

Estimación del porcentaje y direcciones de anisotropía empleando sísmica de refracción en dos puntos ubicados a diferentes distancias de la Falla Potreros, Mesa de Los Santos.

Danna Alejandra Conde Gómez y Laura Camila Merchan Caballero

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geólogo

Director

Rocío Del Pilar Bernal Olaya

PhD Geóloga

Codirector

Saul Ernesto Guevara Ochoa

PhD Geofísico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

A mis padres y mi familia, por su guía y apoyo en todas las decisiones de mi vida.

A Jennie, por su amor, confianza y haber creído en mí, que me ha ayudado ser mejor
persona, infinitas gracias.

A Laura, por su amor y paciencia, gracias por ser mi mejor amiga.

A todos aquellos que contribuyeron con pensamientos, discusiones y vivencias en la
construcción de mi ser durante mi paso por el alma mater.

Danna Conde.

A mis padres, Yolanda y Víctor, por su amor, apoyo incondicional, por sus consejos que
me han ayudado a enfrentar los momentos difíciles, infinitas gracias por todo. A mi familia por
apoyarme y motivarme a alcanzar mis metas.

A mis amigos, en especial a Danna, por su apoyo y amistad incondicional, y a todas las
excelentes personas que conocí a lo largo de estos años que me han enseñado a ser mejor.

Laura Merchan.

Agradecimientos

A nuestra directora de tesis, Geóloga PhD Rocío Del Pilar Bernal Olaya por su guía y sus valiosos aportes en las diferentes fases de este proyecto.

Al PhD Saul Guevara, nuestro codirector, por su acompañamiento y consejos compartidos.

A la Universidad Industrial de Santander y la Escuela de Geología, por brindarnos las herramientas en nuestra formación como profesionales íntegros.

A la escuela de Física por la colaboración en el préstamo de los equipos necesarios para la toma de datos.

Al Señor don Eris y Sergio, por su gran ayuda en la adquisición de los datos, siempre estaremos agradecidas por su esfuerzo y colaboración.

Al PhD Sait Khurama, evaluador de la tesis, por su tiempo y pertinentes observaciones y recomendaciones, para mejorar la escritura y estructura de este proyecto.

A nuestros amigos y compañeros, quienes han contribuido para que este paso por la universidad sea una experiencia inolvidable.

Tabla de Contenido

Introducción	12
1. Generalidades.....	14
1.1 Planteamiento del problema.....	14
1.2 Hipótesis	15
2. Objetivos.....	17
2.1 Objetivo General.....	17
2.2 Objetivos Específicos.....	17
3. Localización.....	18
4. Contexto Geológico	19
4.1 Antecedentes	19
4.1.1 Geofísica	19
4.1.2 Hidrogeología	21
4.2 Estratigrafía.....	23
4.2.1 Formación Los Santos.....	23
4.3 Geología estructural	28
4.3.1 Fallas	28
4.3.2 Fracturas.....	31
5. Marco teórico.....	31
5.1 Conceptos básicos.....	31
5.1.1 Meteorización	32
5.1.2 Porosidad.....	34
5.1.3 Permeabilidad	34

5.1.4 Facies	34
5.1.5 Anisotropía sísmica.....	34
5.2 Métodos geofísicos	36
5.2.1 Método sísmico.....	36
5.3 Sísmica de refracción	40
5.3.1 Distancia y ángulo crítico	41
5.3.2 Curva distancia- tiempo	42
5.3.3 Velocidades sísmicas de las rocas.....	43
6. Aspectos metodológicos	45
6.1 Fase I.....	46
6.1.1 Revisión bibliográfica.....	46
6.1.2 Formulación de modelo geológico.....	46
6.1.3 Diseño de la adquisición geofísica azimutal.....	47
6.1.4 Ensayo previo.....	49
6.2 Fase II.....	49
6.2.1 Campo.....	49
6.2.2 Adquisición de datos.....	49
6.3 Fase III	50
6.3.1 Revisión de calidad y procesamiento de datos	50
6.3.2 Análisis de resultados	53
6.3.3 Elaboración del libro final	53
7. Resultados.....	54
7.1 Lugar 1: Cercano a la Falla Potreros vereda La Fuente.....	54

7.1.1 Modelos de inversión de frente de onda	54
7.1.2 Tomografías de refracción	55
7.2 Lugar 2: 1.6 km de la Falla Potreros vereda Majadal Bajo	56
7.2.1 Modelos de inversión de frente de onda	56
7.2.2 Tomografías de refracción	57
8. Análisis de resultados	58
8.1 Lugar 1: Cercano a la Falla Potreros vereda La Fuente	58
8.1.1 Modelos.....	58
8.1.2 Diagrama de rosas.....	60
8.1.3 Porcentaje de anisotropía	61
8.2 Lugar 2: 1.6 km de la Falla Potreros vereda Majadal Bajo	62
8.2.1 Modelos.....	62
8.2.2 Diagrama de rosas.....	63
8.2.3 Porcentaje de anisotropía	64
9. Discusión.....	65
10. Conclusión	69
11. Recomendaciones	70
Referencias Bibliográficas	71

Lista de Tablas

Tabla 1. Velocidades de onda P para diferentes materiales 44

Lista de Figuras

<i>Figura 1. Localización zona de estudio.</i>	19
<i>Figura 2. Mapa de distribución de diaclasas abiertas y cerradas</i>	22
<i>Figura 3. Columna estratigráfica Fm Los Santos</i>	24
<i>Figura 4. Afloramiento de la Fm. Los Santos</i>	25
<i>Figura 5. Conglomerado del Miembro Inferior de la Formación Los Santos.</i>	26
<i>Figura 6. Intercalaciones de arcillolitas y areniscas del Miembro Medio de la Formación Los Santos</i>	27
<i>Figura 7. Contacto discordante Fm Los Santos- Fm Jordán.</i>	28
<i>Figura 8. Mapa de fallas</i>	29
<i>Figura 9. Estructura de la zona critica</i>	32
<i>Figura 10. Perfil básico de meteorización-capas de la CZ</i>	33
<i>Figura 11. Tipos de isotropía transversal o anisotropía azimutal</i>	35
<i>Figura 12. Elementos de una onda</i>	37
<i>Figura 13. Efectos mecánicos de las ondas sísmicas</i>	38
<i>Figura 14. Representación esquemática ley de Snell</i>	40
<i>Figura 15. Sísmica de refracción</i>	41
<i>Figura 16. Distancia y ángulo critico</i>	42
<i>Figura 17. Curva distancia tiempo</i>	42
<i>Figura 18. Metodología.</i>	45
<i>Figura 19. Formulación modelo geológico 2D</i>	47
<i>Figura 20. Diseño adquisición sísmica multi-azimutal</i>	48
<i>Figura 21. Trazo de los primeros arribos</i>	51

<i>Figura 22. Paso a paso modelo de inversión de velocidad de onda P</i>	522
<i>Figura 23. Parámetros ideales</i>	52
<i>Figura 24. Modelos de inversión de velocidad de onda P lugar cercano a la falla.</i>	545
<i>Figura 25. Tomografías de velocidad de onda P lugar cercano a la falla.</i>	556
<i>Figura 26. Modelos de inversión de velocidad de onda P lugar lejano a la falla</i>	57
<i>Figura 27. Tomografías de velocidad de onda P lugar lejano a la falla</i>	58
<i>Figura 28. Diagrama de Rosas cerca a la falla</i>	61
<i>Figura 29. Diagrama de rosas lugar lejano a la falla</i>	64
<i>Figura 30. Bloque diagrama de análisis de resultados</i>	66

Resumen

Título: Estimación del porcentaje y direcciones de anisotropía empleando sísmica de refracción en dos puntos ubicados a diferentes distancias de la Falla Potreros, Mesa de Los Santos.*

Autor: Danna Alejandra Conde Gómez, Laura Camila Merchan Caballero**

Palabras Clave: Sísmica de refracción azimutal, Falla Potreros, Dirección de fracturamiento, Porcentaje de anisotropía, Mesa de Los Santos.

Descripción: La Mesa de Los Santos, en especial la zona sur, es una región que ha sido afectada por el déficit de agua potable. El estudio de las fracturas es de vital importancia, ya que estas estructuras influyen en el flujo y almacenamiento del agua subterránea, permitiendo la infiltración de agua meteórica y promoviendo la meteorización química. Las fracturas verticales con una orientación preferencial son detectables por anisotropía sísmica, pues la onda se propaga con mayor velocidad a lo largo del rumbo de estas estructuras. El objetivo de este proyecto es determinar el porcentaje y direcciones preferenciales de anisotropía, en varias profundidades, mediante la aplicación de sísmica de refracción azimutal, para esto se seleccionaron dos puntos a ubicados a diferentes distancias de la Falla Potreros. La interpretación de los datos obtenidos indica que las velocidades más rápidas se orientan a 106° azimut de rumbo, para el primer lugar ubicado a 0.3km de la Falla Potreros y 112° en el segundo sitio alejado 1.6 km de esta estructura, aunque las tendencias no están muy marcadas probablemente por la meteorización presente en el medio, los resultados coinciden con la orientación del sistema principal de fracturas estudiadas en la zona. Nuestros resultados también muestran que el porcentaje de anisotropía disminuyen a profundidad en ambos sitios muestreados. La capa dos presenta valores de anisotropía moderada (13.30% - 16.45%) y en la capa tres es relativamente débil a moderado (11.59% - 13.74%). Cabe destacar que el primer lugar cercano a la Falla Potreros tiene el mayor porcentaje de anisotropía. Por lo tanto, la meteorización y la anisotropía parecen estar correlacionadas, lo que sugiere que la meteorización aumenta la anisotropía del lecho rocoso. La comprensión de la anisotropía inducida por la fracturamiento es de gran importancia en el estudio integral del agua subterránea.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Rocío Del Pilar Bernal Olaya. PhD Geología. Codirector: Saul Ernesto Guevara Ochoa. PhD Geofísica.

Abstract

Title: Estimation of the percentage and directions of anisotropy at different depths using refraction seismic at two points located at different distances from the Potrerros Fault, Mesa de Los Santos.*

Author(s): Danna Alejandra Conde Gómez, Laura Camila Merchan Caballero **

Key Words: Seismic refraction, Potrerros Fault, Fracture direction, Anisotropy percent, Mesa de Los Santos.

Description: Historically, Mesa de Los Santos has been historically affected by the deficit of potable water. The study of fractures is essential because these structures influence the flow and storage of groundwater, allowing the infiltration of meteoric water and promoting chemical weathering. Vertical fractures with a preferential orientation are detectable by seismic anisotropy because the wave propagates with higher velocity along the strike of these structures. The objective of this project is to determine the percentage and preferential directions of anisotropy, at different depths, through the application of azimuthal refraction seismic, for this we selected two points located at different distances from the Potrerros Fault. The interpretation of the data obtained indicates that the fastest velocities are oriented at 106° azimuthal heading, for the first site located 0.3 km from the Potrerros Fault and 112° in the second site located 1.6 km away from this structure, although the trends are not very marked probably due to the weathering present in the environment, results coincide with the orientation of the main fracture system studied in the area. Our results also indicate that the percentage of anisotropy decreases at depth in both locations. Layer two shows moderate anisotropy values (13.30% - 16.45%); layer three is relatively weak to moderate (11.59% - 13.74%). Notably, the first location near the Potrerros Fault has the highest percentage of anisotropy. Therefore, weathering and anisotropy appear to be correlated, suggesting that weathering increases bedrock anisotropy. Understanding fracturing-induced anisotropy is of great importance in the comprehensive study of groundwater.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical engineering. Department of Geology. Director: Rocío Del Pilar Bernal Olaya. PhD Geology. Codirector: Saul Ernesto Guevara Ochoa. PhD Geophysics.

Introducción

El agua subterránea es un gran reservorio de agua dulce que fluye continuamente y reabastece el ciclo hidrológico, la calidad de esta es generalmente alta porque se encuentra naturalmente protegida de contaminación, lo que ayuda a que no se requieran tratamientos de alto costo para poder ser consumida, razón por la cual es una alternativa eficaz para atenuar la creciente escasez de esta importante sustancia (Poeter et al., 2020). Las tendencias actuales proyectan que el estrés hídrico seguirá aumentado debido a distintas causas tales como el crecimiento poblacional, la expansión de la urbanización, el cambio climático, entre otras. El estudio de todos los factores que influye en el comportamiento de este recurso en cada territorio es crucial para garantizar la correcta gestión y desarrollo de programas que aseguren el abastecimiento de agua potable en toda la población.

La Mesa de Los Santos, en especial la zona sur, es una región que ha sido históricamente afectada por el déficit de agua potable, esto ha llevado a distintas entidades a realizar diferentes investigaciones que permitan identificar y acelerar soluciones que ayuden al manejo de esta problemática, el agua subterránea representa un potencial para ampliar el acceso básico a este elemento, esto se refleja en el uso de pozos, manantiales y aljibes como principales fuentes de abastecimiento. Los estudios que se vienen realizando sobre diferentes características geológicas e hidrogeológicas permiten tener un conocimiento integral acerca del comportamiento de este recurso, esto es crucial para llevar a cabo una gestión adecuada y sostenible que beneficie a sus habitantes.

La geofísica ofrece información relevante sobre el subsuelo, estas técnicas han sido utilizadas en distintos ámbitos como en la hidrogeología para comprender los procesos y estructuras presentes en el medio, a partir de la detección de contrastes en las propiedades

petrofísicas de las rocas (Kirsch, 2009). Las fracturas juegan un papel importante en la comprensión del sistema hídrico porque facilitan el flujo y almacenamiento de fluidos. El estudio de diferentes características de fracturamiento en el subsuelo puede hacerse a través de mediciones geofísicas. La sismica de refracción es una técnica de gran interés para la exploración de diferentes características que controlan la arquitectura de la zona crítica y permite estudiar la anisotropía inducida por dichas fracturas, lo cual ayuda tener un mayor conocimiento acerca de algunos factores que influyen en el comportamiento del agua subterránea.

En este proyecto se propone el uso de la sismica de refracción azimutal para la comprensión de la anisotropía asociada a la presencia de fracturas, realizando mediciones cerca a la Falla Potrereros y a 1.6 Km de la misma. Además, se busca responder las siguientes preguntas de investigación ¿Cuáles son las orientaciones de las fracturas cerca y a 1,6 km de la Falla Potrereros? ¿Existe o no un gradiente y dirección de anisotropía que varíe con la profundidad y cómo cambia respecto a la distancia con la Falla Potrereros?

1. Generalidades

1.1 Planteamiento del problema

El análisis del sistema de fracturas es de suma importancia dentro del estudio integral del agua, ya que estas permiten que las rocas sean lo suficientemente permeables y por ende tengan una mayor capacidad de almacenamiento y exista flujo de agua subterránea. Estudios previos realizados en la Mesa de Los Santos indican que la principal fuente de recarga corresponde al agua lluvia, la cual se infiltra y profundiza aprovechando la porosidad secundaria generada por fracturamiento (Moyano, 2010).

En el sector centro - sur de la Mesa de los Santos se ha determinado que las fallas NW-SE tiene gran influencia en el arreglo espacial del fracturamiento y su apertura, lo cual configura zonas de mayor interés hídrico para la acumulación y flujo de agua subterránea (Tarazona et al., 2021). La Falla Potreros se puede considerar como un límite estructural al ser una falla principal asociada al esfuerzo local, los altos valores en la intensidad y densidad de lineamientos evidencian la importancia de esta estructura (García, 2022). Este proyecto de investigación se propone sobre la zona influenciada por la Falla Potreros, sitio de gran importancia hidrogeológica debido a su alta porosidad secundaria, favorable para la infiltración y circulación de agua subterránea asociada al Miembro Superior de la Formación Los Santos.

Los métodos geofísicos son una herramienta fundamental para determinar estructuras presentes en el subsuelo, a partir del contraste de propiedades físicas que posee cada material. La refracción sísmica es un método que se utiliza cada vez más para estudiar las regiones más profundas del subsuelo, ya que tiene múltiples ventajas: (1) esta técnica puede proporcionar estimaciones en la velocidad de onda P a profundidades de más de 50 m; (2) este método cuantifica la velocidad de onda P en cintos de metros; (3) es una de las únicas herramientas geofísicas que

pueden cuantificar la ubicación general de los límites definidos por los cambios en la porosidad en la zona crítica ;(4) el procesamiento e inversión de los datos se pueden ejecutar de manera sencilla en computadores portátiles o de escritorio (Holbrook et al., 2013; Flinchum et al., 2022). En este proyecto se propone el uso de la sísmica de refracción azimutal, para sugerir posibles direcciones preferenciales de fracturamiento mediante el análisis de la variación de las velocidades de propagación de las ondas P en el medio.

El interés de este trabajo es proporcionar información para entender la influencia de las fracturas en el sistema hidrológico, a partir de la comparación de las respuestas en la anisotropía medida en dos puntos estratégicos situados a diferentes distancias de la Falla Potreros, lo que otorgará soporte a antiguas y nuevas investigaciones permitiendo el avance en el estudio detallado del agua subterránea y en la construcción del modelo conceptual hidrogeológico de la Mesa de Los Santos.

1.2 Hipótesis

Teniendo en cuenta algunos estudios desarrollados en la Mesa de Los Santos y otros factores que podrían afectar el comportamiento de la anisotropía (meteorización, heterogeneidades laterales, entre otras), se proponen las siguientes hipótesis:

- Existen direcciones preferenciales de anisotropía concordantes con las orientaciones de las fracturas y los tensores de esfuerzo tectónico de esta zona en todas las profundidades, lo que sugiere que las direcciones de fractura del lecho rocoso persisten a través de los procesos de meteorización en la zona crítica poco profunda (regolito y saprolito).
- En la zona crítica poco profunda (~15 m) no se presenta una dirección preferencial de anisotropía, ya que los procesos de meteorización afectan y transforman en gran

medida la estructura de la roca, mientras en zonas más profundas a esta, donde la meteorización disminuye, existe una orientación preferencial de fracturamiento definida por los esfuerzos tectónicos que actúan sobre el área de estudio.

