

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Caracterización de perfiles de meteorización del miembro superior de la Formación Los Santos y su correlación mediante modelamiento geoelectrico y de georradar en La Mesa de Los Santos

Paula Sofía Zárate Martínez

José Alejandro Moreno Moreno

Trabajo de grado para optar el título de Geólogos.

Director

Juan Diego Colegial Gutiérrez

Geólogo

PhD en Ciencias Geológicas

Codirectora

Rocío Del Pilar Bernal

Geóloga

PhD en Geología

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2023

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Dedicatoria

A Dios por permitirme estar aquí, darme salud, fuerza e inteligencia para cumplir este objetivo de vida.

A mis dos padres que desde que empecé este camino, siempre me apoyaron en todas mis decisiones, dispuestos a darme lo que necesitaba, sin ellos no estaría acá.

A mi hermano mayor Jorge e Ivon que desde que llegué a Bucaramanga me acompañaron, agradezco mucho los consejos para la vida y universidad que me dieron en estos años.

A mi hermano menor Alfredo, que fue un apoyo incondicional en estos últimos semestres de la carrera.

A Sofía, mi compañera de tesis, que, gracias a su dedicación, esfuerzo y comprensión, pudimos sacar adelante este trabajo.

A los profesores Juan Colegial y Roció Bernal, que nos guiaron a lo largo del trabajo, sin ellos no sería posible este trabajo.

A Oslo por brindarme momentos de alegría cuando más necesitaba apoyo emocional.

A mis amigos de “La Hermandad” Triana, Zorro, Cristian y Llanero por integrarme en su grupo de amistad desde que llegue a Bucaramanga, gracias por todos los momentos que pasamos a lo largo de la U.

Por ultimo a mis amigos de la infancia y de mi barrio San Luis “PSL” que siempre estuvieron ahí para darme horas de diversión y alegría.

José Alejandro Moreno Moreno

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Tabla de Contenido

Introducción	14
1. Generalidades	15
1.1. Objetivo general	15
1.2. Objetivos específicos.....	15
1.3. Justificación.....	15
2. Marco conceptual	16
2.1. Localización	17
3. Marco teórico.....	18
3.1. Perfiles de meteorización	18
3.1.1. Clasificación de los perfiles de meteorización.....	18
3.2. Tomografías de resistividad eléctrica.....	19
3.2.1. Resistividad aparente	20
3.2.2. Resistividad real.....	20
3.2.3. Inversión y procesamiento	20
3.3. GPR (Ground penetrating radar)	21
3.3.1. Permitividad dieléctrica:	21
3.3.2. Determinación de espesores:.....	22
4. Marco geológico	22
5. Metodología.....	25

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

5.1.	Fase de revisión y recolección bibliográfica	25
5.2.	Fase de aprendizaje y manejo del método.....	25
5.3.	Fase de campo	25
5.3.1.	Caracterización y levantamiento de columnas.....	25
5.3.2.	Adquisición de datos geofísicos.....	27
5.4	Fase de oficina.....	27
5.4.1	Inversión de datos geofísicos	27
5.4.2	Interpretación y correlación	27
6.	Resultados.....	28
6.1	Caracterización de los perfiles de meteorización.....	28
6.1.1	Descripción de los perfiles de meteorización mediante observaciones directas de campo.....	28
6.1.1.1	Perfil Norte 1.....	28
6.1.1.2	Perfil Norte 2.....	30
6.1.1.3	Perfil Central.....	31
6.1.2	Secuencia de los grados de meteorización en muestra macroscópica	32
6.1.3	Columna generalizada	33
6.1.4	Análisis petrográfico en sección delgada	36
6.1.4.1	Perfil Norte 1.....	37
6.1.4.2	Perfil Norte 2.	39

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

6.1.4.3 Perfil Central	41
6.1.5 Porosidad.	44
6.1.6 Difracción de Rayos X	44
6.2 Inversión e interpretación de resultados geofísicos.....	45
6.2.1 Tomografías de resistividad eléctrica (TRE).....	46
6.2.1.1 Tomografía 1 (Perfil Norte 1).....	47
6.2.1.2 Tomografía 2 (Perfil Norte 2)	48
6.2.1.3 Tomografía 3 (Perfil Central)	49
6.2.2 Georradar (GPR) Ground Penetrating Radar.....	50
6.2.2.1 Radargrama 1 (Perfil Norte 1)	52
6.2.2.2 Radargrama 2 (Perfil Norte 2)	54
6.2.3.3 Radargrama 3 (Perfil Central).....	56
6.2.3 Superposición TRE y GPR.....	58
6.2.3.1 Perfil Norte 1.....	58
6.2.3.2 Perfil Norte 2.....	58
6.2.3.3 Perfil Central.....	59
6.3 Correlación de los perfiles meteorizados con los métodos geofísicos	60
6.3.1 Perfil Norte 1.	60
6.3.1.1 Tomografías y grados de meteorización	61
6.3.1.2 Sección del GPR y grados de meteorización.	62

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

6.3.2 Perfil Norte 2.	64
6.3.2.1 Tomografías y grados de meteorización	64
6.3.2.2 Sección del GPR y grados de meteorización.	65
6.3.3 Perfil Central.....	67
6.3.3.1 Tomografías y grados de meteorización	67
6.3.3.2 Sección del GPR y grados de meteorización.	68
6.4 Comparación entre los perfiles del sector Norte y sector Central.....	70
7 Discusión	72
8 Conclusiones.....	75
9 Recomendaciones	77
Referencias Bibliográficas	79

Lista de Tablas

Tabla 1	Tabla recopilatoria de composiciones y sus respectivos porcentajes.	42
Tabla 2	Tabla resumen de minerales identificados en la difracción de rayos X.....	45
Tabla 3	Coordenadas iniciales y finales de las líneas de TRE.....	47
Tabla 4	Tabla de resistividades para los puntos de estudio del sector Norte.....	47
Tabla 5	Tabla de resistividades para el punto de estudio central, del sector Central.....	49
Tabla 6	Coordenadas iniciales y finales de las líneas de GPR.....	51
Tabla 7	Unidades geoelectricas del Perfil Norte 1.....	61
Tabla 8	Relación radarfacies y meteorización del Perfil Norte 1	62
Tabla 9	Tabla resumen del Perfil Norte 1	63
Tabla 10	Unidades geoelectricas del Perfil Norte 2.....	64
Tabla 11	Relación radarfacies y meteorización del Perfil Norte 2.	65
Tabla 12	Tabla resumen del Perfil Norte 2.....	66
Tabla 13	Unidades geoelectricas del Perfil Central.....	67
Tabla 14	Relación radarfacies y meteorización del Perfil Central.....	68
Tabla 15	Tabla resumen del Perfil Central.	69
Tabla 16	Comparación entre perfiles y sectores.....	71

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Lista de Figuras

Figura 1 Mapa de localización de los puntos de estudio en La Mesa de Los Santos.	17
Figura 2 Disposición de líneas de corriente y potencial.	19
Figura 3 Secuencia de grado de meteorización en muestra macroscópica	33
Figura 4 Columna generalizada del Perfil Norte 1.	34
Figura 5 Columna generalizada del Perfil Norte 2.	35
Figura 6 Columna generalizada del Perfil Central.....	36
Figura 7 Microfotografías de secciones delgadas para el Perfil Norte 1.	38
Figura 8 Microfotografías de secciones delgadas para el Perfil Norte 2.	40
Figura 9 Microfotografías de secciones delgadas para el Perfil Central.	42
Figura 10 Localización y líneas de adquisición de los métodos geofísicos.....	46
Figura 11 Tomografía del Perfil Norte 1.	48
Figura 12 Tomografía del Perfil Norte 2.	49
Figura 13 Tomografía del Perfil Central.....	50
Figura 14 Sección procesada con el GPR para el Punto Norte 1.....	52
Figura 15 Sección procesada con el GPR para el Punto Norte 2.....	54
Figura 16 Sección procesada con el GPR para el Punto Central.	56
Figura 17 Afloramiento del perfil Central con líneas de radarfacies.....	57
Figura 18 Superposición TRE y GPR del Perfil Norte 1.	58
Figura 19 Superposición TRE y GPR del Perfil Norte 2.	59
Figura 20 Superposición TRE y GPR del Perfil Central.	60
Figura 21 Correlación tomografías y grado de meteorización Perfil Norte 1.	61
Figura 22 Relación radargrama y el Perfil Norte 1.....	63

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Figura 23 Correlación tomografías y grado de meteorización Perfil Norte 2	64
Figura 24 Relación radargrama y el Perfil Norte 2.....	66
Figura 25 Correlación tomografías y grado de meteorización Perfil Central.....	67
Figura 26 Relación radargrama y el Perfil Central.....	69

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Lista de Apéndices

Apéndice A Recopilación de modelos conceptuales según los siguientes autores: Brown (1981), Dewandel et al (2006) y Borrelli et al (2013), reuniendo las características físicas relevantes para los diferentes grados de meteorización.	84
Apéndice B Mapa Geológico de La Mesa de Los Santos	86
Apéndice C Geología de la zona de estudio.	87
Apéndice D Fallas principales de la Zona de estudio.	88
Apéndice E Mapa bloques estructurales de La Mesa de Los Santos.	89
Apéndice F Bloques estructurales en La Mesa de Los Santos.....	90
Apéndice G Mapa de precipitación de la Mesa de Los Santos.....	91
Apéndice H Fotografías de las campañas de campo geofísicas.....	92
Apéndice I Flujograma para el procesamiento de Tomografías	93
Apéndice J Flujograma usado para el procesamiento en GPRpy	94
Apéndice K Fotografía del afloramiento general del Perfil Norte 1.....	95
Apéndice L Columna de colores según Munsell, 1994. Para el Perfil Norte 1	95
Apéndice M Fotografía del afloramiento general del Perfil Norte 2.	96
Apéndice N Columna de colores según Munsell, 1994. Para el Perfil Norte 2	96
Apéndice O Fotografía del afloramiento general del Perfil Central.	97
Apéndice P Columna de Colores según Munsell, 1994. Para el Perfil Central	97
Apéndice Q Sección de tomografía y sensibilidad del Perfil Norte 1	98
Apéndice R Sección de tomografía y sensibilidad del Perfil Norte 2.....	98
Apéndice S Sección de tomografía y sensibilidad del Perfil Central.....	99
Apéndice T Radargrama sin procesar del Perfil Norte 1	99

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Apéndice U Radargrama sin procesar del Perfil Norte 2	100
Apéndice V Radargrama sin procesar del Perfil Central	100

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Resumen

Título Caracterización de perfiles de meteorización del miembro superior de la Formación Los Santos y su correlación mediante modelamiento geoelectrico y de georradar en La Mesa de Los Santos*

Autor: Moreno José Alejandro., Zarate Paula Sofía **

Palabras Clave: Perfiles de meteorización, tomografías de resistividad eléctrica, georradar, Miembro Superior de la Formación Los Santos

Descripción:

Debido a los problemas en la disponibilidad del recurso hídrico en la Mesa de Los Santos se hace necesario el conocimiento completo de su modelo hidrogeológico, esto incluye reconocer la influencia de la meteorización, como un factor que produce la alteración y descomposición de la roca modificando sus propiedades iniciales, afectando la porosidad e influyendo en la infiltración. Adicionalmente, se encuentran diferencias pluviométricas entre el sector Norte y Central, parámetro condicionante en la formación de los perfiles de meteorización. Por esto se realiza la caracterización de los perfiles de meteorización del Miembro Superior de la Formación Los Santos en el sector Norte y Central y su correlación geofísica, a través de levantamiento estratigráfico, análisis petrográfico, difracción de rayos X, TRE y GPR.

Se obtuvieron para el sector Norte perfiles inferiores a 4m, desarrollando los 6 grados de meteorización y una relación directamente proporcional con la porosidad intergranular, aumento de minerales arcillosos y presencia de minerales de alteración. A través de los métodos geofísicos se contrastaron las observaciones de campo, además de identificar la homogeneidad de los perfiles, zonas de baja resistividad y continuidad lateral en las capas. En cuanto al estudio del sector Central se evidenciaron incongruencias entre los grados de meteorización descritos en campo y los análisis de laboratorio, mostrando menor porosidad en los grados mayores y la ausencia de minerales indicadores de meteorización. Las tomografías arrojaron resistividades altas y geometrías discontinuas. El GPR mostró difracciones notables en la RF3, presentándose bloques de rocas que se encontraban rodeados por material más fino, y en las RF1 y RF2 reflectores inclinados, estos resultados son particulares y difieren de lo encontrado en los perfiles del sector Norte. Esta diferencia entre los sectores se podría explicar por las condiciones climáticas distintas, específicamente la pluviometría, ya que afecta la definición de los grados y el espesor de los perfiles, sin embargo, no se justifica la totalidad de los resultados obtenidos, lo que posibilita la hipótesis de que la génesis de la zona de adquisición del perfil Central sea diferente a la de los perfiles adquiridos en el sector Norte de la Mesa de Los Santos.

* Trabajo de Grado

** Facultad Ingenieras Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director Juan Diego Colegial. Codirectora Rocio Del Pilar Bernal.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Abstract

Title: Characterization of weathering profiles of the Upper Member of the Los Santos Formation and its correlation of geoelectric and georadar modeling in La Mesa de Los Santos*

Author: Moreno José Alejandro., Zarate Paula Sofía **

Keywords: Weathering profiles, electrical resistivity tomography, georadar, Upper Member of the Los Santos Formation.

Description:

Due to the problems in the availability of water resources in Mesa de Los Santos, it is necessary to have a complete knowledge of its hydrogeological model, which includes recognizing the influence of weathering as a factor that produces the alteration and decomposition of the rock, modifying its initial properties, affecting porosity and influencing infiltration. Additionally, rainfall differences are found between the northern and central sectors, a conditioning parameter in the formation of weathering profiles. For this reason, the characterization of the weathering profiles of the Upper Member of the Los Santos Formation in the North and Central sectors and their geophysical correlation is carried out, through stratigraphic survey, petrographic analysis, X-ray diffraction, TRE and GPR.

For the North sector, profiles lower than 4m were obtained, developing the 6 degrees of weathering and a directly proportional relationship with the intergranular porosity, increase of clay minerals and presence of alteration minerals. Through geophysical methods, field observations were contrasted, in addition to identifying the homogeneity of the profiles, low resistivity zones and lateral continuity in the layers. Regarding the study of the Central sector, incongruities between the degrees of weathering described in the field and the laboratory analysis were evidenced, showing lower porosity in the higher degrees and the absence of minerals indicators of weathering. The TRE scans showed high resistivities and discontinuous geometries. The GPR showed remarkable diffractions in RF3, showing blocks of rocks surrounded by finer material, and in RF1 and RF2 inclined reflectors, these results are particular and differ from what was found in the profiles of the North sector. This difference between the sectors could be explained by the different climatic conditions, specifically the pluviometry, since it affects the definition of the grades and thickness of the profiles, however, it does not justify the totality of the results obtained, which makes possible the hypothesis that the genesis of the acquisition zone of the Central profile is different from that of the profiles acquired in the Northern sector of the Mesa de Los Santos.

* Graduation project.

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Director Juan Diego Colegial. Codirector Rocio Del Pilar Bernal.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Introducción

En los últimos años la Mesa de los Santos ha presentado serios problemas para el suministro de recurso hídrico a la comunidad esto debido a una disminución notable en las precipitaciones (IDEAM, 2002-2021), lo que ha hecho de suma importancia la búsqueda de aguas subterráneas como una forma de abastecimiento de agua de la zona por lo cual es necesario realizar estudios enfocados en el subsuelo, específicamente en la zona superficial del terreno, enfocándose en los perfiles de meteorización y su importancia en la hidrogeología de la zona.

La investigación se realizó en el sector rural de la Mesa de Los Santos en zonas ubicadas en los bloques estructurales definidos por Vargas (2008) de La Mojarra y El Tabacal ubicados hacia el centro y norte de la zona de estudio. El objetivo central de este trabajo consiste en la caracterización estratigráfica, y su respectiva correlación con métodos geofísicos como tomografías de resistividad eléctrica (TRE) y radar de penetración terrestre (GPR) de los perfiles de meteorización del Miembro Superior de la Formación Los Santos en tres puntos de estudio, además de presentar las bases conceptuales de un modelo hidrogeológico de estos perfiles, mediante análisis de secciones delgadas, determinación de porosidad y difracción de rayos X (DRX)

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

1. Generalidades

1.1. Objetivo general

Caracterizar los perfiles de meteorización del Miembro Superior de la Formación Los Santos en la Mesa de Los Santos y su posterior correlación con la interpretación geofísica a partir de tomografías de resistividad eléctrica (TRE) y georradar en los puntos de estudio.

1.2. Objetivos específicos

- Realizar levantamiento de los perfiles de meteorización en los puntos de estudio.
- Realizar la inversión y posterior interpretación de los datos geofísicos obtenidos a través de tomografías de resistividad eléctrica y de georradar en los puntos de estudio.
- Correlacionar los perfiles meteorizados levantados con los perfiles geofísicos interpretados.
- Comparar los perfiles de meteorización del sector Central con los del sector Norte de La Mesa de los Santos.

1.3. Justificación

El presente proyecto de investigación está dirigido a caracterizar los perfiles de meteorización estratigráficamente y correlacionarlos con las tomografías de resistividad eléctrica y el georradar, con el fin de establecer rasgos litológicos, mineralógicos y físicos en dos sectores estructurales que difieren en su comportamiento pluviométrico. Esta información es útil para reconocer la influencia de dichos perfiles en la retención e infiltración de agua.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Es una problemática latente la disponibilidad del recurso hídrico en la Mesa de los Santos. La escasez del agua en esta zona es un tema que suscita interés y preocupación, ya que es imprescindible en la calidad de vida de las comunidades locales. Actualmente se cuenta con información diversa sobre las aguas subterráneas de Colombia, sondeos eléctricos verticales, estudios y descripciones estratigráficas para conocer el potencial de las distintas formaciones y química del agua para identificar sus posibles usos. Con base en esto, se ha encontrado que la calidad de los acuíferos y la infiltración no es homogénea en La Mesa de Los Santos. Para comprender de una mejor forma este escenario se deben analizar todos los factores que afectan y aportan al sistema hídrico e hidrogeológico, es decir, el clima, los controles estructurales, la geomorfología, los agentes antrópicos y la meteorización. Este último elemento y/o proceso será el abordado a profundidad, ya que produce una alteración y descomposición de la roca que modifica sus propiedades iniciales. Asimismo, los rasgos climáticos y de intemperismo son fundamentales en el desarrollo de los perfiles de meteorización, y es claro que las condiciones pluviométricas no son iguales en los puntos de estudio, lo cual repercute en la formación de los distintos niveles y grados de meteorización. Esto contribuye a esbozar un panorama más amplio sobre la hidrogeología de la Formación Los Santos, en el sector Norte y sector Central de la Mesa de Los Santos, adquiriendo conocimientos más sólidos que integren todos los aspectos útiles anteriormente mencionados.

2. Marco conceptual

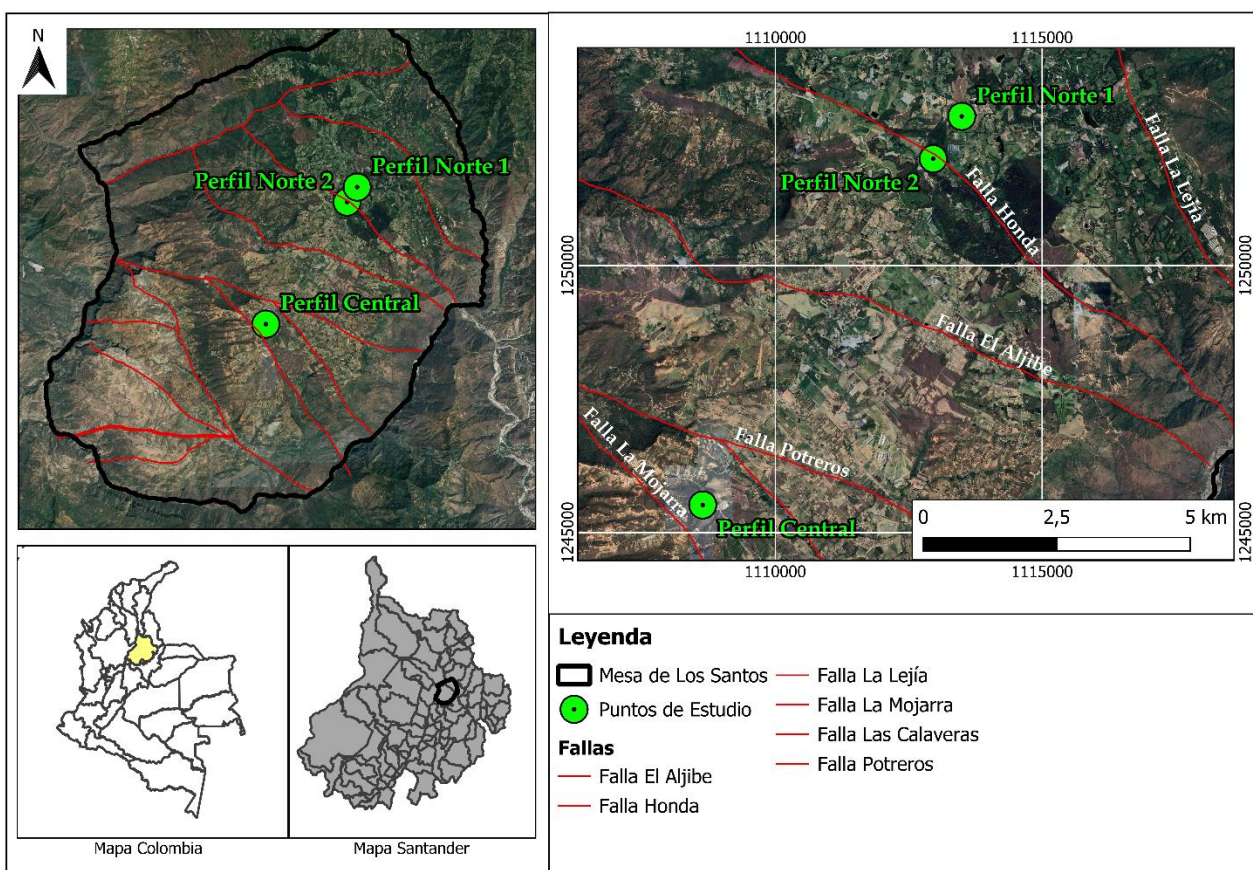
METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

2.1. Localización

El Perfil Norte1 de estudio se encuentra delimitado por las fallas La Honda y La Lejía en la vereda La Granja, coordenadas en origen MAGNA-SIRGAS origen Bogotá ESTE:1113536 NORTE: 1252699, el Perfil Norte 2 es cercano al trazo de la Falla La Honda en la vereda Carrizal, con coordenadas ESTE:1113006 NORTE:1251870 y el Perfil Central está en medio de la Falla La Mojarrá y Falla Las Calaveras, en la vereda La Fuente, con coordenadas ESTE:1108657 NORTE:1245403.

Figura 1

Mapa de localización de los puntos de estudio en La Mesa de Los Santos.



Nota. Tomado y adaptado el 17 de abril de 2023 Google Earth.

3. Marco teórico

3.1. Perfiles de meteorización

La meteorización consta de varios procesos de alteración y disgregación de la roca, dicha descomposición tiene lugar por procesos físicos y químicos, que, dependiendo de las condiciones de susceptibilidad del material, tendrán un efecto en las propiedades y características. Según Ollier, (1984):

“La tendencia a la susceptibilidad de este proceso radica en factores tales como la mineralogía, textura y la presencia de fracturas, sin embargo, los principales controles serán la temperatura y las precipitaciones en el tiempo”.

Generalmente en las rocas cristalinas ocurren procesos químicos, mientras que para las rocas sedimentarias predominan los procesos físicos. Sin embargo, es común que se relacionen y encuentren los dos tipos.

Como resultado de la meteorización se ven cambios en propiedades como la permeabilidad y porosidad, que a su vez controla parte de la presencia de humedad y el flujo de agua, pues a medida que el proceso de alteración y descomposición avanza, cambia la conectividad, forma y tamaño de los poros, afectando también el volumen y flujo.

