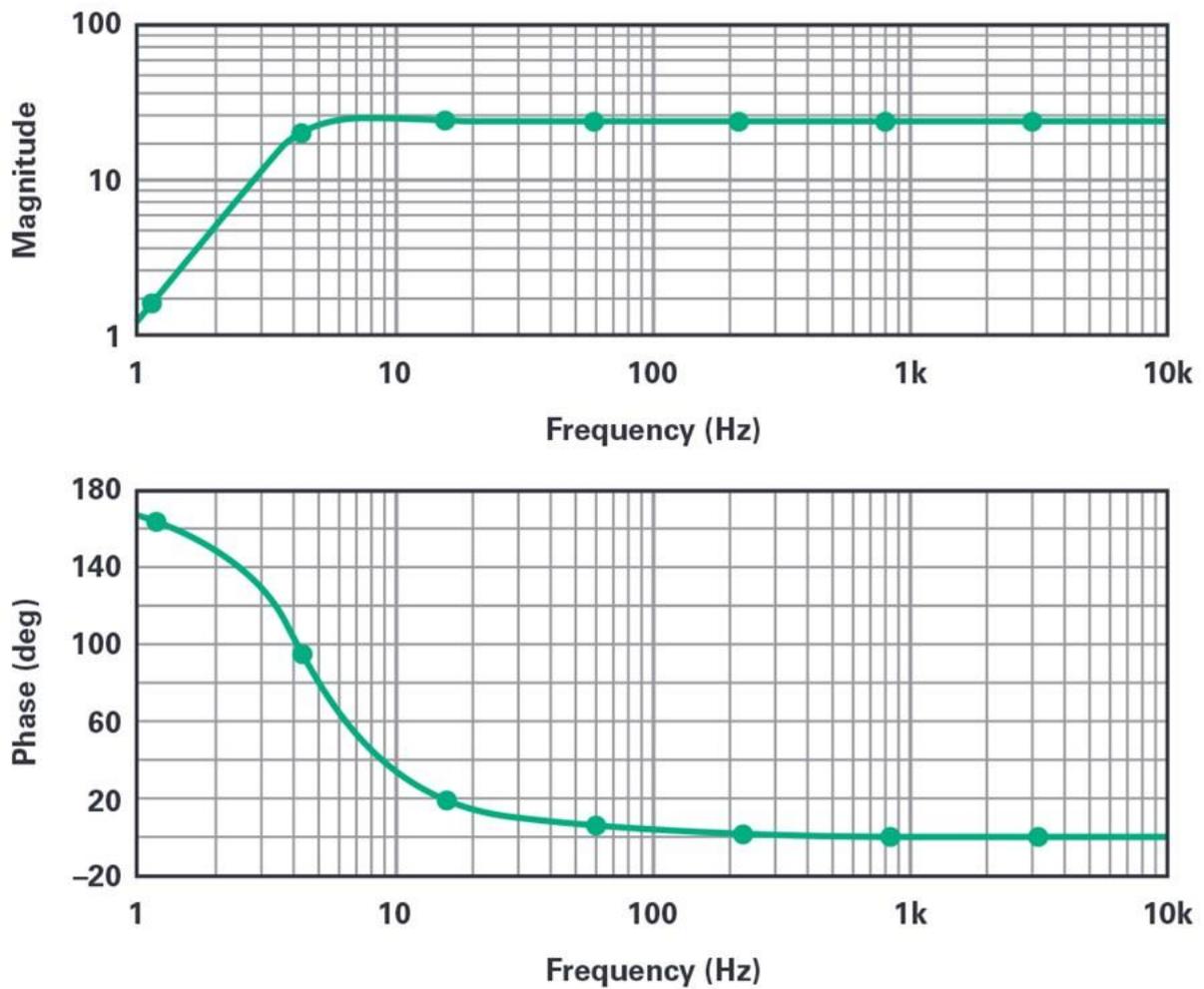
El primer eslabón en la cadena del proceso de registro lo constituyen los geófonos, puesto que es el instrumento que se encuentra en contacto directo con el suelo y de esta manera es que puede transformar los movimientos del terreno en señales eléctricas. Como se observa en la **figura 31**, los geófonos utilizados en esta investigación son geófonos verticales de 4.5 Hz.

Figura 31: Geófono vertical de 4.5 Hz.



En la **Figura 32** se muestra la respuesta de frecuencia simulada de un geófono de 4,5 Hz. La respuesta de frecuencia de un geófono tiene una velocidad plana para un rango de frecuencias por encima de su frecuencia de resonancia y disminuye para frecuencias por debajo de esta. Los geófonos de pequeño tamaño y bajo coste tienen frecuencias de resonancia normalmente superiores a 4,5 Hz.

Figura 32: Respuesta de frecuencia de geófono simulada de 4,5 Hz con un factor de amortiguación de 0,56.



Fuente: (Wang, 2017)

2.2.3 Geología

2.2.3.7 Características de los suelos

El suelo es un recurso natural no renovable que está cambiando continuamente debido a los factores que lo componen y la interacción entre: el clima, material parental o roca madre, los organismos y el tiempo; asimismo, este se encuentra compuesta por sustancias en sus diferentes estados. Todas estas composiciones originan los diferentes tipos de suelos como los no consolidados que son los que caracterizan a la región Cajamarca.

Las formaciones de suelos con porosidad granulados son aptas y de gran aprovechamiento para las aguas subterráneas, en este aspecto, la arquitectura de los suelos

desempeña un papel muy importante en las formaciones de almacenamiento de las aguas dependiendo de los espacios vacíos que en ellos existen.

Los suelos se clasifican en:

a. Suelos derivados de Materiales Residuales

Los suelos residuales se encuentran ocupando laderas suaves y faldas de cerro, con pendientes moderadamente empinadas a muy empinadas. Estos suelos por lo general no presentan desarrollo genético, muy superficiales, de texturas medias, reacción del suelo desde fuertemente ácido hasta moderadamente alcalinos, drenaje excesivo a bueno, ligeramente pedregosos con presencia de afloramientos rocosos y erosión severa. (Poma, 2010)

b. Suelos de origen Aluvio coluvial

Su formación es producto del transporte superficial ocurrido desde las partes altas de los principales cerros que dan origen a las cuencas de los diferentes ríos que constituyen la red hidrográfica del departamento, estos suelos se originan a parde de variada litología, transportados, y luego depositados en forma local, debido a la acción combinada del agua y la gravedad. Se distribuyen en forma moderada y dispersa en vertientes de montaña y en las planicies aluvio locales en las desembocaduras de las quebradas. (ministerio de energía y minas del Perú, 2013)

c. Suelos de origen Aluvial

Estos suelos en su mayoría disponen de cierto riego moderado, aunque son aptos para cultivar principalmente pastos y cultivos agrícolas. Presentan texturas ligeramente pedregosas y erosión nula a moderada, drenaje bueno a excesivo, reacción neutra a moderadamente alcalina. (Autoridad nacional del agua- Perú, 1999).

d. Suelos de origen Fluvio Glaciar

El material por el cual está formado es producto del arrastre de las aguas de escorrentía superficial durante el periodo de lluvias. Además, presentan texturas medias, drenaje bueno, reacción desde fuertemente ácida a ligeramente alcalino, pendientes ligeramente inclinadas, superficiales y bastante pedregosidad superficial. las tierras de la parte se encuentran ocupadas con pastos naturales, y en menor altitud se encuentran cultivadas. (Poma, 2010)

e. Suelos de origen Fluvio Glaciar y Lacustre

Este tipo de suelos son los que predominan en la región de Cajamarca, estos suelos están constituidos por depósitos de material detrítico fino proveniente de las laderas y faldas de los principales cerros que dominan las principales cuencas del departamento de Cajamarca, que son arrastradas por las aguas de escorrentía superficial durante el periodo de lluvias en la zona.

Estos suelos son de textura moderadamente gruesa a moderadamente fina; moderadamente profundos a profundos y están limitados por la presencia del nivel freático; son de drenaje bueno a moderado, con reacción ligera a fuertemente acida. Son desarrollados a partir de sedimentos acumulados en un ambiente glaciárico, generalmente de materiales sedimentarios, muestran un perfil no evolucionado en depósitos morrénicos y poco evolucionados en depósitos fluvio-glaciáricos, debido a las temperaturas muy bajas que limitan el accionar de los micro organismos en el suelo y el crecimiento de la vegetación. (Autoridad Nacional del Agua. 1998)

f. Suelos de la región Cajamarca

Cajamarca al igual que los diferentes departamentos el Perú han tenido almacenamientos de agua desde tiempos antiguos los cuales son producto de los deslizamientos mencionados anteriormente, los suelos de esta región son más arenosos, presentan gran concentración de materia orgánica, debido a la humedad de un suelo y la textura se evidencia en la baja capacidad de agua aprovechable que se presenta en los horizontes que tienen un bajo contenido de limo y arcilla, y que está relacionado con una mayor porosidad gruesa en suelos de textura arenosa (Romero, 2019).

2.2.4 Aguas Subterráneas para uso Agrícola y Ganadero

La finalidad del agua superficial o subterránea es cubrir las brechas o desabastecimientos en los principales sectores en los que este recurso natural es vital, incluyendo el uso poblacional, agrícola y ganadero. En el fundo Tartar, el agua se utiliza tanto para fines agrícolas como ganaderos; las diferencias en los cálculos de esta demanda suelen explicarse a continuación:

2.2.4.1 Demanda de agua para uso agrícola.

El cálculo de la demanda de agua para uso agrícola implica varios factores, como el tipo de cultivo, las condiciones climáticas, el tipo de suelo y las prácticas de riego. Se excluyen de la medición de demanda agrícola las tierras en descanso (rastrajo, barbecho) y los pastos naturales, cuya demanda se satisface mediante los ciclos de precipitación. Para el cálculo de la necesidad hídrica de los cultivos se tiene en cuenta los siguientes factores:

a. Evapotranspiración (ET): La evapotranspiración es la cantidad total de agua que se evapora del suelo y se transpira por las plantas. Se puede estimar utilizando métodos empíricos o modelos matemáticos basados en datos climáticos como temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar. El método de Penman-Monteith es uno de los enfoques más ampliamente utilizados.

b. Factor de Cultivo (Kc): El factor de cultivo es un coeficiente que refleja las necesidades de agua específicas de un cultivo en relación con la evapotranspiración de referencia (ET₀), que es la evapotranspiración de un cultivo hipotético de referencia. Multiplicar la ET₀ por el factor de cultivo proporciona la evapotranspiración real del cultivo en cuestión.

c. Área de Cultivo: Determinar el área total de tierra cultivada con el cultivo en cuestión.

d. Duración del Cultivo: Estimar la duración total del ciclo de cultivo, desde la siembra hasta la cosecha.

e. Eficiencia de Riego: Considerar la eficiencia del sistema de riego utilizado. Algunos métodos de riego son más eficientes en la entrega de agua a las raíces de las plantas que otros.

f. Pérdidas por Escorrentía y Evaporación: Tener en cuenta las pérdidas debidas a la escorrentía superficial y la evaporación antes de que el agua llegue a las raíces de las plantas.

2.2.4.2 Demanda de agua para uso ganadero.

Se calcula la cantidad esencial de agua necesaria para los animales a partir de tres fuentes: la comida, la asimilación y el agua de bebida. El enfoque se centra en calcular el consumo de agua de bebida en el momento crítico para ajustar el sistema de abrevadero. Los requerimientos de agua se basan en mantener el equilibrio corporal, incluyendo pérdidas por heces, orina, evaporación para regular la temperatura y almacenamiento en tejidos para

crecimiento, gestación y producción de leche, siendo variables y dependientes de diversos factores.

a. Factores ambientales: Incluyen la temperatura ambiente, las fluctuaciones diarias de temperatura, la humedad relativa, la precipitación y la velocidad del viento.

b. Factores relacionados con la dieta: Principalmente, la cantidad de humedad, nitrógeno, fibra y sal presentes en los alimentos.

c. Factores individuales del animal: Esto incluye el peso corporal, el estado fisiológico, el nivel de producción y el consumo diario de materia seca.

El requerimiento de agua varía según el peso del animal y su etapa de desarrollo, ya que los animales jóvenes y altamente productivos tienden a consumir más agua que los animales mayores y menos productivos. A continuación, se presenta una tabla que detalla el consumo potencial de agua en animales según su peso, estado fisiológico y la temperatura ambiente.

Tabla 2: Requerimiento de agua para ganado vacuno.

Temperatura (°C)	Vacas lactando (lt/día)	Vacas Secas (lt/día)	Animales En Crecimiento (lt/día)	Animales En Terminación (lt/día)	
	409 kg	409 kg	108 kg	364 kg	454 kg
4	43	25	15	28	33
10	48	27	16	30	36
14	55	31	19	34	41
21	64	37	22	41	48
27	68		25	47	55
32	61		36	66	78

Fuente:(Romero, 2019).

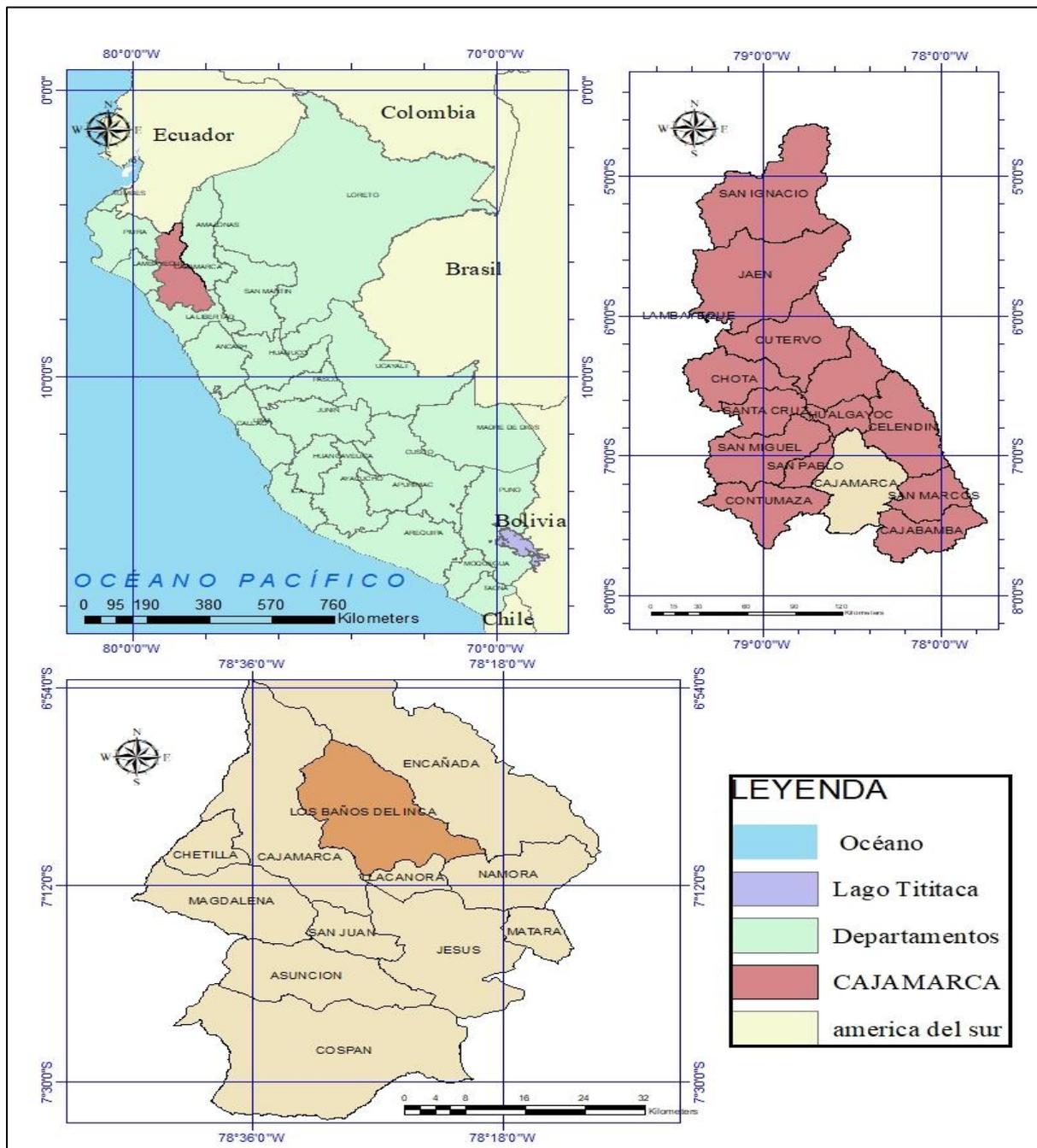
CAPITULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN

3.1.1 Ubicación Política

El área de estudio se ubica en el distrito de baños del inca, provincia y departamento de Cajamarca. A una altitud promedio de 2662 msnm.

Figura 33: Mapa de Ubicación Política



3.1.2 Ubicación Administrativa

- ALA: Cajamarca
- AAA: Marañón

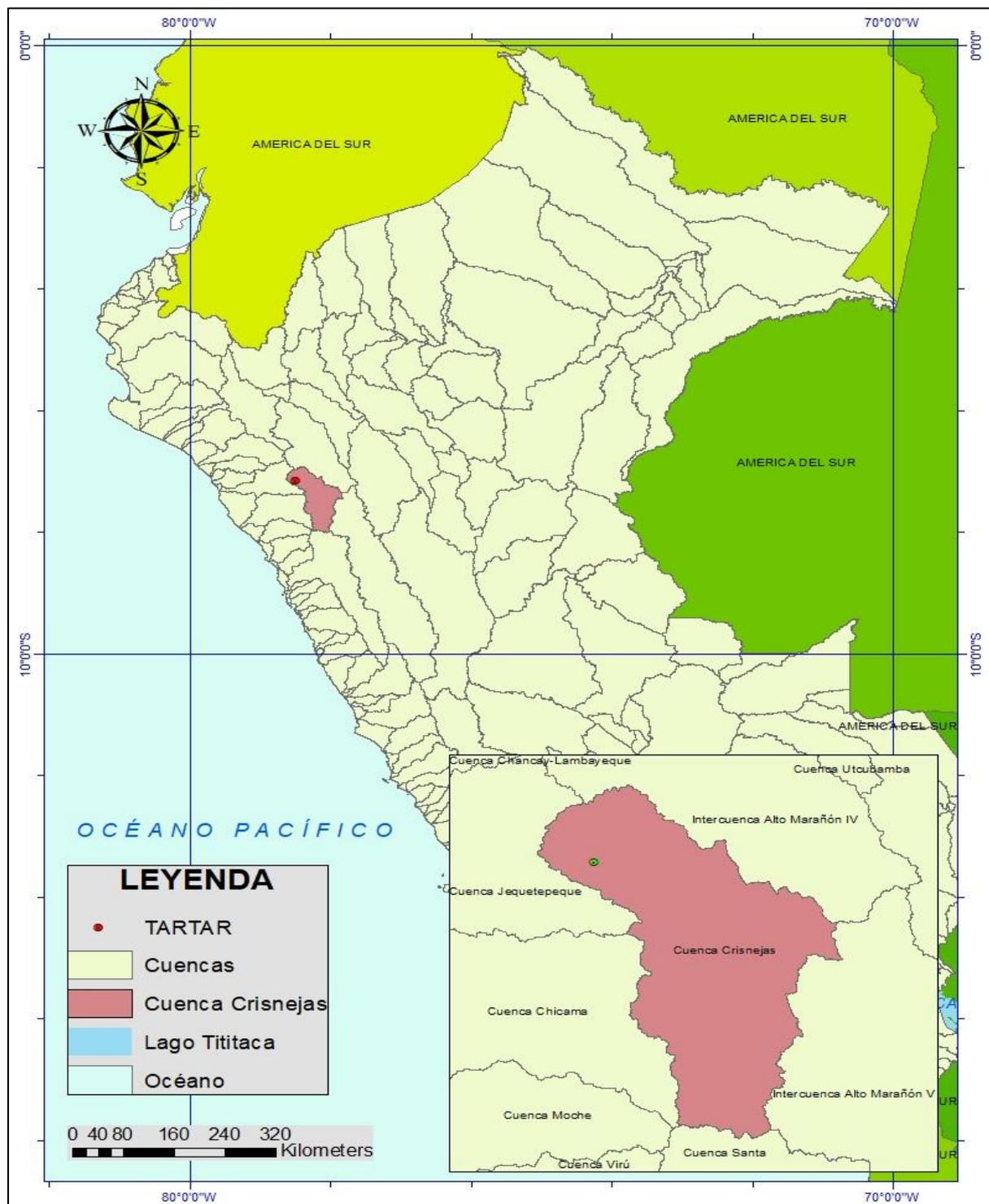
Figura 34: Mapa de Ubicación Administrativa



3.1.3 Ubicación Hidrográfica

- Vertiente: Red hidrográfica del Atlántico.
- Cuenca: Crisnejas

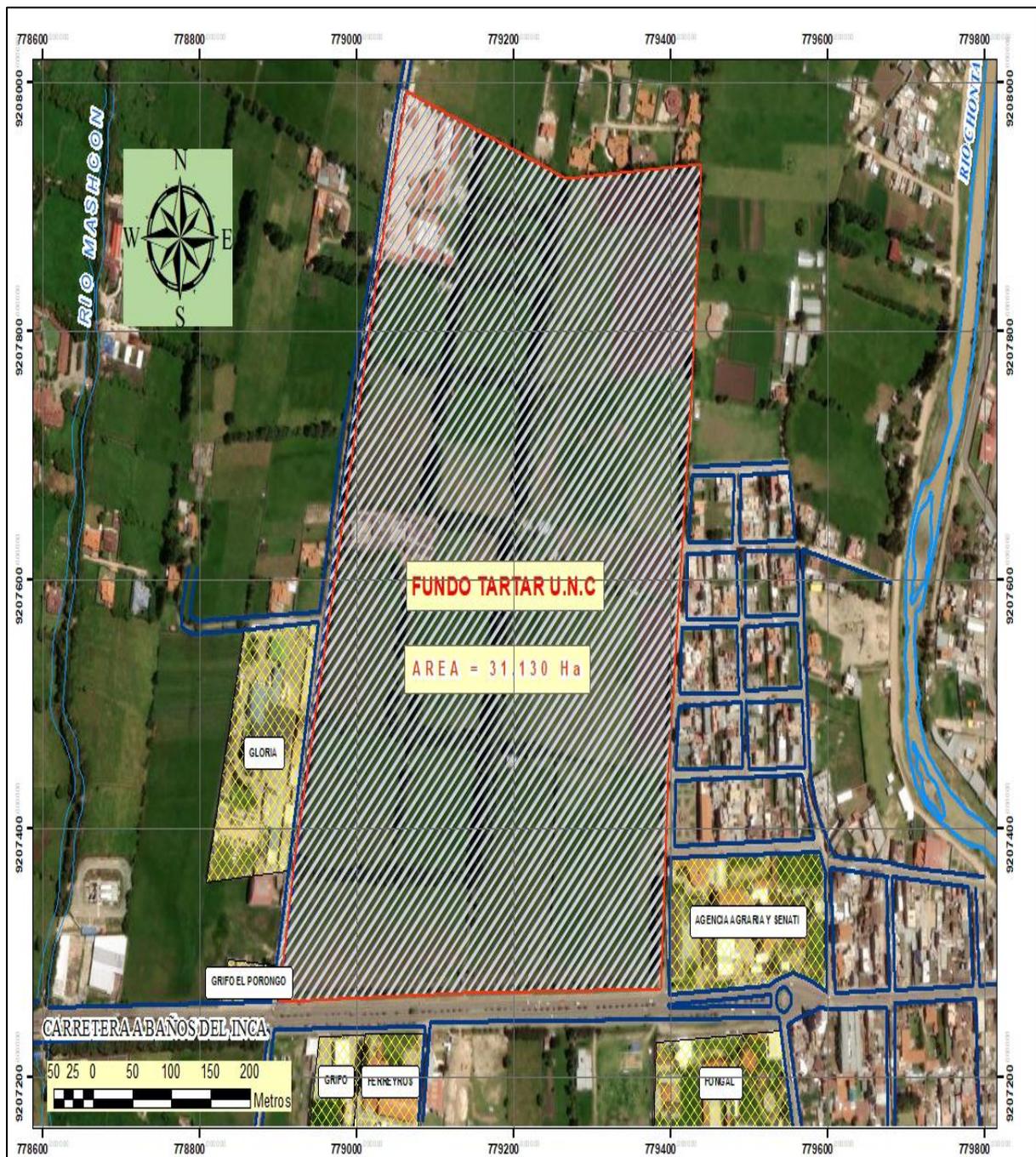
Figura 35: Mapa de ubicación Hidrográfica



3.1.4 Ubicación del área de estudio

La investigación se realizó en el fundo tartar, con un área de 31.130 hectáreas este predio pertenece a la Universidad Nacional de Cajamarca ubicado en el distrito de Baños del Inca, provincia y departamento de Cajamarca. El cual esta administrado por la escuela de veterinaria y la escuela de agronomía, en cuanto a la vegetación el 90% es pasto natural, la demás área está cubierta por sembríos como papa, hortalizas, alfalfa y establos.

