

***ESTIMACIÓN LOCAL DE FÍSICA DE ROCA MEDIANTE MEDICIONES EN
LABORATORIO DE LAS ROCAS AFLORANTES AL OESTE DEL MUNICIPIO DE EL
PLAYÓN***

Nicolas Rojas Rodríguez

Trabajo de investigación para optar al título de M.Sc. en Geofísica

Directora

Rocio del Pilar Bernal Olaya

Geóloga Ph.D

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Con aprecio y amor para aquellos que ya no están

Agradecimiento

Brindo un fraternal agradecimiento a la Escuela de física y a la escuela de geología, al grupo de investigación de geofísica y geología.

Un especial agradecimiento a la directora de este proyecto, Rocio del Pilar Bernal Olaya, por su acompañamiento, consejos y seguimiento al desarrollo de este trabajo de investigación y por sus enormes contribuciones científicas y personales.

Finalmente, al núcleo familiar y profesional que me estuvieron guiando para culminar con este proyecto.

1. Tabla de contenido

| | PÁG. |
|---|-------------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 12 |
| 2. OBJETIVOS | 14 |
| 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 15 |
| 3.1. Hipótesis | 16 |
| 4. METODOLOGÍA | 17 |
| 4.1. Etapa de consulta | 17 |
| 4.2. Pre-campo | 18 |
| 4.3. Campo | 19 |
| 4.4. Post-campo | 19 |
| 4.5. Resultado | 21 |
| 5. MARCO TEÓRICO | 24 |
| 5.1. Localización | 24 |
| 5.2. Marco geológico | 26 |
| 5.2.1. Regional | 26 |
| 5.2.2. Local | 28 |
| 5.3. Marco estructural | 36 |
| 5.4. Marco geofísico | 42 |
| 5.4.1. Resistividad | 42 |
| 5.4.1.1. Factores que afectan la resistividad | 43 |
| 5.4.1.1.1. Naturaleza del suelo | 43 |
| 5.4.1.1.2. Contenido de agua | 44 |
| 5.4.1.1.3. Compactación | 45 |
| 5.4.2. Cargabilidad | 45 |
| 5.4.3. Porosidad | 46 |
| 5.4.4. Velocidad de onda P | 48 |
| 5.4.5. Densidad | 49 |
| 6. RESULTADOS | 50 |
| 7. DISCUSIÓN | 92 |

| | |
|--------------------|----|
| 8. CONCLUSIONES | 95 |
| 9. RECOMENDACIONES | 97 |

Lista de tablas

| | PÁG. |
|---|-------------|
| <i>Tabla 1.</i> Dimensiones medidas de la muestra | 23 |
| <i>Tabla 2.</i> Nomenclatura de las diferentes litologías clasificadas | 34 |
| <i>Tabla 3.</i> Tabla de datos de planos de falla | 39 |
| Tabla 4. Mediana y promedio ponderado de los valores de resistividad adquiridos en laboratorio en muestra húmeda y seca | 75 |
| Tabla 5. Mediana de los valores de V_p adquiridos en laboratorio | 76 |
| Tabla 6. Mediana de los valores densidad adquiridos en laboratorio | 76 |

*Lista de figuras***PÁG.**

| | |
|--|----|
| Figura 1. Metodología del trabajo de investigación (etapa 1, 2, 3) | 21 |
| Figura 2. Metodología del trabajo de investigación (etapa 4, 5). | 22 |
| Figura 3. Modelo digital de elevación. Recuadro A. Mapa de Colombia, B. Mapa de Santander, C. El Playón. | 25 |
| Figura 4. Mapa geológico del Macizo de Santander. Modificado de Velandia et al., (2020). | 27 |
| Figura 5. Modelo geológico de la zona de estudio con sus respectivos cortes A-A', B-B', C-C' (A) Mapa de Colombia. (B) Mapa de Santander. (C) zona de estudio. Modificado de Latorre y Rojas, (2018). | 28 |
| Figura 6. Afloramiento de la zona de estudio. | 31 |
| Figura 7. Litologías sedimentarias de la zona. | 34 |
| Figura 8. Litologías volcánicas, volcanoclasticas y volcanosedimentarias de la zona. | 35 |
| Figura 9. Modelo estructural modificado de Velandia et al., (2020). A) Modelo estructural de los tensores de falla. B) Modelo cizalla. C), Geología estructural regional de la zona estudio. D) Geología estructural local de la zona de estudio. | 37 |
| Figura 10. Mapa estructural local construido con base a modelos digitales de elevación, mapas de sombras y datos estructurales recolectados de la zona de estudio. | 38 |
| Figura 11. Diagrama de rosetas de régimen de esfuerzos principales de la zona de estudio. | 40 |
| Figura 12. Diagrama de rosetas del segundo régimen de esfuerzos de la zona de estudio. | 41 |
| Figura 13. Diagrama de resistividad Vs contenido de agua. Tomado de Ozcep et al., (2009). | 44 |
| Figura 14. Diagrama de compactación Vs resistividad. Tomado de Páez y Goyeneche (2018). | 45 |
| Figura 15. Diagrama de correlación de las propiedades físicas en roca fresca (resistividad, cargabilidad, porosidad, Vp, densidad) de los valores teórico y experimentales. (* modificado de Lowrie, (2007). Telford (2004). Arias et al., (2012). Van Blaricom (1992). Andrade y Lopez (2013). Sanders (1998) Custodio y Lamas (1983). Instituto Geofísico del Perú (2020). Milsom (2003), ASTM D5777 (2011). Gardner et al., (1974). | 50 |
| Figura 16. Diagrama de correlación de las propiedades físicas en roca afectadas (resistividad, cargabilidad, porosidad, Vp, densidad) de los valores teórico y experimentales. (* modificado de Lowrie, (2007). Telford (2004). Arias et al., (2012). Van Blaricom (1992). Andrade y LOPEZ (2013). SANDERS (1998) CUSTODIO Y LAMAS (1983). INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ (2020). MILSOM (2003), ASTM D5777 (2011). GARDNER ET AL., (1974). | 51 |
| Figura 17. Diagrama de dispersión para resistividad en brechas. | 52 |
| Figura 18. Diagrama de dispersión para resistividad en rocas volcánicas. | 53 |
| Figura 19. Diagrama de dispersión para resistividad en arenas. | 54 |
| Figura 20. Diagrama de dispersión para resistividad en lodos. | 55 |
| Figura 21. Diagrama de dispersión para resistividad en limos. | 55 |
| Figura 22. Diagrama de dispersión para resistividad en rocas meteorizadas. | 56 |
| Figura 23. Diagrama de dispersión para cargabilidad en brechas. | 57 |
| Figura 24. Diagrama de dispersión para cargabilidad en rocas volcánicas. | 57 |
| Figura 25. Diagrama de dispersión para cargabilidad en arenas. | 58 |
| Figura 26. Diagrama de dispersión para cargabilidad en lodos. | 59 |
| Figura 27. Diagrama de dispersión para cargabilidad en limos. | 59 |
| Figura 28. Diagrama de dispersión para cargabilidad en rocas meteorizadas. | 60 |
| Figura 29. Diagrama de dispersión para porosidad en roca. | 62 |

| | |
|---|----|
| Figura 30. Diagrama de dispersión para Vp en roca..... | 64 |
| Figura 31. Diagrama de dispersión para densidad en roca. | 66 |
| Figura 32. Relación de Velocidad de onda P Vs Densidad. | 67 |
| Figura 33. Relación de Porosidad Vs Densidad..... | 68 |
| Figura 34. Relación Porosidad Vs Velocidad de onda p. | 69 |
| Figura 35. Relación Porosidad Vs resistividad. | 70 |
| Figura 36. Mapas de interpolación IDW “A) resistividad seco. B) resistividad húmedo. C) cargabilidad seco. D) cargabilidad húmedo. E) porosidad. F) Vp..... | 72 |
| Figura 37. Modelo directo resultado de resistividad (arreglo Dipolo-Dipolo) mediante piGYMLi. | 80 |
| Figura 38. Modelo directo resultado de resistividad (arreglo Schlumberger) mediante piGYMLi. | 81 |
| Figura 39. Modelo directo resultado de resistividad (arreglo Wenner) mediante piGYMLi. | 82 |
| Figura 40. Modelo directo resultado de Vp mediante piGYMLi..... | 87 |
| Figura 41. Modelo directo resultado de densidad mediante piGYMLi. | 90 |

Lista de Apéndices

Apéndice A. Clasificación de roca.

Apéndice B. Catálogo de muestras en laboratorio.

Apéndice C. PiGyMLI.

Apéndice D. Datos estructurales.

RESUMEN

TÍTULO: ESTIMACIÓN LOCAL DE FÍSICA DE ROCA MEDIANTE MEDICIONES EN LABORATORIO DE LAS ROCAS AFLORANTES AL OESTE DEL MUNICIPIO DE EL PLAYÓN

AUTOR: Nicolás Rojas Rodríguez

PALABRAS CLAVE: Mineralogía, propiedades físicas, Geología estructural, Geofísica.

DESCRIPCIÓN:

Este trabajo documenta la medición de las propiedades físicas de porosidad, densidad, resistividad, cargabilidad y velocidad de propagación de onda o hecha en 107 muestras de roca de las Riolitas de la Formación Bocas y de rocas sedimentarias de la Formación Bocas aflorantes entre la Falla de Bucaramanga y la Falla Lebrija en el municipio de Rio Negro, Santander.

Las litologías identificadas en la zona de estudio incluyeron areniscas, areniscas silicificadas, areniscas calcáreas, lodolitas, lodolitas calcáreas, limolitas, riolitas, dacitas, tobas, brechas hidrotermales, brechas tectónicas, brechas magmáticas y brechas polimícticas. Las propiedades que logran diferenciar entre estas litologías son la porosidad, que es nula en las tobas, dacitas, riolitas, y brechas magmáticas, y máxima en las areniscas; la cargabilidad que es alta en las areniscas y algunas dacitas, brechas magmáticas y polimícticas, y baja en las lodolitas y riolitas; la resistividad, que en las brechas es máxima con respecto al resto de litologías, la velocidad de onda p, que es máxima en las brechas polimícticas y tobas, y la densidad que está en un rango estrecho sobrepuesto en las limolitas, lodolitas, tobas, riolitas y brechas tectónicas. El modelado directo permite definir que la resistividad es la mejor herramienta para diferenciar las dacitas de las rocas sedimentarias, pero que cuando hay una capa meteorizada, la amplitud de la anomalía en casos de intercalación entre la dacita y los sedimentos disminuye. En cambio, la velocidad de onda p no es una buena herramienta de diferenciación de litologías. La densidad es la mejor herramienta de identificación de intrusivos vs. otras litologías, incluso entre brechas magmáticas y dacitas.

Las mediciones de física de roca no muestran tendencias lineales entre propiedades típicas de correlación como son la porosidad, resistividad, densidad y velocidad de onda p, lo que sugiere que elementos composicionales y la distribución de los poros puede afectar las tendencias entre propiedades físicas.

* *Proyecto de investigación*

** *Facultad de ciencias y Facultad de Ingenierías Fisicoquímica. Escuela de Física y Escuela de Geología. Directora: Roció del Pilar Bernal Olaya. Ph.D*

ABSTRACT

TITLE: LOCAL ESTIMATION OF ROCK PHYSICS THROUGH LABORATORY MEASUREMENTS OF OUTCROP ROCKS IN THE WESTERN OF THE MUNICIPALITY OF EL PLAYÓN

AUTHOR: Nicolás Rojas Rodríguez

KEYWORDS: Mineralogy, physical properties, structural geology, geophysics.

DESCRIPTION:

This work documents the measurement of physical properties of porosity, density, resistivity, chargeability, and wave propagation velocity made on 107 rock samples from the Rhyolites of the Bocas Formation and sedimentary rocks of the Bocas Formation outcropping between the Bucaramanga Fault and the Lebrija Fault in the municipality of Rio Negro, Santander. The lithologies identified in the study area included sandstones, silicified sandstones, calcareous sandstones, mudstones, calcareous mudstones, siltstones, rhyolites, dacites, tuffs, hydrothermal breccias, tectonic breccias, magmatic breccias, and polymictic breccias. The properties that differentiate between these lithologies are porosity, which is zero in tuffs, dacites, rhyolites, and magmatic breccias, and maximum in sandstones; chargeability, which is high in sandstones and some dacites, magmatic and polymictic breccias, and low in mudstones and rhyolites; resistivity, which is maximum in breccias compared to the other lithologies; the p-wave velocity, which is maximum in polymictic breccias and tuffs; and density, which is in a narrow range overlapping in mudstones, mudstone, tuffs, rhyolites, and tectonic breccias. Direct modeling allows defining that resistivity is the best tool to differentiate dacites from sedimentary rocks, but when there is a weathered layer, the amplitude of the anomaly in cases of intercalation between dacite and sediments decreases. In contrast, the p-wave velocity is not a good tool for lithology differentiation. Density is the best tool for identifying intrusives vs. other lithologies, even between magmatic breccias and dacites. Rock physics measurements do not show linear trends between typical correlation properties such as porosity, resistivity, density, and p-wave velocity, suggesting that compositional elements and pore distribution can affect the trends between physical properties.

* *Investigation project*

** *Science Faculty and Faculty Physicochemical Engineering. Physics school and geology school. Director: Roció del Pilar Bernal Olaya. Ph.D*

1. INTRODUCCIÓN

En el área limítrofe entre los municipios El Playón y Rio Negro, departamento de Santander, en la Cordillera Oriental de Colombia, afloran rocas ígneas volcánicas (tipo riolitas riodacitas y dacitas) con edad radiométrica de 250.7 ma Van der Lelij (2013). Las riolitas, y dacitas se observan intruyendo rocas volcanoclásticas félsicas y cuerpos de brechas cuya génesis aún no ha sido determinada. Estas rocas infrayacen las rocas sedimentarias pertenecientes a la Formación Bocas, la cual es predominantemente siliciclástica.

Las rocas volcánicas suelen contener localmente cristales de pirita diseminados, sectores afectados por silicificación, cloritización, venas y vetillas tanto de cuarzo hidrotermal como de sulfuros tipo arsenopirita-pirita. Los cuerpos de brechas suelen ser tanto clasto-soportados como matriz-soportados. La composición de sus clastos suele ser polimíctica (tanto fragmentos de rocas sedimentarias de la formación Bocas, como fragmentos volcánicos y volcanoclásticos con y sin evidencias de alteración hidrotermal) Latorre et al. (2019).

El magmatismo de edad Triásico temprano representa un evento muy restringido en este sector de la Cordillera Oriental de Colombia, el cual temporalmente se asocia con ambientes de subducción que tuvieron lugar en respuesta al proceso de rifting que afectó el sector oeste de Pangea y separó los terrenos colombianos y mexicanos Latorre, Rojas y Mantilla (2019).

La finalidad de este proyecto de investigación, es aportar al estado del conocimiento geológico y geofísico, mediante el análisis macroscópico de roca y las propiedades físicas (resistividad, cargabilidad, porosidad y velocidad de onda), con el fin de generar modelos directos

de la respuesta geofísica de la Formación Bocas y de los cuerpos volcánicos, subvolcánicos y volcanosedimentarios, agrupados como riolitas de la Formación Bocas.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Describir las variaciones de las propiedades litológicas y físicas al Oeste del municipio de El Playón, para determinar índices de calidad en la roca y generar modelos directos de las respuestas geofísicas de las rocas como precedentes para futuras campañas de adquisición geofísica.

2.2 Objetivos Específicos

- Definir el marco geológico y geofísico al Oeste del municipio de El playón, a partir de recopilación de la información disponible en la literatura científica.
- Clasificar los diferentes cuerpos de rocas a partir de la determinación de la composición, texturas, tamaño de cristal y/o granos de las rocas muestreadas en campo.
- Detallar las propiedades físicas (cargabilidad, resistividad, velocidad de la onda y porosidad) de las rocas en muestra de mano en una base de datos de geofísica y de calidad de roca
- Cartografiar la Falla de Bucaramanga a partir del análisis de imágenes satelitales, recopilación de datos estructurales y trabajo de campo.
- Modelar la señal esperada en un experimento de adquisición de datos geofísicos usando la librería de Pygimli.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La zona de estudio ubicada al oeste de la Falla de Bucaramanga entre las veredas de Algarrobo y La Llandada presenta dos características que avivan el interés investigativo, el primero corresponde al magmatismo de edad triásico temprano, considerado un evento muy restringido y de poco estudio en la Cordillera Oriental de Colombia, denominado por (Ward et al. 1973) como riolitas de la Formación Bocas, datado nuevamente con edad 250.7 ma por Van der Lelij (2013); y el segundo concierne a la actividad tectónica, evidenciada por la presencia de las Fallas de Bucaramanga y Lebrija, formando lo que se considera un posible bloque caído.

Las propiedades físicas de las rocas ígneas han sido estudiadas, anteriormente por Christensen and Stanley (2003). En estas mediciones se ha resaltado la importancia de las mediciones eléctricas y magnéticas para diferenciar estas rocas. Adicionalmente, se ha documentado la gran variación de los valores de velocidad a presión atmosférica, por la existencia de microfracturas, y alteración. Las relaciones de velocidad-densidad han sido otro gran tema de estudio, para poder predecir una propiedad si se conoce la otra. La curva de Nafe-Drake (Nafe and Drake, 1957), ha sido usada para interpretar los resultados sismológicos del manto superior, por ejemplo. Otros como Birch's (1961), Christensen and Salisbury (1975), Gardner et al. (1974) y Christensen and Mooney (1995) han postulado relaciones matemáticas entre estas propiedades.

Se establecen entonces las siguientes preguntas de investigación: ¿Cómo afecta la tectónica las propiedades físicas de las rocas? ¿Se pueden diferenciar las rocas sedimentarias y las riolitas que afloran en la zona de estudio con propiedades geofísicas? ¿Cuál es la propiedad física diferenciadora entre el cuerpo riolítico con las tobas y/o brechas? A partir de los valores de

resistividad, cargabilidad, porosidad y velocidad de onda P obtenidos mediante mediciones en muestras de mano en laboratorio se pretende aportar a la resolución de las preguntas planteadas.

3.1.Hipótesis

- Debido a que las propiedades físicas de las rocas son afectadas y modificadas por el fallamiento, la mineralización y la meteorización, las propiedades geofísicas no permitirían diferenciar una dacita de una brecha (composición similar) o de una toba o roca sedimentaria.
- Aunque las dacitas, riolitas, brechas y/o tobas presentan valores similares en resistividad, al ser la brecha una roca porosa posiblemente pueda rellenarse con fluidos, los cuales nos permitirán observar bajos valores de resistividad con respecto a las demás rocas.

4. METODOLOGÍA

El procedimiento de trabajo se divide en cinco (5) etapas: consulta, pre-campo, campo, post-campo y, por último, elaboración de un informe, las cuales se presentan en la Figura 1 y 2, serán descritas con detalle a continuación.

4.1. Etapa de consulta

Se realizó la búsqueda de información bibliográfica, tanto digital como física, del marco geológico. Se enfatizaron las bases de datos de entes gubernamentales, tales como la Corporación Autónoma Regional de la defensa de la meseta de Bucaramanga (CDMB), Servicio Geológico Colombiano (SGC), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), para el componente geofísico se priorizo el uso de la base de datos digitales (ELSERVIER, SCOPUS, WEB OF SCIENCE) y el catálogo bibliográfico de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

De la información recopilada, se analizó principalmente la información de interés de los siguientes estudios 1) “Estudio mineralógico-petrográfico de las litologías aflorantes en el sector Algarrobo-La Llandada (Entre los municipios de Rio negro - El playón, Departamento de Santander)”, Latorre y Rojas (2018); 2) “Generalidades de las rocas de edad Triásico Temprano aflorantes en áreas de los Municipios El Playón Y Rio Negro (Departamento de Santander, Colombia)”, Latorre, Rojas y Mantilla (2019); 3) “Geología de los cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander”, Ward et al., (1973); 4) “Present-day structural frame of the Santander Massif and Pamplona Wedge: The interaction of the Northern Andes”, Velandia et al., (2020).

Adicionalmente, se utilizó la plancha geológica 97 Cáchira y 109 RioNegro (escala 1:100.000) departamento de Santander, elaborados por INGEOMINAS (actualmente Servicio Geológico Colombiano) en el año 1978 y 1973, respectivamente y la plancha topográfica 109-II-A, 109-I-B, 97-IV-C del municipio de Santander (escala 1:25.000) de los años 1982 y 1983 elaborada por el IGAC. Finalmente, se revisaron los datos geofísicos (resistividad, cargabilidad, porosidad, V_p y densidad), que se encuentra en los textos base: 1) “Fundamentals of Geophysics”, Lowrie (2007); 2) “Applied Geophysics”, Telford (2004); 3) Hydrogeologic Properties of Earth Materials and Principles of Groundwater Flow”, Woessner and Poeter (2020); 4) “Formation Velocity and Density—the diagnostic basics for stratigraphic traps. Geophysics”, Gardner (1974).

4.2.Pre-campo

Se determinaron los puntos de interés como vías de acceso, carreteables, destapados que colindaran con lotes, con el objetivo de evitar entrar a los diferentes lotes ya que en ese momento ocurría el punto crítico del COVID-19. Una vez definidas las zonas de interés, se localizaron puntos para realizar la toma de muestras de mano y datos estructurales. Luego, usando mapas topográficos y modelos digitales de elevación a escala 1:25000, recopilados, se planearon las salidas de campo para adquisición de información primaria. Adicionalmente, se estudiaron y calibraron los equipos usando sus respectivos manuales, los cuales pertenecen al laboratorio de geofísicas de la Escuela de Geología, campus principal de la UIS: 1) Sample Core Induced Polarization Teste; 2) BLP-630 Automated Gas Porosimeter; 3) PLT-2W Wireless Point Load Test System, con el objetivo de aprender a utilizar e identificar el tamaño mínimo de muestra requerida para las mediciones.

4.3.Campo

Se realizaron cuatro (4) salidas de campo divididas en dos recorridos en el área del proyecto. El primer recorrido tuvo lugar en el desvío hacia la zona Oeste que comunica la vía de Rionegro – El Playón y comprende una carretera destapada hacia Algarrobo, Rionegro y el segundo recorrido se realizó en cercanías a la Vereda Tres Portones del municipio El Playón (Figura 2). En la primera salida de campo se realizó el reconocimiento de la zona de estudio, se analizó el estado de las vías y de los afloramientos, la segunda y tercera salida de campo, consistieron en la descripción de afloramientos y toma de muestras de mano (un día para cada recorrido) y finalmente la cuarta salida de campo consistió en toma de datos estructurales en ambos recorridos.

4.4.Post-campo

Esta etapa se dividió en cuatro subcapítulos:

1. Análisis macroscópico de roca: Se realizó usando lupa de aumento estándar 10X, para esto se utilizaron los siguientes parámetros: para rocas sedimentarias, el tamaño de grano se basó en la clasificación propuesta por Wentworth (1922) y para determinar el nombre según su clasificación textural se usó Folk (1980); para rocas volcánicas, el triángulo de clasificación de rocas volcánicas propuesto por Streckeisen (1979), para rocas o depósitos volcanoclásticos, se empleó la clasificación propuesta por Schmid (1981) y finalmente para la caracterización y clasificación de los diferentes cuerpos de brecha se usaron las clasificaciones propuestas por Corbett y Leach (1998) y Cooke (2005). La clasificación litológica de las muestras recolectadas se encuentra en el apéndice A.
2. Física de roca: Con el propósito de hacer las mediciones en laboratorio, se utilizó el taladro Drilling machine DS-160C, con brocas de 2.54 y 3.20 cm de diámetro, para poder extraer los respectivos plugs de las muestras recolectadas.

3. Posteriormente se hicieron las mediciones de las propiedades físicas en laboratorio cuyos parámetros de medición esta definidos en la Tabla 1, se inició con las mediciones de resistividad y cargabilidad usando el equipo Sample Core Induced Polarization Tester (SCIP Tester), continuando con la medición de porosidad con el equipo BLP-630 Automated Gas Porosimeter y finalmente la medición de la velocidad de onda P se llevó a cabo con el equipo PLT-2W Wireless Point Load Test System de la empresa GCTS. La información de los datos obtenidos en laboratorio se encuentra en el apéndice B.
4. Procesamiento: El modelo estructural se creó con base a los resultados de planos de falla obtenidos por el software Wintensor (Delvaux, 2011) y los modelos directos (resistividad, V_p y densidad), se obtuvieron de la librería de Python llamada “PYGIMLI” la cual es una librería de Python para inversión y modelado en geofísica de código abierto, que proporciona herramientas esenciales para el modelado y la inversión de datos. El componente de modelado proporciona la gestión de discretización y la base numérica para solucionadores de elementos finitos y volúmenes finitos en 1D, 2D y 3D en estructuras arbitrarias o mallas no estructuradas. La inversión es generalizada y resuelve la minimización con un algoritmo de Gauss-Newton. Si se requieren restricciones más generales, como estrategias de regularización flexibles, procesamiento de flujo de tiempo y diferentes tipos de acoplamiento individual, los métodos se proporcionan de forma independiente a los métodos existentes para hacer modificaciones (Rücker et al., 2015, 2016, 2017). La información del procesamiento de los datos se encuentra en el apéndice C.
5. Digitalización: Se representaron los datos en tablas y esquemas utilizando un software de diseño gráfico (Corel Draw). Los mapas geológicos, de contornos y de sombras se elaboraron mediante el software QGIS 3.14, implementando los complementos SVG, OTB y SAGA GIS

(2.3.2) con el fin de georreferenciar con exactitud las unidades geológicas y sus límites. Por medio de este software e imágenes satelitales con resolución 30 y 12,5 m (NASA - Instalación de satélites de Alaska, 2015), se reconocieron las estructuras y fallas más importantes que afectan la zona de estudio y se delimitaron las unidades geológicas de la zona

4.5.Resultado

Ensamble de los diferentes resultados para la construcción del informe final.