3.1.1. Clasificación de los perfiles de meteorización

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

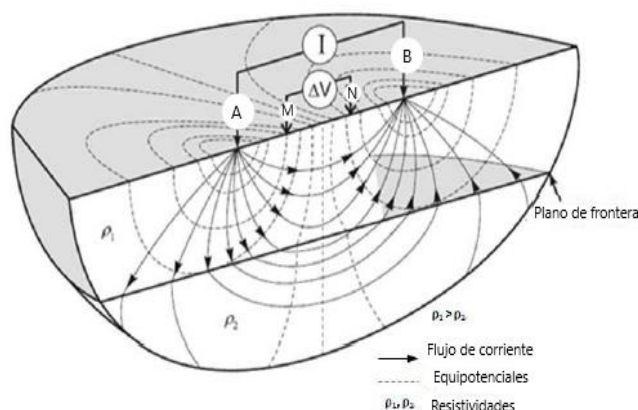
El criterio de clasificación en escala de afloramiento utilizado para realizar la caracterización de los 6 grados de meteorización es la clasificación propuesta por Brown (1981) mostrado en la tabla realizada por Colegial (2017), en la cual, se muestra la recopilación de varios autores acerca de la clasificación de perfiles meteorizados (Apéndice A).

3.2. Tomografías de resistividad eléctrica

Este método geofísico consiste en medir la resistividad del subsuelo por medio de la emisión de un campo de corriente continua para después registrar las diferencias de potencial. La corriente es inyectada por un par de electrodos (A y B) que están conectados a una batería y amperímetro, la diferencia de potencial se medirá a través de los electrodos M y N, conectados a un voltímetro. De esta forma se obtiene la resistividad del suelo (Figura 2).

Figura 2

Disposición de líneas de corriente y potencial.



Nota. Adaptado de Knödel, (2007).

Según Bari et al, (2011): “Las tomografías de resistividad eléctrica permiten identificar las litologías de cierta área de estudio, así como rasgos estructurales”.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Cuando las rocas o los sedimentos están saturados con agua, así como la presencia de arcillas, genera una disminución de la resistividad, lo cual obedece a la una alta capacidad de conducción de corriente eléctrica.

3.2.1. Resistividad aparente

Se define como aquella que se obtiene de manera directa a través de las mediciones en campo, usando el arreglo tetraelectródico y con un esquema geométrico definido (EPM, 2009).

Son estos datos los utilizados para realizar el proceso de inversión y la interpretación, pues el objetivo principal es hallar la resistividad real. Ya que la aparente corresponde a las resistividades de los materiales que encuentra para transmitir la corriente.

3.2.2. Resistividad real

Reynolds (1997) expone que: “Se le conoce como resistividad real a la medida de resistividad que no involucra factores adicionales. Ocurre cuando se quitan todas las distorsiones inducidas”.

Una vez estas resistividades reales son obtenidas, estos resultados pueden compararse con el modelado directo. Habrá diversas soluciones, su fiabilidad dependerá de las observaciones y la interpretación geológica.

3.2.3. Inversión y procesamiento

La inversión consiste en calcular la resistividad real de manera sintética, con modelos numéricos para simular la información adquirida, generando una propuesta que se ajuste al modelo directo, es decir, a los datos y observaciones que se hallaron en campo. Para las tomografías de resistividad eléctrica la magnitud física a usar es la resistividad aparente, una vez dichos datos son

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

procesados en el programa, se encuentran las resistividades reales. Las soluciones son diversas, y tendrán que ser calibradas y objetadas por la geología del lugar y otros parámetros que permitan una adecuada correlación. El método de aproximación de mínimos cuadrados es el que generalmente se usa para minimizar el error entre las mediciones teóricas y las de campo.

3.3.GPR (Ground penetrating radar)

El georradar es un método geofísico no destructivo que basa su funcionamiento en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas por medio de una antena que envía una señal al suelo, dicha señal puede ser reflejada, refractada o difractada. Si se refleja, esta será captada por la antena receptora que genera una respuesta en la consola o pantalla del equipo.

Los datos adquiridos representan la reflectividad de las señales electromagnéticas emitidas, en tiempo doble, que depende de la permitividad dieléctrica.

3.3.1. *Permitividad dieléctrica:*

Se refiere a la tendencia de un material a polarizarse una vez se le aplica un campo eléctrico y cómo anula parcialmente su campo interno. Generalmente esta magnitud física se da en relación al vacío (permitividad relativa). Si se multiplica la permitividad relativa (ϵ_r) por la del vacío (ϵ_0) se obtiene la permitividad absoluta (ϵ_{abs}).

$$\epsilon_{abs} = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$$

Los valores de ϵ_r se encuentran entre 1 (aire) y 81 (agua a 20°C).

La permitividad dieléctrica relativa es una magnitud compleja (Turner y Siggins, 1994).

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$$

ϵ' corresponde a la corriente en fase respecto al campo eléctrico externo

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

$i\epsilon''$ se refiere a la corriente en desfase respecto al campo eléctrico

3.3.2. *Determinación de espesores:*

Para hallar equivalencia entre la profundidad y el tiempo doble de propagación de la onda reflejada es necesario contar con la permitividad o la velocidad de propagación:

$$v = \frac{\text{espacio}}{\text{tiempo}} = \frac{2 \cdot h}{(\Delta t)_D^R} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon'}}$$

$$h = \frac{c}{2 \cdot \sqrt{\epsilon'}} \cdot \Delta t$$

Donde h es la distancia al reflector o espesor del medio que se desea obtener (profundidad).

v es la velocidad a la que se propaga la onda electromagnética

c es la velocidad de propagación en el vacío

ϵ' es la permitividad dieléctrica relativa del medio o constante dieléctrica ϵ

Δt delta del tiempo, es decir, diferencia de tiempo registrada en el radargrama entre la onda directa entre emisor y receptor (t_1) y la reflejada (t_2) en el reflector o la base del medio estudiado

4. Marco geológico

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

4.1.Estratigrafía

Para el conocimiento de la estratigrafía de la zona de estudio se tuvo en cuenta el trabajo de Vargas (2008), y el trabajo de Aldana (2008), que definen la Formación Los Santos para la Mesa de Los Santos (Apéndice B y C).

4.2.Geología Estructural

Vargas, (2008) clasificó las fallas de La Mesa de Los Santos en principales, secundarias y menores (Apéndice D). Dicho contexto estructural es útil para la posterior definición de los bloques estructurales.

4.3.Bloques Estructurales

La Mesa de Los Santos fue dividida estructuralmente en cuatro bloques por Vargas, (2008). Resulta relevante hacer esta diferenciación para hablar de hidrogeología en la zona, debido a la influencia de las fracturas en la porosidad secundaria de las rocas afectadas en los distintos bloques estructurales. Este estudio se enfoca en sectores delimitados por el bloque La Mojarra y el bloque Tabacal, los cuales serán llamados Sector Central y Norte respectivamente para practicidad del presente estudio (Apéndice E y F).

4.4.Hidrogeología y precipitaciones

Díaz et al, (2009) define a la Formación Los Santos de la siguiente forma:

A la Formación Los Santos como unidad hidrolitológica, específicamente el Miembro Superior en las zonas de interés del estudio, encontrando que hacia el norte presenta porosidad primaria media con variaciones texturales hacia el sur, presentando un aumento

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

de porosidad intergranular hacia el centro y una compactación de las rocas hacia el este y el oeste que reducen su porosidad primaria y aumentan su porosidad secundaria por fracturamiento, definiéndose como la unidad geológica con mayor potencial hidrogeológico (p.67-p.69).

La precipitación es el factor de entrada para estimar un valor de oferta hídrica. La cantidad, frecuencia y distribución espacial y temporal de las precipitaciones es muy variable, razón por la que resulta fundamental para las investigaciones relacionadas con el aprovechamiento de los recursos hídricos.

Hincapié (2009) afirma lo siguiente

El comportamiento en la zona de la Mesa de Los Santos se encuentra influenciada por su ubicación geográfica en el trópico y definida por las oscilaciones de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), que presenta un régimen de precipitación dominado por dos épocas húmedas (Abril-Mayo y Septiembre-Octubre) y dos épocas secas (Junio-Julio y Diciembre - Enero), razón por la que se aprecia un comportamiento bimodal para varias de las estaciones evaluadas cercanas a la zona de estudio.

Para realizar el cálculo de la oferta hídrica se consideró un rango de precipitación entre 992 y 1189 mm/año y una precipitación multianual promedio de 1072 mm/año obtenido a partir de un registro común de 22 años y 8 estaciones (p.57) (Apéndice G).

Este parámetro resulta relevante en la formación de perfiles de meteorización, ya que por ser uno de los principales agentes químicos que afectan las rocas influye en el espesor, los contrastes entre los grados, la alteración y oxidación de minerales. Por tanto, es un factor a considerar para entender las diferencias de los sectores Norte y central.

5. Metodología

A continuación, se describen las diferentes fases que se llevaron a cabo para la realización del presente proyecto de investigación, puntualizando los procedimientos y la manera en que estos se efectuaron, así como las referencias de los sistemas de clasificación usados.

5.1. Fase de revisión y recolección bibliográfica

En esta fase se llevó a cabo la búsqueda de información concerniente al tema de interés y demás aspectos relevantes que contribuyan a construir el contexto y panorama con la intención de obtener claridad respecto a los objetivos y las formas adecuadas en las que estos se puedan desarrollar.

5.2. Fase de aprendizaje y manejo del método

En esta etapa se contó con el apoyo de docentes de la materia Campo III para el reconocimiento y buen manejo de los equipos a usar: el tomógrafo de resistividad eléctrica y el radar de penetración terrestre (GPR). Se realizaron distintas prácticas con el fin de adquirir conocimientos de los arreglos, la profundidad estimada, toma de datos y calibración de tiempo/distancia.

5.3. Fase de campo

5.3.1. Caracterización y levantamiento de columnas

Se realizó una salida de inspección con el objetivo de identificar la exposición y ubicación de los perfiles de meteorización, y constatar las indicaciones sugeridas para la

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

ejecución de las tomografías de resistividad eléctrica y GPR. Asimismo, observar los rasgos geológicos generales como indicadores de fallas y estratigrafía. Se planteó la toma de muestras y el levantamiento de columnas de dichos perfiles para su caracterización y posterior correlación con las líneas adquiridas mediante los métodos geofísicos, a través de seis secciones delgadas y difracción de rayos X con motivo de reconocer las familias de arcillas y minerales presentes.

El equipo técnico, constituido por los autores, realizó el levantamiento y caracterización de los tres perfiles de meteorización sedimentarios de base a techo, dos ubicados en el sector Norte y uno en el sector Central en La Mesa de los Santos (Apéndice E). Para la descripción de los grados de meteorización fue necesario hacer apiques que dejaran el perfil fresco y se usó la guía de descripción y muestreo de suelos del IGAC del 2021, adicionalmente, para la clasificación, se empleó la sugerida Brown, 1981 (Apéndice A). Los parámetros utilizados fueron: El color, de acuerdo a la tabla de colores para suelos de Munsell, 1994, las descripciones macroscópicas de las rocas, tales como el tamaño de grano según Miall, 1990, el contenido de arcillas y limos (usando una lupa de 10X), el grado de compactación y fracturas, la oxidación y el contenido de materia orgánica.

Posteriormente en el laboratorio de preparación de muestras de la Universidad Industrial de Santander se elaboraron las seis secciones delgadas de las muestras escogidas como las más sugestivas para el estudio, dichas secciones se pintaron con tinte azul con el objetivo de observar la porosidad y fueron clasificadas según Folk, 1974. Adicionalmente se seleccionaron cuatro muestras para la aplicación de la difracción de rayos X de tipo cualitativo, el cual fue realizado en el laboratorio del Parque Tecnológico Guatiguará, con las que se reconocieron familias de arcillas y demás minerales.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

5.3.2. *Adquisición de datos geofísicos*

Se realizaron tres días de campo en los cuales se contó con la ayuda de los estudiantes inscritos en la materia Campo III. Para la adquisición de los datos de tomografías se usó el arreglo ZZ del tomógrafo ZZ Universal 96 con una extensión de 48 m, colocando electrodos cada 1.5m. Se escogieron dichas distancias por la necesidad de obtener información somera (Figura 3).

Con el GPR, se usó el arreglo TerraSIRch del SIR 3000 con una antena de 400 Hz. La información fue guardada con un nombre distintivo, sin procesar, para dar paso a la siguiente fase (Apéndice H).

5.4 Fase de oficina

5.4.1 *Inversión de datos geofísicos*

Se revisaron los datos usando el software Data Check V4.1, el cual hace parte del equipo ZZ Universal 96 para verificar la calidad de estos. Se eliminaron aquellos que parecían anómalos reduciendo así el porcentaje de error. Luego, se generó un archivo. inp que fue usado para invertir. Se utilizó el programa RES2DINV(demo) para las tomografías, aplicando la inversión robusta de mínimos cuadrados (Apéndice I), y el GPRpy versión 1.0.11 (Apéndice J) para los datos adquiridos con el georradar.

5.4.2 *Interpretación y correlación*

Se analizaron las interpretaciones de los perfiles geoelectricos y de GPR precisando espesores y material, para esto se modificaron tablas de resistividad de estudios previos que facilitaran la correlación de estos con los perfiles de meteorización levantados. Adicionalmente, se contrastaron las observaciones macroscópicas con las secciones delgadas, es decir,

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

observaciones microscópicas, puntualizando aspectos como la porosidad. Con la difracción de rayos X se reconocieron las familias de arcillas presentes y su comportamiento. Finalmente, se recopilaron todos los datos y se elaboró un informe con los hallazgos que respondieran a los alcances establecidos.

6. Resultados

6.1 Caracterización de los perfiles de meteorización

6.1.1 Descripción de los perfiles de meteorización mediante observaciones directas de campo

6.1.1.1 Perfil Norte 1. El afloramiento del perfil Norte 1 tuvo 4,3 m de espesor, de los cuales 2,6 metros se encontraron meteorizados (Apéndice K), en este se pudo distinguir la degradación de colores como fue presentando en la tabla (Apéndice L).

Grado I- Roca Fresca. En este se describieron aproximadamente 2,2 m de intercalaciones de areniscas y arcillas, las cuales se mostraban con pocas o ninguna característica de meteorización (Oxidación, fracturas, materia orgánica etc.). La coloración de las areniscas son 10YR 7/8 YELLOW, el cual se considera como el color original de estas areniscas cuarzosas, las capas de arcillas expuestas se mostraban bien compactadas y con ninguna o pocas discontinuidades en las cuales se observaban manchas de oxidación por donde percola el agua.

Grado II- Roca débilmente Meteorizada. Este grado tuvo 67 cm de espesor de intercalaciones de arenisca y arcillas pobremente meteorizadas, con coloración 7.5 YR 6/8 REDDISH YELLOW, la mayoría de las capas se veían como roca fresca, pero se presentó

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

meteorización penetrativa (tanto en arcillas como en areniscas) por donde se veía decoloraciones amarillentas y rojizas, esto por el paso del agua por las rocas.

Grado III- Roca Moderadamente meteorizada. Tuvo 61 cm de espesor de los cuales 40cm son de arcillas y 21 cm de areniscas, presentando tamaño de grano mayormente arcilla y limo (0,002-0,05mm); la coloración principal del grado se consideró 2.5 YR 6/6 Olive Yellow, las capas de arcillas se presentaron poco friables y con alta decoloraciones a causa de la oxidación, las areniscas se veían fracturadas y con discontinuidades de oxidación.

Grado IV – Roca Altamente Meteorizada. Se observaron aproximadamente 35 cm de espesor de areniscas con tamaño de grano fino a muy fino (0,05-0,25mm) con color 7.5 YR 7/8 REDDISH YELLOW, el material arenoso se mostró decolorado con aspectos friables y con poca de materia orgánica, se encontraron fragmentos de roca con oxidación media a alta.

Grado V – Roca Completamente Meteorizada. Tuvo 21 cm de areniscas arcillosas altamente oxidadas con tamaño de grano muy fino (0,05-0,10mm) a arcilla o limo (0,002-0,05mm), la coloración que presentó fue 2.5 YR 6/8 LIGHT RED; la capa se presentó totalmente decolorada, con presencia de pocos fragmentos de roca fácilmente excavable.

Grado VI – Suelo Residual. Se observó un espesor de 25 cm de suelo con materia orgánica raíces y coloración 10R 3/6 DARK RED, la capa se presentó sin estructuras heredadas, baja densidad, con mayor cantidad de arcillas, el tamaño de grano mayormente fue grano muy fino (0,05-0,10mm) a arcilloso (<0,002mm), el material se disgrega con la mano, no se observaron fragmentos de roca, lo que supone una desaparición completa del material rocoso.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

6.1.1.2 Perfil Norte 2. El afloramiento del perfil Norte 2 tuvo 3,05 m de espesor, parte del perfil estaba cubierto de vegetación (Apéndice M). Sin embargo, se encontró un corte donde fue posible identificar la degradación de colores como se esquematizó en el Apéndice N.

Grado I- Roca Fresca. Se observaron aproximadamente 50cm aflorantes de areniscas de grano medio (0,25-0,5mm) bien calibrada subangular esférica, con alto contenido de cuarzo y bajo porcentaje de minerales micáceos, la coloración se definió como 10YR 8/2 PALE YELLOW.

Grado II- Roca débilmente Meteorizada. Este grado tuvo 40cm de espesor y correspondía a areniscas de grano muy fino (0,05-0,10mm), muy bien calibrada y subredondeada esférica, con alto contenido de cuarzo, la coloración se definió como 7.5YR 8/2 VERY PALE BROWN. La roca evidenció algunas características de meteorización como oxidación y cambios en el color respecto a la infrayacente, fue resistente pero menos respecto al grado I.

Grado III- Roca Moderadamente meteorizada. Este grado tuvo 110 cm de espesor y correspondió a areniscas limosas moderadamente calibrada con granos subangulares esféricos y alto contenido de cuarzo, fue posible identificar mayor porcentaje de micas, la coloración se definió como 10YR 8/6 YELLOW. Se apreciaron fracturas y discontinuidades oxidadas producto de la percolación del agua, fue menos resistente al golpe con el martillo y presentó coloraciones oscuras provenientes de la materia orgánica (suelo).

Grado IV– Roca Altamente Meteorizada. Se observaron 43 cm de espesor de fragmentos de areniscas muy finas (0,05-0,10mm) y fracciones lodosas que se pudieron disgregar con la mano, el grado de compactación fue menor al grado infrayacente, se presentó como un material friable con abundante porcentaje de manchas rojizas y moradas por oxidación, producto de la infiltración del agua. La coloración predominante se definió como 7.5YR 7/8 YELLOW. Fue posible encontrar restos de raíces y materia orgánica proveniente del suelo.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Grado V – Roca Completamente Meteorizada. Grado con un espesor de 22 cm en el que los fragmentos de roca fueron de menor tamaño al infrayacente y fáciles de disgregar con la mano. En contacto gradacional con el suelo residual, el material correspondió a limos y se pudo identificar alto contenido de materia orgánica. La coloración se definió como 5YR 7/6 REDDISH YELLOW.

Grado VI – Suelo Residual. Se identificaron 40cm de suelo residual con tamaño limo (0,002-0,05mm) de coloración uniforme 10R 5/8 RED. No se encontraron fragmentos rocosos, fue posible identificar una capa superior correspondiente a humus y restos de plantas de color grisáceo.

6.1.1.3 Perfil Central. El afloramiento del perfil central tuvo 3,53 m de espesor de areniscas y arcillas meteorizadas (Apéndice O). Se esquematizaron las coloraciones del perfil en el Apéndice P.

Grado I- Roca Fresca. La capa tuvo 80 cm de espesor, se encontraron areniscas moderadamente calibradas de grano medio (0,25-0,5 mm) a fino (0,10-0,25 mm) sin rasgos de oxidación con alto contenido de cuarzo sin fracturar, bien compactada, con estratificación cruzada y coloración 10YR POLE YELLOW.

Grado II - Roca débilmente meteorizada. Se observaron 70 cm de espesor, con coloración 10YR 8/4 POLE YELLOW se identificaron arenas bien calibradas y bien compactadas, con pocas o ninguna discontinuidad de oxidación, se presentaron generalmente fresca en el fondo, mostrando un crecimiento en la oxidación hacia el tope.

Grado III - Roca moderadamente meteorizada. Se describieron 90 cm de espesor, con coloración 10YR 8/6 YELLOW; capa de arenas arcillosas bien calibradas con oxidación moderada en sus caras expuestas al intemperismo, al limpiar el afloramiento, se apreció la continuidad de oxidación baja a media, esta capa se encontró poco compactada y se pudo disgregar fácilmente.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Grado IV- Roca altamente meteorizada. Tuvo 68 cm de espesor con coloraciones 5 YR 6/8 REDDISH YELLOW; se encontraron bloques de areniscas de grano fino (0,10-0,25 mm) altamente oxidadas en matriz arcillo- arenosa, la mayoría del macizo rocoso se observó descompuesto o disgregado en tamaños de grano muy fino (0,05-0,10 mm) a limo (0,002-0,05 mm), los bloques presentes en este grado se mostraron oxidados, bien compactados, y con poca presencia de fracturas.

Grado V - Roca completamente meteorizada. Este grado presentó 20 cm de espesor con coloración mayormente 5 YR 7/8 REDDISH YELLOW, se reconoció principalmente matriz arcillo arenosa, con algunos fragmentos de areniscas que fueron fácilmente disgregadas, de acuerdo a su coloración, la capa tenía alta oxidación; la roca fresca se presentó totalmente descompuesto a suelo.

Grado VI - Suelo Residual. Se observaron 25 cm de espesor con coloraciones 10YR 8/8 YELLOW, la mayoría de este y más hacia el tope se encontró oxidado y muy disgregado, identificándose suelo residual y materia orgánica en forma de raíces, el tamaño de grano fue muy fino (0,05-0,10 mm) a limo o arcilla (0,002-0,05 mm).