Figura 36: Mapa de ubicación de la zona de estudio.



Ubicación geográfica	
Este:	779064.21 m E
Norte:	9207511.79 m S
Altitud:	2662 m.s.n.m

3.1.5 Límites distritales

- Por el norte: Con el distrito de la Encañada.
- Por el sur: Con los distritos de Llacanora y Namora.
- Por el este: Con el distrito de la Encañada.
- Por el oeste: Con la Provincia y departamento de Cajamarca.

3.1.6 Características ambientales del área de estudio

El área de estudio presenta temperaturas que fluctúan entre los 7 y 22° C, durante los meses de invierno comprendidos entre diciembre y abril. Durante los meses de mayo a noviembre la temperatura varía entre los 3° y 22° C, presentándose templado durante el día y frío durante la noche.

3.2 TIEMPO EN LA QUE SE REALIZÓ LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación fue llevada a cabo durante los meses de enero a octubre del año 2023, en este periodo de tiempo se realiza la recopilación de información topográfica y cartográfica, caracterización geológica y geotécnica, determinación de las necesidades hídricas tanto agrícolas como ganaderas, construcción del equipo para el almacenamiento de información, Calibración y validación del equipo y metodología y los sondeos geofísicos, en diferentes puntos del área de estudio.

Figura 37: Fundo Tartar-UNC (2/03/2023)



3.3 MATERIALES

3.3.1 Equipos y materiales utilizados en la investigación:

3.3.1.1 Para la fase de campo

- GPS, para la ubicación de los puntos donde se realizó el sondeo sísmico.
- Cámara fotográfica.
- Equipo Protección Personal para la recopilación de la información: chaleco, zapatos de seguridad.
- 04 geófonos verticales 4.5 HZ.
- 01 cable para conexión de geófonos con 04 canales.
- Equipo de recolección y almacenamiento de datos: Pre-amplificador de señales, filtro pasa bajas, amplificador con ganancia de 6, convertidor de señales analógicas a digitales de 24bits el AD7738, microcontrolador stm32f401re y esp32, conexión Serial a 11520 baudios.

- 01 comba de 20 libras.
- 01 placa de acero.
- 01 wincha de 50 m.
- Estacas.
- Laptop ASUS TUFF GAMING F15.

3.3.1.2 Para la fase de gabinete

- Laptop ASUS TUFF GAMING F15.
- Plano de ubicación del área de estudio proporcionado por la UNC.
- útiles de escritorio.
- Softwares:
 - Microsoft Word, utilizado para redactar la tesis y demás documentos.
 - Microsoft Excel, para el cálculo y manejo de la información presentada en esta tesis.
 - software EasyEDA, para el diseño del sistema de adquisición de información.
 - AutoCAD CIVIL 3D, para la elaboración de planos.
 - CROPWAT 8.0, para el cálculo de la demanda de agua para uso agrícola.
 - MATLAB 2021a, para procesamiento de señales sísmicas.
 - SERIAL PLOT, usado para almacenar datos del sismógrafo.
 - ArcGIS, para el manejo de la información geográfica, cartográfica y geológica útil en la elaboración de planos.

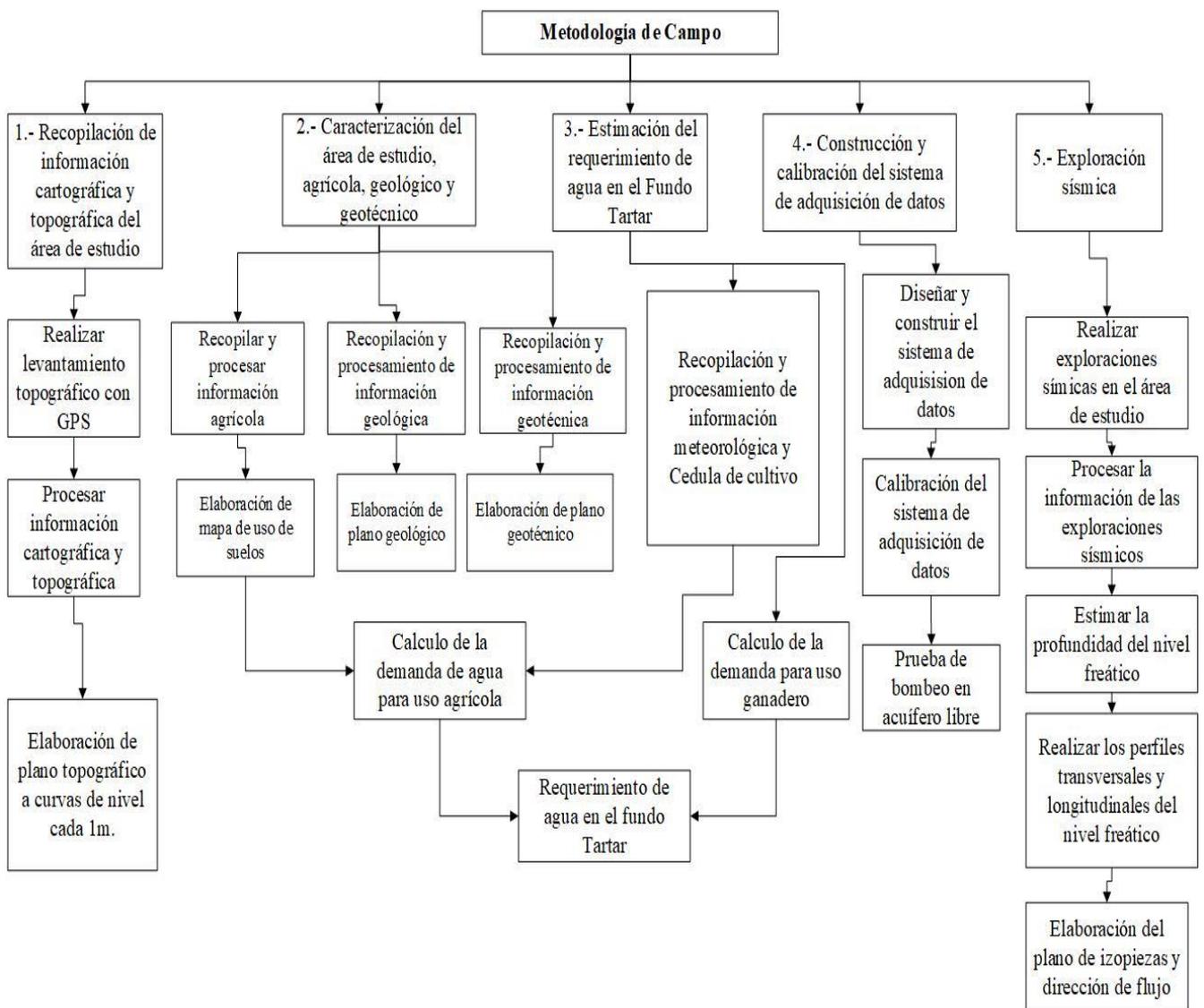
3.4 FASE PRELIMINAR DE LA INVESTIGACIÓN

La fase de preliminar consta de la recopilación de información que consiste en conformar el fundamento teórico de la investigación, como también nos permite realizar un

plan y cronograma de trabajo, para la redacción del marco teórico que se realizó una exhaustiva investigación tanto de libros en español y de diferentes autores nacionales e internacionales, investigaciones realizadas en el medio local, nacional e internacional, artículos científicos y revistas, para la elaboración de la fase de investigación se realizó visitas a campo donde se recopila información topográfica mediante el uso de GPS, inventario de agua superficial, así como los sondeos sísmicos respectivos.

3.5 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Figura 38:Diagrama de flujo de la metodología de trabajo



3.5.1 Recopilación de información cartográfica y topográfica del área de estudio

3.5.1.1 Levantamiento topográfico

Se realizó un levantamiento topográfico del área de estudio usando un GPS Garmin eTrex, de alta sensibilidad, tomando 256 puntos en el sistema UTM WGS84 en todo el perímetro y zonas de importancia como pozos artesanales, áreas cultivadas, accesos, establos, ubicados dentro del área del fundo Tartar. Se utilizó el software Civil 3D para realizar el plano topográfico con curvas a nivel cada 1m, esto para realizar los mapas de izopiezas y dirección de flujo.

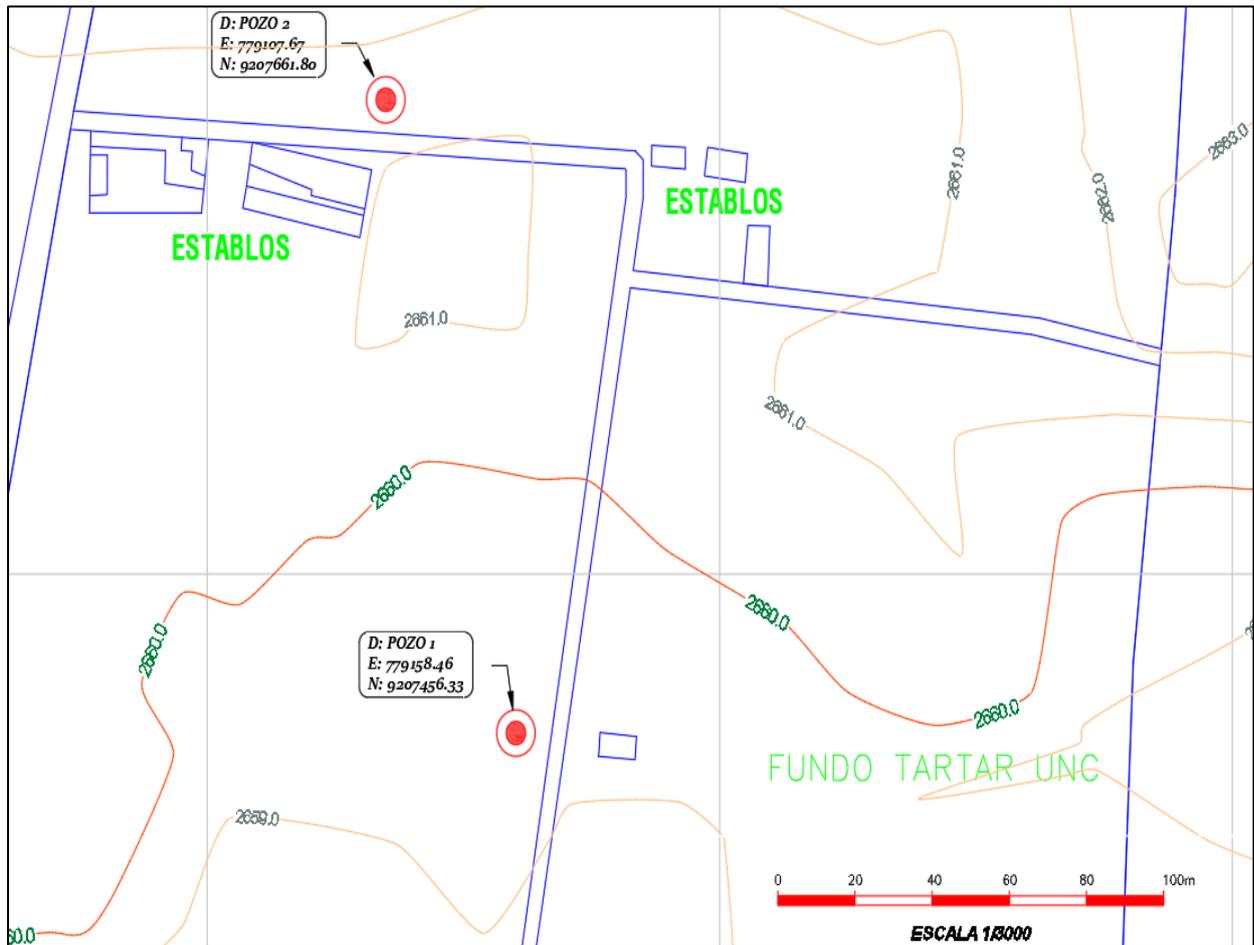
Figura 39: Levantamiento topográfico con GPS (06/05/2023)



3.5.1.2 Plano topográfico del Fundo Tartar-UNC

El plano topográfico se elaboró con una precisión de 1m, utilizando el software AutoCAD Civil 3D, donde está la ubicación de caminos, parcelas, establos y pozos artesanales.

Figura 40: Topografía del Fundo Tartar-UNC, zona de pozos artesanales.



3.5.2 Caracterización agropecuaria, geológica y geotécnica

3.5.2.1 Recopilar y procesar información agropecuaria

El fundo tartar predio que pertenece a la universidad nacional de Cajamarca, esta administrado por las escuelas de agrónoma y veterinaria, el cual tiene parcelas sembradas de papa, hortalizas, alfalfa y pasto (rye Grass), también existen bebederos usados para las vacas que están en el predio.

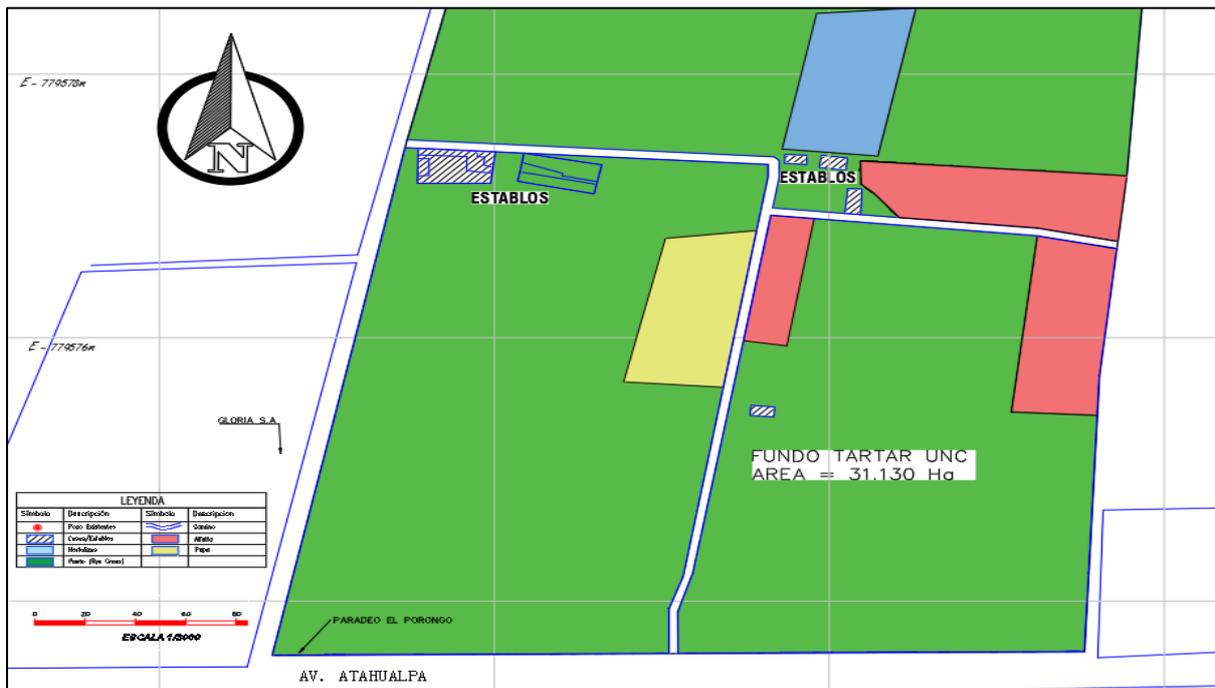
Figura 41: Caracterización agropecuaria del fundo tartar (06/05/2023)



a. Elaboración del plano de uso de suelos

La elaboración del plano de uso de suelos se realizó en el software Civil3D, el cual esta detallado las áreas y ubicaciones de los cultivos distribuidos en el fundo tartar.

Figura 42: Plano de uso de suelos en el fundo Tartar-UNC



3.5.2.2 Recopilar y procesar información geológica

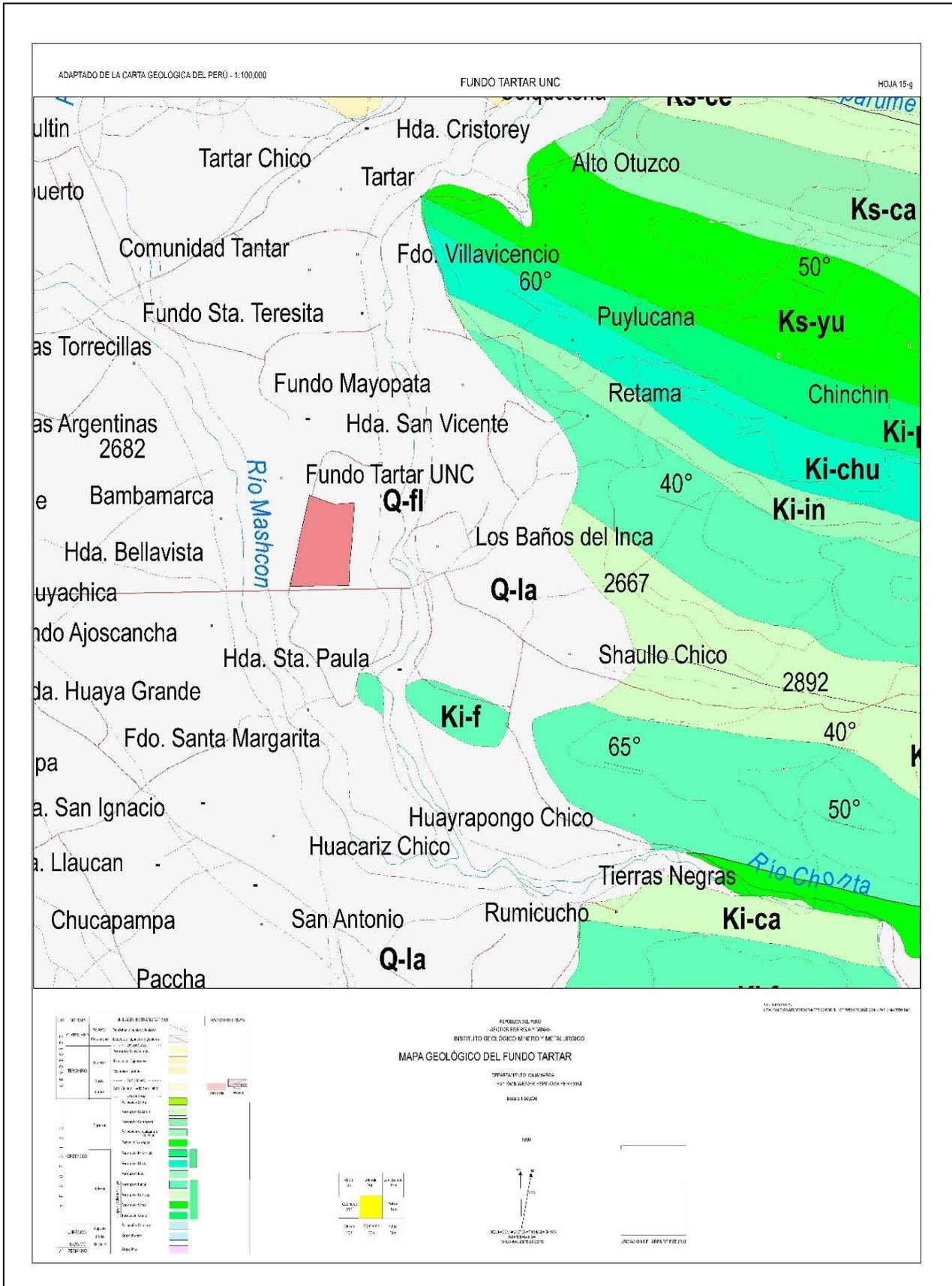
La información geológica se obtuvo de la carta geológica 15-g del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú, para el área de estudio son depósitos procedentes de la sedimentación fluvial y coluvial, depósitos deltaicos, depósitos no consolidados de relleno de fosas tectónicas y cuencas sedimentarias en general, depósitos procedentes de agentes de sedimentación y transporte eólico, depósitos de arroyos efímeros en las zonas costeras y depósitos procedentes de agentes de sedimentación y transporte glacial, esto lo podemos verificar en, (Fcihs. 2009).

Geológicamente el fundo Tartar pertenece a la era del Cenozoico, unidad estratigráficamente es reciente para los depósitos aluviales y fluviales, además para el Pleistoceno pertenecen los depósitos lagunares y glaciares.

Los suelos del valle de la ciudad de Cajamarca principalmente son: Depósitos que fueron arrastrados por las corrientes, depósitos de antiguos lagos, depósito glacial, depósitos por la erosión de los vientos y depósitos generados por la gravedad terrestre (Romero, 2019).

La elaboración del plano geológico se realizó en el software ArcGIS, tomando la información de la carta 15-g y recortando el área de interés, en esta investigación el área del fundo Tartar, en la figura 43 se observa el mapa geológico.

Figura 43: Plano geológico del fundo tartar



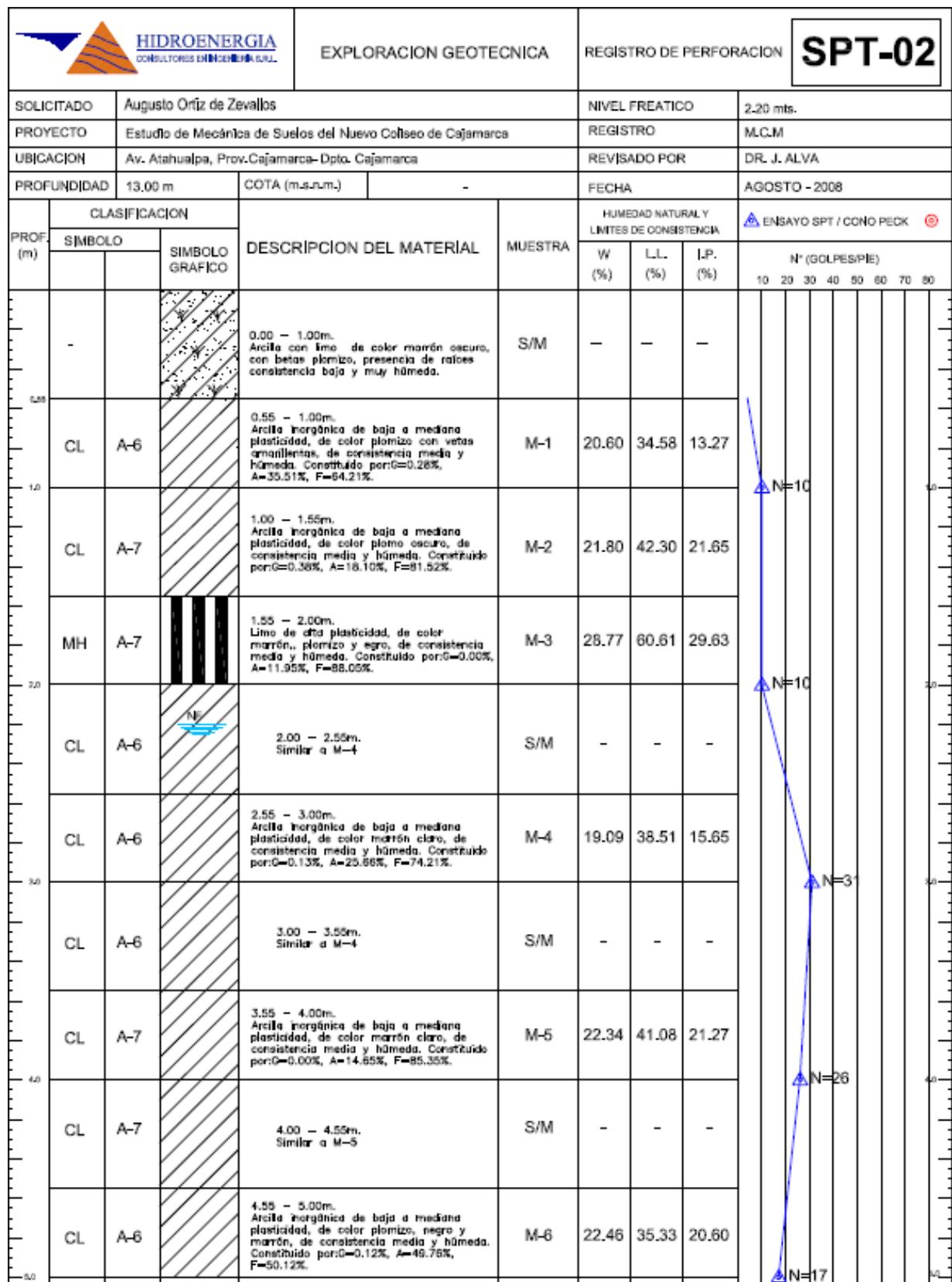
3.5.2.3 Recopilar y procesar información geotécnica

La información para la caracterización geotécnica se obtuvo de los estudios realizados en agosto de 2008 para el análisis de la mecánica de suelos del coliseo de Cajamarca. Estos estudios se llevaron a cabo a escasos metros del área de interés y, geológicamente, muestran características similares. La zona se encuentra en la misma era geológica, sistema y unidad estratigráfica típica del valle de Cajamarca, compuesta por depósitos aluviales y fluviales, así como depósitos lagunares y glaciares.