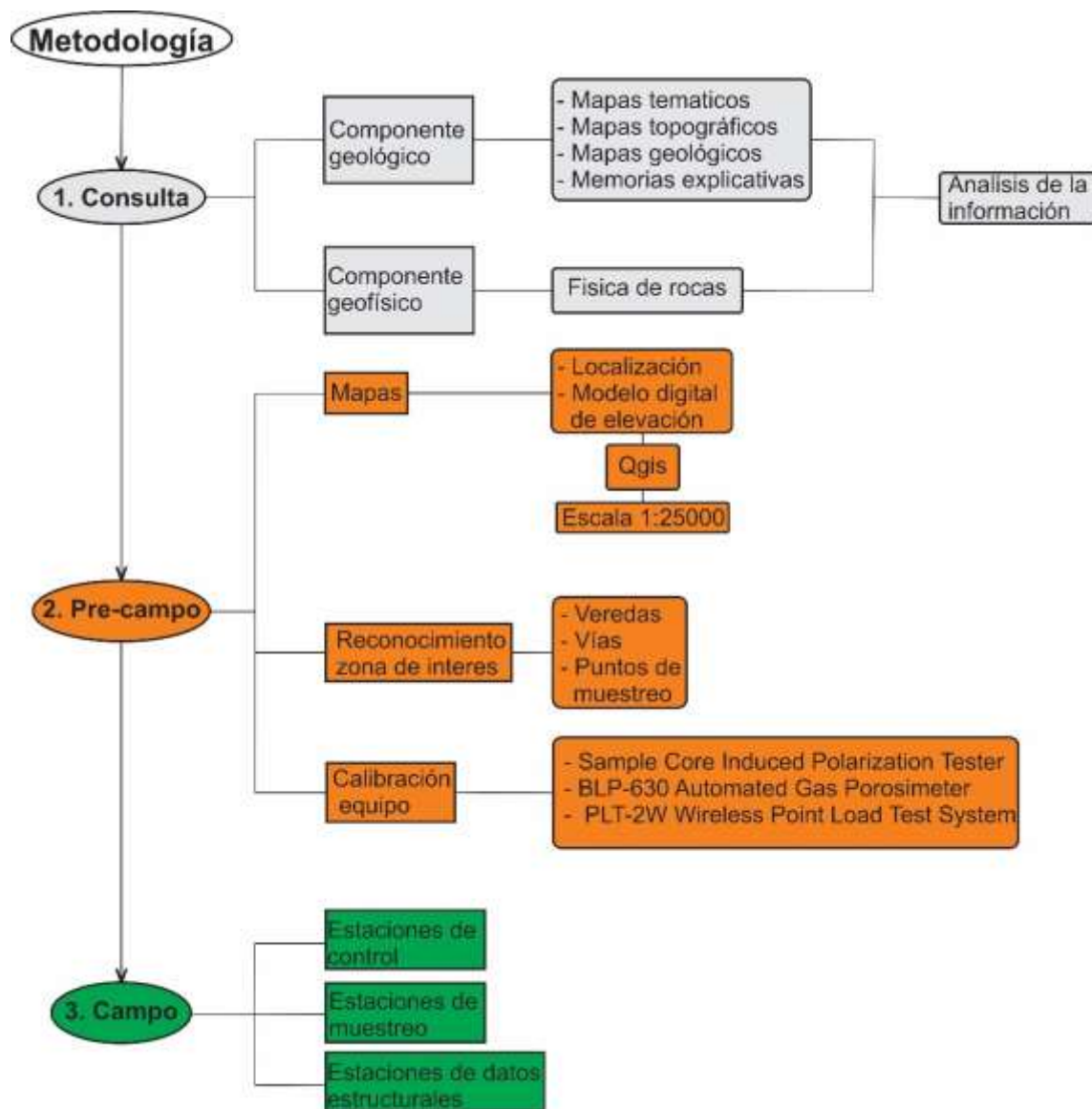


Figura 1. Metodología del trabajo de investigación (etapa 1, 2, 3)

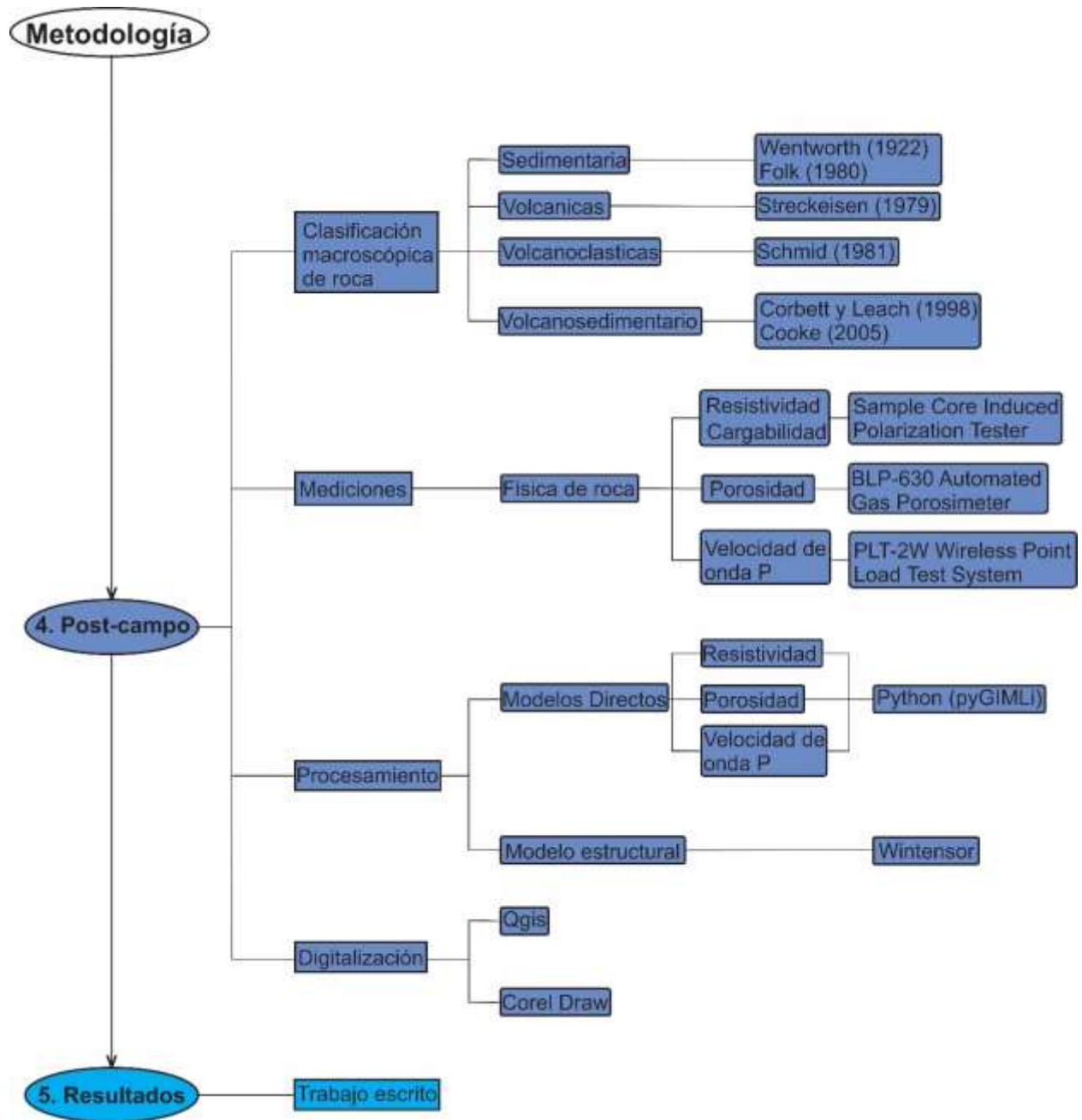


Figura 2. Metodología del trabajo de investigación (etapa 4, 5).

Tabla 1.
Dimensiones medidas de la muestra

| Tipo | Equipo | Software / app | Tipo de medición | | Número de mediciones por muestra | Test inicial | | | Parámetros del equipo | | Parámetros de medición | | |
|-------------------------|---|----------------|------------------|-------------------|----------------------------------|--------------|----------------|--------|-----------------------|----------------|------------------------|-----------|---------------|
| | | | Seca | Húmeda (saturada) | | Voltaje (V) | corriente (uA) | Ciclos | tiempo de ciclo (seg) | modo del ciclo | Diámetro (mm) | Área (mm) | Longitud (mm) |
| Medición en laboratorio | Sample Core Induced Polarization Tester | GDD-SCIP | X | X | 3 | X | - | 30 | 3 | Semi | X | X | X |

| Tipo | Equipo | Software / app | Tipo de medición | Número de mediciones por muestra | Test inicial | Parámetros del equipo | | | | | Parámetros de medición | | | | |
|-------------------------|-----------------------------------|--------------------|------------------|----------------------------------|--------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------|---|---------------------------------|---------------|-----------|----------|
| | | | | | | Numero de corridas | Tiempo de ajuste min (seg) | Tiempo de ajuste max (seg) | Tolerancia a la presión (psi) | Referencia | Anular el tiempo de ventilación de gas global | tiempo ventilación de gas (seg) | Diámetro (cm) | Área (cm) | Masa (g) |
| Medición en laboratorio | BLP-630 Automated Gas Porosimeter | Offite Porosimeter | X | 2 | X | 3 | 40 | 80 | 0.02 | 40cc | Activado | 10 | X | X | X |

| Tipo | Equipo | Software / app | Parámetros del equipo | | | | | Número de mediciones por muestra | Parámetros de medición | | | | | | | | | |
|-------------------------|--|-------------------|---|----------|----------|----------|----------|----------------------------------|----------------------------|---------------|---------------|------------------|------------------------|--|----------|----------|--|--|
| | | | Altura de los pistones | | | | | | tipo de Muestra | longitud (cm) | diametro (cm) | Porfundidad (cm) | Altura de los pistones | | | | | |
| | | | Ranura 1 | Ranura 2 | Ranura 3 | Ranura 4 | Ranura 5 | | | | | Ranura 1 | Ranura 2 | Ranura 3 | Ranura 4 | Ranura 5 | | |
| Medición en laboratorio | PLT-2W Wireless Point Load Test System | Point Load Tester | Distancia de los pistones, depende de la longitud de la muestra | | | | | 1 | Núcleo con longitud < (cm) | 6 | X | X | - | Colocar en la misma ranura de pisto que se indico en el ajuste de equipo | | | | |
| | | | | | | | | | Núcleo con longitud > (cm) | 6 | X | X | - | | | | | |
| | | | | | | | | | Núcleo irregular | | X | X | X | | | | | |

Nota: Criterios usados para cada equipo para las mediciones de propiedades físicas en roc

5. MARCO TEÓRICO

5.1. Localización

La zona de estudio comprende una extensión superficial total de 40 km² entre los municipios El Playón y Rionegro, Departamento de Santander, delimitada mediante las siguientes coordenadas geográficas (MAGNA-SIRGAS/ Zona Colombia Bogotá):

X₁: 1'090.000 m

X₂: 1'096.350 m

Y₁: 1'312.500 m

Y₂: 1'320.750 m

La geología del área de estudio aparece en el cuadrángulo H12 de Bucaramanga, en las planchas a escala 1:100.000 (Cachira-97 (Vargas y Arias. 1981b) y Rionegro-109 (Ward et al., 1973)), cartografías por el Servicio Geológico Colombiano. La topografía del área aparece en las planchas a escala 1:25.000 (97-III-D, 97-IV-C, 109-I-B, 109-II-A), del instituto Geográfico Agustín Codazzi.

El área de estudio se encuentra localizada en el flanco occidental de la Cordillera Oriental (CO), en el Macizo de Santander (MS) (Figura 3).

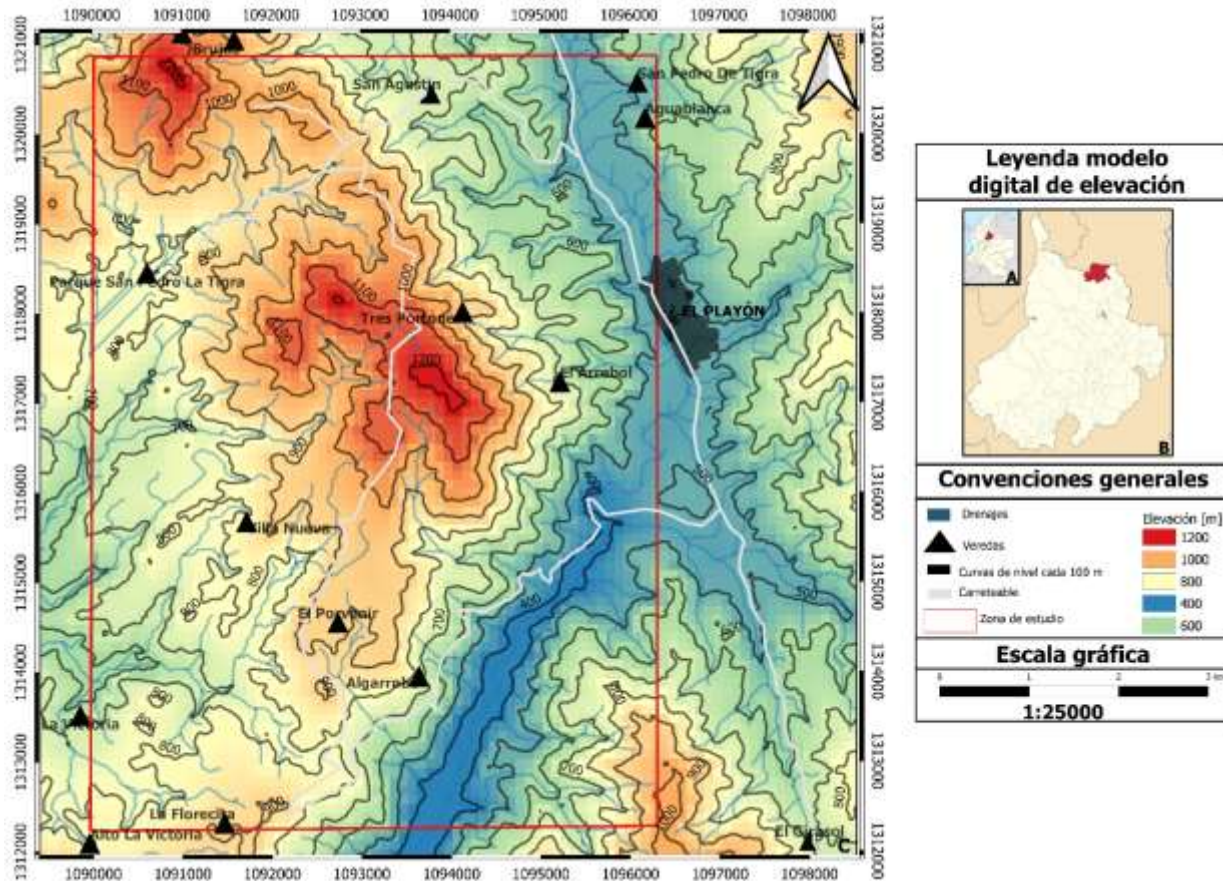


Figura 3. Modelo digital de elevación. Recuadro A. Mapa de Colombia, B. Mapa de Santander, C. El Playón.

5.2.Marco geológico

5.2.1. Regional

Esta región corresponde al Sistema Andino de Colombia (SAC). Junto con los Andes de Mérida y Ecuador conforman el denominado Bloque Andino (Pennington, 1981), también denominado Andes del Norte (Gansser et al., (1973a); Alemán & Ramos, (2000)). El área de estudio se localiza en la Cordillera Oriental (CO), en el Macizo de Santander (MS), que corresponde al Terreno Chibcha (Toussaint y Restrepo, (1976)) (Figura 4).

El Macizo de Santander está constituido por rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias. Las rocas metamórficas de edad Precámbrica a Paleozoica incluyen al Neis de Bucaramanga, la Formación Silgara y el Ortoneis Ward et al., (1973). Las rocas magmáticas del Paleozoico Tardío son escasas o ausentes en el Macizo de Santander y el magmatismo del Triásico temprano está registrado por los diques riolíticos que intruyen las rocas sedimentarias al oeste de la Falla Bucaramanga (Figura 2). La edad radiométrica de estos intrusivos es de 250.7 ± 4.3 Ma Van der Lelij, (2013), Spikings et al., (2015) & Van der lelij et al., (2015). Estos intrusivos hacen parte de los granitoides y las riolitas que cristalizaron durante los 272-196 Ma, que para Van der Lelij (2013) se formaron por un sistema de arco continental.

Las rocas intrusivas del Triásico y Jurásico Goldsmith, (1971), fueron agrupadas y denotadas como el Grupo Plutónico de Santander. Este grupo está representado por las siguientes unidades geológicas: “Batolitos y Plutones, Batolito de Mogotes (RC), Batolito de Rio Negro, Riolitas de la Formación Bocas (r) y rocas diques Ward et al., (1973).

La Formación Bocas se constituye de rocas sedimentarias conformada por intercalaciones de lodolitas con areniscas de espesor variable, ligeramente calcáreas y cuerpos volcánicos y volcanosedimentarios agrupados como riolitas de la Formación Bocas, que corresponden a diques riolíticos y flujos de lava de composición riolítica con texturas microporfídicas, granófiros y brechas (Ward et al. 1973), que se encuentran en la parte norte del cuadrángulo H-12, al oeste de la Falla de Bucaramanga, y que afloran al occidente de El Playón, en el caserío de Ceiba, en los límites veredales La esperanza, Tres portones, Algarrobo, La Llandada, en la carretera El Playón-Cuesta Rica al suroriente de Coromoro, al oriente de Encino, al norte del Departamento de Santander y al suroccidente del municipio de Onzaga

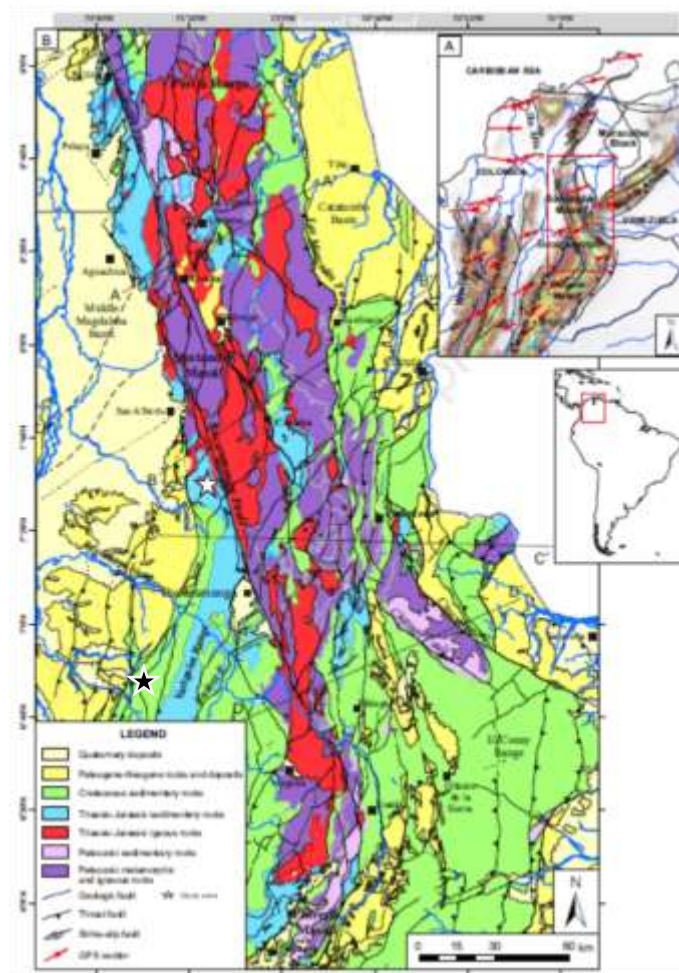


Figura 4. Mapa geológico del Macizo de Santander. Modificado de Velandia et al., (2020).

5.2.2. Local

La zona de estudio comprende el área entre los municipios El Playón y Rionegro, ubicada en la Provincia Soto Mayor (Gutiérrez y Clavijo, 2001), ubicada al norte del departamento de Santander y delimitada al norte por el municipio de Cáchira, al este por el municipio de Surata, al sur por el municipio de Matanza y al oeste por la provincia del Magdalena Medio (Latorre y Rojas, 2018). (Figura 5).

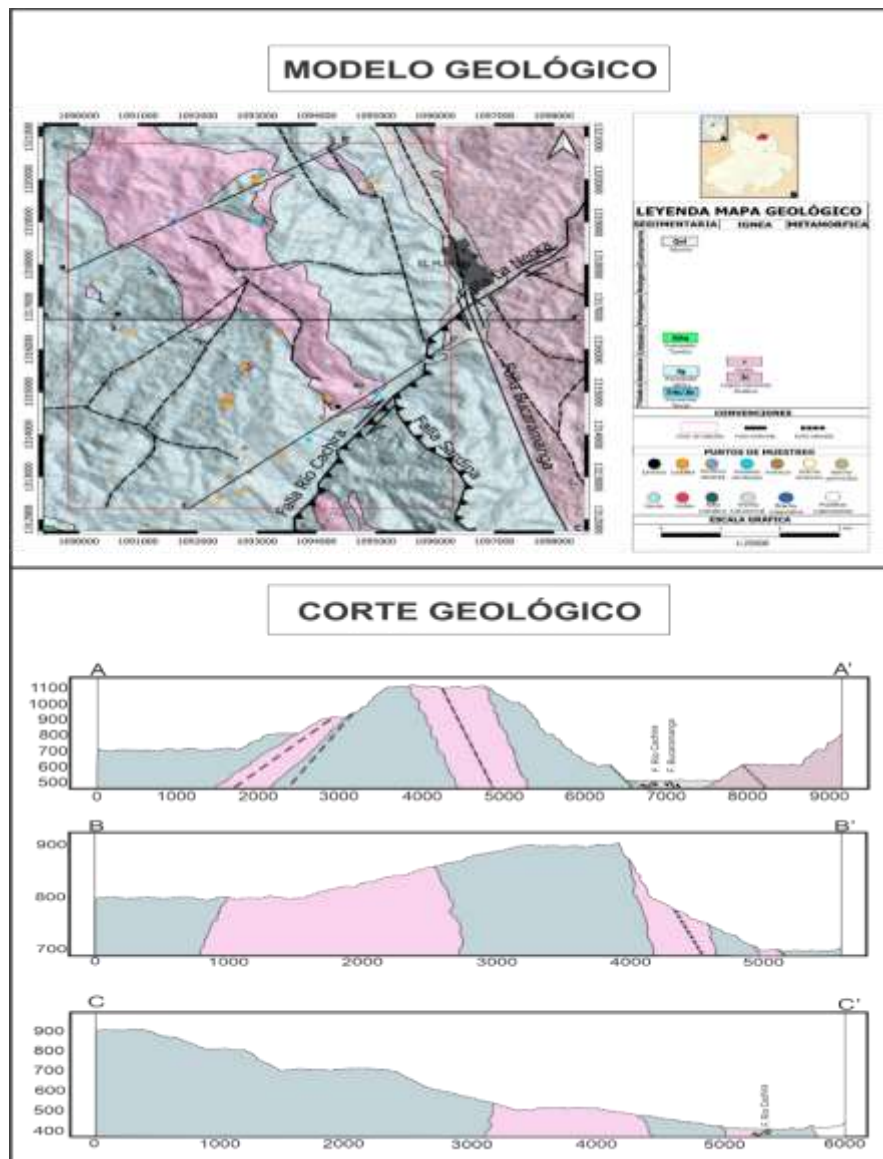


Figura 5. Modelo geológico de la zona de estudio con sus respectivos cortes A-A', B-B', C-C' (A) Mapa de Colombia. (B) Mapa de Santander. (C) zona de estudio. Modificado de Latorre y Rojas, (2018).

El trabajo de campo fue fundamental para establecer la distribución espacial de las masas rocosas y conocer las relaciones cronológicas entre ellas. En este trabajo se realizaron dos recorridos en el área del proyecto: el primer recorrido tuvo lugar en el desvío hacia la parte oeste que comunica la vía de Rionegro – El Playón, que comprende una carretera destapada hacia Algarrobo, Rionegro y el segundo recorrido se realizó en cercanías a la Vereda Tres Portones del municipio El Playón.

En el primer recorrido se observó la presencia de rocas sedimentarias con estratificación plano paralela compuestas por intercalaciones de lodolitas en capas de 2 metros y areniscas de espesor variable entre 0,5 a 1 metro. Las areniscas presentan un contenido de carbonato (calcita y dolomita). Estratigráficamente, tienen rumbo y buzamiento de $320^{\circ}/82^{\circ}$ (tomado en azimut de rumbo). Por otra parte, se observaron rocas volcánicas tipo riolitas, las cuales son de color gris claro a gris oscuro por la ocurrencia de cuarzo y feldespatos de textura fanerítica, con tamaño de grano grueso inequiangular y dacitas con estructuras de lavas y presencia de sulfuros diseminados en contacto con rocas sedimentarias. En este contacto la roca sedimentaria presenta una textura peperítica. Siguiendo la vía metros más adelante, se identificaron brechas matriz soportadas silíceas, con presencia de sulfuros, estas brechas están compuestas por clastos que varían de angulares a redondeados en tamaños de 1 mm a 1 cm. Estos clastos se clasifican composicionalmente en dos tipos: el primer tipo es un clasto volcánico (dacita) que exhibe silicificación producto de un aporte hidrotermal, mientras que el segundo es un clasto sedimentario (arenisca). Además, estas brechas poseen cuarzo calcedónico asociado a volátiles y procesos hidrotermales.

El segundo recorrido de campo fue en las cercanías a la Vereda Tres Portones, donde se identificaron diferentes tipos de roca como rocas sedimentarias, brechas con textura stockwork

con ocurrencia de sulfuros de pirita y nuevamente dacitas intruyendo a riolitas. Al contrario del primer recorrido, en este segundo recorrido se observaron tobas. Uno de los rasgos geológicos más importantes de este recorrido fue hallar el contacto entre riolitas y brechas volcánicas, el cual se identificó debido a la ocurrencia superficial de la roca que se encuentra expuesta a la intemperie (peperita). También, se presentan rodados de brecha hidrotermal-magmática con ocurrencia de vetillas tipo stockwork (Figura 6).

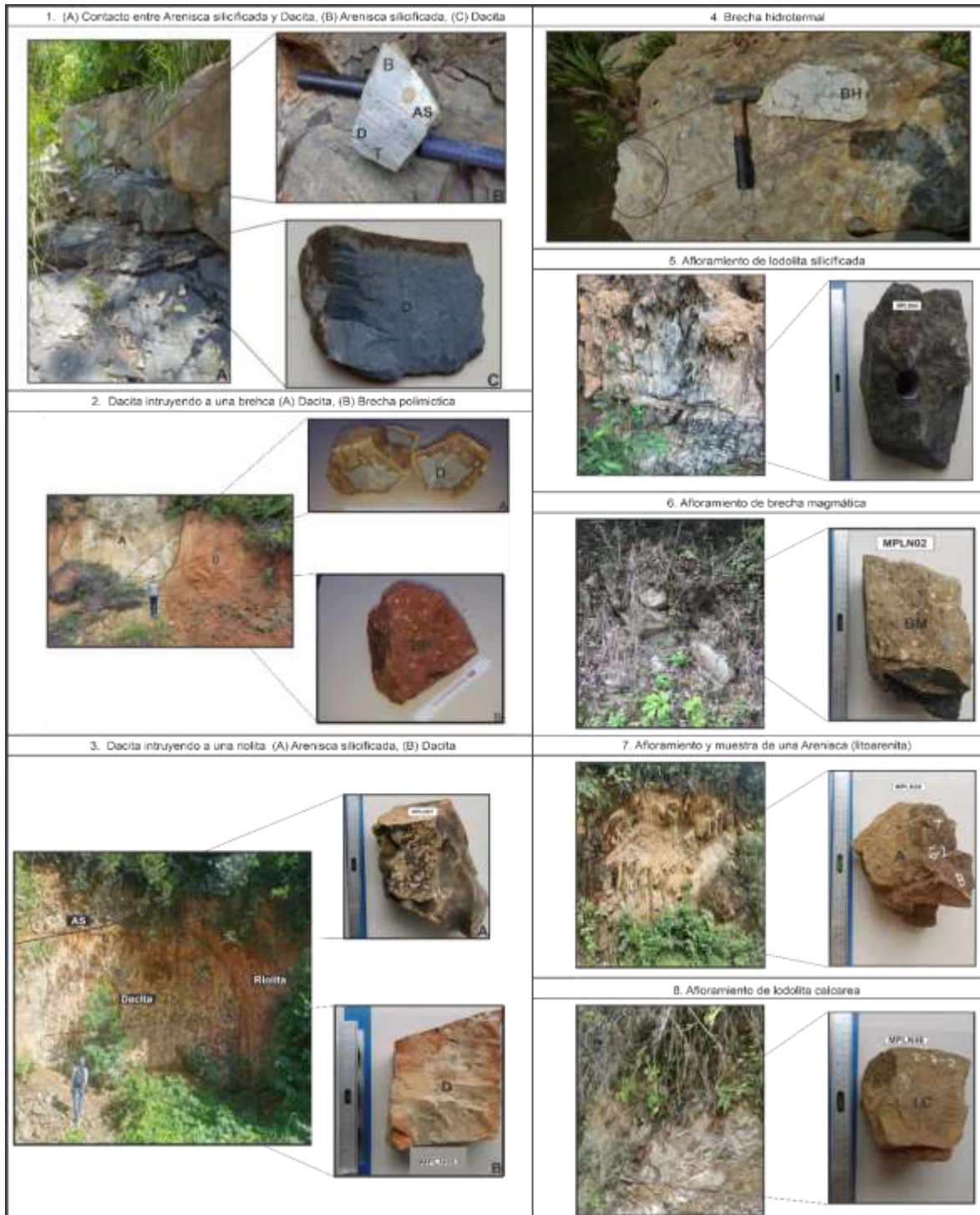


Figura 6. Afloramiento de la zona de estudio.

Durante las salidas de campo se recogieron ciento diecisiete (117) muestras, clasificadas según su composición mineralógica y textura en trece (13) tipos de rocas como se muestra en el Figura 7 y 8 (Apéndice A).