- En el Miembro Superior de la Formación los Santos, las variaciones faciales del ambiente fluvial de depósito que generan heterogeneidades laterales no permitirían la correcta medición de la anisotropía, por lo tanto, no existiría una dirección preferencial de fracturamiento.
- El punto ubicado a 0.3 km de la Falla Potreros, puede encontrarse dentro de la zona de daño de esta estructura, donde el protolito se verá afectado por la alta densidad de diaclasas, por lo tanto, su porcentaje de anisotropía será mayor, a diferencia del punto situado a 1.6 km de la falla, posiblemente localizado fuera de la zona de daño lugar en el que disminuiría el fracturamiento y por consiguiente habría una reducción en los porcentajes de anisotropía.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Determinar el porcentaje y direcciones preferenciales de anisotropía, a diferentes profundidades, mediante la aplicación de sísmica de refracción azimutal, para aportar al conocimiento y entendimiento de la influencia de las fracturas en el sistema hidrogeológico de la Mesa de Los Santos, a partir de la comparación de los datos en la Falla Potreros y a más de un kilómetro y medio de la misma.

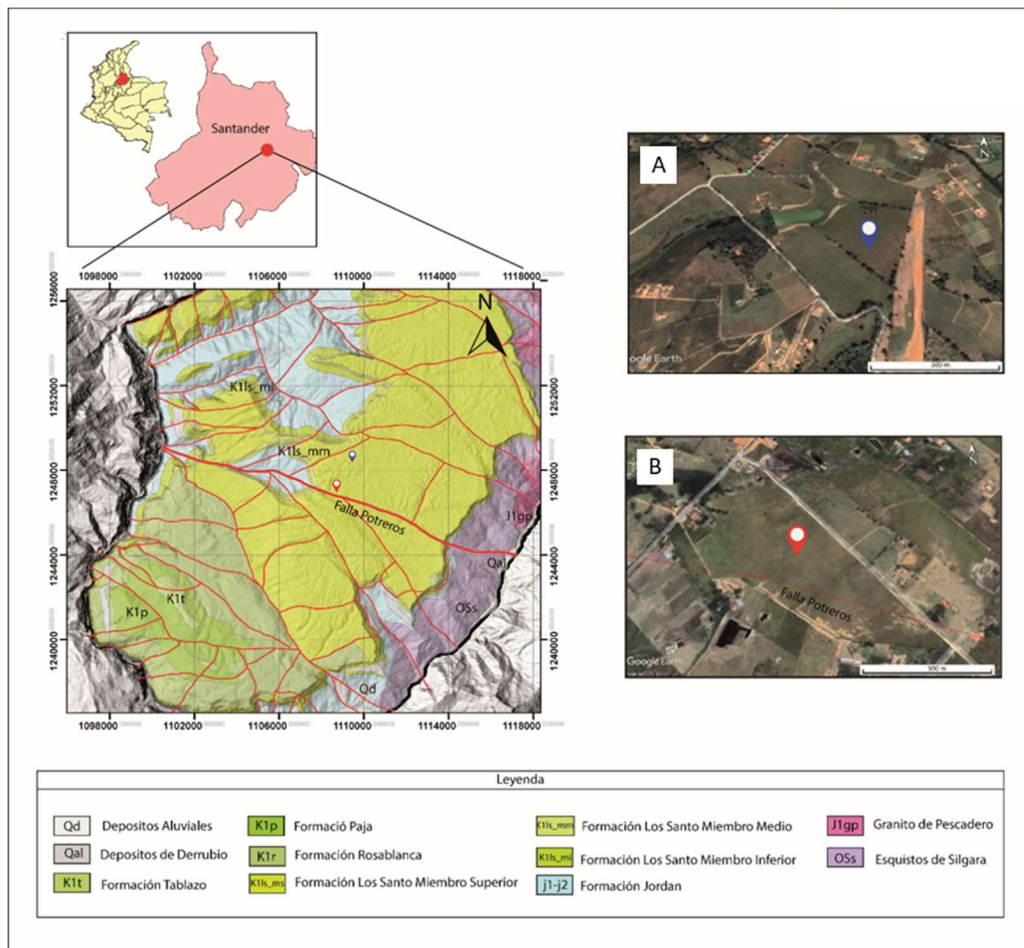
2.2 Objetivos Específicos

- Cuantificar el gradiente de variación de la anisotropía en función de la profundidad de manera indirecta en el Miembro Superior de la Formación Los Santos.
- Proporcionar información sobre la influencia de las fracturas en el sistema hidrogeológico de la Mesa de Los Santos, a partir del análisis de las características inferidas del fracturamiento.
- Validar el uso de la sísmica de refracción azimutal, para determinar las direcciones de anisotropía y la variación del gradiente a profundidad en la Mesa de Los Santos.

3. Localización

La Mesa de Los Santos se encuentra ubicada en la parte central del departamento de Santander, en el flanco occidental de la cordillera oriental. Abarca un área de aproximadamente 430 km² delimitada al este por el río Chicamocha y al oeste por el río Sogamoso, comprende parte de los municipios de Los Santos, Piedecuesta y San Juan de Girón, los cuales se encuentran en el mapa geológico del cuadrángulo H-12, escala 1:100.000 realizada por INGEOMINAS (1977).

Para este proyecto se seleccionaron dos puntos de estudio los cuales se encuentran estructuralmente ubicadas en el bloque Mojarra según Pinto et al. (2007). El primero (Figura 1.A) está situado a menos de 1 km de la estación de servicio Los Linderos en la vereda Majadal Bajo, sus coordenadas geográficas son (6°50'24.79"N & 73° 5'8.40"O) alejado 1.6 Km de la Falla Potrerros. El segundo lugar (Figura 1.B) se localiza en la vereda la Fuente sobre la vía principal (Piedecuesta-Los Santos) con coordenadas (6°49'32.35"N & 73° 5'6.76"O) cercano a la Falla Potrerros.

Figura 1. Localización zona de estudio.

Nota. Localización del área de estudio. A) zona seleccionada lejana a la Falla Potrerros. B) zona seleccionada cerca a la Falla Potrerros. Herramientas: Qgis y Google earth. Tomado y modificado de Pinto et al. (2007).

4. Contexto Geológico

4.1 Antecedentes

4.1.1 Geofísica

La Mesa de Los Santos ha sido objeto de varios estudios geofísicos, especialmente métodos geoelectrónicos, enfocados al estudio del agua subterránea. Moyano (2010) desarrolla un modelo

hidrogeológico preliminar basado en los estudios cartográficos, estructurales, hidrogeoquímicos y geofísicos para identificar posibles regiones de interés hidrológico. Se hicieron 78 sondeos eléctricos verticales (SEV) distribuidos principalmente hacia la zona sur, según este estudio la Formación Los Santos exhibe un alto potencial hídrico, siendo en ella donde se encuentran un gran número de manantiales, aljibes y pozos documentados en el área, además indica la importancia de la porosidad secundaria generada por las fracturas en cercanías a planos de falla que permiten una mayor circulación y almacenamiento de los fluidos, también se sugiere que la principal fuente de recarga es la infiltración de agua lluvia.

García & Gómez (2015) mediante la aplicación de métodos geofísicos (Tomografías de Resistividad Eléctrica y Sondeos Electromagnéticos en Dominio del Tiempo) plantean un modelo conceptual hidrogeofísico para evaluar el potencial hidrogeológico de la Formación Los Santos, de acuerdo con los resultados obtenidos los autores establecen las resistividades y espesores de cada uno de los miembros de la esta formación, donde obtiene que el Miembro Superior registra una resistividad de 1813.83 ohm*m y un espesor de 68.28 m, además muestran que los valores de resistividad resultantes definen zonas saturadas con agua subterránea e indican la presencia de acuíferos fracturados en la Formación Los Santos.

IngeoExploraciones (2016) a partir de la interpretación de los resultados de las Tomografías Eléctricas 2D realizadas en el sector de La Mesa del municipio de Los Santos, concluye que la zona de estudio presenta condiciones hidrogeológicas favorables, esto debido principalmente al comportamiento estructural del área (fracturas que presentan la Formación Los Santos y Girón). También indica una distribución irregular de la permeabilidad en la secuencia estratigráfica de La Mesa de Los Santos, lo que sugiere que es difícil que se presenten acuíferos tabulares de dimensiones definidas y confinados entre estratos impermeables, por ello los acuíferos

en la región probablemente sean una serie de sectores porosos, saturados e interconectados por fracturas.

Vargas (2021) compara la anisotropía de la resistividad del subsuelo fracturado en sectores aledaños a diferentes estructuras para determinar sus implicaciones hidrogeológicas, para esto utiliza Sondeos eléctricos azimutales y Colineales, Tomografías de resistividad eléctrica (TRE) y Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW), los resultados obtenidos muestran que la anisotropía de resistividad del Miembro Superior de la Formación Los Santos se encuentra influenciada por la presencia de fracturas en cercanía a las zonas de falla, las variaciones de la resistividad con la orientación sugieren anisotropía, además heterogeneidad del subsuelo lateral y verticalmente, también indica que posiblemente las fallas con mayor importancia hidrogeológica sean las de tipo normal con componente de rumbo, ya que estas favorecen la acumulación y transmisión de agua subterránea en la Mesa de Los Santos.

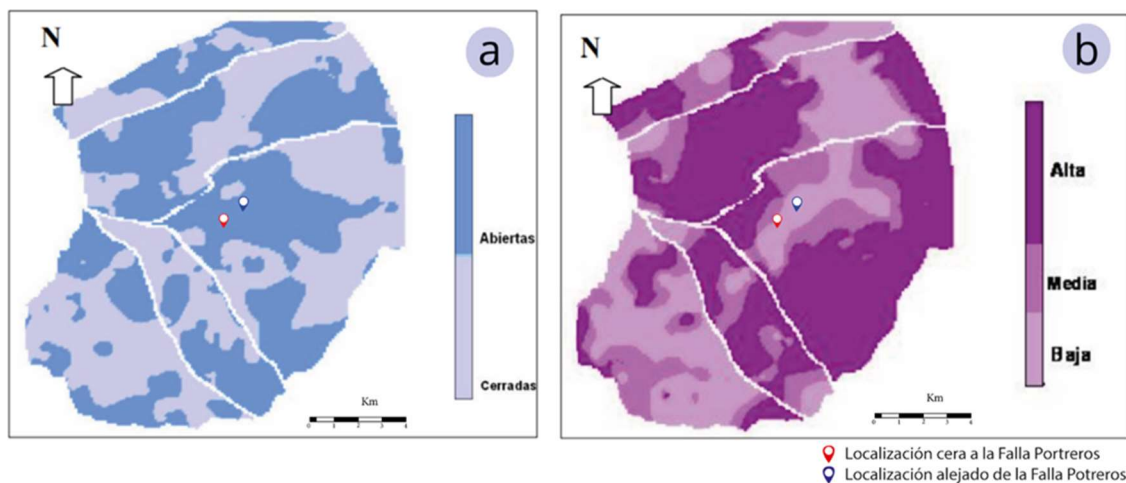
4.1.2 Hidrogeología

Pinto et al. (2007), en su proyecto de investigación sobre la geología e hidrología de la Mesa de Los Santos y un sector al noreste de Curití, presentan un análisis de los puntos más favorable para la acumulación del agua subterránea, de acuerdo con las características estratigráficas, estructurales y geología de arcillas presentes en la región, con esta información diferencia la Mesa de Los Santos en siete zonas hidrogeológicas, las zonas I y II tienen un alto interés hidrogeológico, las zonas III y IV medio y las zonas V, VI, VII bajo potencial. Los sitios planteados en este trabajo se encuentran dentro de la zona I y II, lo cual indica condiciones favorables para el flujo y almacenamiento de agua subterránea.

Contreras (2008) analiza el fracturamiento en la Formación Los Santos, teniendo en cuenta atributos fundamentales como el espaciamiento y la dirección. Los resultados de este proyecto

incluyen mapas de distribución de apertura y densidad de diaclasas (Figura 2). Se reconocen dos sectores con un alto interés hidrogeológico, el primero hacia el noreste y el segundo en la zona central de La Mesa de Los Santos, los cuales marcan lugares con mayor favorabilidad para la infiltración y transmisión de agua debido a la concentración de fracturas abiertas con una densidad de fracturamiento que va de media a alta.

Figura 2. Mapa de distribución de diaclasas abiertas y cerradas



Nota. Mapa de distribución de diaclasas abiertas y cerradas (a) y densidad de fracturamiento (b) en La Mesa de Los Santos. Tomado de Contreras (2008).

Díaz et al. (2009) en su investigación lleva a cabo un análisis y evaluación hidrogeológica en las unidades geológicas que afloran en La Mesa de Los Santos, establece la importancia hidrogeológica del Miembro Superior de la Formación Los Santos de acuerdo con sus características texturales, porosidad primaria media y alta porosidad secundaria, indica también que el Miembro Inferior presenta un interés hídrico con una porosidad alta y permeabilidad media y sugiere bajo potencial en el Miembro Medio de la Formación Los Santos y otras formaciones que se encuentran en este sector, debido a factores litológicos, baja permeabilidad y porosidad.

Tarazona & Vargas (2020) por medio del análisis cuantitativo del sistema de fracturas en la zona sur de la Mesa de Los Santos identificaron áreas favorables para la infiltración y circulación de fluidos, este proyecto se elaboró a partir de la recolección de datos estructurales y fotografías de 22 estaciones, se empleó el software FracPaQ para determinar diferentes parámetros como intensidad, densidad y longitud de la fractura. Los resultados conseguidos por esta investigación demuestran que los sectores con mayor interés se encuentran influenciados por la Falla Mojarra la cual cuenta con una alta porosidad que permitiría y facilitaría el almacenamiento de agua, así mismo los sitios afectados por la Falla Potreros cuentan con una intensidad y densidad de fracturamiento media a alta.

4.2 Estratigrafía

Las rocas que afloran en el área de estudio (Mesa de Los Santos) corresponden a secuencias de las formaciones: Formación Silgará (NeoProterozoico- Paleozoico temprano), Granito de Pescadero, rocas sedimentarias del sistema Jurásico (Formación Jordán y Girón) y por ultimo las formaciones Los Santos, Rosa Blanca, Paja y Tablazo que son rocas del Cretácico (Ward et al., 1973).

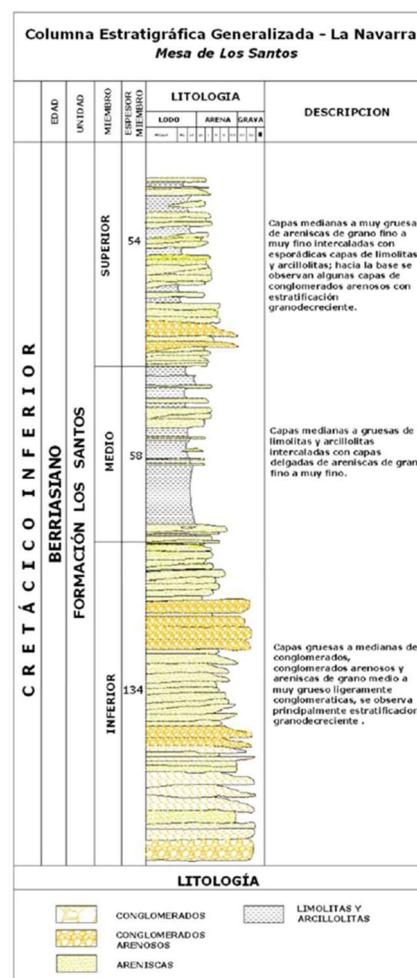
Con el fin de contextualizar desde el aspecto geológico la zona de estudio, a continuación, se presentará los rasgos mineralógicos, petrológicos y geotectónicos que se consideran de mayor interés de la Formación Los Santos ya que es la formación en la cual se realiza el presente proyecto.

4.2.1 Formación Los Santos

La Formación Los Santos fue nombrada y definida inicialmente por Morales (1958) como Fm. Tambor basándose en un informe de Hedberg (1931). Para ese entonces, este nombre se hizo bastante común en los trabajos de la época y años siguientes, no obstante, distintos autores como Cediell (1968) notaron que esta nomenclatura era errónea y propusieron cambiarla en la zona de

Mesas y Cuestas por el nombre de Fm. Los Santos. Esta formación se considera de edad Berriasiano (Etayo & Rodriguez, 1985) y aflora en gran parte de la Mesa de Los Santos, donde se han realizado cuatro columnas estratigráficas (Aldana, 2008; Rincón, 2008; Morales et al., 2010) ubicadas en las veredas La Navarra (figura 3 y 4), San Rafael, Mesitas de San Javier y Calicho. Se encuentra subdivida según sus características litoestratigráficas en tres miembros: Miembro inferior (K11s_mi), Miembro medio (K11s_mm) y Miembro superior (K11s_ms).

Figura 3. Columna estratigráfica Fm Los Santos



Nota. Columna localizada en la vereda Navarra, Mesa de Los Santos. Tomado de (Morales et al., 2010).

Figura 4. Afloramiento de la Fm. Los Santos



Nota. Tomado de (Tarazona & Vargas, 2020).

4.2.1.1 Miembro Inferior (K1ls_mi)

Este Miembro se encuentra compuesto por capas de areniscas conglomeráticas y conglomerados arenosos de tonalidades rojas grisáceas, laminación cruzada y estructura de grano decreciente, las capas son medianas a gruesas y en la base se presenta una composición sublitoconglomerática y sublitarenita, su ambiente de depositación corresponde al de un abanico aluvial (Morales et al., 2010). Las facies en este miembro se pueden asociar a las formadas en la parte proximal de un abanico aluvial, abanico medio con ríos trenzados, depósitos de canal, abanico distal con ríos trenzados y facies que se interdigitan con una llanura aluvial (Aldana, 2008).

Figura 5. Conglomerado del Miembro Inferior de la Formación Los Santos.



Nota. Foto localizada en la vereda el Pozo, Mesa de Los Santos. Tomado de (Morales et al., 2010).

4.2.1.2 Miembro Medio (K1ls_mm)

El Miembro Medio se encuentra constituido por arcillolita ílítica, limolita de cuarzo, arenisca lodosa de grano muy fino a medio de tonalidades rojizas y manchas verdosas grisáceas debido a la reducción de materia orgánica, exponen estructuras sedimentarias como laminación plano-paralela y laminación cruzada. El ambiente de depósito corresponde a llanura de inundación, crevasse splay y otros componentes de un río meandriforme (Clavijo & Royero, 2001).