De acuerdo con los ensayos de penetración estándar (SPT) presentados en la figura 44, se observa que en los primeros metros del suelo (0 a 1m) se encuentra una capa de suelo arcilloso con limo de color marrón oscuro. Esta capa continua hasta los 1.55 metros, donde la arcilla cambia a una de baja a mediana plasticidad, presentando un color plomo oscuro. A partir de los 1.55 metros hasta los 2 metros de profundidad, se encuentra una capa de limo de alta plasticidad, de color marrón plumizo y negro. A una profundidad de 2.24 metros se localiza el nivel freático, el cual muestra profundidades similares a las del área de estudio y un suelo caracterizado como M-4, compuesto por arcilla inorgánica de baja a mediana plasticidad y de color marrón claro. Estos resultados son fundamentales para comprender las características del suelo y su comportamiento ante cargas y movimientos, lo que permitirá tomar decisiones adecuadas en el diseño y construcción de estructuras en la zona.

Además, la información obtenida a través de estos estudios proporciona una base sólida para el desarrollo de estrategias de ingeniería geotécnica y la implementación de medidas de mitigación de riesgos en proyectos de construcción y desarrollo urbano en la región de Cajamarca. La comprensión detallada de las propiedades del suelo y su comportamiento bajo diversas condiciones de carga es esencial para garantizar la seguridad y la estabilidad de las estructuras y edificaciones en la zona.

Figura 44: Perfil geotécnico del ensayo en el estudio de mecánica de suelos del nuevo coliseo de Cajamarca



3.5.3 Estimación del requerimiento de agua en el fondo Tartar

3.5.3.1 Cálculo de la demanda de agua para uso agrícola

a. Cálculo de la evapotranspiración potencial

El cálculo de la ETo se realizó con el método de Penman-Monteith, ya que es uno de los métodos más precisos para estimar la ETo, este método tiene en cuenta múltiples variables climáticas, como la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del viento y la presión atmosférica. Esto permite una estimación más precisa de la ETP, ya que considera la influencia de diferentes factores climáticos en el proceso de evapotranspiración. Dichos datos fueron obtenidos de la estación meteorológica Weberbauer.

Tabla 3: Información climática resumida y cálculo de la evapotranspiración potencial (ETo).

MES	T° Min	T° Max	Humedad	Viento	Sol	Radiación	ETo	
	°C	°C					(mm/día)	(mm/mes)
Enero	9.15	21.57	70	1.3	5.30	4.30	0.69	21.39
Febrero	9.66	21.27	72	1.2	4.70	6.20	1.05	29.40
Marzo	9.54	21.25	72	1.1	4.50	9.30	1.77	54.87
Abril	8.89	21.51	71	1.0	5.30	13.50	2.62	78.60
Mayo	6.93	21.93	68	1.0	6.40	17.30	3.39	105.09
Junio	5.49	21.88	64	1.2	6.90	19.00	3.79	113.70
Julio	4.88	21.71	61	1.5	7.40	19.00	3.82	118.42
Agosto	5.56	22.10	61	1.6	7.10	16.40	3.35	103.85
Setiembre	7.11	22.10	64	1.4	5.70	11.50	2.34	70.20
Octubre	8.13	22.24	66	1.3	5.40	7.60	1.44	44.64
Noviembre	8.03	21.99	65	1.4	6.10	5.20	0.85	25.50
Diciembre	8.75	21.87	68	1.3	5.70	3.50	0.75	23.25
PROMEDIO	7.7	21.8	66.9	1.30	5.88	11.1	2.16	65.74

b. Coeficiente de uso consuntivo (Kc)

La distribución de áreas de cultivo en el fundo Tartar **tabla 4**, que se obtuvo del plano de uso de suelos es de 1.44 ha de papa lo que equivale a 4.63 %, hortalizas 0.63 ha que es 2.02 %, alfalfa 2.42 ha es el 7.77% y pastizales como rye Grass un 80.18% que es un área de 24.96 ha.

Tabla 4: Distribución de áreas en el fundo Tartar

Descripción	Área	porcentaje	Descripción	Área	Porcentaje
Establos	0.27 Ha	0.87%	Caminos	0.47 Ha	1.51%
Hortalizas	0.63 Ha	2.02%	Alfalfa	2.42 Ha	7.77%
Pasto (rye Grass)	24.96 Ha	80.18%	Papa	1.44 Ha	4.63%

Este coeficiente Kc depende de que se está cultivando en el fundo Tartar, en la **tabla 5**, se muestran los coeficientes Kc y el coeficiente ponderado.

Tabla 5: Calculo del (Kc) promedio mensual para los cultivos en el fundo Tartar

CEDULA DE CULTIVO		MESES											
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Cultivo	Ha												
Pasto natural+ RYE Grass	24.96	24.96	24.96	24.96	24.96	24.96	24.96	24.96	24.96	24.96	24.96	24.96	24.96
	Kc	1.13	0.52	0.78	0.52	0.78	1.11	1.15	1.13	0.52	0.78	1.11	1.15
Papa	1.44								1.44	1.44	1.44	1.44	1.44
	Kc								0.70	0.97	1.18	1.16	0.72
Hortalizas	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63		
	Kc	0.80	0.82	0.87	0.96	1.04	1.11	1.16	1.17	1.12	0.98		
Alfalfa	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42	2.42
	Kc	0.65	0.75	0.85	1.00	1.10	1.13	1.12	1.08	1.00	0.90	0.80	0.65
Total, Ha	29.45	28.01	28.01	28.01	28.01	28.01	28.01	28.01	29.45	29.45	29.45	28.82	28.82
Kc Ponderado		1.08	0.55	0.79	0.57	0.81	1.11	1.15	1.11	0.59	0.81	1.09	1.09

c. Precipitación Confiable (PP75%)

El agua en forma de lluvia es la precipitación, cuyas cantidades cambian de mes a mes y de año a año. Por lo tanto, es crucial determinar el valor de la precipitación mensual que ocurre con un 75 % de persistencia o precipitación confiable, las precipitaciones son obtenidas de la estación weberbauer con un periodo de 45 años desde el año 1978-2022.

Tabla 6: Calculo de la persistencia al 75% de precipitaciones usando Weibull.

Precipitaciones - P(mm): Weberbauer													
Orden	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROB
1	191.20	242.70	257.00	144.90	75.80	25.10	27.60	29.40	81.40	130.40	120.30	168.10	2.17%
2	184.70	233.60	245.00	129.50	69.50	24.60	23.40	20.90	56.60	124.80	119.90	162.70	4.35%
3	180.70	186.50	230.20	120.20	65.60	23.90	22.10	18.70	53.50	121.80	111.00	140.40	6.52%
4	154.20	162.30	213.60	111.50	62.60	22.80	13.90	18.30	51.40	117.20	109.40	129.40	8.70%
5	116.90	158.80	202.20	105.70	53.70	22.30	13.80	15.80	47.10	111.90	99.90	123.70	10.87%
6	116.60	152.90	199.30	102.90	53.00	21.20	13.20	15.70	43.90	110.70	99.60	122.60	13.04%
7	109.70	134.70	182.40	102.00	51.50	17.90	12.30	14.60	40.80	108.80	99.10	122.30	15.22%
8	103.00	133.30	172.70	99.10	50.10	16.70	11.80	13.40	39.50	106.60	97.60	118.40	17.39%
9	101.80	126.40	170.20	95.90	48.10	15.60	10.80	12.70	37.30	106.30	97.60	114.90	19.57%
10	100.80	124.00	159.70	95.60	47.20	15.40	10.70	12.30	36.70	96.50	97.40	111.30	21.74%
11	99.00	116.50	154.00	88.70	42.40	15.40	10.70	12.30	34.70	92.30	93.40	109.70	23.91%
12	98.20	112.90	152.80	88.40	42.20	15.10	9.60	11.70	34.40	90.30	92.60	106.70	26.09%
13	95.40	112.20	143.20	85.40	40.50	12.00	8.30	10.80	33.60	87.60	89.80	104.10	28.26%
14	94.80	108.30	138.90	83.90	39.50	10.80	7.50	10.60	33.60	86.90	77.00	97.10	30.43%
15	87.00	107.30	138.60	80.00	38.20	10.50	7.20	10.60	32.90	83.30	74.30	90.90	32.61%
16	84.90	105.50	136.60	78.80	38.20	10.10	5.70	10.00	31.20	80.90	72.20	87.80	34.78%
17	84.40	103.10	133.70	78.80	37.40	9.80	4.80	8.90	28.90	79.60	71.40	87.40	36.96%
18	84.10	102.90	133.10	78.60	35.30	9.10	4.60	7.10	27.80	78.50	68.80	86.10	39.13%
19	83.20	102.00	126.40	78.10	31.60	8.80	4.50	6.70	27.70	76.20	67.30	84.10	41.30%
20	82.90	101.60	126.30	77.60	31.10	8.60	4.40	6.60	27.40	69.40	66.20	81.70	43.48%
21	80.20	100.80	125.20	77.30	30.70	7.80	4.40	6.40	25.10	68.60	65.20	80.70	45.65%
22	78.20	98.00	123.80	77.20	30.60	7.50	3.50	6.10	25.00	65.30	63.80	76.40	47.83%
23	77.50	95.20	121.30	73.80	30.20	7.30	3.30	5.90	24.40	64.00	63.20	74.20	50.00%
24	76.60	90.00	120.10	73.30	29.00	6.60	3.20	4.70	23.70	63.40	60.40	72.30	52.17%
25	75.70	85.30	118.40	72.80	26.90	5.40	3.20	3.90	22.00	61.80	60.40	71.90	54.35%
26	71.70	81.60	117.30	65.00	24.90	5.00	2.60	3.90	21.20	60.00	58.30	70.80	56.52%
27	65.20	75.70	113.50	63.00	23.00	4.80	2.30	3.80	20.10	51.80	58.30	69.40	58.70%
28	63.80	74.60	110.50	57.20	22.70	4.50	2.30	3.50	19.20	50.80	55.10	68.80	60.87%

29	61.50	73.30	107.90	56.90	20.60	4.00	2.10	3.40	19.10	50.00	54.00	68.80	63.04%
30	61.00	72.30	105.70	56.20	19.60	3.90	2.10	2.90	19.00	46.20	52.50	63.40	65.22%
31	52.60	68.50	103.60	55.20	18.90	3.30	2.10	2.70	17.80	46.00	50.90	63.10	67.39%
32	51.10	67.30	96.80	54.00	18.80	3.00	2.00	2.50	15.60	43.60	50.50	61.50	69.57%
33	49.50	61.40	90.70	52.20	17.90	2.30	1.80	1.30	14.80	43.40	47.10	58.30	71.74%
34	46.90	60.00	75.70	50.40	17.00	2.10	1.80	1.20	14.60	37.20	45.70	51.90	73.91%
35	46.00	55.40	75.70	49.70	16.70	1.90	1.30	1.10	13.90	33.20	45.60	51.80	76.09%
36	44.70	54.30	69.50	46.50	16.30	1.80	1.20	0.70	11.90	31.50	44.50	50.00	78.26%
37	43.80	53.70	66.60	44.50	16.20	1.70	0.80	0.40	11.80	28.20	32.00	47.90	80.43%
38	40.50	50.90	65.00	42.10	14.70	1.60	0.60	0.30	11.60	27.20	30.00	46.60	82.61%
39	38.20	47.70	58.30	41.90	13.70	1.40	0.50	0.20	11.50	26.50	29.10	45.70	84.78%
40	36.10	42.40	56.90	40.40	10.60	0.80	0.50	0.10	10.60	24.40	28.10	44.80	86.96%
41	34.90	42.40	48.80	37.10	9.10	0.80	0.40	0.00	10.20	24.40	26.30	40.30	89.13%
42	27.00	34.40	44.80	37.00	7.70	0.70	0.20	0.00	7.60	21.70	24.40	39.50	91.30%
43	24.70	31.80	39.20	33.70	7.20	0.60	0.00	0.00	3.70	16.80	23.90	34.10	93.48%
44	24.60	31.20	37.20	29.30	7.00	0.40	0.00	0.00	2.30	12.70	17.00	34.10	95.65%
45	12.70	17.50	26.50	27.40	6.90	0.40	0.00	0.00	1.30	9.90	16.10	2.70	97.83%
PROM	78.63	95.40	123.00	71.99	31.34	8.78	5.98	7.16	26.19	65.97	65.05	80.85	100%

Para el cálculo se utilizó la probabilidad empírica de Weibull, para obtener la persistencia al 75% se interpoló los datos y se obtuvo las precipitaciones al 75 % que están en la **tabla 7**.

Tabla 7: *Precipitación al 75% de persistencia*

Precipitaciones - P(mm):												
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	PROB
46.45	57.7	75.7	50.05	16.85	2	1.55	1.15	14.25	35.2	45.65	51.85	75%

d. Cédula de cultivo y dotación de agua

Tabla 8: Cédula de cultivo y dotación de agua (Área=29.45 Ha)

PARAMETRO	UNIDAD	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1. Evotransp Potencial	(mm/día)	0.69	1.05	1.77	2.62	3.39	3.79	3.82	3.35	2.34	1.44	0.85	0.75	
2. Kc ponderado		1.08	0.55	0.79	0.57	0.81	1.11	1.15	1.11	0.59	0.81	1.09	1.09	
3. Evotranp. Real o Uso consuntivo (1*2)	(mm/día)	0.75	0.57	1.39	1.50	2.76	4.21	4.38	3.70	1.39	1.17	0.92	0.81	
4. Precipitación Efectiva	(mm/día)	1.50	2.06	2.44	1.67	0.54	0.07	0.05	0.04	0.48	1.14	1.52	1.67	
5. Déficit de Humedad (3-4)	(mm/día)	0.00	0.00	0.00	0.00	2.21	4.15	4.33	3.67	0.92	0.04	0.00	0.00	
6. Eficiencia de riego	(%)	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	
7. N° días del mes	(días)	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	365.00
8. Requerimiento de agua (5/6)	(mm/día)	0.00	0.00	0.00	0.00	3.88	7.28	7.60	6.43	1.61	0.06	0.00	0.00	
	(m3/ha/día)	0.00	0.00	0.00	0.00	38.85	72.75	76.03	64.33	16.06	0.64	0.00	0.00	
	(m3/ha/mes)	0.00	0.00	0.00	0.00	1,204.21	2,182.52	2,357.06	1,994.37	481.90	19.71	0.00	0.00	8,239.78
9. Área total sembrada	(has)	28.01	28.01	28.01	28.01	28.01	28.01	28.01	29.45	29.45	29.45	28.82	28.82	
10. Módulo de Riego	(l/s/ha)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.45	0.84	0.88	0.74	0.19	0.01	0.00	0.00	
11. Caudal Unitario	(l/s)	0.00	0.00	0.00	0.00	12.59	23.58	24.65	21.93	5.48	0.22	0.00	0.00	
12. Volumen demandado	m3/mes	0.00	0.00	0.00	0.00	33,730.04	61,132.30	66,021.39	58,734.25	14,192.10	580.46	0.00	0.00	234,390.53
13. Volumen demandado por Ha	m3/ha	7,958.93												

3.5.3.2 Cálculo de la demanda de agua para uso ganadero

Para el cálculo del agua demandada para uso ganadero, en el Fundo Tartar de la Universidad Nacional de Cajamarca, se tiene 18 vacas lecheras y 14 vacas secas, de donde haciendo los cálculos con los datos de la **Tabla 2** con una temperatura promedio de 21 °C.

$$Q = 18vaca \left(64 \frac{L}{dia * vaca} \right) + 14vaca \left(37 \frac{L}{dia * vaca} \right)$$

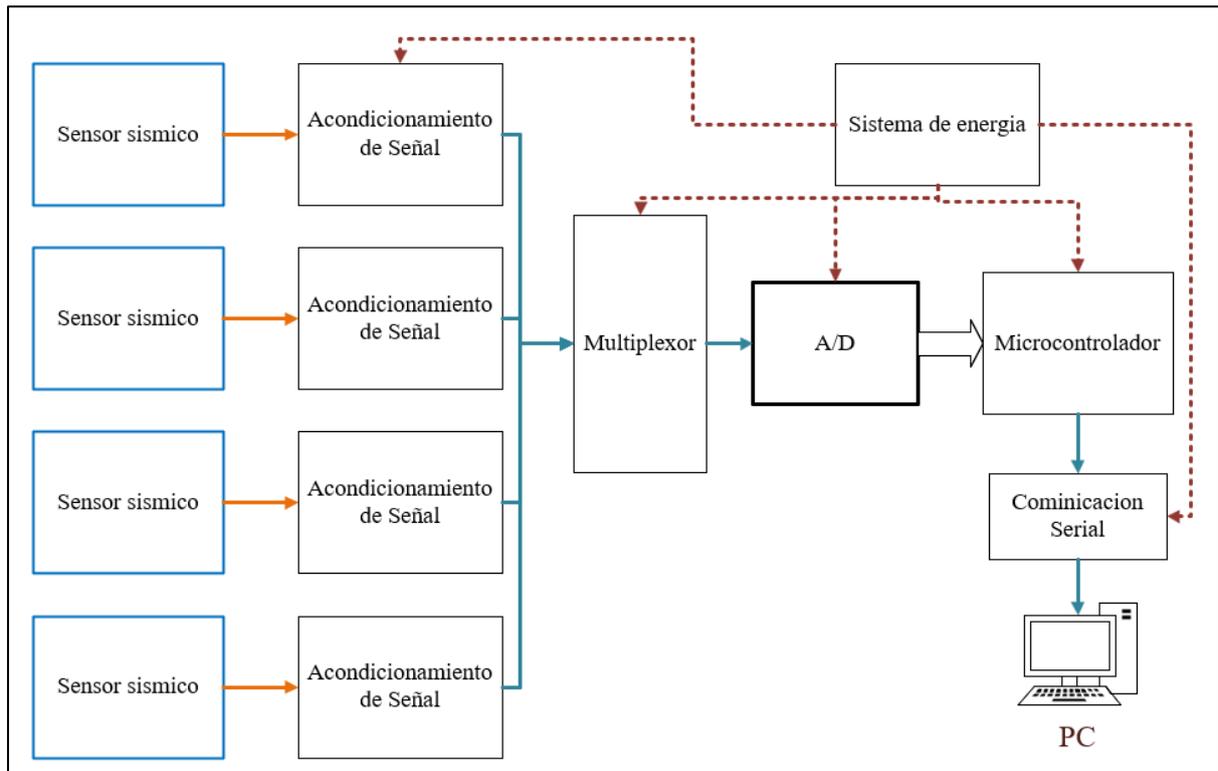
$$Q = 1670 L/dia$$

3.5.4 Construcción y calibración del sistema de adquisición de datos

3.5.4.1 Diseñar y construir el sistema de adquisición de datos

El equipo con el que se realizó la adquisición y almacenamiento de información (sismógrafo), fue diseñado por el tesista en su totalidad, las características técnicas son las siguientes; consta de cuatro geófonos verticales de 4.5Hz con factor de amortiguamiento 0.56, la unidad de acondicionamiento de señal y el convertidor analógico-digital AD7738, administrados por un microprocesador stm32f401re y el esp32 el cual se encarga de enviar datos mediante comunicación serial, un cable de cuatro canales para conectar los geófonos al equipo, y una batería de 12V.

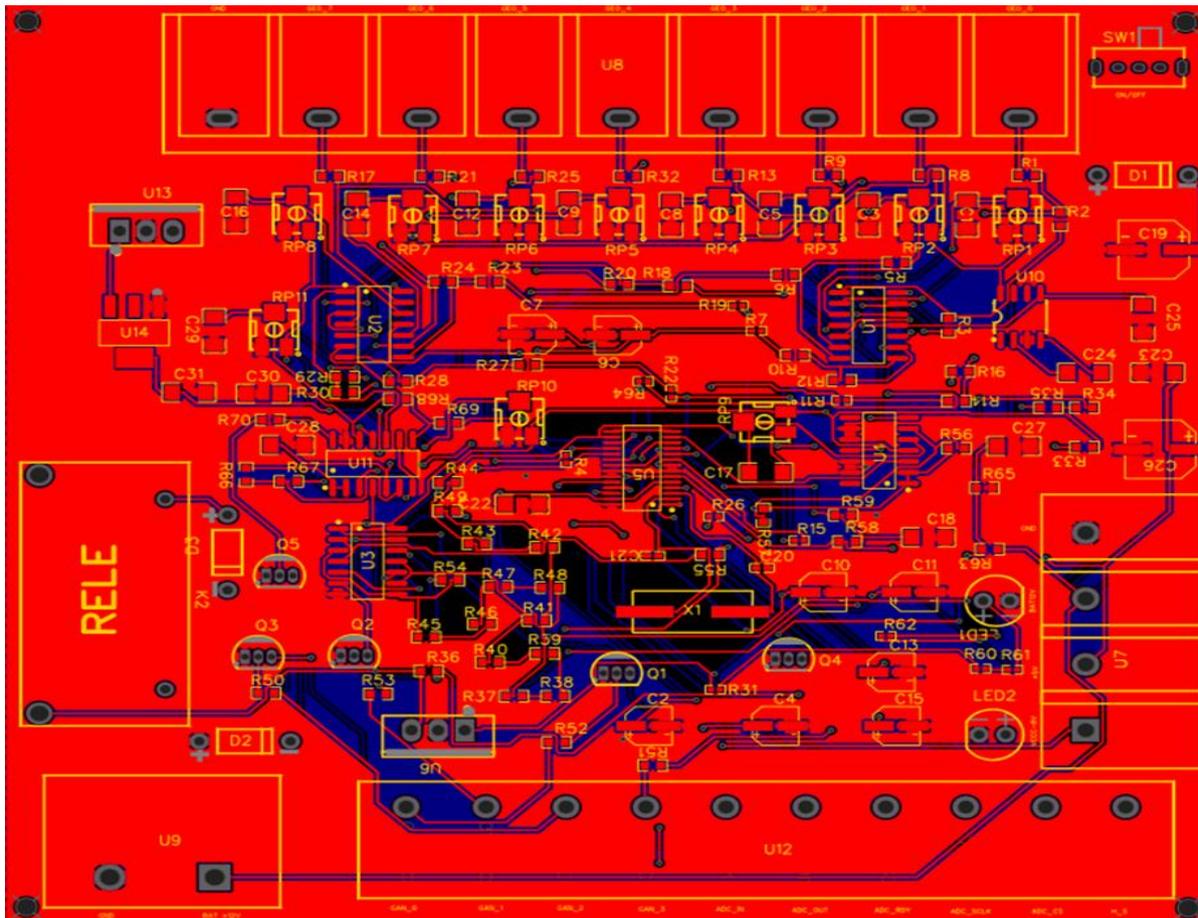
Figura 45: Esquema de bloques del Sistema de adquisición de señales sísmicas



La fuente sísmica utilizada fue una masa de 20lb y una placa de acero, con esta fuente se estima que el alcance de prospección es de una profundidad entre 30m y 40m, dicha profundidad es suficiente para este estudio ya que en las medidas directas del nivel freático mediante wincha en los pozos artesanales que se encuentran en el predio se llegó a determinar que está a una profundidad de 3.11 m en el pozo 1 y en el pozo 2 de 2.7m.