1. Brecha Hidrotermal (BH): Muestra de brecha con textura stockwork, con evidencia de venas hidrotermales las cuales cortan una matriz riolítica de tonalidad gris oscura.
2. Brecha Magmática (BM): Muestra de brecha con matriz volcánica, se evidencia la presencia de clastos de rocas ígneos, composicionalmente está dada por cuarzo, plagioclasa y alcalinos, presenta óxidos de hierro (pirita).
3. Brecha Sedimentaria (Tectónica) (BT): Roca sedimentaria de color gris oscuro con matriz lodo soportada, que presenta clastos de carbonatos. La roca contiene pirita como mineral accesorio tanto en la matriz como en los clastos. Debido a la angularidad que predomina en los clastos la muestra corresponde a una brecha sedimentaria.
4. Brecha polimictica (BP): Muestra de brecha matriz lodo soportada que contiene tres tipos de clastos (dacita, arenisca silícea y calcita).
5. Toba cristalina (TC): Roca volcanoclástica de tamaño de ceniza fina de tonalidad gris oscura, con presencia de clastos subredondeados a angulares incrustados en una matriz afanítica. Presenta enclaves de feldespatos debido a la cantidad de máficos y cristales de cuarzo calcedónico.
6. Dacita (D): Roca volcánica de tonalidad gris claro a gris oscuro. Presenta una textura porfirítica con presencia de sulfuros diseminados (Pirita). Sus cristales son anhedrales a subhedrales, inequigranulares de grano fino a medio. Hacia los bordes de la roca se evidencia la presencia de cuarzo bipiramidal y una tonalidad blanca con naranja producto de alteración supérgena, la

cual produce la formación de alunita ocasionando la pérdida de pirita y la generación de cristales de tonalidad café conocido como Goethita.

7. Riolita (R): Roca ígnea de tonalidades rojizas y grises claros producto de la presencia de cuarzo y feldespato, de textura fanerítica y tamaño de grano grueso inequigranular.
8. Areniscas (Litoarenita) (A): Roca feldespática ligeramente gravosa, tamaño de grano limo medio a arena gruesa, mal calibrada, granos subangulares hasta subredondeados con contacto flotante y baja porosidad. Composicionalmente, se caracteriza por tener cuarzo predominantemente, con feldespatos y minerales opacos; cementada por carbonatos.
9. Arenisca calcárea (AC): Roca sedimentaria de color gris oscuro con armazón areno soportado y matriz de lodo calcáreo, de tamaño de grano de arena muy fina a fina y bien calibrada. Se clasifica como una arenisca de grano muy fino a fino ligeramente calcárea.
10. Arenisca silicificada (AS): Roca sedimentaria de color gris claro a gris oscuro, de tamaño de grano muy fino, equigranular, armazón arenosoportado, cemento silíceo y matriz arcillosa.
11. Lodolita ligeramente calcárea (LC): Roca sedimentaria color gris claro a gris oscuro con armazón lodo soportado y matriz lodosa, localmente posee carbonatos. Su clasificación textural está determinada por los porcentajes de arena 5%, arcilla 50% y limo 45%, que corresponde a una lodolita de grano muy fino.
12. Lodolita silicificada (LS): Roca sedimentaria color gris claro a gris oscuro con armazón lodosoportado y matriz lodosa, presentando silicificación, Su clasificación textural está determinada por los porcentajes de arena 5%, arcilla 50% y limo 45%, que corresponde a una lodolita de grano muy fino.
13. Limolita (L): Cuerpo sedimentario de tonalidades gris claro a verdoso, tamaño de grano muy fino a limo con porosidad.

Tabla 2.

Nomenclatura de las diferentes litologías clasificadas.

| Clasificación macroscópica de roca | Brecha hidrotermal | Brecha magnética | Dacita | Riolita | Toba cristalina | Brecha polimíctica | Brecha tectónica | Arenisca silicificada | Arenisca calcárea | Arenisca (Litoarenita) | Lodolita calcárea | Lodolita silicificada | Limolita |
|------------------------------------|--------------------|------------------|--------|---------|-----------------|--------------------|------------------|-----------------------|-------------------|------------------------|-------------------|-----------------------|----------|
| Nomenclatura | BH | BM | D | R | TC | BP | BT | AS | AC | A | LC | LS | L |



Figura 7. Litologías sedimentarias de la zona.

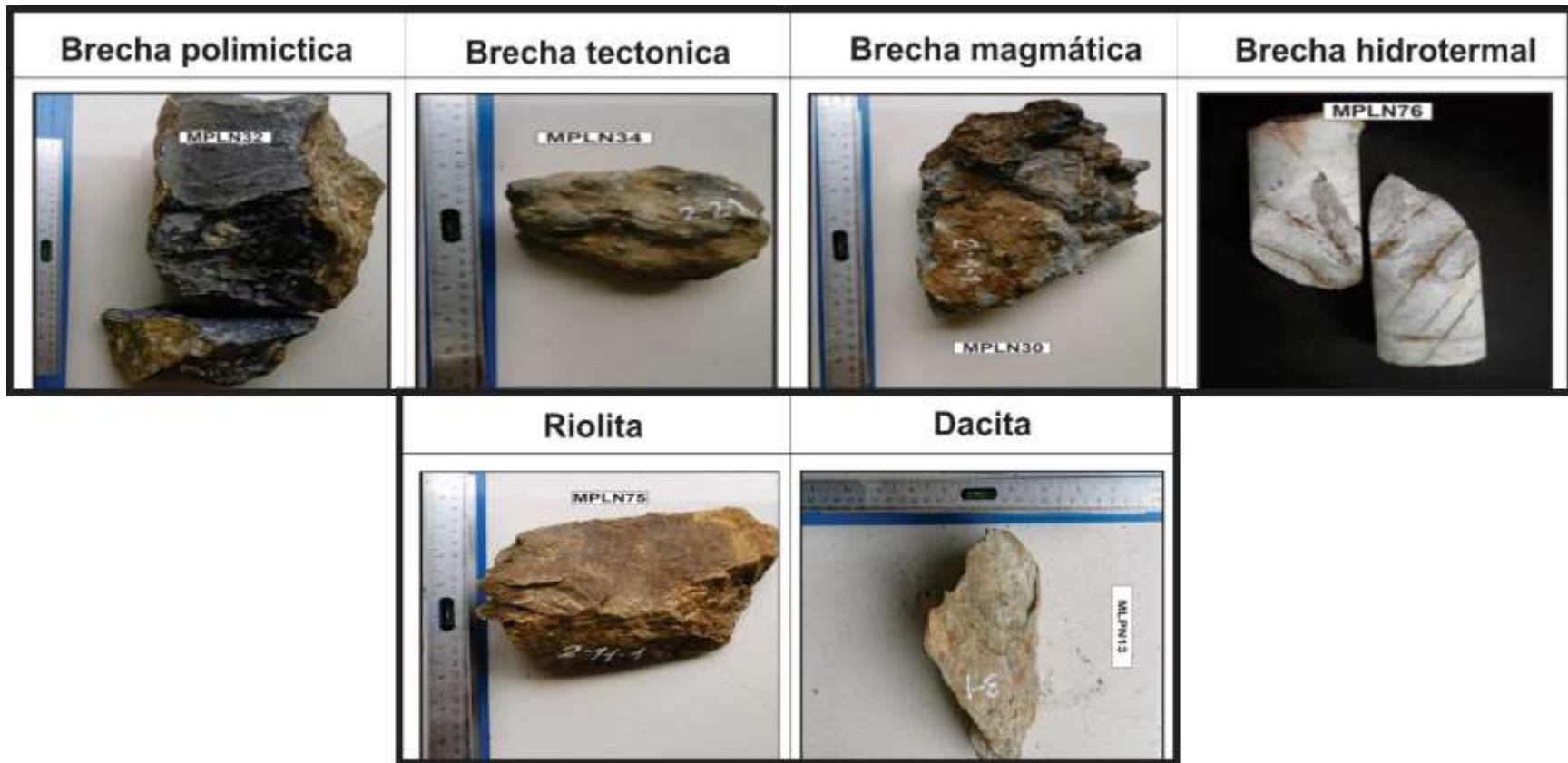


Figura 8. Litologías volcánicas, volcanoclasticas y volcanosedimentarias de la zona.

5.3. Marco estructural

5.3.1. Regional

Los modelos estructurales relacionados con el Macizo de Santander presentan diferentes interpretaciones, ya que en esta zona se encuentran los tres tipos de deformación (compresión, transcurrancia y distensión) por el movimiento de Los Andes del Norte hacia el NE Audemard & Audemard, (2002); Egbue, et al., (2010). Adicionalmente, el Macizo de Santander (MS) presenta un cambio de dirección NE a NW, respecto a la cordillera oriental (CO) por el movimiento lateral izquierdo de las fallas Haca, Villa Caro, El Carmen, Bucaramanga y Lebrija (Figura 9)

La Falla de Lebrija es una estructura que tiene continuidad regional paralela a la Falla de Bucaramanga, configurando una nueva zona relativamente elongada y levantada por el movimiento sinistral de las dos fallas principales, entre estas dos se pueden encontrar fallas dextrales como La Esperanza, Río San Pablo, Santa Lucía, Río Cáchira, Solferino, Girón, Ruitoque, El Monje y Pescadero Velandia, (2017).

La Falla de Lebrija se muestra como una falla mayor asociado a la estructura en flor de Bucaramanga y se propone el límite occidental del MS (Figura 4), adicionalmente pone en contacto rocas del Paleozoico y Jurásico Velandia, (2017); Velandia et al., (2020)

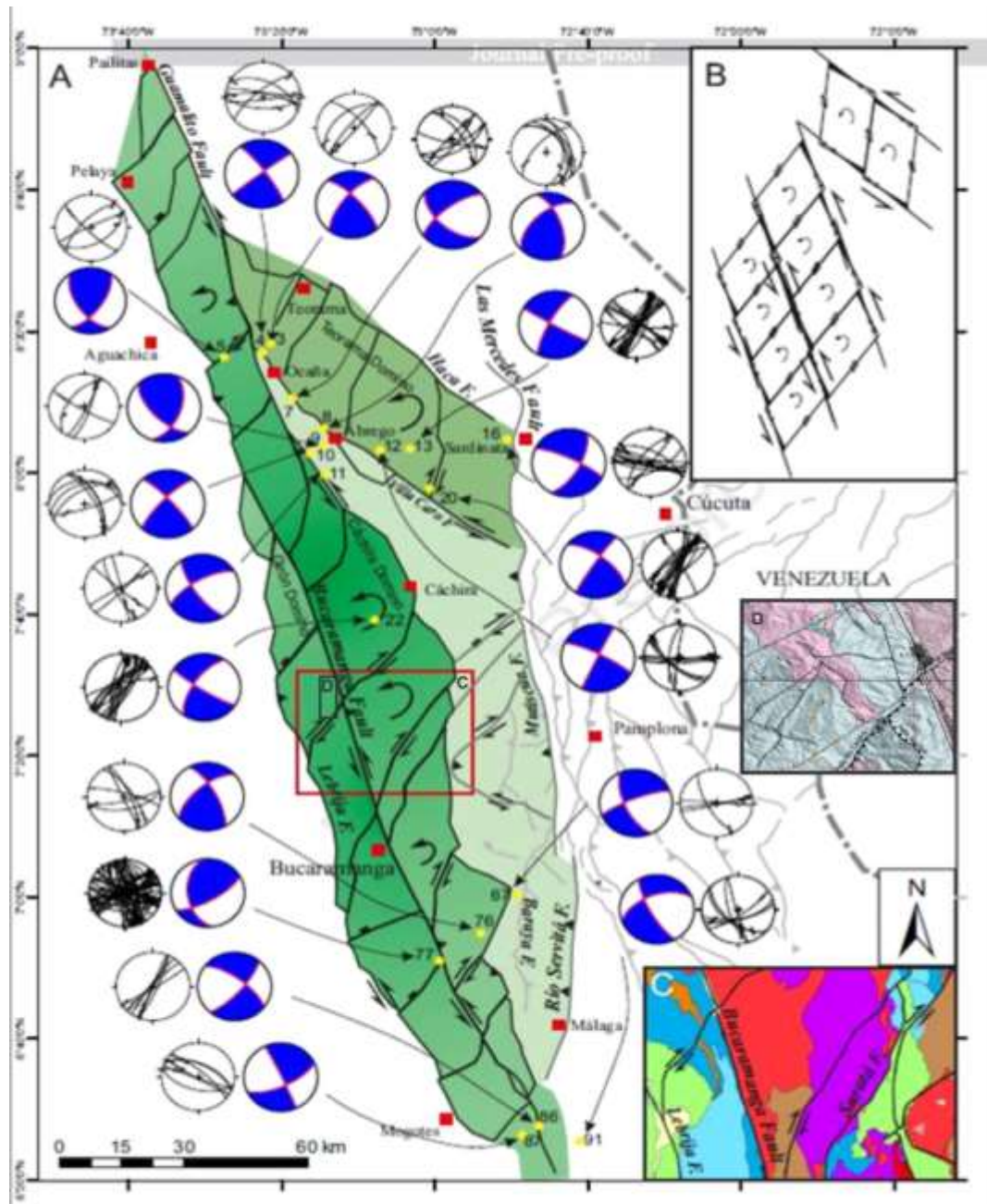


Figura 9. Modelo estructural modificado de Velandia et al., (2020). A) Modelo estructural de los tensores de falla. B) Modelo cizalla. C), Geología estructural regional de la zona estudio. D) Geología estructural local de la zona de estudio.

5.3.2. Local

El análisis estructural se elaboró a partir de la compilación de cartas geológicas, la construcción de modelos digitales de elevación y de mapas de sombras de fallas geológicas, En el desarrollo de los mapas derivados de elevación y de sombras se usaron imágenes satelitales con resolución 30 y 12,5 m (NASA - Instalación de satélites de Alaska, 2015), además mediante el trabajo de campo se tomaron sesenta (60) planos de falla (Tabla 3), que permitieron definir la continuidad de las falla principales y menores, y a su vez identificar las características estructurales (Figura 10).

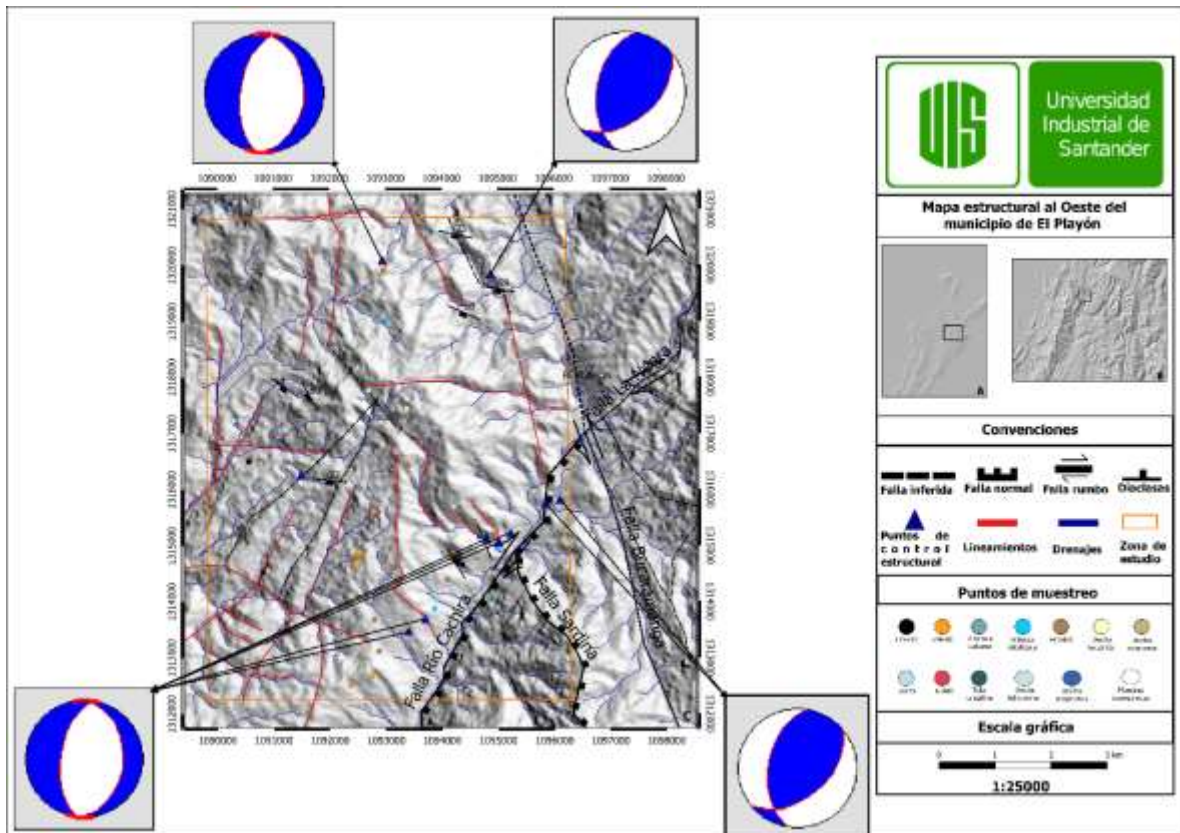


Figura 10. Mapa estructural local construido con base a modelos digitales de elevación, mapas de sombras y datos estructurales recolectados de la zona de estudio.

Tabla 3.

Tabla de datos de planos de falla.

| Estación | Tipo 1 | Rumbo | Buzamiento | Tipo 2 | Dirección | Orientación | Tipo |
|----------------|---------------------------------------|-------|------------|--------|-----------|-------------|-----------|
| EST 01 | Plano de falla | 314 | 28 | Estria | 85 | S | Inversa |
| | Plano de falla | 155 | 54 | Estria | 75 | S | Inversa |
| | Plano de falla | 170 | 87 | Estria | 55 | N | Inversa |
| | Plano de falla | 178 | 86 | Estria | 35 | N | Sinistral |
| | Plano de falla | 179 | 79 | Estria | 25 | N | Dextral |
| EST 02 | Plano de falla | 184 | 77 | Estria | 60 | S | Sinistral |
| | Plano de falla | 295 | 68 | Estria | 10 | W | Dextral |
| | Plano de falla | 181 | 85 | Estria | 15 | S | Sinistral |
| | Plano de falla | 184 | 88 | Estria | 5 | N | Sinistral |
| EST 03 | Plano de falla | 2 | 90 | Estria | 45 | S | Dextral |
| | Plano de falla | 78 | 62 | Estria | 40 | W | Dextral |
| | Plano de falla | 115 | 84 | Estria | 35 | W | Dextral |
| | Plano de falla | 10 | 61 | Estria | 55 | S | Sinistral |
| | Plano de falla | 278 | 71 | Estria | 45 | W | Dextral |
| | Plano de falla | 250 | 63 | Estria | 25 | W | Dextral |
| | Plano de falla | 214 | 54 | Estria | 45 | S | Dextral |
| EST 04 | Plano de falla | 205 | 76 | Estria | 40 | S | Dextral |
| | Plano de falla | 145 | 76 | Estria | 2 | W | Dextral |
| | Plano de falla | 18 | 40 | Estria | 50 | N | Normal |
| | Plano de falla | 29 | 34 | Estria | 70 | N | Normal |
| | Plano de falla | 45 | 31 | Estria | 45 | S | Inversa |
| | Plano de falla | 226 | 76 | Estria | 20 | S | Dextral |
| | Plano de falla | 35 | 78 | Estria | 30 | S | Sinistral |
| | Plano de falla | 184 | 70 | Estria | 75 | N | Normal |
| EST 05 | Plano de falla | 255 | 89 | Estria | 5 | S | Sinistral |
| | Plano de falla | 163 | 46 | Estria | 65 | N | Inversa |
| | Plano de falla | 197 | 56 | Estria | 25 | S | Sinistral |
| | Plano de falla | 35 | 89 | Estria | 60 | S | Sinistral |
| EST 06 | Plano de falla | 121 | 43 | Estria | 50 | S | Inversa |
| | Plano de falla | 0 | 66 | Estria | 45 | S | Dextral |
| | Plano de falla | 121 | 84 | Estria | 23 | S | Sinistral |
| EST 07 | Plano de falla | 305 | 86 | Estria | 20 | S | Sinistral |
| | Plano de falla | 18 | 64 | Estria | 20 | N | Sinistral |
| EST 08 | Plano de falla | 294 | 85 | Estria | 25 | S | Dextral |
| | Plano de falla | 136 | 86 | Estria | 70 | N | Inversa |
| | Plano de falla | 260 | 63 | Estria | 55 | W | Normal |
| | Plano de falla | 215 | 30 | Estria | 10 | S | Dextral |
| | Plano de falla | 50 | 47 | Estria | 40 | E | Dextral |
| | Plano de falla | 60 | 44 | Estria | 15 | E | Dextral |
| | Plano de falla | 57 | 53 | Estria | 25 | E | Dextral |
| | Plano de falla | 10 | 82 | Estria | 90 | E | Inversa |
| | Plano de falla | 155 | 44 | Estria | 40 | S | Inversa |
| | Plano de falla | 52 | 46 | Estria | 35 | E | Dextral |
| | Plano de falla | 84 | 46 | Estria | 10 | W | Dextral |
| | Plano de falla | 136 | 70 | Estria | 60 | S | Inversa |
| | Plano de falla | 210 | 73 | Estria | 40 | W | Dextral |
| | Plano de falla | 128 | 36 | Estria | 45 | W | Dextral |
| | Plano de falla | 290 | 57 | Estria | 55 | W | Normal |
| | Plano de falla | 144 | 47 | Estria | 35 | N | Dextral |
| | Plano de falla | 15 | 76 | Estria | 85 | S | Inversa |
| | Plano de falla | 205 | 63 | Estria | 80 | N | Inversa |
| | Plano de falla | 204 | 60 | Estria | 55 | N | Inversa |
| | Plano de falla | 158 | 36 | Estria | 45 | S | Sinistral |
| Plano de falla | 126 | 57 | Estria | 70 | S | Sinistral | |
| Plano de falla | 133 | 46 | Estria | 60 | W | Inversa | |
| Plano de falla | 215 | 79 | Estria | 71 | N | Inversa | |
| Plano de falla | 216 | 57 | Estria | 65 | N | Inversa | |
| EST 09 | Plano de falla Estrolito o de presión | 141 | 50 | - | - | - | - |
| | Plano de falla | 259 | 67 | Estria | 40 | W | Sinistral |
| | Plano de falla | 255 | 56 | Estria | 20 | W | Sinistral |

El principal régimen de esfuerzos obtenido de los datos tomados en campo (Figura 11) está dado por fallas de tipo inverso y componente dextral con rumbo de NE-SW y fallas con desplazamiento en rumbo de tipo sinistral con tendencia N-S. Este es un régimen principalmente compresivo con sigma 1 en dirección 300/1. La configuración de los datos encaja con el modelo de domino propuesto por Velandia et al. (2020) quienes establecen una zona de cizalla sinistral adherida al comportamiento de la Falla Bucaramanga y la Falla Lebrija con bloques internos que rotan y presentan cizalla de tipo dextral.

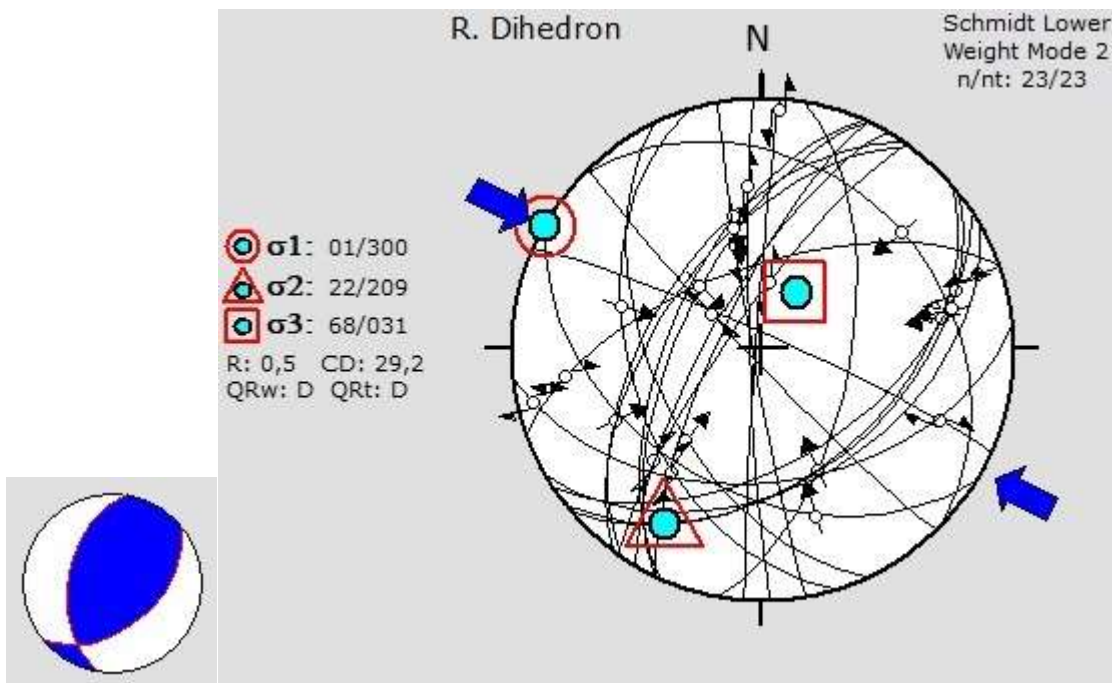


Figura 11. Diagrama de rosetas de régimen de esfuerzos principales de la zona de estudio.

El segundo régimen de esfuerzos obtenido (Figura 12) hace referencia a un sistema extensivo, formado por los planos de falla normales y algunos con desplazamiento en rumbo de tipo sinistral con tendencia en rumbo N-S. Este régimen se puede asociar a segmentos no reactivados de las etapas de rifting del Triásico-Jurásico o periodos previos del Proterozoico (Cediel et al., 2003; Mora et al., 2017).

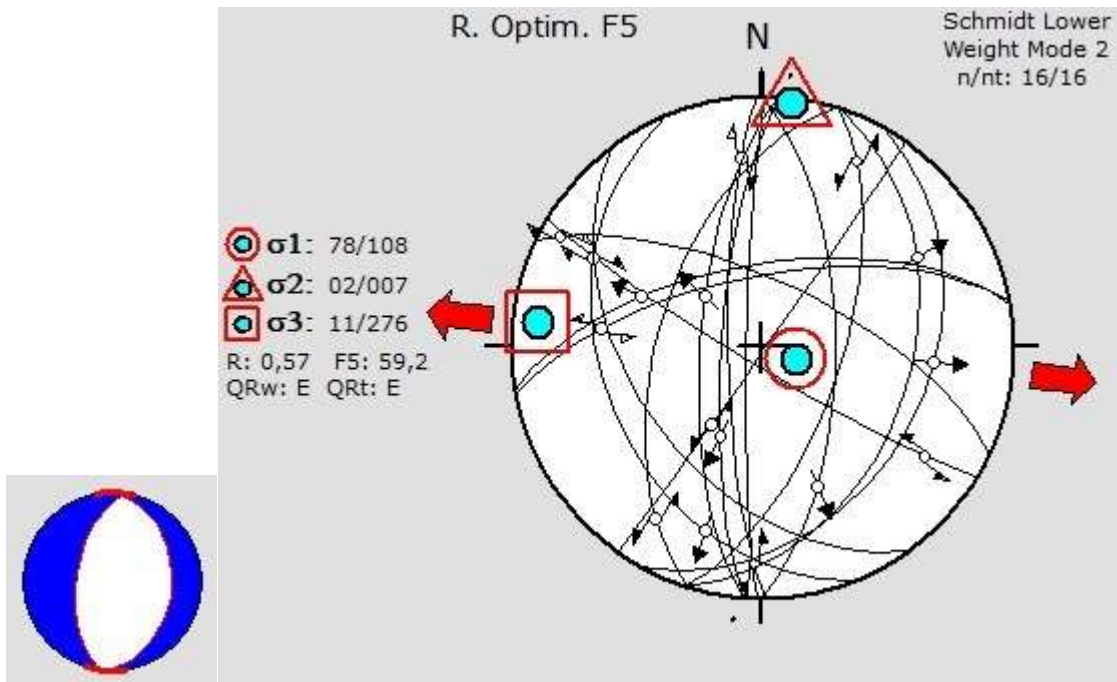


Figura 12. Diagrama de rosetas del segundo régimen de esfuerzos de la zona de estudio.