6.1.2 Secuencia de los grados de meteorización en muestra macroscópica

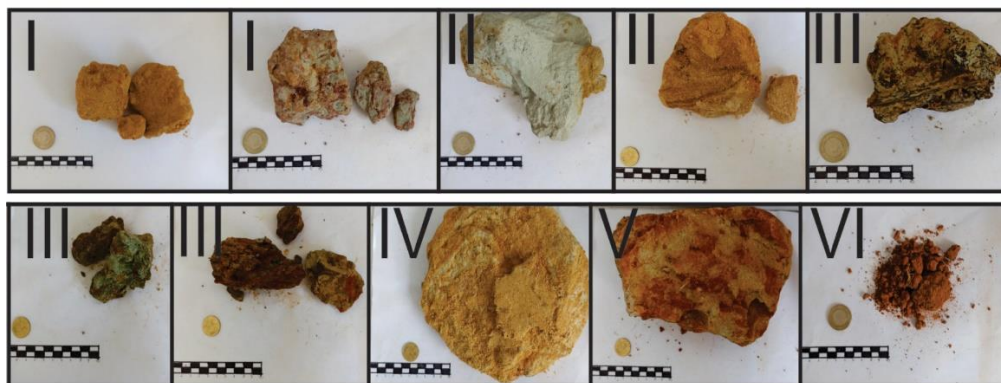
Se realizó el análisis macroscópico petrográfico por medio de las muestras de mano de los diferentes grados identificados, atendiendo a las propiedades físicas de color, tamaño de grano, grado de oxidación. A continuación, se presentan las respectivas muestras con su clasificación (Figura 3):

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Figura 3

Secuencia de grado de meteorización en muestra macroscópica

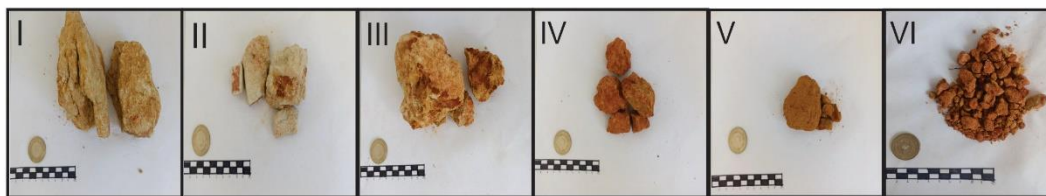
Perfil Norte 1



Perfil Norte 2



Perfil Central



Grado de Meteorización →

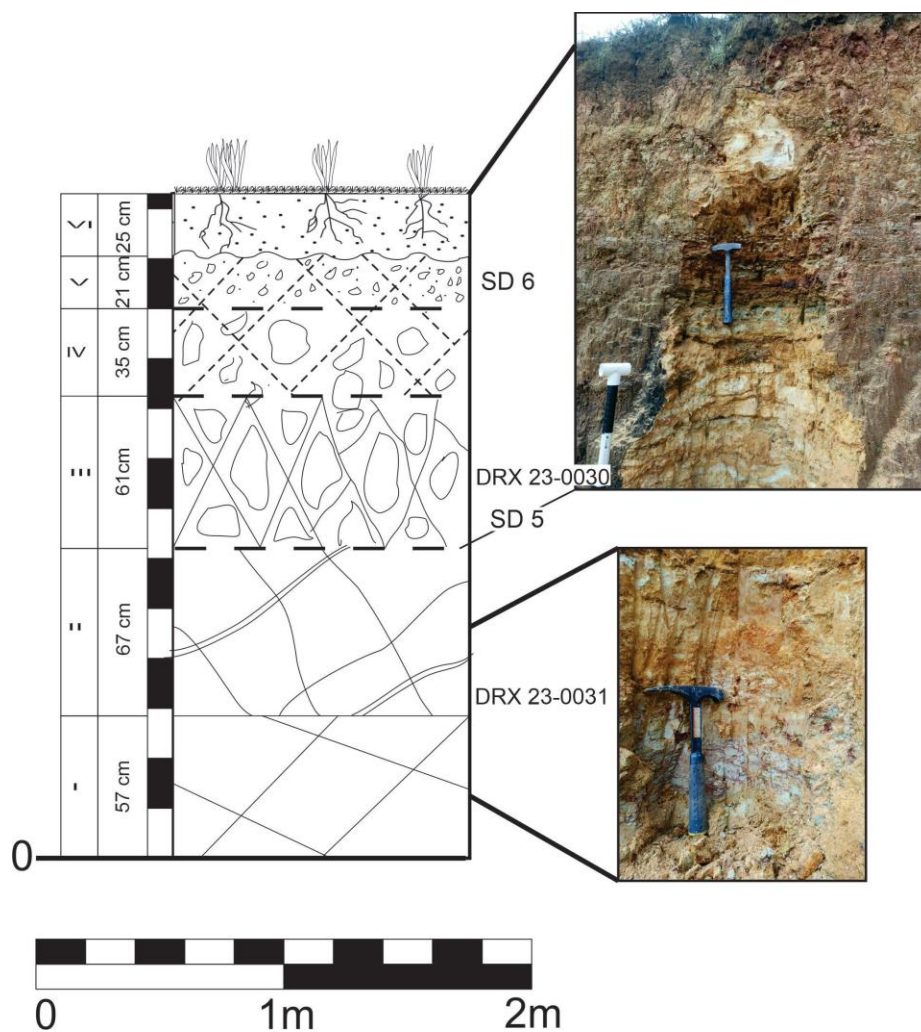
6.1.3 Columna generalizada

Para la elaboración de las columnas de meteorización se sumaron los espesores mostrados en los afloramientos de cada perfil. El Perfil 1 Norte contó con 2,6 m de material meteorizado, del cual, el grado II fue el que más espesor mostró (67 cm) (Figura 4). El Perfil Norte 2 tuvo 3,05 m de espesor, de los cuales el grado III fue el de mayor espesor (1,10 m) (Figura 5). Finalmente, el perfil Central con un espesor total de 3,53 m tuvo el grado III como el de mayor espesor (90 cm) (Figura 6).

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

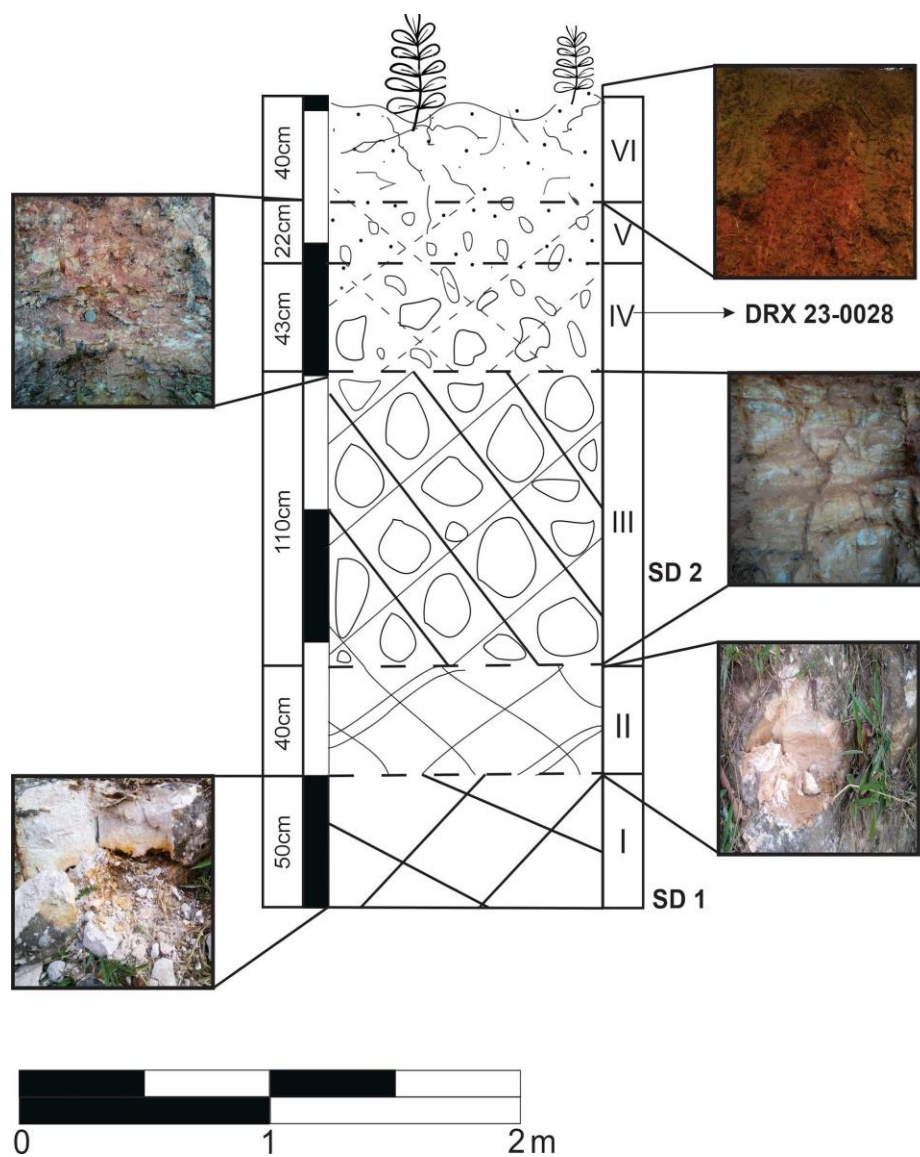
Figura 4

Columna generalizada del Perfil Norte 1.



Nota. Se observan capas intercaladas de areniscas y arcillas. El espesor de los perfiles estudiados corresponde a la escala de la columna esquematizada.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

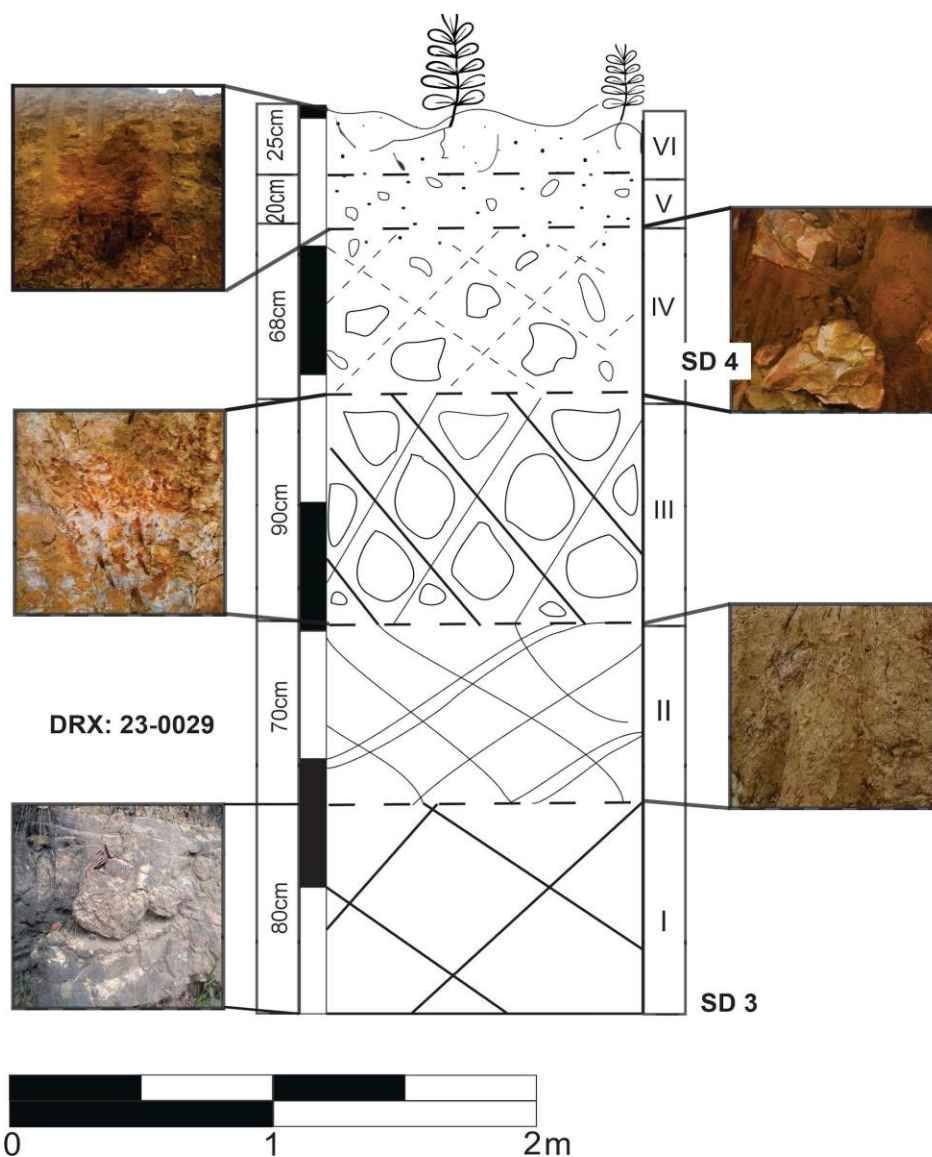
Figura 5*Columna generalizada del Perfil Norte 2.*

Nota. Se observan capas de arenisca y fracciones limosas. El espesor de los perfiles estudiados corresponde a la escala de la columna esquematizada.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Figura 6

Columna generalizada del Perfil Central.



Nota. Se observan capas de arenisca y arcillas. El espesor de los perfiles estudiados corresponde a la escala de la columna esquematizada.

6.1.4 Análisis petrográfico en sección delgada

Se analizaron seis secciones delgadas, dos por cada perfil. Las muestras fueron tomadas de grados diferentes para comparar la meteorización y las características mineralógicas, de igual

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

forma, se aplicó tinción azul para reconocer la porosidad y establecer rasgos cualitativos generales. A continuación, se presentan dos fotografías por perfil en nicoles cruzados y paralelos con el objetivo de 10X. Finalmente, se elaboró una tabla recopilatoria de minerales y su porcentaje en cada sección (Tabla 1)

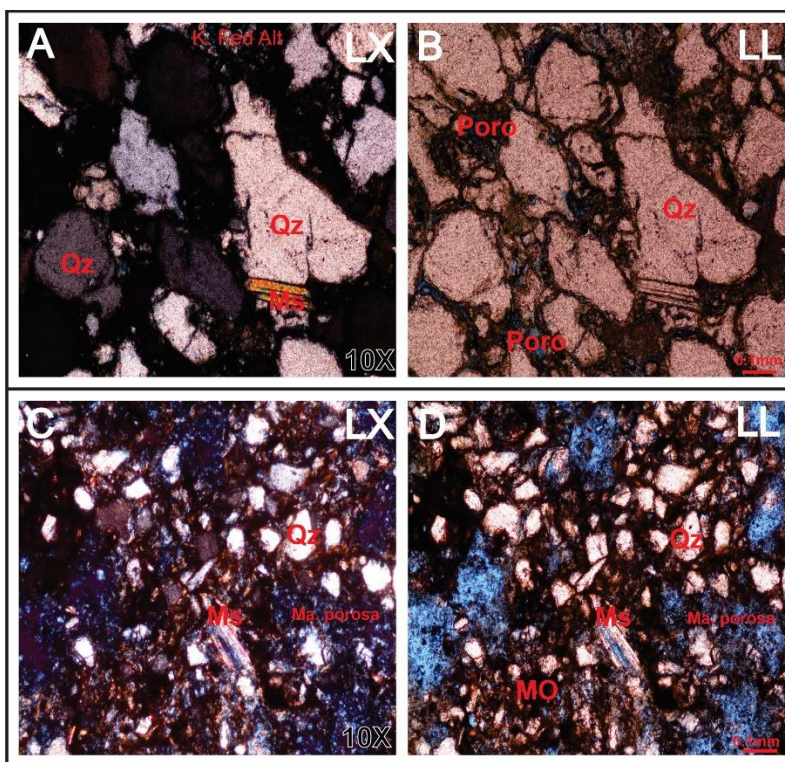
6.1.4.1 Perfil Norte 1. Sección delgada SD5. Grado III de meteorización (Roca moderadamente meteorizada) se describió como arenisca subarcosa de grano fino bien calibrada, altamente compacta, granos no esféricos redondeados, predominó el cuarzo (61%), plagioclasa (16%), micas (6%), óxidos (6%), feldespatos (4%), composicionalmente madura, con un porcentaje de matriz de 4.7%; granos generalmente con contacto puntual (tangencial) y longitudinal; los cuarzos se encontraron sin alteración, los feldespatos por otra parte se hallaron alterados por hidrólisis formando caolinita (Figura 7A y 7B). La porosidad se encuentra interconectada (intergranular) por toda la muestra.

Sección delgada SD6. Esta muestra fue tomada del grado V de meteorización, a través de las observaciones microscópicas se determinó que se trata de una limolita arcosa muy bien calibrada, con granos esféricos angulares a no esféricos angulares, alto contenido de cuarzo (19,8%) y feldespato K (7,6%), el porcentaje de matriz arcillosa fue alto (32,1%) y en su mayoría porosa (Tabla 1). Los cristales estaban en contacto flotante y la porosidad fue considerablemente mejor a la del grado I (SD5). La corrosión del cuarzo en los bordes es posible que se haya dado por la percolación de aguas ligeramente acidificadas por la materia orgánica, lo cual contribuyó a mejorar la porosidad de la roca (Figura 7D).

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Figura 7

Microfotografías de secciones delgadas para el Perfil Norte 1.



Nota. A) Microfotografía en nicols cruzados de la sección SD5, del grado III de meteorización, se observa la presencia de caolinita producto de alteración de feldspatos. B) Microfotografía en nicols paralelos de la sección SD5, se puede ver con más claridad la presencia de porosidad intergranular. C) Microfotografía en nicols cruzados de la muestra SD6, corresponde al grado V de meteorización, se aprecia un aumento de la matriz y degradación de cristales de cuarzo. D) Microfotografía en nicols paralelos del grado V con mucha materia orgánica y un gran aumento de la porosidad. Qz (Cuarzo), Ms (Moscovita), Mo (Materia orgánica).

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

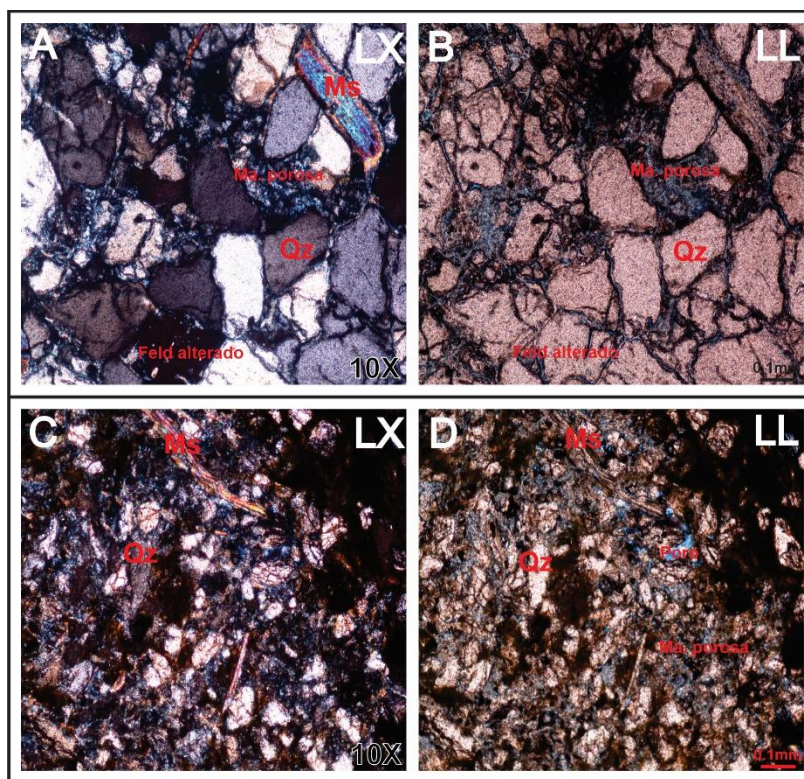
6.1.4.2 Perfil Norte 2. Sección delgada SD1. Esta muestra fue tomada del grado I de meteorización (Roca fresca), a través de las observaciones microscópicas se determinó que se trata de una arenisca subarcosa de grano fino bien calibrada, con granos predominantemente no esféricos muy angulares, alto contenido de cuarzo (46,2%), la matriz es cuarzosa y el feldespato K (7,7%) se está alterando a caolinita (Tabla 1). La mayoría de los cristales se mostraron en contacto puntual y algunos flotantes porque se hallaron dentro de la matriz. (Figura 8A y 8B). La acomodación de los cristales y evidencias de fracturamiento (Porosidad secundaria) representaron una buena compactación.

Sección delgada SD2. Esta muestra fue tomada del grado III de meteorización (Roca moderadamente meteorizada), a través de las observaciones microscópicas se determinó que se trata de una arenisca subarcosa de grano muy fino lodosa, bien calibrada, con granos predominantemente esféricos angulares, alto contenido de cuarzo (33%) y feldespato K (5,7%), este último se encontraba alterando a minerales arcillosos (Tabla 1). La mayoría de los cristales se mostraron en contacto flotante debido a que hubo porcentaje alto de matriz (36,8%), mayor al del grado I (SD1). Se apreció moscovitas que posiblemente estuvieron precipitando hierro en la superficie de las laminillas formando hematita. La corrosión del cuarzo en sus bordes se dio por la percolación de aguas ligeramente acidificadas por la materia orgánica, lo que contribuyó a mejorar la porosidad (Figura 8D) que se considera en aumento para este grado. A nivel de afloramiento las fracturas se apreciaron rellenas por limos de color rojizo que permitieron la infiltración del agua.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Figura 8

Microfotografías de secciones delgadas para el Perfil Norte 2.



Nota. A) Microfotografía en nicols cruzados de la muestra SD1, corresponde al grado I de meteorización. B) Microfotografía en nicols paralelos del grado I, se puede distinguir fácilmente la porosidad. C) Microfotografía en nicols cruzados de la muestra SD2, corresponde al grado III de meteorización. D) Microfotografía en nicols paralelos del grado III, se observa mayor cantidad de materia orgánica (material marrón rojizo) y se aprecia la porosidad. Qz (Cuarzo), Ms (Moscovita), Mo (Materia orgánica), Feld (Feldespato).

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

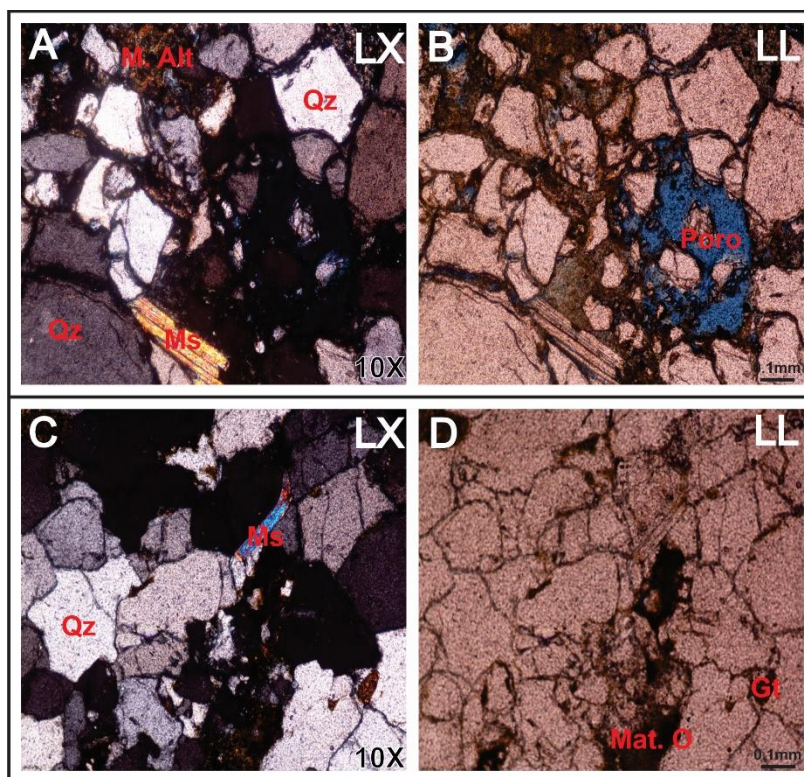
6.1.4.3 Perfil Central. Sección delgada SD3. La muestra fue extraída en el grado I de meteorización (Roca fresca) (Tabla 1), se clasificó como una arenisca subarcosa de grano fino bien calibrada, de grano compactos, esféricos subangulares a subredondeados, predominando el cuarzo (51%) plagioclasa (10%) micas (9,7%) y feldespatos (1,4%), los contactos entre estos minerales se hallaron de manera puntual (tangencial) a longitudinal, la presencia de matriz fue baja (10%). Algunos cristales de cuarzo se vieron afectados por corrosión, lo que hizo que lucieran con colores oscuros en los alrededores de estos, los cristales de feldespato se mostraron totalmente alterados por hidrólisis formándose así caolinita en la sección (Figura 9A y 9B). La porosidad observada en la sección se encontró con poca interconexión y algunos poros se vieron rellenos por materia orgánica

Sección delgada SD4. La muestra fue extraída del grado IV de meteorización (Roca altamente meteorizada) (Tabla 1), y se clasificó como una areniscas arcosa de grano medio bien calibrada, de compactación mayor, con granos no esféricos, subangulares a subredondeados, cuarzo predominante (55%), plagioclasa (19%), micas (8%) y feldespatos (5,2%), se hallaron contactos suturados a longitudinales, con una matriz de 2,3%. Los cristales de la muestra se presentaron con poca o ninguna alteración evidente (Figura 9C y 9D). No mostró alta porosidad, ni se observaron espacios porosos pronunciados, además, se evidenció materia orgánica que se encontraba relleno los intersticios de los cristales.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Figura 9

Microfotografías de secciones delgadas para el Perfil Central.



Nota: A) Microfotografía en nicoles cruzados de la muestra SD3, corresponde al grado I de meteorización B) Microfotografía en nicoles paralelos del grado I. C) Microfotografía en nicoles cruzados de las muestras SD5, correspondiente al grado IV de meteorización. D) Microfotografía en nicoles paralelos del grado IV, se puede ver la presencia de materia orgánica. Qz (Cuarzo), Ms (Moscovita), Mo (Materia orgánica).

