

Análisis estructural de la Mesa de Los Santos y redes neuronales para la estimación local de las propiedades físicas de la roca.

Sergio Andrés García Arias

Trabajo de Investigación para optar al título de Magíster en Geofísica

Director

Francisco A. Velandia P.

Geólogo PhD.

Codirector

José D. Sanabria G.

Físico PhD.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

A mi hija Danna Isabella García Castro.

Agradecimientos

A mi director Francisco Alberto Velandia Patiño y a mi codirector José David Sanabria Gómez, gracias por su tiempo, orientación y recomendaciones brindadas en todas las etapas del trabajo de investigación para que este saliera adelante.

Tabla de Contenido

Introducción	16
1. Objetivos	19
2. Antecedentes	20
2.1. Hidrogeología	20
2.2. Geofísica	21
2.3. Aprendizaje automático en la geofísica	23
3. Marco teórico	24
3.1. Marco geológico	24
3.2. Análisis cinemático de fallas	26
3.2.1. Indicadores Cinemáticos	26
3.2.2. Análisis poblacional de fallas	27
3.3. Patrones y atributos del fracturamiento	29
3.3.1. Métodos de muestreo	29
3.3.2. Parámetros para la caracterización de fracturas	30
3.4. Propiedades físicas de la roca	34
3.4.1. Densidad	34

3.4.2. Porosidad	35
3.4.3. Resistividad eléctrica	35
3.4.4. Cargabilidad eléctrica	36
3.4.5. Susceptibilidad magnética	37
3.4.6. Velocidad de onda	38
3.4.7. Ensayo de carga puntual	39
3.5. Aprendizaje automático	41
4. Metodología	46
4.1. Cinemática de fallas	46
4.2. Patrones de fractura	50
4.3. Propiedades físicas de la roca	52
4.4. Modelos de red neuronal	57
5. Resultados	62
5.1. Patrones de fracturas y cinemática de fallas	62
5.1.1. Análisis de diaclasas	62
5.1.2. Análisis cinemático	65
5.1.3. Cuantificación de patrones de fractura	71
5.2. Propiedades físicas de las rocas	81
5.3. Redes neuronales	93

6. Discusión	103
7. Conclusiones	114
8. Recomendaciones	119
Referencias Bibliográficas	120
Apéndices	134

Lista de Figuras

Figura 1.	Geología de la Mesa de Los Santos	17
Figura 2.	Geología de la Mesa de Los Santos	25
Figura 3.	Fracturas secundarias como criterios cinemáticos	28
Figura 4.	Atributos medibles para patrones de fractura	30
Figura 5.	Conectividad entre fracturas	33
Figura 6.	Tipo de espécimen en el ensayo carga puntual.	40
Figura 7.	Ejemplo de una red neuronal	43
Figura 8.	Peso en una red neuronal	44
Figura 9.	Diagramas rosas de los planos de fracturas medidos en campo para cada uno de los bloques estructurales.	63
Figura 10.	Localización de los tensores locales obtenidos.	66
Figura 11.	Tensor general del área de estudio.	67
Figura 12.	Resultados del análisis empleando FracPaQ para el Bloque Cuchilla y Mirador.	75
Figura 13.	Resultados del análisis empleando FracPaQ para el Bloque Agudo.	76
Figura 14.	Resultados del análisis empleando FracPaQ para el Bloque Minas.	77
Figura 15.	Mapas de interpolación para la intensidad y densidad de lineamientos en la MLS.	78

Figura 16.	Diagrama ternario de conectividad de los lineamientos asociados a fracturamiento y estratificación estimados por FracPaQ.	79
Figura 17.	Mapa de interpolación para la conectividad de lineamientos en la MLS.	80
Figura 18.	Localización de las estaciones donde se extrajo una muestra de roca.	82
Figura 19.	Rangos de porosidad y agua.	83
Figura 20.	Rango de densidad.	84
Figura 21.	Rango de resistividades.	86
Figura 22.	Relación Agua-Variación de la resistividad	87
Figura 23.	Rango de cargabilidad.	88
Figura 24.	Rango de I_{s50} .	89
Figura 25.	Rango de velocidad de onda P.	90
Figura 26.	Rango de susceptibilidad magnética	92
Figura 27.	Correlación de Pearson.	95
Figura 28.	Comparación del mapa geológico de Pinto V. et al. (2007) y el estimado por la Red Neuronal.	97
Figura 29.	Mapas generados por el método de interpolación IDW y Redes Neuronales para el Agua retenida y la porosidad.	99
Figura 30.	Mapas generados por el método de interpolación IDW y Redes Neuronales para la densidad y la velocidad de onda tipo P.	100
Figura 31.	Mapas generados por el método de interpolación IDW y Redes Neuronales para la resistividad eléctrica.	102

Figura 32.	Precipitación anual promedio entre los años 2000-2020 para la Mesa de Los Santos.	106
Figura 33.	Comparación de resultados entre dos redes neuronales.	109
Figura 34.	Geología a diferentes profundidades empleando redes neuronales.	111
Figura 35.	Valores de Porosidad a diferentes profundidades empleando redes neuronales.	112
Figura 36.	Relación de los valores de Porosidad y la distancia al trazo de falla más cercano.	113

Lista de Tablas

Tabla 1.	Propiedades físicas formación Los Santos.	22
Tabla 2.	Propiedades físicas formación Rosablanca.	22
Tabla 3.	Régimen de esfuerzos.	29
Tabla 4.	Clasificación del material rocoso a partir del I_{s50}	41
Tabla 5.	Meteorización del macizo rocoso.	47
Tabla 6.	Parámetros para estandarizar el entrenamiento.	59
Tabla 7.	Resultados obtenidos del procesamiento de los conjuntos de planos estriados asociados a fallamiento.	70
Tabla 8.	Parámetros de las redes neuronales generadas.	96
Tabla 9.	Información de los planos estriados medidos en campo.	134
Tabla 10.	Información de los planos de foliación medidos en campo.	138
Tabla 11.	Información de los planos de estratificación medidos en campo.	139
Tabla 12.	Información de los planos de fracturas medidos en campo.	144
Tabla 13.	Resultados de FracPaQ	177
Tabla 14.	Localización plugs extraídos en la Mesa de Los Santos.	180
Tabla 15.	Valores de las propiedades físicas de las rocas medidas en laboratorio.	190

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Datos estructurales.	134
Apéndice B. Propiedades físicas de las rocas.	180

Resumen

Título: Análisis estructural de la Mesa de Los Santos y redes neuronales para la estimación local de las propiedades físicas de la roca. *

Autor: Sergio Andrés García Arias **

Palabras Clave: Cinemática, tensor de esfuerzos, FracPaQ, redes neuronales, física de rocas.

Descripción: La Mesa de Los Santos es una planicie morfológica con una superficie aproximada de 430 km^2 y una altitud media de 1.650 m.s.n.m., donde se han realizado diferentes estudios para dar posibles soluciones a la falta de recursos hídricos. Para este trabajo se realizó el registro fotográfico, medición de planos de fractura y estrías de falla en 72 estaciones, posteriormente se realizó un análisis cinemático junto con una cuantificación de los patrones de fracturas para establecer las orientaciones preferenciales del sistema de fracturas y tensores de esfuerzo locales; la medición de las propiedades físicas de la roca se realizó a 358 muestras recolectadas en el área de estudio.

El análisis de fracturas y tensores de esfuerzo para la Mesa de Los Santos permitió identificar una dirección NWW del máximo esfuerzo horizontal que causa movimientos de rumbo o tectónica transcurrente. Este régimen de esfuerzos se refleja en dos direcciones preferenciales de fracturamiento cercanas al NW-SE y SW-NE. La cuantificación de fracturas permitió definir que los valores de intensidad, densidad y conectividad de lineamientos son mayores en el sector sur respecto al sector norte de la Mesa de Los Santos, y que las direcciones de flujo se asocian a los trazos de falla principales y cercanos a las estaciones evaluadas.