El diseño del esquema eléctrico y el diseño de la PCB se realizó con el software EasyEDA, el código para el manejo del AD está escrito en lenguaje C, que esta implementado en el microcontrolador Arm Cortex-M4 encargado de administrar el sistema de adquisición de señales, en la figura 46 se muestra la PCB.

Figura 46: PCB del sistema de adquisición de señales sísmicas



El equipo completo consta de una masa de 24 lb, una placa de acero, cuatro geófonos verticales de 4.5 Hz y un cable multicanal para la conexión de geófonos. Además, incluye el sistema de adquisición de señales sísmicas, compuesto por un convertidor analógico-digital AD7738, que cuenta con un multiplexor para muestrear la señal simultáneamente, y un microcontrolador. También se requiere una laptop para el procesamiento de los datos. En la Figura 47 se observa al tesista junto al equipo completo, listo para realizar las mediciones necesarias. La combinación de estos elementos proporciona una plataforma completa y efectiva para llevar a cabo estudios geofísicos con precisión y fiabilidad, lo que resulta fundamental en la investigación.

Figura 47: Equipo utilizado para la adquisición de información sísmica (10/07/2023)

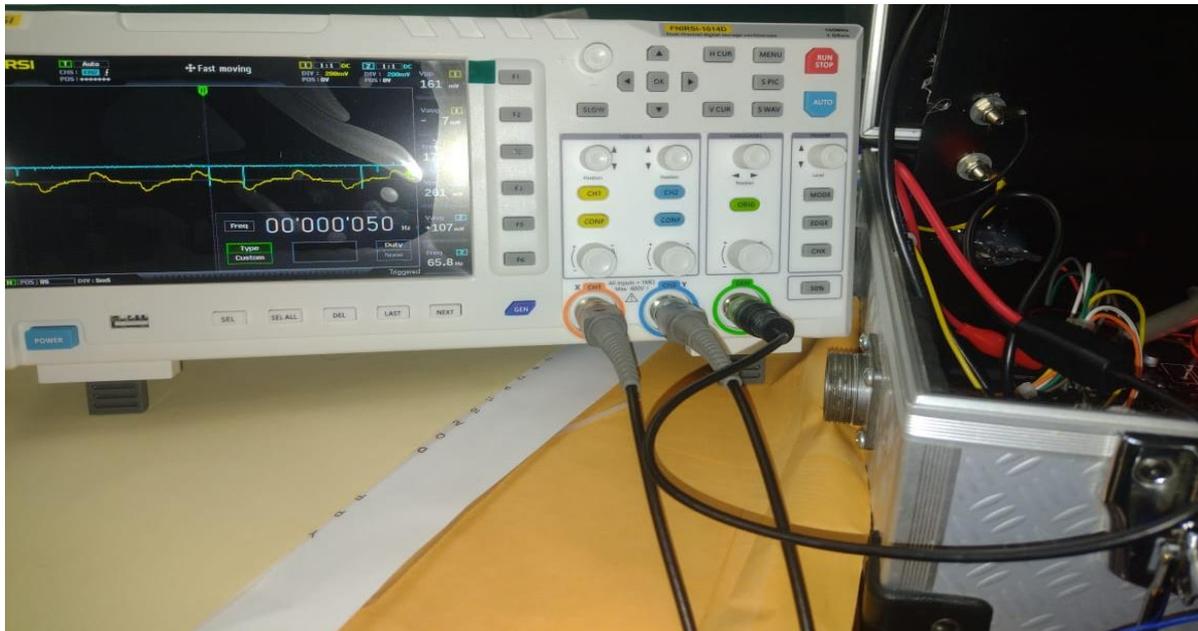


3.5.4.2 Calibración del sistema de adquisición de datos

a. Calibración electrónica

La calibración electrónica consistió en la conexión de el generador de la señal(geófono), luego con el osciloscopio digital FINIRSI 1014D con el que se mide la respuesta en frecuencia y calidad de señal amplificada que llega al convertidor analógico digital A/D luego para el correcto monitoreo de los datos enviados del A/D al microcontrolador mediante el protocolo SPI se utilizó el analizador lógico de 8 canales de 24MHZ suficiente para la configuración utilizada en el circuito de adquisición de información sísmica.

Figura 48: Calibración del equipo de adquisición de información sísmica mediante osciloscopio (25/06/2023)



La calibración se realizó para las diferentes frecuencias desde 4.5 Hz hasta los 50 Hz que es un ancho de banda suficiente para este equipo que está monitorizando señales de baja frecuencia.

b. Calibración en el área de trabajo

Los pozos artesanales de calibración se han denominado Pozo 1 con coordenadas UTM WGS84, Este:779158.16 Norte: 9207455.40, Altura:2659 m y el Pozo 2 con coordenadas UTM WGS84, Este: 779108.15, Norte: 9207657.57, Altura:2661, estos pozos posos sirvieron para calibración del modelo, tanto en las equidistancias (ófssets) óptimas como en la calidad y resolución de datos obtenidos, ya que se realizó una mediada directa del nivel freático y luego se comparó con los datos obtenidos de los ensayaos en cada pozo.

1) Sondeo de calibración Pozo 1 y Pozo 2

En los pozos 1 y 2 que están alejados 217.36 m, ubicados de tal manera que se obtendrán datos representativos, se realizó sondeos con diferentes equidistancias de 3m,4 y 5m para obtener el offset correcto, como también la variación de la profundidad medidas directamente con wincha al nivel estático y comparados con los datos obtenidos de los ensayos, la finalidad y utilidad de estos datos son esenciales para los demás ensayos que se llevaran a cabo en todo

el área de estudio en la figura 49 , se observa la mediada del nivel freático que fue de **2.43 m** en el pozo 1 y **2.65 m** en el pozo 2 en el mes de agosto del año 2023.

Figura 49: Toma de medidas del nivel freático en el fundo Tartar (16/08/2023)



Los ensayos sísmicos de calibración se realizaron de la misma manera en los dos pozos los cuales se muestran en la tabla 9, y en la fotografía la disposición de los sensores en las inmediaciones del pozo 1.

Figura 50: Sondeo de Calibración en el pozo 1 (11/08/2023)



En la tabla 9, se observan los datos obtenidos en los ensayos sísmicos de calibración, donde las equidistancias o offests fueron variados desde 3 m hasta los 5 m tanto para el pozo 1 y 2.

Tabla 9: Sondeos de calibración en los pozos 1 y2

Ensayo	Equidistancia (m)	Onda	Velocidad (m/s)	Tiempo intercepto (s)	Profundidad (m)
Pozo 1	3	V1	143.26	-	
		V2	199.47	0.019	2.65
	4	V1	118.27	-	
		V2	239.84	0.038	2.58
	5	V1	155.62	-	
		V2	203.33	0.02	2.41
Pozo 2	3	V1	102.62	-	
		V2	262.89	0.038	2.51
	4	V1	98.33	-	
		V2	295.025	0.053	2.71
	5	V1	96	-	
		V2	126.103	0.053	3.03

2) Selección óptima de equidistancias entre geófonos (offset)

Las frecuencias bajas son útiles para medir la velocidad de la onda a mayor profundidad, mientras que las altas son más efectivas en menor profundidad. Los arreglos largos reducen la precisión lateral. Las distancias cortas capturan frecuencias bajas, influenciadas por el campo cercano, mientras que las distancias largas registran frecuencias altas, afectadas por ondas de cuerpo. El objetivo es encontrar el arreglo óptimo que brinde alta resolución lateral y cubra un amplio rango de frecuencias. (Heisey , 1982).

para la correcta selección de las equidistancias o offsets se tienen que tener en cuenta tres parámetros importantes, la distancia de la fuente al receptor, la distancia entre los geófonos y la longitud total (arreglo) que cubrir con los geófonos, el primer parámetro no tiene mucha influencia significativa en la resolución de la señal, La longitud del arreglo puede influir en la resolución de dos maneras: Mayores valores del arreglo resultan en una mayor resolución, pero

una longitud excesiva conlleva el problema de distorsión en la señal. Un mayor número de geófonos resulta en una resolución más alta. Sin embargo, un muestreo espacial excesivo también conlleva el problema de distorsión de la señal. Esto se ilustra en un caso real obtenido de 60 canales (Park, 2001).

El criterio para la ubicación y distribución se realizó teniendo en cuenta los resultados de la calibración del modelo, en donde los datos obtenidos de la medida directa con wincha y de la tabla 9 se demuestra que la equidistancia (offset) es de 4 m que se tiene los datos más exactos con una variación de 2 centímetros para el pozo 1 o de 6 centímetros para el pozo dos, que es el 0.82 % y el 2.64 % respectivamente.

3.5.4.3 Prueba de bombeo en acuífero libre

Con la finalidad de evaluar el acuífero y conocer el caudal de equilibrio para proyectar el número de pozos necesarios para cubrir la demanda agrícola y ganadera se realizó el ensayo en el pozo 2. Para ello se realizó el bombeo con una motobomba con diferentes caudales hasta llegar al caudal de equilibrio, se tomaron datos cada 10 min de la profundidad del nivel freático iniciando de una profundidad de 2.05 m, y llegando a una profundidad de 4.42 m, en un tiempo de 3.5 horas de bombeo, en la figura 33 se observa la motobomba utilizada para el ensayo y la toma de medidas del nivel freático.

El caudal de bombeo de equilibrio se logró realizando investigación en campo en donde se inició con un caudal constante a máxima potencia de 2.22 lt/s, luego con diferentes caudales, hasta llegar al caudal de 0.64 lt/s que es el caudal de equilibrio, los resultados están en la Tabla 13, este caudal mantiene estable el nivel freático a un bombeo constante y continuo.

Figura 51: Prueba de bombeo, izquierda motobomba de 2.2 lt/s, derecha tomando las medidas del nivel freático. (01/08/2023)



3.5.5 Exploración sísmica

3.5.5.1 Exploraciones sísmicas en el área de estudio

a. Distribución de los sondeos sísmicos de refracción (SSR)

La ubicación de los perfiles transversales y longitudinales de los sondeos sísmicos de refracción se traza mediante la disposición de 20 puntos estratégicamente distribuidos para cubrir la máxima área del fundo Tartar, propiedad de la Universidad Nacional de Cajamarca, tal como se muestra en la Figura 52. Esta distribución cuidadosamente planificada garantiza una cobertura completa y representativa del área de estudio, permitiendo una evaluación exhaustiva de las características del subsuelo. Además, la disposición estratégica de los puntos de muestreo facilita la interpretación precisa de los datos sísmicos obtenidos.

Figura 52: Mapa de distribución de los perfiles longitudinales y transversales.



b. Ensayos sísmicos de exploración

Se procedió a realizar el sondeo sísmico en los perfiles tanto longitudinales y transversales distribuidos en el fondo tartar, iniciando en el perfil transversal 1, terminando en el perfil longitudinal 4, el trabajo siguió los siguientes pasos:

- 1) Ubicar el perfil de trabajo, donde se realizará el ensayo sísmico
- 2) Colocar un cordel a lo largo del perfil en línea recta y medir con wincha la longitud total.
- 3) Ubicar la fuente y colocar la placa de acero que servirá para golpear con la masa de 20lb.
- 4) Medir desde la fuente al primer geófono, y colocar los demás geófonos a una equidistancia de 3m.
- 5) Conectar el trigger y ubicar el sistema de admisión de señales y la laptop, para luego conectar los geófonos.
- 6) Realizar el tiro y guardar los datos en el sistema de adquisición de señales.
- 7) Repetir el ensayo hasta cubrir toda la longitud del ensayo.

Figura 53: Sondeos sísmicos en los perfiles del fondo Tartar (12/08/2023)



3.5.5.2 Procesar la información de las exploraciones sísmicas

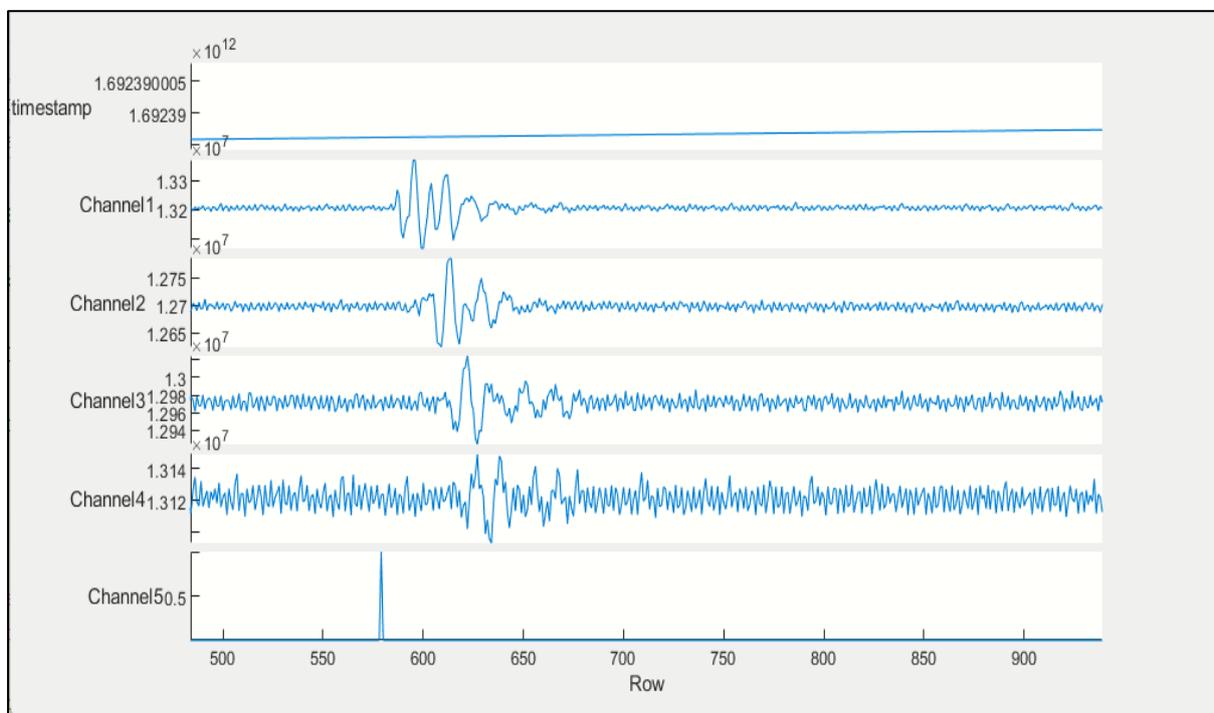
a. Preprocesamiento de las señales sísmicas

Cuando se obtiene las señales sísmicas estas necesitan ser preprocesadas, para corregir la amplitud, eliminar ruidos que son generadas por el medio ambiente y el equipo mismo, calcular tiempos desde la generación de las señales hasta la detección por medio de los geófonos este proceso sigue una serie de etapas a que se describirán a continuación.

1) Señales sísmicas sin procesamiento

Las señales sin procesamiento que cuentan con cuatro canales, una señal de trigger y la marca de tiempo temporal son las que se muestran en la figura 54, el trigger es el que marca el inicio de la generación de las vibraciones sísmicas, pasados algunos milisegundos se obtiene las vibraciones refractadas las cuales son detectadas por los geófonos, se puede notar un desfase de las señales con respecto del trigger esto se debe a la distancia que se encuentran los demás geófonos, esto da como producto una recta.

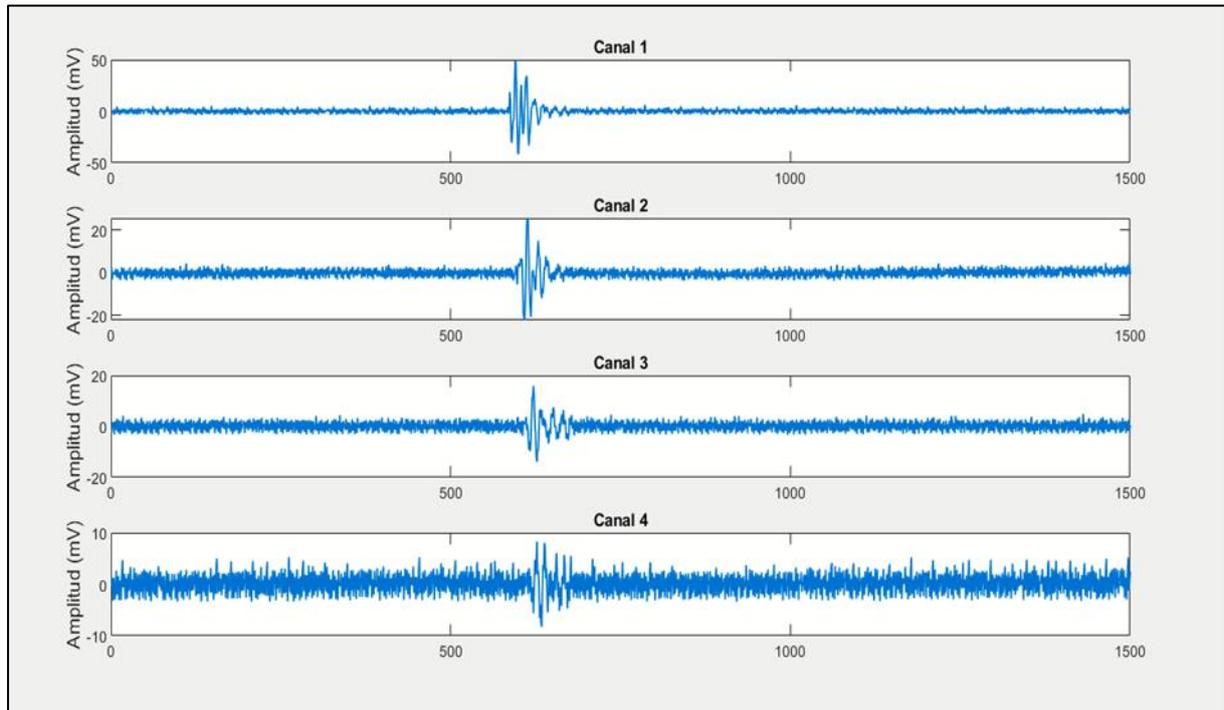
Figura 54: Datos sin procesamiento, cada geófono está a 4 m de equidistancia.



2) Señales sísmicas con ajuste de amplitud y centrado de la señal en cero

El ajuste de amplitud se realiza a las señales para verificar la intensidad de llegada de señal ya que el geófono utilizado es de 28 V/m/s lo que significa que generaría 28V a una velocidad de 1 m/s. de gran utilidad para tener como referencia cuando se obtengan las velocidades.

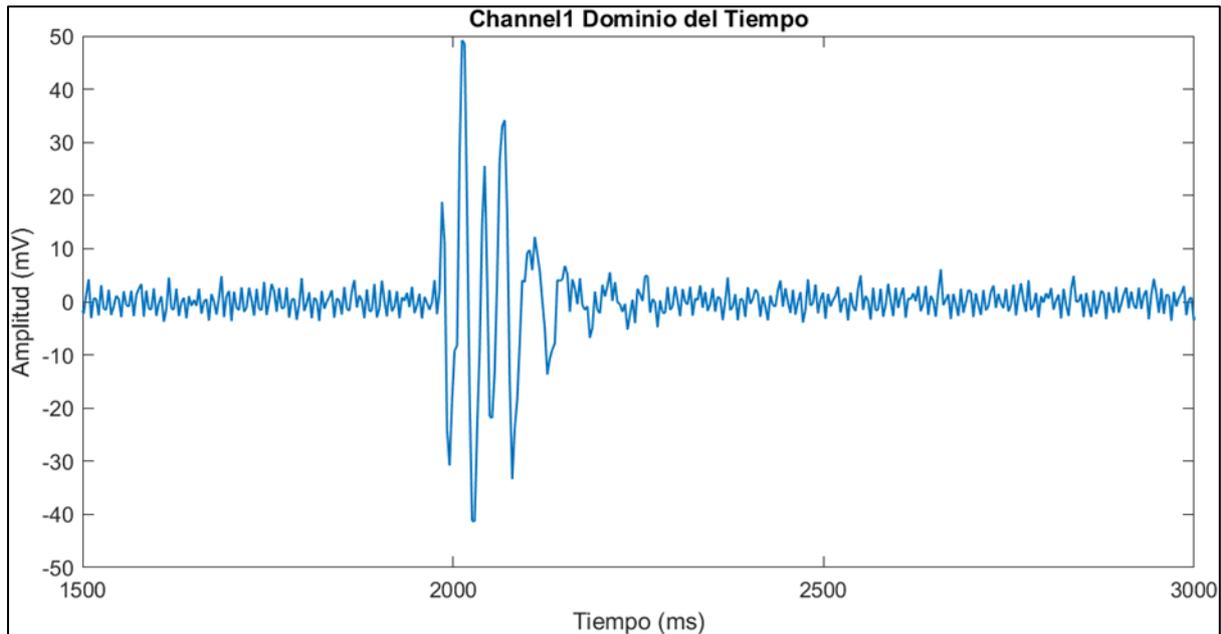
Figura 55: Señal con ajuste de amplitud y centrado en cero.



3) Señales sísmicas con ajuste de frecuencia de muestreo y tiempo

El ajuste de la frecuencia de muestreo nos permite referenciar las señales con el tiempo, el cual suele medirse en milisegundos. Esta precisión temporal es fundamental, ya que nos permite realizar cálculos precisos relacionados con las velocidades de las vibraciones sísmicas. Al ajustar adecuadamente la frecuencia de muestreo, aseguramos que capturamos suficientes puntos de datos en intervalos específicos de tiempo, lo que garantiza una representación fiel de las características de la señal sísmica. Este proceso es esencial para comprender la naturaleza y la intensidad de los eventos sísmicos, así como para tomar medidas adecuadas en términos de prevención y mitigación de riesgos ante posibles impactos sísmicos. Por lo tanto, el ajuste cuidadoso de la frecuencia de muestreo no solo mejora la precisión de nuestros cálculos, sino que también contribuye significativamente a una evaluación más completa y confiable de la actividad sísmica.