Tabla 1

Tabla recopilatoria de composiciones y sus respectivos porcentajes.

Perfil	Código de laboratorio	Grado de meteorización	Composición	%
Perfil Norte 1	SD5	III	Cuarzo	61,49
			Plagioclasa	16,22
			Feldespato P.	4,05
			Moscovita	4,73

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

			Hematita	3,38
			Goethita	2,70
			Biotita	1,35
			Matriz	4,73
			Poros	1,35
	SD6	V	Cuarzo	22,41
			Feldespato P.	8,62
			Moscovita	6,89
			Goethita	6,03
			Hematita	4,31
			Opaco	2,58
			Matriz no porosa	6,03
			Matriz porosa	30,17
			Poros	12,9
Perfil Norte 2	SD1	I	Cuarzo	46,2
			Feldespato P.	7,7
			Moscovita	6,9
			Hematita	6,2
			Matriz no porosa	8,5
			Matriz porosa	23,8
			Poros	0,8
	SD2	III	Cuarzo	33
			Feldespato P.	5,7
			Moscovita	17
			Hematita	7,5
			Matriz no porosa	5,7
			Matriz porosa	31,1
Perfil Central	SD3	I	Cuarzo	52,86
			Plagioclasa	10,71
			Feldespato P.	1,43
			Moscovita	10,00
			Matriz	12,86
			Poros	12,14
	SD4	IV	Cuarzo	58,9
			Plagioclasa	21,0
			Feldespato P.	5,6
			Moscovita	7,3
			Biotita	1,6

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

	Matriz	2,41
	Poros	3,26

Nota. Se especifican los códigos y grados de meteorización de los cuales se obtuvieron las muestras.

6.1.5 Porosidad.

En el proceso de análisis petrográfico de las muestras de sección delgada fue posible la observación de la porosidad en cada una, en términos generales, se evidenció un aumento de porosidad en relación con el aumento del grado de meteorización debido a la pérdida de compactación, la alteración y disolución de minerales.

Se encontró porosidad intergranular por la disolución de matriz y cemento en la sección SD5 del grado III del Perfil Norte 1 (Figura 9, B), y porosidad intercrystalina y secundaria intragranular que correspondieron a dos tipos diferentes, la porosidad intercrystalina dentro de grandes parches de arcillas y porosidad intragranular por disolución de clastos de feldespatos, esto fue apreciable en mayor proporción en los perfiles Norte 2 y Central (Figura 8 y Figura 9B), con una pobre conexión entre los poros.

6.1.6 Difracción de Rayos X

El análisis cualitativo de difracción de rayos X realizado en cuatro muestras, dos para el Perfil Norte 1, uno para el Perfil Norte 2 y uno para el Perfil Central (Tabla 2), arrojó la presencia de minerales arcillosos del grupo de la esmectita (Bentonita), que tiene como característica el alto potencial expansivo, lo que se traduce en buena absorción de agua, la palygorskita, arcilla que se considera con una capacidad intermedia de absorción e hinchamiento, y el grupo de la Caolinita (Caolinita, Nacrita) el cual tiene baja capacidad de absorción y de expansión.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Además de los minerales de arcillas encontrados, se registraron minerales relacionados con los procesos de alteración debido a la meteorización (Hematita, goethita y langita), minerales del grupo de los carbonatos como la calcita, el aragonito, y del grupo de los sulfatos como el yeso y la anhidrita.

Tabla 2

Tabla resumen de minerales identificados en la difracción de rayos X.

Perfil	Nombre de Muestra	Grado de Meteorización	Profundidad	Minerales presentados	
Perfil Norte 1	23-0030	III	1,20m	Bentonita	Calcita
				Caolinita-1A	Cuarzo
				Nacrita	Microclina
	23-0031	II	2,05m	Palygorskita	Moscovita-2M1
				Bentonita	Yeso
				Palygorskita	Cuarzo
Perfil Central	23-0029	II	2,65m	Goethita	Ortoclase
				Calcita	Pirita
				Aragonita	Microclina
				Anhidrita	Moscovita-2M1
				Bentonita	Yeso
Perfil Norte 2	23-0028	IV	0,98m	Caolinita-1A	Cuarzo
				Goethita	Moscovita-2M1
				Hematita	
				Bentonita	Langita
				Caolinita-1A	Cuarzo

6.2 Inversión e interpretación de resultados geofísicos

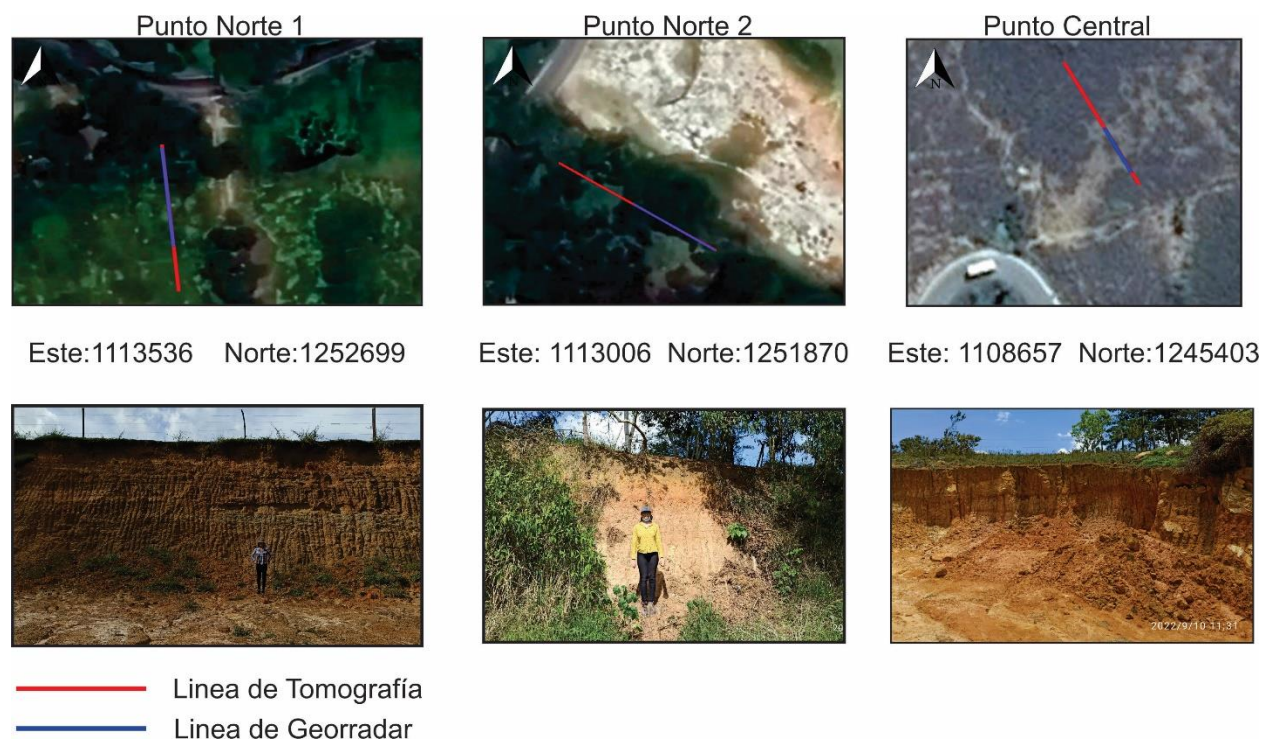
En este capítulo se encuentran algunos parámetros de inversión usados y las interpretaciones dadas para los datos geofísicos, tanto para las tomografías de resistividad eléctrica

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

como para el GPR. En la Figura 10 se señalan los puntos de estudio con sus respectivas coordenadas y las líneas de adquisición.

Figura 10

Localización y líneas de adquisición de los métodos geofísicos



Nota: Coordenadas en el sistema de referencias MAGNA-SIRGAS origen Bogotá

6.2.1 Tomografías de resistividad eléctrica (TRE)

A continuación, se presentan las tomografías realizadas en las zonas de estudio (Dos en el sector Norte y una en el sector Central), mostrando las interpretaciones geofísicas y la ubicación de las columnas de meteorización levantadas en campo, así mismo se adjunta las tablas de resistividad, una por cada sector, que fueron determinadas en concordancia con los rangos obtenidos.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Para la realización de la interpretación algunos perfiles se cortan vertical y horizontalmente, pues se hizo énfasis en los metros que abarcaban la totalidad del perfil de meteorización levantado y se excluyeron las zonas de baja sensibilidad.

Tabla 3

Coordenadas iniciales y finales de las líneas de TRE

Tomografías				
	Punto de inicio		Punto final	
	Este	Norte	Este	Norte
Perfil Norte 1	1113491.3	1252823	1113496.1	1252775.3
Perfil Norte 2	1112959.1	1252002.4	1112917.7	1252026.7
Perfil Central	1108646.2	1245525.8	1108624.7	1245559.3

Nota: Coordenadas en el sistema de referencias MAGNA-SIRGAS origen Bogotá

6.2.1.1 Tomografía 1 (Perfil Norte 1). La tomografía norte 1 tuvo 48 metros de longitud, alcanzando así una profundidad aproximada de 11 metros, de los cuales los 6 metros más someros fueron de interés para el estudio de meteorización, la inversión de la tomografía presentó 1,68 % de error absoluto, la sección se mostró horizontalmente homogénea en 5 iteraciones, presentando buena sensibilidad de los datos en la parte central y superior (Apéndice Q).

Los valores de resistividad real invertidos en el sector variaron desde los 200 hasta los 1700 Ohm*m (Tabla 4).

Tabla 4

Tabla de resistividades para los puntos de estudio del sector Norte.

Tabla de resistividades (Norte)	
Resistividad Ohm*m	Interpretación
0-200	Suelos residuales/ arcillas moderadamente saturadas

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

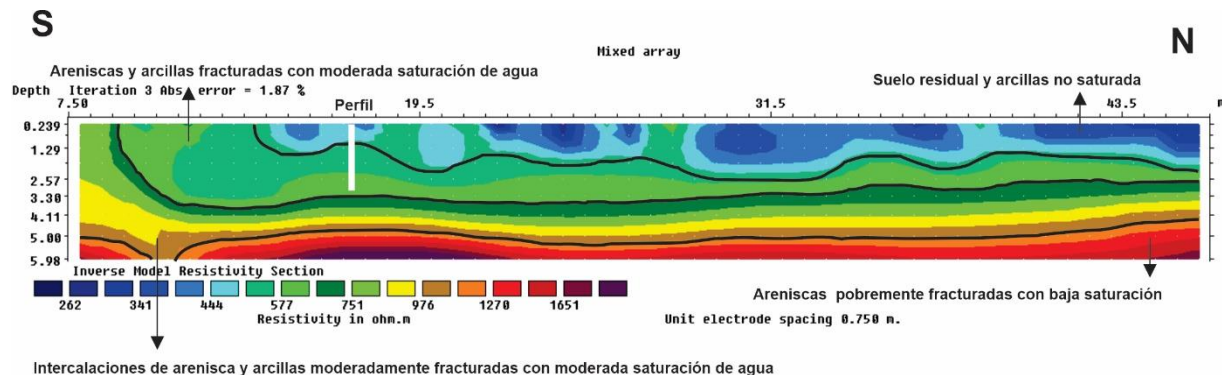
200-460	Suelos residuales/ arcillas no saturadas
460-800	Areniscas y/o arcillas fracturadas con moderada saturación de agua
800-1000	Areniscas moderadamente fracturadas con moderada saturación de agua
1000-2800	Areniscas pobremente fracturadas con baja saturación de agua

Nota. Tomado y adaptado de Hincapie y Veloza (2009).

Observando los 2,56 m del perfil en la tomografía 1 (Figura 11), fue posible identificar 4 rangos diferentes de resistividades.

Figura 11

Tomografía del Perfil Norte 1.



Nota. Indicando las interpretaciones dadas y la ubicación de la columna levantada en campo.

6.2.1.2 Tomografía 2 (Perfil Norte 2). La tomografía tuvo una longitud aproximada de 36 m, alcanzando un espesor entre los 0,239 metros y los 10 metros, de los cuales, se tomaron en cuenta los primeros 6 metros para la inversión, mostrando un error absoluto de 3,0% en 5 iteraciones. La sección se apreció horizontalmente homogénea en su mayoría, con zonas altamente arcillosas (90 Ohm*m) hacia los 24 metros de longitud y con buena sensibilidad de los datos en la parte superior (Apéndice R).

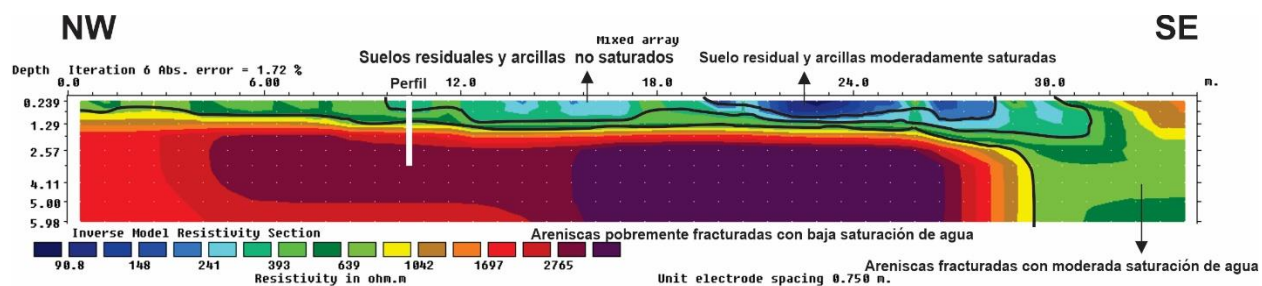
Los valores registrados variaron desde 90 hasta 2800 Ohm*m (Tabla 5).

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

De acuerdo con los 3,05 metros del perfil en la tomografía, se identificaron 4 rangos de resistividades. (Figura 12)

Figura 12

Tomografía del Perfil Norte 2.



Nota. Indicando las interpretaciones dadas y la ubicación de la columna levantada en campo.

6.2.1.3 Tomografía 3 (Perfil Central). La tomografía 3 tuvo 36 metros de longitud, alcanzando de este modo una profundidad aproximada de 11 metros, de los cuales los 6 metros más someros fueron de interés para el estudio de meteorización, la inversión de los datos de tomografía presentó 1,58% de error absoluto en 5 iteraciones. La sección no fue horizontalmente homogénea, se pudieron apreciar bloques de tamaño considerable en un material menos resistivo, las litologías se interpretaron como secas o con baja saturación, presentó buena sensibilidad de los datos en la parte central y superior (Apéndice S).

Los valores encontrados en el sector variaron desde los 200 hasta los 8000 Ohm*m (Tabla 5).

Tabla 5

Tabla de resistividades para el punto de estudio central, del sector Central.

Tabla de resistividades (La vuelta)	
Resistividad Ohm*m	Interpretación
0-200	Suelos residuales/ arcillas saturadas

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

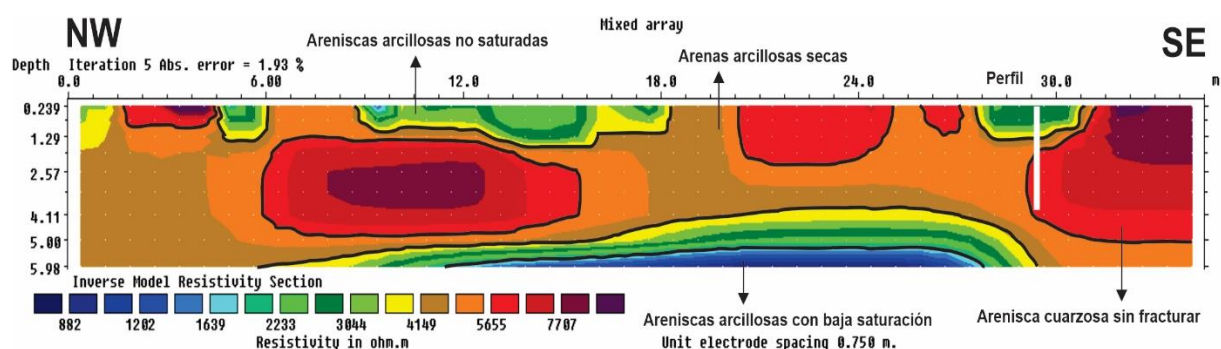
200-800	Arcillas no saturadas
800-2000	Areniscas arcillosas con baja saturación
2000-4000	Areniscas arcillosas no saturadas
4000-5600	Arenas arcillosas secas
5600-8000	Areniscas cuarzosas sin fracturar

Nota. Tomado y adaptado de Vargas (2021).

Observando los 3,65 m del perfil en la tomografía 3 (Figura 13), fue posible identificar 4 rangos diferentes de resistividades.

Figura 13

Tomografía del Perfil Central.



Nota. Indicando las interpretaciones dadas y la ubicación de la columna levantada en campo.

6.2.2 Georradar (GPR) Ground Penetrating Radar

Se realizó la adquisición de datos en las zonas de estudio usando el radar de penetración terrestre (GPR). Para la interpretación se tomaron características como la amplitud de las difracciones, el contraste de los reflectores y la homogeneidad que presenta el radargrama en cada radarfacies.

Se usó el emparejamiento hiperbólico el cual permite estimar la velocidad de propagación del medio a través de la forma ideal de una función hiperbólica definida y cualquier hipérbola de

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

reflexión o difracción que ocurra en las secciones (Cassidy y Jol, 2009). Este proceso se repitió 3 veces y se calculó el promedio de las velocidades halladas.

Tabla 6

Coordenadas iniciales y finales de las líneas de GPR

Georradar				
	Punto de inicio		Punto final	
	Este	Norte	Este	Norte
Perfil Norte 1	1113494.6	1252789.8	1113491.3	1252821.9
Perfil Norte 2	1112958.8	12520002.4	1112936.9	1252015
Perfil Central	1108643.9	1245529.1	1108636.1	1245541.4

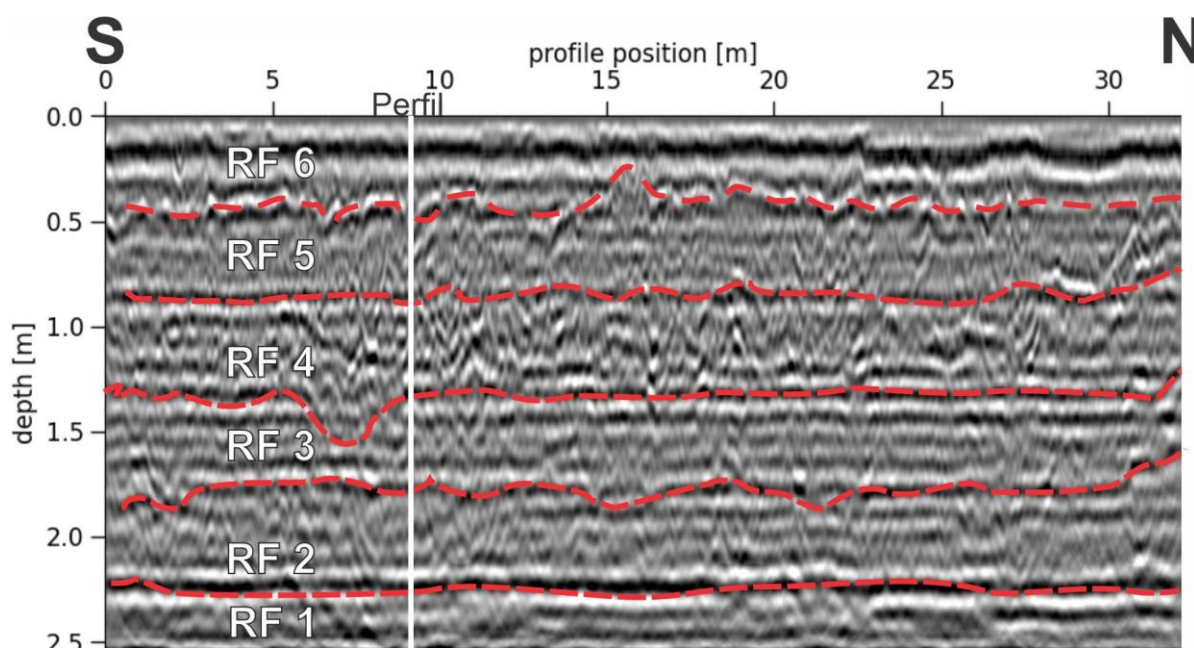
Nota: Coordenadas en el sistema de referencias MAGNA-SIRGAS origen Bogotá

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

6.2.2.1 Radargrama 1 (Perfil Norte 1). Este perfil fue de 32 metros de longitud, llegando a un espesor de alrededor 2,5 metros, los cuales abarcaron la mayoría del perfil de meteorización que presentó la zona (2,6 metros) (Apéndice T). Para el procesamiento del radargrama se estableció la velocidad de propagación de 0,110 m/ns y se usaron filtros de dewow a 50 trazas, smooth a 8 trazas, ganancia de AGC de 200 trazas y migración fk una vez se halla el espesor. En este se pudieron identificar 6 radarfacies (Figura 14) que se describieron a continuación.

Figura 14

Sección procesada con el GPR para el Punto Norte 1.



Nota. Se indican las distintas radarfacies identificadas y la ubicación del perfil en la sección.

Radar Facies (RF1). Reflectores poco definidos, subparalelos y horizontales, mostraron un contraste bajo, con espesor de 25 cm.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Radar Facies (RF2). Reflectores definidos, subparalelos y subhorizontales con un espesor 35 cm.

Radar Facies (RF3). Reflectores poco definidos, paralelos, horizontales con un espesor de 55 cm.

Radar Facies (RF4). Reflectores bien definidos, subparalelos, subhorizontales de un espesor de 45 cm. Presentó ondulaciones dentro de la capa, pudiendo referirse al material competente en matriz arenosa o arcillo-arenosa.

Radar Facies (RF5). Niveles con reflectores subparalelos, horizontales, poco definidos y con un espesor 45 cm.

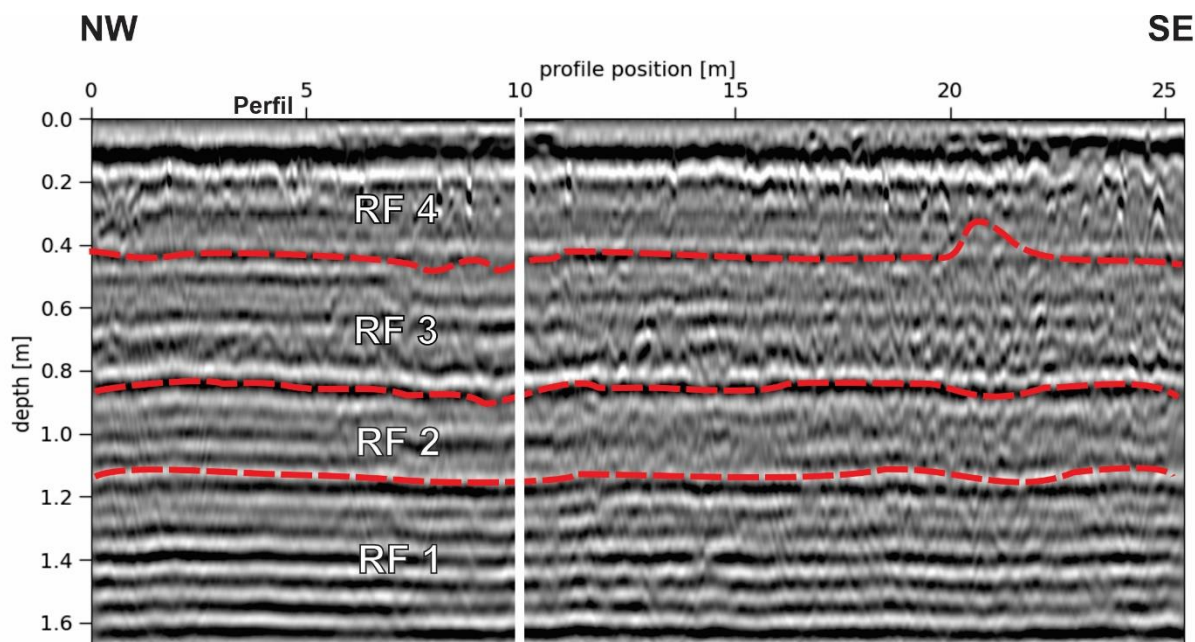
Radar Facies (RF6). Reflectores bien definidos, paralelos y horizontales de un espesor de 45 cm.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

6.2.2.2 Radargrama 2 (Perfil Norte 2). La línea de adquisición tuvo 25 metros de longitud, alcanzando un espesor de 1,6 metros (Apéndice U), para el procesamiento del radargrama se obtuvo una velocidad de propagación de 0,077 m/ns y se aplicaron filtros de dewow a 50 trazas, smooth a 14 trazas, ganancia de AGC de 350 trazas y migración fk una vez se halla el espesor. Se lograron identificar 4 radarfacies (Figura 15) que se describieron a continuación.