Se generaron diferentes topologías de redes neuronales usando Scikit-learn y considerando la localización, litología y la distancia a la falla más cercana para predecir valores de porosidad. El modelo de red neuronal con una estructura

* Trabajo de investigación

** Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Director: Francisco A. Velandia P., Geólogo PhD. Codirector: José D. Sanabria G., Físico PhD.

de capas ocultas de 25-8-5 y función de activación ReLu ($Score = 0,32$) estima la porosidad de manera coherente con lo observado en los ensayos de laboratorio que se realizaron a las muestras. Las áreas destacadas por el modelo para mayor potencial hidrogeológico corresponden a la Formación Los Santos (areniscas) y a la Formación Rosablanca (calizas), especialmente las ubicadas al sur de La Mesa de Los Santos. Aunque en este sector sur se evidencian condiciones algo mayores para la acumulación e infiltración de aguas, la precipitación es menor, lo que limita la recarga y el flujo del agua subterránea.

Abstract

Title: Structural analysis of La Mesa de Los Santos and neural networks for the local estimation of the physical properties of the rock. *

Author: Sergio Andrés García Arias **

Keywords: Kinematics, stress tensor, FracPaQ, neural networks, rock physics.

Description: La Mesa de Los Santos is a morphological plain with an area of approximately 430 km^2 and an average altitude of 1650 meters above sea level, where different studies have been carried out to provide possible solutions to the lack of water resources. For this work, a photographic record was made, measurement of fracture planes and fault striations in 72 stations, later a cinematographic analysis was carried out together with a quantification of the fracture patterns to establish the preferential orientations of the fracture system and local stress tensors. The measurement of the physical properties of the rock was carried out on 358 samples collected in the study area.

The analysis of fractures and stress tensors for La Mesa de Los Santos allowed us to identify an NWW direction of the maximum horizontal stress that causes strike-slip movements or transcurrent tectonics. This stress regime is reflected in two preferential fracture directions near the NW-SE and SW-NE. The quantification of fractures allowed us to define that the values of intensity, density, and connectivity of lineaments are higher in the southern sector concerning the northern sector of La Mesa de Los Santos and that the flow directions of evaluated stations are associated with nearby fault lines.

Different neural network topologies were generated using Scikit-learn considering the location, lithology, and distance to the nearest fault to predict porosity values. The neural network model with a 25-8-5-1 layers structure and ReLu

* Bachelor Thesis

** Science Faculty. School of Physics. Director: Francisco A. Velandia P., Geologist PhD. Co-director: José D. Sanabria G., Physicist PhD.

activation function estimates the porosity in a manner consistent ($Score = 0,32$) with that was observed in the laboratory tests performed on the samples. The areas highlighted by the model for the greatest hydrogeological potential correspond to the Los Santos Formation (sandstones) and the Rosablanca Formation (limestone), especially those located south of La Mesa de Los Santos. Although in this southern sector there are somewhat better conditions for the accumulation and infiltration of water, precipitation is less, which limits the recharge and flow of groundwater.

Introducción

La Mesa de Los Santos (MLS) es una planicie morfológica con una extensión aproximada de 430 km^2 y altitud promedio de 1.650 msnm, ubicada en el sector noroeste de la Cordillera Oriental, en la región de mesas y cuevas del departamento de Santander (Colombia) (Figura 1). En la MLS varias veredas presentan problemas para el suministro hídrico potable debido a la escasez de agua superficial (Díaz et al., 2009; IDEAM, 2019).

El sistema acuífero en la MLS se considera como producto de la tectónica local, la captación de aguas al norte se realiza principalmente del Miembro Superior de la Formación Los Santos, y las lluvias favorecen la recarga del acuífero. Al suroeste de la Mesa de Los Santos, donde aflora principalmente la Formación Rosablanca, el acceso al agua subterránea es casi nulo, debido a la baja porosidad y baja permeabilidad de la formación (Becerra Hernández y Parra Estepa, 2016).

Los estudios geofísicos previos realizados, principalmente métodos geoelectrónicos (Moyano Nieto, 2010; Gómez Sánchez et al., 2014; García Arias y Gómez García, 2015; Wilches Sánchez y Corzo Farfán, 2015; IngeoExploraciones, 2016; Díaz Duarte y Duarte Tarazona, 2019) se han concentrado en la zona norte (Formación Los Santos) y en cercanías a la Falla Los Santos, considerando que las propiedades físicas de las formaciones en la MLS son un factor adicional que influye en el sistema acuífero.

Los valores de las propiedades físicas se pueden obtener por mediciones en campo o con ensayos en laboratorio, pero en áreas extensas o de difícil acceso es necesario optar por métodos alternativos. Usualmente se consideran los métodos de interpolación espacial como TIN (Triangula-

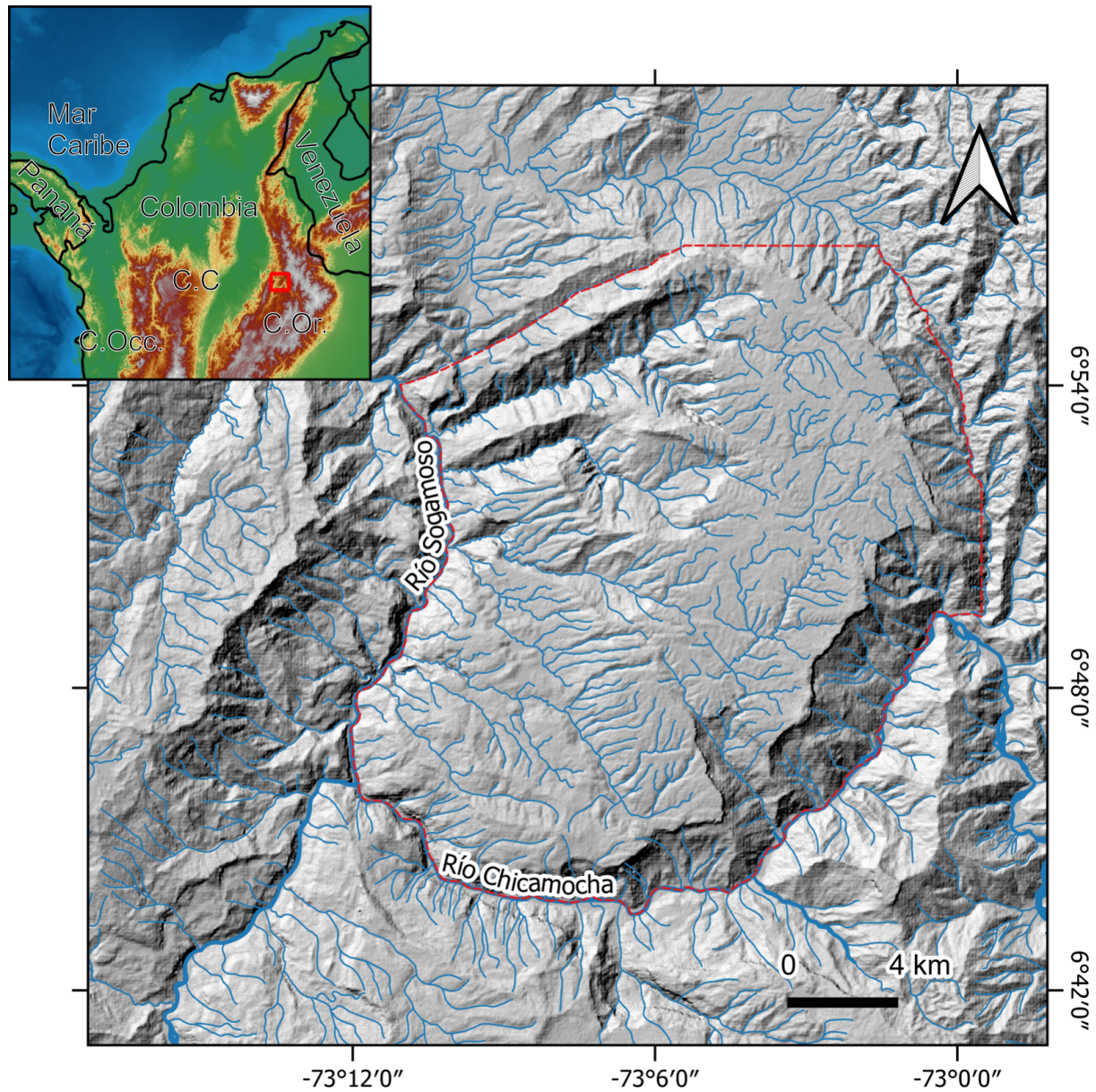


Figura 1. Localización de la Mesa de Los Santos en el sector noroeste de la Cordillera Oriental de los Andes Colombianos.

ted Irregular Network) y IDW (Inverse Distance Weighting) básicos para el cálculo o la estimación de valores desconocidos de una variable espacial a partir de valores en áreas ya conocidas.