5.4. Marco geofísico

5.4.1. Resistividad

En la medición de las propiedades físicas de las rocas y minerales, la resistividad eléctrica muestra el mayor rango de variaciones. Mientras que, otras propiedades como la densidad y la velocidad de onda elástica tienen un rango de valores reducido.

Existen diferentes tipos de materiales en la naturaleza que se clasifican a partir de su capacidad para conducir la corriente eléctrica. Un material conductor generalmente se define como un material de resistividad menor a $10^{-5} \Omega.m$, en cambio un aislante presenta una resistividad mayor a $10^7 \Omega.m$, en medio de estos valores se encuentran los semiconductores, los cuales contienen una gran cantidad de electrones libres cuya movilidad es muy grande (Telford, 2004). Respecto al tipo de roca, por lo general las rocas ígneas tienen las resistividades más altas, las rocas sedimentarias las más bajas y las rocas metamórficas las intermedias; como se muestra en la Figura 15.

Las mediciones de resistividad en muestra de mano son llevadas a cabo en el laboratorio o en afloramientos, con fuentes de alimentación de baja frecuencia o corriente directa. En las medidas de laboratorio, es necesario que la muestra presente una forma homogénea mejor aún cilíndrica, ya que permite medir en más de una dirección para determinar la anisotropía de resistividad. El cálculo de la resistividad viene dado por la siguiente ecuación:

$$\rho = AV/LI$$

Donde, ρ corresponde a la resistividad del material medida en $\Omega.m$, A es el área transversal medida en metro cuadrado (m^2), V es el voltaje medido en voltios (V), L es la

longitud del cilindro de muestra de roca medido en metros (m) y I es la corriente medido en amperios (A) (Telford, 2004).

5.4.1.1. Factores que afectan la resistividad

Si se tiene un material que es conductor homogéneo e isótropo, el valor de la resistencia en cualquier punto y en cualquier dirección es igual. Dependiendo de la escala de medición los materiales rocosos pueden ser isotrópicos y homogéneos. En una escala de laboratorio, por ejemplo. Pero en una escala de afloramiento, la estratigrafía en rocas sedimentarias, la intrusión de diques, la sobreposición de eventos, y la meteorización física o química, hace que el medio sea un conductor heterogéneo y anisótropo (Tarbuck & Luthens, 2005). La heterogeneidad y anisotropía se definen por la naturaleza del tipo de suelo o material, humedad, compactación, orientación de la muestra para la medición, entre otros. (Páez y Goyeneche (2018))

5.4.1.1.1. Naturaleza del suelo

Los suelos pueden ser buenos, regulares o malos conductores de la corriente eléctrica. La Figura 11 muestra que la resistividad de estos materiales puede variar en un rango muy amplio. Con respecto al tipo de roca, cabe señalar que a medida que el tamaño de las partículas incrementa, la resistividad incrementa. Por ejemplo, una grava tiene mayor resistividad que la arena, y ésta presenta un valor mayor con respecto a la arcilla. La razón de esto se debe al tamaño de los vacíos que se generan en la estructura y el fluido que se encuentra en ellos. Si el fluido es agua, la resistividad será baja y si es aire, la resistividad será alta ya que el aire no es conductor de electricidad (Páez y Goyeneche, 2018).

5.4.1.1.2. Contenido de agua

Algunas investigaciones de resistividad han mostrado que esta propiedad depende en gran medida del contenido de agua. Por ejemplo, los resultados publicados por Ozcep et al., (2009) revelan que existe una relación exponencial entre el contenido de agua y resistividad (Figura 13).

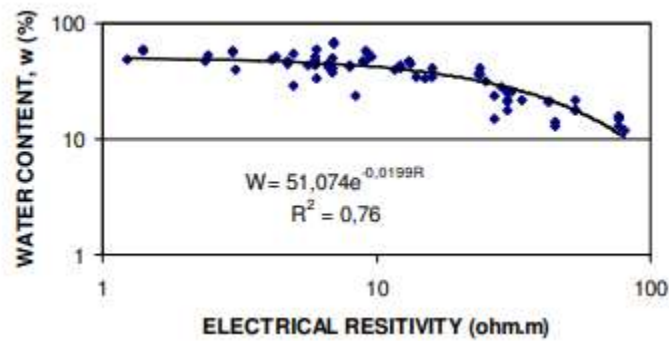


Figura 13. Diagrama de resistividad Vs contenido de agua. Tomado de Ozcep et al., (2009).

5.4.1.1.3. Compactación

Cuando los materiales se compactan, la resistividad disminuye ya que se reduce la cantidad de contenido de vacíos en la roca y por lo tanto disminuye el contenido de agua. Figura 14. (Páez y Goyeneche, 2018).

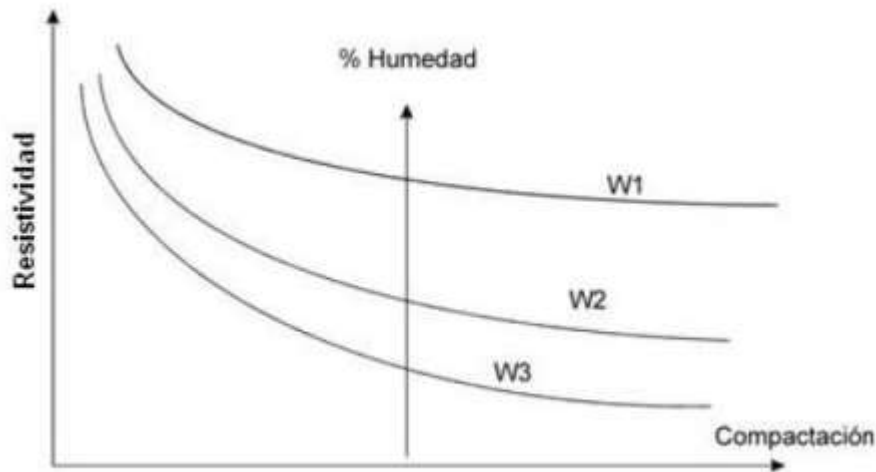


Figura 14. Diagrama de compactación Vs resistividad. Tomado de Páez y Goyeneche (2018).

5.4.2. Cargabilidad

Dentith & Mudge (2014) define la cargabilidad como la cuantificación del decaimiento del voltaje secundario a partir de una serie de mediciones discretas de voltaje en el tiempo de caída seleccionados. De acuerdo con Seigel (1959), la cargabilidad se mide en el dominio del tiempo y es expresada mediante la letra μ , por tanto, la cargabilidad es igual a:

$$\mu = \frac{e_x(t)}{E_0} \quad (1)$$

Sin embargo, en la práctica sólo se miden diferencias de potencial, el campo eléctrico es la primera derivada del potencial (Hallob, 1964, Slater & Lemes, 2002, Sogade et al., 2006, Andrade y Lopez, 2013), por lo cual la expresión (1) se puede reescribir como:

$$\mu = \frac{\Delta V(t)}{\Delta V(0)} \quad (2)$$

Orellana (1974) al integrar el decaimiento en el numerador de la ecuación 2, define a la cargabilidad en ms, como es apreciable en la ecuación 3.

$$\mu = \frac{\int_0^{t_1} \Delta V(t) dt}{\Delta V(t)_{t=\infty}}$$

El instrumento eficaz para medir la resistividad y cargabilidad en muestra de mano es el Sample Core Induced Polarization Tester (SCIP Tester) el cual simula un levantamiento de polarización inducida. La forma de la onda es la siguiente: ON+, OFF, ON-, OFF. Una corriente eléctrica es transmitida a través la muestra y luego cortada. Cuando la corriente circula a través de la muestra, la resistividad eléctrica (Rho) se calcula durante el tiempo ON de la forma de la onda. Cuando la corriente esta interrumpida, la tensión eléctrica disminuye gradualmente a las extremidades de la muestra y forma una curva de decaimiento (DECAY). La medida de aquella curva es la cargabilidad (M) (Instrumentation GDD, s.f.).

5.4.3. Porosidad

Una muestra puede presentar alta porosidad, y si sus poros se encuentran aislados entre sí, se dice que la misma no es efectiva. Es posible reconocer una porosidad derivada de la deposición, cristalización o enfriamiento de una roca, a esto se le denomina porosidad primaria, la cual puede ser afectada o alterada posteriormente por procesos geoquímicos, tectónicos, diagenéticos, entre otros, para formar una porosidad secundaria.

La geometría de los granos que conforman el sedimento juega un papel importante para definir las propiedades. Los granos más finos poseen una forma planar que crea un retículo de granos numerosos huecos en relación a granos esféricos de mayor diámetro, es

por este motivo que los materiales finos como las arcillas presentan una porosidad mayor que un cuerpo arenoso. Además de los espacios vacíos existentes por la granulometría de un sedimento, puede ocurrir una porosidad producto del fracturamiento de la roca ya sea por procesos hidrostáticos o estructurales.

La porosidad intercrystalina en rocas ígneas plutónicas formadas por la cristalización fraccionada de un magma es muy limitada, ya que el crecimiento de los cristales se da en cámaras magmáticas en un gran intervalo de tiempo, permitiendo que estos crezcan ocupando todo el espacio disponible sin dejar lugar a la presencia de huecos. Mientras que por otro lado las rocas volcánicas y subvolcánicas pueden presentar una porosidad macroscópica como resultado del rápido enfriamiento y descenso de presión al que es sometido el magma o como resultado de alteraciones mineralógicas por la percolación de fluidos meteóricos (Goldman, 2018) (ver tabla 3).

De esta forma se define la porosidad de un material como el porcentaje del volumen total que está ocupado por poros, los poros pueden estar saturados o no saturados dependiendo de la cantidad de fluido en él. La porosidad se expresa así:

$$n = \frac{V - V_s}{V} * 100$$

Donde, n es la porosidad, V es el volumen total que corresponde al volumen de la parte sólida (V_s) más el volumen de los poros.

Se denomina porosidad efectiva si solo se considera el volumen de los poros que están interconectados (Navarro, et al., s.f.). Las mediciones de porosidad en muestras de mano son llevadas a cabo en laboratorio implementando el equipo BLP-630 Automated Gas Porosimeter, permitiéndonos medir la porosidad efectiva (OFITE,2015).

5.4.4. Velocidad de onda P

La velocidad con la que se propaga las ondas elásticas a través de los materiales rocosos es una propiedad utilizada en su caracterización, especialmente desde el punto de vista de su calidad o grado de alteración, debido a su relación con las características petrográficas y más específicamente con los espacios vacíos (Tatham, 1982).

Un estudio detallado de las variables que interviene en las mediciones de la velocidad de propagación de ondas elásticas puede verse en Lana y Vutukuri (1978), donde aluden a las características intrínsecas del material (mineralogía, textura, porosidad y anisotropía).

Los valores de onda P (ver tabla 4), pueden ser utilizados directamente como índice de calidad de las rocas, se calcula como la relación entre la velocidad de propagación de las ondas P obtenida experimentalmente (V_p) y la calculada teóricamente a partir de la composición modal de la roca (V_p').

$$IQ = \frac{V_p}{V_p'} * 100$$

La onda P genera un esfuerzo de compresión en el material a lo largo de la dirección de propagación del frente de onda. Esto produce una oscilación en la misma dirección de propagación del material (Hernández, 2017).

La siguiente ecuación muestra que la onda P puede viajar a través de sólidos, líquidos y gases, los cuales son comprimibles ($K \neq 0$) (Lowrie, 2007):

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$$

Donde α es la velocidad de onda P, K es el módulo bulk, λ es la constante de Lamé, μ es equivalente al módulo de rigidez.

Las mediciones de velocidad de onda P se realizarán con el equipo PLT-2W Wireless Point Load Test System de la empresa GCTS. (GCTS Testing Systems, 2018).

5.4.5. Densidad

La densidad de una roca depende tanto de su composición mineral como de su porosidad, de tal forma la densidad en los cuerpos sedimentarios tiende a aumentar con la profundidad, debido a la compactación y a la cementación progresiva. La mayoría de las rocas ígneas y metamórficas tienen una porosidad despreciable, y su composición es la causa principal de la variación de densidad, que generalmente aumenta en la medida que disminuye la acidez, por lo tanto, se observa un contraste de densidad de las rocas ígneas básicas a las rocas ígneas ultra básicas. (ver tabla 5).

De esta forma la densidad se define como su masa por unidad de volumen. Si una masa m de material homogéneo tiene un volumen V , la densidad ρ es:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

La densidad es una propiedad intensiva del material, es decir que dos objetos constituidos del mismo material tienen igual densidad (Sears et al., 2009).

6. RESULTADOS

El reconocimiento litológico debe estar acompañado del análisis de las propiedades físicas de las rocas, lo cual permite comprender y tener información previa del subsuelo antes de la aplicación de un método geofísico. Ciento diecisiete (117) muestras tipo plug fueron utilizadas en estado secos y húmedo para efectuar la medición de cinco (5) propiedades físicas de la roca. Los valores teóricos y experimentales de las litologías descritas son resumidos en la Figura 15. Los valores teóricos y experimentales considerando factores que afectan las mediciones (meteorización, alteración y fallamiento) se resumen en la Figura 16.

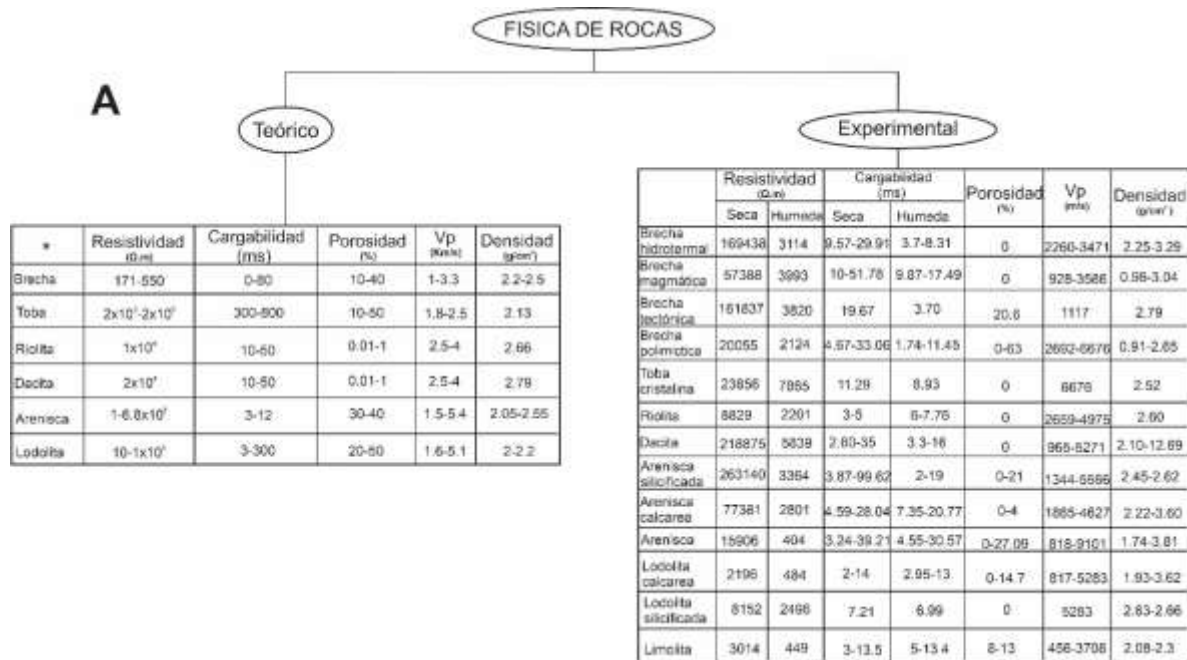


Figura 15. Diagrama de correlación de las propiedades físicas en roca fresca (resistividad, cargabilidad, porosidad, Vp, densidad) de los valores teórico y experimentales. (* modificado de Lowrie, (2007). Telford (2004). Arias et al., (2012). Van Blaricom (1992). Andrade y Lopez (2013). Sanders (1998) Custodio y Lamas (1983). Instituto Geofísico del Perú (2020). Milsom (2003), ASTM D5777 (2011). Gardner et al., (1974).

B

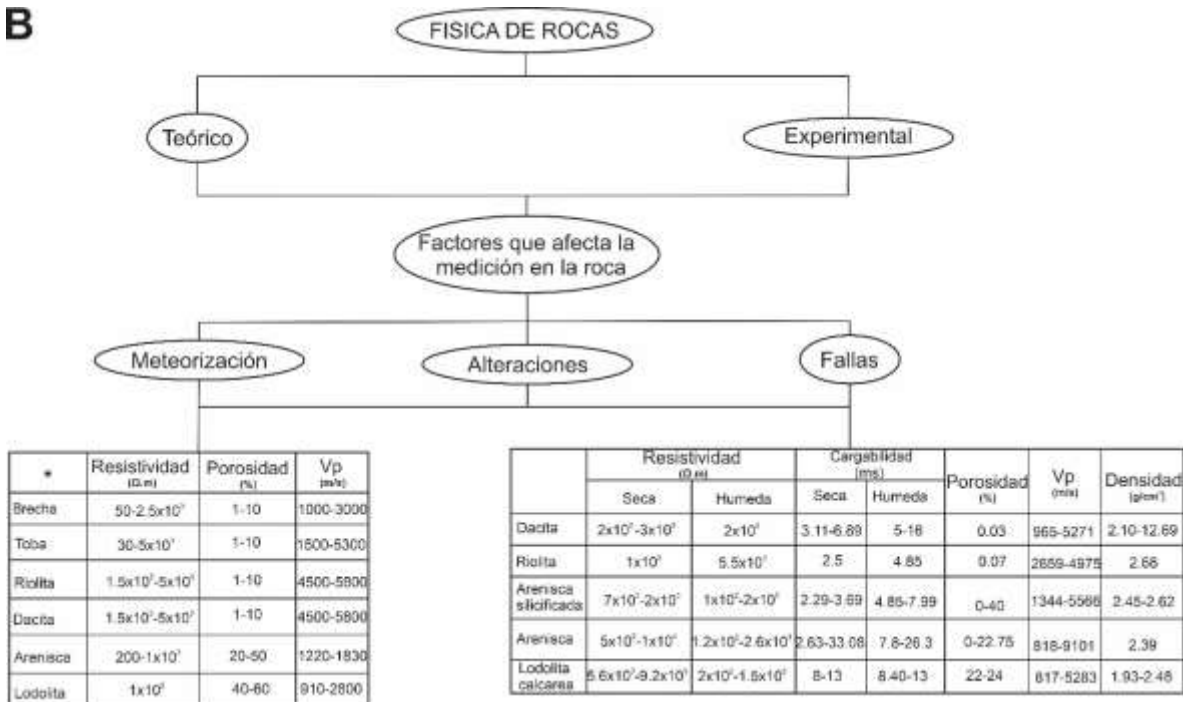


Figura 16. Diagrama de correlación de las propiedades físicas en roca afectadas (resistividad, cargabilidad, porosidad, Vp, densidad) de los valores teórico y experimentales. (* modificado de Lowrie, (2007). Telford (2004). Arias et al., (2012). Van Blaricom (1992). Andrade y LOPEZ (2013). SANDERS (1998) CUSTODIO Y LAMAS (1983). INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ (2020). MILSOM (2003), ASTM D5777 (2011). GARDNER ET AL., (1974).

6.1. Resistividad en núcleos (plugs)

Los datos obtenidos mediante las mediciones en laboratorio de los trece (13) diferentes tipos de rocas clasificadas a partir del análisis macroscópico de roca fueron:

Para la unidad geológica definida como riolitas de la Formación Bocas se presenta una amplia distribución, donde la resistividad varía entre 2124 ohm.m a 2218875.35 ohm.m, ya que esta unidad agrupa rocas volcánicas, subvolcánicas, volcánoclasticas. Especificando según la litología tenemos:

- Para las rocas definidas como brecha una amplia distribución donde la resistividad varía entre 307.03 ohm.m a 518142.75 ohm.m. Para todas las muestras la resistividad

disminuye a medida que aumenta el grado de saturación de agua (Anexo B). En el estado seco se encuentra la mayor dispersión de datos con rangos de resistividad de 45262.41 ohm.m a 518142.75 ohm.m; y la menor dispersión ocurre en el estado húmedo con rangos de 307.03 ohm.m a 3820.05 ohm.m. Los valores de resistividad de las (4) litologías definidas para las brechas son: brecha hidrotermal varía entre 1140.07 a 518142.75 ohm, brecha magmática varía entre 824.36 a 64851.98 ohm.m, Brecha tectónica varía entre 3820.05 a 61837.93 ohm.m y brecha polimíctica varía entre 307.03 ohm.m a 45262.41 ohm (Figura 17). La brecha hidrotermal presenta mayor resistividad en la muestra seca en comparación a los otros tipos de brecha debido a que su matriz composicional contiene rocas ígneas, en cambio la brecha presenta menor valor de resistividad en consecuencia que su matriz composicional es de rocas sedimentarias.

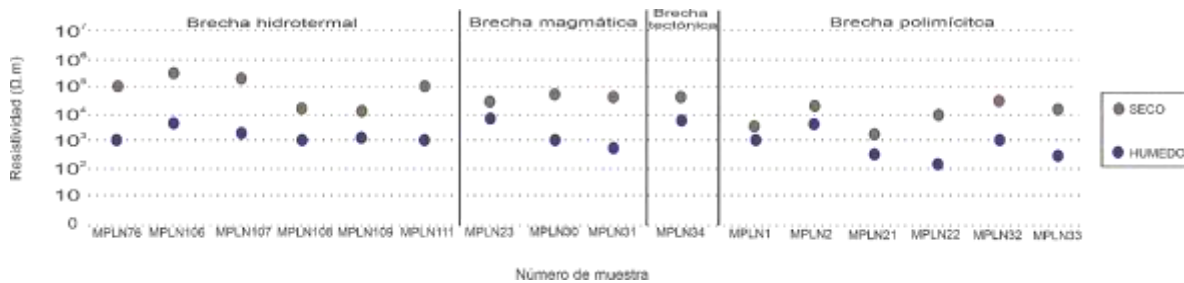


Figura 17. Diagrama de dispersión para resistividad en brechas.

- Para las rocas clasificadas como tobas lapilli su resistividad varía entre 7865 ohm.m a 23856 ohm.m (Figura 18).
- Para las rocas clasificadas como dacita su resistividad se encuentra entre los rangos 1197.85 ohm.m a 2212075.35 ohm.m, para el estado seco y rangos de 1197.85 ohm.m a 4205.11 ohm.m. cuando está saturado de agua (Figura 18).
- Para las rocas clasificadas como riolitas su resistividad se encuentra entre los rangos 1007.05 ohm.m a 113739.05, donde el estado seco es el que presenta mayor dispersión de datos con rangos de resistividad de 12119.98 ohm.m a 113739.5 ohm.m y una menor

dispersión en el estado húmedo con rangos de 1007.05 ohm.m a 3395.21 ohm.m (Figura 18).



Figura 18. Diagrama de dispersión para resistividad en rocas volcánicas.

Para la unidad geológica definida como Formación Bocas la resistividad varía entre 122.66 ohm.m a 1552929.25 ohm.m, ya que esta unidad agrupa areniscas, lodolitas y limolitas con algunas variaciones entre ellas, de tal manera que dentro de este tenemos:

- Para las rocas definidas como areniscas la resistividad varía entre 122.66 ohm.m a 1552929.25 ohm.m. para todas las muestras la resistividad disminuye a medida que aumenta el grado de saturación de agua (Anexo B), donde el estado seco es el que presenta mayor dispersión de datos con rangos de resistividad de 571.32 ohm.m a 1552929.25 ohm.m y una menor dispersión en el estado húmedo con rangos de 122.66 ohm.m a 20716.77 ohm.m. En este tipo de rocas se clasificaron en tres (3) litologías: arenisca silicificada varía entre 850.42 a 1552929.25 ohm, arenisca calcárea varía entre 5608.05 ohm.m a 264955.84 ohm.m, arenisca varía entre 122.66 ohm.m a 174976.08 ohm.m. La arenisca silicificada presenta mayor resistividad en comparación a los otros tipos de areniscas debido a que esta roca se encuentra alterada por silicificación producto de fluidos hidrotermales lo que ocasiona la disminución de la porosidad en la roca. (Figura 19).

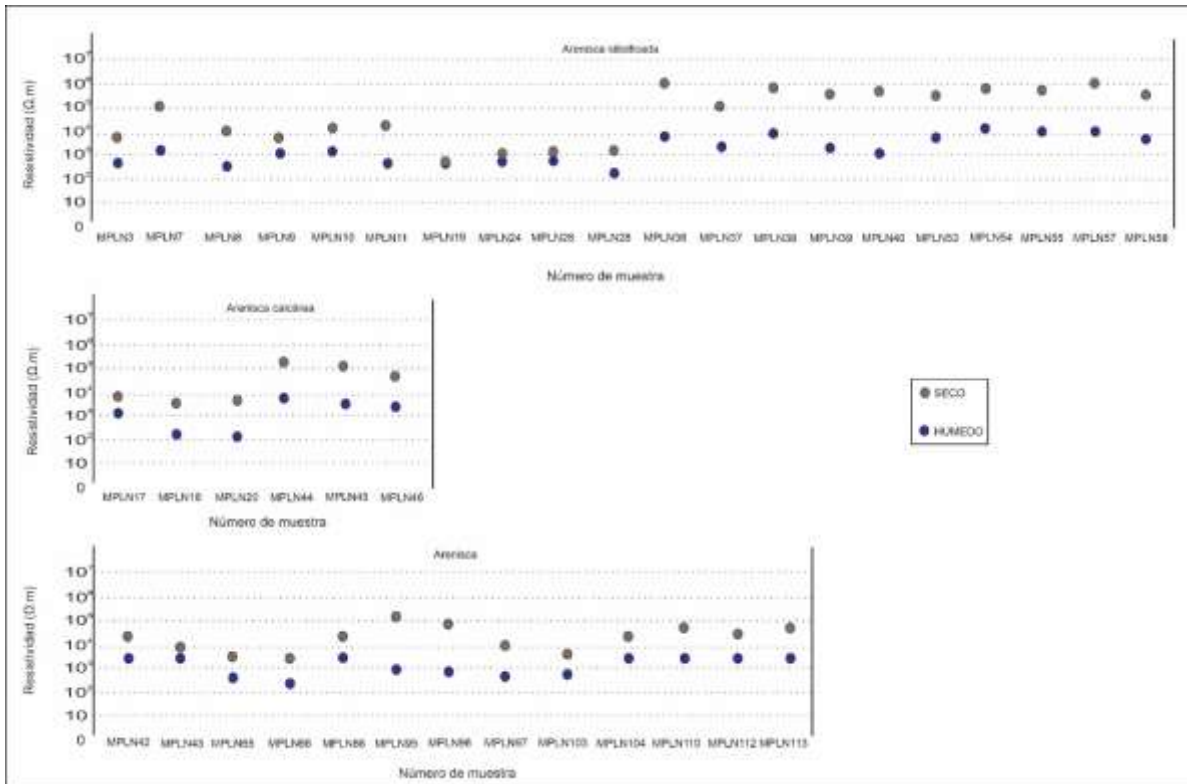


Figura 19. Diagrama de dispersión para resistividad en arenas.

- Para las rocas clasificadas como lodolitas la resistividad varía entre 213.04 ohm.m a 10513.02 ohm.m. para todas las muestras la resistividad disminuye a medida que aumenta el grado de saturación de agua (Anexo B), donde el estado seco es el que presenta mayor dispersión de datos con rangos de resistividad de 607.19 ohm.m a 10513.02 ohm.m y una menor dispersión en el estado húmedo con rangos de 213.04 ohm.m a 2496.44 ohm.m. En este tipo de rocas se clasificaron en dos (2) litologías: lodolita silicificada varía entre 2496.44 a 8152.39 ohm y lodolita calcárea varía entre 213.04 a 10513.02 ohm. Al comparar los resultados obtenidos entre la arenisca silicificada y la lodolita silicificada, se presenta que las lodolitas tienen exhibe valores con menor resistividad que las areniscas. (Figura 20).