Figura 15

Sección procesada con el GPR para el Punto Norte 2.



Nota. Se indican las distintas radarfacies identificadas y la ubicación del perfil en la sección

Radar Facies (RF1). Reflectores Paralelos horizontales, bien definidos de un espesor alrededor de 50 cm. hacia la parte superior de la radarfacies se difuminan los reflectores.

Radar Facies (RF2). Los reflectores se apreciaron subparalelos horizontales, no tan definidos, se notó contraste reducido con respecto al radar facie 1 (RF1), con un espesor de 40 cm.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Radar Facies (RF3). Los reflectores se observaron paralelos horizontales, con pequeñas discontinuidades (concordante con la litología del área), se veían poco definidos y con un espesor de 40 cm.

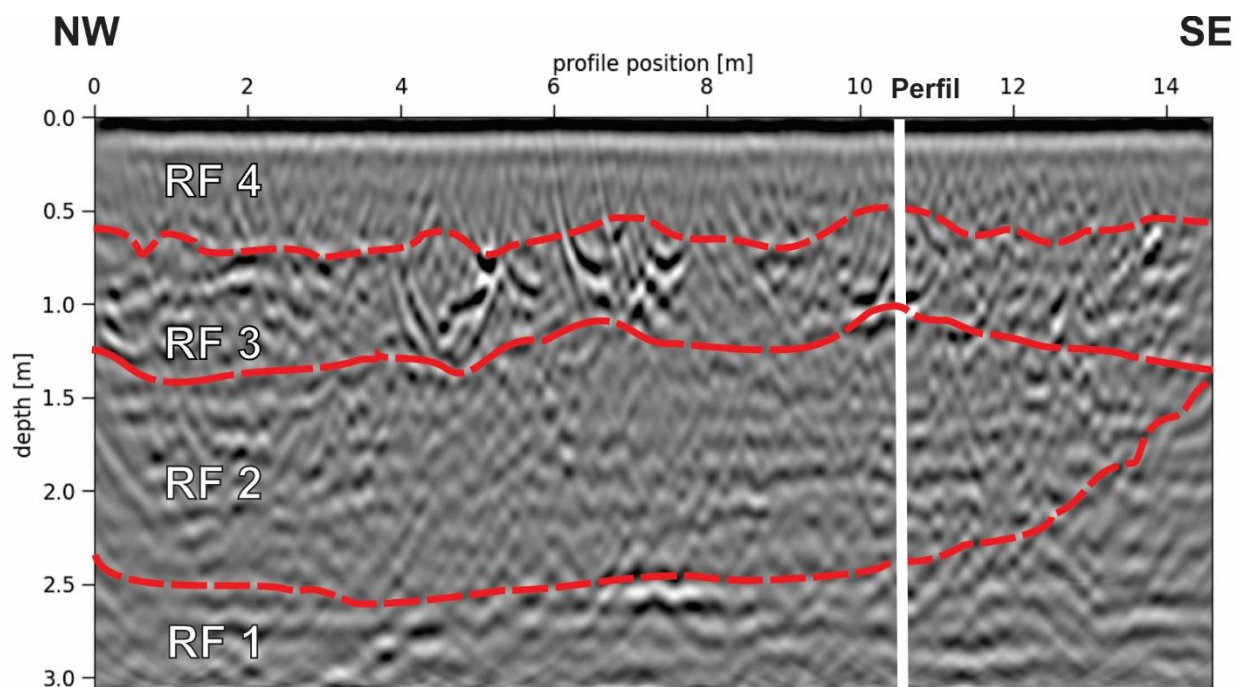
Radar Facies (RF4). Los reflectores se observaron horizontales, paralelos y bien definidos hacia la parte superior.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

6.2.3.3 Radargrama 3 (Perfil Central). El perfil tuvo 14 m de longitud, alcanzando un espesor de 3 metros (Apéndice V) para el procesamiento del radargrama se obtuvo una velocidad de propagación de 0,123 m/ns y se aplicaron filtros de dewow a 50 trazas, smooth a 8 trazas, ganancia de AGC de 350 trazas y migración fk una vez se halla el espesor. Se identificaron 4 radarfacies (Figura 16). El radargrama se describió como homogéneo ya que no presenta mayor cambio entre los reflectores, este bajo contraste se debe a la poca presencia de agua en el subsuelo o a cambios faciales poco marcados, en la Figura 17 se encuentra la fotografía en campo con las líneas de georradar trazadas, mostrando el cambio facial y la presencia de bloques de areniscas en la RF3.

Figura 16

Sección procesada con el GPR para el Punto Central.

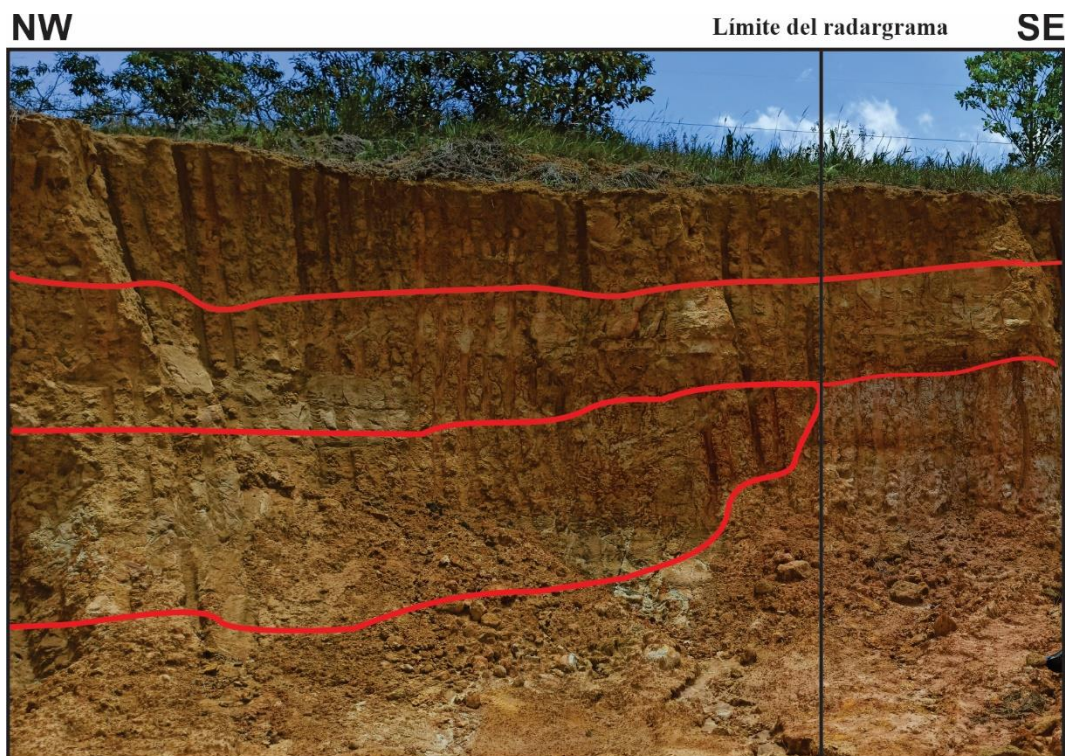


Nota. Se indican las distintas radarfacies identificadas y la ubicación del perfil en la sección.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Figura 17

Afloramiento del Perfil Central con líneas de radarfacies



Radar Facies (RF1). Los reflectores de la RF1 se veían poco definidos debido a su poco contraste, subparalelos e inclinados en la parte derecha del afloramiento, con un espesor de 50 cm.

Radar Facies (RF2). Los reflectores estaban poco definidos, con poco contraste, subparalelos y horizontales, con un espesor de aproximadamente 1m.

Radar Facies (RF3). Reflectores bien definidos y alto contraste en ciertas zonas de la capa, se muestrearon subparalelos, horizontales y con espesor alrededor de 90 cm, se resaltan eventos de difracción de alta amplitud alrededor de los 6-8 metros de longitud del radargrama, esto podría inferir la presencia de material consolidado en esa zona, posiblemente de bloques de areniscas o material de tamaños de grano mayores (gravas).

Radar Facies (RF4). Poco definida, de poco contraste, subparalela y horizontal con un espesor de 60 cm.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

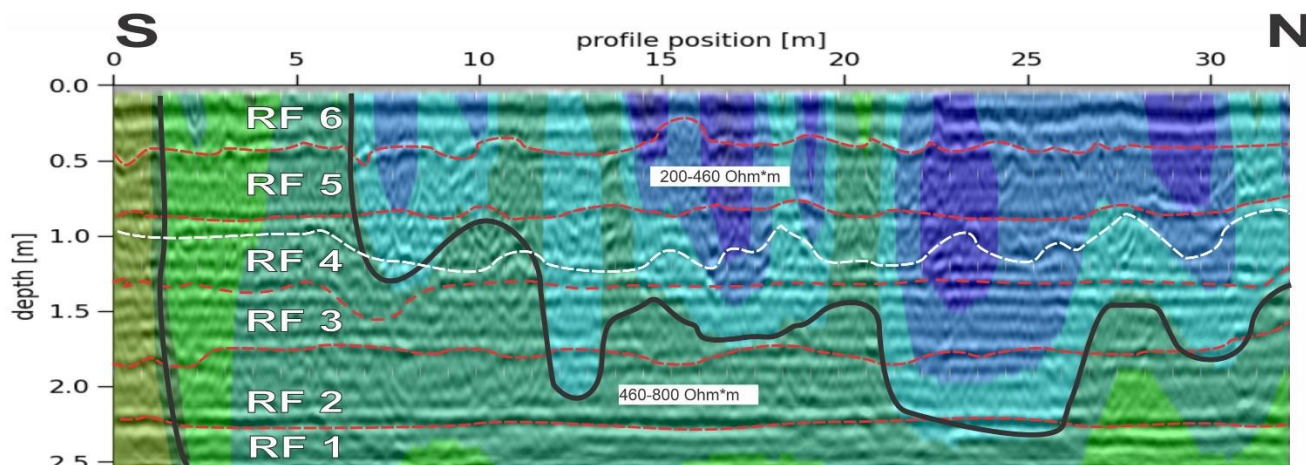
6.2.3 Superposición TRE y GPR

Se realizó la superposición de tomografías de resistividad eléctrica y georradar de cada perfil, con el fin de comparar las respuestas de los dos métodos y ver la relación entre las interpretaciones.

6.2.3.1 Perfil Norte 1. Se observaron resistividades bajas asociadas a suelo residuales y contenido de arcilla de manera general en las tres primeras radarfacies, esto ocurrió aproximadamente de 0-1,3 m. Para las radarfacies más profundas, desde las RF3 hacia abajo se mostraron resistividades de 460-800 Ohm*m que indican areniscas y/o arcillas fracturas con moderada saturación de agua. El radargrama representó mayor continuidad y se identificó en la RF4 reflectores irregulares (línea blanca) que concuerdan con los contornos de resistividades más bajos, esto se debe a la sensibilidad de estos métodos a la presencia de agua o al incremento del contenido de arcillas en el subsuelo (Figura 18).

Figura 18

Superposición TRE y GPR del Perfil Norte 1.



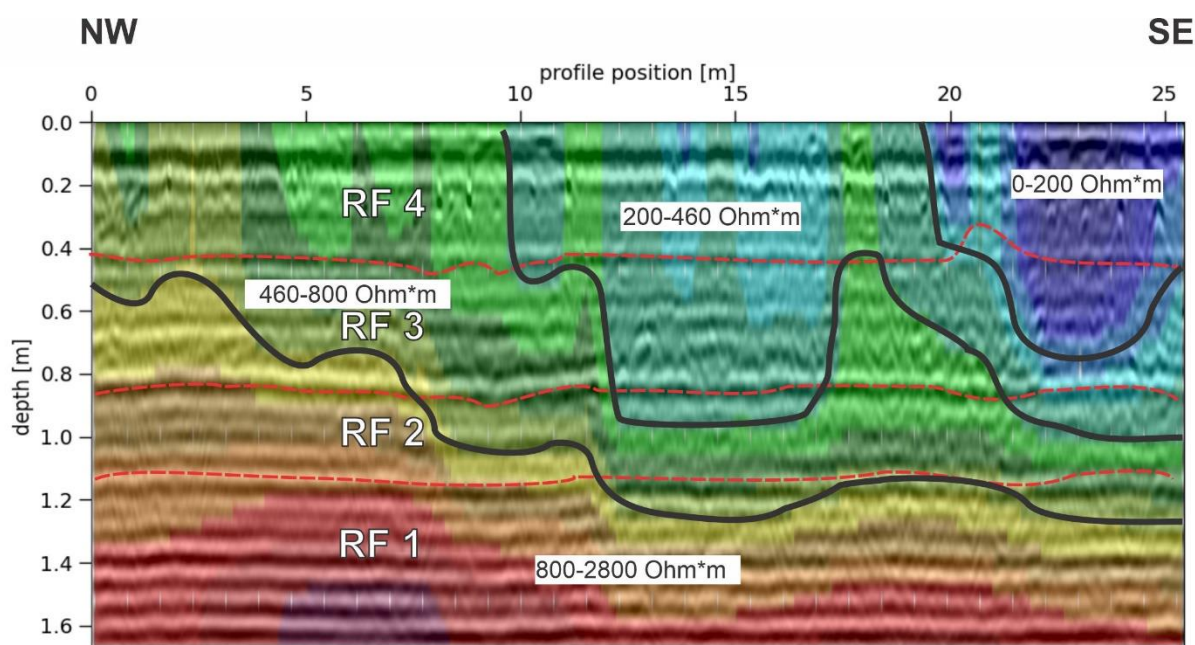
6.2.3.2 Perfil Norte 2. La RF 1 se relaciona con los contornos de resistividades más altas (800-2800 Ohm*m). En las zonas de menor resistividad se mostraron difracciones las cuales en su

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

mayoría se encuentran en zona de baja resistividad. Los contornos de resistividad en la RF 2 se ven afectados por el promedio de resistividades altas y bajas que infra y suprayace la radarfacies (Figura 19).

Figura 19

Superposición TRE y GPR del Perfil Norte 2.

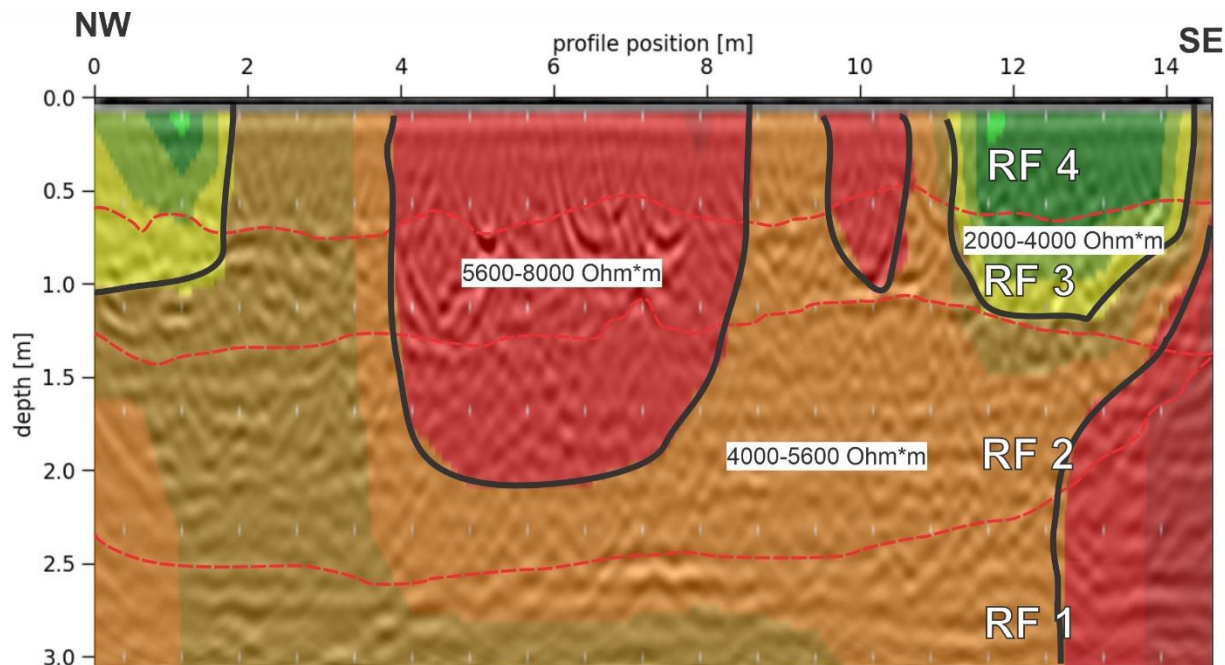


6.2.3.3 Perfil Central. La sección de georradar se mostró más continua horizontalmente en comparación con la sección geoelectrica en la que se evidenciaron bloques de resistividades muy altas, estos, a su vez, coinciden con las difracciones de alta amplitud que presenta el radargrama, especialmente en la RF3. Por otra parte, es preciso anotar que los rangos de resistividad no mostraron una relación directa con las radarfacies definidas. La inclinación de los reflectores de las radarfacies RF1 y RF2 en la tomografía se ve como un cambio de resistividad (Figura 20).

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Figura 20

Superposición TRE y GPR del Perfil Central.



6.3 Correlación de los perfiles meteorizados con los métodos geofísicos

6.3.1 Perfil Norte 1.

Las líneas interpretadas en el capítulo anterior se conservaron, pero fueron nombradas con un grado de meteorización según las características litológicas encontradas (Figura 21). En la Tabla 7 se muestran las unidades geoelectricas (Rangos de resistividad) identificadas y su relación con los perfiles de meteorización. Además de se presentan las radarfacies y su respectiva correspondencia con los grados de meteorización (Tabla 8), sus características y de manera representativa la comparación con la columna del perfil (Figura 22). En la Tabla 9 está la síntesis de la correlación hallada para cada método geofísico.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

6.3.1.1 Tomografías y grados de meteorización

Figura 21

Correlación tomografías y grado de meteorización Perfil Norte 1.

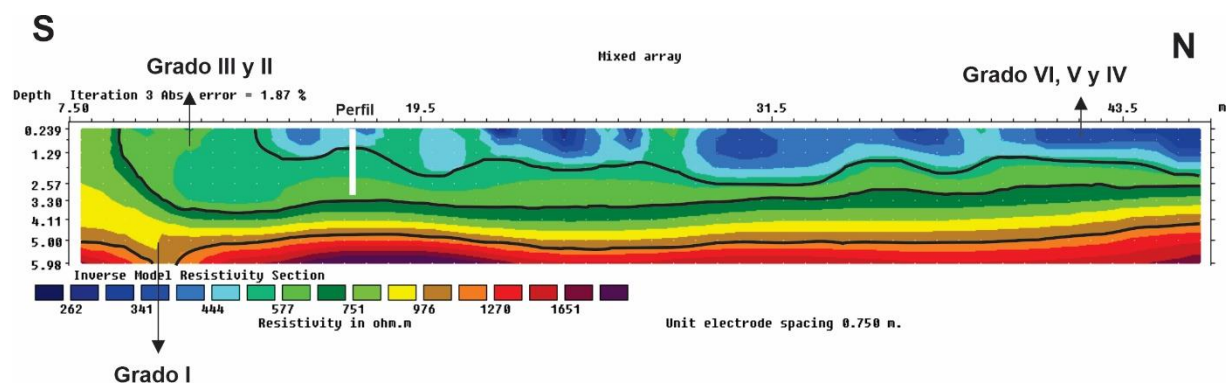


Tabla 7

Unidades geoelectricas del Perfil Norte 1.

Unidad Geoelectrica	Rango de resistividad Ohm*m	Grado de meteorización	Litología
UG 3	200-460	VI,V,IV	Suelo residual/ arcillas no saturadas
UG 2	460-800	II y III	Areniscas y/o arcillas fracturadas con moderada saturación de agua
UG 1	800-1000	I	Areniscas moderadamente fracturadas con moderada saturación de agua

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

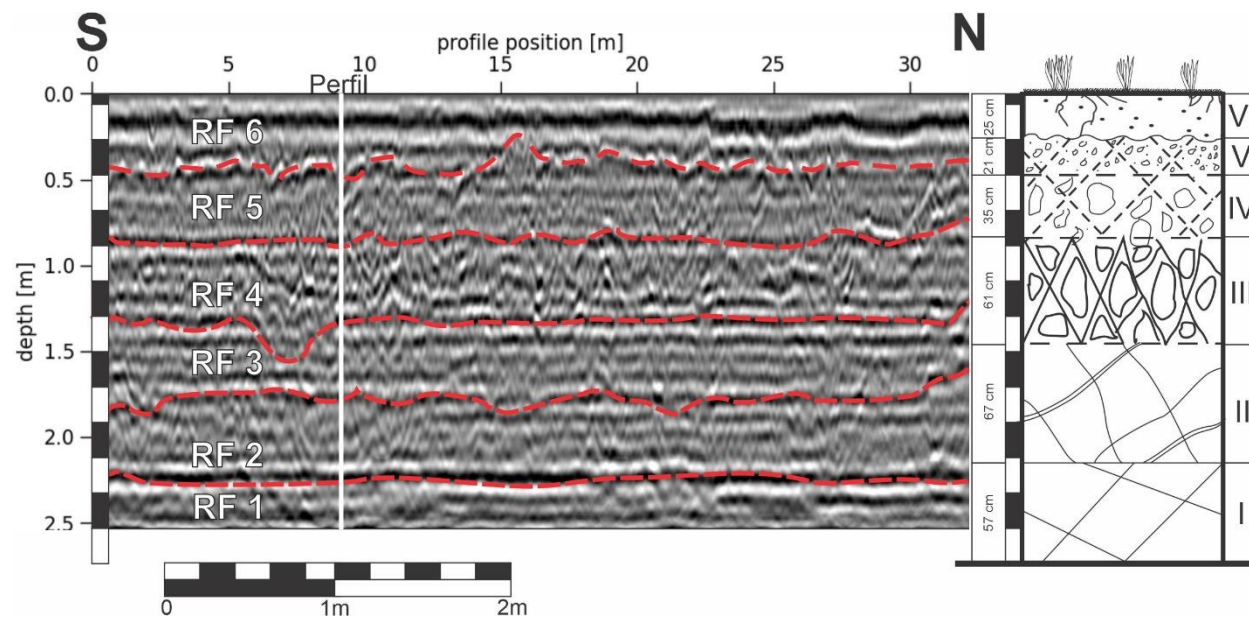
6.3.1.2 Sección del GPR y grados de meteorización.

Tabla 8

Relación radarfacies y meteorización del Perfil Norte 1

Radarfacies	Grado de meteorización
RF1	Nivel arcilloso sin meteorización, se mostró consolidado, y con pocas venas de circulación de agua. (Grado I de Meteorización)
RF2	Arcillas con coloraciones amarillentas consolidadas con venas de oxidación (por donde percola el agua). (Grado II)
RF3	Niveles de areniscas competentes, poco meteorizado
RF4	Correspondió a un nivel de fragmentos de areniscas suspendidas en matriz arcillo-arenosa, las areniscas se presentaron con media o poca oxidación (Grado III de meteorización).
RF5	Niveles arcillosos muy oxidados y con características fisiles en ciertas zonas, presentaron altas coloraciones rojizas y negras. (Grado IV)
RF6	Areniscas muy oxidadas con presencia de materia orgánica hacia el tope, llegando así al suelo residual de unos 20 cm, que fueron los reflectores de más contraste de la zona. (Grados V y VI)

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Figura 22*Relación radargrama y el Perfil Norte 1.*

Nota. El radargrama muestra 2,51 m de profundidad de los 2,60m del perfil meteorizado.