Los Mapas de Anomalías elaborados con TIN y IDW no consideran el factor geológico en su interpolación, por lo que algunas de las anomalías pueden ser producto de la ausencia de este parámetro. La integración del conocimiento geológico y geofísico requiere un modelo terrestre común, las limitaciones en la generación de un modelo no están en el poder de cómputo, sino en la gestión de la complejidad técnica y la comunicación con el equipo de geociencias. Todos los modelos son incorrectos y están destinados a ser reemplazados a medida que se obtengan más datos o conocimientos. Por ello, automatizar la generación de la interpretación “correcta” es un beneficio en tiempo y recursos ([FitzGerald, 2019](#)).

En el campo de la geofísica las redes neuronales (RN) son cada vez más populares al ser una herramienta que puede hacer una aproximación a cualquier función continua con una precisión arbitraria. Lo que permite contribuciones importantes para encontrar soluciones a la variedad de aplicaciones geofísicas actuales ([van der Baan y Jutten, 2000](#); [Dramschi, 2020](#)).

El ajuste al modelo cinemático y la caracterización del fracturamiento en la MLS permite el definir posibles áreas de mayor saturación y flujo de agua subterránea. La estimación de propiedades físicas de la roca a partir de redes neuronales (RN) permite evaluar diferentes modelos de respuesta geofísica iniciales de manera simultánea y óptima.

1. Objetivos

Objetivo general

- Determinar la influencia del fallamiento local y las propiedades física de las formaciones locales en el sistema acuífero en La Mesa de Los Santos.

Objetivos específicos

- Establecer las orientaciones preferenciales del sistema de fracturas y tensores de esfuerzo locales en la Mesa de Los Santos utilizando los programas GeoRose y Win-Tensor.
- Comparar los patrones de fractura en La Mesa de Los Santos usando la herramienta FracPaQ de MATLAB.
- Identificar los rangos de las propiedades físicas de la roca de densidad, porosidad, resistividad, cargabilidad, susceptibilidad magnética, ensayo de carga puntual y velocidad de la onda P para las unidades aflorantes en La Mesa de Los Santos.
- Integrar la información geológica y geofísica para la generación de modelos de respuesta geofísica de las unidades geológicas en La Mesa de Los Santos usando redes neuronales.

2. Antecedentes

2.1. Hidrogeología

[Pinto V. et al. \(2007\)](#) diferencian la MLS en siete zonas hidrogeológicas, las zonas de interés hidrogeológico alto (Zonas I y II) se localizan al norte de la MLS, las de interés medio (Zonas III y IV) corresponde al sector central de la MLS, y las zonas de poco interés (Zonas V, VI y VII). [Contreras Vásquez \(2008\)](#) considera que las zonas norte y centro de la MLS probablemente están constituidas por un acuífero en el que las fracturas son de gran importancia, permitiendo la recarga del acuífero y el flujo de agua en ciertas direcciones, y en profundidad presenta mayor grado de fracturamiento, considerándolo como un acuífero fracturado.

Debido a la poca profundidad de los pozos realizados en la MLS se ha asociado el miembro superior de la Formación Los Santos como el acuífero principal ([Contreras Vásquez, 2008](#)), y una dirección Este-Oeste para el flujo del agua subterránea [Becerra Hernández y Parra Estepa \(2016\)](#). En el sector sur no se tiene registro de presencia de pozos.

Aunque se considera el sector sur con un bajo potencial hidrológico, [Arguello Diaz et al. \(2018\)](#) analizan las microcuencas al suroeste de la MLS, enfatizan que la Formación Rosablanca es de mayor predisposición para la percolación y captación de agua. El conocimiento y delimitación de las zonas kársticas tiene implicaciones en el potencial hidrogeológico y aprovechamiento de aguas subterráneas para consumo humano o agricultura ([Galviz Gómez, 2018](#)). La Formación Rosablanca es la unidad kárstica con mayor extensión al sur de la MLS, el nivel arenoso de esta formación se considera como posible acuífero ([Díaz Alvarez, 2008](#)); [Julivert \(1963\)](#) establece un

espesor de 19m al nivel arenoso y lo ubica a 44m de profundidad del techo de la formación.

2.2. Geofísica

Los estudios geofísicos realizados por [Gómez Sánchez et al. \(2014\)](#); [García Arias y Gómez García \(2015\)](#); [Díaz Duarte y Duarte Tarazona \(2019\)](#); [Wilches Sánchez y Corzo Farfán \(2015\)](#); [IngeoExploraciones \(2016\)](#); [Moyano Nieto \(2010\)](#), principalmente métodos geoelectrónicos, en la MLS se han enfocado en el sector centro-norte en busca del abastecimiento de agua subterránea para los habitantes. [IngeoExploraciones \(2016\)](#) infieren que las condiciones hidrogeológicas para la acumulación y movimiento de aguas subterráneas en la MLS se debe a su naturaleza estructural (fracturas) que presentan las rocas cretácicas y jurásicas. [IngeoExploraciones \(2016\)](#) concluye que la secuencia estratigráfica de la MLS presenta una distribución irregular de la permeabilidad, debido al grado de fracturamiento de las capas, por lo cual es difícil pensar en acuíferos tabulares de dimensiones definidas y confinados entre los estratos impermeables; los acuíferos pueden tener una extensión horizontal pequeña y aislamiento entre ellos. [Moyano Nieto \(2010\)](#) considera la posible existencia de áreas permeables a lo largo de la Falla Los Santos permitiendo conectar el flujo del agua de la Formación Los Santos con la Formación Rosablanca.

Los estudios previos en la MLS permiten establecer valores de los espesores ([Julivert, 1963](#); [Aldana Martínez, 2008](#); [Rincon Gómez, 2008](#)), porosidad ([Díaz Alvarez, 2008](#)) y rangos de resistividad ([Moyano Nieto, 2010](#); [García Arias y Gómez García, 2015](#)) para las formaciones Los Santos (Tabla 1) y Rosablanca (Tabla 2). En literatura se encuentran de manera generalizada rangos de resistividad ([Lowrie, 2007](#)), densidad promedio ([Lowrie, 2007](#); [Telford et al., 1990](#)) y valores de velocidad de onda P ([Lowrie, 2007](#); [Milsom, 2003](#)) para unidades detríticas y carbonatadas.

Tabla 1

Valores de espesor, porosidad, rango resistividad, densidad y velocidad de la onda P para rocas sedimentarias correspondiente a la Formación Los Santos. Fuentes: [Julivert \(1963\)](#); [Aldana Martínez \(2008\)](#); [Rincon Gómez \(2008\)](#); [Díaz Alvarez \(2008\)](#); [Moyano Nieto \(2010\)](#); [García Arias y Gómez García \(2015\)](#); [Lowrie \(2007\)](#); [Telford et al. \(1990\)](#); [Milsom \(2003\)](#).