Figura 6. Intercalaciones de arcillolitas y areniscas del Miembro Medio de la Formación Los Santos



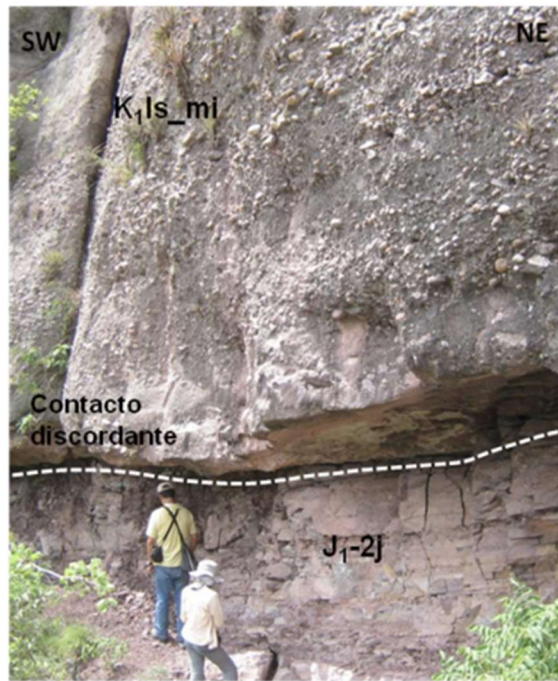
Nota. Foto localizada en la vereda La Navarra. Tomado de (Morales et al., 2010).

4.2.1.3 Miembro Superior (K1ls_ms)

Se encuentra constituido en su mayoría por areniscas de grano muy fino, fino y medio, también por pocas y delgadas capas de arcillolita íltica, limolita de cuarzo, arenisca de grano grueso y arenisca conglomerática. Presenta laminación cruzada, plana paralela y en artesa. Este miembro se asociado a un ambiente de río de baja sinuosidad y profundidad (Cediel, 1968). Tiene una porosidad y permeabilidad media a alta y alto grado de fracturamiento, que cuenta con características propias de un acuífero libre en la Mesa de Los Santos y acuífero fracturado (Pinto et al., 2007).

La Formación Los Santos se encuentra en discordancia angular con la Formación Jordán (figura 7) y en contacto concordante con la Formación Rosablanca.

Figura 7. Contacto discordante Fm Los Santos- Fm Jordán.



Nota. Foto localizada en Camino El Roto, Mesa de Los Santos. Tomado de (Morales et al., 2010).

4.3 Geología estructural

La Mesa de Los Santos se localiza en el macizo de Santander, donde se exhibe una tectónica con predominio de fallas inversas y pliegues abiertos en dirección NW-NE (Julivert et al., 1964). Se encuentra limitada estructuralmente por: la Falla de Bucaramanga hacia el E, que presenta un movimiento sinistral y dirección del tensor de esfuerzo máximo NW-SE; la Falla de Suárez al W, de tipo inverso; y la Falla Los Montes al N (Clavijo & Royero, 2001).

4.3.1 Fallas

Las estructuras presentes en esta zona se pueden clasificar en tres grupos de acuerdo con las características geométricas y cinemáticas de cada una de ellas (Figura 8), el sistema de fallas longitudinales se caracteriza por una dirección predominante NW, este tipo de fallas presenta una

4.3.1.1 Sistema de fallas longitudinales

Entre las estructuras que hacen parte del sistema de fallas longitudinales se encuentran: las fallas La Lejía, El Aljibe, ubicadas al NE del municipio de Los Santos, que presentan una cinemática normal con componente de rumbo dextral y dirección NE. Las fallas Las Calaveras, La Mojarra, Los Santos situadas hacia el SE de la Mesa de Los Santos, tienen una cinemática de rumbo sinistral con un componente inverso en el buzamiento y la Falla Potreros sobre la cual se hará especial énfasis por su importancia en el presente estudio:

- Falla Potreros: Se localiza en la zona central del municipio de Los Santos, fue inicialmente definida como una falla de rumbo dextral con componente normal, pero de acuerdo con nuevos estudios realizados por Tarazona & Vargas (2020) se redefinió como una falla con cinemática sinistral y componente de rumbo normal en el buzamiento. Exhibe un trazo curvo hacia los escarpes y recto en la parte central que afectan las rocas de la Formación Los Santos, Jordán y Silgará. La extensión de esta falla es de aproximadamente 13 km.

4.3.1.2 Sistema de fallas transversales

Las fallas Los Montes y San Javier se encuentran localizadas al NE de la Mesa de Los Santos, estas estructuras presentan una cinemática dextral con componente inverso, con vergencia SE y NW respectivamente (Morales et al., 2010). Afectan a las rocas de las formaciones Los Santos, Jordán, Silgará y Granito de Pescadero.

4.3.1.3 Fallas menores

En la Mesa de los Santos se encuentran diferentes estructuras menores que se ubican hacia el SW, estas son fallas producto de la tectónica local que afecta la región, entre las cuales se encuentran: Falla Zanjón de Pardo, de tipo inverso, la Falla La Pilonera y el tramo izquierdo de

Falla Zanjón de la Vega, tienen una cinemática sinistral con un componente normal en el buzamiento y Falla La Chivatera junto con el tramo derecho de Falla Zanjón de la Vega se describen como sinestrales con componente normal en el buzamiento (Morales et al., 2010). Estas fallas se conectan con el trazo de la Falla Los Santos.

4.3.2 Fracturas

Según los estudios realizados por Velandia (2010) para la Mesa de Los Santos el análisis de fracturamiento indica una dirección preferencial de N50-70W (para las fracturas), por otro lado, Tarazona & Vargas (2020) por medio del análisis de 551 planos de fractura en la región sur de la Mesa establecen una dirección de N60-70 W, además definen las siguientes direcciones preferenciales de tipo local para el sector sur: N70-80W, N20-30W y N0-10E.

5. Marco teórico

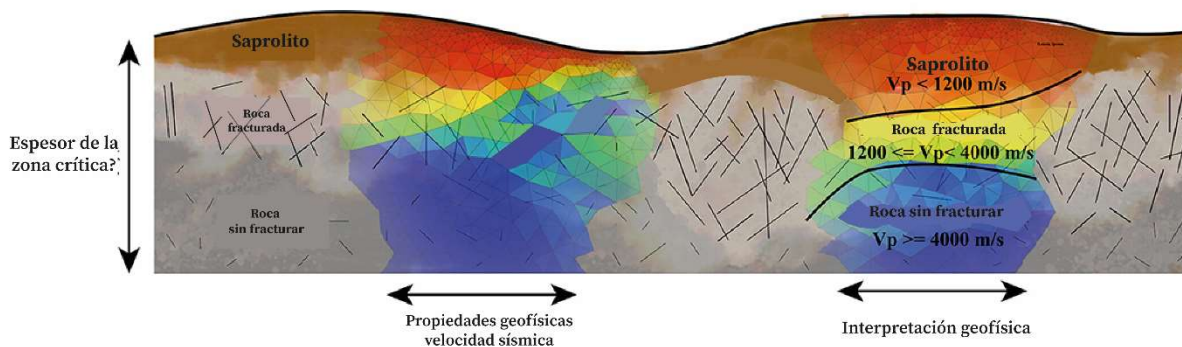
El léxico empleado en este trabajo de investigación comprende ramas de la geología estructural, hidrogeología y geofísica. En este capítulo se exponen los conceptos más relevantes para comprender la terminología usada en el presente proyecto

5.1 Conceptos básicos

La región que se extiende desde las zonas más superficiales altamente meteorizadas hasta el lecho rocoso no alterado se conoce como “zona crítica (ZC)”. Este término hace referencia a la capa de la tierra en la cual existe una interacción entre la roca, aire, agua, suelo y seres vivos, que conduce a heterogeneidades estructurales y composicionales tanto lateral como verticalmente (Richter et al., 2009; Brantley et al., 2017). El grosor de la zona crítica es una de las preguntas que siguen sin tener respuesta, sin embargo, en términos generales la ZC se puede dividir en capas distinguibles de suelo, saprolito y roca madre fracturada. El estudio de estas capas brinda información relevante acerca de diferentes procesos involucrados en el flujo y almacenamiento de

agua (Riebe et al., 2016). El análisis de las estructuras que rigen la ZC es un desafío debido a la accesibilidad, logística y gastos que conlleva su reconocimiento. Los métodos geofísicos han sido utilizados con éxito para su caracterización ya que cuentan con una buena resolución y una penetración de profundidad variables (Befus et al., 2011; Leopold et al., 2013; Mendieta, 2017). En este trabajo se tiene en cuenta la definición de la zona crítica, y se prevé que modificará potencialmente la relación de anisotropía a profundidad como documenta Flinchum et al. (2022) en la figura 9.

Figura 9. Estructura de la zona crítica



Nota. dibujo conceptual de la ZC muestra cómo se relaciona las propiedades geofísicas (V_p) con las variaciones en la ZC a profundidad. Tomado y modificado de (Flinchum et al., 2022).

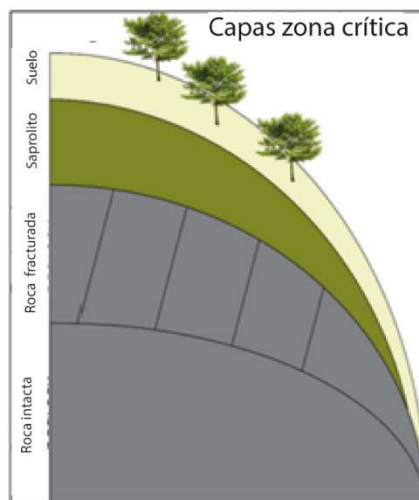
5.1.1 Meteorización

La meteorización se define como el conjunto de procesos que transforman las características originales de la roca. Las fracturas promueven la meteorización química, estos procesos controlan la evolución y arquitectura de la zona crítica, el análisis de estos factores permite obtener información relevante sobre el subsuelo (Anderson et al., 2007; Holbrook et al.,

2013; St. Clair et al., 2015). Se puede considerar que el perfil básico de meteorización lo conforman:

- Suelo: suelo móvil, parte del regolito que se desplaza ladera abajo, material desagregado.
- Saprolito: roca madre fracturada y meteorizada que ha sufrido procesos químicos y mecánicos.
- Regolito: las capas de suelo y saprolito, también conocidas como regolito móvil e inmóvil, respectivamente.
- Roca fracturada: roca madre no meteorizada, fracturada, con aberturas de fractura más pequeñas que el saprolito. Alterado por procesos mecánicos, pero no químicos.
- Roca madre intacta: parte de la roca que no ha sido afectada por los fluidos meteóricos.

Figura 10. Perfil básico de meteorización-capas de la CZ



Nota. Tomado de Mendieta (2017).

5.1.2 Porosidad

La porosidad está definida como aquel porcentaje ya sea de una roca o de un depósito sedimentario que corresponde a espacios vacíos y abiertos (Yale & Crawford, 1998). Las rocas sedimentarias suelen ser más porosas que las rocas cristalinas, y se sabe que entre mayor sea la porosidad de una roca o formación, será superior la capacidad para retener agua. El espacio abierto causado por fracturas también es considerado porosidad y este tipo de porosidad se le conoce como secundaria.

5.1.3 Permeabilidad

La permeabilidad se conoce como la facilidad con que un fluido se traslada a través de un medio (la roca), hace referencia a la medida de la interconexión de los espacios libres o porosidad de una roca (Yale & Crawford, 1998).

5.1.4 Facies

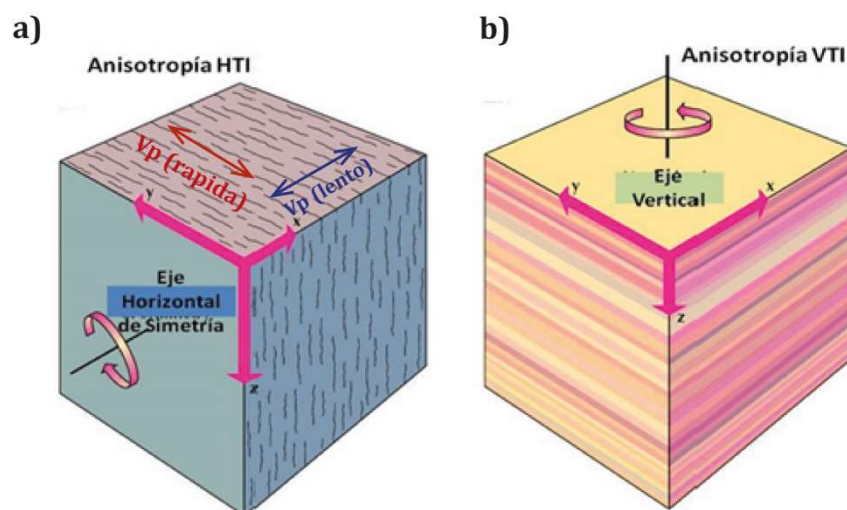
Según Gressly (1838), una facie se denomina como "la suma total de los aspectos litológicos y paleontológicos de una unidad estratigráfica", en otras palabras, corresponde al conjunto de características litológicas y paleontológicas de un estrato o un grupo de estratos que da lugar a su distinción de los demás.

5.1.5 Anisotropía sísmica

La anisotropía es una propiedad que presentan múltiples materiales en la corteza terrestre, se define como la variación de los valores en las propiedades físicas respecto a las direcciones en las que se estén midiendo. En las rocas la anisotropía se genera por distintos factores entre los cuales se encuentran las fracturas, la estratificación, el contenido de arcilla y la foliación en rocas metamórficas donde los minerales se orientan con una dirección preferencial.

Las rocas presentan un comportamiento elástico que permite el paso de ondas sísmicas a través de ellas, las variaciones en las velocidades en diferentes direcciones pueden indicar la presencia de anisotropía sísmica (Crampin, 1986). De acuerdo Lynn & Michelena (2011) para el estudio de esta propiedad es necesario entender el comportamiento de las rocas las cuales pueden tener un tipo de simetría específico que va a depender de un número de constantes elásticas, entre estas se encuentra la isotropía transversal o también llamada anisotropía azimutal (ver figura 11), donde dependiendo del eje de simetría puede ser: isotropía transversal vertical (VTI) que se asocia a la estratificación de las rocas. La isotropía transversal horizontal (HTI) que se presenta debido a la existencia de fracturas verticales en las rocas las cuales generan un cambio de velocidades en distintos azimuts, como se puede observar (figura 11.a) la onda sísmica viaja más rápido en la dirección del rumbo de las fracturas y más lento cuando se propaga perpendicular a estas, como lo indica Bamford & Nunn, (1979).

Figura 11. Tipos de isotropía transversal o anisotropía azimutal



Nota. a) isotropía transversal horizontal (HTI). b) representa la isotropía transversal vertical (VTI). Tomada y modificada de (Vega, 2013).

5.2 Métodos geofísicos

Los métodos geofísicos son bastante útiles y comunes en los estudios del agua subterránea, ya que con ellos se puede conocer zonas sin acceso directo para el ser humano como lo es el subsuelo (Telford et al., 1990). Son varios los métodos geofísicos existentes y todos ellos se valen de las propiedades físicas de las rocas para obtener datos indirectos a espera de una interpretación, además se pueden clasificar según el parámetro físico investigado. Para cumplir los objetivos de este proyecto de investigación se propone el uso de la sísmica de refracción azimutal, cuyo parámetro físico corresponde a la velocidad de propagación de las ondas.

5.2.1 Método sísmico

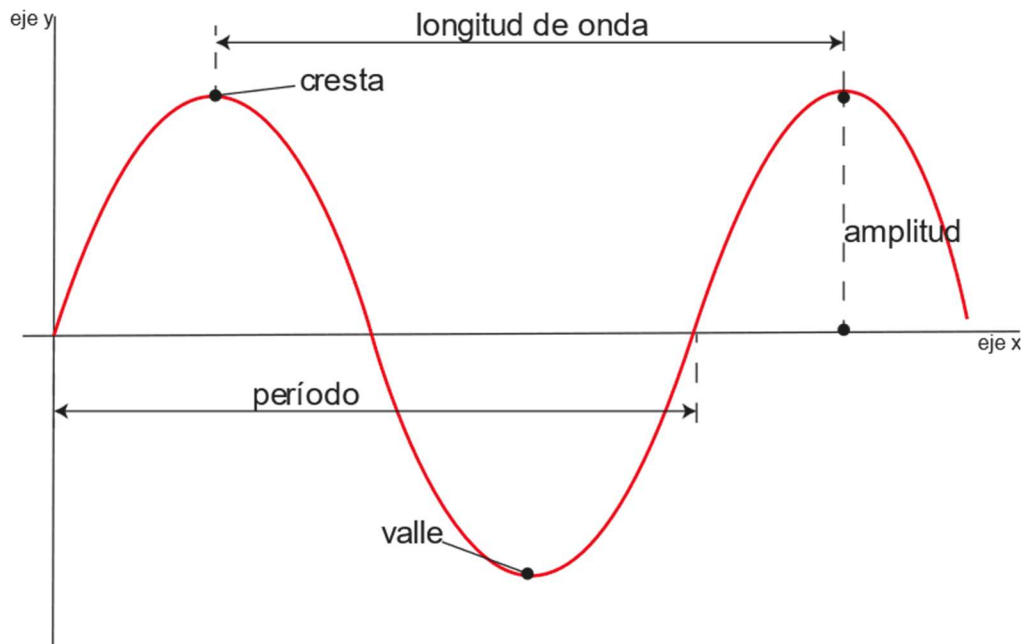
El método sísmico es una herramienta que consiste en detectar las propagaciones de los frentes de onda elásticas producidas por una fuente artificial ya sea martillos, pistones, explosivos, entre otros. Existen dos tipos de ondas elásticas; las ondas de cuerpo y las ondas de superficie, siendo las primeras las de mayor interés en el sentido de cumplir con los objetivos de este proyecto de investigación, debido a que las ondas de cuerpo tienen la capacidad de atravesar niveles de profundidad en el subsuelo (Kirsch, 2009). Los marcados contrastes de la velocidad de propagación de las ondas permiten un buen análisis de las estructuras presentes en la zona crítica y esta propiedad física depende principalmente de las constantes elásticas de las rocas (módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, módulo de compresibilidad, módulo de rigidez y constante de Lamé).