Tabla 9*Tabla resumen del Perfil Norte 1*

Grado de Meteorización	Profundidad (UG)	Unidad Geoeléctrica	Rango de la UG	Profundidad (RF)	Radarfacies
Grado VI	1,29 m	UG3	200-460 Ohm*m	0,5 m	RF6
Grado V					
Grado IV				0,8 m	RF5
Grado III	3,32 m	UG2	460-800 Ohm*m	1,3 m	RF4
Grado II	5 m	UG1	>800 Ohm*m	2,2 m	RF2 y RF3
Grado I				2,5 m	RF1

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

6.3.2 Perfil Norte 2.

Las líneas interpretadas anteriormente se conservaron, pero fueron nombradas con un grado de meteorización según las características litológicas encontradas (Figura 23). En la Tabla 10 se muestran las unidades geoelectricas (Rangos de resistividad) identificadas y su relación con los perfiles de meteorización. Por medio de la Tabla 11 se muestra la correspondencia de las radarfacies y los grados de meteorización identificados considerando la profundidad de la sección de GPR. En la Figura 24 se esquematizó dicha relación. En la Tabla 12 está la síntesis de la correlación hallada para cada método geofísico.

6.3.2.1 Tomografías y grados de meteorización

Figura 23

Correlación tomografías y grado de meteorización Perfil Norte 2

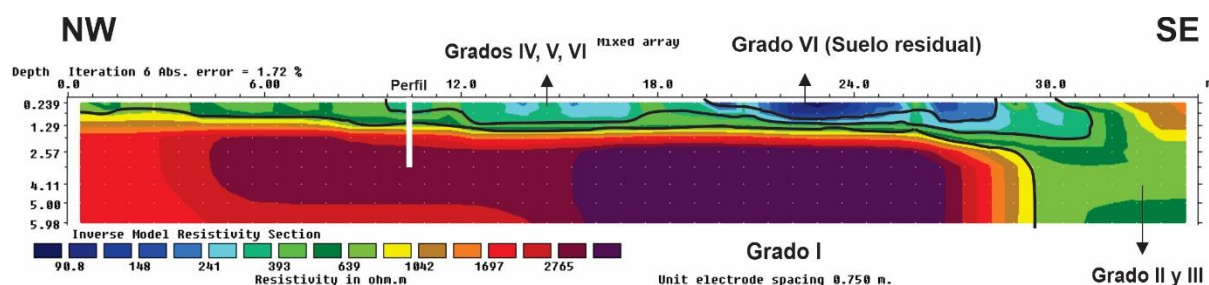


Tabla 10

Unidades geoelectricas del Perfil Norte 2

Unidad Geoelectrica	(Rango de resistividad Ohm*m)	Grado de Meteorización	Litología
UG 3	200-460	VI,V,IV	Suelo residual/ arcillas no saturadas

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

UG 2	460-800	II y III	Areniscas fracturadas con moderada saturación de agua
UG 1	800-2800	I	Areniscas pobremente fracturadas con baja saturación de agua

6.3.2.2 Sección del GPR y grados de meteorización.**Tabla 11**

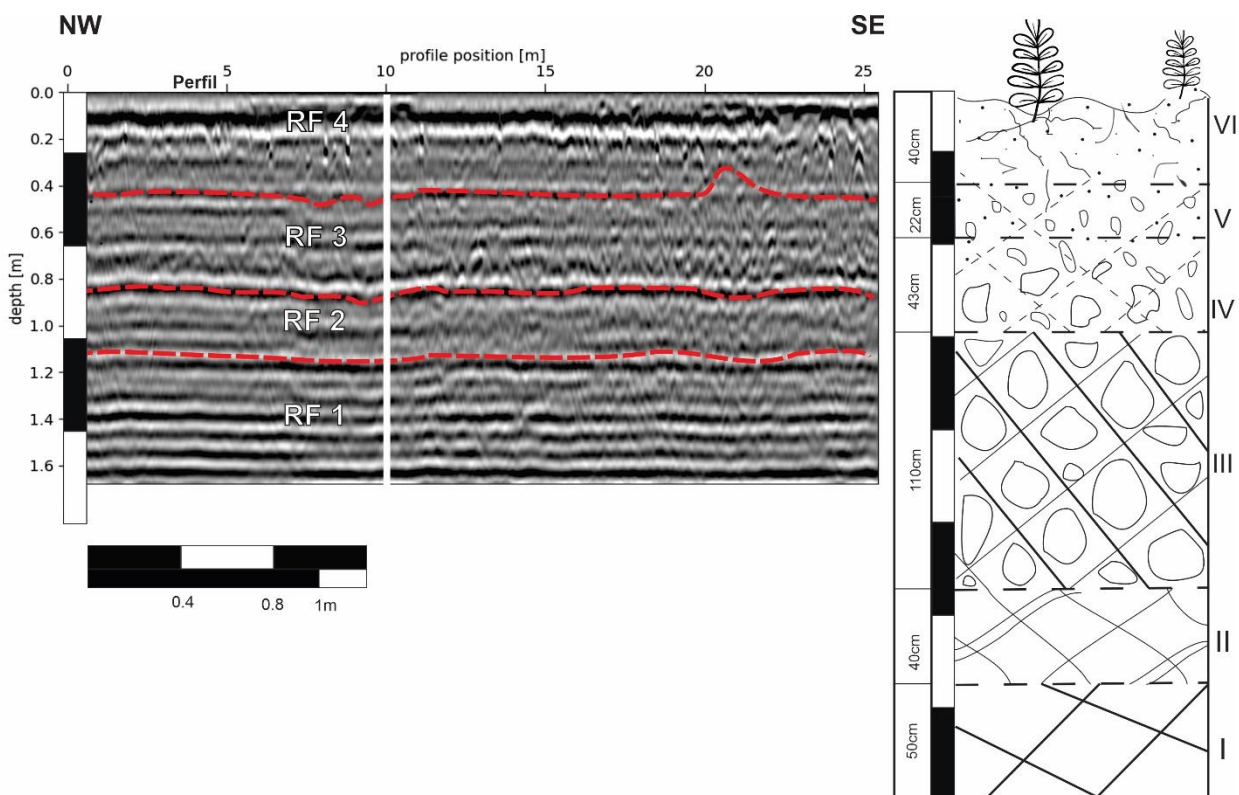
Relación radarfacies y meteorización del Perfil Norte 2.

Radarfacies	Grado de meteorización
RF1	Paquetes de areniscas competentes con signos de oxidación (fracturas), que correspondió al grado III de la clasificación de meteorización. Las rocas presentaron mayormente su estructura original.
RF2	Capa arenosa no tan competente y más oxidada con respecto a la radarfacies 1, se observaron más fracturada, hizo referencia al grado IV de meteorización.
RF3	Capas friables de tamaño de grano limo, con alta oxidación por la percolación de agua en las capas. (Grado V de meteorización)
RF4	Cambio facial a materiales más arcillosos y limosos (suelo residual). (Grado VI)

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Figura 24

Relación radargrama y el Perfil Norte 2.



Nota. El radargrama muestra 1,7 m de profundidad de los 3,05m del perfil meteorizado.

Tabla 12

Tabla resumen del Perfil Norte 2

Grado de Meteorización	Profundidad (UG)	Unidad Geoeléctrica	Unidad Geoeléctrica	Profundidad (RF)	Radarfacies
Grado VI	0,5 m	UG3	200-460 Ohm*m	0,43 m	RF4
Grado V				0,82 m	RF3
Grado IV				1,1 m	RF2
Grado III	1,29 m	UG2	460-800 Ohm*m	1,7 m	RF1
Grado II					No definido

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Grado I	5,98 m	UG1	800 - 2800 Ohm*m	No definido
----------------	--------	-----	---------------------	-------------

6.3.3 Perfil Central.

Los contornos interpretados en el capítulo anterior se conservaron, pero fueron nombradas con un grado de meteorización según las características litológicas encontradas (Figura 25). En la Tabla 13 se muestran las unidades geoelectricas (Rangos de resistividad) identificadas y su relación con los perfiles de meteorización. En la Tabla 14 se muestra la correspondencia de las radarfacies y los grados de meteorización identificados que son representados en la Figura 26. Se consideró solo la profundidad de la sección de GPR. En la Tabla 15 está la síntesis de la correlación hallada para cada método geofísico.

6.3.3.1 Tomografías y grados de meteorización

Figura 25

Correlación tomografías y grado de meteorización Perfil Central.

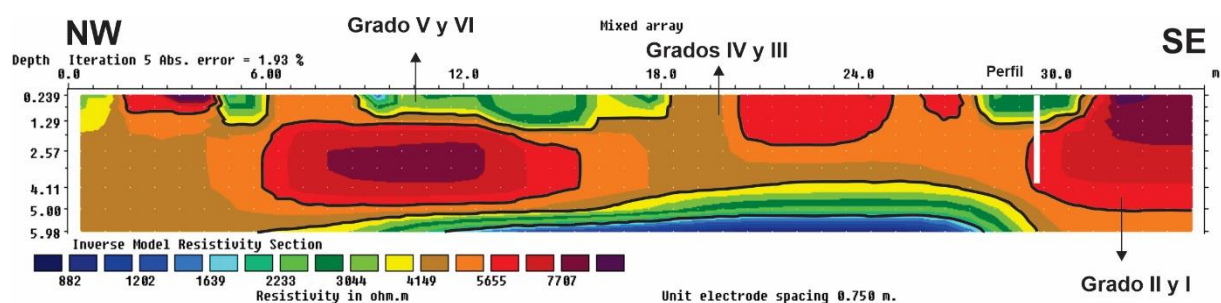


Tabla 13

Unidades geoelectricas del Perfil Central.

Unidad Geoelectrica	(Rango de resistividad Ohm*m)	Grado de Meteorización	Litología
UG 3	2000-4000	VI y V	Areniscas arcillosas no saturadas

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

UG 2	4000-5600	IV y III	Arenas arcillosas secas
UG 1	5600-8000	II y I	Areniscas cuarzosas sin fracturar

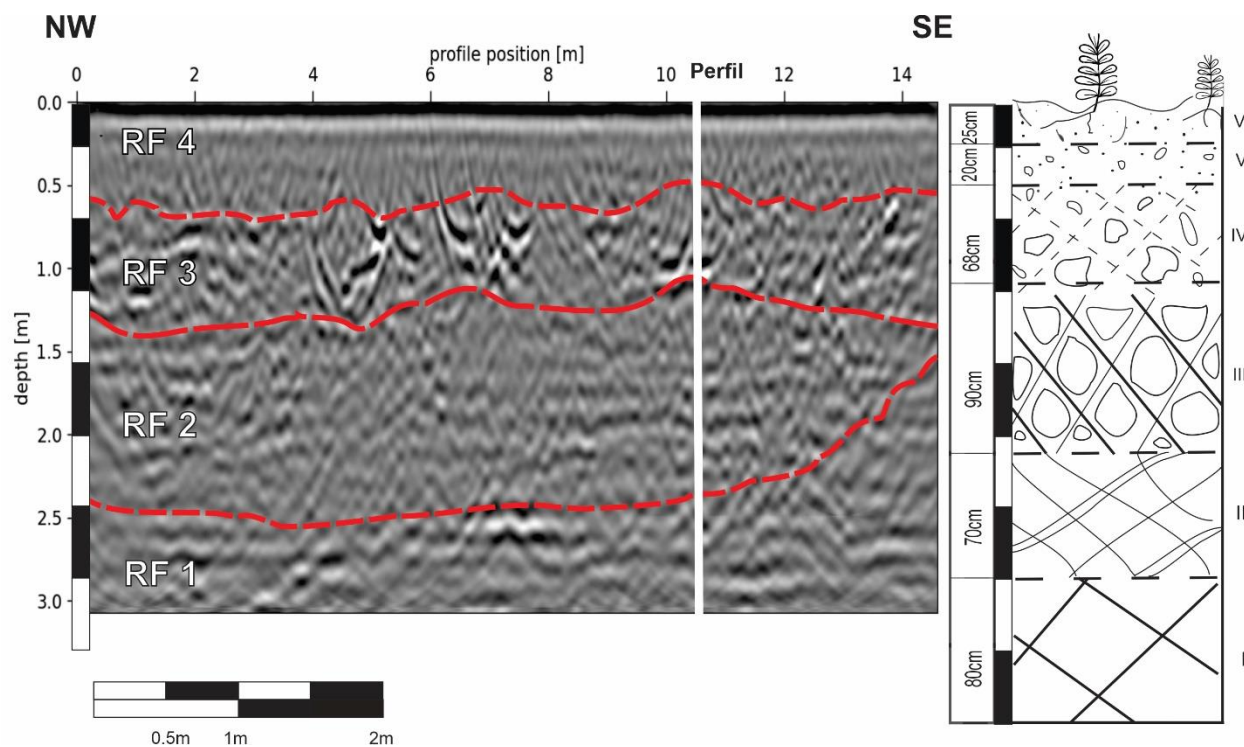
6.3.3.2 Sección del GPR y grados de meteorización.**Tabla 14***Relación radarfacies y meteorización del Perfil Central*

Radarfacies	Grado de meteorización
RF1	Arcillas frescas con poca oxidación, bien consolidadas. (Grado II Meteorización)
RF2	Arcillas menos consolidadas, su oxidación aumenta a medida que se llega a la parte superior, mostrando niveles alta o completamente oxidados al final de la capa. (Grado III)
RF3	Matriz arcillo-arenosa con la presencia de bloques de areniscas muy competentes (reflectores definidos y contrastados), la matriz arcillo-arenosa se mostró con oxidación creciente, los bloques presentaron poca oxidación en forma de venas o fracturas rojizas. (Grado IV)
RF4	Capa no competente de matriz arcillo-arenosa, granodecreciente hasta llegar al suelo residual, presentó pocos fragmentos de rocas hacia el inicio de la capa. (Grado V y VI)

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Figura 26

Relación radargrama y el Perfil Central.



Nota. El radargrama muestra 3,1 m de profundidad de los 3,53m del perfil meteorizado.

Tabla 15

Tabla resumen del Perfil Central.

Grado de Meteorización	Profundidad (UG)	Unidad Geoeléctrica	Unidad Geoeléctrica	Profundidad (RF)	Radarfacies
Grado VI	1,30 m	UG3	2000-4000 Ohm*m	0,5 m	RF4
Grado V					
Grado IV	1,60 m	UG2	4000-5600 Ohm*m	1,25 m	RF3
Grado III				2,4 m	RF2
Grado II	4 m	UG1	5600-8000 Ohm*m	3,1 m	RF1
Grado I					No definido

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

6.4 Comparación entre los perfiles del sector Norte y sector Central

Se realizó una tabla comparativa (Tabla 16) entre los tres perfiles estudiados, donde se tuvieron en cuenta aspectos como el espesor, porosidad, grados de meteorización y valores de los métodos geofísicos empleados. Esto con el fin de sintetizar los cambios y similitudes entre los perfiles de meteorización y algunos factores que condicionan y brindan información sobre las propiedades de infiltración y retención de agua en los sectores estudiados.

La meteorización en el sector Norte y sector Central se desarrolló en contextos pluviales diferentes (precipitaciones anuales en mm/año) (Apéndice G), lo que generó diferencias en las características de los perfiles de cada sector. Los perfiles del sector Norte, presentaron mayores porosidades, alteraciones minerales y presencia de arcillas en los niveles más altos de meteorización (V y VI), sugiriendo una mayor posibilidad de infiltración y retención de agua. En el perfil central, por otro lado, no se encontraron relaciones directas entre la porosidad, alteración y arcillas con el grado de meteorización.

Las resistividades más bajas en los dos perfiles del sector Norte estaban en los grados más altos de meteorización, debido a la presencia de material arcilloso y orgánico. En el perfil Central las resistividades más bajas (800 Ohm*m) se encontraron alrededor de los 6 m de profundidad donde no se registraron descripciones de meteorización, además, se registraron cuerpos rocosos con alta resistividad (7000 Ohm*m) embebidos en zonas de resistividad menores (4000 Ohm*m).

Los radargramas de los perfiles del sector Norte son fácilmente identificables a través de contrastes y atenuaciones en los reflectores, además de tener continuidad lateral a lo largo de las líneas tomadas. El sector Central presentó difracciones fuertes en el grado de meteorización IV descrito en campo, adicionalmente en las radarfacies RF1 y RF2 se presentaron reflectores inclinados en la zona SE de la línea.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Tabla 16

Comparación entre perfiles y sectores.

	Perfil Norte 1	Perfil Norte 2	Perfil Central
Espesor (m)	2,6m	3,05m	3,53m
Grados de meteorización identificados	I,II,III,IV,V,VI	I,II,III,IV,V,VI	I,II,III,IV,V,VI
Porosidad	Aumentó tinción con el incremento del grado de meteorización	Aumentó tinción con el incremento del grado de meteorización	No se identificó aumento de tinción con el incremento del grado de meteorización
Minerales (Difracción de rayos X)	Arcillas: Bentonita, caolinita, palygorskita y nacrita. Minerales por oxidación: Goethita	Arcillas: Bentonita, caolinita. Minerales por oxidación: Goethita y hematita	Arcillas: Bentonita y caolinita
TRE (rango de resistividades y geometría)	Rango (200-1700 Ohm*m) la geometría fue homogénea a profundidad, en la zona superior donde se apreció mayor meteorización no hubo continuidad lateral	Rango (90-2800 Ohm*m) la geometría fue homogénea después de los 2m de profundidad, la zona superior meteorizada no fue homogénea lateralmente	Rango (200-8000 Ohm*m) la geometría no fue homogénea, se apreciaron bloques de alta resistividad y no se identificó el suelo residual
GPR (radarfacies y geometría)	Se reconocieron 6 radarfacies paralelas y continuas	Se reconocieron 4 radarfacies paralelas y continuas	Se reconocieron 4 radarfacies poco continuas con inclinación, interpretadas como superficies de erosión, además de difracciones altas (RF3).
Observaciones	La roca fresca (Grado I) correspondió a intercalaciones de areniscas y arcillas. Perfil con más tipos de arcillas	Grados de meteorización muy marcados e identificables	La roca fresca (Grado I) presentó estratificación cruzada. En el grado IV de meteorización se encontraron bloques de arenisca en una matriz fina.

7 Discusión

Se identificó la degradación de la roca fresca y los diferentes grados de meteorización, en especial aquellos ubicados en el sector Norte (Bloque Tabacal). Estos se encontraron bien definidos en todo el afloramiento, mostrando características de cada uno de los grados presentes como la coloración y la aparición de minerales arcillosos. En el sector Central (Bloque La Mojarra) se presentaron fragmentos rocosos que no fueron concordantes con las características de los grados altos de meteorización del material circundante. Dichos hallazgos en observaciones de campo fueron corroborados con el análisis petrográfico en el cual se apreció el aumento de minerales arcillosos, la aparición de minerales de alteración, producto de oxidación e hidrólisis causados por aguas acidificadas por la materia orgánica y el incremento porosidad intergranular y porosidad por alteración y disolución de feldespatos a medida que el grado de meteorización aumenta. La excepción es la muestra realizada en el sector Central SD4, en la cual se observó un decrecimiento en porosidad y un aumento de compactación en comparación a la muestra SD3 que tiene tres grados menos de meteorización.

En el análisis de DRX de los niveles arcillosos de los perfiles, se reconoció principalmente la presencia de minerales de arcillas del tipo expansivo (bentonita y palygorskita) y no expansivo (caolinita y nacrita) que coinciden con las observaciones petrográficas realizadas, ya que estas son producto de alteración de filosilicatos y de feldespato K. Por otra parte, los minerales de alteración (goethita, hematita), son minerales de oxidación comunes en el suelo, estos se lograron reconocer especialmente en los grados de meteorización superior. La presencia de las familias de arcillas de

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

tipo expansivo permite la capacidad de absorber el recurso hídrico y que actúe como sello de este, pero debido a los espesores reducidos de las capas y al tipo de análisis realizado (cualitativo) no fue posible realizar afirmaciones sobre el carácter de sello. Un resultado a destacar en el análisis de DRX en el perfil Central es la ausencia de minerales de alteración producto de la meteorización, mientras que en los perfiles del norte se presentaron hematita y goethita.

Con la adquisición geofísica de tomografías de resistividad eléctrica se relacionaron los rangos de resistividad encontrados con los grados de meteorización (Tabla 4). Sin embargo, debido a que los perfiles de meteorización tenían un espesor inferior a 4m, no se logró la identificación de cada grado de meteorización con la resolución vertical disponible. En las tomografías realizadas en el sector Norte las capas poco someras no fueron homogéneas en la resolución de los métodos usados, ni lateralmente continuas, pero a cierta profundidad esto cambia (Figura 11 y 12), ya que se encontraron en concordancia con las observaciones de campo esto es, a medida que disminuyen los valores de resistividad aumenta el contenido de arcillas y fracturas en el perfil. Mientras que el sector Central se definió como un perfil heterogéneo, con datos anómalos de resistividad respecto a la litología descrita macroscópicamente, debido esto, fue necesario elaborar una tabla de rangos de resistividad distinta para este sector. (Figura 13, Tabla 5).

El uso del GPR brindó una mejor resolución pero menor profundidad, alcanzando mayor coincidencia de los grados de meteorización definidos en observaciones directas en campo, los reflectores de alta amplitud y las hipérbolas de difracción (Apéndice V) marcadas fueron interpretadas como niveles o grados en los que se hallaban fragmentos o bloques rocosos fracturados, esto se evidenció de forma clara en el Perfil Central, ya que fue el perfil menos homogéneo de los analizados, pues se identifican grupos de reflectores inclinados que pueden

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

corresponder a superficies de erosión. Mientras que los radargramas de los perfiles del sector Norte se mostraron lateralmente continuos y sin considerables cambios.

Los resultados de porosidad en sección delgada del Miembro Superior de la Formación Los Santos hechos en Pinto et al, (2009), concluyen el sector Norte presenta porosidad principalmente del tipo intergranular y porosidad secundaria de disolución y microfracturamiento, de igual forma, los análisis de DRX hechos por Pinto et al, (2007) enfocados en el Miembro Medio el cual catalogan como el más arcilloso de la Formación Los Santos, mostraron familias de arcillas que también están presentes en los análisis realizados en el presente estudio para el Miembro Superior.

La tabla de resistividades elaborada por Hincapié et al, (2009) para la Formación Los Santos comprende valores y rangos de referencia que son adecuados para la interpretación de las TRE del presente trabajo, pues es consistente con las litologías y rasgos observados en los perfiles de estudio. Annan (2005), expone que la geometría, continuidad y los cambios en función de contraste de los reflectores obtenidos con el GPR son útiles para la definición de estratigrafía deposicional fina. Dichas características se tomaron en cuenta para el procesamiento e interpretación de los radargramas adquiridos y su posterior relación con los grados de meteorización. Se resalta que solo con los métodos geofísicos no se pudieron definir grados de meteorización de manera específica, pero estos sí brindaron una respuesta a diferentes variables, como el contenido de agua, de arcillas, materia orgánica, salinidad, pH, etc... Que se ajustaron a las características que tiene cada grado.

Según los resultados obtenidos en la caracterización del perfil de meteorización, la interpretación geofísica y en la posterior correlación del perfil del sector Central, se plantea la

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

hipótesis de que este perfil tenga procesos genéticos diferentes a los perfiles del sector Norte, en los que podrían estar implicados la colmatación de sedimentos arcillosos en cuerpos de agua, seguido de un evento de coluvión, lo cual explicaría la presencia de bloques en una matriz no consolidada.