Fm. Los Santos Miembro	Espesor [m]	Porosidad [%]	Resistividad [$\Omega \cdot m$]	Densidad [$10^3 kg \cdot m^{-3}$]	Vel. onda P (porosidad) [$km \cdot s^{-1}$] (%)
Superior	33-95.3	3-21	$10 - 10^4$		1.5 (40)
Medio	21.8-41	3-5	-	1.61-2.76	-
Inferior	56-152	5-18	(30 - 7630)		5.4 (5)
	$\Sigma : 127.8-243$	$\bar{x}_{sup} : 5$ $\bar{x}_{med} : 4$ $\bar{x}_{inf} : 7$	$\bar{x}_{sup} : 1813.8$ $\bar{x}_{med} : 50.3$ $\bar{x}_{inf} : 564.7$	$\bar{x} : 2.3$	$\bar{x} : 3.0$

Tabla 2

Valores de espesor, porosidad, rango resistividad, densidad y velocidad de la onda P para rocas sedimentarias correspondiente a la Formación Rosablanca. Fuentes: [Julivert \(1963\)](#); [Aldana Martínez \(2008\)](#); [Rincon Gómez \(2008\)](#); [Díaz Alvarez \(2008\)](#); [Moyano Nieto \(2010\)](#); [García Arias y Gómez García \(2015\)](#); [Lowrie \(2007\)](#); [Telford et al. \(1990\)](#); [Milsom \(2003\)](#).

Fm. Rosablanca Nivel	Espesor [m]	Porosidad [%]	Resistividad [$\Omega \cdot m$]	Densidad [$10^3 kg \cdot m^{-3}$]	Vel. onda P (porosidad) [$km \cdot s^{-1}$] (%)
Limaquéllico	44				
Arenoso	19				1.1 (40)
Margoso superior	52		$10 - 10^4$		-
Caliza	8-9	3	-	1.93-2.90	4.0 (20)
Shales y calizas	57		(80-350)		-
Margoso inferior	34				7.0 (0)
Caliza marrón	10				
Inferior	92				
	$\Sigma : 316-317$		$\bar{x} : 1220$	$\bar{x} : 2.5$	$\bar{x} : 5.4$

2.3. Aprendizaje automático en la geofísica

En los últimos años se ha usado los modelos de RN en las geociencias para reconocimiento de patrones con áreas de kimberlita ([FitzGerald, 2019](#)), generar modelos de velocidad que ayuden a una convergencia más rápida en la Full Waveform Inversion (FWI) ([Lu et al., 2019](#)), estimación del índice de saturación considerando registros de pozo ([Baneshi et al., 2013](#)), estimación de la porosidad total directamente a partir de las amplitudes sísmicas ([Allo et al., 2021](#)), determinar la velocidad de onda S usando información de registros de pozos ([Parra et al., 2014](#)), generación de datos sintéticos para evaluar la anisotropía de los shales ([You et al., 2020](#)), entre otros.

La integración del conocimiento geológico y geofísico requiere un modelo terrestre común, todo modelo se debe someter a evaluación constantemente ya que puede ser reemplazado a medida que se obtengan más datos o conocimientos. Por ello, automatizar la generación y correlación de modelos es un beneficio en tiempo y recursos ([FitzGerald, 2019](#)).

3. Marco teórico

3.1. Marco geológico

En la MLS el basamento lo conforman las rocas metamorfismo de bajo a medio grado de los Esquistos del Silgará (Paleozoico) y cuerpos ígneos intrusivos del Jurásico asociados al Granito de Pescadero ([Ward et al., 1977](#)). Durante el Jurásico se depositan sedimentos asociados a la Formación Jordán y de manera discordante la Formación Girón hacia el sector occidental ([Cediel, 1698](#); [Osorio Afanador y Velandia, 2021](#)), estas unidades son de origen continental y se reconocen en la región como “red beds” con manifestaciones locales de rocas volcánicas félsicas ([Alarcón et al., 2020](#)). La parte inferior del Cretácico la conforman unidades sedimentarias de las formaciones Los Santos (principalmente areniscas cuarzosas), Rosablanca (secuencia de calizas y lodolitas), Paja (shales) y Tablazo (calizas y lodolitas) ([Julivert, 1963](#); [Laverde Montano, 1985](#); [Pinto V. et al., 2007](#); [Díaz et al., 2009](#)). La Formación Los Santos presenta contacto fallado al sur con la Formación Rosablanca e inconforme con los Esquistos del Silgará al occidente ([Pinto V. et al., 2007](#)), además de discordante con la Formación Jordán al suroriente (Figura 2).

La cinemática en la MLS ha sido evaluada por diferentes autores, [Vargas Jerez \(2008\)](#) ubica el esfuerzo principal para la MLS en sentido NS con σ_1 : 345/14, σ_2 : 225/64 y σ_3 : 081/21, asociándolo a un patrón cinemático normal de rumbo. [Araque Gómez y Otero Ramírez \(2016\)](#) establecen a la Falla Los Montes, para el sector W de esta falla una dirección de esfuerzos NE-SW, y WNW-ESE en el sector centro de la falla. Al sur de la MLS [Tarazona Lizcano y Vargas López \(2020\)](#) determinan que N60-70W es la dirección preferencial de deformación frágil, así mismo establecen

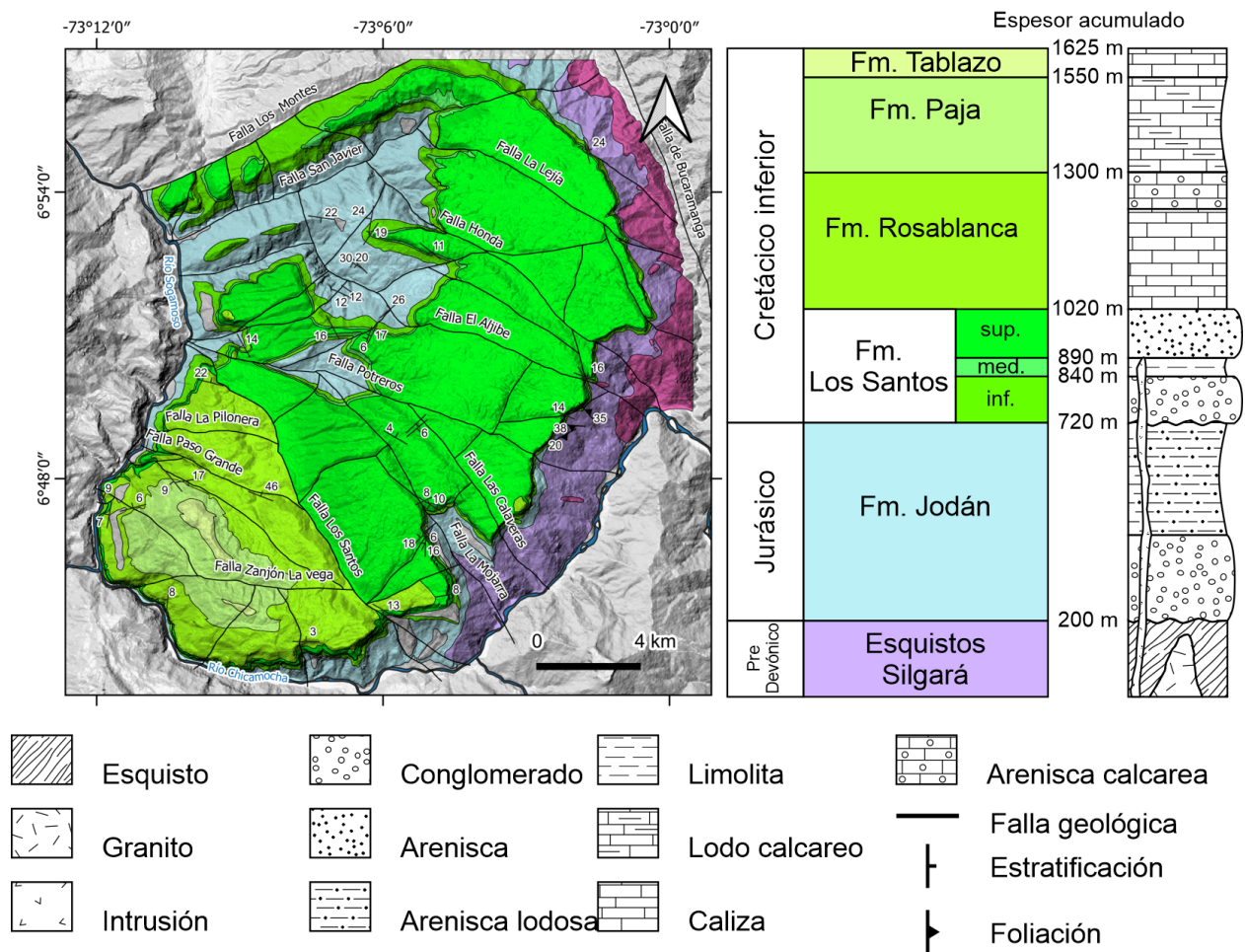


Figura 2. Unidades geológicas aflorantes en la Mesa de Los Santos, conformada por un basamento metamórfico y cuerpos ígneos, posterior se generaron depósitos sedimentarios detríticos y calcáreos. La Formación Los Santos y Rosablanca son consideradas las de mayor interés hidrológico. Tomado y modificado de [Pinto V. et al. \(2007\)](#).

como segundas direcciones preferenciales de tipo local las orientaciones N70-80W, N20-30W y N0-10E.