5.2.1.1 Onda sísmica

Las ondas sísmicas son oscilaciones que viajan desde una fuente a través del material elástico (sólido o líquido) a diferentes velocidades (Lowrie & Fichtner, 2020), a continuación, los elementos principales de una onda:

- Cresta o pico: corresponde al punto de máximo desplazamiento por arriba de ese eje central.
- Valle: punto de máximo desplazamiento por debajo de ese eje central.
- Longitud de onda (λ): hace referencia a la distancia horizontal entre dos crestas o dos valles consecutivos y es la altura alcanzada por la onda.
- Periodo (T): es el tiempo que se requiere para que dos crestas sucesivas pasen por un determinado lugar, es decir, es el tiempo entre las repeticiones sucesivas de la onda.
- Frecuencia (f): corresponde al número de onda por unidad de tiempo
- Velocidad (V): se define como $V = \lambda * f$.

Figura 12. Elementos de una onda

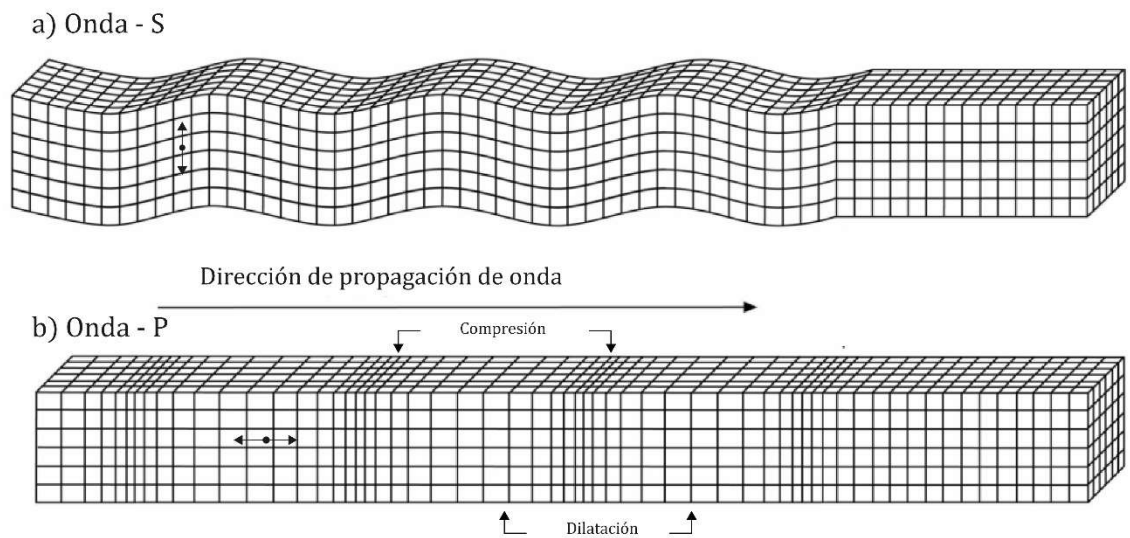


Nota. Elementos de una onda, fuente: modificado de (Lowrie & Fichtner, 2020).

5.2.1.2 Ondas de cuerpo

Las ondas de cuerpo son capaces de propagarse a través del interior de un medio elástico, como ya se mencionó antes, pueden viajar por el medio en diferentes niveles de profundidad. Las ondas compresionales (ondas P) y de corte (ondas S) son los dos tipos de ondas de cuerpo que existen, las primeras viajan con una velocidad mayor que el segundo tipo y se propagan comprimiendo y dilatando el medio, por otro lado, las ondas de corte (ondas S) son más lentas que las ondas compresionales y tienen un movimiento perpendicular a la dirección de propagación de la onda (Udías, 2000; Stein & Wysession, 2003).

Figura 13. Efectos mecánicos de las ondas sísmicas



Nota. Ondas de cuerpo (a) ondas P y (b) ondas S. tomado y modificado de (Stein & Wysession, 2003).

5.2.1.3 Refracción

Se llama refracción al cambio experimentado por la onda en la dirección de propagación que ocurre cuando esta pasa de un medio a otro (Kearey et al., 2002).

La propagación y trayectorias de ondas sísmicas en la refracción está regido por las siguientes leyes y principios.

- (1) Principio de Huygens.
- (2) Principio de Fermat.
- (3) Ley de refracción (o de Snell)

5.2.1.4 Principio de Huygens

Christiaan Huygens, físico y matemático holandés, fue quien explicó por primera vez el paso de una onda a través del medio, el principio establece que “cada punto de un frente de onda se puede comportar como un nuevo generador de nuevos frentes ondas secundarias” (Kirsch, 2009).

5.2.1.5 Principio de Fermat.

El principio fue formulado por el matemático francés Pierre de Fermat, explica la trayectoria de los rayos sísmicos en el medio y establece que “el trayecto seguido por una onda al propagarse desde la fuente al receptor es tal que el tiempo empleado es un mínimo” es decir la onda siempre elige el camino que le sea más rápido para viajar de un punto A hasta un punto B.

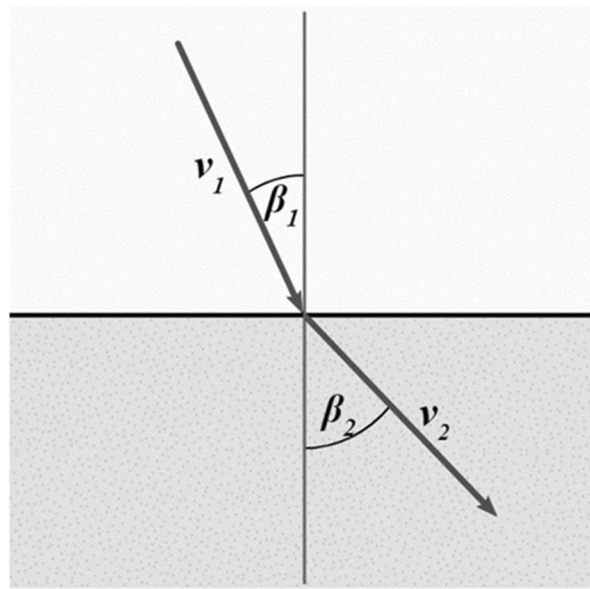
5.2.1.5 Ley de refracción (o de Snell)

La ley de refracción o ley de Snell establece que el seno del ángulo incidente es al seno del ángulo de refracción como la velocidad de la onda incidente es a la velocidad de la correspondiente onda refractada (Telford et al., 1990).

$$\frac{\text{sen } \beta_1}{\text{sen } \beta_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

Donde β_1 corresponde al ángulo incidente, β_2 ángulo de refracción, V_1 velocidad de onda incidente y V_2 velocidad de onda refractada (ver imagen 14)

Figura 14. Representación esquemática ley de Snell



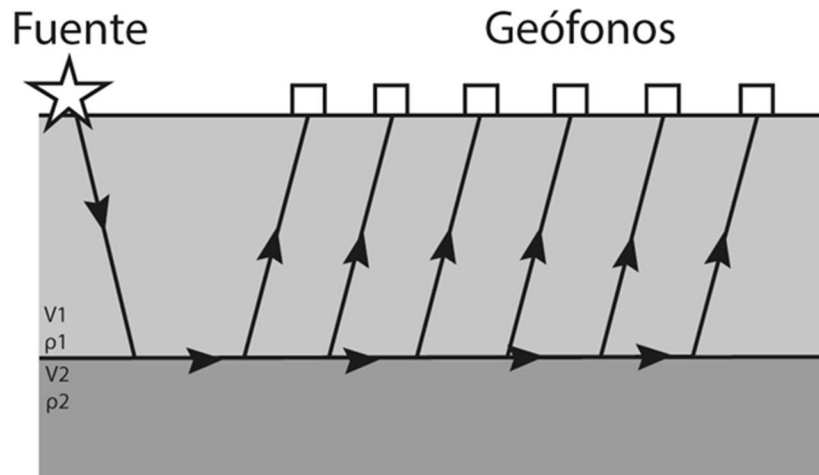
Nota. Tomado y modificado de (Telford et al., 1990).

5.3 Sísmica de refracción

La sísmica de refracción es un método que ha sido comúnmente utilizado en estudios hidrogeológicos, identificación de fracturas, profundidad del nivel freático, entre otros. El método consiste en extender un tendido de una longitud predeterminada y distribuir geófonos que son registradores de ondas (sismodetectores) separados entre sí convencionalmente de 5 a 10 metros, empleando de 12 hasta 48 canales. El trabajo de los geófonos es captar las vibraciones que se producen por una determinada fuente que se escoge dependiendo de la profundidad y resolución que se desee analizar. Para estudios superficiales se utiliza generalmente una porra de 16 o 18 lb, mientras que para investigaciones más profundas se suelen usar pistones o explosivos. La profundidad de medición es aproximadamente 1/4 o 1/3 de la extensión del tendido (Kearey et al., 2002).

La sísmica de refracción usa los tiempos de los primeros arribos del sismograma que hace referencia a las ondas refractadas críticamente (refracciones con ángulo crítico) en las distintas interfaces del subsuelo.

Figura 15. Sísmica de refracción



Nota. Tomado y modificado de (Kearey et al., 2002).

5.3.1 Distancia y ángulo crítico

Cuando el frente de onda es refractado es perpendicular a la interfase es decir $\beta_2=90^\circ$ (figura 16), el ángulo β_1 o ángulo incidente que corresponde a esa refracción es llamado ángulo crítico (β_c) (Reynolds, 2011). Está definido como:

$$\text{sen } \beta_c = \frac{V_1}{V_2}$$

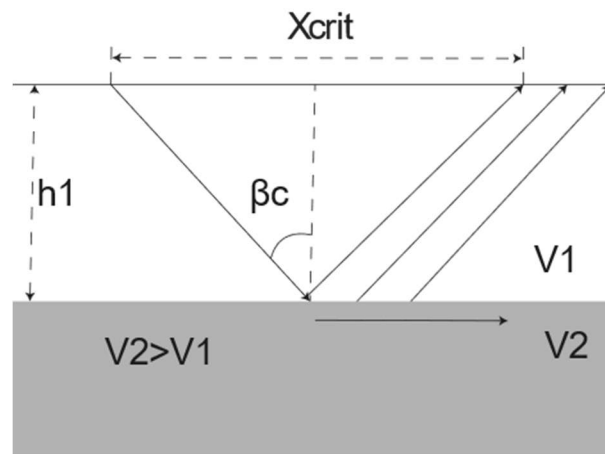
Donde V_2 es mayor a V_1 , $V_2 > V_1$.

Por otro lado, la distancia crítica (X_{crit}) hace referencia al intervalo entre el punto de disparo y el sitio en donde se detecta la primera onda refractada en superficie (Lowrie & Fichtner, 2020). Está definida por la siguiente ecuación:

$$X_{crit} = \frac{2h_1}{\left(\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 - 1\right)^{0.5}}$$

Donde h_1 corresponde al espesor de la capa 1, V_2 la velocidad de la capa 2 y V_1 la velocidad de la capa 1 (ver figura 17).

Figura 16. Distancia y ángulo crítico

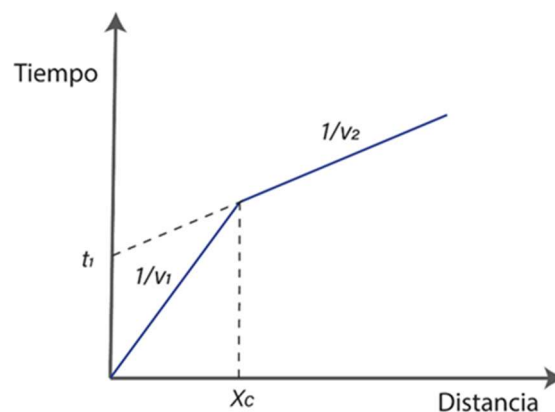


Nota. Tomado y modificado de (Reynolds, 2011)

5.3.2 Curva distancia- tiempo

El diagrama de rayos tiempo – distancia (Figura 17), se elabora con los tiempos de llegada de las ondas P a cada uno de los geófonos y la separación que tienen estos sensores a la fuente.

Figura 17. Curva distancia tiempo



Nota. Gráfico Tiempo- Distancia para dos capas. Tomado y modificado de (Anomohanran, 2013).

Según la imagen anterior, el primer segmento de recta corresponde al tiempo de llegada de la onda directa y el segundo indica los tiempos de arribo de la onda refractada, la cual tendrá menor inclinación que la anterior. La pendiente de cada uno de estos tramos equivale a $1/v_1$ y $1/v_2$ para la primera y segunda capa respectivamente, el inverso de estas representa la velocidad de cada una de las capas. La distancia crítica (X_c) se encuentra en el vértice entre el primer y el segundo tramo de línea y es el punto en el que la onda directa y refractada llegan al mismo tiempo a cada uno de los receptores.

Con esta información es posible obtener los espesores de cada una de las diferentes capas identificadas de acuerdo con la siguiente ecuación, donde v_1 corresponde a la velocidad del medio uno, v_2 es la velocidad de la capa dos y t_1 es el tiempo transcurrido.

$$h = \frac{t_1 v_1 v_2}{2\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}$$

5.3.3 Velocidades sísmicas de las rocas

Las velocidades con la que se propagan las ondas a través de los diferentes tipos de rocas dependen de distintos factores, entre los cuales se encuentran la composición, mineralogía, contenido de fluidos, tamaño de grano, presión, temperatura, cementación, porosidad, entre otros (Press, 1966). La siguiente tabla muestra el rango de velocidades de ondas P para distintos materiales:

Tabla 1. Velocidades de onda P para diferentes materiales

Material	V _p (m/s)
Aluvión	500-2100
Arcilla	1100-2500
Arena	200-2000
Arenisca	1400-4500
Shale	2300-4700
Caliza	
Soft	1700-4200
Hard	2800-6400
Cristalina	5700-6400
Dolomita	3500-6900
Granito, Granodiorita	4600-6000
Diabasa	5800-6000
Gabro	6400-6700
Basalto	5400-6400
Esquisto	4200-4900
Gneis	3500-7500
Agua	1450
Aire	335

Nota. Tomado y modificado (Press, 1966)

La anisotropía dada por las fracturas presentes en las rocas genera cambios en las propiedades elásticas iniciales, esto causa una variación en las velocidades de propagación de las ondas sísmicas. Múltiples estudios han demostrado que el comportamiento en el dominio del tiempo y de la frecuencia de la forma de onda está condicionada por la densidad de la fractura presente en el medio, es decir, las ondas sísmicas se tenderán a propagar más lentamente en medios con una alta densidad de fracturas (Stan -Kleczeck & Idziak, 2008).

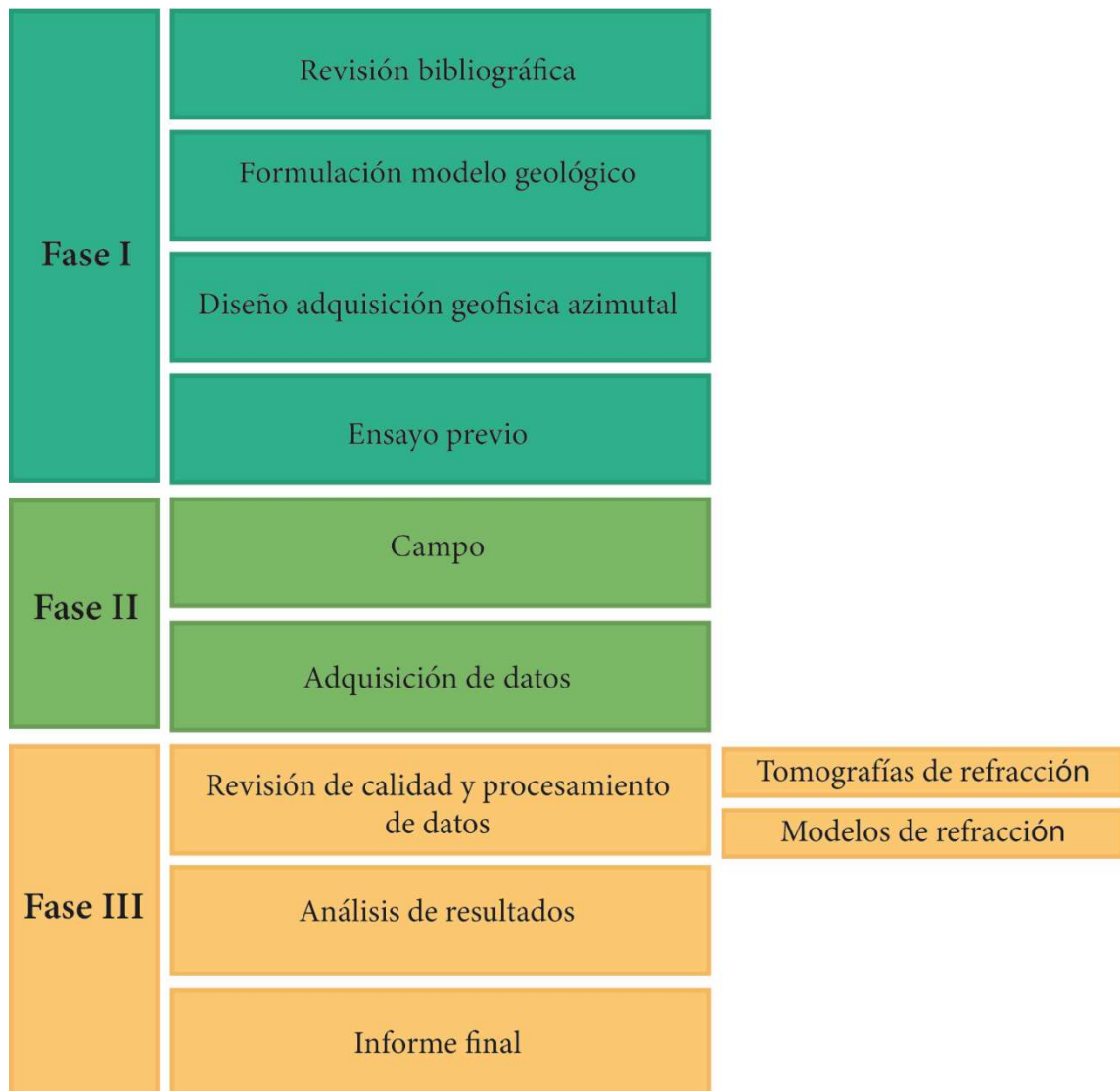
La anisotropía sísmica (v_a) se puede definir utilizando los valores de velocidad máxima (v_{max}) y velocidad mínima (v_{min}) medidas en campo.

$$v_a = \frac{v_{max} - v_{min}}{v_{max}}$$

6. Aspectos metodológicos

Este proyecto de investigación sigue el siguiente flujo de trabajo con el fin de cumplir con los objetivos planteados, se propone una metodología compuesta por tres fases que inicia con una búsqueda preliminar de información hasta la finalización y entrega de resultados del informe final.