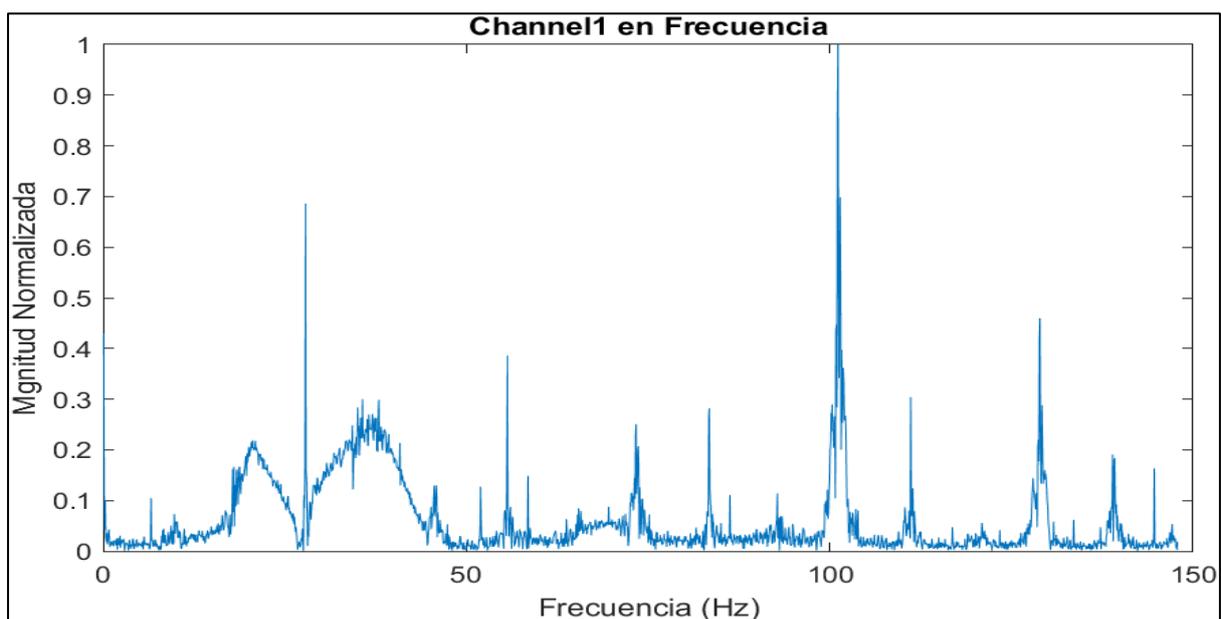
Figura 56: Señal ajustada en amplitud y tiempo con una frecuencia de muestreo de 295 Hz.



4) Transformar la señal al campo de la frecuencia aplicando FFT

Para atenuar parte de los ruidos de la señal presentes y que dificulten la correcta visualización del tiempo y el cambio de amplitud, se filtra la señal para eso se hace uso de la transformada rápida de Fourier, para pasarlo del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia y mediante filtro se atenúa las frecuencias que no formen parte de la señal.

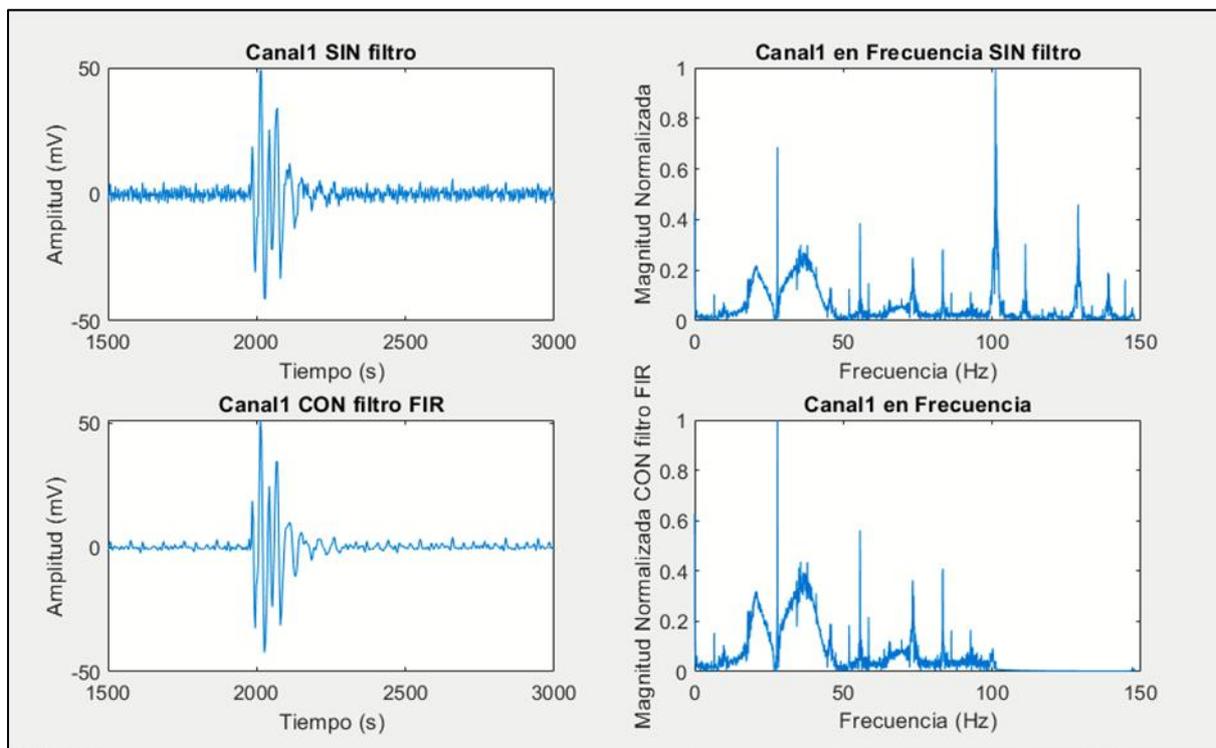
Figura 57: Señal sísmica transformada al dominio de la frecuencia



5) Filtrado de la señal para eliminar ruidos

La señal cuando se encuentra en el dominio del tiempo nos proporciona cierta información que es útil para calcular cuánto tardo la señal en ser detectada por los geófonos pero si se quiere eliminar señales no deseadas se tiene que pasar por un filtro y la manera de lograrlo es mediante la conversión al dominio de la frecuencia en la figura 57 se muestra la señal sin filtrado donde se aprecia una gran intensidad en aproximadamente la frecuencia de 100 Hz la cual fue atenuada mediante un filtro rechaza bandas de orden 200, en la figura 58 se observa la atenuación resultante al aplicar al rango de 100 Hz y 145 Hz, de esa manera la señal se observa más limpia en la parte inferior izquierda.

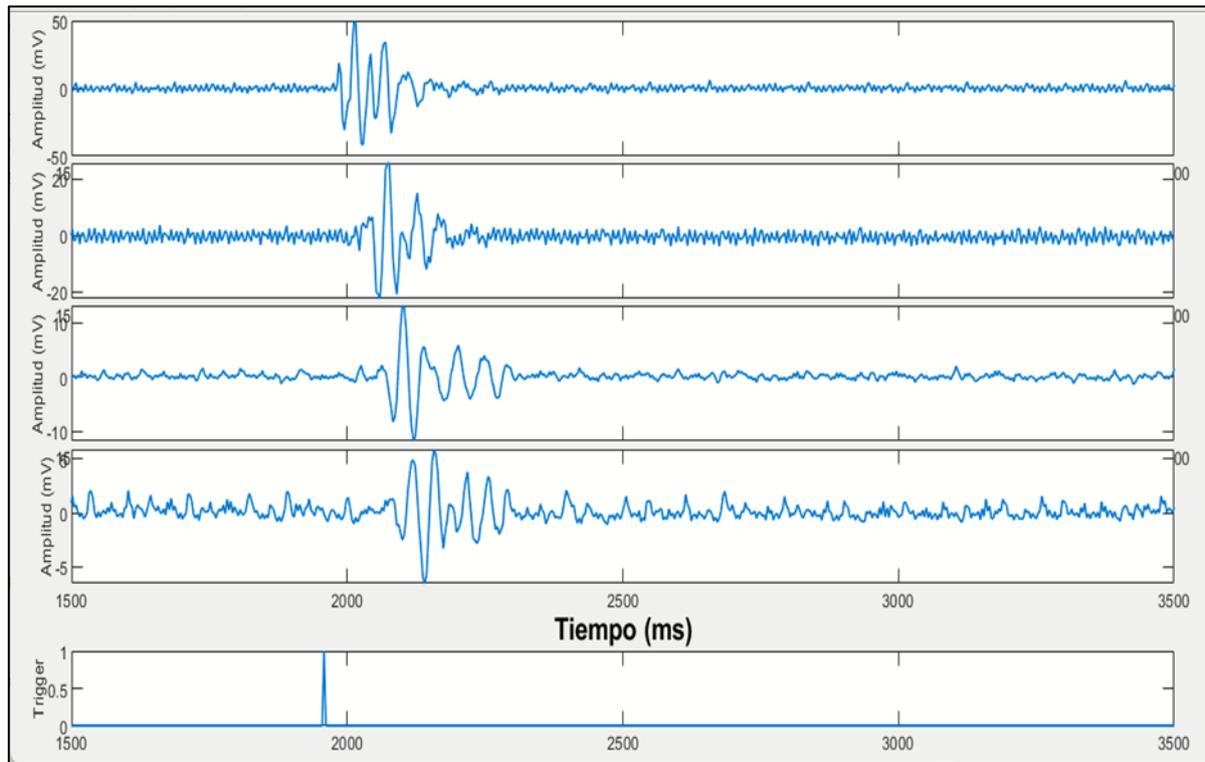
Figura 58: En la parte superior se observa la señal sin filtro y en la parte inferior filtrada.



6) Señal sísmica limpia

Una vez finalizado el preprocesamiento de las señales para limpiar y clarificar los datos obtenidos de los ensayos, se avanza con el procesamiento de estos datos, que se explicará a continuación. En la Figura 59 se muestran las señales con el resultado final del procesamiento.

Figura 59: Señal preprocesada lista para la obtención de la curva tiempo vs. Distancia.

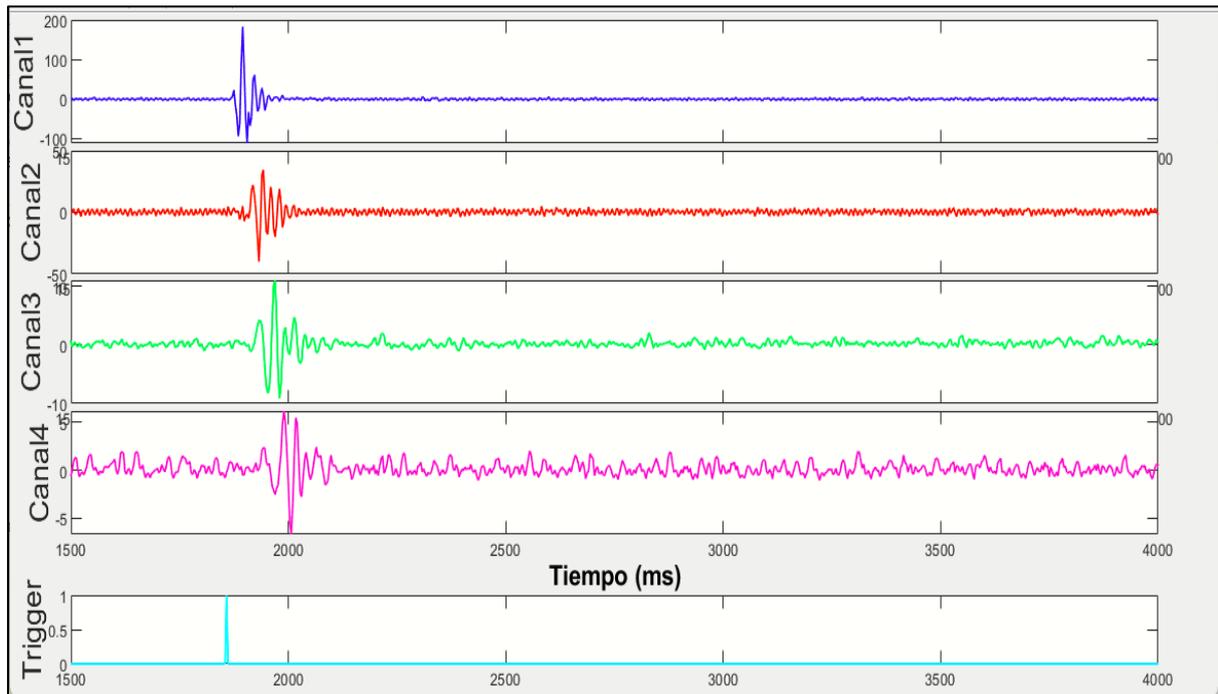


b. Procesamiento de las señales sísmicas

1) Registro de datos sísmicos

Después del procesamiento inicial de los datos, se genera el registro que se presenta en la figura 60. En el eje x se encuentra el tiempo en milisegundos (ms), con las señales sincronizadas respecto al disparo inicial (trigger), marcado en color celeste. Este disparo señala el comienzo del ensayo y está conectado a la fuente de vibración. En el eje y, se muestran cuatro señales correspondientes a los canales 1 al 4, que representan los geófonos desde el primero, ubicado al principio del arreglo, hasta el cuarto. Este registro detallado nos brinda una visión en tiempo real de cómo las vibraciones se propagan a través del suelo, permitiendo una evaluación precisa de su comportamiento. A partir de esta información, se procede a generar la curva de tiempo versus distancia, una herramienta esencial para comprender la dinámica de las ondas sísmicas en el terreno y su relación con la ubicación y la intensidad del evento sísmico.

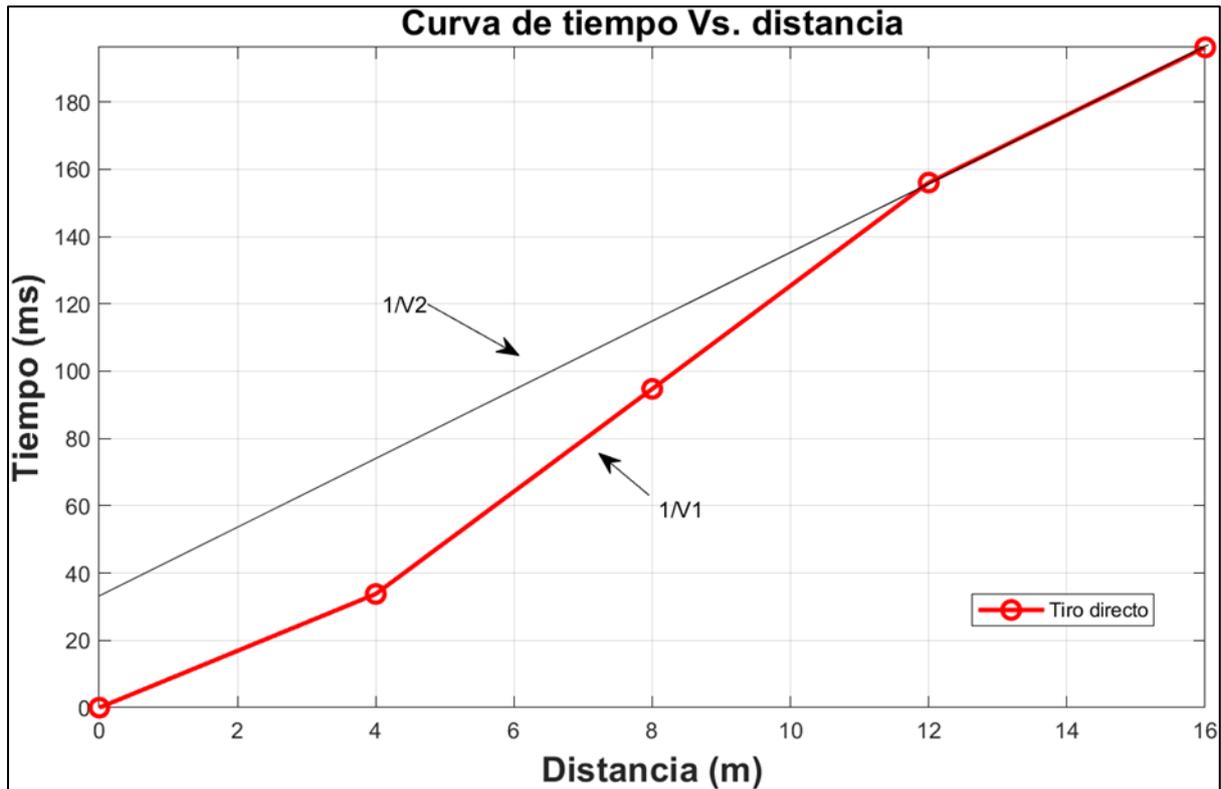
Figura 60: Registro de datos con cuatro geófonos (canales) y señal de disparo (trigger).



2) Curvas de tiempo vs. Distancia

La gráfica muestra la distancia de cada geófono en el eje x y el tiempo que la onda tarda en llegar desde el inicio del ensayo hasta su detección por cada uno de ellos. En el contexto de la refracción sísmica, se espera que la velocidad de la onda en el segundo estrato sea mayor que en el primero. Al analizar la gráfica, se confirma que la velocidad V_2 es mayor que la V_1 , como se anticipaba. La velocidad se calcula a partir del inverso de la pendiente, representada por dos pendientes en la gráfica: una para V_1 y otra para V_2 . Esto sugiere la presencia de dos estratos. Si hubiera una tercera pendiente, indicaría un tercer estrato, y así sucesivamente. La prolongación de la curva hacia el eje y en cada cambio de pendiente proporciona el tiempo de intercepto, que luego se utiliza para calcular el espesor del estrato.

Figura 61: Curva de tiempo (eje y) en milisegundos y distancia (eje x) en metros



3.5.5.3 Cálculo de las profundidades del nivel freático

Para estimar el nivel freático, se emplea la teoría de refracción, que requiere calcular las velocidades a partir de las curvas de tiempo versus distancia. Estas velocidades se obtienen como el inverso de las pendientes, $1/V_1$ y $1/V_2$. Las velocidades calculadas para el registro mostrado en la Figura se presentan en la Tabla 10. Este enfoque de cálculo basado en la refracción sísmica es crucial para determinar con precisión la profundidad del nivel freático.

Tabla 10: Resultados obtenidos de la curva tiempo vs distancia.

Fuente	Onda	Velocidad (m/s)	Tiempo intercepto (s)
Comba (20lbs)	Directa V1	138.47	-
	Directa V2	217.49	0.032

Con la información de las velocidades obtenidas de la curva tiempo vs distancia, las cuales están en la **tabla 10** se procede al cálculo de la profundidad del nivel freático como sigue a continuación.

$$Z_1 = \frac{0.032 * 138.47 * 217.49}{2 * \sqrt{217.49^2 - 138.47^2}}$$

$$Z_1 = 2.86 \text{ m}$$

En la **tabla 11** esta las profundidades de los 20 puntos distribuidos en el área de estudio, estos datos están de la siguiente manera, V₁ y V₂ representan las velocidades de las ondas que se desarrollan en cada uno de los estratos, el tiempo de intercepto (ti) que es la prolongación de las pendientes al eje y (tiempo) que está en segundos y los resultados de cada profundidad (Z₁) en metros calculada usando la ecuación de refracción sísmica.

Tabla 11: Profundidades del nivel freático en el fondo tartar

Punto	Velocidad de Onda (m/s)		Tiempo intercepto (s)	Cálculo de Z1 Ec. 15 (m)
	V1	V2		
1	V1	96.01	-	
	V2	126.12	0.041	3.05
2	V1	107.63	-	
	V2	153.46	0.037	2.79
3	V1	105.31	-	
	V2	153.46	0.038	2.99
4	V1	221.57	-	
	V2	345.20	0.026	2.311
5	V1	118.20	-	
	V2	160.08	0.026	2.28
6	V1	126.99	-	
	V2	169.89	0.025	2.39
7	V1	146.06	-	
	V2	206.19	0.024	2.48
8	V1	134.62	-	

	V2	202.07	0.029	2.62
9	V1	121.99	-	
	V2	241.22	0.049	3.46
10	V1	131.43	-	
	V2	276.67	0.047	3.51
11	V1	125.08	-	
	V2	177.13	0.028	2.47
12	V1	114.40	-	
	V2	145.80	0.022	2.03
13	V1	132.30	-	
	V2	189.10	0.027	2.5
14	V1	119.46	-	
	V2	210.58	0.043	3.12
15	V1	123.20	-	
	V2	196.89	0.037	2.92
16	V1	108.01	-	
	V2	143.48	0.027	2.21
17	V1	78.42	-	
	V2	98.64	0.034	2.19
18	V1	138.47	-	
	V2	219.48	0.032	2.86
19	V1	138.47	-	
	V2	218.26	0.031	2.86
20	V1	147.49	-	
	V2	183.72	0.019	2.35

En la **tabla 12** está el análisis estadístico de la información tanto la desviación estándar, media tanto de las velocidades, tiempo de intercepto y profundidad del nivel freático.

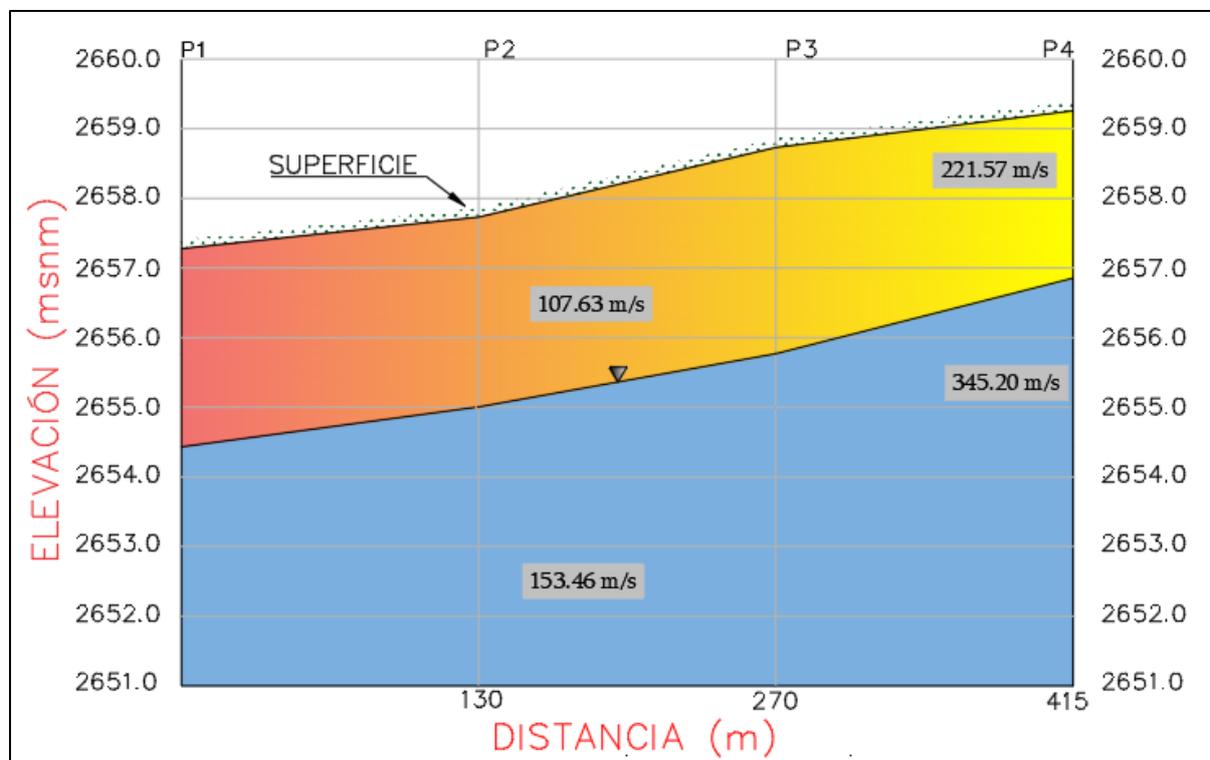
Tabla 12: *Parámetros estadísticos de los datos obtenidos de los ensayos en el fondo tartar*

	V1 (m/s)	V2 (m/s)	ti (s)	Z1 (m)
Media	126.756	190.872	0.032	2.670
Desv. Estd	28.057	55.000	0.008	0.420
Curtosis	6.723	2.251	-0.546	-0.532
Varianza	747.861	3022.122	0.000067	0.167

3.5.5.4 Perfiles transversales y longitudinales del nivel freático

Para la elaboración de los perfiles se utiliza el plano topográfico y los datos de la **tabla 11**, para ello se ha tomado como referente el inicio y el final de cada perfil, en el eje **y** esta las profundidades y el eje **x** la longitud del perfil, también se colocó las velocidades de cada estrato en el perfil para poder analizar mejor la información.