Las direcciones de esfuerzo son a su vez relacionadas con el fracturamiento local en la MLS, [Vargas Jerez \(2008\)](#) establece un fracturamiento generalizado en dirección N80-90W, cual concuerda con la tendencia de las principales fallas cartografiadas en la MLS, el fracturamiento

presenta un ángulo de inclinación predominante entre 80-90°, por lo que la acumulación y movimiento de aguas subterráneas en la MLS se asocia al fracturamiento ([IngeoExploraciones, 2016](#)). En la MLS se localizan aproximadamente 20 cuevas ([Gelvez et al., 2018](#)), estas estructuras pueden ser consideradas como evidencias de posibles corredores para el flujo del agua ([Galviz Gómez, 2018](#)); la Cueva El Borboso, localizada al sureste de la MLS, presenta una tendencias de fracturamiento en dirección N-E ([Gelvez et al., 2018](#)).

3.2. Análisis cinemático de fallas

El análisis cinemático tiene como objetivo interpretar los movimientos que alteraron la ubicación, orientación, forma y tamaño de un cuerpo de roca durante la deformación. Estos movimientos se pueden expresar completamente en términos geométricos sin considerar el esfuerzo y la dinámica que los genera ([Marrett y Peacock, 1999](#); [Davis et al., 2011](#)).

A escala afloramiento la medición de indicadores de desplazamiento tales como estrías de falla, planos tipo Riedel, escalones neomineralizados, entre otros, permiten determinar la cinemática. Se debe contar con datos de diferentes planos de fallas que pertenezcan a una misma familia, aquellas que no han sido reactivadas ni reorientadas y son producto de un solo evento tectónico ([Huang y Angelier, 1989](#)).

3.2.1. Indicadores Cinemáticos. Los indicadores cinemáticos son evidencias físicas en campo de origen tectónico que permiten determinar el sentido del desplazamiento en zonas de cizalle y fallas. El modelo de [Riedel \(1929\)](#) explica la deformación adentro de una zona que sufre las fuerzas que corresponden a una falla de rumbo.

Los lineamientos en la superficie de la falla son útiles, pero se requieren de criterios cine-

máticos adicionales, aunque muchos de ellos tienden a ser ambiguos, para determinar el sentido de deslizamiento. Por lo tanto, se deben combinar tantos criterios cinemáticos de “jerarquía dominante” como sea posible para el análisis cinemático (Petit, 1987; Fossen, 2010).

Las fracturas secundarias (Figura 3) son pequeñas fracturas desarrolladas a lo largo de una falla o superficie de deslizamiento, dando información al sentido de deslizamiento. En función de la orientación y cinemática de las mismas reciben diferentes nombres:

- Fracturas R (Riedel). Son sintéticas con el movimiento principal, formando un ángulo de $\sim 15^\circ$ con la falla principal.
- Fracturas R' (Antiriedel). Son fracturas con movimiento antitético respecto de la falla principal, con la cual forma un ángulo $\sim 75^\circ$.
- Fracturas T. Pequeñas fracturas de extensión, normalmente mineralizadas de cuarzo o carbonatos presentando inclinaciones de 45° respecto a la superficie de deslizamiento.
- Fracturas P. Se originan por presión local entre fracturas riedel. Presentan un ángulo de $\sim 15^\circ$, pero en sentido contrario a las fracturas R.

3.2.2. Análisis poblacional de fallas. Huang y Angelier (1989) indica que conocida la orientación y sentido de movimiento de una familia de fallas se puede asignar un eje de presión y tensión causantes de la deformación. Con las observaciones de campo es posible definir la cinemática y temporalidad de la deformación, siendo esta la mejor forma de establecerlas, sin embargo, no siempre se cuentan con las condiciones necesarias para ello (Velandia, 2017).

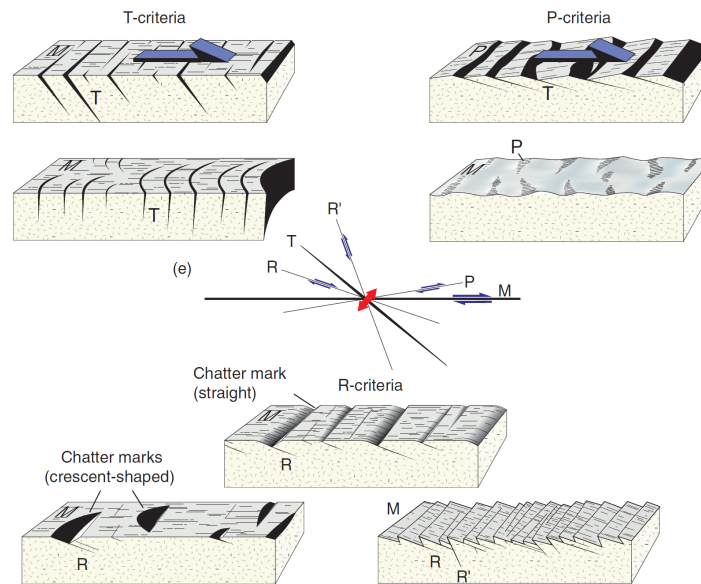


Figura 3. Criterios cinemáticos para una falla dextral. Tomado de Fossen (2010) a partir de Petit (1987). M es el plano principal estriado, T por fracturas de tensión, R incluye todas las fracturas tipo Riedel, y P las fracturas secundarias Post Riedel.

Para el cálculo de un tensor de esfuerzos se requieren como mínimo cuatro planos que preferiblemente tengan distinta orientación (Angelier, 1994), de tal manera se pueda:

- Representar los tres esfuerzos principales σ_1 , σ_2 , σ_3 .
- Representen la relación de los tres esfuerzos principales (R):

$$R = \frac{(\sigma_2 - \sigma_3)}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (1)$$

- Representar el índice R' , este índice permite identificar directamente el régimen de esfuerzos asociado (Tabla 3), donde:

$R'=R$ indica extensión.

$R'=2-R$ indica transcurrencia.

$R'=2+R$ indica compresión.

Tabla 3

Régimen de esfuerzos a partir del índice R' . Tomado de [Delvaux et al. \(1997\)](#).

Índice R'	σ_x en la vertical	Régimen de esfuerzos
0.00-0.25	σ_1	Extensión radial
0.25-0.75	σ_1	Extensión pura
0.75-1.25	σ_1 o σ_2	Transtensión
1.25-1.75	σ_2	Transcurrencia pura
1.75-2.25	σ_2 o σ_3	Transpresión
2.25-2.75	σ_3	Compresión pura
2.75-3.00	σ_3	Compresión radial

3.3. Patrones y atributos del fracturamiento

La intersección de una fractura con una superficie rocosa expuesta, como un afloramiento de roca o en la pared en una mina, genera una traza de fractura; estas trazas no permiten directamente observar la forma tridimensional de la fractura ([Mauldon et al., 2001](#)). Las trazas expuestas en una superficie rocosa rara vez son uniformes o aleatorios, debido a que las fracturas a menudo muestran algún tipo de orden o relaciones, afectando las propiedades mecánicas (resistencia, anisotropía, otros) y de transporte (fluidos, calor, otros) de la roca ([Healy et al., 2017](#)).