Figura 20. Diagrama de dispersión para resistividad en lodos.

- Para las rocas definidas como limolitas su resistividad se encuentra entre los rangos 449 ohm.m a 3014 ohm.m. (Figura 21).

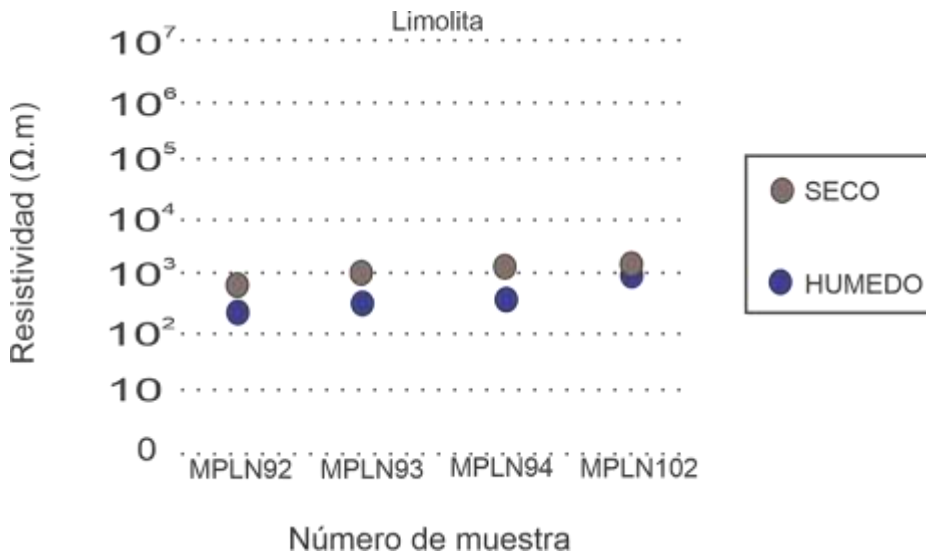


Figura 21. Diagrama de dispersión para resistividad en limos.

Finalmente, ambas unidades geológicas tienen ejemplares de degradación (meteorización), alteración y fallamiento, en los que se obtuvieron los siguientes valores:

- La dacita presenta una resistividad entre los rangos 2005 ohm.m a 3245 ohm.m. (Figura 22).
- La riolita su resistividad varía entre 1007.08 ohm.m a 5537.1 ohm.m. (Figura 22).
- Las areniscas silicificadas su resistividad exhibe variaciones entre 180.31 ohm.m a 59032.11 ohm.m. (Figura 22).

- La arenisca presenta variaciones de resistividad de 122.66 ohm.m a 10058.14 ohm.m. (Figura 22).
- La lodolita calcárea su resistividad se encuentra entre 520.81 ohm.m a 10576.48 ohm.m. (Figura 22).

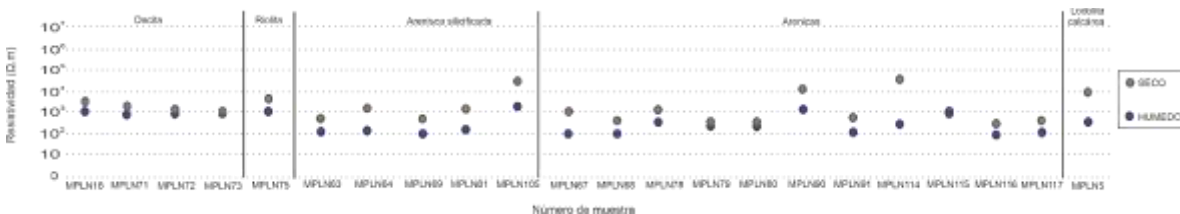


Figura 22. Diagrama de dispersión para resistividad en rocas meteorizadas.

6.2. Cargabilidad en núcleos (plugs)

La unidad geológica catalogada como riolitas de la Formación Bocas, presenta una variación de cargabilidad entre 1.74 ms a 262.69 ms, esto ocurre como resultado de que esta unidad agrupa rocas volcánicas, subvolcánicas, volcánoclasticas, de tal manera que dentro de este grupo tenemos:

- Para las rocas definidas como brecha su distribución de cargabilidad varía entre 1.74 ms a 51.78 ms, para todas las muestras la cargabilidad disminuye a medida que aumenta el grado de saturación de agua (Anexo B), las muestras en estado seco presentan mayor dispersión de datos con rangos de cargabilidad de 4.67 ms a 51.78 ms y menor dispersión en el estado húmedo con rangos de 3.70 ms a 17.49 ms. Este tipo de rocas se clasificaron en cuatro (4) litologías: brecha hidrotermal varía entre 3.7 a 29.91 ms, brecha magmática varía entre 9.87 a 51.78 ms, brecha tectónica varía entre 3.70 a 19.67 ms y brechavaría entre 1.74 a 33.06 ms. El cambio de la cargabilidad depende en mayor medida a la composición mineral de la roca, esto es apreciable en la muestra de brecha magmática (MPLYN30) con cargabilidad de hasta 51.78 ms debido a su contenido de pirita, cuya

cargabilidad es mayor en comparación con las otras muestras sin contenido de pirita (Figura 23).

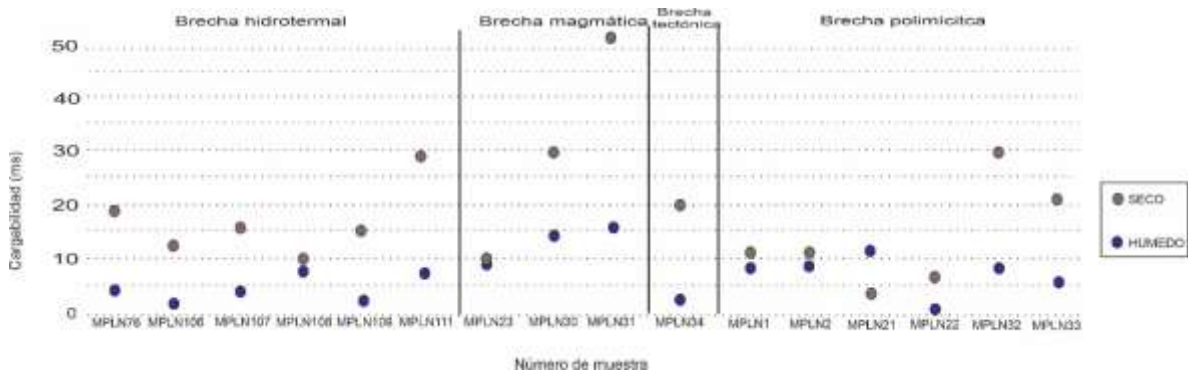


Figura 23. Diagrama de dispersión para cargabilidad en brechas.

- Para las rocas clasificadas como tobas lapilli su cargabilidad varía entre 8.93 ms a 11.29 ms (Figura 24).
- Para las rocas clasificadas como dacita su cargabilidad se encuentra entre los rangos 2.60 ms a 262.9 ms, donde el estado seco es el que presenta mayor dispersión de datos con rangos de cargabilidad de 2.60 a 262.9 ms y una menor dispersión en el estado húmedo con rangos de 3.3 ms a 16 ms. (Figura 24).
- Para las rocas clasificadas como riolita su cargabilidad se encuentra entre los rangos 3 ms a 7.76 ms (Figura 24).

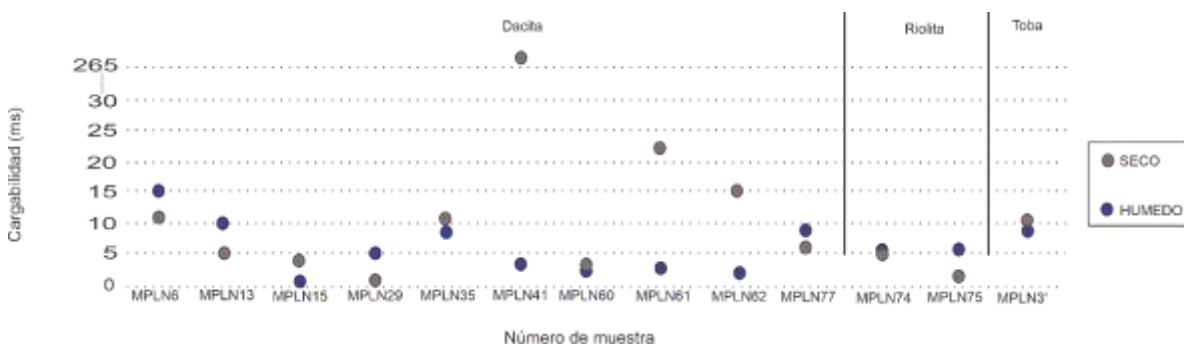


Figura 24. Diagrama de dispersión para cargabilidad en rocas volcánicas.

Dentro de la unidad geológica denominada Formación Bocas se exhibe una distribución de cargabilidad, entre 2 ms a 99.62 ms, en consecuencia, a que esta unidad agrupa areniscas, lodolitas y limolitas con algunas variaciones entre ellas, de tal manera que dentro de este grupo tenemos:

- Las areniscas muestran una distribución de cargabilidad que varía entre 2 ms a 99.62 ms. Para todas las muestras la cargabilidad disminuye a medida que aumenta el grado de saturación de agua (Anexo B). Este tipo de rocas se clasificaron en tres (3) litologías: arenisca silicificada varía entre 2 a 99.62 ms, arenisca calcárea varía entre 4.59 a 28.04 ms y areniscas varía entre 3.24 ms a 39.21 ms. (Figura 25).

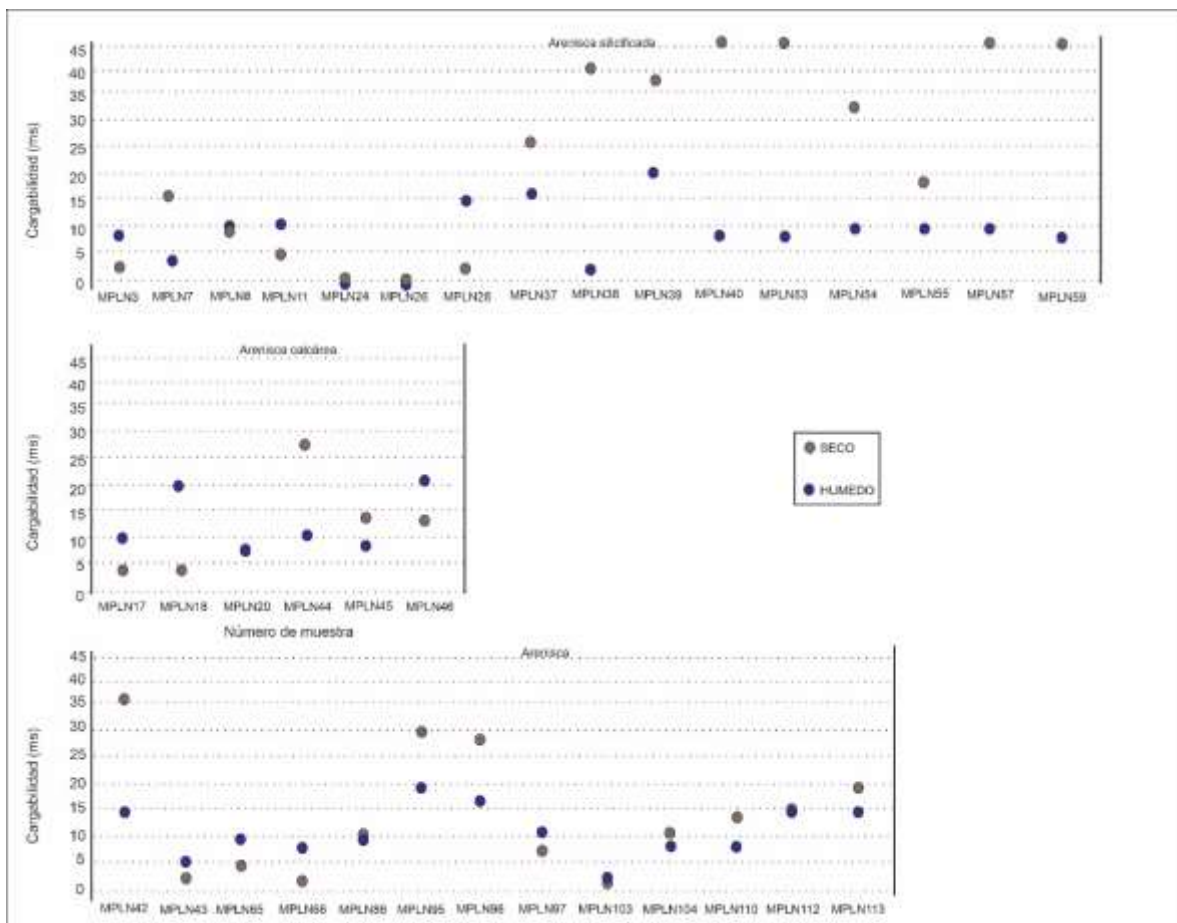


Figura 25. Diagrama de dispersión para cargabilidad en arenas.

- Las lodolitas muestran una distribución donde la cargabilidad varía entre 2 ms a 12 ms. En este tipo de rocas se clasificaron en dos (2) litologías: lodolita silicificada varía 6.99 a 7.21 ms y lodolita calcárea varía entre 2 a 12 ms. A medida que aumenta el grado de saturación de agua la cargabilidad aumenta (Figura 26).

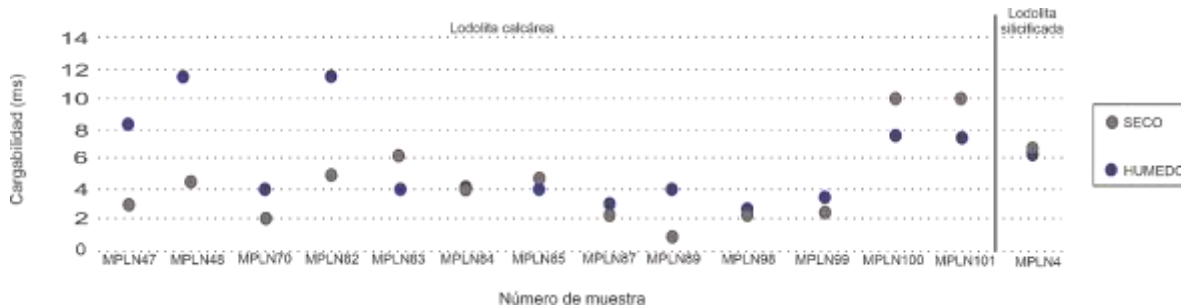


Figura 26. Diagrama de dispersión para cargabilidad en lodos.

- Las limolitas muestran una cargabilidad entre los rangos 5.1 ms a 13.5 ms (Figura 27).

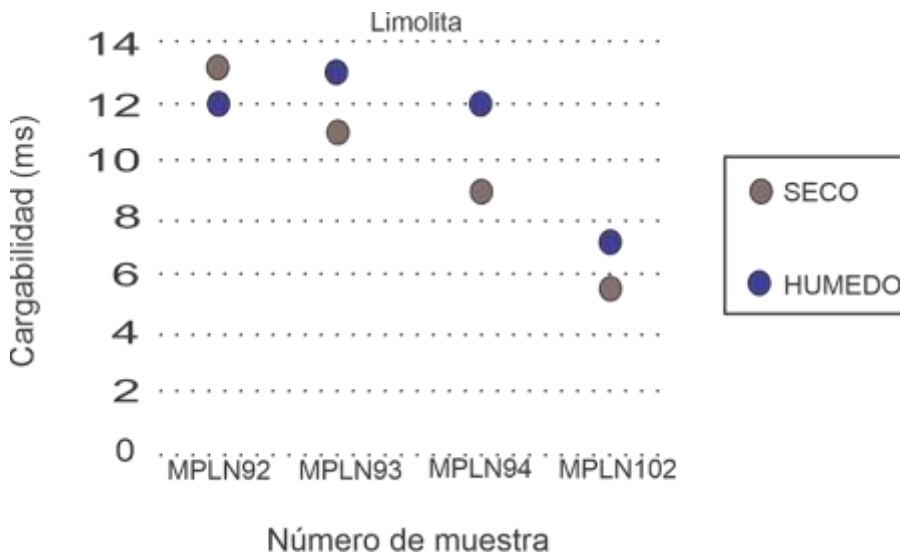


Figura 27. Diagrama de dispersión para cargabilidad en limos

Finalmente, ambas unidades geológicas tienen ejemplares de degradación (meteorización), alteración y fallamiento, en los que se obtuvieron los siguientes valores:

- En la dacita se exhibe valores de cargabilidad entre los rangos 3.11 ms a 16 ms (Figura 28).
- La riolitas su cargabilidad se encuentra entre los rangos 2.5 ms a 4.85 ms (Figura 28).
- En la arenisca silicificada la cargabilidad varía entre 2.29 ms a 7.99 ms (Figura 28).
- La arenisca su cargabilidad se encuentra entre los rangos 2.63 ms a 33.08 ms (Figura 28).
- La lodolita calcárea muestra valores de cargabilidad entre 8 ms a 13 ms (Figura 28).

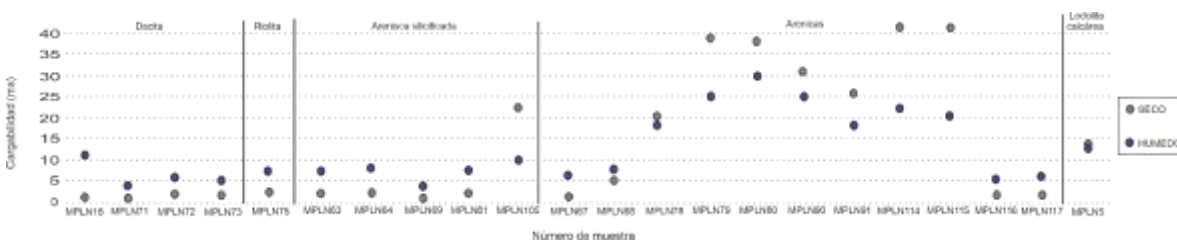


Figura 28. Diagrama de dispersión para cargabilidad en rocas meteorizadas.

6.3. Porosidad en núcleos (plugs)

La unidad geológica denominada riolitas de la Formación Bocas agrupa cuerpos de roca como: brecha, toba, dacita y riolita, cuyas porosidades son despreciables a excepción de la brecha tectónica que presenta porosidades de 20.6% y la brecha polimíctica que muestra una porosidad que varía entre 1.05% a 37.5% (Figura 29). La porosidad de la brecha tectónica y polimíctica es una porosidad secundaria.

La Formación Bocas presenta una amplia distribución de valores de porosidad, entre 0% a 40.27%, en consecuencia, a que esta unidad agrupa areniscas, lodolitas y limolitas con algunas variaciones entre ellas, de tal manera que dentro de este grupo tenemos:

- Las areniscas de la Formación Bocas catalogadas como areniscas silicificadas, areniscas calcáreas y areniscas, muestran una distribución que varían para arenisca silicificada en

el que la porosidad varía entre 0% a 40.27%, arenisca calcárea varía entre 0% a 4.5% y arenisca cuya porosidad varía entre 0% a 27.09%, en este grupo de la Formación Bocas, la arenisca silicificada la mediana de sus valores de porosidad corresponde a 5.26%, pero al ser una roca que ha sufrido alteración (silicificación) y ha sido afectada por procesos de meteorización y fracturamiento, la porosidad varía hasta 40.27%, por tanto, es la litología con mayor dispersión de datos (Figura 29).

- La lodolita calcárea su porosidad varía entre 0% a 22.31%; lodolita silicificada su porosidad es 0% (Figura 29).
- La porosidad de la limolita varía entre 8% a 13% (Figura 29).

Tanto en las areniscas calcáreas y lodolitas calcáreas se genera la porosidad en consecuencia de la reacción química del material calcáreo con el ácido carbónico disuelto en el agua que genera disolución parcial a lo largo de discontinuidades o a nivel de grano. Asimismo, la sustitución iónica del calcio del carbonato por magnesio reduce el volumen ocupado por la red cristalina aumentando así la porosidad.

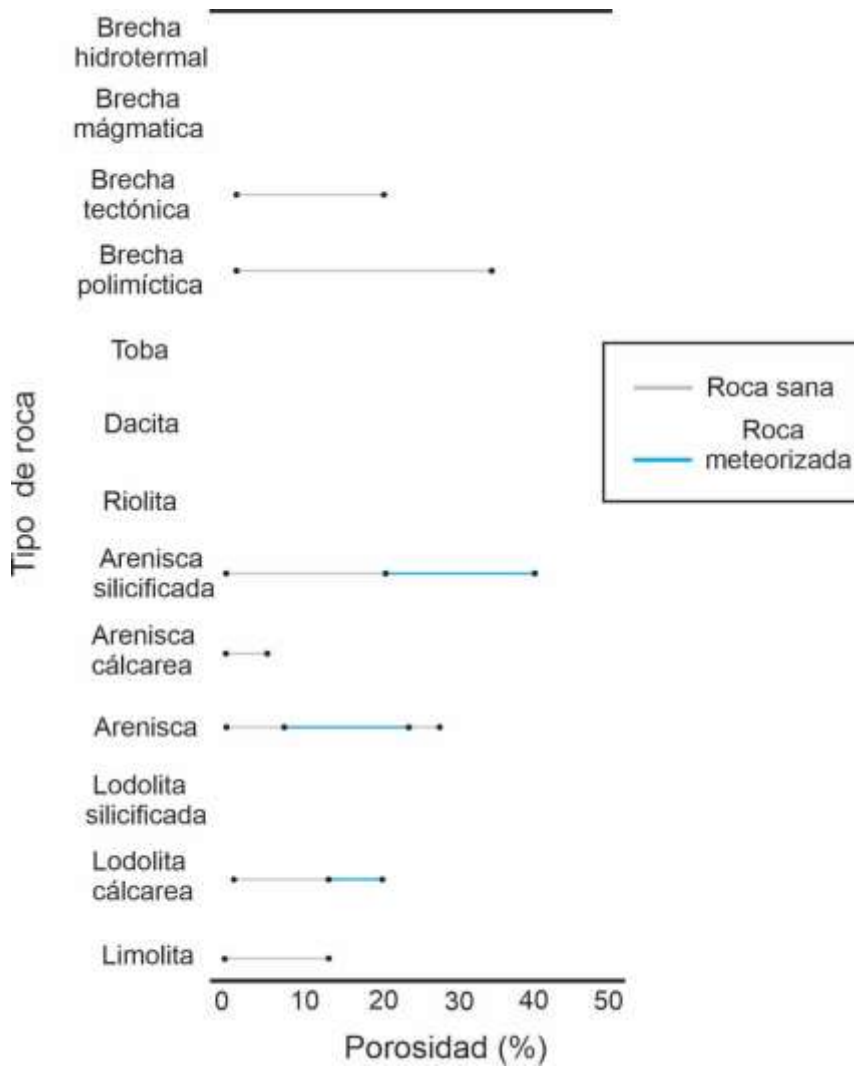


Figura 29. Diagrama de dispersión para porosidad en roca.

6.4. Velocidad de onda P en núcleos (plugs)

Las dacitas, riolitas, brechas y tobas conforman la unidad geológica denominada riolitas de la Formación Bocas, por tanto, se presenta una amplia distribución donde la V_p varía entre 928 m/s a 6676 m/s, de tal manera que dentro de esta unidad geológica se tiene:

- Para las rocas definidas como brecha su distribución de V_p varía entre 471 m/s a 6676 m/s. En este tipo de rocas se clasificaron en cuatro (4) litologías: brecha hidrotermal varía entre 471 a 2260 m/s, brecha magmática varía entre 928 a 3586 m/s, brecha tectónica es 1117 m/s y brecha polimíctica varía entre 2692 y 6676 m/s (Figura 30).
- Para las Tobas lapilli su V_p es de 6676 m/s (Figura 30).
- En las Dacitas su V_p se encuentra entre los rangos de 965 m/s a 5271 m/s, la amplia variación de la distribución de datos es ocasionada por variaciones en la composición mineralógica de las rocas. (Figura 30).
- La V_p de la riolita se encuentra entre los rangos 2659 m/s a 4975 m/s, estas rocas presentan rangos similares a las dacitas (Figura 30).

La unidad geológica definida como Formación Boca, presenta una distribución de V_p entre 817 m/s a 9101 m/s, debido a que esta unidad agrupa areniscas, lodolitas y limolitas con algunas variaciones entre ellas, de tal manera que dentro de este grupo tenemos:

- Para la arenisca la distribución de V_p varía entre 818 m/s a 9101 m/s. En este tipo de rocas se clasificaron en tres (3) litologías: arenisca silicificada varía entre 1344 a 5566 m/s, dado por las variaciones de porosidad, densidad y mineralógicas producto de la alteración silicificada de la roca, arenisca calcárea varía entre 1865 a 4627 m/s, y arenisca varía entre 818 m/s a 9101 (Figura 30).

- En la lodolita la distribución de V_p varía entre 817 m/s a 5283 m/s. En este tipo de roca se clasificaron en dos (2) litologías: lodolita silicificada es 5283 m/s y lodolita calcárea varía entre 817 a 5283 m/s (Figura 30). Al comparar los resultados obtenidos de los datos de lodos, se presentan similitud debido a que en factores como porosidad y mineralogía son similares a excepción de algunos constituyentes.
- Para las rocas clasificadas como limolitas su V_p se encuentra entre los rangos 456 m/s a 3708 m/s. (Figura 30).

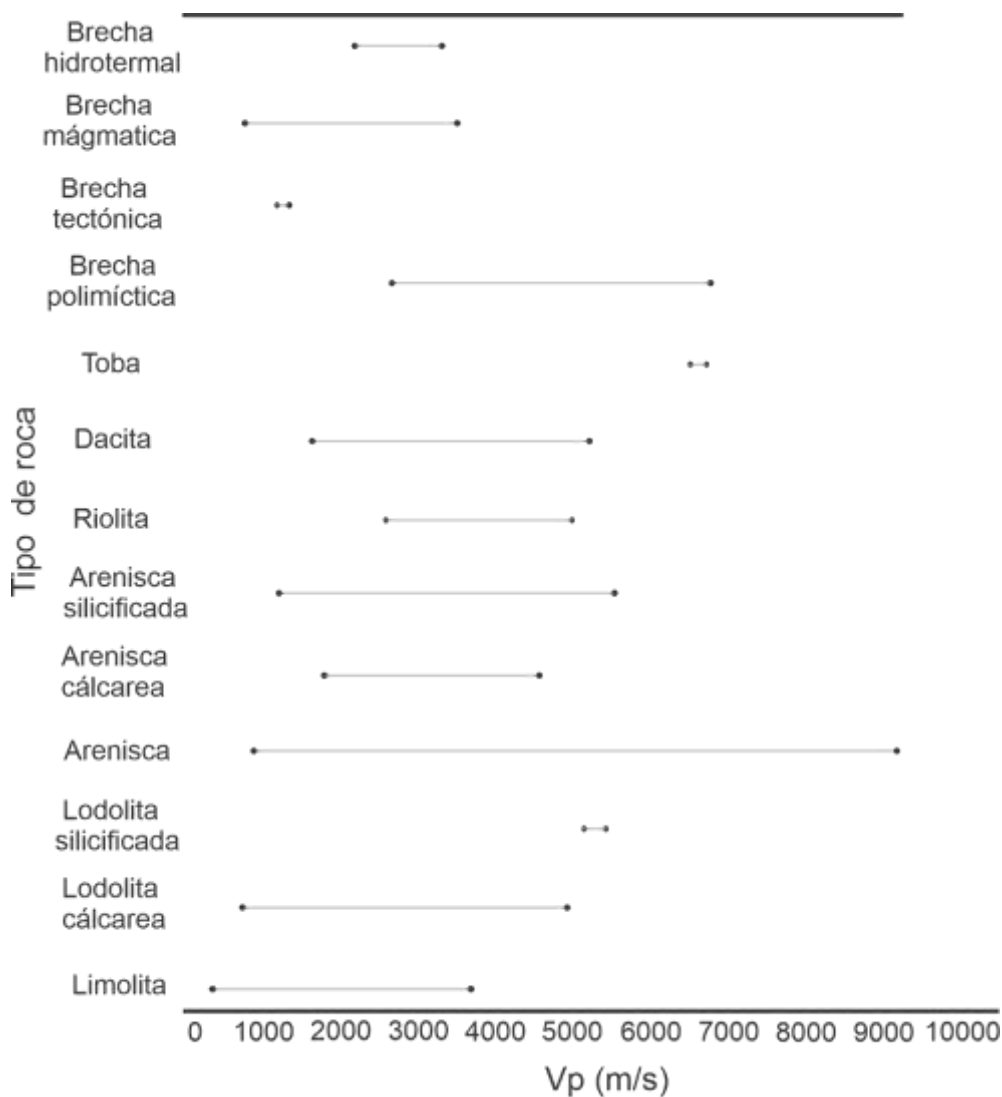


Figura 30. Diagrama de dispersión para V_p en roca.