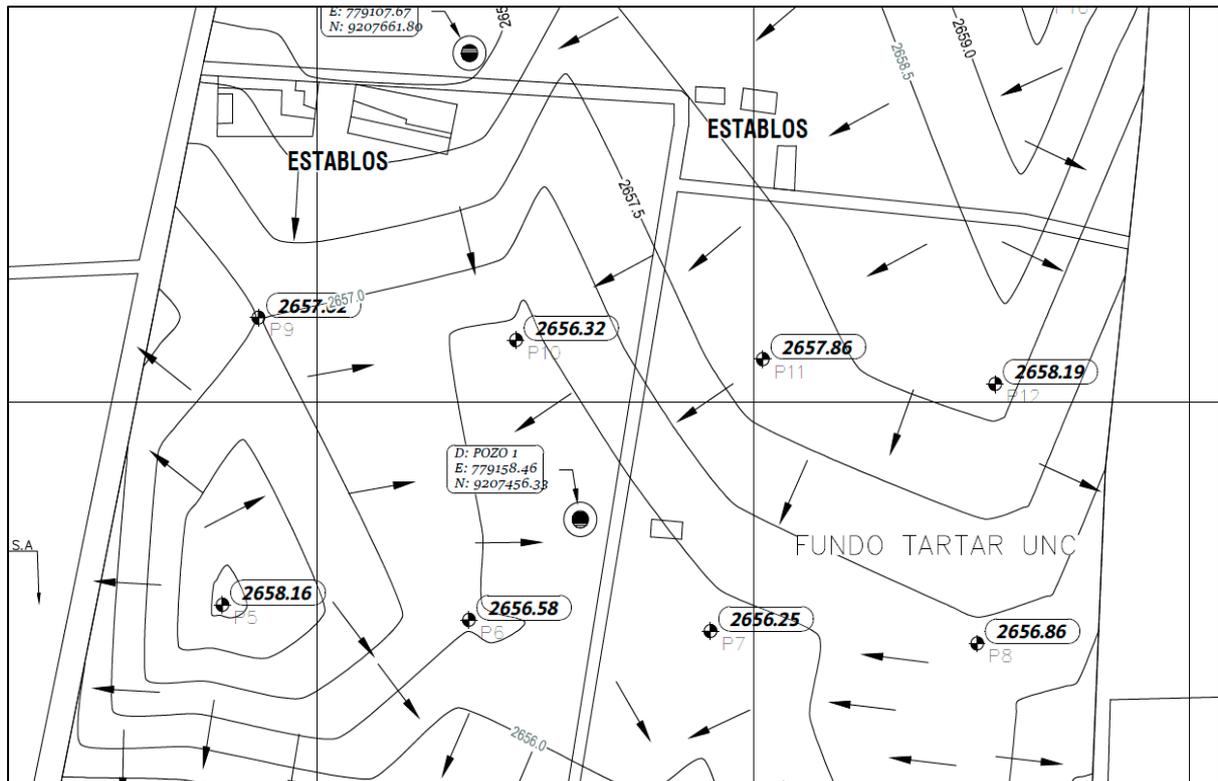
Figura 62: Perfil del nivel freático donde se representa los estratos y sus velocidades respectivas.



3.5.5.5 Elaboración del plano de isopiezas y dirección de flujo

La elaboración del plano de isopiezas y dirección de flujo se realizó en el programa Civil3D con el plano topográfico y las profundidades del nivel freático, figura 63.

Figura 63: Plano de isopiezas y dirección de flujo - Zona de establos y pozos



CAPITULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 RESULTADOS

4.1.1 Requerimiento de agua

Al realizar el cálculo del requerimiento de agua para uso agropecuario, se determinó que se necesitan 235,000.05 m³/año. Estos datos están representados en la **tabla 13**.

Tabla 13: Requerimiento de agua en el fundo tartar

	Volumen Requerido (m³/año)
Requerimiento agrícola	234,390.53
Requerimiento ganadero	609.55
Total	235,000.05

4.1.2 Prueba de bombeo

En la **tabla 14** se presentan los resultados de la prueba de bombeo realizada en el fundo Tartar. Se registró un caudal de equilibrio de 0.643 l/s, tomando medidas de la profundidad del nivel freático cada 10 minutos en el pozo 1 durante un período de 220 minutos.

Tabla 14: Prueba de bombeo con motobomba con un caudal de 0.643 l/s (12/09/2023)

Nombre Pozo	:	Pozo 1	
Nivel freático Antes de la Prueba (m)	:	2.05	
Caudal bombeo (lt/s)	:	0.643	
Tiempo de Bombeo (hr)	:	3.66	
Durante el bombeo cada 10 min		Recuperación del pozo cada 30 min	
Tiempo (min)	Nivel Freático (m)	Tiempo (min)	Nivel Freático (m)
0	2.05	0	4.35
10	2.20	10	4.28
20	2.30	20	4.21
30	2.45	30	4.14
40	2.50	40	4.07
50	2.60	50	4.01
60	2.75	60	3.94
70	2.80	70	3.87
80	2.90	80	3.80

90	3.01	90	3.73
100	3.11	100	3.66
110	3.24	110	3.59
120	3.31	120	3.52
130	3.43	130	3.45
140	3.50	140	3.38
150	3.61	150	3.32
160	3.71	160	3.25
170	3.88	170	3.18
180	3.93	180	3.11
190	4.02	190	3.04
200	4.14	200	2.97
210	4.35	210	2.90
220	4.35	220	2.83
		230	2.76
		240	2.69
		250	2.63
		260	2.35

4.1.3 Refracción sísmica: análisis de velocidades y profundidades.

Según la norma técnica peruana de edificaciones E.03 Diseño sismorresistente, donde se clasifican los suelos de acuerdo a la velocidad de onda **tabla 15** y la geología del área de estudio **figura 43**, será usada como referencia para el análisis de los resultados.

Tabla 15: Clasificación de los suelos geotécnicamente en función de las velocidades de ondas

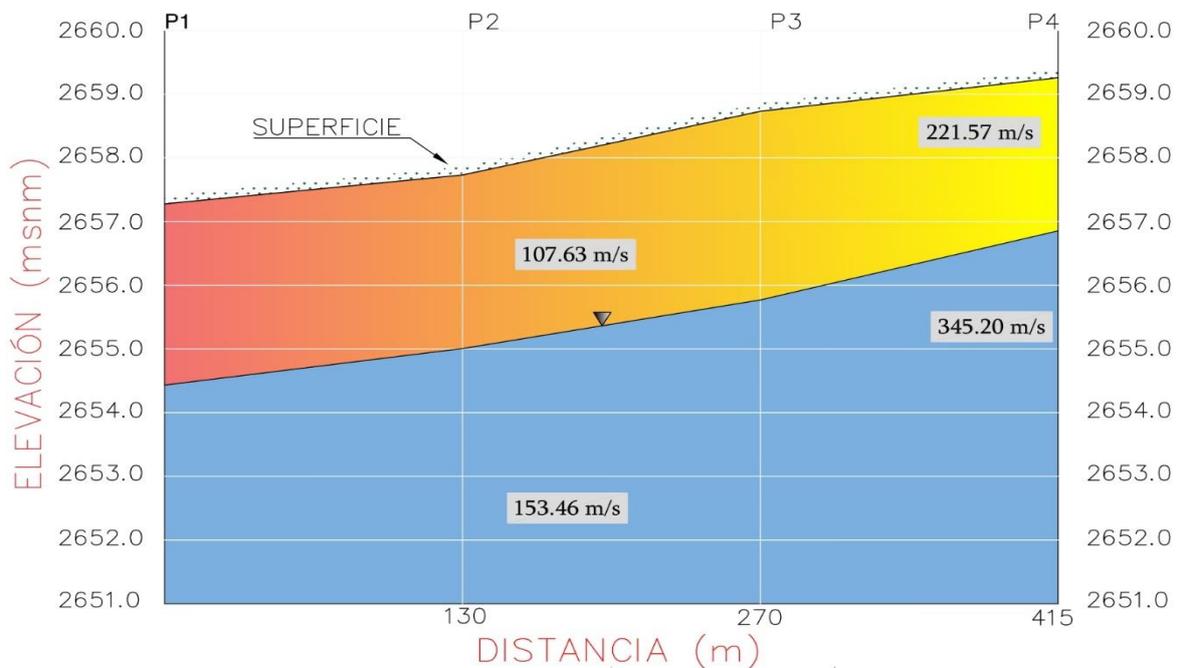
Perfil	Vs30	Condición Geotécnica
S0	Mayor a 1500 /s	Roca dura
S1	500 m/s a 1500 m/s	Roca o suelo muy rígido o arcillas muy compactas
S2	180 m/s a 500 m/s	Suelo medianamente rígidas arenas densas, y suelos cohesivos compactos
S3	Menor a 180 m/s	Suelos blandos, arenas medias a finas o gravas arenosas
S4	Clasificación basada en el EMS	Condiciones excepcionales, donde las condiciones geológicas y topográficas son desfavorables

Fuente: NTP E030.

4.1.3.1 Perfil transversal 01

El perfil transversal se origina en el punto p1 y se extiende a lo largo de los puntos p2, p3 y p4 con una longitud de 415 m. Se ha determinado dos interfaces con valores de velocidad de 96.01 m/s, 107.63 m/s, 105.31 m/s y 221.57 m/s , que se relaciona con suelos blandos y materiales orgánicos que según la geología del área de estudio figura 43 son depósitos aluviales y fluviales, en el punto p4 existe una velocidad mayor que 180 m/s según la clasificación geotécnica corresponde a suelos medianamente rígidos, arenas densas o suelos cohesivos compactos según la **tabla 15**, la segunda estructura alcanza valores de velocidad de 126.12 m/s, 153.46 m/s, 345.20 m/s. y esta se correlaciona con material saturado.

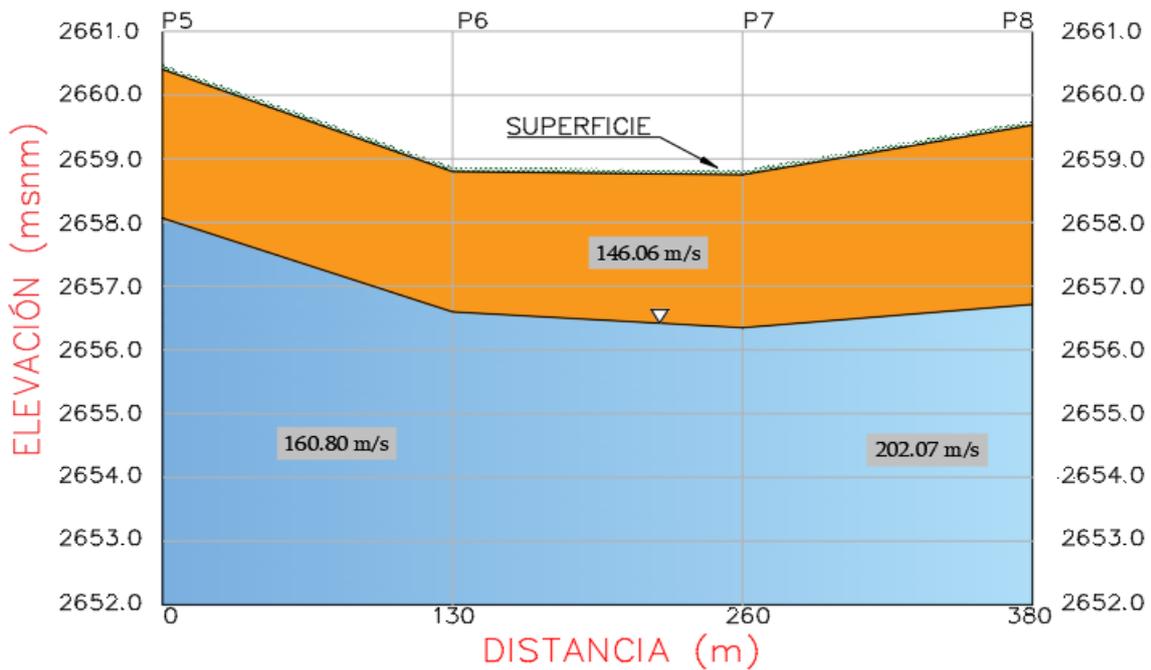
Figura 64: Nos muestra el perfil transversal 1, con sus estratos determinados.



4.1.3.2 Perfil transversal 02

Inicia en el punto p5 y se extiende por los puntos p6, p7 y p8 cubriendo una longitud de 385 m. Se ha identificado dos interfaces la primera interfaz con unas velocidades de 118.20 m/s, 126.99 m/s, 146.06 m/s y 134.62 m/s que son suelos blandos, gravas arenosas y orgánicos, la segunda interfaz con velocidades de 160.08 m/s, 169.89 m/s, 206.19 m/s y 202.07 m/s, dando lugar a suelos blandos, pero desde el punto p7 y p8 las velocidades son mayores clasificándose como suelos cohesivos compactos o arenas densas, dando lugar a una posible tercera interfaz.

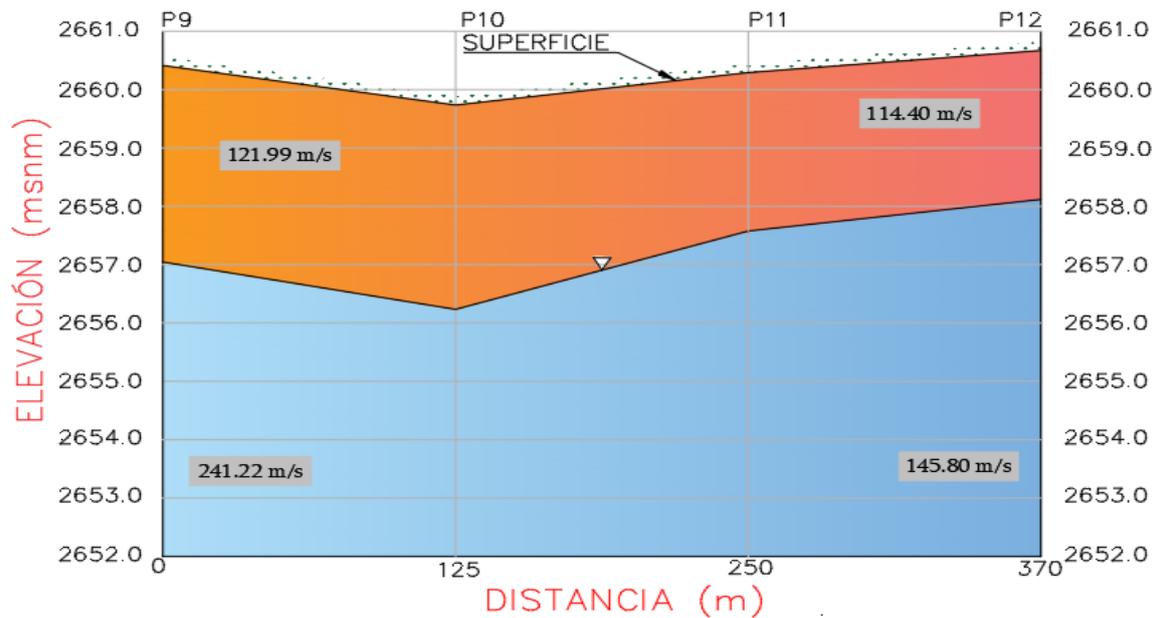
Figura 65: Perfil transversal 2, con sus dos estratos y velocidades



4.1.3.3 Perfil transversal 03

Este perfil se inicia en el punto p9 y llega hasta el punto p12 con una longitud de 370 m, identificando dos interfaces la primera tiene velocidades de 121.99 m/s, 131.43 m/s, 125.08 m/s y 114.40 m/s, con un espesor que alcanza los 3.51 m, la segunda interfaz con velocidad de 241.22 m/s, 276.67 m/s, 177.13 m/s y 145.80 m/s, según la clasificación de la **tabla 15** en el punto p11 sería un suelo cohesivo compacto, estas velocidades corresponden a suelos aluviales y fluviales que están presentes en el área de estudio.

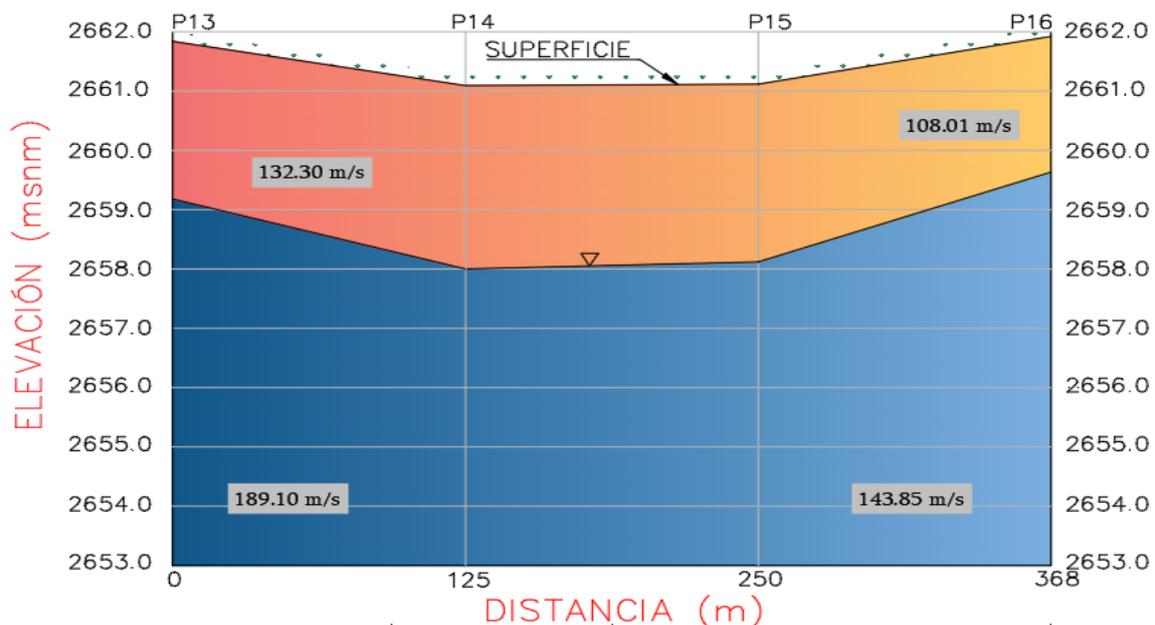
Figura 66: Perfil transversal 3, con sus respectivos estratos



4.1.3.4 Perfil transversal 04

Este perfil inicia en el punto p13 hasta el punto p16 con una longitud de 368 m, identificando dos estratos con velocidades de 132.30 m/s, 119.46 m/s 123.20 m/s y 108.01 m/s, llegando hasta un espesor de 3.12 m, la segunda interfaz que correspondería al nivel freático tiene velocidades de 189.10 m/s, 210.58 m/s, 196.89 y 143.48 m/s entre los puntos p14 y p15 según la clasificación de suelos de la **tabla 15** correspondería a un suelo cohesivo y compacto.

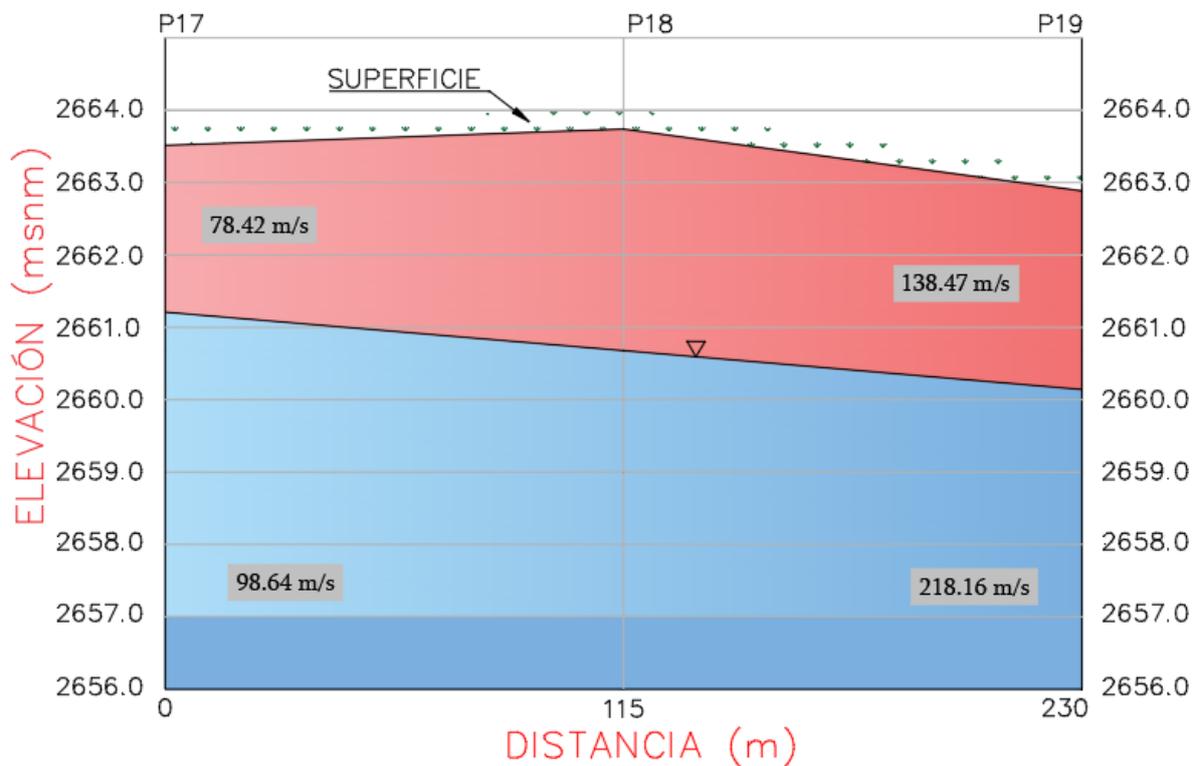
Figura 67: Perfil transversal 4, velocidades menores a 180 m/s para el estrato 1



4.1.3.5 Perfil transversal 05

Este perfil inicia en el punto p17 hasta el punto p19 con una longitud de 230 m, identificando dos estratos con velocidades de 78.42 m/s, 138.47 m/s alcanzando un espesor de hasta 2.86 m, para la segunda interfaz las velocidades son de 98.64 m/s, 219.48 m/s y 218.26 m/s, desde el punto de vista geotécnico son materiales más compactos debido a la presencia de agua.

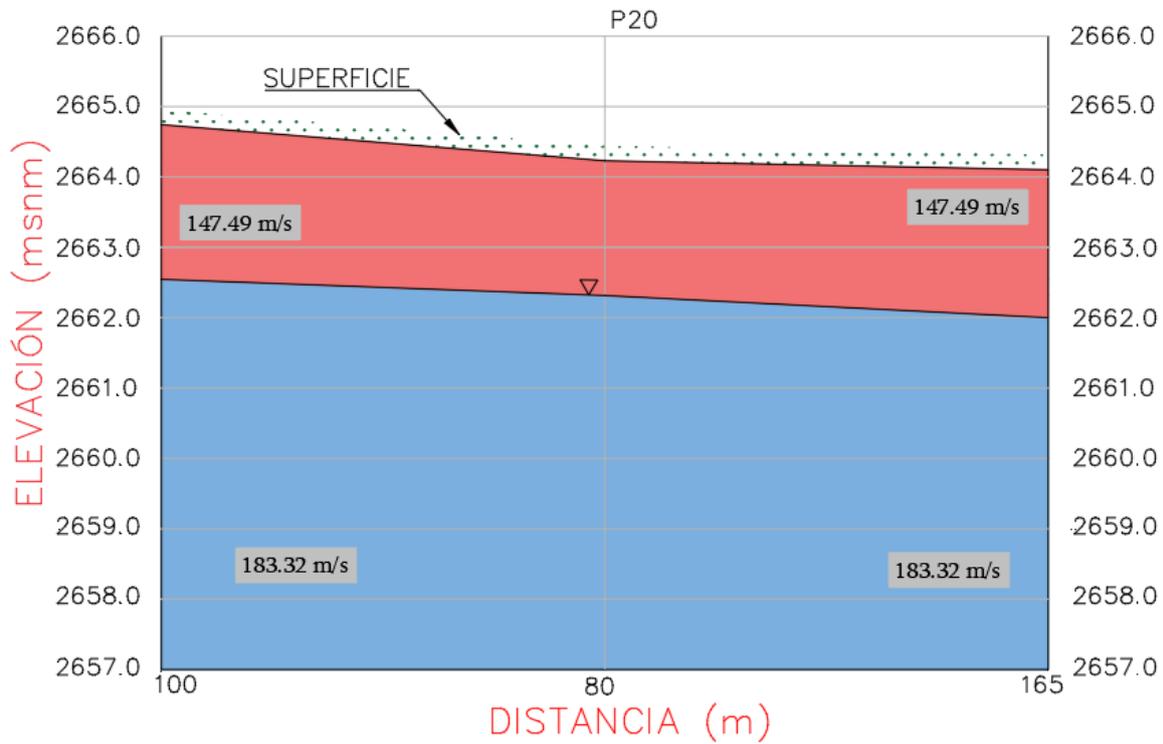
Figura 68: Perfil transversal 5, con sus dos estratos



4.1.3.6 Perfil transversal 06

Este perfil pasa por el punto p20 con una longitud de 165 m, se identificó dos estratos con velocidades de 147.49 m/s y profundidad de hasta 2.35 m, para el segundo estrato las velocidades de 183.32 m/s, indicando la presencia de un suelo más denso por la presencia de nivel freático además según la clasificación de la **tabla 15** correspondería a un suelo más denso y cohesivo.