3.3.1. Métodos de muestreo. Para caracterizar las fracturas en un afloramiento de roca existen diferentes métodos, pero los métodos de muestreo lineal o areal más utilizados corresponden (i) al muestreo de línea de exploración o “Scanline Sampling”, (ii) el muestreo de ventana y (iii) el método de líneas de muestreo circular o ventanas circulares ([Rohrbaugh et al., 2002](#); [Zeeb et al., 2013](#)).

Las líneas de muestreo y ventanas circulares fueron propuestas por [Mauldon et al. \(2001\)](#) como una herramienta de muestreo eficiente para estimar medidas de abundancia de fracturas en dos dimensiones. La línea de muestreo consiste en una caracterización lineal, realizando una línea recta en un área representativa del afloramiento, posterior se realiza la medición de los parámetros de fracturamiento. La ventana de muestreo y la ventana circular corresponden a un análisis areal de la pared de roca, donde la ventana de muestreo toma un rectángulo como referencia y un círculo para la ventana circular, en ambos el área encerrada por la figura corresponde al área representativa del afloramiento a caracterizar ([Tarazona Lizcano y Vargas López, 2020](#)).

3.3.2. Parámetros para la caracterización de fracturas. Los atributos medibles (Figura 4) para las metodologías de muestreo propuestas por [Mauldon et al. \(2001\)](#) son ([Moreno y García, 2006](#)):

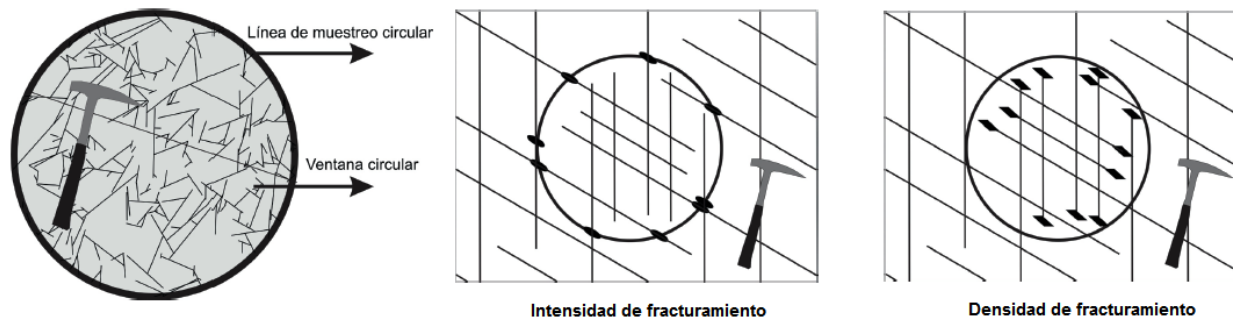


Figura 4. (izquierda) Técnicas de línea de muestreo y ventana circular, las cuales dependen del radio del círculo, debido a la configuración geométrica de estas ventanas el sesgo por orientación se elimina de forma automática. (centro) Intensidad de fracturamiento en una ventana circular, los óvalos corresponden a las intersecciones de la línea de muestreo circular con las trazas de fractura. (derecha) Densidad de fracturamiento, corresponde al número de puntos terminales (rombos) de la fractura que caen dentro de la ventana circular. Tomado y modificado de [Moreno y García \(2006\)](#).

La intensidad de fracturamiento es una medida de la abundancia de fracturas y generalmente

se define como el número de fracturas por la longitud de la línea de muestreo. Para las ventanas circulares es necesario determinar el número de intersecciones entre las fracturas y la circunferencia externa, expresada como:

$$I = \frac{n}{4r} \quad (2)$$

Donde n es el número de intersecciones entre la circunferencia de la ventana de muestra y las trazas de fractura y r es el radio de la circunferencia usada (Mauldon et al., 2001).

La densidad de fracturamiento hace referencia al número de fracturas por unidad de área, se expresa como:

$$\rho = \frac{m}{2\pi r^2} \quad (3)$$

Donde m es el número de inicios y terminaciones de las fracturas dentro de la ventana de muestra y r el radio de la circunferencia usada Mauldon et al. (2001).

La longitud promedio de las fracturas siempre es sesgada debido a inconvenientes durante las mediciones en campo y usualmente no se cuenta con la vista en tres dimensiones del afloramiento de roca. Aun así, Mauldon et al. (2001) hace una aproximación, en la cual se consideran las intersecciones de las fracturas n con la circunferencia externa, como el número de puntos terminales m que caen dentro de la misma, junto con el radio r de la circunferencia, quedando:

$$\mu = \frac{\pi r}{2} \left(\frac{n}{m} \right) \quad (4)$$

La expresión anterior se considera dimensionalmente correcta y su resultado corresponde a la longitud en relación a las unidades empleadas. El método permite calcularla la longitud sin realizar ningún tipo de medida directa de la longitud ([Velandia et al., 2016](#)).

La conectividad de las fracturas se puede evaluar a través de la topología, la cual describe la relación entre fracturas individuales en un sistema de fractura usando el gráfico ternario de conectividad propuesto por [Manzocchi \(2002\)](#). El gráfico cuenta con tres vértices que denota los nodos I (para extremos aislados de trazas), Y (para puntos de ramificación, aplastamientos o estribos) y X (para intersecciones transversales). De esta manera, las redes más conectadas se trazarán hacia la línea Y-X, en la parte inferior de este diagrama, mientras que las redes menos conectadas se trazarán hacia el vértice I (Figura 5). La conectividad entre líneas (CL) se expresa como ([Sanderson y Nixon, 2015](#)):

$$CL = 4 \frac{N_Y + N_X}{N_I + N_Y} \quad (5)$$

El tensor de fracturas ([Oda, 1982](#); [Oda et al., 1987](#)) y el tensor de permeabilidad ([Suzuki et al., 1998](#)) se estiman considerando un sistema de fracturas en dos dimensiones. El tensor de fracturas considera los datos de la distribución de orientación (ángulos) con los tamaños (longitudes) de las fracturas y su densidad espacial para proporcionar una medida adimensional única de un patrón de fracturas [Healy et al. \(2017\)](#). [Healy et al. \(2017\)](#) calculan el tensor de fracturas mediante la siguiente expresión:

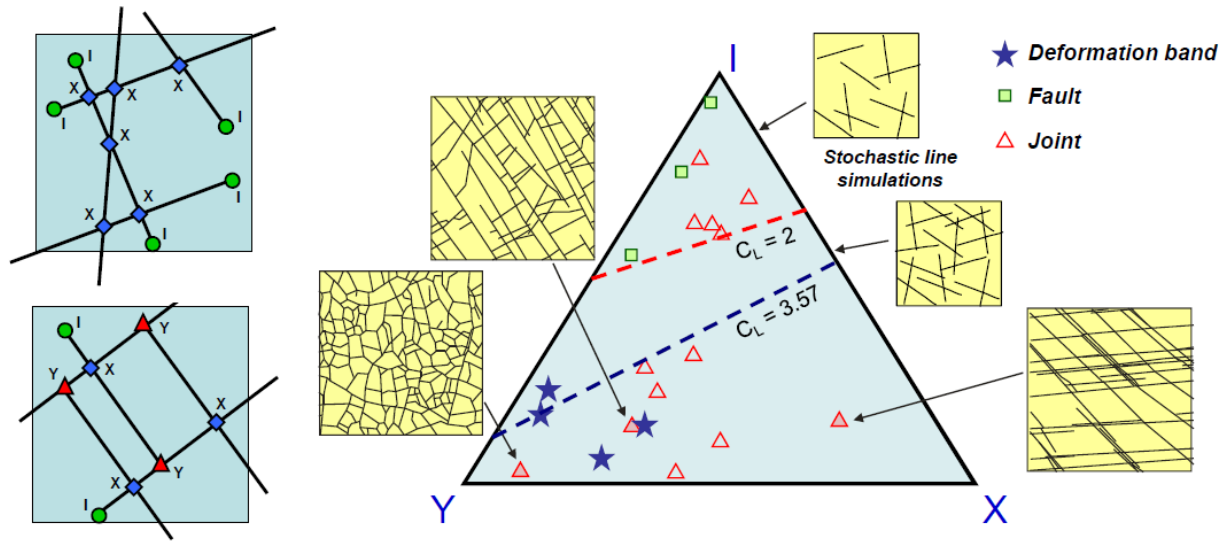


Figura 5. Topología de red definida por la disposición de líneas y nodos. (izquierda) Matriz esquemática aleatoria de líneas generada para un modelo estocásticos y uno fracturado. (derecha) Representación ternaria de la distribución de los nodos para diferentes redes naturales y simuladas, las líneas discontinuas corresponden a la media de conexiones por línea (CL), un valor de $CL=2$ corresponde al límite en el cual no se puede definir un grupo de expansión y $CL=3.57$ a un valor simulado para la percolación de un sistema de líneas aleatorias de longitud fija. Tomado y modificado de Sanderson y Nixon (2015).