Figura 18. Metodología.



Nota. Metodología seguida para la realización del presente trabajo. Fuente: autores.

6.1 Fase I

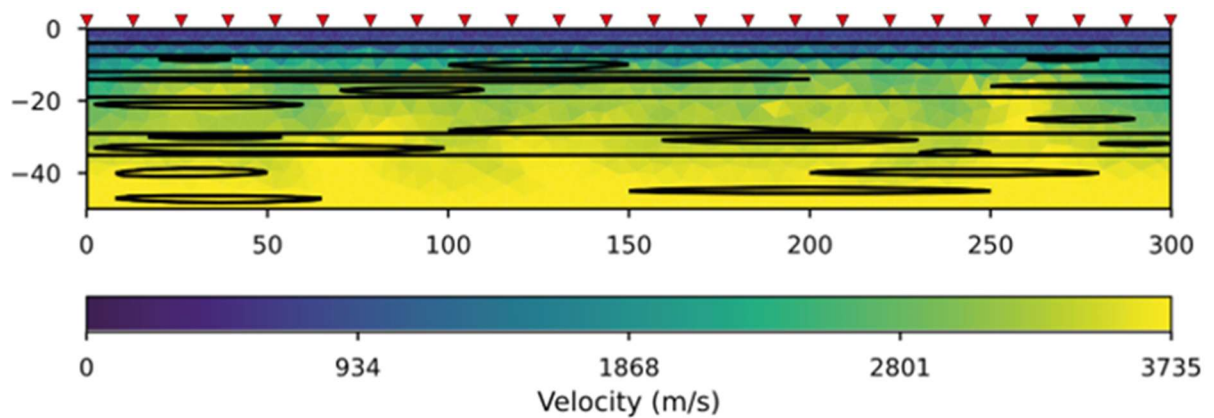
6.1.1 Revisión bibliográfica

En la primera etapa se realizó una búsqueda, análisis y síntesis de la información relacionada con los objetivos del proyecto de investigación, con el fin de tener una visión del estado actual del escenario geológico, geomorfológico, estratigráfico, estructural e hidrogeológico del área de estudio. Además, se investiga acerca del método sísmico de refracción azimutal, sus principios físicos, equipo de adquisición y procesamiento de datos, con la finalidad de establecer alcances, limitaciones del método, aprender y aclarar definiciones de conceptos básicos relacionados con el tema de trabajo.

6.1.2 Formulación de modelo geológico

Durante la etapa de planeación “pre-campo” se establecen los parámetros de adquisición con la formulación de un modelo geológico, que permita identificar con un modelado directo, las distancias idóneas, y la longitud máxima del arreglo de adquisición para muestrear la anisotropía a diferentes profundidades respecto al perfil de meteorización.

Para la formulación de dicho modelo se utiliza la librería de código abierto “pyGIMLi”. A partir de la revisión de la estratigrafía del Miembro Superior de la Formación Los Santos dada por (Cediel, 1968; Aldana, 2008; Rincón 2008). Para este modelo se consideraron siete cambios litológicos diferenciados por estos autores en un perfil de aproximadamente 50 m de profundidad. Se establecieron distintas velocidades de onda P teóricas para cada capa. El resultado de la inversión muestra los cambios de la velocidad de manera gradual conforme lo que se espera que suceda en un modelo generalizado.

Figura 19. Formulación modelo geológico 2D

Nota. Formulación del modelo geológico 2D con siete capas con distintas V_p , veinticuatro geófonos. Herramienta pyGIMILi. Fuente autores.

6.1.3 Diseño de la adquisición geofísica azimutal

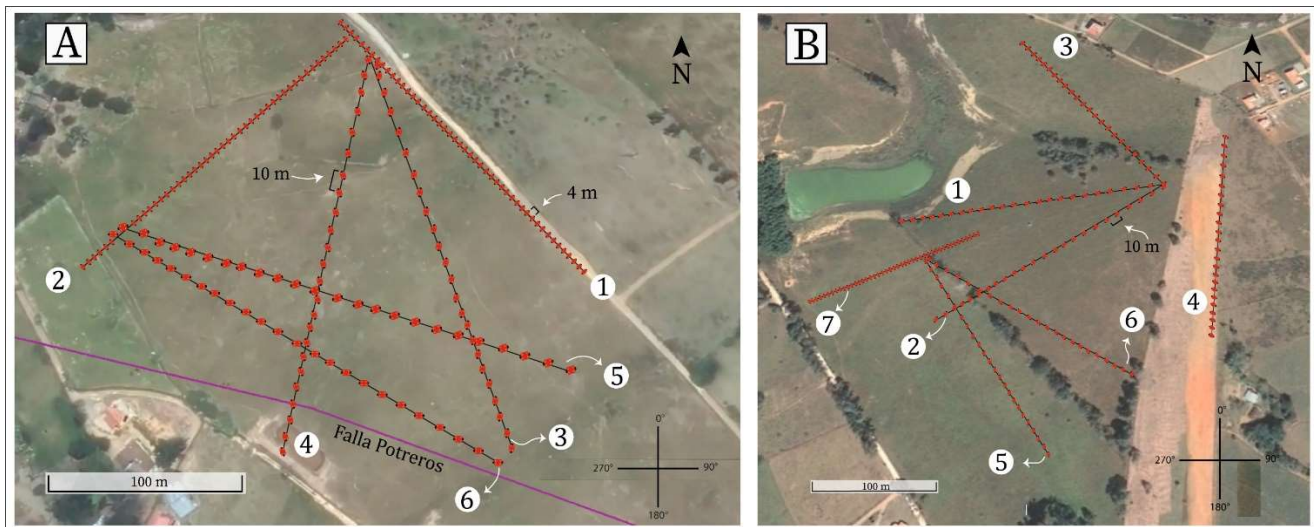
Dado que se quiere determinar la dirección de anisotropía se propone un estudio de refracción sísmica azimutal, se revisa la metodología desarrollada por Masyhur et al. (2018) que consiste en un tendido sísmico de líneas de prospección 2D multiazimutal en forma de abanico dispuestas de tal manera que comparten un mismo geófono inicial (ver figura 20).

En total se adquieren trece líneas sísmicas, diez de estas con veinticuatro geófonos separados diez metros entre ellos y tres implementando 48 geófonos distanciados entre si cuatro metros con el propósito de tener mayor detalle en los datos. Además, se establecen siete puntos de disparo en cada línea con cinco a siete apilamientos para aumentar la relación señal/ruido.

La distribución de los azimuts se escogió teniendo en cuenta que el fracturamiento en esta zona esta influenciado por la Falla Potreros, esta estructura tiene un rumbo de $\sim 115^\circ$. Por lo tanto se trató de que uno de los tendidos sísmicos en los dos sitios tuviera una orientación similar, el resto de las líneas sísmicas se distribuyeron en otras direcciones para cubrir la mayor cantidad de azimuts.

Teniendo en cuenta relación 1/5 entre la extensión del arreglo y la profundidad de muestreo en los estudios de sismica, se plantea una longitud máxima de 230 m para obtener resultados hasta aproximadamente los 45m de profundidad.

Figura 20. Diseño adquisición sísmica multi-azimutal



Nota. Tendido sísmico multiazimutal. A) Lugar 1 ubicado en la vereda La Fuente cerca a la Falla Potreros, el diseño de adquisición consiste en cuatros líneas sísmicas (3,4,5 y 6) con 24 geófonos separados 10 m y dos líneas sísmicas (1 y 2) con geófonos equidistanciados 4 m. B) Lugar 2 ubicado en la vereda Majadal Bajo a 1.6 km a la Falla Potreros se realizaron seis líneas sísmicas en diferentes azimuts con geófono separados 10 m (líneas 1, 2,3,4,5,6) y una línea sísmica con geófonos separados 4 m (línea 7). Además, se establecen siete puntos de disparo en cada línea con cinco a siete apilamientos para aumentar la relación señal/ruido. Los puntos rojos representan la ubicación de los receptores.

6.1.4 Ensayo previo

Con el fin de aprender el uso adecuado del equipo de sismica se realiza una práctica en conjunto con los estudiantes de la asignatura de campo 3, el ensayo se llevó a cabo en la sede principal de la Universidad Industrial de Santander. Se estableció una línea sísmica de cuarenta y ocho (48) geófonos de 10 Hz espaciados cuatro metros entre ellos, se hicieron tres golpes en total con una porra de 18 lb, aprendiendo el uso general del equipo de sismica.

6.2 Fase II

6.2.1 Campo

En la etapa de campo, realiza un reconocimiento previo de la zona de la Mesa de Los Santos, para tener una visión más clara del ámbito estructural y proponer posibles puntos de adquisición, uno cercano y otro lejano a la Falla Potreros (alejado más de 1.5Km), confirmando que cuenten con los siguientes criterios básicos:

a) espacio suficiente para realizar el tendido sísmico multiazimutal, teniendo en cuenta que cada línea sísmica tiene una longitud de 230 metros.

b) fácil acceso para el transporte de la fuente, en este caso un pistón transportado por una camioneta.

c) topografía lo más plana posible.

6.2.2 Adquisición de datos

En esta subetapa se hace la respectiva instalación del equipo y se procede a la toma de datos, esto se realiza en un total de cinco días teniendo en cuenta el presupuesto.

En la adquisición de las trece líneas sísmicas de refracción se usa el equipo ABEM Terraloc Pro, con el diseño anteriormente mencionado que corresponde a: diez líneas de veinticuatro geófonos de 10 Hz separados 10 m entre sí, y tres de 48 canales separados 4 metros. A lo largo de

cada arreglo se ejecutan un total de 7 golpes, con un tiempo de muestreo de 1.63 ms y cinco stacks. Como fuente de energía sísmica se utiliza un pistón (PEG-40) transportado por una camioneta y una porra de 18 lb para ciertos casos donde las condiciones del terreno no permitan la entrada del vehículo.

6.3 Fase III

6.3.1 *Revisión de calidad y procesamiento de datos*

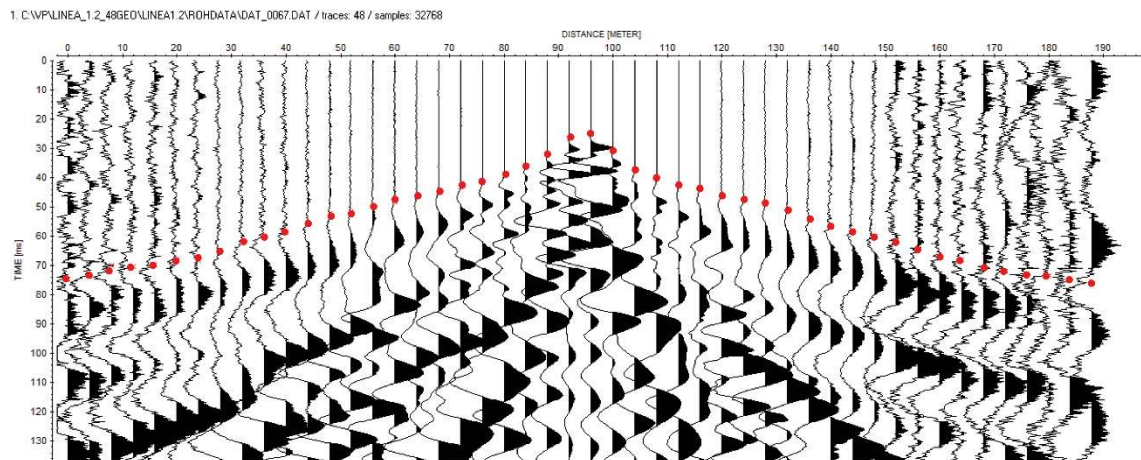
En esta fase inicialmente se hace una revisión de la calidad y procesamiento de los datos obtenidos en campo, para ello se utiliza el software REFLEXW ampliamente empleado en el procesamiento geofísico, desarrollado por la compañía geofísica Sandmeier y del cual la Universidad Industrial de Santander cuenta con una licencia actualmente vigente.

Para el procesamiento de los datos tomados en campo seguimos este flujo de trabajo:

- **Almacenamiento:** En el módulo *2D-data analysis* se importan los datos obtenidos en la campaña de campo grabados en formato SEG2, compatible con el software utilizado. Se configura la geometría donde se verifica que las coordenadas de cada línea estén correctamente definidas (fuentes y receptores).
- **Eliminación de trazas:** Se eliminan algunas trazas que presentan demasiado ruido o trazas con picos aleatorios, que pueden afectar los resultados posteriores.
- **Picado de los primeros arribos:** Se seleccionan los primeros tiempos de llegada de la onda P, de forma manual. Para este proceso se aplica la función de ganancia para incrementar la amplitud de las trazas y mejorar la visibilidad de los datos.
- **Filtro pasa banda:** Para disminuir el ruido presente en las trazas y poder realizar los picados de los primeros arribos en estos sectores donde no hay tanta claridad de la primera

llegada de la onda, se aplica un filtro pasa banda Butterworth de 10 a 100 Hz. Este filtro se escogió ya luego de varias pruebas era el que mejor ajustaba a todo el conjunto de datos.

Figura 21. Trazo de los primeros arribos



Nota. Puntos rojos indican los primeros arribos de las ondas P, esta línea tiene una función de ganancia de 32 para incrementar la amplitud de las trazas y mejorar la visibilidad de los datos, esta imagen no presenta filtro pasa banda Butterworth, software Reflexw. fuente: autores

Generación de modelos

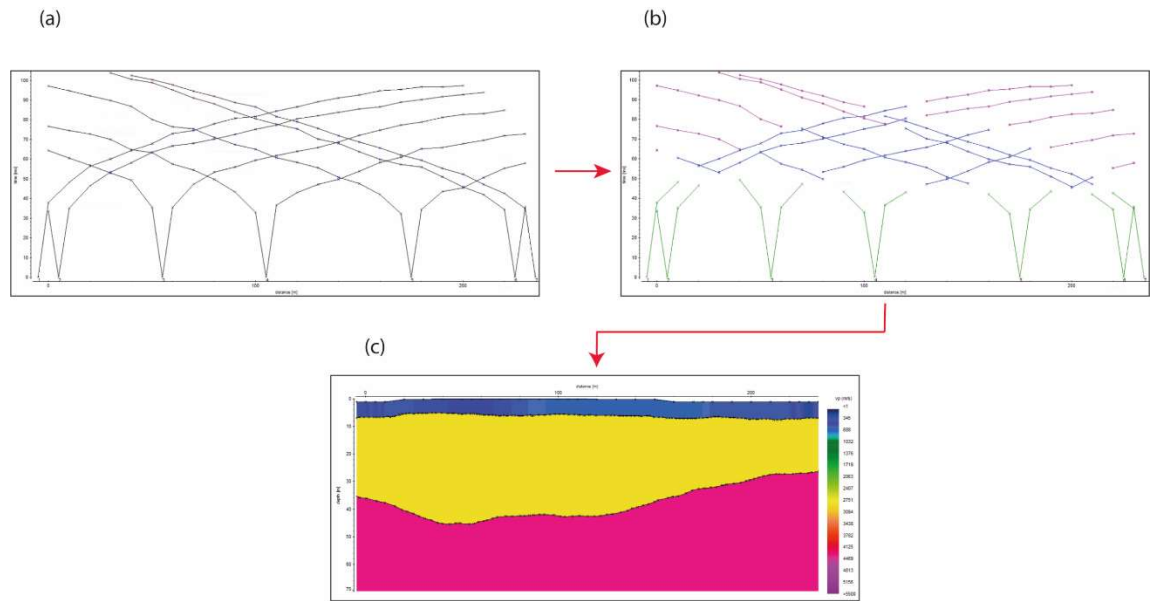
Para este trabajo de investigación se generaron dos modelos en cada línea sísmica utilizado dos diferentes métodos, wavefront-inversion y tomografía de refracción, esto con el fin de obtener una información más completa acerca del subsuelo y poder realizar una mejor interpretación de los datos obtenido.

- **Inversión de frente de onda (wavefront-inversion)**

Los picados de los primeros arribos se ingresan y unen en el módulo *traveltime analysis* donde a partir de la interpretación y teniendo en cuenta el cambio de pendientes de cada línea se asignaron las capas para cada modelo. Los tiempos de viaje combinados se invierten en un modelo

del subsuelo en el que se presentan distintas interfaces y sus respectivas velocidades, usando el método de **inversión de frente de onda**.

Figura 22. Paso a paso modelo de inversión de velocidad de onda P

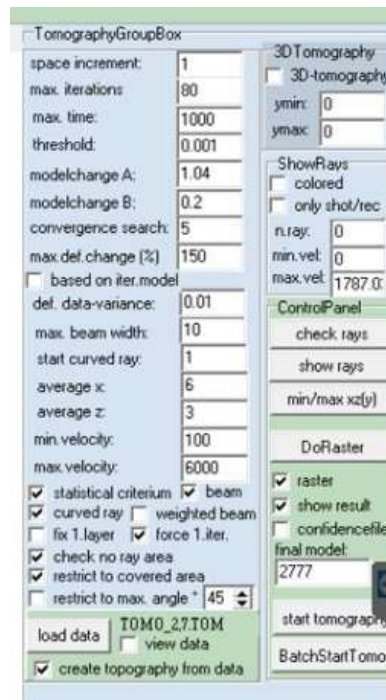


Nota. paso a paso para la creación del modelo de inversión de velocidad de onda P. a) travel time cargadas en el módulo 2d-data análisis. b) pendientes analizadas y observadas. c) modelo de inversión de la velocidad de onda P.