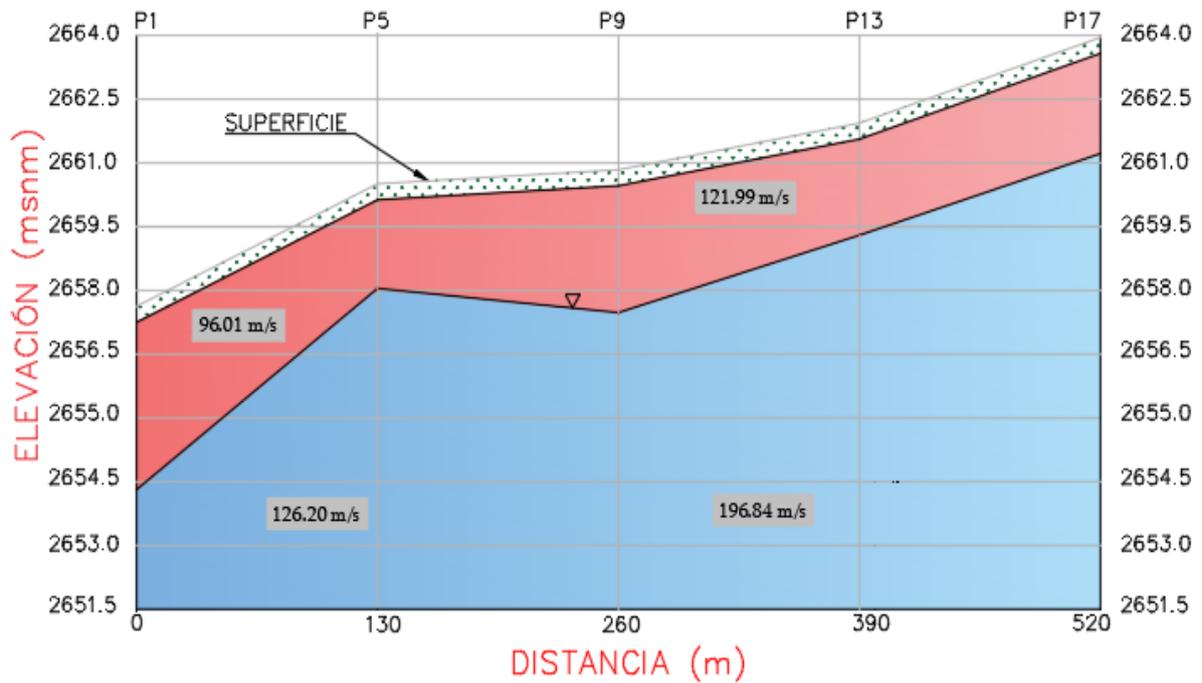
Figura 69: Perfil transversal 6.



4.1.3.7 Perfil longitudinal 01

Se ubica entre el punto p1 y p17 con una longitud de 520 m, con dos estratos y velocidades de 96.01 m/s, 118.20 m/s, 121.99 m/s y 78.42 m/s con espesor de hasta 3.05 m, y velocidades de 126.2 m/s, 160.08 m/s, 241.22 m/s, 196.89 m/s y 98.64 m/s para el segundo estrato suelos blandos, características similares al perfil transversal 1.

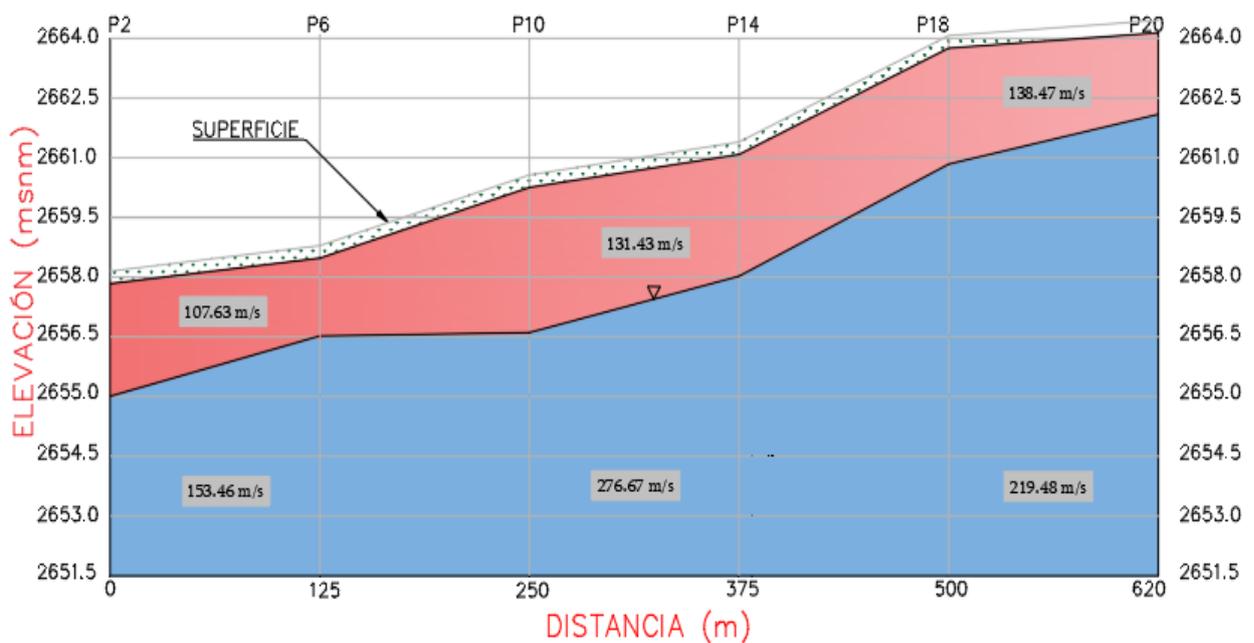
Figura 70: Perfil longitudinal 01, velocidades de onda variable desde 96.1 m/s a 196.4 m/s



4.1.3.8 Perfil longitudinal 02

Se ubica entre el punto p2 y p20 con una longitud de 620 m, identificando dos estratos, velocidades de 107.63 m/s, 126.99, 131.43, 119.46, la clasificación de los suelos corresponde a suelos blandos, arenas medias a finas o gravas arenosas.

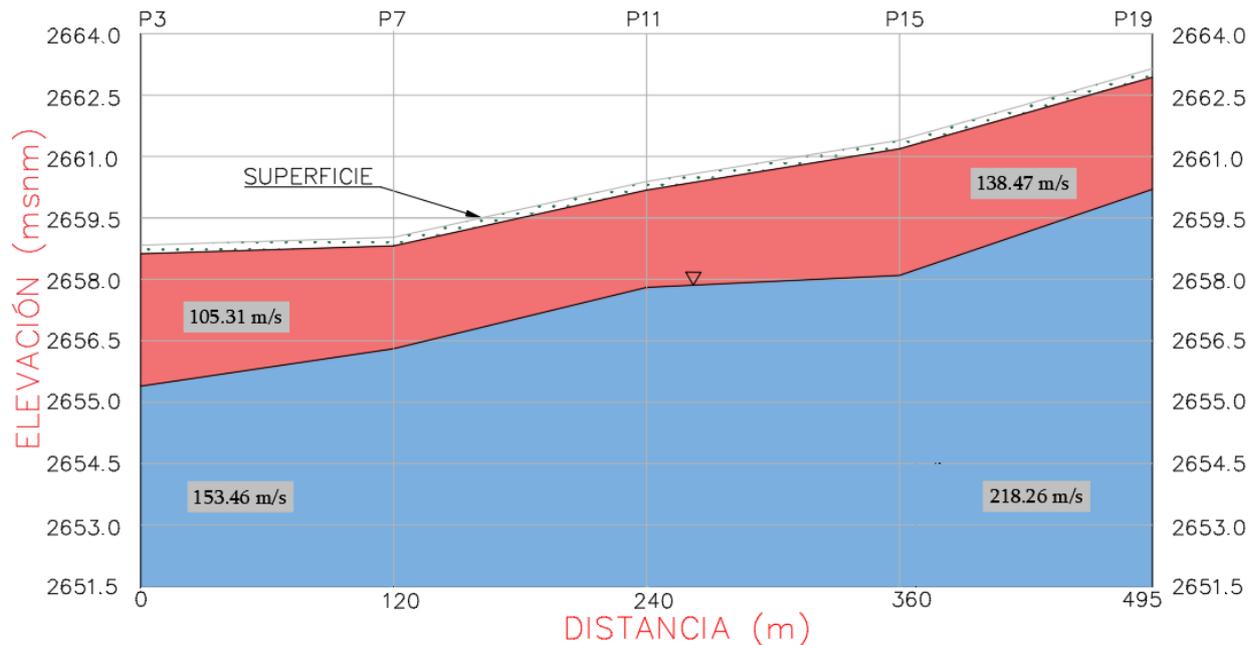
Figura 71: Sección longitudinal 2 con dos horizontes, velocidades de 107.63 m/s a 219.48 m/s



4.1.3.9 Perfil longitudinal 03

Inicia en el punto p3 y finaliza en el p19 con una longitud de 495 m, las velocidades son menores a 180 m/s que corresponde a suelos ssuelos blandos, arenas medias a finas o gravas arenosas.

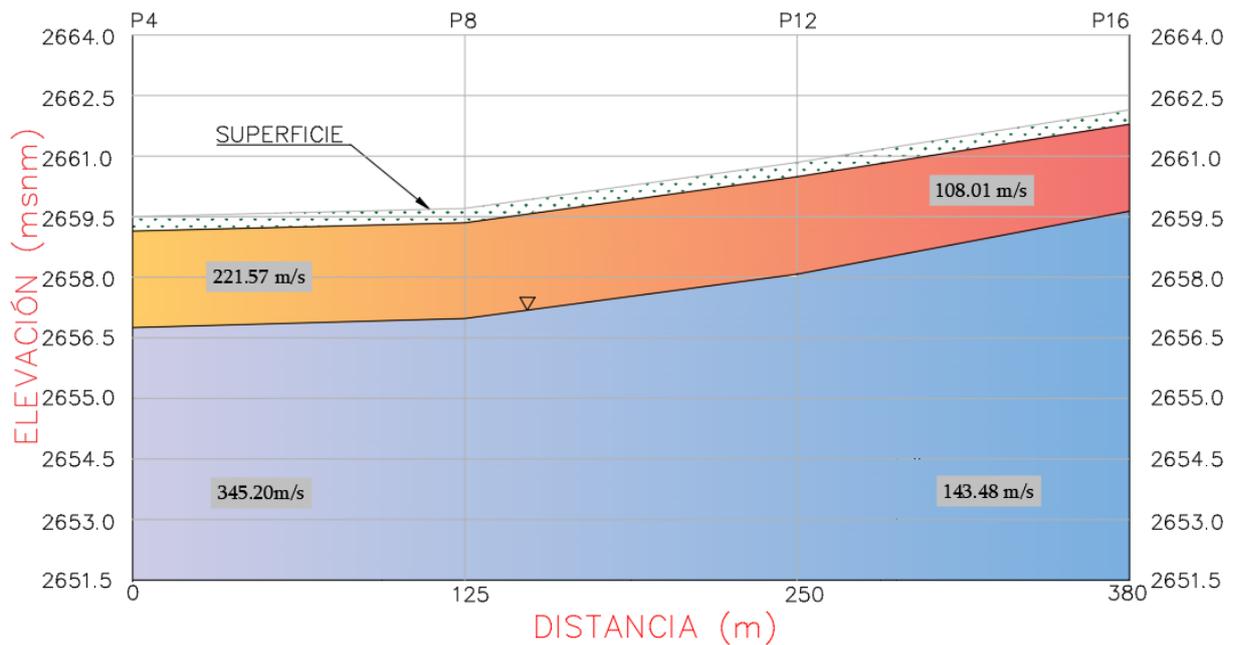
Figura 72: Perfil longitudinal 3



4.1.3.10 Perfil longitudinal 04

Este perfil inicia en el p4 y finaliza en p16 con una longitud de 380 m, como se puede observar existen dos tipos de suelos ya que hay velocidades menores a 180 m/s que son Suelos blandos, arenas medias a finas o gravas arenosas y velocidades mayores a 180 m/s que son suelos medianamente rígidas arenas densas, y suelos cohesivos compactos, geológicamente se clasifican en zonas fluviales y aluviales con presencia de gravas y arenas.

Figura 73: Perfil longitudinal 4, velocidades de 108.01 m/s a 345.20 m/s



4.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El estudio geofísico de refracción sísmica llevado a cabo en el Fundo Tartar fue realizado en 6 perfiles transversales con un total de 1933 m y 4 perfiles longitudinales con 1520 m, con un espaciamiento de 4 m entre geófonos, revelando dos estratos: el primer estrato presenta velocidades desde 78.42 m/s a 221.57 m/s, hasta una profundidad de 3.51 m, para el segundo estrato velocidades desde 98.64 m/s a 345.20 m/s. indicando la presencia de suelos blandos, arenas medias a finas o gravas arenosas velocidades menores a 180 m/s y suelos medianamente rígidas arenas densas, y suelos cohesivos compactos para velocidades de 180 m/s a 500 m/s.

Este estudio en comparación con el trabajo realizado por la investigación denominada "Estudio de Mecánica de Suelos con Fines de Cimentación del Nuevo Coliseo de Cajamarca". Los métodos geofísicos empleados en este estudio, como el análisis de ondas de superficie y el método de refracción sísmica, proporcionaron información detallada sobre las características del subsuelo en la ubicación del nuevo coliseo. Por ejemplo, se observaron velocidades de onda Vs de 270 a 540 m/s en el tercer estrato, lo que indicaría la existencia de un material arcilloso medianamente compacto.

También se destaca el trabajo realizado por Ticona (2019), quien empleó una combinación de métodos sísmicos y eléctricos para caracterizar los suelos. Los resultados

obtenidos por Ticona también destacaron la presencia de suelos compactos en profundidad, con velocidades de onda Vs que aumentan con la profundidad, indicando suelos muy compactos. Por ejemplo, se observaron velocidades de onda Vs de 380 m/s para los primeros horizontes, que aumentaron con la profundidad llegando hasta los 1000 m/s.

Además, el estudio realizado en el Instituto Geofísico de la UNSA proporciona una perspectiva adicional sobre las características del subsuelo. Los métodos geofísicos empleados en este estudio revelaron la presencia de materiales con velocidades de onda Vp de 300 m/s en la primera estructura, así como velocidades de 1000 m/s y 2000 m/s para el segundo y tercer horizonte refractor, respectivamente.

El estudio de Romero (2019) en el Fundo La Victoria, cerca de la zona de estudio, utilizó la prospección geofísica mediante Sondeos Eléctricos Verticales para determinar la resistividad eléctrica de los estratos geológicos y evaluar la explotación de aguas subterráneas. Se encontró que la resistividad del suelo varía entre 5.21 $\Omega\text{-m}$ y 126.33 $\Omega\text{-m}$, indicando la presencia de suelos diversos como arcillosos, limosos y arenosos. Además, se identificó un acuífero libre con el nivel freático entre 1.05 m y 5.28 m de profundidad, y la presencia de un acuitardo de arcillas saturadas. Se ubicaron 2 puntos favorables para la perforación de pozos tubulares. Estos resultados complementan la comprensión de las características del subsuelo en la región de Cajamarca, proporcionando información valiosa para la gestión sostenible de los recursos hídricos y la planificación de proyectos de construcción y desarrollo.

En conjunto, estos resultados resaltan la importancia de utilizar múltiples metodologías geofísicas para obtener una comprensión completa y precisa de las características del subsuelo. La combinación de la refracción sísmica, el análisis de ondas de superficie y otras técnicas proporciona una visión más completa de la heterogeneidad del subsuelo y las propiedades de los materiales presentes. Esta información es esencial para la planificación y ejecución de proyectos de hidrogeología y desarrollo en la región, ya que permite tomar decisiones informadas sobre la ubicación de estructuras y la evaluación de la estabilidad del suelo.

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Se logro llevar a cabo la recopilación de información cartográfica en la zona de estudio, obteniendo un conjunto de datos geospaciales que proporcionan una representación detallada y precisa del área en cuestión. Estos datos cartográficos abarcan diversos aspectos, como: la topografía, los límites administrativos, ubicación de pozos de calibración y posterior ubicación de los puntos de sondeo sísmico de refracción.
- Se realizó la caracterización del fundo Tartar desde los puntos de vista agrícola y geológico. Se identificaron suelos adecuados para la agricultura según el plano de uso de suelos de Cajamarca (ver anexo N° 2). En ciertas parcelas, se han establecido diferentes cultivos, como 1.44 hectáreas de papa (equivalente al 4.63%), 0.63 hectáreas de hortalizas (2.02%), 2.42 hectáreas de alfalfa (7.77%), y un 80.18% de la superficie ocupada por pastizales, principalmente rye grass, lo que representa un área de 24.96 hectáreas. Desde el punto de vista geológico, el fundo Tartar se sitúa en la era del Cenozoico. Estratigráficamente, los depósitos aluviales y fluviales son recientes, mientras que los depósitos lagunares y glaciares son de la época del Pleistoceno.
- Se determinó que el requerimiento de agua para uso agrícola es de 234,390.53 m³/año y para uso ganadero de 609.55 m³/año, lo cual es una demanda total de 235,000.08 m³/año, con una demanda máxima de 66,021.39 m³/año en el mes de julio.
- Se construyó y calibro el equipo sísmico tanto eléctrico y digital mediante osciloscopio ajustándose las ganancias, de la fase del acondicionamiento de señales, las cuales sirven para desplazar la señal sobre los 2.5 V de esta manera el convertidor de analógico a digital puede obtener la máxima amplitud entregada por el geófono, la calibración digital se realizó en el A/D que es programable, ajustándose a una frecuencia de muestreo de 295 Hz y una entrada de +-2.5V. también, se calibro en campo en los pozos 1 y 2, para obtener señales sísmicas limpias y sincronizadas, de esta manera se eliminó significativamente el ruido producido por los sensores y el medio ambiente.
- Se logro aplicar adecuadamente el método sísmico de refracción, al aplicar las técnicas de preprocesamiento y procesamiento de información en los cuales se aplica la FFT (transformada rápida de Fourier) y el filtrado mediante un filtro rechaza bandas, para finalmente procesarlas y obtener las curvas de tiempo vs distancia con las que se puede obtener las velocidades y tiempos de intercepto para aplicar el modelo matemático que

nos permite estimar la distancia de la superficie al nivel freático, primero se realizó la calibración en el pozo 1 y 2 la cual proporciono un ajuste en el modelo y metodología que luego fue aplicada en los demás puntos de sondeo sísmico distribuidos en toda el área de investigación.

- Se interpreto y analizo los datos sísmicos, que no solo han proporcionado una visión clara de la distribución espacial y las variaciones en la profundidad del nivel freático, sino que también ha contribuido a una mejor comprensión de los factores geológicos locales que influyen en el comportamiento de las aguas subterráneas. Estos datos que están distribuidos en toda el área de estudio tienen un promedio de 2.66 m desde el nivel terrestre al nivel freático, dando una idea que toda el área de estudio no tiene mucha variación geológica ya que las velocidades sísmicas son muy parecidas en magnitud, también topográficamente el terreno no tiene cambios topográficos importantes ya que es una zona plana, su dirección de flujo se distribuye al rio Mashcon y al rio chonta como se muestra en dicho mapa de dirección de flujo.

5.2 RECOMENDACIONES

- Colocar más geófonos separados entre ellos con equidistancia de 1m a 2m para comprender con más exactitud el comportamiento de los perfiles obtenidos mediante refracción sísmica, con el fin de obtener un reflejo más detallado en las curvas tiempo vs distancia.
- Utilizar una fuente de energía más potente como tiros con cartucho o explosivos cuando se necesite realizar un sondeo con más alcance de profundidad.
- Agregar filtros electrónicos en el equipo de adquisición de señales para evitar interferencias en la señal de adquisición, ya que el actual solo cuenta con un filtro pasa bajas con frecuencia de corte de 50 hz.
- Se recomienda utilizar software especializado o algún lenguaje de programación para el preprocesamiento y procesamiento de la señal, se tiene que utilizar complejas ecuaciones y métodos como es el caso de la transformada rápida de Fourier, que es indispensable su utilización al momento de analizar una señal en el espectro de las frecuencias, como en el filtrado de ruidos.

CAPITULO VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

6.1 BIBLIOGRAFÍA

- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology*. 4th ed. Prentice Hall. California, Estados Unidos. p. 560.
- Freeze, A. R., y Cherry, J. A. (1979). *Groundwater* (1st ed.). Prentice Hall, New York, Estados Unidos. pp. 156-159.
- Herrera, V. (2013). *Propuesta de una fuente que emplea audio para exploración sísmica de refracción somera*. (pp.132). México, México: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Hiscock, K. M., y Bense, V. F. (2014). *Hydrogeology principles and practice* (Second Edition). Wiley Blackwell, pp. 314-331. California - Estados Unidos.
- Kirsch, R. (2006). *Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology* (Second Edition). Springer, (pp. 315-120). Alemania.
- Sheriff, R. E., y Geldart, L. P. (1995). *Exploration Seismology* (2nd Edition). (Pag. 56). Inglaterra.
- Sotelo Ávila, G. (1997). *Hidráulica General: Vol. I*. Editorial Limusa S.A. (pág. 118).
- Ticona, J. R. (2019). *Caracterización de los Suelos del Instituto Geofísico de la UNSA, A través de Metodologías Sísmicas y Eléctricas*. (p. 115). Arequipa-Perú: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Toalombo, M. T. (2010). *Exploración de aguas subterráneas en Cadeate para el abastecimiento de la Comunidad*. (pág. 323- 450) Guayaquil-Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Vélez Otalvaro, M. V. (1999). *Hidráulica de Aguas Subterráneas* (Segunda). (pp 172) Medellín-Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Zafra Otero, D. (2017). *Ondas Sísmicas, su importancia para la geofísica y la humanidad*. (pp. 34-45). Colombia: Universidad Industrial de Santander
- Smith, J. (2021). *Suavizado de curvas: marco teórico*. Journal of Data Analysis, (pp.45-56).