6.5. Densidad en roca

Las riolitas de la Formación Bocas están conformadas por rocas de composición dacítica, riolítica, brechas y tobas, por tanto, presenta una amplia distribución donde la densidad varía entre 0.91 g/cm^3 a 12.69 g/cm^3 , de tal manera que dentro de esta unidad geológica se tiene:

- Las rocas definidas como brecha muestran una distribución de densidad que varía entre 0.91 g/cm^3 a 3.29 g/cm^3 . En este tipo de rocas se clasificaron en cuatro (4) litologías: brecha hidrotermal varía entre 2.0 a 3.29 g/cm^3 , brecha magmática varía entre 0.98 a 3.04 g/cm^3 , brecha tectónica es 2.79 g/cm^3 y brecha polimíctica varía entre 0.91 a 2.65 g/cm^3 (Figura 31). La brecha hidrotermal y la brecha polimíctica exhiben valores similares debido a que el magma formador de estas rocas es de composición similar.
- Para las Tobas lapilli su densidad es 2.52 g/cm^3 (Figura 31).
- La dacita su densidad se encuentra entre los rangos de 2.10 g/cm^3 a 12.69 g/cm^3 , (Figura 31). Por otra parte, las riolitas tienen una densidad de 2.60 g/cm^3 , esta roca presenta valores similares a las dacitas ya que su composición mineralógica es similar.

Para la unidad geológica definida como Formación Bocas su distribución de densidad varía entre 1.74 g/cm^3 a 3.81 g/cm^3 , producto que esta unidad agrupa areniscas, lodolitas y limolitas con algunas variaciones entre ellas, de tal manera que dentro de este grupo tenemos:

- Las rocas definidas como areniscas muestran una distribución donde la densidad varía entre 1.74 g/cm^3 a 3.81 g/cm^3 . En este tipo de rocas se clasificaron en tres (3) litologías: arenisca silicificada varía entre 2.45 a 2.62 g/cm^3 , arenisca calcárea varía entre 2.22 a 3.60 g/cm^3 , arenisca varía entre 1.74 a 3.81 g/cm^3 (Figura 31).

- La lodolita presenta una variación de densidad entre 1.93 g/cm³ a 3.62 g/cm³. En este tipo de rocas se clasificaron en dos (2) litologías: lodolita silicificada es 2.66 g/cm³ y la lodolita calcárea varía entre 1.93 a 3.62 g/cm³ (Figura 31).
- Para las rocas clasificadas como limolitas su densidad se encuentra entre los rangos de 2.08 g/cm³ a 2.3 g/cm³ (Figura 31).

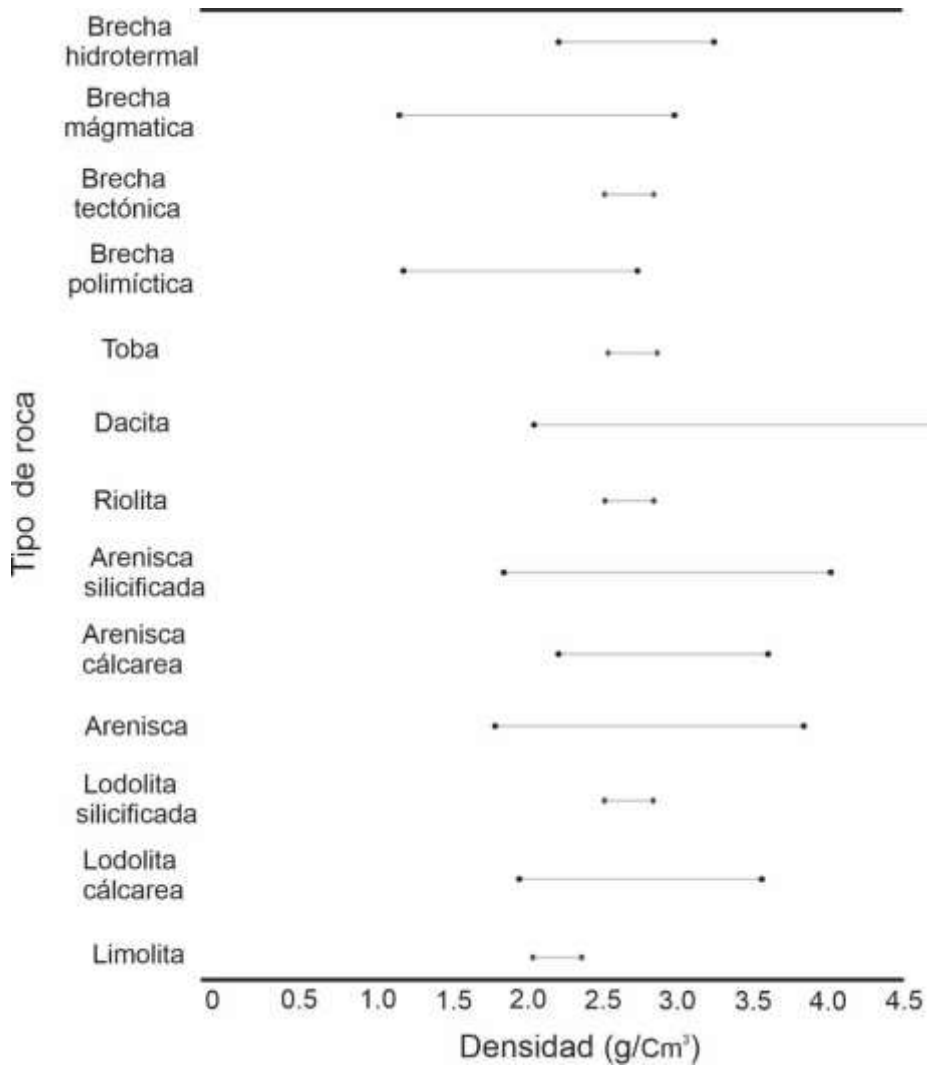


Figura 31. Diagrama de dispersión para densidad en roca.

6.6. Relaciones de propiedades

Las relaciones intrínsecas entre las propiedades físicas de las rocas como resistividad, porosidad, velocidad y la densidad, se han calculado para diferentes litologías, con el objetivo de hacer una de estas propiedades predecible con el conocimiento de la otra Nafe-Drake (Nafe and Drake, 1957), Birch's (1961), Christensen and Salisbury (1975), Gardner et al. (1974) y Christensen and Mooney (1995) documentan las pruebas de laboratorio y las relaciones propuestas para todo tipo de litología.

6.6.1. Velocidad de onda P – densidad

Con base a la Figura 32 no se aprecia relación lineal entre los resultados obtenidos de la relación velocidad de onda P y la densidad en la mayoría de litologías. En las areniscas silicificadas, areniscas, y lodolitas calcáreas podría sugerirse la existencia de más de una línea de tendencia.

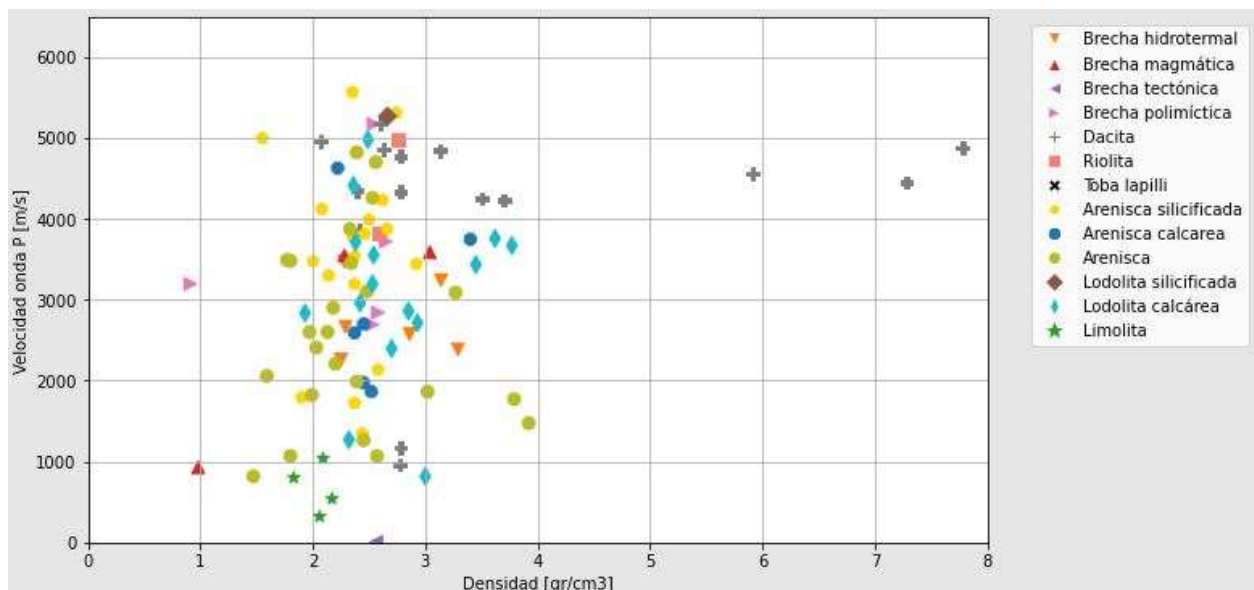


Figura 32. Relación de Velocidad de onda P Vs Densidad.

6.6.2. Porosidad – densidad

En los resultados obtenidos de la porosidad VS densidad en areniscas, areniscas silicificadas y varias lodolitas, se obtiene que a mayor porosidad menor densidad de los materiales. Las otras litologías no muestran tendencias entre estas dos propiedades.

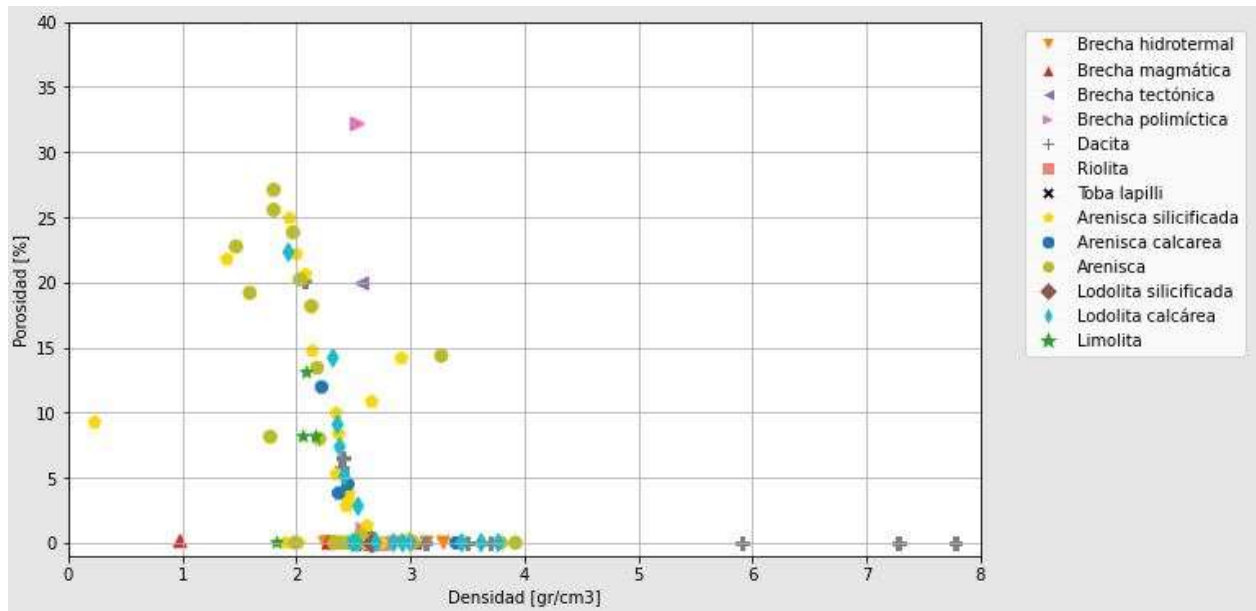


Figura 33. Relación de Porosidad Vs Densidad.

6.6.3. Porosidad – velocidad de onda p

Con base en la relación se obtiene que, para las areniscas, se observa que a mayor porosidad, menor velocidad de onda p. Para el resto de litologías no puede establecerse una relación entre estas dos propiedades.

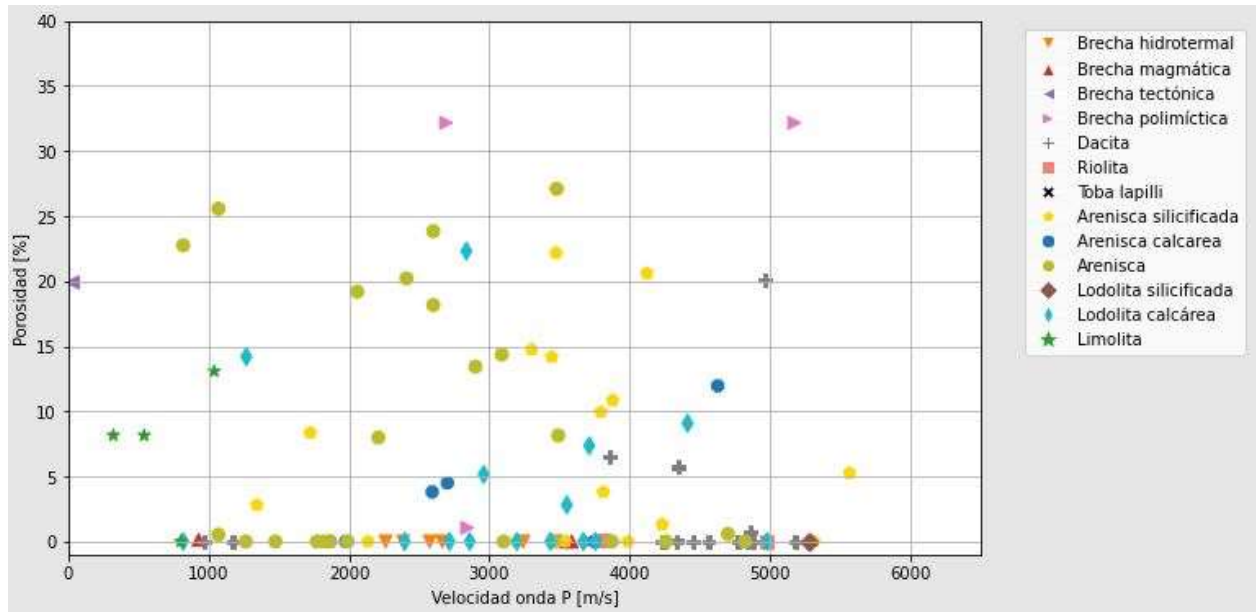


Figura 34. Relación Porosidad Vs Velocidad de onda p.

6.6.4. Porosidad – Resistividad

La resistividad de las muestras húmedas de arenisca, luego del 15% de porosidad, aumenta cuando la porosidad aumenta, sugiriendo baja conectividad entre los poros. El resto de litologías no muestra una relación entre estas propiedades.

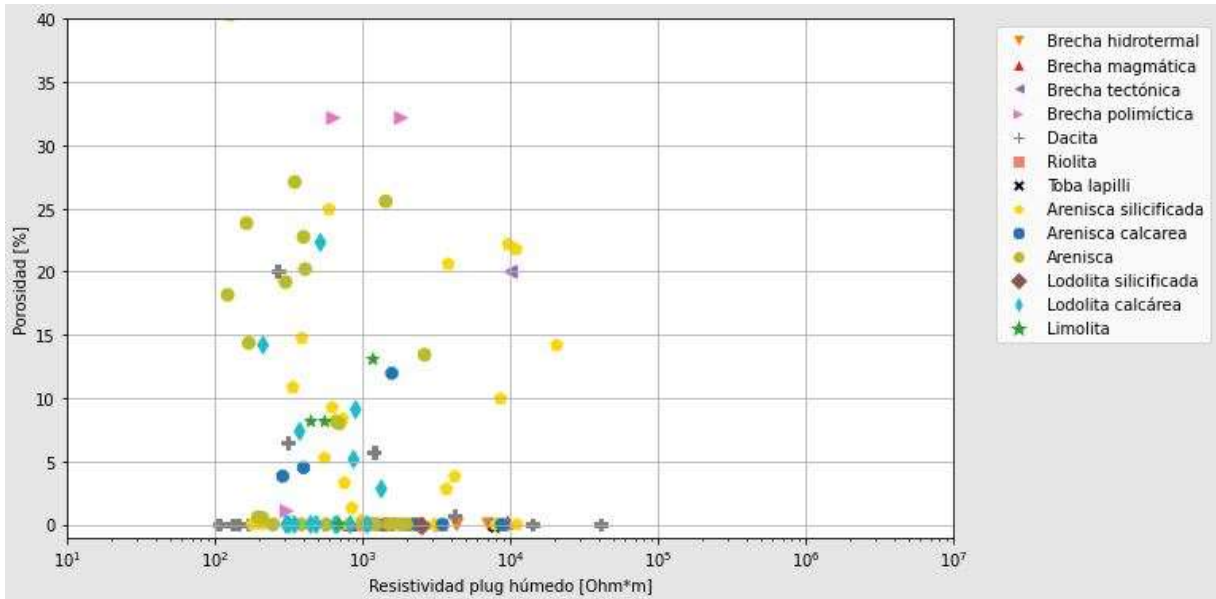


Figura 35. Relación Porosidad Vs resistividad.

6.7. Mapas de interpolación IDW

El reconocimiento litológico nos permite observar la distribución de las diferentes masas rocosas y la relación entre ellas, esta al ser acompañado del análisis de las propiedades físicas de la roca permite comprender y tener información del subsuelo. Por lo tanto, a partir de la información recolectada previamente mediante las mediciones de física de roca (resistividad, cargabilidad, porosidad, velocidad de onda p), se pretende observar las propiedades físicas de la roca con base a la distribución espacial de las muestras recolectadas (Figura 36).

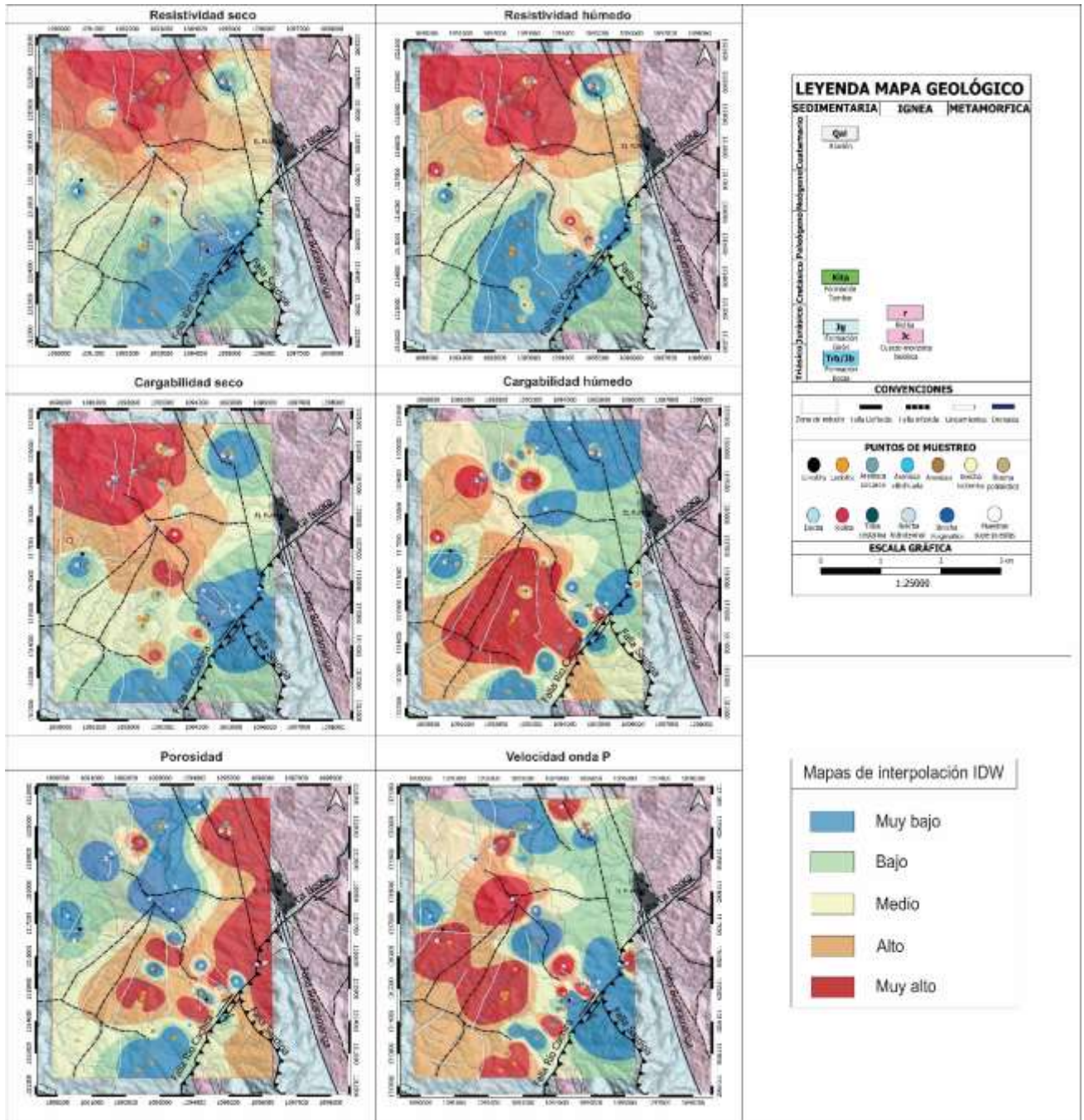


Figura 36. Mapas de interpolación IDW “A) resistividad seco. B) resistividad húmedo. C) cargabilidad seco. D) cargabilidad húmedo. E) porosidad. F) V_p .

1. Las muestras de areniscas que se encuentran afectadas por procesos de meteorización (MPLYN78, MPLYN79, MPLYN80, MPLYN90, MPLYN116, MPLYN117) producto de su interacción con los sistemas de fallas (Falla Río Cáchira y Falla Sardina) (Figura 36), presentan valores de resistividad que varían entre 145.65 ohm.m a 196 ohm.m; su cargabilidad varía entre 3.24 ms a 19.58 ms (Figura 22 y 28), cuyo valores disminuyen en comparación de sus homólogos que no se encuentra afectados (MPLYN95, MPLYN96, MPLYN97, MPLYN114, MPLYN115), los cuales tienen valores de resistividad que varían entre 348.87 ohm.m a 91507.83 ohm.m y cargabilidad entre 8.77 ms a 31.40 ms (Figura 19 y 25),
2. Las muestras de rocas volcánicas “dacitas y riolitas” que se encuentran cercanas a las de Falla Río Cáchira y Falla Sardina (MPLYN6, MPLYN60, MPLYN61, MPLYN62, MPLYN75, MPLYN77) (Figura 36), presentan valores de resistividad que varían entre 1197.85 ohm.m a 13666.48 ohm.m (Figura 18), por otro lado los cuerpos volcánicos “dacita y riolita” ubicados lejos de los sistemas de fallas (MPLYN12, MPLYN13, MPLYN14, MPLYN15, MPLYN74), presentan valores de resistividad que varían entre 1307.85 ohm.m a 19656.48 ohm.m; lo cual indica que los valores de resistividad son similares en las rocas volcánicas afectadas y no afectadas por los sistemas de falla, por consiguiente, la tectónica no es un factor diferenciador significativo para este tipo de rocas en la propiedad de resistividad eléctrica.
3. En las zonas cercanas a los sistemas de falla (falla Rio Cáchira, falla Sardina y falla Bucaramanga) (Figura 36), las rocas presentan valores altos de porosidad con respecto a las rocas de composición similar que no están siendo afectadas

tectónicamente (Figura 15, 16 Y 29), se determina que en las brechas polimícticas y tectónicas, su porosidad es secundaria.

4. El análisis de velocidad de onda P en la Figura 36, permite inferir que el control estructural no es un determinante ni significativo en la medición de velocidad de onda P en rocas duras, se aprecia en zonas con estructuras geológicas altos y bajos valores de velocidad de onda P, esto ocurre de igual manera en las zonas sin control estructural, por tanto, sus variaciones de V_p están controladas por la composición y textura de la roca. Por el contrario, en las rocas sedimentarias las cuales esta cercanas a la Falla Río Cáchira y Falla Sardina, se observa disminución en los resultados de V_p en comparación con aquellas muestras de roca que no se encuentran cercanas a los sistemas de falla.

6.8. Modelos directos

Para unificar los valores de resistividad, velocidad de onda P y densidad adquiridos en laboratorio, se calculó la mediana y el valor promedio ponderado de las diferentes litologías medidas (Tabla 4, 5, 6).

Tabla 4.