- **Tomografía de refracción**

Las tomografías de refracción permiten una inversión automática de los tiempos de viaje combinados, la inversión se basa en un enfoque tomográfico bidimensional basado en SIRT (técnica de reconstrucción iterativa simultánea). En este proyecto se definieron unos parámetros iniciales (Figura 23). Se busco establecer un valor RMS (error) menor a 2 con el fin de obtener modelos tomográficos confiables en las zonas de estudio.

Figura 23. Parámetros ideales



Nota. Parámetros ideales obtenidos a partir de múltiples pruebas en el software Reflex W, para generar una tomografía de inversión de velocidad de onda P.

6.3.2 Análisis de resultados

De acuerdo con la distribución y cambio de velocidades en los diferentes azimuts, en el siguiente apartado se realiza una interpretación y análisis de los modelos de inversión de frente de onda y tomografías de refracción generados en cada lugar. A partir de las velocidades obtenidas en los modelos se elaboran diagramas polares para observar si existe una orientación preferencial de fracturamiento y así poder dar respuesta a los objetivos planteados inicialmente.

6.3.3 Elaboración del libro final

En la última etapa metodológica se elabora el documento final que recopila toda la información y productos obtenidos a lo largo del proyecto de forma organizada y clara. Además, se concretan las conclusiones de acuerdo con los resultados y las hipótesis planteadas en la fase inicial del estudio.

7. Resultados

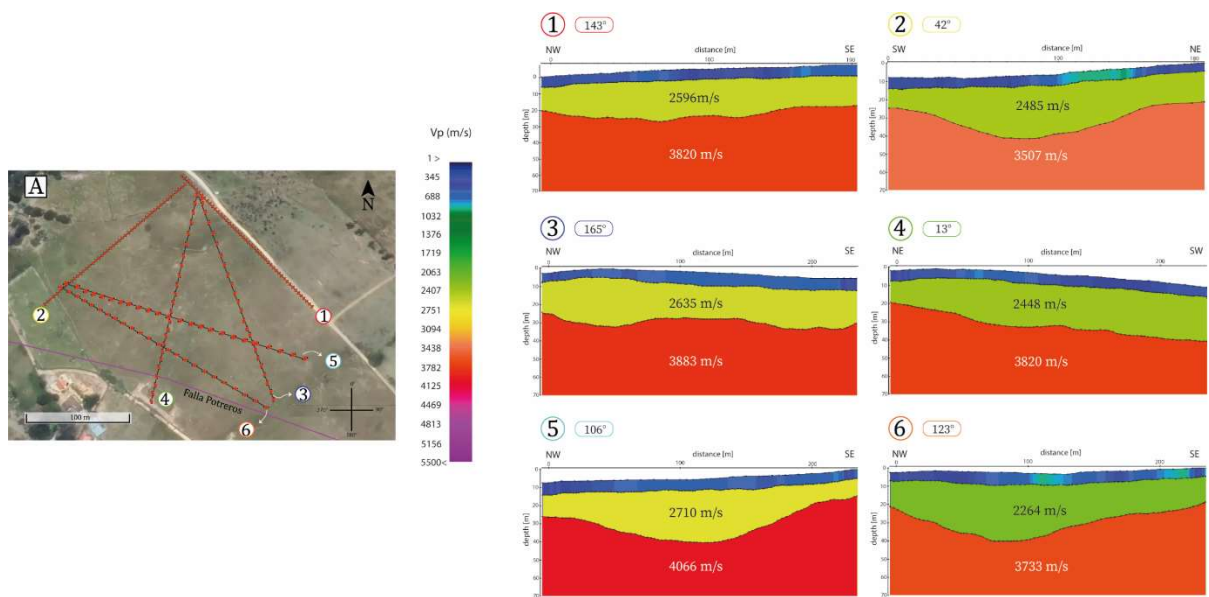
Basados en la metodología anteriormente descrita se presenta a continuación los resultados de los modelos geofísicos usando los métodos de inversión de frente de onda y tomografías de refracción, obtenidos a partir del procesamiento de datos de un total de trece líneas sísmicas en diferentes azimuts recolectadas en campo. Seis (6) líneas en la vereda La Fuente cercano a la Falla Potreros y siete (7) líneas sísmicas en la vereda Majadal Bajo alejado más de un kilómetro de la Falla Potreros.

7.1 Lugar 1: Cercano a la Falla Potreros vereda La Fuente

7.1.1 Modelos de inversión de frente de onda

Para el lugar cercano a la falla los resultados de los modelos de refracción usando el método de inversión de las velocidades de onda P se identifican claramente tres capas. En todas las líneas las velocidades para la primera capa varían entre los 300 m/s y 900 m/s, además de tener un espesor de aproximadamente 6 m. La segunda capa presenta un espesor entre 12m y 29m y las velocidades obtenidas en las diferentes líneas están entre los 2264 m/s y 2710 m/s. La última capa registra velocidades entre los 3507 m/s y 4066 m/s.

Figura 24. Modelos de inversión de velocidad de onda P lugar cercano a la falla.



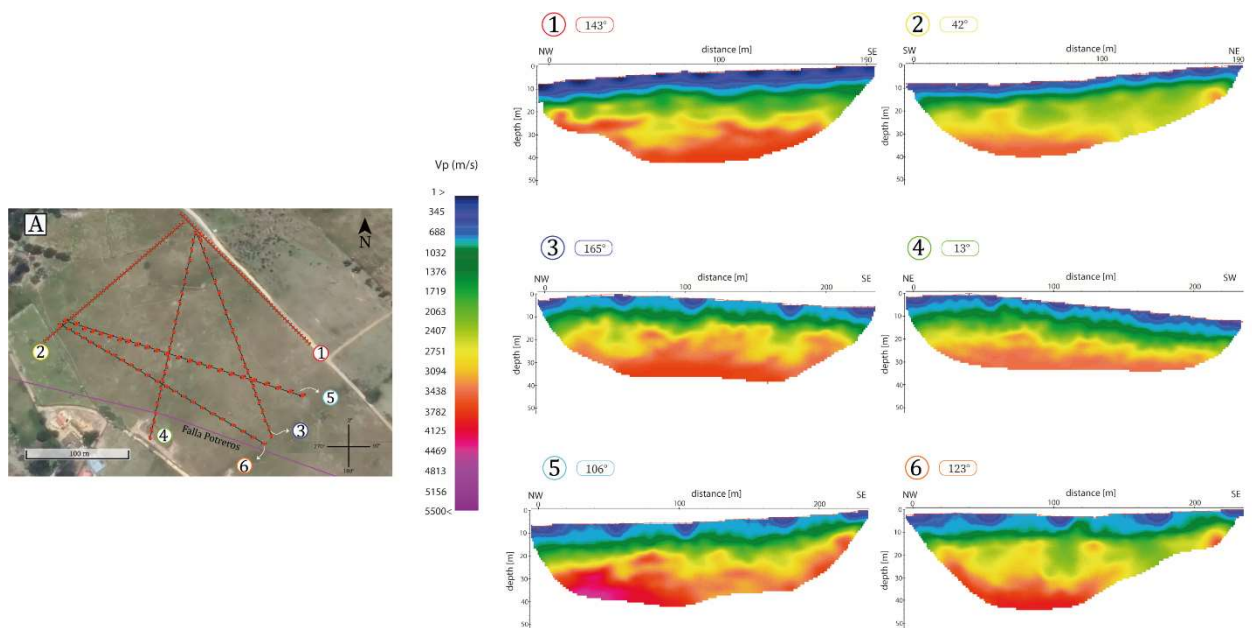
Nota. A) Diseño adquisición sísmica multiazimutal. 1) modelo de refracción sísmica línea de 143°. 2) línea de 42°. 3) línea de 165°. 4) línea de 13°. 5) línea de 106°. 6) línea de 123°.

Fuente. Autores.

7.1.2 Tomografías de refracción

Se realizaron tomografías para cada una de las seis líneas sísmicas donde se muestra una profundidad de trayectoria de rayos de aproximadamente 40 m. Se observan cuatro distintas fases, la primera corresponde a los tonos azules cuyas velocidades varían entre los 300 m/s y 1000 m/s. la segunda corresponde a los tonos verdes y sus velocidades están entre los 1000 m/s y los 2043 m/s. la tercera fase de tonos amarillos tiene velocidades entre los 2043 m/s y 3090 m/s. y por último la fase con tonalidades rojizas cuenta con unas velocidades mayores a 3090 m/s.

Figura 28. Tomografías de velocidad de onda P lugar cercano a la falla.



Nota. A) Diseño adquisición sísmica multiazimutal. 1) tomografía de velocidad de onda P línea de 143°. 2) línea de 42°. 3) línea de 165°. 4) línea de 13°. 5) línea de 106°. 6) línea de 123°.

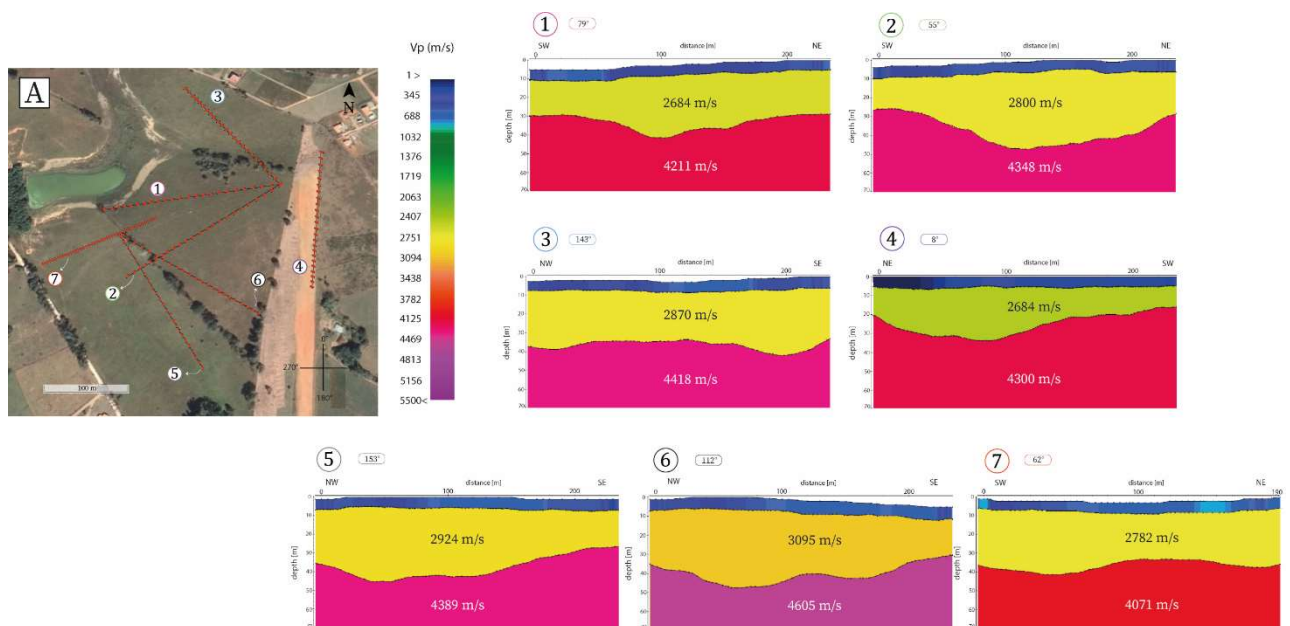
Fuente. Autores.

7.2 Lugar 2: 1.6 km de la Falla Potrerros vereda Majadal Bajo

7.2.1 Modelos de inversión de frente de onda

Para el segundo lugar ubicado a 1.6 km de la Falla Potrerros, los resultados de los modelos de refracción usando el método de inversión de frente de onda también muestran claramente tres capas. En todas las siete líneas la primera capa tiene velocidades que varían entre los 300 m/s y 900 m/s, además de tener un espesor de aproximadamente 6 m. La segunda capa presenta un espesor entre 20m - 35m y las velocidades obtenidas en las diferentes líneas varían entre los 2684 m/s y 3096 m/s. La última capa registra velocidades que se encuentran entre los 4071 m/s y 4605 m/s.

Figura 26. Modelos de inversión de velocidad de onda P lugar lejano a la falla.

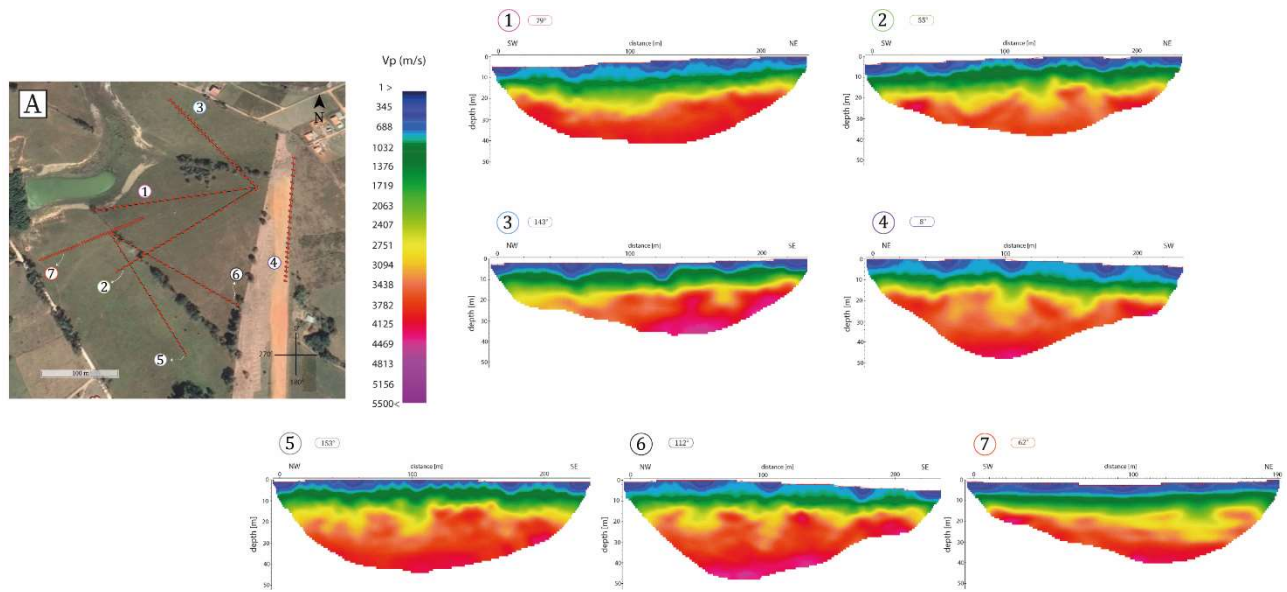


Nota. A) Diseño adquisición sísmica multiazimutal. 1) modelo de refracción sísmica línea de 79°. 2) línea de 55°. 3) línea de 143°. 4) línea de 8°. 5) línea de 153°. 6) línea de 112°. 7) línea de 62°. Fuente. Autores.

7.2.2 Tomografías de refracción

Para el segundo lugar también se observan cuatro distintas fases, la primera corresponde a los tonos azules cuyas velocidades varían entre los 300m/s y 1000m/s. La segunda corresponde a los tonos verdes y sus velocidades están entre los 1000 m/s y los 2407m/s. La tercera fase de tonos amarillos tiene velocidades entre los 2407m/s y 3094m/s. Por último, la fase con tonalidades rojizas cuenta con unas velocidades mayores a 3094m/s.

Figura 27. Tomografías de velocidad de onda P lugar lejano a la falla.



Nota. A) Diseño adquisición sísmica multiazimutal. 1) tomografía de velocidad de onda P línea de 79°. 2) línea de 55°. 3) línea de 143°. 4) línea de 8°. 5) línea de 153°. 6) línea de 112°. 7) línea de 62°. Fuente. Autores.

8. Análisis de resultados

8.1 Lugar 1: Cercano a la Falla Potreros vereda La Fuente

8.1.1 Modelos

El primer punto localizado en la vereda La Fuente se encuentra en cercanía al trazo de la Falla Potreros ($\approx 115^\circ$ azimuth de rumbo) una importante estructura de rumbo sinistral con componente normal. De acuerdo con García (2022) la Falla Potreros es la que más se asemeja con la dirección de esfuerzo principal el cual es 290° para La Mesa de Los Santos.

Para simplificar el análisis en zonas de fractura que tienen anisotropía azimutal, se asume una anisotropía polar en la que ocurre una sola dirección de fracturas. Para esta zona influenciada por la Falla Potreros, asumiremos que la anisotropía mostrara dos direcciones preferenciales,

donde la onda sísmica viajara más rápido en la dirección del rumbo de las fracturas y más lento cuando se propague perpendicular a estas, como lo indica Bamford & Nunn, (1979).

Se presenta el siguiente análisis e interpretación de los datos obtenidos en los modelos de refracción usando el método de inversión de frente de onda:

- Se observa una primera capa heterogénea de aproximadamente 6 m de espesor donde no se puede definir una dirección de anisotropía, esta zona se asocia con material superficial con un alto grado de meteorización.
- La segunda capa presenta una variación de las velocidades respecto a la dirección de medición, donde la máxima velocidad (2710 m/s) está orientada a 106° en azimut y esta dirección es la más cercana con la orientación preferencial de las fracturas inducidas por la Falla Potrereros la cual tiene un rumbo de aproximadamente 115° . La velocidad mínima (2264 m/s) orientada a 123° no se ajusta con lo que indica la teoría, ya que se espera que la V_p sea más lenta perpendicular a la orientación principal de fracturamiento.
- La última capa tiene una velocidad máxima de 4066 m/s también está orientada a 106° en azimut, por lo tanto, sigue una orientación cercana a la dirección preferencial de fracturamiento en este sector. La dirección más lenta de propagación de la onda P es 42° en azimut, lo que se asemeja a lo afirmado por Bamford & Nunn (1979).