8 Conclusiones

A través del levantamiento de los perfiles de meteorización del Miembro Superior de la Formación Los Santos en el sector Norte y sector Central de la Mesa de Los Santos fue posible distinguir los seis grados de meteorización (I Roca fresca-VI Suelo residual). Mostrando para los perfiles del sector Norte la relación entre el aumento de porosidad, oxidación y presencia de minerales arcillosos con el desarrollo de los grados de meteorización. Mientras en el perfil del sector Central no fue clara esta relación.

Por medio de la interpretación de las tomografías de resistividad eléctrica se definieron rangos de resistividades y litologías diferentes para cada sector, notándose para el sector Norte la homogeneidad de las capas profundas y la geometría discontinua para la parte superficial. Para el sector Central se evidenciaron rangos de resistividades muy altos y heterogeneidad en toda la sección eléctrica procesada.

El radar de penetración terrestre (GPR) por medio de difracciones y contrastes de los reflectores en las tres secciones permite la identificación de litofacies con estratificación paralela

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

en el sector Norte y litofacies con estratificación discontinua, como es la ocurrencia de bloques de arenisca en una matriz arcillosa en el perfil Central.

Al superponer los resultados del GPR con las TRE los contornos de resistividad tienden a diferenciarse de las radarfacies interpretadas, esto es debido a la resolución, la cantidad de datos, la forma de inversión de estos y la susceptibilidad de cada método a ciertas características como el contenido de agua o la presencia de arcillas.

Las unidades geoelectricas definidas de acuerdo con los rangos de resistividad y litologías propuestas en la interpretación junto con los perfiles de meteorización realizados en campo en el sector Norte, mostraron que el suelo residual y capas con contenido de arcillas (IV, V, VI) presentan bajos valores de resistividad (0-460 Ohm*m), y para rocas compactas y poco afectadas por la meteorización (grado I, II, III) resistividades altas (>460 Ohm*m). En el caso del perfil central se determinaron unidades diferentes por los valores anómalos de resistividad registrados en la adquisición geofísica, por lo cual, las capas del suelo residual y rocas completamente meteorizadas (V y VI) mostraron resistividades de 2000-4000 Ohm*m y los grados más profundos (I, II, III) resistividades mayores a los 4000 Ohm*m.

Los perfiles de meteorización levantados se relacionaron directamente con las radarfacies interpretadas, mostrando que los reflectores de los grados más arcillosos se mostraban con contrastes bajos y tenues, mientras que en grados de meteorización en donde las rocas se veían compactadas, poco meteorizadas, y con contenido de arcillas mínimo, los reflectores se encontraban mejor definidos.

Tanto las observaciones de campo y el análisis petrográfico como la adquisición geofísica mostraron diferencias entre los sectores estudiados, indicando para el sector Norte continuidad y

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

uniformidad lateral, así como decrecimiento de tamaño de grano y compactación del material hacia el suelo residual y porosidad congruente con los grados de meteorización, lo cual indica un mayor potencial de infiltración. Mientras que el perfil de meteorización del sector Central difiere de tales características. Esto se podría explicar por las condiciones climáticas distintas, específicamente la pluviometría, ya que afecta la definición de los grados y el espesor de los perfiles, sin embargo, no se justifica la totalidad de los resultados obtenidos, lo que posibilita la hipótesis de que la génesis de la zona de adquisición del perfil Central sea diferente a la de los perfiles adquiridos en el sector Norte de la Mesa de Los Santos.

9 Recomendaciones

Realizar la caracterización de perfiles de meteorización del Miembro Superior de la Formación Los Santos en los demás sectores de la Mesa de Los Santos, para cubrir el estudio de este factor (meteorización) en el modelo hidrogeológico y que sea comparado con los resultados del presente estudio.

Para hacer una estimación de rangos y caracterización óptima de porosidad se deben realizar ensayos y pruebas de laboratorio, tales como el porosímetro de helio o el análisis petrográfico de imágenes digitalizadas convertidas a una imagen binaria donde cada pixel ha sido referido a la categoría “poro” (en negro) o “no poro” (en blanco). De esta forma es posible calcular el tamaño y la geometría correctamente. Asimismo, resulta pertinente establecer de manera experimental la permeabilidad y su relación con la tasa de infiltración de los perfiles de meteorización.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Ampliar el conocimiento de los porcentajes de los minerales presentes en los perfiles de meteorización por medio del análisis de difracción de rayos X de tipo cuantitativo, haciendo énfasis en la clasificación de las arcillas, minerales de alteración y cómo sus respectivas características condicionan el comportamiento de los perfiles de meteorización.

La adquisición de datos por medio de prospección geofísica se puede realizar en el caso del GPR usando una antena con diferente frecuencia para alcanzar mayor profundidad, o bien, usando la metodología punto a punto, de esta manera se disminuye el ruido proveniente del movimiento del equipo. Para las tomografías de resistividad eléctrica diferentes arreglos geométricos pueden arrojar profundidades, resoluciones y sensibilidades diferentes que se podrían contrastar con las mediciones y procesamientos ya efectuados. Por otra parte, las tomografías en tres dimensiones son una herramienta útil para la comprensión del comportamiento del material meteorizado, la homogeneidad y rasgos estructurales que puedan ser relevantes para su estudio.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE 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, Bucaramanga, Colombia.
- Annan, P. (2005). *GPR Methods for Hydrogeological Studies*. In Y. Rubin & S. S. Hubbard (Eds.), *Hydrogeophysics* (pp. 145-171). Springer.
- Bari, C., Lapenna, V., Perrone, A., Puglisi, C., & Sdao, F. (2011). Digital photogrammetric analysis and electrical resistivity tomography for investigating the Picerno landslide (Basilicata region, southern Italy). *Geomorphology*, 133(1–2), 34–46. <https://doi.org/10.1016/J.GEOMORPH.2011.06.013>
- Borrelli, L., Perri, F., Critelli, S. and Gulla, G., Characterization of granitoid and gneissic weathering profiles of the Mucone River basin (Calabria, southern Italy). *Catena*, 113, pp. 325-340, 2013.
- Brown, E., *Rock characterization testing & monitoring: ISRM suggested methods*. Oxford: pergamon for the commission on testing methods, International society for Rock Mechanics, 1981, 211 P.
- Cassidy, N y Jol, H. (2009). *Ground penetrating radar: theory and applications*. En N. J. Cassidy & H. M. Jol, *Ground penetrating radar data processing, modelling and analysis*. Amsterdam: Elsevier. Recuperado de: [Ground Penetrating Radar Theory and Applications - 1st Edition \(elsevier.com\)](https://www.elsevier.com/ground-penetrating-radar-theory-and-applications)

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Cediel, F. (1968). El grupo Girón, una molasa mesozoica de la cordillera Oriental. Servicio Geológico Nacional. Boletín Geológico. Bogotá.

Colegial-Gutierrez, J.D., Forero-Quintero, M. C., Fuentes-Rueda, M. A. & Gómez-Isidro, S., Tipificación de perfiles de meteorización de rocas cristalinas al oriente de Bucaramanga y definición de propiedades hidrogeológicas. Boletín de Ciencias de la Tierra, (41), 16-30, 2017.

Dewandel, B., Lachassagne, P., Maréchal, J.C., Wyns, R. and Krishnamurthy, N., SA generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifer controlled by single or multiphase weathering. Journal of hydrology, 330, pp. 260-284, 2006.

Díaz, E., Contreras, N., Pinto, J., Velandia, F., Morales, C., Hincapie, G. (2009). *Evaluación hidrogeológica preliminar de las unidades geológicas de la Mesa de Los Santos, Santander*. Boletín de Geología, 31, 61–71.

EPM. (2009). Medida de resistividad eléctrica en el suelo. Medellín, Colombia.

Folk, R. L. (1974). *The petrology of sedimentary rocks*. Austin Geological Society Bulletin, 1-45.

Forero Dueñas, C., Gálvez, P., Fino y Ulloa. (1999). *Estudios de la estructura de las cenizas volcánicas de Armenia y su relación con el comportamiento geotécnico*. X Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería Colombiana. Bogotá: Sociedad Colombiana de Geotecnia.

Google Earth. (2023). [Mesa de Los Santos]]. Recuperado el 17 de abril del 2023 de <https://earth.google.com/web/search/Mesa+de+los+Santos,+Piedecuesta,+Santander/@6>.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

85511299,73.07112415,1695.3943589a,41911.01234077d,35y,351.52850638h,0t,0r/data
=CigiJgokCYVVCpW-hDRAEYVVCpW-hDTAGeAbNSLuSz9AicLG1Ud5uFHA

Hincapié, G. y Veloza, J. (2009). *Recurso del subsuelo: Informe hidrogeológico de la Mesa de los Santos*. Bogotá, Colombia.

Knödel, K., Lange, G., & Voigt, H. (2007). *Environmental Geology*. Springer Berlin (pp.205) , Heidelberg.

Munsell Color Company. (1994). *Munsell Book of Color - Matte Finish Collection*. Munsell

Olarte, B. (2021). Descripción y muestreo de suelos. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

Recuperado de:

<http://igacnet2.igac.gov.co/intranet/UserFiles/File/DOCUMENTOS%20SGI%202021/GAG/PC-GAG-05/IN-GAG-PC05-05%20Descripcion%20y%20muestreo%20de%20suelos.pdf>

Ollier, C. (1984). *Weathering*. London: Longman.

Ordoñez, C. A. (2005). *El perfil de meteorización en la ingeniería geotécnica (algunos casos tipo)*. *Politécnica*, 1, 47–54.

Pinto et al. (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. Memoria explicativa de la investigación geológica e hidrogeológica en la Mesa de Los Santos, sector Noreste de Curití*. Bucaramanga.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Pinto, J. (2009). Evaluación hidrogeológica preliminar de las unidades geológicas de la Mesa de los Santos, Santander. *Boletín de Geología*, (31), 61-70.

Rodríguez, E., et al. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenazas por movimientos en masa escala 1:25000*. Servicio Geológico Colombiano. Bogotá. (Anexo 3.2.2)

Reynolds, J. M. (1997). *An introduction to applied and environmental geophysics*. England: Wiley.

Terry, Neil, Day-Lewis, F.D., Robinson, J.L., Slater, L.D., Halford, Keith, Binley, Andrew, Lane, J.W., y Werkema, Dale. (2017). Scenario Evaluator for Electrical Resistivity Survey Pre-modeling Tool. *Groundwater*, <http://dx.doi.org/10.1111/gwat.12522>.

Turner, G., & Siggins, A. F. (1994). Constant Q-attenuation of subsurface radar pulses. *Geophysics*, 59, 1192-1200. <https://doi.org/10.1190/1.1443677>.

Van Der Lelij, R.; Spikings, R.; Ulianov, A.; Chiaradia, M.; Mora, A. (2016). *Palaeozoic to Early Jurassic history of the northwestern corner of Gondwana, and implications for the evolution of the Iapetus, Rheic and Pacific Oceans*. *Gondwana Research* 31: 271- 294.

Vargas, C. (2008). *Cartografía geológica a escala 1:25.000 de la Mesa de los Santos, Departamento de Santander*. [Tesis de Pregrado]. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. Recuperado de: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2008/126243.pdf>

Vargas, M. (2021). *Comparación de la anisotropía de la resistividad del subsuelo fracturado en zonas aledañas a diferentes tipos de estructuras, e implicaciones hidrogeológicas para un*

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

área rural del Municipio de los Santos, Santander, [Tesis de Maestría]. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Apéndices

Apéndice A

Recopilación de modelos conceptuales según los siguientes autores: Brown (1981), Dewandel et al (2006) y Borrelli et al (2013), reuniendo las características físicas relevantes para los diferentes grados de meteorización.

BROWN (1981)	DEWAN DEL ET AL (2006)	BORELLI ET AL (2013)	DESCRIPCIÓN AFLORAMIENTO
VI Suelo Residual	Laterita o Corteza De Hierro	VI Suelo Residual y Coluvión	Todo el macizo rocoso se ha transformado en suelo. Se ha destruido la estructura del macizo y la fábrica del material. El macizo rocoso se compone principalmente de suelo residual, coluvial y; b. El material tiene principalmente las siguientes características: completamente decolorados; piezas de gran tamaño pueden ser fácilmente disgregadas con las manos y se desmorona por la presión de los dedos en los granos constituyentes.
V Completamente Meteorizado		V Completamente Meteorizada	Todo el macizo rocoso aparece descompuesto, completamente descolorido. No conserva la estructura original de la roca o se encuentra en forma de relicto. La masa de roca está completamente meteorizada (saprolito) (más de 70% del afloramiento).
IV Altamente Meteorizado	Saprolito o Alterita, Regolito	IV Altamente Meteorizado	Más de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo, completamente descolorido. La masa de roca está altamente meteorizada (más de 70% del afloramiento); volúmenes de macizos rocosos limitados por discontinuidades pueden estar constituidos por roca moderadamente o altamente meteorizada. Los volúmenes constituidos por suelos residuales, se presentan rara vez en el afloramiento, las fracciones arena y limos son predominante.
III Moderadamente Meteorizado	Capa Laminada	III Moderadamente Meteorizada	Menos de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados. La masa de roca esta moderadamente meteorizada (más de 70% del afloramiento). Es la base de la Isalterite, presenta laminación horizontal de los minerales más grandes (por ejemplo, pórfidos de feldespatos), pero sigue conservando en gran medida la estructura original de la roca. Los colores penetrantemente son más tenues en

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

				comparación con la roca fresca, pero localmente el color de la roca fresca está presente.
II Ligeramente Meteorizado	Capa Fisurada		II Ligeramente Meteorizada	La masa de roca está ligeramente meteorizada (más de 70% del afloramiento). Presenta el mismo color de la roca fresca con decoloración sólo cerca de las discontinuidades; textura y microestructura de la roca fresca originales se conservan perfectamente. Se caracteriza por presentar fisuras densas horizontales en los primeros metros y a una mayor profundidad fisuras sub-horizontales y sub-verticales.
I Roca Fresca	Basamento Fresco		I Roca Fresca	Roca sin cambio desde el estado original o solo ligeramente manchado a lo largo de las discontinuidades. La masa de roca es fresca (más de 70% del afloramiento); Puede ser considerado como impermeable y de muy bajo coeficiente de almacenamiento, en una escala local.

Nota. Tomado y adaptado de Colegial et.al, (2017).

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Apéndice C

Geología de la zona de estudio.

Unidad Geológica	Miembro	Descripción Litológica	Localización
Formación Los Santos (K1ls) (Cediel, 1968; Vargas, 2008)	Miembro Superior (K1l_ms)	Corresponden a capas de arenisca de grano fino, medio y muy fino, alternando con arcillolita ilíticas y limolita de cuarzo (Aldana.2008)	Parte superficial de la zona de estudio.
	Miembro Medio (K1ls_mm)	Presenta limolitas y arcillolitas de color marrón rojizo con manchas verdosas grisáceas producto de la reducción de materia orgánica, intercaladas con arenisca de grano muy fino a medio. En este miembro se observa laminación plano paralela y cruzada (Vargas, C.2008)	En los alrededores de la Mesa de Los Santos infrayaciendo el Miembro Superior.
	Miembro Inferior (K1ls_mi)	Capas medias a gruesas de conglomerados arenosos y areniscas conglomeráticas de color rojo grisáceo, con estratificación grano decreciente, laminación cruzada y lechos conglomeráticos, de composición sublitconglomerática y sublitarenita. (Vargas, C.2008)	En los alrededores de la Mesa de Los Santos infrayaciendo el Miembro Medio de la Formación Los Santos.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Apéndice D

Fallas principales de la Zona de estudio.

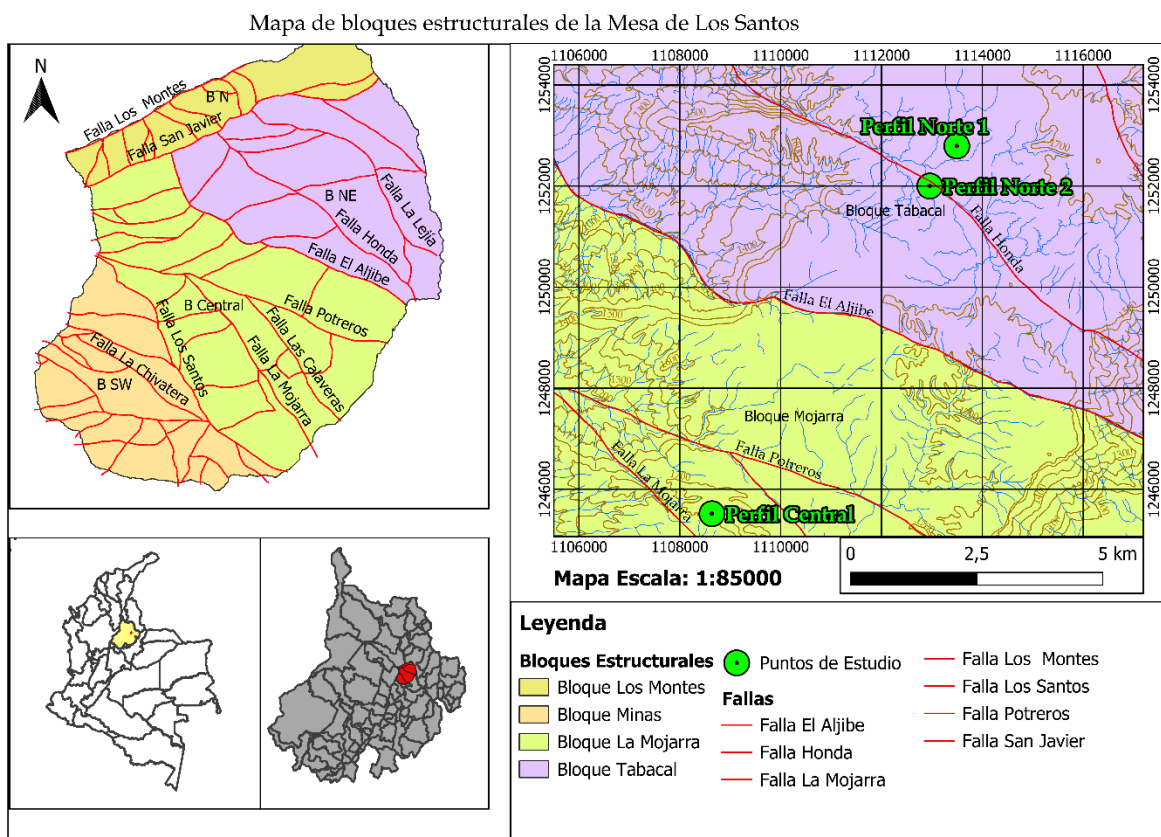
	Descripción	Nombre de falla
Fallas Principales	Fallas normales con expresiones rectas, sinuosas y curvas, con dirección preferencial NO, paralelas y subparalelas en su gran mayoría. Estas fallas afectan la secuencia sedimentaria Jurásica y Cretácica, así mismo rocas del basamento.	Falla Los Santos Falla Potreros Falla El Ajibe
Fallas Secundarias	Fallas inversas las cuales presentan dirección preferencial NE. Muestran expresión sinuosa y curva. Estas se encuentran subordinadas en relación de corte, por lo que se encuentran en su mayoría contenidas dentro de las fallas principales	Falla San Javier Falla Los Montes
Fallas Menores	Estas fallas pueden ser producto de tectónica localizada por acción de relajación y/o acomodación del material después de eventos tectónicos.	Falla La Pilonera, Falla Zanjón La Vega Falla Zanjón de Pardo.

Nota. Vargas, C.2008

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Apéndice E

Mapa bloques estructurales de La Mesa de Los Santos.



Nota. Adaptado de Pinto et. Al. 2007. En Vargas, C. 2008

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Apéndice F

Bloques estructurales en La Mesa de Los Santos

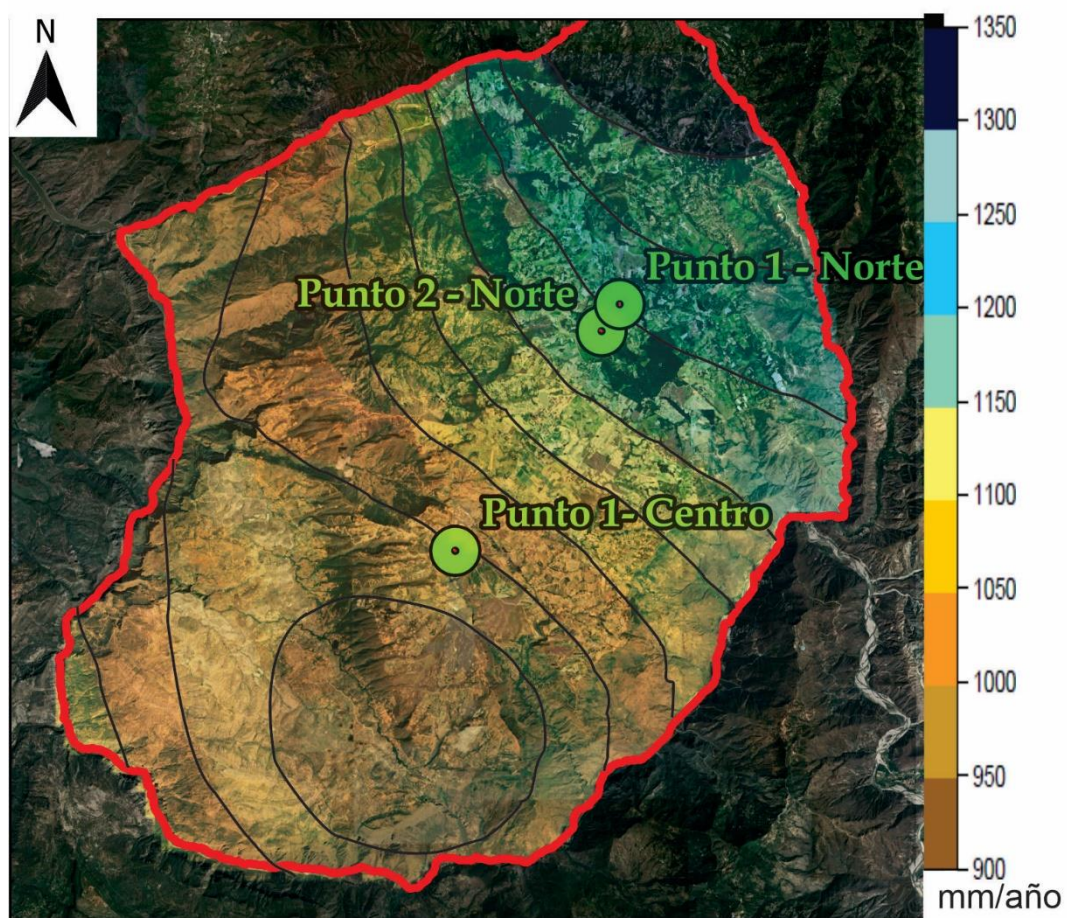
Bloques Estructurales	Descripción
Bloque Montes	El bloque presenta dirección N80-90O en el diaclasamiento. Se caracteriza por estar enmarcado entre dos fallas inversas y presentar en el interior fallas normales subordinadas en corte con respecto a las fallas inversas
Bloque Tabacal	Muestra una dirección preferencial N70-80O el cual corresponde a fracturas sintéticas de las fallas normales o antitéticas de las fallas inversas del bloque.
Bloque Mojarra	Muestra una dirección preferencial N70-80° el cual corresponde a fracturas sintéticas de las fallas normales o antitéticas de las fallas inversas del bloque, estas fracturas muestran ángulos de buzamiento muy marcado en 80-90°.
Bloque Minas	Muestra una dirección de diaclasas N10-20 E el cual corresponde a fracturas antitéticas de las fallas normales, estas fracturas muestran ángulos de buzamientos de 80-90°.

Nota. Tomado de Vargas, C.2008.