Mediana y promedio ponderado de los valores de resistividad adquiridos en laboratorio en muestra húmeda y seca.

| | | | | | | | |
|---------------------------|---|---|------------------------------|----------------|---|---|---------------------------|
| MEDIANA | RESISTIVIDAD SECO (Ω^*m) | RESISTIVIDAD HUMEDO (Ω^*m) | Limolita | MEDIANA | RESISTIVIDAD SECO (Ω^*m) | RESISTIVIDAD HUMEDO (Ω^*m) | Riolita |
| | 3014 | 449 | | | 62929,74 | 2201,13 | |
| MEDIANA | RESISTIVIDAD SECO (Ω^*m) | RESISTIVIDAD HUMEDO (Ω^*m) | Lodolita silicificada | MEDIANA | RESISTIVIDAD SECO (Ω^*m) | RESISTIVIDAD HUMEDO (Ω^*m) | Dacita |
| | 8152,39 | 2496,44 | | | 10658,74 | 2015,03 | |
| PROMEDIO PONDERADO | RESISTIVIDAD SECO (Ω^*m) | RESISTIVIDAD HUMEDO (Ω^*m) | Lodolita calcárea | MEDIANA | RESISTIVIDAD SECO (Ω^*m) | RESISTIVIDAD HUMEDO (Ω^*m) | Brecha polimictica |
| | 2087,46 | 572,79 | | | 18453,97 | 1056,3 | |
| PROMEDIO PONDERADO | RESISTIVIDAD SECO (Ω^*m) | RESISTIVIDAD HUMEDO (Ω^*m) | Arenisca | MEDIANA | RESISTIVIDAD SECO (Ω^*m) | RESISTIVIDAD HUMEDO (Ω^*m) | Brecha tectonica |
| | 19785,99 | 852,74 | | | 61836,93 | 9950,31 | |
| PROMEDIO PONDERADO | RESISTIVIDAD SECO (Ω^*m) | RESISTIVIDAD HUMEDO (Ω^*m) | Arenisca silicificada | MEDIANA | RESISTIVIDAD SECO (Ω^*m) | RESISTIVIDAD HUMEDO (Ω^*m) | Brecha magmatica |
| | 157347,02 | 3820,87 | | | 57387,68 | 1492,38 | |
| MEDIANA | RESISTIVIDAD SECO (Ω^*m) | RESISTIVIDAD HUMEDO (Ω^*m) | Arenisca Calcarea | MEDIANA | RESISTIVIDAD SECO (Ω^*m) | RESISTIVIDAD HUMEDO (Ω^*m) | Brecha hidrotermal |
| | 40879,61 | 1931,45 | | | 119082,81 | 1944,01 | |
| MEDIANA | RESISTIVIDAD SECO (Ω^*m) | RESISTIVIDAD HUMEDO (Ω^*m) | Toba | | | | |
| | 23856 | 7865 | | | | | |

Tabla 5.
Mediana de los valores de Vp adquiridos en laboratorio.

| | | | | | |
|---------|----------|-----------------------|---------|----------|--------------------|
| MEDIANA | VP (m/s) | Limolita | MEDIANA | VP (m/s) | Riolita |
| | 600 | | | 3817 | |
| MEDIANA | VP (m/s) | Lodolita silicificada | MEDIANA | VP (m/s) | Dacita |
| | 1800 | | | 4560 | |
| MEDIANA | VP (m/s) | Lodolita calcárea | MEDIANA | VP (m/s) | Brecha polimictica |
| | 3196,5 | | | 3456,5 | |
| MEDIANA | VP (m/s) | Arenisca | MEDIANA | VP (m/s) | Brecha tectonica |
| | 2504,5 | | | 1117 | |
| MEDIANA | VP (m/s) | Arenisca silicificada | MEDIANA | VP (m/s) | Brecha magmatica |
| | 3666,5 | | | 3546 | |
| MEDIANA | VP (m/s) | Arenisca Calcarea | MEDIANA | VP (m/s) | Brecha hidrotermal |
| | 2646 | | | 2619,5 | |
| MEDIANA | VP (m/s) | Toba | | | |
| | 6676 | | | | |

Tabla 6.
Mediana de los valores densidad adquiridos en laboratorio.

| | | | | | |
|---------|-------------------------------|-----------------------|---------|-------------------------------|--------------------|
| MEDIANA | Densidad (g/cm ³) | Limolita | MEDIANA | Densidad (g/cm ³) | Riolita |
| | 2,08-2,3 | | | 2,60-2,68 | |
| MEDIANA | Densidad (g/cm ³) | Lodolita silicificada | MEDIANA | Densidad (g/cm ³) | Dacita |
| | 2,63-2,66 | | | 2,6-2,91 | |
| MEDIANA | Densidad (g/cm ³) | Lodolita calcárea | MEDIANA | Densidad (g/cm ³) | Brecha polimictica |
| | 2,55-2,62 | | | 2,54-2,57 | |
| MEDIANA | Densidad (g/cm ³) | Arenisca | MEDIANA | Densidad (g/cm ³) | Brecha tectonica |
| | 2,39 | | | 2,56-2,79 | |
| MEDIANA | Densidad (g/cm ³) | Arenisca silicificada | MEDIANA | Densidad (g/cm ³) | Brecha magmatica |
| | 2,37-2,58 | | | 2,28-2,55 | |
| MEDIANA | Densidad (g/cm ³) | Arenisca Calcarea | MEDIANA | Densidad (g/cm ³) | Brecha hidrotermal |
| | 2,45-2,52 | | | 2,05-2,86 | |
| MEDIANA | Densidad (g/cm ³) | Toba | | | |
| | 2,52 | | | | |

Con la información obtenida de las tablas (4, 5, 6) y con base en cuatro (4) panoramas geológicos existentes en la zona de estudio, que consta de: A) Cuerpo volcánico (dacita) intruyendo a la roca sedimentaria (arenisca); B) Cuerpo volcánico (dacita) intruyendo a la brecha volcánica; C). Sucesión estratigráfica de la Formación Bocas; D) Sucesión estratigráfica de la Formación Bocas siendo cortada por un intrusivo de composición dacítica. Los modelos directos se desarrollaron usando la librería de código abierto de Python “piGYMLi”, permite crear secciones que tienen longitudes

La extensión de la línea de tomografía de resistividad eléctrica modelada fue de 1 km, se usaron 96 electrodos con separación entre ellos de 10 m. En las mediciones se emplearon los arreglos de adquisición Dipolo-Dipolo, Schlumberger y Wenner, a continuación, se darán los valores usados de resistividad para los cuatro (4) panoramas definidos:

- **Modelo directo de resistividad para roca fresca** (Figura 37, Figura 38, Figura 39)

A. Cuerpo volcánico (dacita) intruyendo a la roca sedimentaria (arenisca):

Capas 0 y 2 se asignó el valor de resistividad de 852 ohm.m y un espesor de 190 m.

Capa 1 se asignó el valor de resistividad de 85 ohm.m y un espesor de 10 m.

Capa 3 se asignó el valor de resistividad de 1500 ohm.m y un espesor de 50 m.

Capa 4 se asignó el valor de resistividad de 2015 ohm.m y un espesor de 150 m.

B. Cuerpo volcánico (dacita) intruyendo cuerpo de brecha volcánica:

Capas 0 y 2 se asignó el valor de resistividad de 1500 ohm.m y un espesor de 190 m.

Capa 1 se asignó el valor de resistividad de 85 ohm.m y un espesor de 10 m.

Capa 3 se asignó un valor de 2015 ohm.m y un espesor de 190 m.

C. Sucesión estratigráfica de la Formación Bocas:

Capa 0 se asignó el valor de resistividad de 449 ohm.m y un espesor de 18 m.

Capa 1 se asignó el valor de resistividad de 573 ohm.m y un espesor de 22 m.

Capa 2 se asignó el valor de resistividad de 852 ohm.m y un espesor de 35 m.

Capa 3 se asignó el valor de resistividad de 2015 ohm.m y un espesor de 45 m.

Capa 4 se asignó el valor de resistividad de 449 ohm.m y un espesor de 80 m.

D. Sucesión estratigráfica de la Formación Bocas cortada por un intrusivo de composición dacítica:

Capa 0 se asignó el valor de resistividad de 449 ohm.m y un espesor de 18 m.

Capa 1 se asignó el valor de resistividad de 573 ohm.m y un espesor de 22 m.

Capa 2 se asignó el valor de resistividad de 852 ohm.m y un espesor de 35 m.

Capa 3 se asignó el valor de resistividad de 2015 ohm.m y un espesor de 45 m.

Capa 4 se asignó el valor de resistividad de 449 ohm.m y un espesor de 80 m.

Capa 5 se asignó el valor de resistividad de 2015 ohm.m y un espesor de 200 m.

- **Modelos directos incluyendo la roca meteorizada** (Figura 37, Figura 38, Figura 39)

A. Cuerpo volcánico (dacita) intruyendo a la roca sedimentaria (arenisca):

Capas 0 y 2 se asignó el valor de resistividad de 302 ohm.m y un espesor de 190 m.

Capa 1 se asignó el valor de resistividad de 85 ohm.m y un espesor de 10 m.

Capa 3 se asignó el valor de resistividad de 1000 ohm.m y un espesor de 50 m.

Capa 4 se asignó el valor de resistividad de 2015 ohm.m y un espesor de 150 m.

B. Cuerpo volcánico (dacita) intruyendo cuerpo de brecha volcánica:

Capas 0 y 2 se asignó el valor de resistividad de 1000 ohm.m y un espesor de 190 m.

Capa 1 se asignó el valor de resistividad de 85 ohm.m y un espesor de 10 m.

Capa 3 se asignó un valor de 2015 ohm.m y un espesor de 190 m.

C. Sucesión estratigráfica de la Formación Bocas:

Capa 0 se asignó el valor de resistividad de 449 ohm.m y un espesor de 18 m.

Capa 1 se asignó el valor de resistividad de 520 ohm.m y un espesor de 22 m.

Capa 2 se asignó el valor de resistividad de 302 ohm.m y un espesor de 35 m.

Capa 3 se asignó el valor de resistividad de 2015 ohm.m y un espesor de 45 m.

Capa 4 se asignó el valor de resistividad de 449 ohm.m y un espesor de 80 m.

D. Sucesión estratigráfica de la Formación Bocas cortada por un intrusivo de composición dacítica:

Capa 0 se asignó el valor de resistividad de 449 ohm.m y un espesor de 18 m.

Capa 1 se asignó el valor de resistividad de 520 ohm.m y un espesor de 22 m.

Capa 2 se asignó el valor de resistividad de 302 ohm.m y un espesor de 35 m.

Capa 3 se asignó el valor de resistividad de 2015 ohm.m y un espesor de 45 m.

Capa 4 se asignó el valor de resistividad de 449 ohm.m y un espesor de 80 m.

Capa 5 se asignó el valor de resistividad de 2015 ohm.m y un espesor de 200 m.

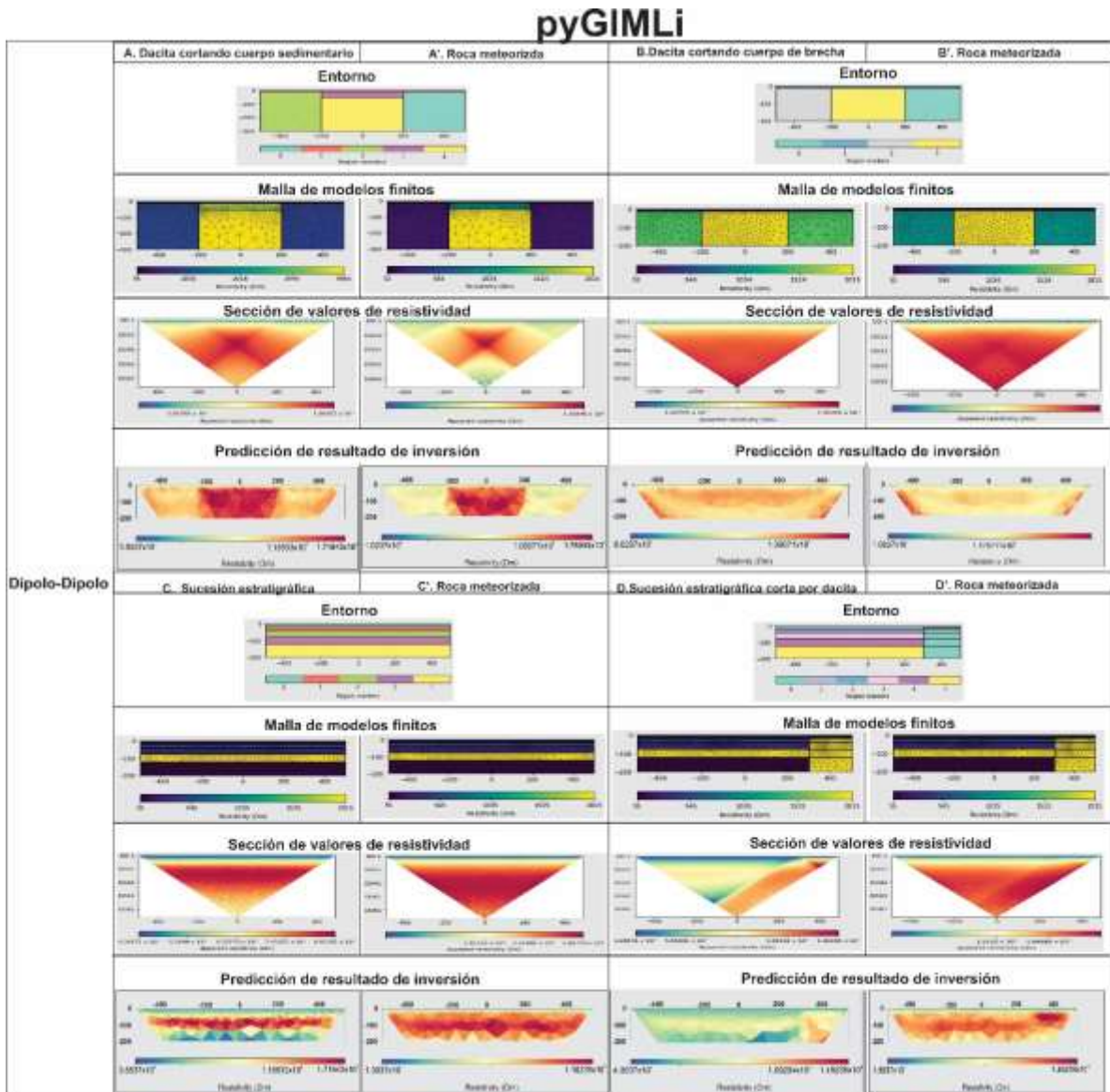


Figura 37. Modelo directo resultado de resistividad (arreglo Dipolo-Dipolo) mediante pyGIMLi.

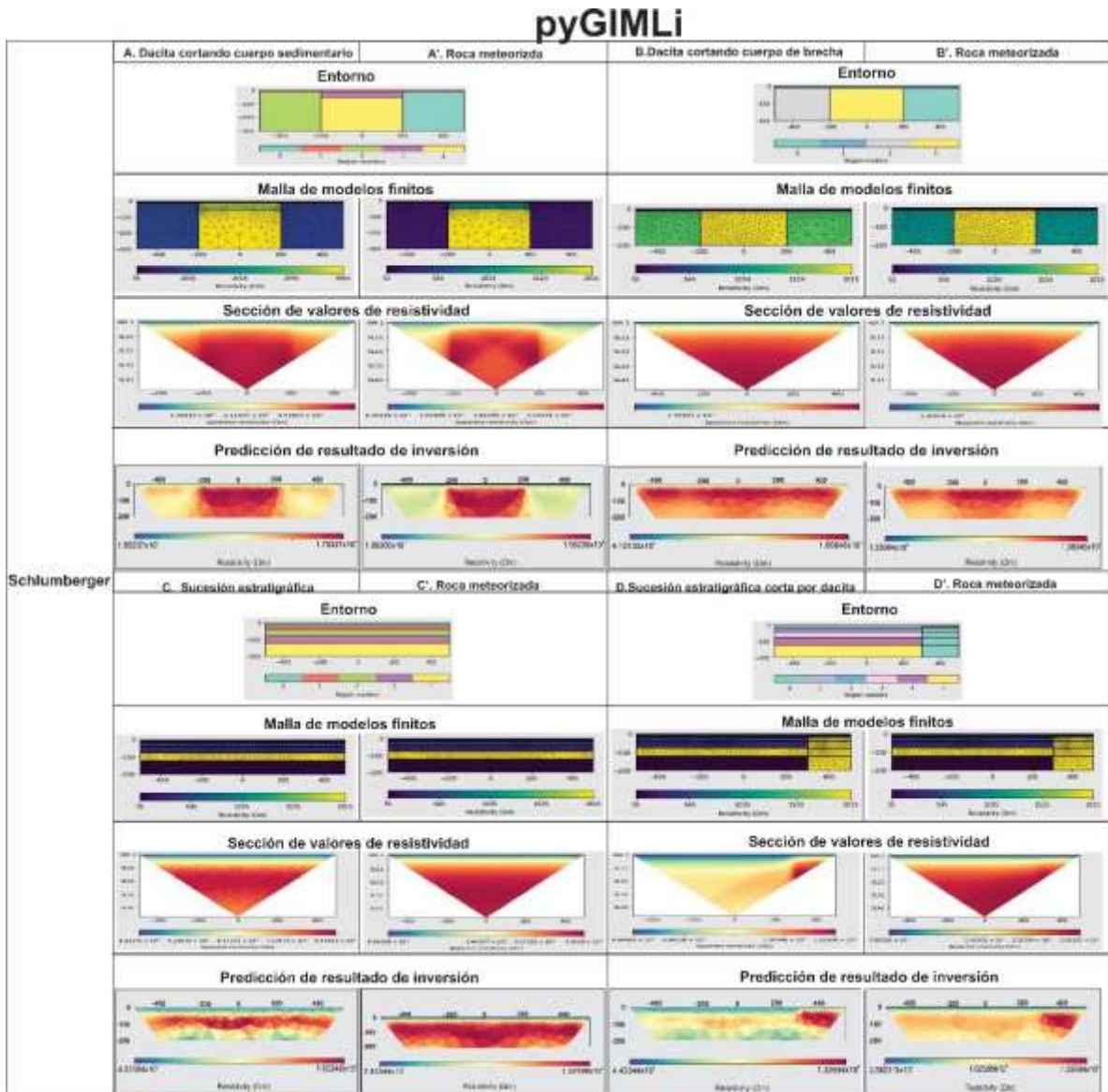


Figura 38. Modelo directo resultado de resistividad (arreglo Schlumberger) mediante piGYMLi.

pyGIMLi

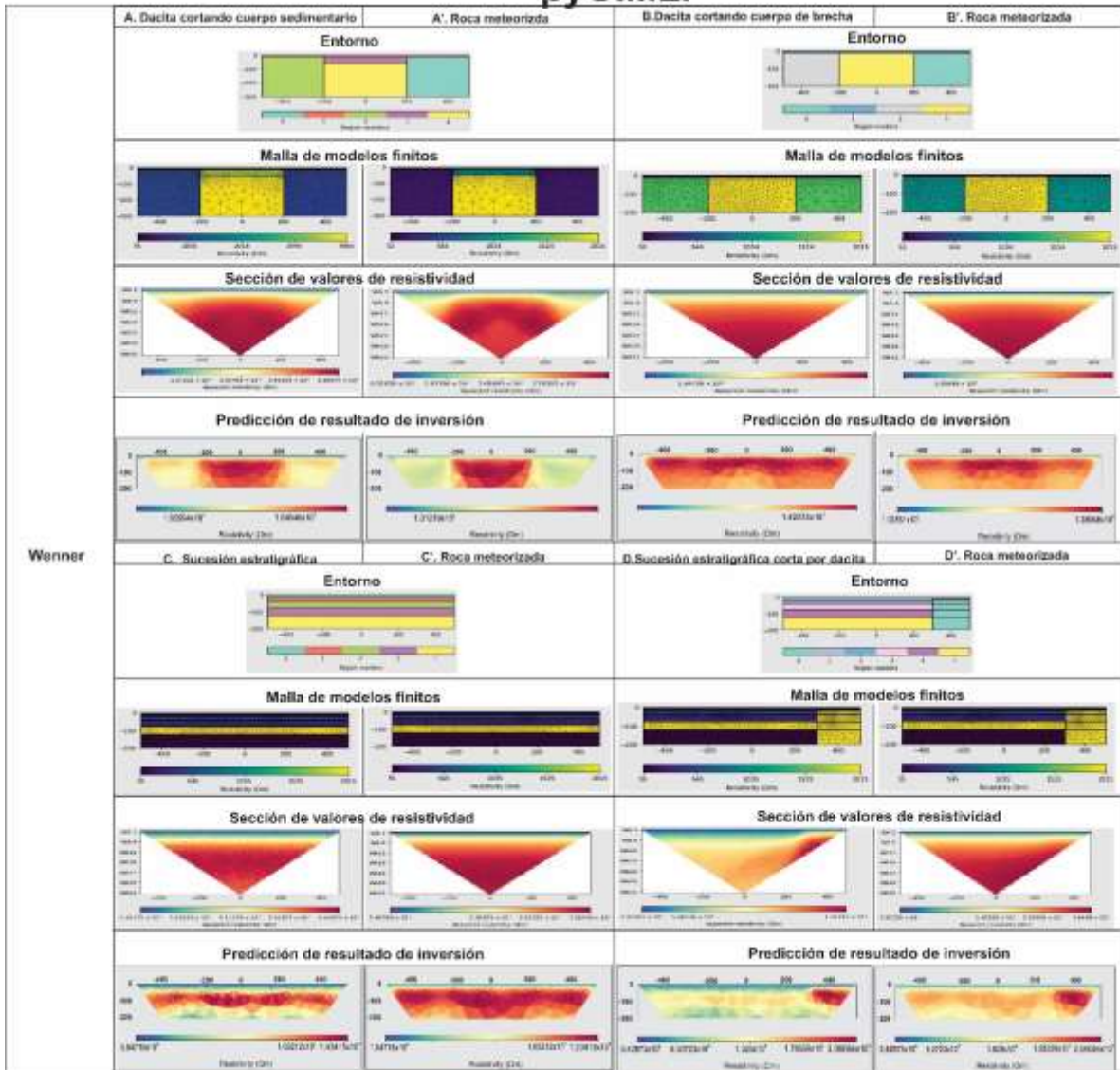


Figura 39. Modelo directo resultado de resistividad (arreglo Wenner) mediante piGYMLi.

Identificación de anomalías modeladas

- Panorama A: Los resultados de inversión de los arreglos Dipolo-Dipolo, Schlumberger y Wenner (figuras 37, 38, 39) sugieren que los contrastes de dacita de 2015 ohm.m, y roca sedimentaria de 852 ohm.m son visibles con valores invertidos, identificando a la dacita de 2000 ohm.m en la roca sedimentaria que tiene valores de 600 a 800 ohm.m. En la roca sedimentaria meteorizada las anomalías esperadas tienen valores entre 100 a 150 ohm.m.
- Panorama B. Los resultados de inversión tanto para la roca sana como la roca meteorizada mediante los arreglos Dipolo-Dipolo, Schlumberger y Wenner (figuras 37, 38, 39) sugieren que no es posible identificar una anomalía invertida para la dacita y la brecha magmática.
- Panorama C. Los resultados de inversión obtenidos para la roca sana mediante los arreglos Dipolo-Dipolo, Schlumberger Y Wenner (figuras 37, 38, 39) muestran anomalías que correlacionan las rocas sedimentarias con cambios litológicos de la siguiente manera: limolita 305 a 400 ohm.m, lodolita 500 a 573 ohm.m, arenisca 700 a 860 ohm.m. La anomalía invertida para la dacita tiene valores de 1930 ohm.m. En cuanto a la roca meteorizada, el arreglo Dipolo-Dipolo sugiere anomalías por variaciones litológicas: limolita 150 a 200 ohm.m, lodolita 260 a 596 ohm.m, arenisca 600 a 1020 ohm.m y 1400 a 1900 ohm.m para dacita (Figura 37).
- Panorama D. Los resultados de inversión obtenidos para la roca sana mediante los arreglos Dipolo-Dipolo, Schlumberger y Wenner (figuras 37, 38, 39) sugieren que en las rocas sedimentarias los cambios de litología crean anomalías: limolita 305 a 400 ohm.m, lodolita 500 a 573 ohm.m, arenisca 700 a 860 ohm.m, y 1050 a 1932 ohm.m para la dacita

y el intrusivo de composición dacítica. En la roca meteorizada el arreglo Dipolo-Dipolo, muestra que para las rocas sedimentarias presenta cambios de litologías visibles con anomalías invertidas así: limolita 150 a 200 ohm.m, lodolita 260 a 596 ohm.m, arenisca 600 a 1020 ohm.m y 1429 ohm.m para la roca de composición dacita y el intrusivo dacítico (Figura 37). En cambio, para los arreglos Schlumberger y Wenner, no es posible visualizar los cambios de contraste entre las rocas sedimentarias (lodolita, y arenisca) y las dacitas, debido a que las anomalías invertidas para los grupos de roca se agrupan entre 1020 a 2100 ohm.m (Figura 38 y 39).

- **Modelos directos de Velocidad de onda P**

En todos los modelos directos, la extensión de la línea sísmica fue de 500 m y se usaron 48 geófonos con separación de 10 m entre ellos. (Figura 40). A continuación, se mostrarán los ajustes empleados para los diferentes modelos de velocidad de onda p:

A. Cuerpo volcánico (dacita) intruyendo a la roca sedimentaria (arenisca):

Capas 0 y 2 se asignó el valor de V_p de 2502 m/s y un espesor de 190 m.

Capa 1 se asignó el valor de V_p 816 m/s y un espesor de 10 m.

Capa 3 se asignó el valor de V_p de 3546 m/s y un espesor de 50 m.

Capa 4 se asignó el valor de V_p de 4560 m/s y un espesor de 150 m.

B. Cuerpo volcánico (dacita) intruyendo cuerpo de brecha volcánica:

Capas 0 y 2 se asignó el valor de V_p de 3546 m/s y un espesor de 190 m.

Capa 1 se asignó el valor de V_p 816 m/s y un espesor de 10 m.

Capa 4 se asignó el valor de V_p de 4560 m/s y un espesor de 190 m.

C. Sucesión estratigráfica de la Formación Bocas:

Capa 2 se asignó el valor de V_p de 600 m/s y un espesor de 18 m.

Capa 3 se asignó el valor de V_p de 1800 m/s y un espesor de 22 m.

Capa 4 de asignó el valor de V_p de 2545 m/s y un espesor de 35 m.

Capa 5 se asignó el valor de V_p de 4560 m/s y un espesor de 45 m.

Capa 6 se asignó el valor de V_p de 600 m/s y un espesor de 80 m.

D. Sucesión estratigráfica de la Formación Bocas cortada por un intrusivo de composición dacítica:

Capa 2 se asignó el valor de V_p de 600 m/s y un espesor de 18 m.

Capa 3 se asignó el valor de V_p de 1800 m/s y un espesor de 22m.

Capa 4 de asignó el valor de V_p de 2545 m/s y un espesor de 35.

Capa 5 se asignó el valor de V_p de 4560 m/s y un espesor de 45 m.

Capa 6 se asignó el valor de V_p de 600 m/s y un espesor de 80 m.

Capa 0 se asignó el valor de V_p de 3546 m/s y un espesor de 200 m.

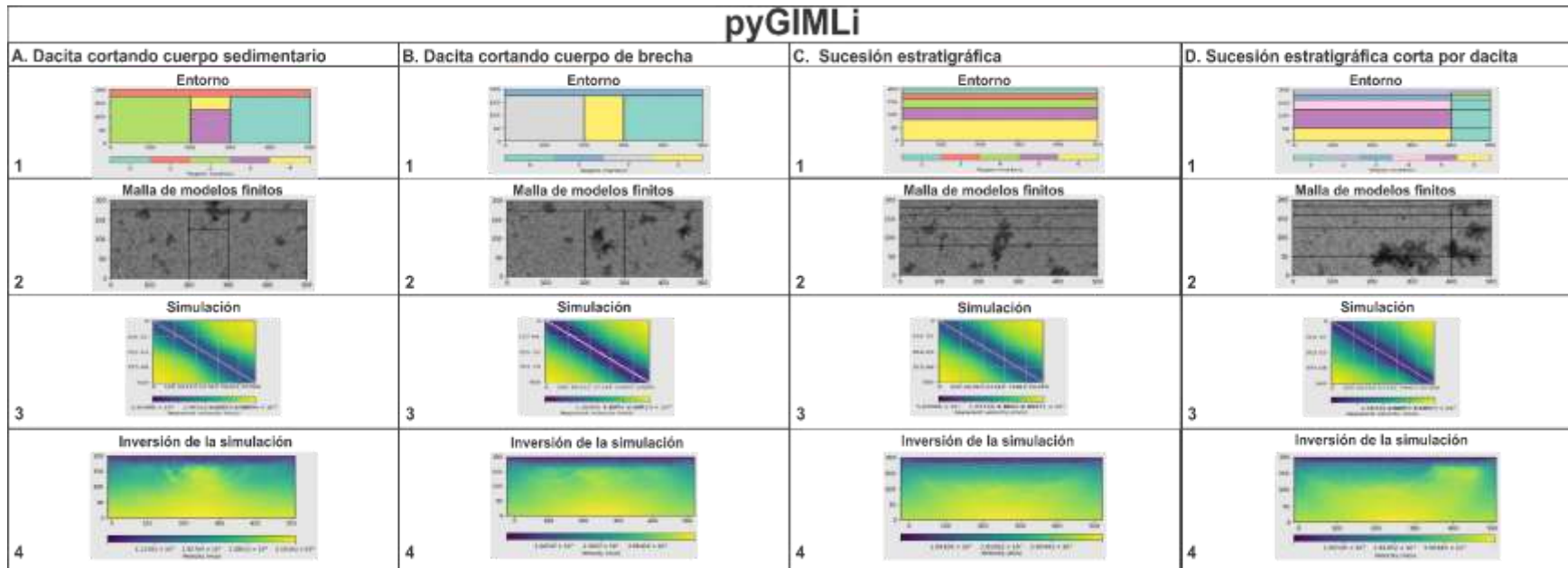


Figura 40. Modelo directo resultado de Vp mediante piGYMLi.