$$P_{ij} = \frac{\pi \rho R^2 T^3 N_{ij}}{4} \quad (6)$$

Donde ρ es la densidad de las fracturas (número por unidad de área), R^2 es la media de las longitudes al cuadrado de las fracturas, T^3 es la media de las aperturas al cubo de las fracturas y N_{ij} es la matriz de orientación. Suzuki et al. (1998) estima el tensor de permeabilidad con la expresión:

$$k_{ij} = \frac{\lambda (P_{kk} \delta - P_{ij})}{12} \quad (7)$$

Donde λ es un factor entre 0 y 1, y δ es el delta de Kronecker. Las ecuaciones 6 y 7

son empleadas por el software FracPaQ (Healy et al., 2017, 2019), el cual usa una aproximación de tensor de segundo rango y calcula la anisotropía de la permeabilidad en 2D, considerando la dirección de máxima permeabilidad con el eje principal de la elipse.

El tensor de fracturas es calculado por FracPaQ (Healy et al., 2017) considerando los polos de las fracturas, adicionalmente considera los trabajos realizados por Oda (1982); Oda et al. (1987), el tensor de rank=0 se puede asociar a la porosidad producto de las fracturas, un tensor de rank=2 se puede asociar en como las fracturas están distribuidas. Expandir el tensor a un rank=4 o mayor permite diferencias dos cuerpos y la geometría de sus fracturas, pero sus resultados no suelen ser tan intuitivos. La representación gráfica polar del tensor de fracturas para un rank ≥ 2 , permite considerar que una geometría casi circular corresponde a un medio casi isotópico, cuando más deformado esté la geometría más anisótropa se considera el cuerpo.

3.4. Propiedades físicas de la roca

Para calificar el comportamiento de los materiales respecto de las direcciones del espacio se puede considerar a un material como isótropo respecto de una propiedad determinada cuando esa propiedad no varía al cambiar la dirección en la que se mida la propiedad, en este caso, se dice que la propiedad es escalar. Por el contrario, un material es anisótropo cuando la propiedad varía según la dirección considerada, en este caso, la propiedad es vectorial.

3.4.1. Densidad. La densidad ρ es una magnitud escalar que relaciona la cantidad de masa M por unidad de volumen V de una sustancia o un objeto sólido, se expresa como:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (8)$$

Las diferencias en la densidad de las rocas producen cambios en el campo de gravedad de la Tierra y en velocidad de propagación de la onda. La unidad de densidad del Sistema Internacional de Unidades (SI) es el $kg \cdot m^{-3}$, pero el $Mg \cdot m^{-3}$ también es usado. La mayoría de las rocas de la corteza tienen densidades de entre 2.0 y 2.9 $Mg \cdot m^{-3}$ (Milsom, 2003).

3.4.2. Porosidad. El volumen de espacio abierto (espacio poroso) en las rocas en relación con el volumen total de la roca se llama porosidad Φ (Kirsch, 2009).

$$\Phi = \frac{V_{\text{espacioPoroso}}}{V_{\text{total}}} \quad (9)$$

La porosidad asociada al espacio poroso entre los granos minerales o los fragmentos de rocas clásticas se denomina porosidad primaria; una porosidad adicional producto a fracturas tectónicas o cavernas de disolución se denomina porosidad secundaria. Ambas porosidades se expresan en porcentaje (0 .. 100 %) o como fracción (0.0 .. 1.0) (Kirsch, 2009).

La porosidad en rocas sedimentarias depende de cómo estén dispuestos los granos minerales, qué tan bien estén cementados y de su grado de clasificación. Las rocas ígneas y metamórficas generalmente tienen baja porosidad, a menos que hayan sido fracturadas (Lowrie, 2007).

3.4.3. Resistividad eléctrica. El científico alemán Georg Simon Ohm estableció en 1827 que la corriente eléctrica I en un cable conductor es proporcional a la diferencia de potencial V a través de él (Lowrie, 2007).

$$V = IR \quad (10)$$

Donde R es la resistencia del conductor. La unidad de la resistencia es el ohmio Ω , cuando la corriente I está en amperios y voltaje V está en voltios. La inversa de la resistencia es llamada conductancia y su unidad es la recíproca al ohm, Ω^{-1} llamada mhos o siemens S (Milsom, 2003). En observaciones experimentales para un material es posible observar que la resistencia es proporcional a la longitud L e inversamente proporcional al área de la sección transversal A del conductor, esta relación se expresa como (Lowrie, 2007):

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (11)$$

La resistencia de un material a la corriente que fluye entre caras opuestas se conoce como su resistividad ρ y se mide en ohmios-metros $\Omega \cdot m$ (Lowrie, 2007). Los materiales isotrópicos tienen la misma resistividad en todas las direcciones. La mayoría de las rocas son razonablemente isotrópicas, pero las pizarras y lutitas fuertemente laminadas son más resistentes a través de las laminaciones que paralelas a ellas (Milsom, 2003).

La resistividad de muchas rocas es aproximadamente igual a la resistividad del poro fluidos divididos por la porosidad fraccionada. La ley de Archie, establece que la resistividad es inversamente proporcional a la porosidad fraccionaria elevada a una potencia que varía entre aproximadamente 1,2 y 1,8 según la forma de la matriz granos, proporciona una aproximación más cercana en la mayoría de los casos (Milsom, 2003).

3.4.4. Cargabilidad eléctrica. La medición en dominio del tiempo en la Polarización Inducida requiere el monitoreo del decaimiento del voltaje después de que la corriente

eléctrica es eliminada. La cargabilidad M se considera como área A debajo de la curva de decaimiento durante un cierto intervalo de tiempo ($t_1 \sim t_2$) normalizado por la diferencia de potencial en estado estacionario ΔV_C (Kearey et al., 2002):

$$M = \frac{A}{\Delta V_C} = \frac{1}{\Delta V_C} \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt \quad (12)$$

Por tener un principio en el dominio del tiempo, la unidad de la cargabilidad se considera los milisegundos, también es frecuente el uso de los $mV \cdot V^{-1}$.

3.4.5. Susceptibilidad magnética. El campo magnético de la tierra (gran escala) está superpuesto por anomalías magnéticas de pequeña escala asociadas con rocas magnetizadas. La magnetización es una cantidad vectorial que está asociado con el concepto de polo norte y polo sur de un imán, este vector de magnetización puede tener una orientación arbitraria en una roca, por lo que cuerpos geoméricamente idénticos pueden mostrar anomalías magnéticas diferentes. La ubicación y orientación de un cuerpo de roca influye en la variación de este vector, al igual la existencia de una magnetización remanente en el cuerpo de roca o los minerales que la conforman (Kirsch, 2009).