Las tomografías de refracción permiten tener información complementaria del subsuelo en este sector. Los resultados muestran que el aumento de la velocidad es gradual a profundidad, con ausencia de interfaces netas que permitan delimitar capas, además en el modelo orientado a 106° se observa un cambio más significativo en las velocidades alcanzando valores mayores a los 4000 m/s y las velocidades más bajas en este caso parecen están orientadas 42° en azimut. Estos

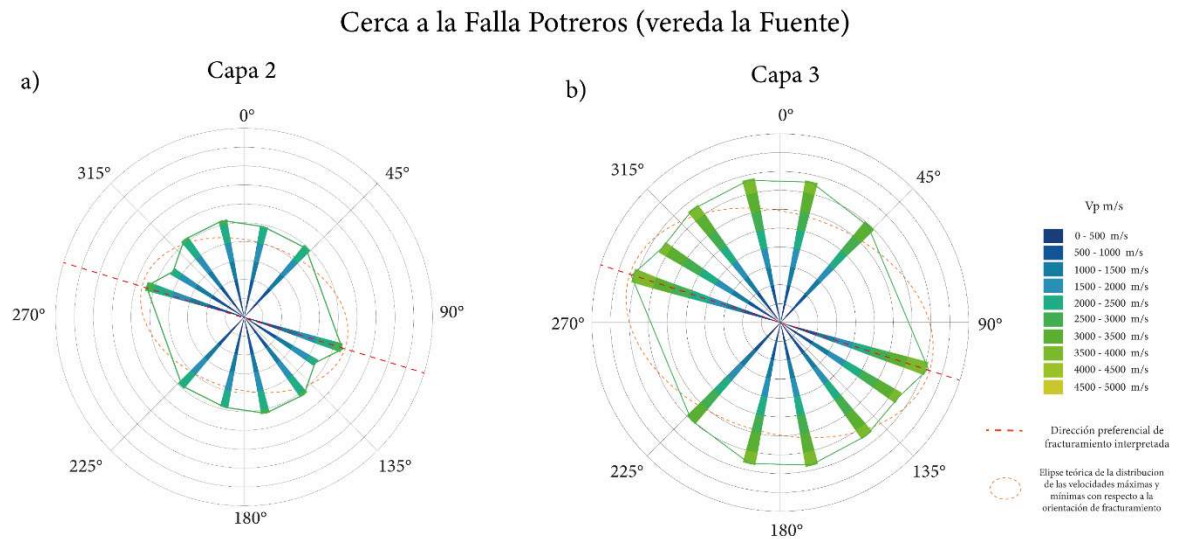
resultados concuerdan con los mostrados anteriormente en los modelos de refracción, donde las velocidades más altas están orientadas en el mismo sentido del fracturamiento principal.

8.1.2 Diagrama de rosas

Los diagramas de rosas muestran la distribución de la velocidad de propagación de onda P en los diferentes azimuts medidos en campo, donde la orientación preferencial de fracturamiento para este caso debe coincidir con la velocidad más rápida. Estos diagramas fueron realizados en el software Generic Mapping Tools (GMT) teniendo en cuenta las velocidades obtenidas en los modelos de refracción.

Los resultados de los valores de velocidad de onda P mostrados en el diagrama polar para la capa 2 (figura 28.a) indican que para esta capa las velocidades se encuentran entre los 2264 m/s y 2710 m/s, en este caso la velocidad más alta está orientada aproximadamente a los 106° en azimut. La capa 3 (figura 28.b) coincide con lo mostrado anteriormente, donde la velocidad más rápida (4066 m/s) está orientada a 106° en azimut. En este lugar no se muestra una orientación de fractura dominante tan evidente, esto probablemente sea causado por la cercanía a la Falla Potreros, la cual provoca una alta deformación en el material circundante. Pese a esto, los resultados siguen una leve tendencia concordante con la elipse teórica que coincide con la dirección del trazo de la Falla Potreros ($\sim 115^\circ$ azimut de rumbo).

Figura 28. Diagrama de Rosas cerca a la falla



Nota. Diagrama polar obtenido a partir de las velocidades de los modelos de refracción en el lugar 1 ubicado en el sector de la vereda La Fuente cerca a la Falla Potrerros. a) capa 2. b) capa 3. La línea roja representa la dirección de fracturamiento preferencial interpretada. La elipse indica la velocidad de propagación de la onda P teórica, donde la velocidad es mayor paralela a la orientación referencial de fracturamiento, y menor perpendicular a esta.

8.1.3 Porcentaje de anisotropía

Se realiza el cálculo de los valores de anisotropía sísmica usando la siguiente ecuación:

$$anisotropía = 100 \times \left(\frac{V_{fast} - V_{slow}}{V_{fast}} \right)$$

Para el primer lugar cercano a la Falla Potrerros (vereda La Fuente) el valor de anisotropía en la capa dos es de 16.45 % y para la capa tres es de 13.74 %. Según Thomsen (1986) los cambios menores al 20% están en el rango de anisotropía débil a moderada. Por consiguiente, un cambio porcentual de 16.45% para la capa dos y 13.74 % en la capa tres sugiere que las rocas presentes en esta zona tienen una anisotropía moderada inducida por fracturas.

8.2 Lugar 2: 1.6 km de la Falla Potreros vereda Majadal Bajo

8.2.1 Modelos

En el segundo lugar ubicado en la vereda Majadal Bajo a 1.6 km de la Falla Potreros, se obtuvieron los resultados de siete perfiles en diferentes direcciones que muestran una variación de las velocidades y un incremento de esta propiedad con respecto al sitio localizado en la vereda La Fuente.

Para los modelos de refracción usando el método de inversión de frente de onda en el segundo lugar se observan tres capas claramente definidas y se presenta el siguiente análisis:

- La capa más superficial de aproximadamente 6 m de espesor es heterogénea y no se puede definir una dirección de anisotropía, tiene velocidades bajas (300 m/s – 900 m/s) que se asocian con sedimentos superficiales altamente meteorizados.
- En la segunda capa se identifica una variación de las velocidades en diferentes direcciones, siendo la velocidad más rápida 3095 m/s orientada 112°, dirección que es cercana a la orientación principal de fracturamiento, además teniendo en cuenta este resultado podemos intuir que aún existe un control tectónico generado por la Falla Potreros donde las fracturas mantienen una orientación similar al segmento de falla principal en este caso aproximadamente 115° azimut de rumbo. Las velocidades más lentas en esta capa (2684 m/s) están orientadas en un rango entre los 8° a 79° azimut de rumbo, esto se asemeja a lo que indica la teoría, donde la onda sísmica viaja más lentamente cuando se propaga perpendicular a la orientación preferencial de fracturamiento.
- La capa 3 sigue la misma tendencia de la capa 2, donde la máxima velocidad (4605 m/s) está orientada a los 112° azimut de rumbo, similar a la dirección de fracturamiento principal

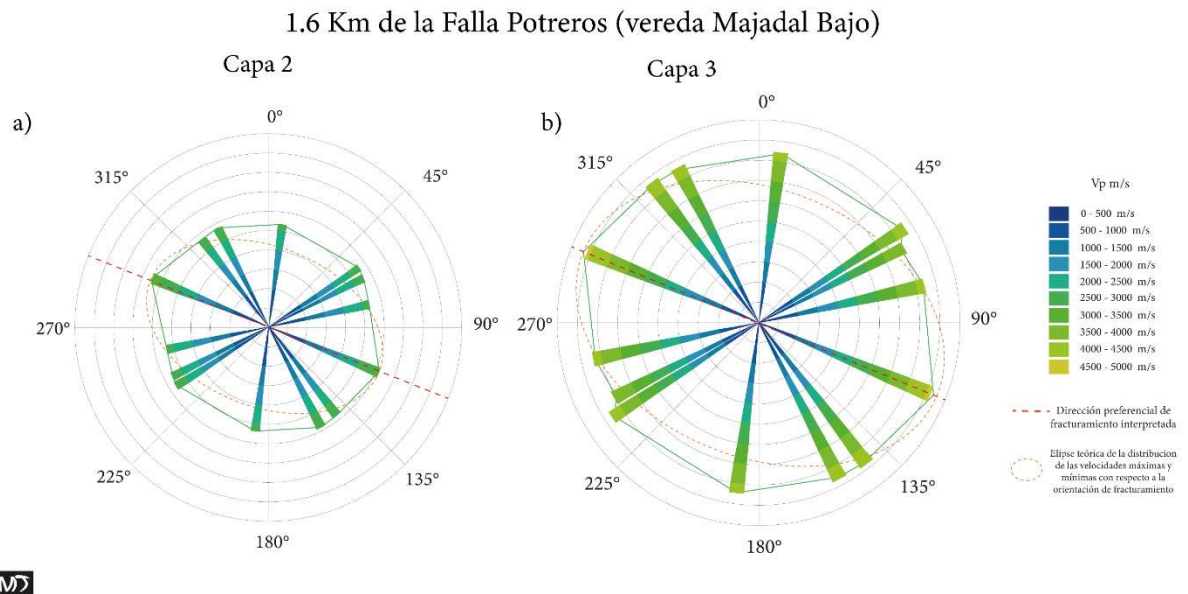
y las velocidades más lentas están en un rango entre los 8° a 79° azimut de rumbo, siendo la velocidad más baja (4071 m/s) orientada 62° azimut.

En esta zona las tomografías de refracción generadas muestran un cambio menos gradual entre las velocidades, que incluso permite identificar capas y un aumento considerable de la velocidad a comparación de las tomografías en el primer lugar cercano a la Falla Potrereros. La tomografía orientada a los 112° alcanza las mayores velocidades, esto coincide con la dirección dominante de fracturamiento en este sector y con los resultados mostrados en los modelos anteriores. Aunque la diferencia de velocidad entre los azimuts 8° y 62° es sutil, el modelo orientado a los 62° presenta las velocidades más bajas.

8.2.2 Diagrama de rosas

Para el segundo lugar ubicado a más de 1.5 km de la Falla Potrereros nuestros resultados sugieren una tendencia similar a la elipse teórica de anisotropía azimutal polar, donde la velocidad más rápida debería coincidir con la orientación preferencial de fracturamiento y la más lenta tendría que estar ortogonal a esta. Los valores obtenidos para la capa 2 (figura 29.a) muestran una tendencia dominante hacia NW – SE estando la velocidad más alta orientada $\sim 112^\circ$ azimut. Para la tercera capa (figura 29.b) también observa e interpreta que existe una orientación de fractura dominante ubicada aproximadamente a los 112° azimut de rumbo. Este lugar también se localiza cerca de una falla con orientación NEE los valores en la distribución de la velocidad de onda P no muestran que esta estructura tenga una influencia marcada en fracturamiento en este sector, ya que los azimuts próximos a esta orientación presentan velocidades bajas y esto no coincidiría con la teoría de anisotropía azimutal anteriormente mencionada.

Figura 29. *Diagrama de rosas lugar lejano a la falla*



Nota. Diagrama polar generado a partir de las velocidades de los modelos de refracción para el lugar 2 ubicado en el sector de la vereda Majadal Bajo a 1.6 km de la Falla Potreros. a) capa 2. b) capa 3. La línea roja representa la dirección de fracturamiento preferencial interpretada. La elipse indica la velocidad de propagación de la onda P teórica, donde la velocidad es mayor paralela a la orientación referencial de fracturamiento, y menor perpendicular a esta.

8.2.3 Porcentaje de anisotropía

Se realiza el cálculo de los valores de anisotropía sísmica usando la siguiente ecuación:

$$anisotropía = 100 \times \left(\frac{V_{fast} - V_{slow}}{V_{fast}} \right)$$

En el segundo punto de adquisición ubicado aproximadamente a 1.6 km de la Falla Potreros en la vereda Majadal Bajo, el valor de anisotropía en la capa dos es de 13.30% y un valor de 11.59% para la capa tres. De acuerdo con Thomsen (1986) los cambios menores a 20% se encuentran en el rango de una anisotropía débil a moderada. Por lo tanto, un cambio porcentual de entre 11 % y 14% aproximadamente sugiere una anisotropía moderada en este sector.

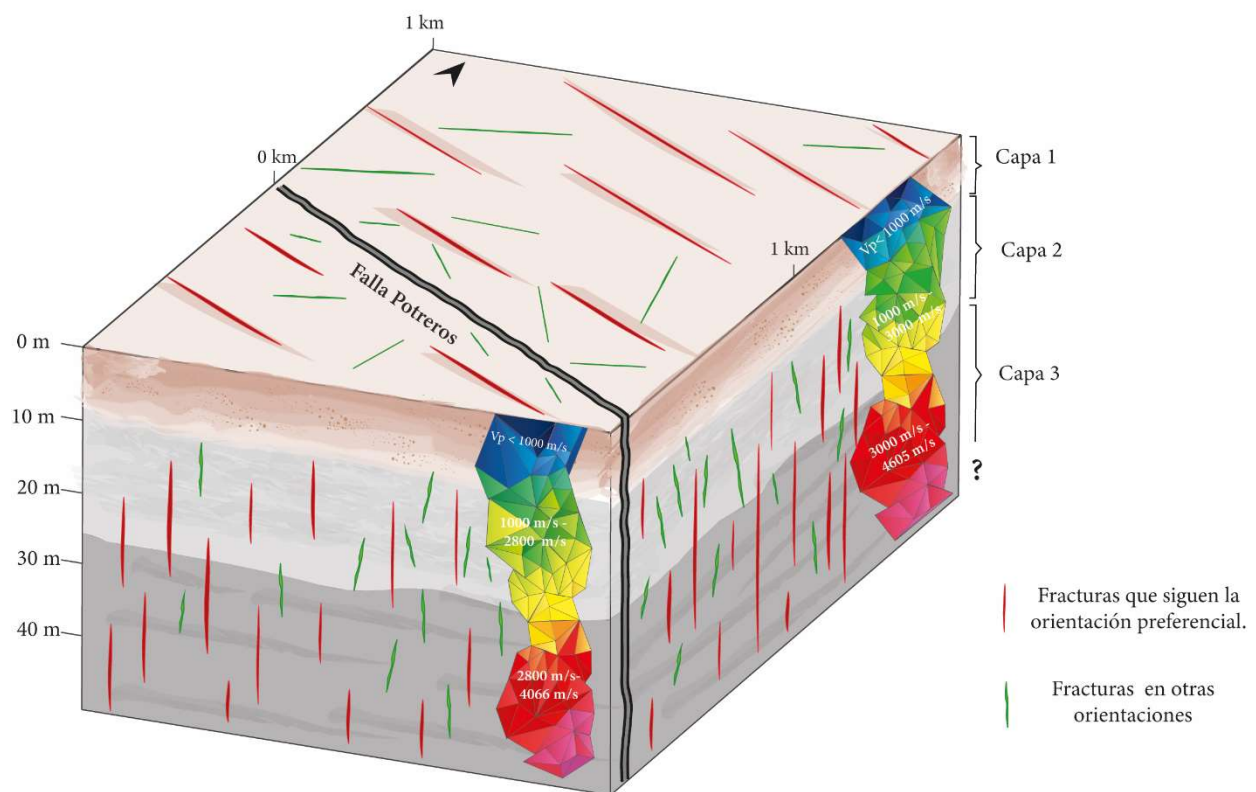
9. Discusión

Las descripciones litológicas de los pozos y las columnas estratigráficas detalladas compiladas en el trabajo conjunto de Pinto et al., (2007), permiten relacionar los resultados de los perfiles sísmicos generados usando los métodos de inversión de frente de onda y tomografías de refracción con la geología del área. La capa más superficial de aproximadamente 8m de espesor, con velocidades entre los 300 m/s – ~1000 m/s, se interpreta como sedimentos superficiales de grano fino principalmente areno-arcillosos y areniscas fuertemente meteorizadas. La segunda capa cuyas velocidades varían entre 1000 m/s – 3000 m/s se puede asociar areniscas altamente fracturadas y meteorizadas, probablemente con algunos niveles de arcillolitas. La última capa con velocidades mayores a 3000 m/s se asocian areniscas fracturadas, con niveles de arcillolitas. La profundidad de muestreo en este estudio es ~45 m, es probable que estos límites correspondan al Miembro Superior de la Formación Los Santos, sin embargo, existe cierta incertidumbre ya que los registros de los pozos no permiten diferenciar de forma clara cada uno de los miembros de la Formación Los Santos.

Los dos lugares donde se realizó este proyecto presentan una variación en la velocidad de onda P tomadas en diferentes direcciones. En el primer lugar ubicado a ~ 0.3 km de la Falla Potrerros, la capa más superficial (regolito) es heterogénea y no hay anisotropía, la capa dos (saprolito) y tres (roca madre fracturada), si muestran una leve tendencia tectónica (~ 106°) influenciada por la Falla Potrerros, aunque no hay suficiente claridad en los datos. Esta situación puede deberse a que estemos en la zona de daño interna de la falla donde habitualmente las rocas están intensamente deformadas en todas las direcciones, esto también provoca un aumento de la meteorización y resulta difícil encontrar una dirección preferencial de fracturamiento. En el segundo sitio localizado a 1.6 km de la Falla Potrerros, los resultados indican una dirección de

máxima velocidad más dominante ($\sim 112^\circ$ en azimut) en la capa dos y tres. En este punto las fracturas mantienen una orientación similar al segmento de falla principal, además teniendo en cuenta la tenencia tan marcada en la dirección de anisotropía se sugiere que hay menos meteorización con respecto al primer lugar. En ambos sitios con el aumento de la profundidad y disminución de la meteorización se observa mejor la tendencia tectónica inducida por la Falla Potrerros.

Figura 30. Bloque diagrama de análisis de resultados



Nota. Diagrama de fracturamiento para los dos puntos de estudio generado a partir del análisis de resultados. Se puede observar la variación de las velocidades a profundidad en las dos

zonas estudiadas. Y la existencia de una orientación preferencial de fracturamiento influenciado por la Falla Potrerros.