Identificación de anomalías modeladas

- Panorama A. Los resultados de inversión sugieren que los contrastes entre la dacita 4560 m/s con respecto a la arenisca 2500 m/s son visibles. Los valores de velocidad invertidos para la dacita es 5581 m/s y 1927 m/s para la arenisca. (Figura 40).
- Panorama B. Los resultados de inversión obtenidos muestran valores de velocidad p para la dacita de 4560 m/s y 3854 m/s para la brecha de matriz magmática de composición dacítica. (Figura 40).
- Panorama C. Los resultados de inversión obtenidos sugieren que es posible diferenciar entre las rocas sedimentarias (1091 a 1810 m/s) y la lava de composición dacítica 3004 m/s, pero no es posible apreciar con exactitud la diferencia de contrastes entre las rocas sedimentarias. (Figura 40).
- Panorama D. Los resultados de inversión obtenidos exponen la diferencia de los valores de velocidad invertidos de las rocas sedimentarias (1091 a 1810 m/s), con respecto a lava de composición dacítica y el intrusivo de composición dacítica 3004 m/s, pero no es posible apreciar el contraste de inversión entre lava dacítica y el intrusivo dacítico (Figura 40).

- **Modelos directos de Anomalía Gravimétrica**

Para todos los modelos directos se utilizó una extensión horizontal de medición cada un (1) km, con puntos medición de gravimetría cada 20 m. (Figura 41). A continuación, se mostrarán los ajustes empleados para los diferentes modelos de gravimétricos:

A. Cuerpo volcánico (dacita) intruyendo a la roca sedimentaria (arenisca):

Capa 1 se asignó el valor de densidad de 2.39 g/cm^3 y un espesor de 200 m.

Capa 2 se asignó el valor de densidad de 2.91 g/cm^3 y un espesor de 195 m.

B. Cuerpo volcánico (dacita) intruyendo cuerpo de brecha volcánica:

Capas 1 se asignó el valor de densidad de 2.28 g/cm^3 y un espesor de 200 m.

Capa 2 se asignó el valor de densidad de 2.91 g/cm^3 y un espesor de 195 m.

C. Sucesión estratigráfica de la Formación Bocas:

Capa 0 se asignó el valor de densidad de 2.08 g/cm^3 y un espesor de 18 m.

Capa 1 se asignó el valor de densidad de 2.55 g/cm^3 y un espesor de 22 m.

Capa 2 de asignó el valor de densidad de 2.39 g/cm^3 y un espesor de 35 m.

Capa 3 se asignó el valor de densidad de 2.91 g/cm^3 y un espesor de 45m.

Capa 4 se asignó el valor de densidad de 2.08 g/cm^3 y un espesor de 80 m.

D. Sucesión estratigráfica de la Formación Bocas cortada por intrusivo de composición

dacítica:

Capa 0 se asignó el valor de densidad de 2.08 g/cm^3 y un espesor de 18 m.

Capa 1 se asignó el valor de densidad de 2.55 g/cm^3 y un espesor de 22 m.

Capa 2 de asignó el valor de densidad de 2.39 g/cm^3 y un espesor de 35 m.

Capa 3 se asignó el valor de densidad de 2.91 g/cm^3 y un espesor de 45m.

Capa 4 se asignó el valor de densidad de 2.08 g/cm^3 y un espesor de 80 m.

Capa 5 se asignó el valor de densidad de 2.91 g/cm^3 y un espesor de 195 m.

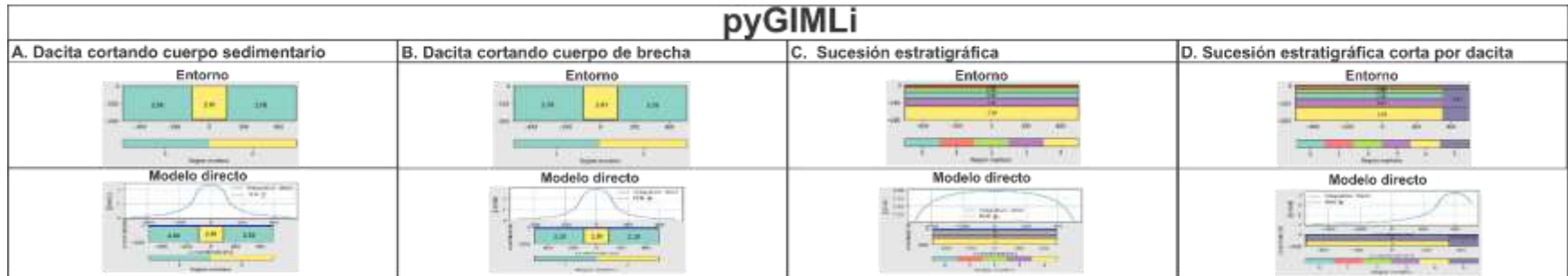


Figura 41. Modelo directo resultado de densidad mediante piGYMLi.

Identificación de Anomalías Modeladas

- En los panoramas A, C y D, Los resultados de los modelos directos sugieren anomalías del campo gravitacional terrestre de 2-2.5 mGal, debido a la intrusión de rocas volcánicas de composición dacítica en rocas sedimentarias (Figura 41).
- Panorama B. Los resultados del modelo directo sugieren anomalías del campo gravitacional terrestre de hasta 3 mGal producto de la intrusión de rocas volcánicas en la brecha de composición volcánica (Figura 41).

7. DISCUSIÓN

Mediante la medición de resistividad de las rocas pertenecientes a la Formación Bocas, se aprecia que las limolitas presentan intervalos de resistividad que varían entre 449 a 3014 ohm.m, las lodolitas presentaron diferentes valores de resistividad asociados a su composición: 1. Lodolita calcárea entre 572.79 a 2087.46 ohm.m; 2. Lodolita ligeramente silicificada entre 2496.44 a 8152.39 ohm.m

las areniscas a partir de su composición se obtuvieron: 1. Arenisca silicificada su resistividad permitió identificar y diferenciar roca fracturada (153.99 a 764.66 ohm.m), roca meteorizada (209.99 a 1253.67) ohm.m), roca fresca (3820.87 a 157347.02 ohm.m) y roca con presencia de sulfuros diseminado (650584.05 a 1552929.25 ohm.m). 2. Arenisca calcárea entre 1931.45 a 40879.61 ohm.m. 3. Areniscas cuya resistividad permitió identificar y diferenciar roca fracturada (145.65 a 196 ohm.m) roca meteorizada (210.03 a 941.09) ohm.m) y roca fresca (852.74 a 19785.99 ohm.m). En cuanto a las rocas agrupadas como riolitas de la Formación Bocas los valores de resistividad permiten diferenciar entre la riolita (2201.13 a 62929.74 ohm.m) y la dacita (2015.03 a 10658.74 ohm.m). Cuando la roca “dacita” presenta sulfuros diseminados (686782.27 ohm.m a 2212075.35 ohm.m).

Para las rocas volcanoclasticas se obtuvo que las tobas tienen valores de resistividad que varían de 7865 a 23856 ohm.m y las brechas clasificadas a partir de su proceso de formación tienen los siguientes valores de resistividad: 1. Brecha magmática varía entre 492.38 a 57387.68 ohm.m, brecha hidrotermal 1944.01 a 119082.81 ohm.m, brecha tectónica 1056.3 a 61836.93 ohm.m y brecha polimíctica 1056.30 a 18453.97 ohm.m). Los resultados de resistividad arrojaron valores

similares y concordantes con los expuestos en los trabajos por Telford (2004) y Lowrie (2017) (Tabla 4 y Figura 15 y 16), donde las principales variaciones y diferencias entre los resultados está dado por la mineralogía de la roca, los procesos de meteorización físicas y químicas, el grado de alteración y la relación del grado de fracturamiento en la roca.

Con los valores medidos, se configuraron modelos directos (Figura 37, 38, 39, 40, 41), en los que no se observan anomalías modeladas de resistividad entre la dacita y la brecha magmática de composición dacítica, debido a que sus rangos varían entre 1420 a 1720 ohm.m, pero es posible visualizar el cambio litológico mediante el modelo directo de velocidad de onda P con resultado de contraste de inversión para la dacita (4560 m/s) y para la brecha magmática (3854 m/s). La densidad de la dacita es 2.91 g/cm^3 y la brecha magmática es 2.28 g/cm^3 , lo cual permitió identificar el cambio en el campo gravitacional terrestre de 2 mGal, consecuente a la diferencia de densidad de 0.63 g/cm^3 entre ambas rocas. A su vez, se determinó que las rocas sedimentarias pertenecientes a la sucesión estratigráfica de la Formación Bocas no son distinguibles mediante los contrastes modelados de V_p (1091 a 1810 m/s) y densidad ($2.08 - 2.55 \text{ g/cm}^3$), pero sí lo son con los contrastes de inversión para resistividad obtenida: limolita 305 a 400 ohm.m, lodolita 500 a 573 ohm.m, arenisca 700 a 860 ohm.m.

En la exploración minera, las propiedades geoelectricas, asociadas a anomalías eléctricas de los depósitos de mineral como de sus rocas adyacentes juegan un papel importante en el descubrimiento, ubicación, forma, naturaleza y tamaño de los depósitos, la resistividad es uno de los métodos eléctricos comúnmente empleados en la exploración de depósitos minerales tanto metálicos como no metálicos. La mineralización de sulfuro dispersado y las disseminaciones reducen la resistividad mientras mejoran la capacidad de carga de las rocas huésped.

Mientras que la relación de porosidad con respecto a la velocidad de onda p, permite discriminar y definir la naturaleza de los materiales.

Por otra parte, para obtener una correlación espacial entre los parámetros físicos estimados y las características litológicas correspondientes; se realizan varios modelos geofísicos con base a los valores obtenidos, graficando la relación velocidad de onda P VS densidad, porosidad VS densidad, porosidad VS velocidad de onda P y porosidad VS resistividad (Figura 32, 33, 34, 35), en los cuales a partir de la definición de Gardner no se observa tendencia lineal en los resultados obtenidos, debido a que las mediciones fueron elaboradas en condiciones atmosféricas. Adicionalmente, el estudio sugiere la porosidad de las muestras analizadas corresponden principalmente porosidad secundaria y de menor proporción porosidad intergranular.

Finalmente, En las zonas cercanas a los sistemas de falla (falla Rio Cáchira, falla Sardina y falla Bucaramanga) (Figura 36), las rocas presentan valores altos de porosidad con respecto a las rocas de composición similar que no están siendo afectadas tectónicamente (Figura 15, 16 Y 29), se determina que en las brechas polimícticas y tectónicas, su porosidad es secundaria, en cuanto a la velocidad de onda P en la Figura 36, permite inferir que el control estructural no es un determinante significativo en la medición de velocidad de onda P en rocas duras, se aprecia en zonas con estructuras geológicas altos y bajos valores de velocidad de onda P, esto ocurre de igual manera en las zonas sin control estructural, por tanto, sus variaciones de V_p están controladas por la composición y textura de la roca. Por el contrario, en las rocas sedimentarias las cuales esta cercanas a la Falla Río Cáchira y Falla Sardina, se observa disminución en los resultados de V_p en comparación con aquellas muestras de roca que no se encuentran cercanas a los sistemas de falla.

8. CONCLUSIONES

- Con base en los datos obtenidos de resistividad de las rocas, los mapas de interpolación y los modelos directos realizados a partir de la librería piGYMli, se concluye que el cuerpo intrusivo mostrará un contraste de resistividad con respecto a los cuerpos sedimentarios con aporte calcáreo o silicificación, sin embargo cuando se presenta el cuerpo intrusivo cortando cuerpos de brechas magmáticos no se podría diferenciar un contraste visible en los resultados de resistividad, pero sí es apreciable el cambio de contraste con los modelados directos de Vp y densidad, por esta razón se recomienda que cuando se proponga una campaña de adquisición geofísica es necesario combinar el método geoelectrico con otros métodos geofísicos (gravimetría, sísmica y/o magnetometría).
- Las litologías identificadas en la zona de estudio incluyeron areniscas, areniscas silicificadas, areniscas calcáreas, lodolitas, lodolitas calcáreas, limolitas, riolitas, dacitas, tobas, brechas hidrotermales, brechas tectónicas, brechas magmáticas y brechas polimícticas. Las propiedades que logran diferenciar entre estas litologías son la porosidad, que es nula en las tobas, dacitas, riolitas, y brechas magmáticas, y máxima en las areniscas; la cargabilidad que es alta en las areniscas y algunas dacitas, brechas magmáticas y polimícticas, y baja en las lodolitas y riolitas; la resistividad, que en las brechas es máxima con respecto al resto de litologías, la velocidad de onda p, que es máxima en las brechas polimícticas y tobas, y la densidad que está en un rango estrecho sobrepuesto en las limolitas, lodolitas, tobas, riolitas, y brechas tectónicas.
- Las mediciones de física de roca no muestran tendencias lineales entre propiedades típicas de correlación como son la porosidad, resistividad, densidad y velocidad de onda p, lo que sugiere

que elementos composicionales y la distribución de los poros puede afectar las tendencias entre propiedades físicas.

- Los cuerpos sedimentarios que están cercanos a zonas de falla, varían en el rango de valores de las propiedades físicas en comparación con sus homólogos que no están en cercanías a zonas de falla. Mientras que los cuerpos volcánicos no presentan una variación considerable cuando están en cercanías a zonas de falla. Por estas evidencias, se determinó que los principales factores que alteran las propiedades físicas de las rocas están dados primeramente por las alteraciones y segundo por el grado de meteorización que sufrió la roca.
- La zona de estudio presenta dos regímenes de esfuerzo: el principal régimen de esfuerzos es un régimen comprensivo con sigma 1 en dirección 300/1, el cual está determinado por fallas de tipo inversa y componente dextral con rumbo de NE-SW y fallas con desplazamiento en rumbo de tipo sinistral con tendencia N-S, y el segundo régimen de esfuerzos obtenido hace referencia a un sistema extensivo, formado por los planos de falla normales y algunos de ellos con desplazamiento en rumbo de tipo sinistral con tendencia en rumbo N-S.

9. RECOMENDACIONES

- Reconstruir un modelo de depositación de la Formación Bocas para determinar la proveniencia de este material.
- Completar la geofísica de la zona de estudio mediante métodos resistivos, magnéticos y gravimétricos, teniendo como indicadores los resultados del presente trabajo y considerando como objetivo clave la extensión y geometría de los cuerpos volcánicos en el subsuelo y la identificación de anomalías gravimétricas y magnéticas causadas por los cuerpos que se encuentren mineralizados.

REFERENCIAS

- Alemán, A. y Ramos, V.A. 2000. *The Northern Andes. In Tectonic Evolution of South America*, Cordani UG, Milani EJ, Thomaz Filho A, Campos DA (eds). *31st International Geological Congress: Río de Janeiro*, 453–480.
- Alonso, F.J. y Suárez del Río, L.M. (1985). *Velocidad de propagación de ondas en rocas carbonatadas. Trabajo de geología, Univ. De Oviedo*, 15, 315-324, ISSN 0474-9588.
- Arias, A & Vargas, R. (1978). *Geología de las planchas 86 Abrego y 97 Cáchira. Escalla 1:100.000. Memoria explicativa. INGEOMINAS.*
- ASTM D6032-08. (2008). *Standard Test Method for Determining Rock Quality Designation (RQD) of Rock Core. Philadelphia.*
- Audemard, F.E., and Audemard, F.A. (2002). *Structure of the Mérida Andes, Venezuela: Relations with the South America-Caribbean geodynamic interaction, Tectonophysics*, 345: 299–327.
- Birch, F. (1961). *The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars, Part 2. J. Geophys. Res.* 66, 2199-2224.
- Calleja, L.; Ruiz de Argandoña V.G.; Sánchez-Delgado, N.; Setién, A. (2020) *Interpretation of petrographic anisotropy in ornamental granites based on P wave velocity measurements. Mater. Construcc.* 70 [339], e227 <https://doi.org/10.3989/mc.2020.15419>
- Cediel, F., Shaw, R., Cáceres, C., 2003. *Tectonic assembly of the northern Andean Block. In: Bartolini, C., Buffler, R. T., and Blickwede, J. (Eds.), The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation and plate tectonics. American Association of Petroleum Geologists Memoir 79*, 815–848.
- Christensen, N. I., & Salisbury, M. H. (1975). *Structure and constitution of the lower oceanic crust. Reviews of Geophysics*, 13(1), 57. <https://doi.org/10.1029/rg013i001p00057>.
- Christensen, N. I., & Mooney, W. D. (1995). *Seismic velocity structure and composition of the continental crust: A global view. Journal of Geophysical Research*, 100(B6), 9761-9788. <https://doi.org/10.1029/95jb00259>

- Christensen, N. I., & Stanley, D. (2003). 83 Seismic velocities and densities of rocks. *International Geophysics*, 1587-1594. [https://doi.org/10.1016/s0074-6142\(03\)80278-4](https://doi.org/10.1016/s0074-6142(03)80278-4).
- Cooke, D. (Febrero de 2005). *Breccias in Epithermal and Porphyry Deposits*. The Society of Economic Geologists. CODES University of Tasmania. Vancouver, Canadá.
- Cooke, D. (Febrero de 2005). *The Giant Sediment-hosted Zn-Pb-Ag Deposits of Northern Australia*. The Society of Economic Geologists. CODES University of Tasmania. Vancouver, Canadá,
- Corbett, G. J., & Leach, T. M. (1998). *Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration and Mineralization*. Society of Economic Geologist, Special Publication Number 6.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. (1983). *Hidrología Subterránea*. 2 tomos. Omega, Barcelona. P p. 2359.
- Delvaux, D., 2011. Win-Tensor, an interactive computer program for fracture analysis and crustal stress reconstruction. EGU General Assembly, Vienna, 2011. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 13, EGU2011-4018.
- Egbue, O., Kellogg, J., 2010. Pleistocene to present North Andean “escape”. *Tectonophysics*, 489: 248-257.
- ESTUDIO POLARIZACION INDUCIDA. www.geomastersac.com. (2015). Recuperado el 4 de febrero de 2022, de <http://www.geomastersac.com/servicios-geof%C3%ADsicos/estudio-polarizacioninducida.html#:~:text=De%20forma%20general%20la%20resistividad,y%20el%20tipo%20de%20alteraci%C3%B3n>.
- Folk, R. L. (1980). *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill publishing company.
- Gardner, G., Gardner, L. and Gregory, A., 1974. formation velocity and density—the diagnostic basics for stratigraphic traps. *geophysics*, 39(6), pp.770-780.
- Gansser, A., 1973a, *Facts and theories on the Andes: Journal of the Geological Society, London*, v. 129, p. 93–131.
- Gardner, G., Gardner, L., Gregory, A., 1974. Formation velocity and density—the diagnostic basics for stratigraphic traps. *Geophysics* 39 (6), 770–780.
- GCTS Testing Systems, (2018). PLT-2W Wireless Point Load Test System. Recuperado de: https://www.gcts.com/?s=prod_ver&p=products&ID=226

- Goldsmith, R. MAarvin, R. & Mehnert, H. 1971, radiometric ages in the Santander massif, Eastern cordillera, Colombian andes, Geological survey. Pp.44-49.
- Goldmann, G., (2018). *Determinacion de la distribución de la porosidad mediante resistividad eléctrica. Especialización en energía nuclear, Universidad Nacional de Cuyo y Universidad de Buenos Aires.*
- Gutierrez, J. M., & Clavijo, J. A. I. R. O. (2001). *Mapa geológico generalizado–Departamento de Santander.*
- Hernández, M. (2017). *Caracterización geofísica y geológica de la estación sísmica ROA-UCM. Universidad Complutense de Madrid. Tesis de Maestría en Ingeniería geológica.*
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (1982). *Plancha 97-III-D a Escala 1:25000. Bogotá: Ministerio de Hacienda.*
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (1983). *Plancha 97-IV-C a Escala 1:25000 Bogotá: Ministerio de Hacienda.*
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (1982). *Plancha 109-I-B a Escala 1:25000 Bogotá: Ministerio de Hacienda.*
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (1982). *Plancha 109-II-A a Escala 1:25000 Bogotá: Ministerio de Hacienda.*
- Instituto Geofísico del Peru, 2020. *Estudio Geofísico de los acantilados de la costa verde en el distrito de Magdalena del Mar. Lima: Ministerio del Ambiente, pp.17-47.*
- Instrumentation GDD, Inc. (s.f.). *Probador SCIP. Modelo TDLV. Manual del usuario. Québec, Canadá. Recuperado de: https://www.gddinstrumentation.com/pdf/es-ES/Manual_Probador SCIP.pdf*
- Kassab, M. A., Gendy, N. H. E., Saad, S. A., Shehata, M. G., Gadallah, M. H., & Badaró, M. M. (2018). *Petrographic and petrophysical characterization of some Paleozoic rocks, Um Bogma area, Southwest Sinai, Egypt. Egyptian Journal of Petroleum, 27(4), 867-876. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.01.002>*
- Khalil, Y. S., Wenyuan, L., Huang, J., Abbas, S. A., & Jun, H. (2022). *Geophysical exploration and geological appraisal of the Siah Diq porphyry Cu–Au prospect: A recent discovery in the Chagai*

volcano magmatic arc, SW Pakistan. *Open Geosciences*, 14(1), 1250-1267.
<https://doi.org/10.1515/geo-2022-0429>

Lana, R. D y Vutukuri , V.S. (1978). *Handbook of mechanical properties of rocks*. V.II, Trans. Tech, Publication, 195-311

Latorre, O. and Rojas, N. (2018). *Estudio mineralógico-petrográfico de las litologías aflorantes en el sector Algarrobo-La Llandada (Entre los municipios de Rio negro- El playón, Departamento de Santander)*. Universidad Industrial de Santander.

Latorre, O., Rojas, N. and Mantilla, L. (2019). *Generalidades De Las Rocas De EdaTriásico Temprano Aflorantes En Áreas De Los Municipios El Playón Y Rio Negro (Departamento De Santander, Colombia)*. In: XVII Congreso Colombiano de Geología. Bogota, Colombia: Sociedad Colombiana de Geología, p.1067.

Lowrie, W. (2007) *Fundamentals of Geophysics*. 2th Edition, Cambridge University press.

Milsom, J. (2003). *Field Geophysics*. 3rd edition. University College of London.

Montoya, E. (2008). *Estudio estocástico de cargabilidad en líneas de transmisión*. Instituto Politécnico Nacional. México D.F. (Tesis de maestría). Recuperado de: <https://pdfs.semanticscholar.org/eb9d/69a56a03a2d6a915c48171ac45fada66f74d.pdf>

Mora, J.A., Oncken, O., Le Breton, E., Ibáñez-Mejía, M., Faccena, C., Veloza, G., Vélez, V., De Freitas, M., Mesa, A., (2017b). *Linking late cretaceous to Eocene tectono-stratigraphy of the san Jacinto fold belt of NW Colombia with Caribbean plateau collision and flat subduction*. *Tectonics* 36, 2599–2629. <https://doi.org/10.1002/2017TC004612>.

NASA – Alaska Satellite Facility. 2015. <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>. Consultado en octubre de 2021.

Nafe, J. I.; & Drake, C. L., 1957. *Variation with depth in shallow and deep water marine sediments of porosity, density and the velocities of compressional and shear waves*, *Geophysics*, 22, 523-552.

Navarro, A., Alfageme, F., Eraso, A. y Laguna, L., (s.f.). *La hidrogeología como tecnología de apoyo en la ingeniería civil*. Instituto Tecnológico GeoMinero de España.

OFI Testing Equipment. (2015). *BLP-630 Automated Gas Porosimeter. Part No. 127-25. Instruction Manual*. Houston, Texas, USA. Recuperado de: <http://www.ofite.com/sds-forms/brochures/769-127-25-brochure/file>.

- Ozcep, Ferhat., Tildirim, Eray., Tezel, Okan., Aci, Metin., Karabulut, Savas. (2009). "Correlation between electrical resistivity and soil-water content based artificial intelligent techniques". *International Journal of Physical Sciences*. Vol. 5 (1), pp. 047-056, January
- Páez, O., & Goyeneche, J. (2018). *Estudio comparativo de la resistividad de material granular compacto usado en estructuras de vías y la relación con su peso unitario (Pregrado)*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Pennington, W., 1981. *Subduction of the Eastern Panama Basin and seismotectonics of Northwestern South America*. *Jour Geoph. Res.*, V. 86, B11, Pp. 753 -770.
- Rücker, C., T. Günther, F. Wagner. *PyGIMLi - Eine Open Source Python Bibliothek zur Inversion und Modellierung in der Geophysik*. In *75. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft (DGG), Hannover 2015*. 2015.
- Rücker, C., T. Günther, F. Wagner. *PyGIMLi - An Open Source Python Library for Inversion and Modelling in Geophysics*. In *78th EAGE Conference and Exhibition 2016, WS08-Open Source Software in Applied Geosciences*. 2016. doi:10.3997/2214-4609.201601651.
- Rücker, C., Günther, T., Wagner, F.M., 2017. *pyGIMLi: An open-source library for modelling and inversion in geophysics*, *Computers and Geosciences*, 109, 106-123, doi: 10.1016/j.cageo.2017.07.011.
- Sanders, L. (1998). *A manual of field hydrogeology*. Prentice hall, Pp. 38.
- SCHMID, R., (1981) *Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments: Recommendations of the IUSG Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks*. - *Geology*, 9: 41-43.
- Sears, Z., Young, H. & Freedman, R (2009). *Física universitaria volumen 1*. Decimosegunda edición. Pearson educación, México.
- Spikings, R., Cochrane, R., Villagomez, D., Van der Lelij, R., Vallejo, C., Winkler, W. and Beate, B. (2015). *The geological history of northwestern South America: from Pangaea to the early collision of the Caribbean Large Igneous Province (290–75Ma)*. *Gondwana Research*, 27(1), pp.95-139.

- Streckeisen, A. (1979) *Classification and Nomenclature of Volcanic Rocks, Lamprophyres, Carbonatites, and Melilitic Rocks: Recommendation and Suggestion of the IUGS, Subcommission on the Systematic of Igneous Rock*. *Geology*, 4, 331-335.
- Tarbuck, E., Luthens, F., & Tasa, D. (2005). *Ciencias de la Tierra una introducción ala geología física* (8th ed., pp. 175-200). PEARSON.
- Tatham, R. H. (1982), *Vp/Vs, and lithology*, *Geophysica*, 46 (3), 336-344.
- Telford, W., Geldart, L., & Sheriff, R. (2004). *Applied Geopgysics* (2nd ed., pp. 283-292). New york: Cambridge University.
- Toussaint, J. F. Y Restrepo, J. J. (1976). *Edades radiométricas de algunas rocas de Antioquia, Colombia*. *Publicación Especial Geología*. Universidad nacional de Colombia, Medellin, No 12: Pp 1-11.
- Van der Lelij, R., Spikings, R., Ulianov, A., Chiaradia, M. and Mora, A. (2015). *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, pp.271-294.
- Van der Lelij, R. *Reconstructing north-western Gondwana with implications for the evolution of the Iapetus and Rheic Oceans: a geochronological, thermochronological and geochemical study*. *Thèse de doctorat: Univ. Genève*, 2013, no. 4581.
- Vargas, R., y Arias, A., 1981b. *Geología de la Plancha 97-Cáchira, escala 1:100.000*. Ingeominas.
- Velandia, F., 2017. *Cinemática de las fallas mayores del Macizo de Santander - énfasis en el modelo estructural y temporalidad al sur de la Falla de Bucaramanga*. Doctorado. Universidad Nacional de Colombia.
- Velandia, F., García, H, López, J., Bermúdez, M., Zuluafa, C., & Taboada, A. (2017). *Modelos structural del macizo de Santander y zonas agyacentes*. In *XVI congreso Colombiano de Geología y III simposio de exploradores* (pp. 994-1000). Santamarta: Julian Andres Lopez Isaza. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/320004238>.
- Velandia, F., García-Delgado, H., Zuluaga, C., López, J., Bermúdez, M. and Audemard M, F., 2020. *Present-day structural frame of the Santander Massif and Pamplona Wedge: The interaction of the Northern Andes*. *Journal of Structural Geology*, 137, p.104087.

Ward D., Goldsmith R., Cruz B., Jaramillo C., & Restrepo H., 1973. *Geología de los cuadrángulos H-12, Bucaramanga y H-13, Pamplona, Departamento de Santander. US Geological Survey e Ingeominas. Boletín Geológico, 21(1-3), Pp. 1-132.*

Wentworth, C. (1922). *A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. The Journal Of Geology, 30(5), 377-392. doi: 10.1086/622910*