- Sauquillo, A. (2009). *La importancia de las aguas subterráneas*. X Programa de Promoción de la Cultura Científica y Tecnológica. Real Academia de las ciencias exactas. España Vol. 103, Nº. 1, (pp 97-114).
- Cortez, C. (2020). *Exploración geológica y geofísica para la búsqueda de recursos hídricos subterráneos en el caserío Guaderrama, distrito de Motupe, provincia y departamento de Lambayeque – Perú* (tesis de pregrado). Universidad Nacional de Piura. Piura, Perú. pp 132.
- Romero, J. (2019). *Estudio geoeléctrico y planteamiento de explotación de aguas subterráneas en el fundo la victoria – UNC, 2019* (tesis de pregrado). Universidad nacional de Cajamarca. Cajamarca, Perú. pp 142.
- Mijailov, L. (1985). *Hidrogeología*. Editorial Mir. Moscú, Rusia. p 285. Disponible en <http://www.udep.edu.pe/recursoshidricos/hidrogeologia.pdf>
- Zektser, I. *Groundwater fluxes in the global hydrologic cycle: past, present and future of Hydrology*. Estados Unidos. pp 144.
- Cabrera, M. y Custodio, E. (2013). *Hidrología y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos*. Métodos, técnicas y experiencias en las Islas Canarias. 1ª Edición. Juan Carlos Santamarta Cerezal Et al. Madrid, España. pp 554.
- Sotelo, G. (1997). *Hidrología general*. Vol 1. Balderas, Mexico: Editorial Limusa. pp 286
- Sanchez, F. (2012). *Hidrología Superficial y Subterránea*. 2ª ed. Kindle Direct Publishing. pp 440.
- Todd, D. y Mays, L. (2005). *Hidrología de aguas subterráneas*. 3.ª edición, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, pp 652.
- Naranjo, H. Y Dranichnikov, T. (2012). *Cálculo de capacidad portante basado en geofísica y método convencional: El caso del puente sobre el río Maicito*. Quito, Ecuador: Editorial Universitaria Abya-Yala. pp 201.
- Singiresu, R. (2012). *Vibraciones mecánicas*. Quinta edición, México: Pearson educación, pp 776.
- Chapra, S. Y Canale, R. (2010). *Métodos numéricos para ingenieros*. Quinta edición. Mexico: interamericana editores, S.A. pp 1001.

- Redpath, B. (1973). *Exploración de refracción sísmica para investigaciones de sitios de ingeniería*. California, Estados Unidos: Cameron station, pp 70.
- Zhao, Y., Wang, L. y Yan, X. (2017). *The Principle and Simulation of Moving-coil Velocity Detector*. Hubei, China. pp 7.
- Schaumann, R. y Valkenburg, M. (1999). *Design of analog filters: Passive, active RC, and switched capacitor*. Oxford University Press. pp 758.
- Poma, W. Y Alcantara, G. (2010). *Estudio de suelos y capacidad de uso mayor del departamento de Cajamarca*. Recuperado de <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-de-lima/mecanica/inf-suelos-zee-091-tipos-de-suelos/9789>
- Heisey J., Stokoe K. y Meyer A. (1982). *Moduli of pavement systems from spectral analysis of surface waves*. Transp.Res. Rec., vol. 852, pp. 22- 31
- Park, C., Miller, R., Xia, J. y Ivanof, J. (2007). “MASW – active and passive methods”: Leading Edge, v.26, n.1, p.60-65

6.2 LINKOGRAFÍA

- Martines, J. y Castaño, G. 2006. Disponibilidad de agua. [Fecha de la consulta: 22 de diciembre 2021]. Disponible en web: <https://www.fundacionaquae.org/wiki/cantidad-de-agua-potable-fuente-de-vida/>
- ASTM D5777-00 (2011). Guía estándar para utilizar el método de refracción sísmica en la investigación del subsuelo. [Fecha de consulta 18 enero 2019. Disponible en: web <https://www.astm.org/d5777-00r11e01.html>
- Ministerio de energía y minas del Perú, (2013). *Tipos de suelos*. Recuperado de: https://minem.gob.pe/_legislacionM.php?idSector=1&idLegislacion=7272
- Autoridad nacional del agua – Perú. (1999). *Capacidad de mayor uso de suelos*. Recuperado de: <https://www.ana.gob.pe/2019/consejo-de-cuenca/urubamba/O>

ANEXOS

ANEXO 01: DATOS METEOROLÓGICOS

Tabla 16: Temperaturas máximas mensual promedio, estación meteorológica Weberbauer.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1989	20.2	20.3	20.6	19.9	21.0	20.3	20.7	21.4	21.2	21.8	22.6	22.9
1990	20.9	21.5	21.9	22.3	21.4	20.7	21.2	21.0	22.1	22.0	21.4	22.3
1991	21.9	22.1	22.4	22.4	22.1	21.6	22.5	21.7	22.3	21.2	22.3	22.6
1992	22.4	23.1	22.4	21.8	22.9	21.0	20.1	21.3	20.6	20.4	22.1	22.9
1993	20.8	20.2	19.2	20.1	21.3	21.0	20.8	20.7	20.1	20.3	21.3	19.9
1994	19.9	19.9	20.0	20.7	20.7	20.6	20.9	20.3	21.3	21.2	21.0	21.3
1995	21.9	20.8	20.4	22.2	21.8	21.5	20.5	22.0	21.3	21.5	21.5	21.5
1996	19.9	20.4	20.2	20.5	21.3	21.1	21.1	20.5	21.2	20.4	22.1	22.0
1997	21.5	20.2	22.3	21.8	21.3	21.9	21.2	20.9	22.3	22.1	20.9	20.4
1998	21.0	21.0	20.8	21.6	22.1	21.0	21.3	21.7	22.1	21.2	21.5	22.3
1999	20.5	19.0	20.6	20.7	20.6	20.4	19.3	21.0	20.0	20.8	21.4	20.5
2000	21.1	18.9	20.1	20.2	20.6	20.2	20.0	20.5	20.5	21.5	22.3	20.3
2001	19.1	19.7	19.2	20.4	20.4	20.1	20.6	20.9	21.0	21.6	20.7	21.5
2002	21.5	20.7	20.4	20.8	21.4	21.0	20.7	21.5	22.0	20.6	20.4	20.9
2003	21.5	21.3	20.3	20.8	20.8	20.9	20.6	21.5	21.8	22.5	21.7	20.1
2004	21.9	19.9	21.0	20.8	21.4	19.6	20.1	21.1	20.9	21.3	20.9	21.4
2005	21.4	21.6	20.6	21.4	21.8	22.1	22.3	22.1	22.1	20.1	22.2	20.3
2006	20.9	20.6	19.4	20.6	21.2	20.1	21.0	20.9	21.3	21.8	21.3	20.7
2007	21.0	20.5	20.0	20.2	21.1	20.7	21.1	20.9	20.5	20.6	20.3	20.9
2008	20.2	19.8	19.5	19.9	20.7	20.7	20.5	21.2	20.9	20.2	21.2	21.7
2009	20.2	19.9	19.8	20.4	20.9	20.8	20.2	21.5	21.7	21.5	21.5	20.8
PROM	20.9	20.5	20.5	20.9	21.3	20.8	20.8	21.2	21.3	21.2	21.5	21.3

Fuente:(SENAMHI, 2023)

Tabla 17: Temperaturas mínima mensual promedio, estación meteorológica Weberbauer.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1989	5.0	5.6	5.2	5.3	2.8	2.5	0.6	3.3	3.0	2.6	3.3	3.3
1990	6.2	4.8	5.0	4.7	3.4	3.3	0.6	0.0	3.1	5.6	4.9	3.0
1991	4.0	3.9	5.7	3.8	2.9	4.0	-0.2	1.7	1.6	2.4	1.6	4.0
1992	4.5	4.3	4.4	8.4	2.6	3.7	3.8	4.9	6.7	7.6	7.4	4.8
1993	7.9	8.8	9.2	9.7	8.4	5.7	5.4	5.5	7.9	8.8	8.3	10.2
1994	10.1	9.8	9.3	9.2	8.1	4.6	4.3	4.5	6.7	7.2	7.6	8.7
1995	8.4	8.7	9.6	8.0	6.6	5.4	5.1	5.5	6.1	8.5	9.0	8.9
1996	9.0	9.2	9.8	8.5	6.8	5.2	3.6	5.0	7.2	9.5	6.7	8.3
1997	8.7	10.0	7.4	8.2	7.3	5.3	4.7	6.0	7.7	9.2	9.9	11.2
1998	11.0	11.4	12.2	11.1	8.0	5.8	5.0	6.2	7.4	9.3	8.0	7.5

1999	9.4	10.2	9.2	9.2	7.4	6.9	5.0	4.9	7.4	7.2	8.4	10.1
2000	8.5	9.4	9.6	9.2	8.0	6.6	4.8	5.4	8.0	6.3	5.5	8.9
2001	10.2	10.1	10.4	8.3	7.9	4.8	5.5	5.1	7.5	9.2	9.8	9.3
2002	8.8	10.8	10.2	9.2	7.4	5.5	6.2	4.8	7.6	9.2	10.0	11.1
2003	10.2	9.9	9.3	9.4	7.8	6.4	4.3	5.3	6.6	8.3	9.5	9.7
2004	7.7	10.3	9.5	8.5	7.4	5.3	6.0	5.2	6.9	9.4	9.8	10.2
2005	9.5	10.8	10.7	9.5	5.9	5.8	4.2	5.0	7.3	9.4	7.0	9.5
2006	9.4	11.0	10.7	8.3	5.8	6.3	4.1	5.3	7.1	8.2	9.4	10.7
2007	11.1	9.1	10.3	9.4	7.8	5.2	5.6	5.8	5.7	8.2	10.1	8.6
2008	10.6	9.9	9.6	9.2	7.5	5.7	5.0	6.4	7.9	9.4	9.4	8.2
2009	10.5	10.2	10.4	9.8	7.8	5.8	6.5	6.3	6.9	9.1	8.9	10.4
PROM	8.6	9.0	8.9	8.4	6.6	5.2	4.3	4.9	6.5	7.8	7.8	8.4

Fuente:(SENAMHI, 2023).

Tabla 18: Humedad relativa mensual promedio, estación meteorológica Weberbauer.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1989	81.8	80.5	78.6	80.2	72.4	81.4	90.0	86.5	86.4	83.5	84.6	69.1
1990	73.7	78.1	75.3	77.9	76.4	80.2	69.1	66.6	72.4	77.1	80.4	70.3
1991	71.1	72.9	76.6	79.6	79.5	83.0	83.0	88.3	80.0	81.7	84.5	85.3
1992	80.5	75.9	80.7	86.0	82.9	82.5	71.8	66.0	82.0	74.6	72.4	64.7
1993	74.1	79.1	85.1	82.9	82.3	80.8	79.3	79.0	83.5	80.1	72.6	84.4
1994	87.2	82.3	87.6	84.2	77.5	73.7	87.9	74.9	78.0	78.3	74.3	75.7
1995	72.8	77.2	79.2	75.3	73.5	69.1	70.1	65.5	65.8	74.9	74.5	74.9
1996	78.5	80.5	82.7	78.9	76.7	72.6	66.4	70.5	68.7	75.3	64.0	68.9
1997	72.3	80.7	72.9	75.6	71.5	66.9	60.4	61.7	62.9	66.7	72.4	80.3
1998	79.6	79.9	82.7	81.1	73.0	69.1	63.9	62.4	65.6	71.8	69.3	62.8
1999	74.4	84.7	79.1	77.8	77.4	76.3	67.6	61.7	74.0	67.0	68.5	76.0
2000	72.8	81.0	79.2	79.2	77.1	74.3	66.7	64.7	72.4	62.0	57.7	75.3
2001	80.9	78.6	83.7	76.6	77.4	68.7	66.1	59.8	67.8	69.2	75.7	75.9
2002	72.1	79.9	81.6	78.0	71.7	66.9	67.7	60.8	65.3	73.8	76.0	78.7
2003	73.0	76.2	78.2	78.7	73.5	73.6	67.0	65.1	66.4	71.3	73.4	74.3
2004	70.4	77.3	74.7	75.2	72.7	67.5	69.5	61.9	65.0	71.5	73.8	76.2
2005	75.1	77.7	81.4	75.5	68.8	66.8	61.9	60.4	62.0	75.0	62.4	72.0
2006	72.2	79.8	82.5	75.4	68.9	70.2	64.3	63.6	66.7	66.3	70.1	75.7
2007	78.4	74.4	80.8	80.4	74.7	66.6	66.9	64.8	62.9	71.7	76.3	71.9
2008	79.0	80.8	78.3	77.8	74.2	69.6	66.4	65.1	67.4	73.7	73.0	68.9
2009	80.3	79.9	81.0	78.0	43.7	70.5	67.1	64.4	62.5	70.1	71.1	76.3
PROM	76.2	78.9	80.1	78.8	73.6	72.9	70.1	67.3	70.4	73.1	72.7	74.2

Fuente:(SENAMHI, 2023).

Tabla 19: Velocidad de viento mensual promedio, estación meteorológica Weberbauer.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1987		4.20	3.68	3.02	3.88	4.55	3.75	4.61	3.27	3.59	2.78	2.94
1989	3.12	2.70	2.86	2.31	2.00	1.86	2.21	3.51	3.07	3.44	2.80	3.20
1990	3.08	2.86	3.25	3.18	3.42	3.14	3.74	3.88	3.17	2.52	2.19	3.29
1991	3.09	3.10	2.33	2.78	3.08	3.41	3.44	4.27	3.24	2.85	2.59	2.68
1992	2.68	2.40	2.40	1.85	2.33	2.66	3.49	3.11	2.57	2.05	2.28	2.53
1993	2.69	2.14	1.97	1.93	1.98	2.52	3.10	3.10	2.54	2.17	2.22	1.91
1994	2.18	1.97	2.12	2.37	2.60	2.70	3.20	3.45	2.71	2.29	2.30	2.04
1995	2.34	2.11	2.24	2.49	2.47	2.42	2.31	2.54	3.22	2.35	1.85	2.07
1996	2.01	2.24	1.88	2.12	2.11	2.41	3.10	2.42	2.40	1.64	2.49	1.96
1997	2.08	1.95	2.21	2.05	2.40	2.29	3.87	3.60	2.38	2.32	2.46	1.92
1998	2.10	2.28	2.28	2.19	2.88	3.16	3.69	3.40	2.73	2.14	2.27	2.62
1999	2.00	1.69	1.88	1.89	2.04	2.12	3.12	3.16	2.60	2.91	2.26	2.23
2000	2.59	2.16	2.25	1.98	2.17	2.18	2.77	2.64	1.93	2.47	2.37	1.96
2001	1.98	1.98	1.82	2.36	2.26	2.96	2.44	3.44	2.18	2.22	1.82	1.98
2002	2.30	1.85	1.99	2.13	2.14	2.86	2.79	3.30	2.49	1.95	2.22	2.16
2003	2.15	2.01	2.06	2.13	2.41	2.28	3.05	3.26	2.69	2.26	1.86	1.05
2004	1.32	0.85	0.99	0.99	1.27	1.73	1.42	2.63	1.53	1.29	0.88	1.27
2005	0.86	1.26	0.80	1.38	1.29	1.69	2.49	2.03	2.12	0.82	1.47	1.37
2006	1.97	1.38	1.13	1.38	1.81	1.96	2.74	2.05	1.71	1.46	1.18	1.20
2007	1.29	1.63	1.05	1.05	1.16	2.28	2.47	2.03	2.62	1.68	1.03	1.53
2008	1.19	1.02	1.05	1.00	1.08	1.44	1.82	2.11	1.94	1.53	1.58	1.33
2009	0.73	0.91	0.97	1.33	1.14	1.88	1.95	1.99	2.31	1.40	1.37	0.84
PROM	2.1	1.9	1.9	1.9	2.1	2.4	2.8	2.9	2.5	2.1	2.0	2.0

Fuente:(SENAMHI, 2023).

Tabla 20: Radiación solar mensual promedio, estación meteorológica Weberbauer.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1989	497.1	492.6	494.0	451.8	462.5	436.2	476.3	483.7	520.2	554.9	556.5	558.3
1990	487.9	523.3	515.2	494.7	461.4	431.1	482.9	523.5	533.2	513.3	515.0	554.0
1991	536.9	547.2	512.7	510.8	475.9	434.4	510.4	511.2	558.8	549.8	578.5	543.5
1992	537.8	555.6	539.7	420.4	478.9	430.2	428.5	459.7	458.4	458.1	486.1	535.4
1993	460.8	440.7	409.8	390.7	390.5	404.3	414.6	443.5	430.6	436.3	460.2	407.9
1994	412.8	419.6	420.5	405.4	387.8	411.6	430.0	451.6	466.8	476.5	466.9	452.1
1995	469.7	451.5	422.5	445.4	421.3	415.1	414.9	460.9	476.3	459.1	452.2	452.8
1996	429.8	437.0	416.2	411.7	412.5	410.7	441.9	448.6	459.4	428.9	496.5	468.6
1997	460.2	423.2	484.5	438.3	405.6	421.6	429.2	440.4	467.8	457.9	429.3	400.3
1998	414.7	414.4	388.5	391.8	407.8	402.4	426.8	447.4	468.8	442.2	469.1	485.4

1999	432.8	400.4	431.3	405.4	394.8	380.5	400.3	455.3	437.7	470.3	460.5	417.8
2000	455.9	412.7	417.0	397.9	385.5	381.5	412.4	443.2	436.6	494.3	520.3	433.3
2001	399.3	412.1	390.9	414.9	385.9	403.5	410.6	451.3	452.1	451.2	427.9	445.6
2002	457.5	417.7	413.3	408.3	406.2	406.7	402.1	464.0	463.9	434.9	420.6	410.2
2003	436.4	441.3	425.1	405.6	394.0	393.6	425.9	457.7	475.9	478.7	448.6	419.8
2004	480.3	413.3	433.1	417.6	405.2	390.6	397.6	453.2	459.3	444.5	431.8	430.2
2005	445.2	432.6	408.5	413.3	431.6	417.5	449.5	469.4	471.2	424.9	494.8	424.9
2006	439.2	411.9	389.5	418.3	424.8	383.8	434.5	448.7	461.0	468.9	443.6	413.3
2007	414.3	440.4	405.0	396.9	396.6	407.1	415.3	441.3	470.4	451.4	418.0	447.7
2008	410.6	417.4	408.8	394.3	394.9	399.8	417.0	438.8	445.6	427.7	441.2	465.6
2009	411.7	415.9	400.1	394.0	393.2	400.6	391.8	442.7	469.5	452.2	455.1	418.4
PROM	451.9	443.8	434.6	420.4	415.1	407.8	429.2	458.9	470.6	465.5	470.1	456.4

Fuente:(SENAMHI, 2023).

Tabla 21: Precipitaciones mensuales promedio, estación meteorológica Weberbauer.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
1978	12.70	34.40	48.80	37.00	65.60	3.90	4.40	3.80	25.00	24.40	54.00	44.80
1979	84.10	81.60	159.70	37.10	16.30	1.80	7.50	15.70	33.60	24.40	26.30	46.60
1980	34.90	42.40	65.00	29.30	6.90	15.10	3.20	6.70	2.30	130.40	111.00	106.70
1981	78.20	186.50	105.70	33.70	14.70	6.60	7.20	12.70	22.00	111.90	45.60	111.30
1982	71.70	102.90	75.70	88.70	38.20	7.80	2.10	6.60	43.90	124.80	67.30	87.40
1983	116.60	75.70	152.80	105.70	31.10	10.10	9.60	2.70	19.20	86.90	28.10	118.40
1984	24.70	233.60	123.80	80.00	69.50	25.10	23.40	18.70	36.70	68.60	97.60	104.10
1985	24.60	42.40	37.20	41.90	53.00	0.40	4.80	18.30	37.30	50.00	23.90	40.30
1986	84.40	47.70	96.80	120.20	16.20	0.60	1.20	14.60	1.30	43.60	66.20	51.80
1987	98.20	95.20	39.20	52.20	9.10	4.00	10.80	12.30	39.50	37.20	74.30	61.50
1988	109.70	105.50	44.80	95.60	10.60	5.40	0.00	0.40	32.90	69.40	65.20	63.40
1989	87.00	158.80	113.50	85.40	18.80	16.70	3.20	5.90	53.50	106.60	47.10	2.70
1990	101.80	68.50	58.30	27.40	39.50	24.60	0.80	7.10	20.10	87.60	99.10	72.30
1991	43.80	90.00	133.70	55.20	17.90	0.70	0.40	0.30	10.20	28.20	55.10	71.90
1992	52.60	31.80	66.60	46.50	18.90	21.20	4.60	10.00	40.80	64.00	32.00	34.10
1993	61.00	112.20	245.00	102.90	30.20	1.90	3.30	2.90	51.40	106.30	71.40	84.10
1994	116.90	103.10	170.20	144.90	35.30	3.30	0.00	0.20	11.90	27.20	89.80	122.60
1995	44.70	108.30	75.70	49.70	20.60	1.70	13.20	10.80	11.50	51.80	50.50	76.40
1996	65.20	124.00	120.10	50.40	13.70	0.80	0.50	15.80	13.90	76.20	68.80	34.10
1997	63.80	152.90	26.50	40.40	17.00	15.40	0.20	0.00	27.40	50.80	119.90	129.40
1998	103.00	116.50	257.00	83.90	19.60	4.80	1.30	4.70	17.80	79.60	29.10	47.90
1999	94.80	242.70	69.50	65.00	53.70	22.80	22.10	1.20	81.40	21.70	77.00	68.80
2000	46.00	162.30	126.30	77.30	40.50	15.60	2.10	13.40	56.60	9.90	44.50	122.30
2001	191.20	100.80	230.20	57.20	48.10	2.30	13.90	0.00	34.40	46.20	93.40	90.90
2002	27.00	60.00	133.10	77.20	23.00	8.80	10.70	3.40	14.60	90.30	99.90	86.10
2003	51.10	61.40	103.60	42.10	30.70	22.30	1.80	10.60	14.80	46.00	63.80	80.70
2004	36.10	102.00	56.90	44.50	42.40	2.10	13.80	29.40	19.00	63.40	92.60	123.70
2005	84.90	53.70	136.60	54.00	7.20	4.50	0.60	3.50	31.20	92.30	30.00	87.80
2006	83.20	101.60	199.30	77.60	7.70	23.90	1.80	6.10	33.60	12.70	60.40	81.70
2007	95.40	17.50	182.40	111.50	29.00	1.40	10.70	6.40	11.60	117.20	97.60	68.80

2008	80.20	133.30	118.40	99.10	22.70	15.40	2.30	11.70	34.70	96.50	72.20	97.10
2009	180.70	74.60	110.50	78.80	42.20	17.90	12.30	3.90	11.80	78.50	109.40	74.20
2010	49.50	112.90	154.00	88.40	31.60	8.60	2.60	1.30	28.90	43.40	52.50	70.80
2011	76.60	73.30	125.20	102.00	16.70	0.40	8.30	0.00	47.10	31.50	24.40	109.70
2012	154.20	134.70	126.40	72.80	51.50	0.80	0.00	2.50	19.10	83.30	120.30	58.30
2013	61.50	98.00	213.60	73.80	62.60	7.50	5.70	8.90	3.70	110.70	17.00	51.90
2014	75.70	67.30	143.20	78.80	26.90	5.00	2.00	3.90	27.70	26.50	45.70	114.90
2015	184.70	55.40	202.20	63.00	75.80	3.00	4.40	0.10	27.80	16.80	99.60	39.50
2016	82.90	85.30	121.30	56.20	7.00	1.60	2.10	1.10	25.10	60.00	16.10	63.10
2017	77.50	72.30	138.90	78.60	47.20	12.00	2.30	20.90	21.20	65.30	63.20	168.10
2018	99.00	126.40	117.30	73.30	50.10	10.80	0.50	0.00	24.40	61.80	97.40	69.40
2019	46.90	107.30	172.70	78.10	37.40	9.10	11.80	0.00	7.60	121.80	60.40	162.70
2020	38.20	31.20	107.90	56.90	24.90	7.30	27.60	0.70	10.60	33.20	58.30	140.40
2021	100.80	54.30	138.60	129.50	38.20	10.50	4.50	12.30	23.70	108.80	58.30	45.70
2022	40.50	50.90	90.70	95.90	30.60	9.80	3.50	10.60	15.60	80.90	50.90	50.00
PROM	78.63	95.40	123.00	71.99	31.34	8.78	5.98	7.16	26.19	65.97	65.05	80.85

Fuente:(SENAMHI, 2023).

NEXO 02: PLANO TOPOGRÁFICO

ANEXO 03: PLANO DE USO DE SUELOS

ANEXO 04: PLANO DE ISOPIEZAS

ANEXO 05: PLANO DE GEOLÓGICO