Nuestros resultados sugieren que existe una correlación entre el porcentaje de anisotropía y el grado de meteorización. Los valores de anisotropía disminuyen a profundidad en ambos sitios muestreados, además la distancia a la Falla Potrerros también es un factor determinante, ya que el primer sitio ubicado cerca a esta estructura tiene los valores más altos, 16.45 % y 13.74 % para la segunda y tercera capa respectivamente. Y el segundo lugar situado a 1.6 km de la Falla Potrerros tiene valores de 13.30% para la capa dos y 11.59 % en la capa tres. Por lo tanto, se deduce que la meteorización aumenta la anisotropía azimutal del medio.

La distancia a la Falla Potrerros también tiene incidencia en la homogeneidad de las capas, en el primer lugar cercano a esta estructura donde seguramente hay más meteorización, las tomografías de refracción muestran que las capas no son consistentes lateral ni verticalmente, mientras que, en el segundo sitio alejado de la Falla Potrerros, los modelos generados revelan capas mejor definidas. Es probable que haya otras razones que expliquen este comportamiento, como cambios en la litología de ambos sectores lo que genere una distribución de la velocidad más homogénea en la parte externa de la zona de daño. El cambio de altura y pendientes en ambos sitios, podrían modificar la tasa de infiltración y por lo tanto esto también generaría una diferencia en la heterogeneidad de las capas, diferente al que la Falla Potrerros está mostrando con más fracturamiento en el primer lugar ubicado cerca a esta estructura.

Existe una tendencia tectónica predominante en los dos puntos de estudio, ya que las fracturas conservan la orientación preferencial de la región en todo el perfil, incluso en las zonas con mayor meteorización (saprolito). Estas fracturas verticales podrían facilitar la infiltración de agua meteórica en el medio. Con nuestros resultados no tenemos certeza de la existencia de un

nivel freático en estos sitios, puesto que el valor de anisotropía no es indicativo para saber si las rocas de estos lugares están saturadas en agua o aire.

Actualmente no existen muchos trabajos que detecten estos cambios en los espesores meteorización y sus implicaciones en la dirección y porcentaje de anisotropía en rocas sedimentarias, usando sísmica de refracción azimutal. Por lo tanto, más estudios a lo largo del trazo de la Falla Potreros, así como en otras zonas de la Mesa de Los Santos, aportaran información relevante que enriquezcan el modelo planteado en este proyecto y aumente el conocimiento en este tema. Con base en los resultados obtenidos, si se realizara otro estudio similar, se esperaría que la respuesta en la anisotropía varíe dependiendo del sector de la zona de daño de falla que se realice la investigación, es decir, si se realiza sobre el trazo de falla en la parte interna de la zona de daño donde la deformación es mayor, es probable que los valores en la anisotropía polar no tengan una tendencia clara. Si la falla es una zona de deformación de más de 300 metros, no habría cambio en la respuesta de anisotropía. Y si la zona de daño de la falla es un gradiente de deformación, entonces, habría una tendencia cuantificable de aumento de anisotropía con la distancia del trazo de falla.

10. Conclusión

En el primer lugar ubicado a menos de 0.3 km de la Falla Potreros se identifica la máxima velocidad de propagación de onda P en un azimut de 106° , en las dos capas estudiadas. Para el segundo lugar localizado a 1.6 km de esta estructura, se reconoce la velocidad más rápida en dirección 112° azimut de rumbo. Con los datos disponibles en ambos sectores se documenta que las orientaciones de las máximas velocidades de propagación de onda P son casi paralelas con la dirección del trazo de la Falla Potreros ($\sim 115^\circ$ azimut de rumbo). Estos resultados prueban que la anisotropía azimutal esta influenciada por la presencia y orientación de las fracturas en el medio en el cual se propaga la onda sísmica.

En lugar cercano a la Falla Potreros se obtuvieron los valores más altos de anisotropía de 16.45 % para la segunda capa y de 13.74 % en la tercera capa. El gradiente de anisotropía de este punto es de 0.06% por metro. En el punto situado a 1.6 km de la Falla Potreros los valores de anisotropía determinados para la capa 2 fueron de 13.30 % y para la tercera capa de 11.59 %. El gradiente de anisotropía de este sitio es de 0.04% por metro.

Este estudio muestra la presencia de anisotropía azimutal en las capas dos y tres. Existe una dirección preferencial en la anisotropía está influenciada por la Falla Potreros en los dos lugares estudiados. La anisotropía causada por el fracturamiento cerca de la zona de falla muestra un comportamiento más favorable para la infiltración de agua meteórica, sin embargo, se requieren mayores estudios para corroborar esta interpretación.

Las velocidades de las rocas cerca a la Falla Potreros varían entre los 300 m/s a los 4066 m/s. Para el segundo lugar alejado de esta estructura los resultados muestran un aumento de la velocidad con valores que varían entre los 300 m/s a los 4605 m/s. Lo que nos permite sugerir que

las rocas cerca a la falla tienen mayor porosidad, nosotros interpretamos que esto es producto de la meteorización, que tiene un mayor efecto cerca a la Falla Potreros que lejos de esta.

La aplicación de sísmica de refracción azimutal ha mostrado una relación directa entre la anisotropía y la dirección de fracturamiento principal en las dos zonas ubicadas a diferentes distancias de la Falla Potreros. Además, nuestros resultados demostraron que la velocidad sísmica de la superficie continúa siendo una de las propiedades físicas más útiles para detectar las transiciones entre las rocas con mayor meteorización y las rocas fracturadas no meteorizadas.

11. Recomendaciones

Se sugiere utilizar otros métodos geofísicos que pueden aportar información valiosa en la caracterización del sistema de fracturas en la Mesa de Los Santos. La resistividad y la velocidad de onda S, podrían ser muy buenas herramientas para estudiar las fracturas en el área de estudio y comparar con los resultados obtenidos en este proyecto.

La fuente implementada para la toma de datos (PEG -40) tuvo mejor relación señal-distancia, que la porra de 18lb. Sin embargo, se reconoce los desafíos logísticos que implica usar este tipo de fuente por el difícil acceso y necesidad de una topografía plana para el golpe.

Los datos tomados en campo y resultados de este proyecto se encuentran disponibles en:

[Drive – Sísmica de refracción Los Santos](#)

Referencias Bibliográficas

- Aldana, S. (2008). *Estratigrafía de la Formación Los Santos en Las Secciones de la Navarra y el Calicho en la Mesa de Los Santos (Departamento de Santander)*. [Tesis de pregrado]. Universidad Industrial de Santander.
- Anderson, S. P., Von Blanckenburg, F. & White, A. F. (2007). Physical and Chemical Controls on the Critical Zone. *Elements*, 3(5), 315-319. <https://doi.org/10.2113/gselements.3.5.315>
- Anomohanran, O. (2013). Seismic Refraction Method: A Technique for Determining the Thickness of Stratified Substratum. *American Journal of Applied Sciences*, 10(8), 857-862. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2013.857.862>
- Bamford, D., & Nunn, K. R. (1979). In situ seismic measurements of Crack anisotropy in the Carboniferous Limestone Of Northwest England*. *Geophysical Prospecting*, 27(2), 322-338. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1979.tb00973.x>
- Befus, K. M., Sheehan, A. F., Leopold, M., Anderson, S. P. & Anderson, R. S. (2011). Seismic Constraints on Critical Zone Architecture, Boulder Creek Watershed, Front Range, Colorado. *Vadose Zone Journal*, 10(4), 1342-1342. <https://doi.org/10.2136/vzj2010.0108er>
- Brantley, S. L., McDowell, W. H., Dietrich, W. E., White, T. S., Kumar, P., Anderson, S. P., Chorover, J., Lohse, K. A., Bales, R. C., Richter, D. D., Grant, G. & Gaillardet, J. (2017). Designing a network of critical zone observatories to explore the living skin of the terrestrial Earth. *Earth Surface Dynamics*, 5(4), 841-860. <https://doi.org/10.5194/esurf-5-841-2017>
- Cediel, F. (1968). El grupo Girón, una molasa mesozoica de la cordillera Oriental. *Boletín Geológico*. 16(1-3), 5-96. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol16.1-3.1968.108>

- Clavijo, J. & Royero, J. M. (2001). Mapa Geológico Generalizado del Departamento de Santander: Memoria Explicativa. *Instituto Colombiano de Geología y Minería- INGEOMINAS*.
- Contreras, N. M. (2008). *Análisis del Fracturamiento Presente en la Formación Los Santos al Noreste y Centro de la Mesa de Los Santos, Departamento de Santander* [Tesis de pregrado]. Universidad Industrial de Santander.
- Crampin, S. (1986). Anisotropy and Transverse Isotropy. *Geophysical Prospecting*, 34(1), 94-99. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1986.tb00454>.
- Díaz, E. J., Contreras, N. M., Pinto, J. E., Velandia, F., Morales, C. J. & Hincapie, G. (2009). Evaluación Hidrogeológica Preliminar de Las Unidades Geológicas de la Mesa de Los Santos. *Boletín De Geología*, 31(1). <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegologia/article/view/167>
- Etayo, F., & Rodriguez, G.I. (1985). Edad de la Formación Los Santos. Proyecto Cretácico. *Publicaciones Geológicas Especiales del INGEOMINAS*, (16), Capítulo XXVI.
- Flinchum, B. A., Holbrook, W. S. & Carr, B. J. (2022). What Do P-Wave Velocities Tell Us About the Critical Zone? *Frontiers in Water*, 3. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.772185>
- García, S. & Gómez, E. (2015). *Modelo conceptual hidrogeofísico para evaluar el potencial hidrogeológico de la Formación Los Santos en la Mesa de Los Santos – Santander, Colombia*. [Tesis de pregrado]. Universidad Industrial de Santander.
- García, S. (2022). *Análisis estructural de la Mesa de Los Santos y redes neuronales para la estimación local de las propiedades físicas de la roca*. [Tesis de maestría]. Universidad Industrial de Santander.
- Gressly, A. (1838). Observations géologiques sur le Jura Soleurois. *Nouveaux mémoires de la Société Helvétique des Sciences Naturelles*.

- Hedberg, H. D. (1931). Cretaceous Limestone as Petroleum Source Rock in Northwestern Venezuela. *AAPG Bulletin*, 15. <https://doi.org/10.1306/3d932984-16b1-11d7-8645000102c1865d>
- Holbrook, W. S., Riebe, C. S., Elwaseif, M., Hayes, J. L., Basler-Reeder, K., Harry, D. L., Malazian, A., Dosseto, A., Hartsough, P. C., Hopmans, J. W. & Holbrook, W. S. (2013). Geophysical constraints on deep weathering and water storage potential in the Southern Sierra Critical Zone Observatory. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(3), 366-380. <https://doi.org/10.1002/esp.3502>
- IngeoExploraciones (2016). Elaboración y Formulación Del Plan de Manejo de Aguas Subterráneas en el Sector de la Mesa, Municipio de Los Santos. Fase III. *Reporte Técnico*, IngeoExploraciones S.A.S., Bucaramanga.
- INGEOMINAS. (1977). *Mapa geológico del cuadrángulo H-12 Bucaramanga. (escala 1:100.000). Memoria Explicativa*. Bogotá.
- Julivert, M., Barrero, D., & Navas, G. (1964). Geología de La Mesa de Los Santos. *Boletín De Geología*, 18, 5-11.
- Kearey, P., Brooks, M. & Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration, 3rd Edition* (3.^a ed., pp. 99-120). Wiley-Blackwell.
- Kirsch, R. (2009). *Groundwater Geophysics: A Tool for Hydrogeology* (2.^a ed., pp. 23-82). Springer Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88405-7>
- Leopold, M., Völkel, J., Huber, J. & Dethier, D. (2013). Subsurface architecture of the Boulder Creek Critical Zone Observatory from electrical resistivity tomography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38, 1417-1431. <https://doi.org/10.1002/esp.3420>

- Lowrie, W. & Fichtner, A. (2020). *Fundamentals Of Geophysics* (3.^a ed., pp.121-202). Cambridge University Press. <https://www.cambridge.org/9780521859028>
- Lynn, H. B. & Michelena, R. J. (2011). Practical applications of anisotropy. *The Leading Edge*, 30(7), 726-730.
- Masyhur, E. M., Ghani, A. & Noh, K. (2018). Behavior of seismic wave propagation with respect to fracture orientations in limestone, Perak, Malaysia. *International Journal of Engineering and Technology*, 7, 400-403. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.28.22620>
- Mendieta, A. (2017). Seismic Refraction and Electrical Resistivity Tests for Fracture Induced Hydraulic Anisotropy in a Mountain Watershed. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2017*.
- Morales, C. J., Forero, H., Rojas, N. & Alvarado, S. (2010). Integración Geológica e Hidrogeológica del Centro de Santander. Bogotá. *Instituto Colombiano de Geología y Minería- INGEOMINAS*.
- Morales, L. G. (1958). General Geology and Oil Occurrences of Middle Magdalena Valley, Colombia. In: Weeks, L.G. (editor). Habitat of oil. *American Association of Petroleum Geologists-AAPG*, Tulsa.
- Moyano, I. E. (2010). Prospección Geoeléctrica en La Mesa de Los Santos (Santander). Procesamiento e Interpretación de Sondeos Eléctricos verticales. *Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS*, Bogotá, Colombia.
- Pinto, J. E., Clavijo, J., Gomez, S., Gutiérrez, D., Mora, J. P., Rojas, N., Adarme, I., Aldana, S., Contreras, N., Díaz, E., Melo, L., Reátiga, G., Rincón, M., Vargas, C., Morales, C., Velandia, F., Hincapié, G., Forero, H., Duarte, R., . . . De Bermoudes, O. (2007). Proyecto de investigación geológica e hidrogeológica en la Mesa de Los Santos, sector noreste de

- Curití y borde occidental del Macizo de Santander, departamento de Santander. Bucaramanga. *Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS*
- Poeter, E., Fan, Y., Cherry, J., Wood, W., & Mackay, D. (2020). Groundwater in Our Water Cycle: Getting to Know Earth's Most Important Fresh Water Source. *The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada*. <https://doi.org/10.21083/978-1-7770541-1-3>
- Press, F. (1966). Section 9: Seismic Velocities. En *Handbook of Physical Constants*, (pp.119-220). <https://doi.org/10.1130/MEM97-p195>
- Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics* (2.^a ed.). Wiley & Sons.
- Richter, D. D. & Mobley, M. L. (2009). Monitoring Earth's Critical Zone. *Science*, 326(5956), 1067-1068. <https://doi.org/10.1126/science.1179117>
- Riebe, C. S., Hahm, W. J. & Brantley, S. L. (2016). Controls on deep critical zone architecture: a historical review and four testable hypotheses. *Earth Surface Processes and Landforms*. <https://doi.org/10.1002/esp.4052>
- Rincón, M. A. (2008). *Estratigrafía de la Formación Los Santos en las Secciones estratigráficas la Punta, Carrizal (Mesa de Los Santos) y la Cuevana (Curití), Departamento de Santander*. [Tesis de pregrado]. Universidad Industrial de Santander.
- St. Clair, J., Moon, S., Holbrook, W. S., Perron, J. T., Riebe, C. S., Martel, S. J., Carr, B., Harman, C., Singha, K. & Richter, D. D. (2015). Geophysical imaging reveals topographic stress control of bedrock weathering. *Science*, 350(6260), 534-538. <https://doi.org/10.1126/science.aab2210>
- Stan -Kleczeck, I & Idziak, A. F. (2008). Anisotropy of elastic properties of rock mass induced by cracks. *Acta Geodyn Geomater*, 5–2, 153-159.

- Stein, S. & Wysession, M. (2003). *Seismic waves. An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure* (pp. 53-61). Blackwell Publishing.
- Tarazona, Y. & Vargas, M. C. (2020). *Análisis Cuantitativo de Sistemas de Fracturas como Aporte al Conocimiento Hidrogeológico de la zona Sur de la Mesa de Los Santos, Santander-Colombia*. [Tesis de pregrado]. Universidad Industrial de Santander.
- Tarazona, Y., Vargas, M. C., & Velandia, F. (2021). Análisis cuantitativo de sistemas de fracturas y sus implicaciones hidrogeológicas en la zona sur de la Mesa de Los Santos, Santander - Colombia. *Boletín de Geología*, 43(3). <https://doi.org/10.18273/revbol.v43n3-2021005>
- Telford, W. M., Geldart, L. P. & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics* (2.^a ed.). Cambridge University Press.
- Thomsen, L. (1986). *Weak elastic anisotropy*. *GEOPHYSICS* 51: 1954-1966. <https://doi.org/10.1190/1.1442051>
- Udías, A. (2000). *Elastic waves. In Principles of Seismology* (pp. 29-52). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139164306.004>
- Vargas, C. Y. (2008). *Cartografía Geológica a Escala 1:25.000 de la Mesa de Los Santos, Departamento de Santander*. [Tesis de pregrado]. Universidad Industrial de Santander.
- Vargas, M. I. (2021). *Comparación de la anisotropía de la resistividad del subsuelo fracturado en zonas aledañas a diferentes tipos de estructuras, e implicaciones hidrogeológicas para un área rural del municipio de Los Santos, Santander*. [Tesis de maestría]. Universidad Industrial de Santander.
- Vega, J. C. (2013). *Diseño de Parametros de Adquisicion Sismica 3d Orientado a la Deteccion De Fracturas Asistido por Modelado Sismico Anisotropo*. [Tesis De Maestría]. Universidad Eafit.

- Velandia, F. (2010). Análisis de fracturas para exploración de aguas subterráneas en el centro de Santander. *Hidrogeología para la gestión del recurso hídrico*. 149-158. Universidad de Antioquia. ISBN 978-958-714-453-6
- Ward, D., Goldsmith, R., Jimeno, A., Cruz, J., Restrepo, H. & Gómez, E. (1973). Mapa geológico del cuadrángulo h-12 Bucaramanga planchas 109 Rionegro - 120 Bucaramanga.: Memoria Explicativa. *Instituto Colombiano de Geología y Minería- INGEOMINAS*.
- Yale, D. P. & Crawford, B. (1998). Plasticity and Permeability in Carbonates: Dependence on Stress Path and Porosity. *SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering, Trondheim, Noruega*. <https://doi.org/10.2118/47582-ms>