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Apéndice G

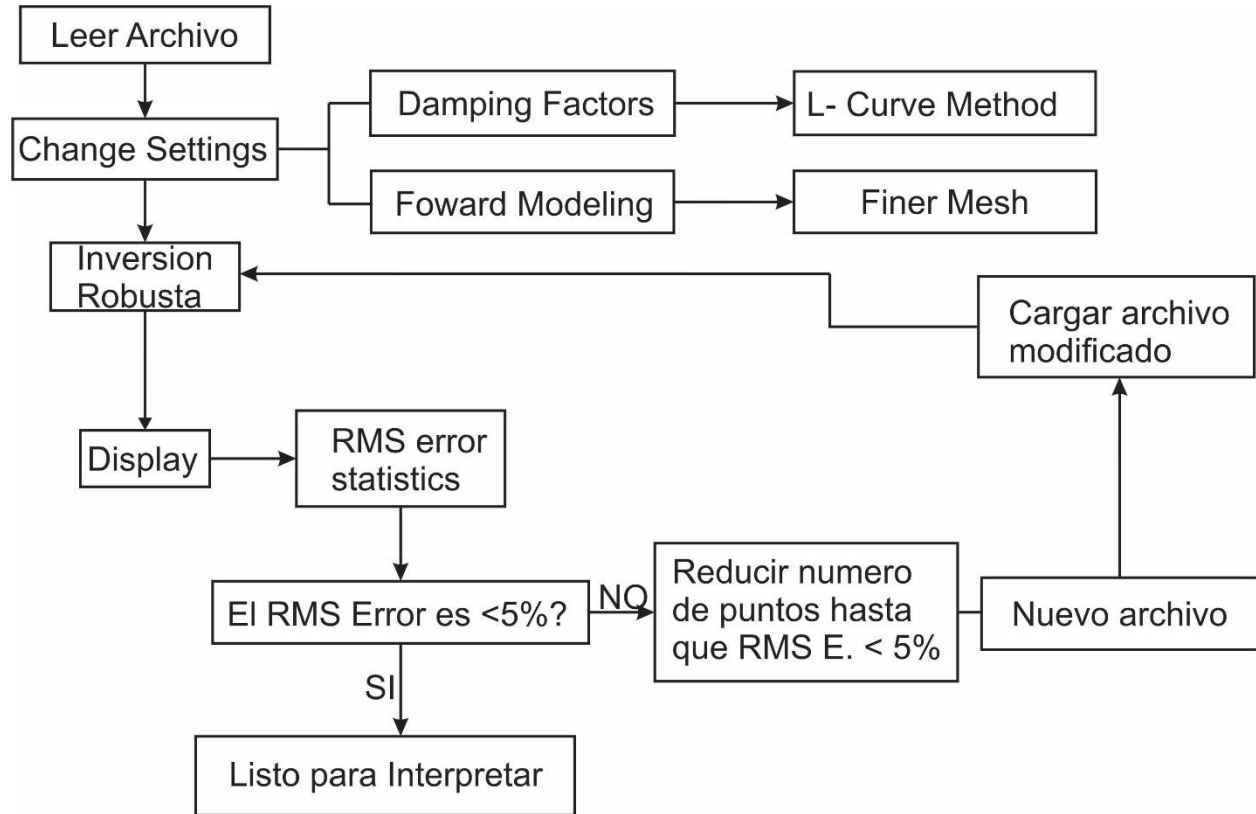
Mapa de precipitación de la Mesa de Los Santos.



Nota: Tomado y adaptado de Hincapié y Veloza (2009)

Apéndice I

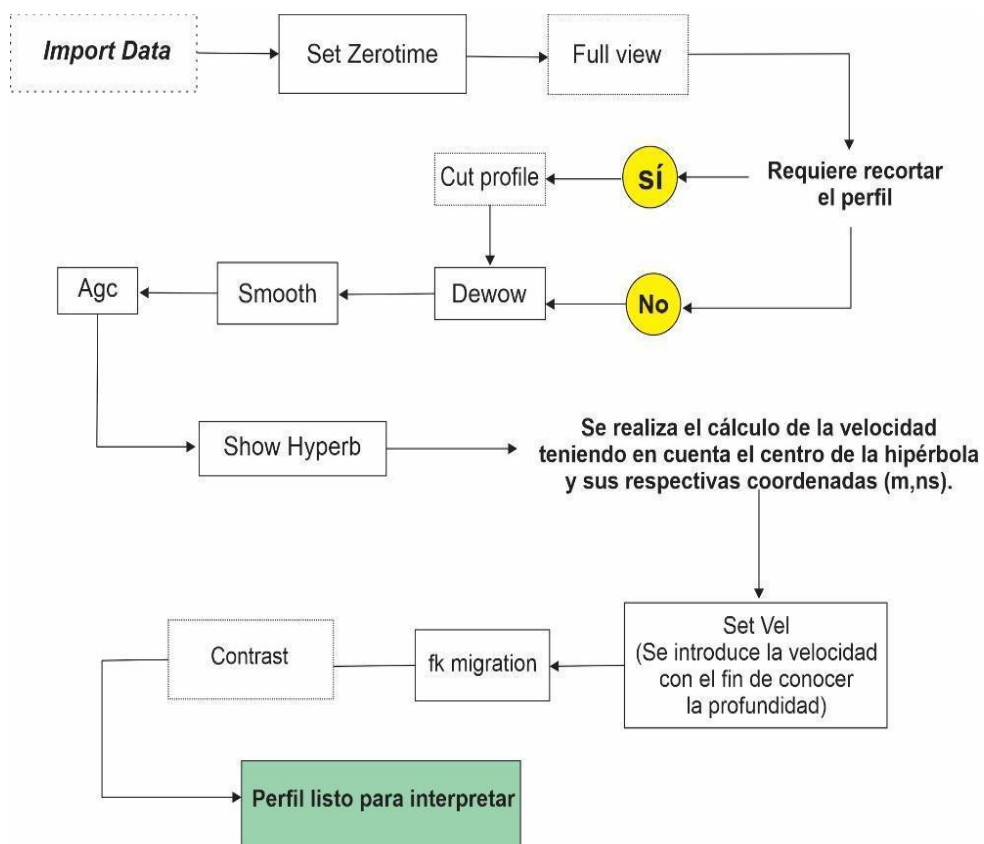
Flujograma para el procesamiento de Tomografías



METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Apéndice J

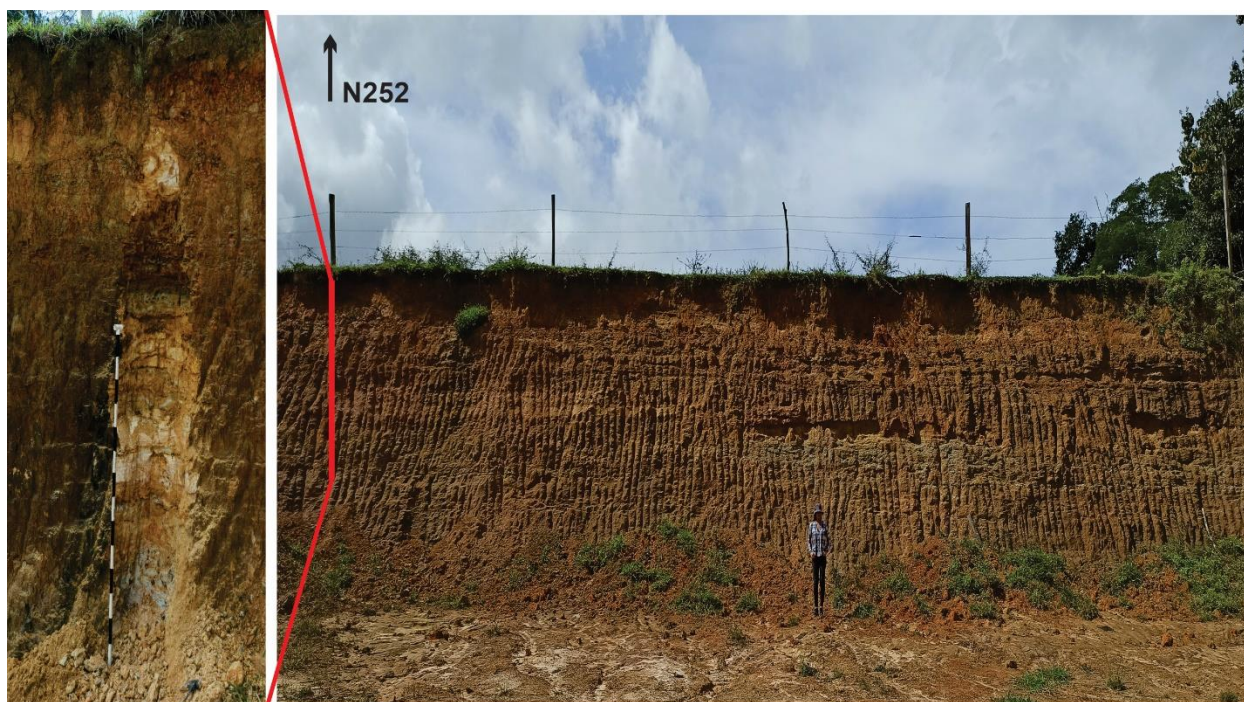
Flujograma usado para el procesamiento en GPRpy



METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS







Apéndice K

Fotografía del afloramiento general del Perfil Norte 1.



Apéndice L

Columna de colores según Munsell, 1994. Para el Perfil Norte 1

Intervalo de Meteorización	Color según Munsell	Representación
VI	10R 3/6 Dark Red	
V	2.5 YR 6/8 Ligth Red	
IV	7.5 YR 7/8 Redish Yellow	
III	2.5 YR 6/6 Olive Yellow	
II	7.5 YR 6/8 Reddish Yellow	
I	10 YR 7/8 Yellow	

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS






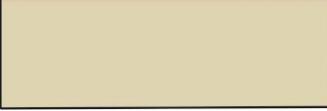
Apéndice M

Fotografía del afloramiento general del Perfil Norte 2.



Apéndice N

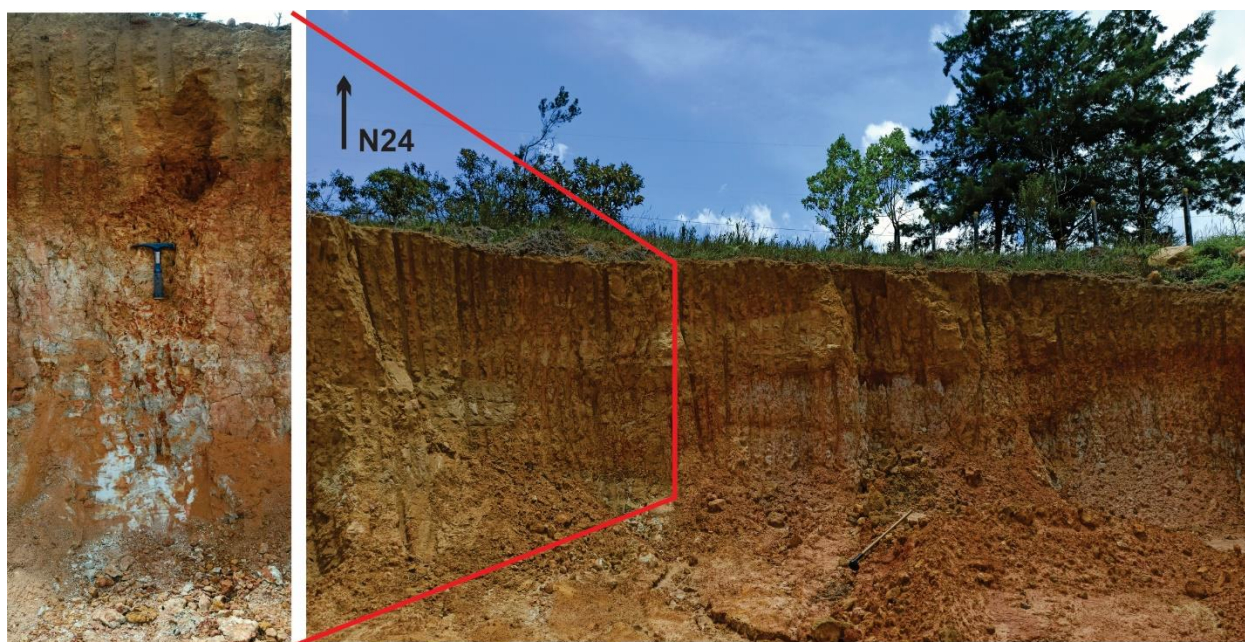
Columna de colores según Munsell, 1994. Para el Perfil Norte 2

Intervalo de meteorización	Color según Munsell	Representación
VI	10R 5/8 Red	
V	5YR 7/6 Reddish yellow	
IV	7.5YR 7/8 Yellow	
III	10YR 8/6 Yellow	
II	7.5YR 8/2 Very pale brown	
I	10YR 8/2 Pale Yellow	

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS







Apéndice O

Fotografía del afloramiento general del Perfil Central.



Apéndice P

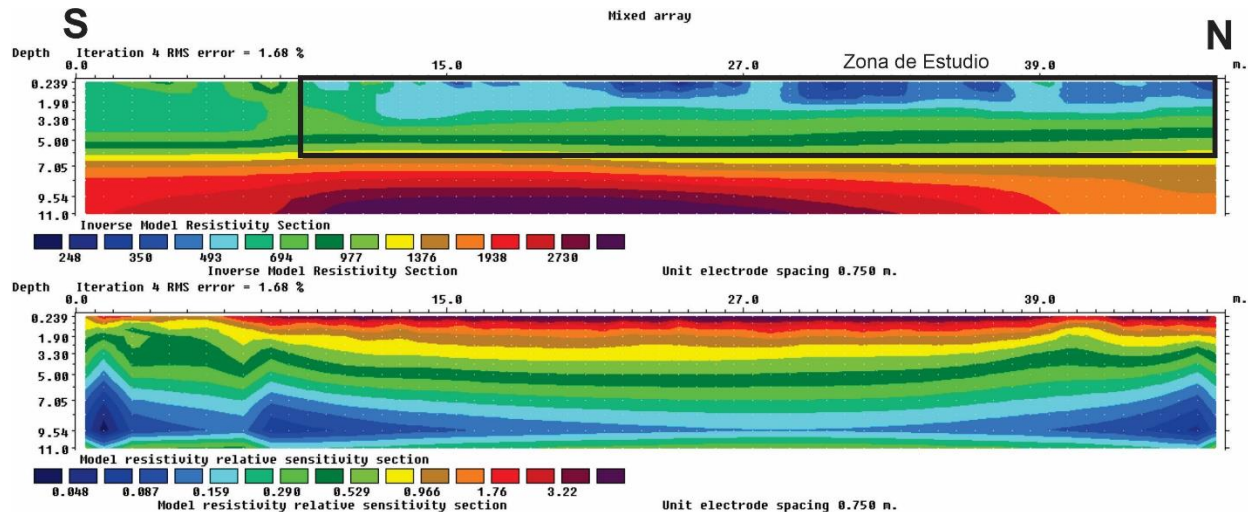
Columna de Colores según Munsell, 1994. Para el Perfil Central

Intervalo de meteorización	Color según Munsell	Representación
VI	10YR 8/8 Yellow	
V	5YR 7/8 Reddish yellow	
IV	5YR 6/8 Reddish yellow	
III	10YR 8/6 Yellow	
II	10YR 8/4 Pole Yellow	
I	10YR Pole Yellow	

METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

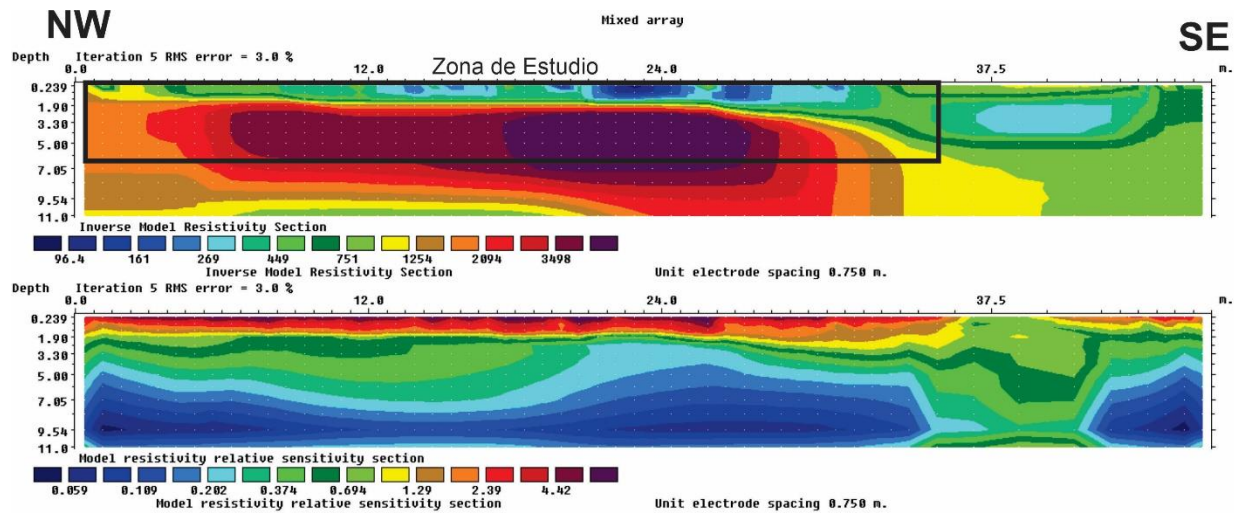
Apéndice Q

Sección de tomografía y sensibilidad del Perfil Norte 1



Apéndice R

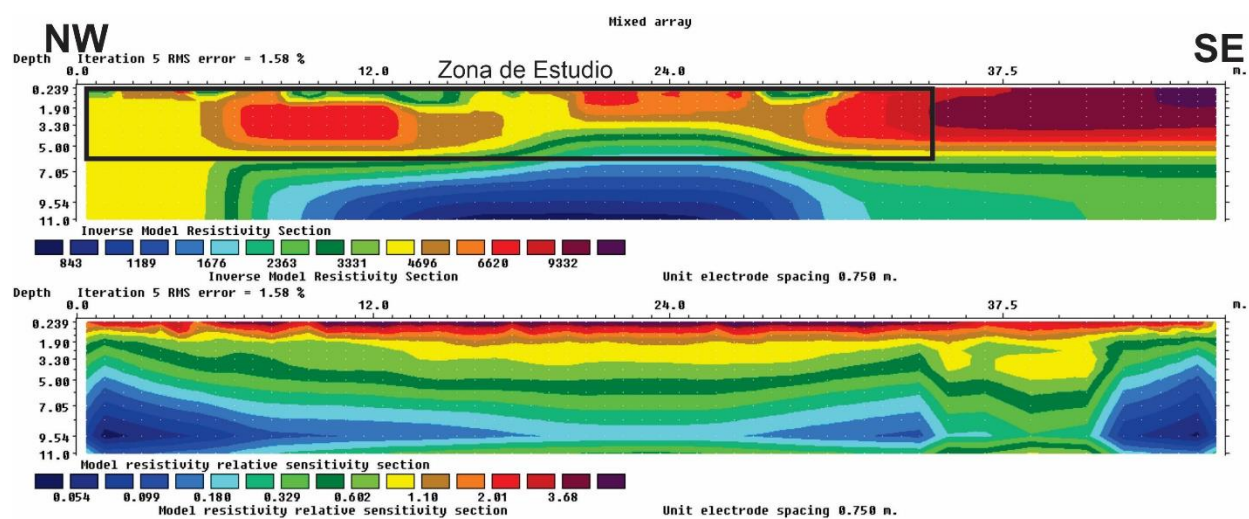
Sección de tomografía y sensibilidad del Perfil Norte 2



METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

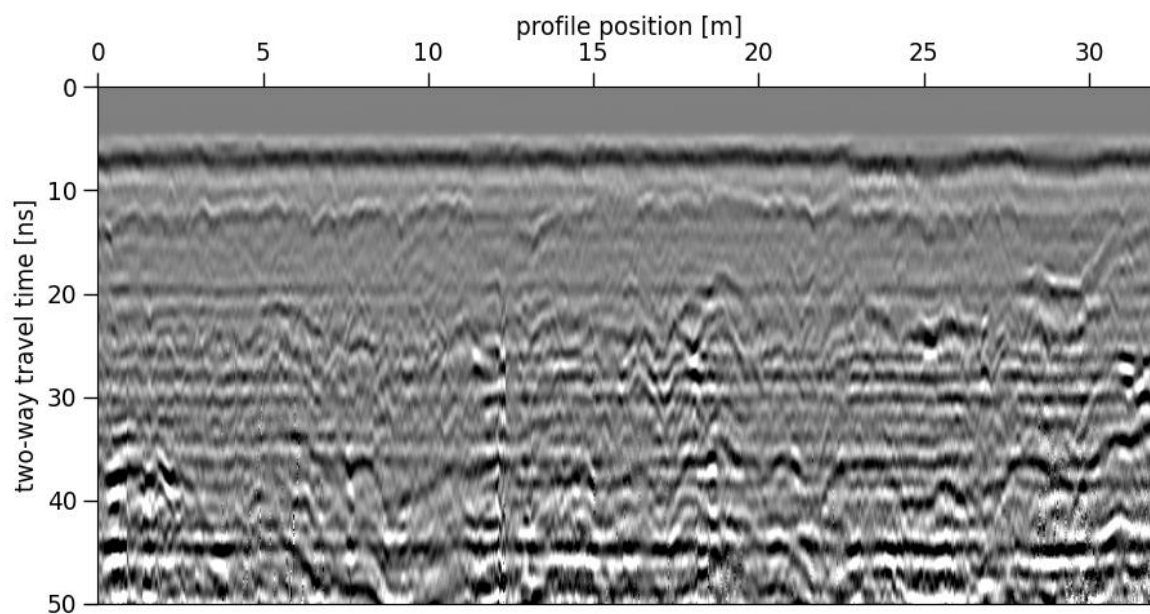
Apéndice S

Sección de tomografía y sensibilidad del Perfil Central

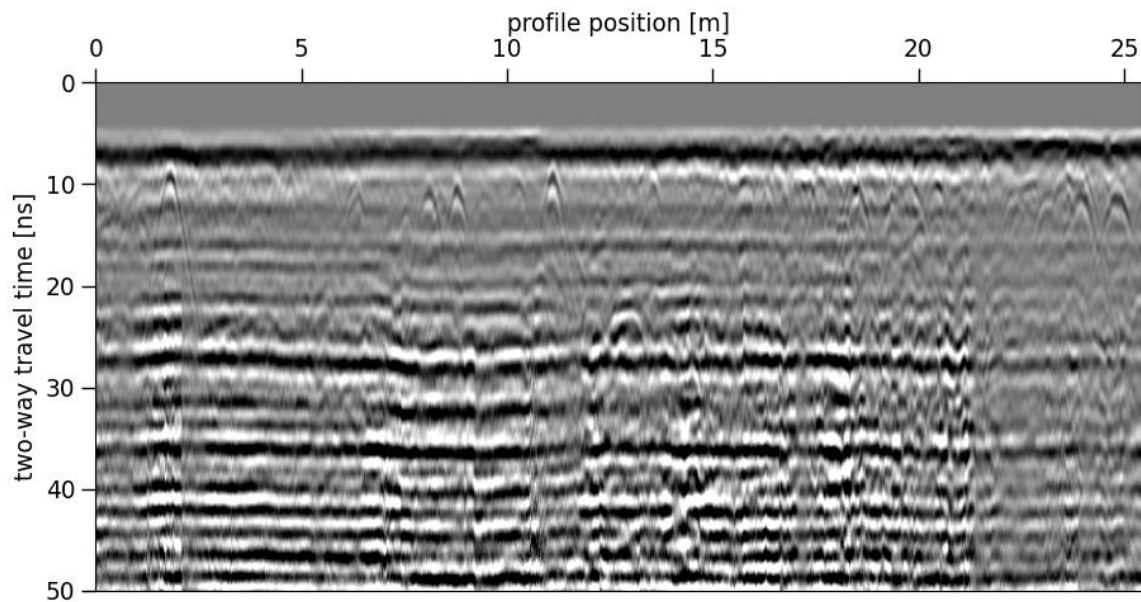


Apéndice T

Radargrama sin procesar del Perfil Norte 1



METEORIZACIÓN EN LA MESA DE LOS SANTOS

Apéndice U*Radargrama sin procesar del Perfil Norte 2***Apéndice V***Radargrama sin procesar del Perfil Central*