Todas las rocas están ubicadas en el campo magnético terrestre inductor F , por lo que son afectadas por una magnetización inducida M_i . El vector M_i es en general paralelo al vector del campo inductor F , expresa como (Kirsch, 2009):

$$M_i = k \cdot f \quad (13)$$

Donde k es la susceptibilidad magnética del material, puede ser positiva o negativa, M_i y F son medidos en amperios/metro $A \cdot m^{-1}$, la susceptibilidad en el sistema SI es adimensional (Kirsch, 2009; Kearey et al., 2002).

3.4.6. Velocidad de onda. Una onda sísmica es energía acústica transmitida por vibración de partículas de roca. Las ondas de baja energía son aproximadamente elásticas, dejando la masa rocosa sin cambios con su paso, pero cerca de una fuente sísmica la roca puede romperse y deformarse permanentemente (Milsom, 2003).

Las velocidades sísmicas para ondas de compresión V_P y de corte V_S están relacionadas con constantes elásticas como módulo de volumen k , módulo de Young E y módulo de corte (μ) por (Kirsch, 2009):

$$V_P = \sqrt{\frac{3k + 4\mu}{3\rho}} = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}} \quad (14)$$

y

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (15)$$

Donde ρ es la densidad y ν el coeficiente de Poisson. Dado que las propiedades elásticas de las rocas están muy influenciadas por la porosidad, el material altamente poroso es más com-

presible que el material de menor porosidad, las velocidades sísmicas también están influenciadas por la porosidad ([Kirsch, 2009](#)).

3.4.7. Ensayo de carga puntual. El ensayo de carga puntual es una prueba que tiene como objetivo caracterizar los materiales rocosos considerando su resistencia a la compresión ([Suarez-Burgoa, 2015](#)). Se pueden realizar tres tipos de pruebas considerando la forma de la muestra (Figura 6), cada uno con sus propias consideraciones en la dimensión de la muestra para hacer la prueba ([GCTS Testing Systems, 2018](#)):

- Diametral: La longitud (L) de la muestra debe ser superior a la mitad de su diámetro (D).
$$L > 0,5D$$
- Axial: El diámetro (D) de la muestra debe ser menor que su ancho, pero mayor que 0.3 veces su ancho (W).
- Irregular: La longitud (L) de la muestra debe ser superior a la mitad de su diámetro (D). El diámetro (D) de la muestra debe ser menor que su ancho (W) pero mayor que 0.3 veces su ancho (W).

En cada prueba los resultados deben incluir las dimensiones de la muestra y la carga de falla P (kN). En mecánica de rocas el tamaño de una muestra afecta sus propiedades mecánicas, asociado con la naturaleza no homogénea de los materiales rocosos. Existiendo la probabilidad de que un plano más débil o una fractura afecte el comportamiento del material, por lo que se realiza una corrección en función del tamaño de la muestra a una dimensión de referencia de 50 mm, para

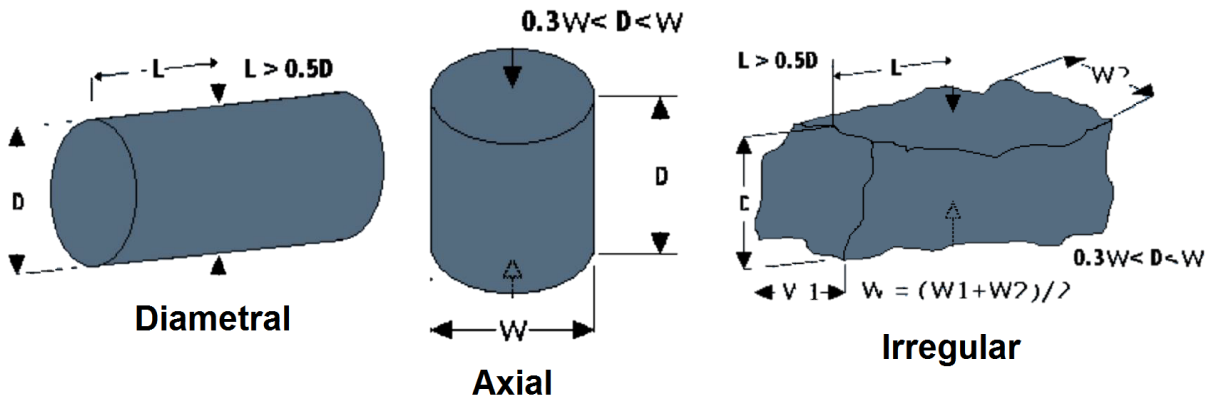


Figura 6. Consideraciones dimensionales para los tipos de muestras que el equipo PLT-2W Wireless Point Load Test System permite probar. Tomado de [GCTS Testing Systems \(2018\)](#).

ser clasificado el material rocoso en base al índice de carga puntual simple corregido Is_{50} (Tabla 4). Por lo que se calcula el diámetro equivalente (D_e) del núcleo ([GCTS Testing Systems, 2018](#)):

$$D_e = D, \text{ para pruebas diametrales} \quad (16)$$

$$D_3 = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}}, \text{ para pruebas axiales o irregulares}$$

Donde, A es el área de sección transversal mínima de un plano a través del punto de contacto de los planos, expresada como:

$$A = W * D \quad (17)$$

La resistencia de carga puntual no corregida Is se calcula con la ecuación:

$$I_s = \frac{P}{D_e^2} \quad (18)$$

El ajuste a la dimensión de referencia de 50 mm:

$$I_{s50} = F * I_s \quad (19)$$

Donde F es un factor de corrección de tamaño:

$$F = \left(\frac{D_e}{50} \right)^{0,45} \quad (20)$$

Tabla 4

Clasificación del material rocoso a partir del I_{s50} . Tomado de [Suarez-Burgoa \(2015\)](#).

Clasificación	I_{s50}
Muy alta resistencia	> 8
Alta resistencia	4 a 8
Mediana resistencia	2 a 4
Baja resistencia	1 a 2
Muy baja resistencia	< 1

3.5. Aprendizaje automático

[Cracknell \(2014\)](#) realiza una comparación de algoritmos de aprendizaje automático para aplicaciones de clasificación de litología supervisada. En su trabajo considera que los algoritmos de aprendizaje automático (machine learning algorithms - MLA) son una herramienta que permiten inferir resultados a partir de datos, utilizando métodos de aprendizaje supervisados o no supervisados ([Friedman, 1997](#)).

El aprendizaje supervisado emplea datos de entrenamiento y se puede considerar como una aproximación de funciones ([Kotsiantis, 2007](#); [Hastie et al., 2009](#)) debido a que se busca minimizar un criterio de error o pérdida ([Kuncheva, 2004](#); [Marsland, 2009](#)). El entrenamiento en el método supervisado emplea datos con un conjunto de etiquetas discretas y desordenadas (datos entrada) que indican resultados u observaciones conocidos (datos salida). Los datos de entrada conocidos se utilizan para inducir o entrenar un modelo de clasificación que vincula las variables a las clases presentes en los datos de entrenamiento mientras minimiza el criterio de error. Obtenido un modelo de clasificación empleando aprendizaje supervisado es posible predecir las etiquetas de clase de muestras no vistas previamente por el MLA ([Hastie et al., 2009](#); [Kuncheva, 2004](#)).

Por el contrario, el aprendizaje no supervisado solo tiene un conjunto de variables (datos de entrada) y no tiene conocimiento previo u observado de los resultados deseados (datos de salida), es decir, se basa en datos ([Ripley, 1996](#)). Al no tener conocimiento previo de los datos de salida, el evaluar los resultados del aprendizaje no supervisado significa que la evaluación cuantitativa de los productos es inviable. Por lo tanto, el objetivo del aprendizaje no supervisado no es minimizar una función de error empírico, es identificar grupos naturales y coherentes dentro de los datos como un medio para comprender cómo se organizan estos datos ([Hastie et al., 2009](#); [Kuncheva, 2004](#)).

Así mismo [Cracknell \(2014\)](#) resalta la importancia de MLA en las ciencias y como el MLA de perceptrón se asemejan a la capacidad de los sistemas nerviosos biológicos para reconocer patrones y objetos empleando el concepto de neurona. Los perceptrones incluyen un conjunto de algoritmos conocidos como redes neuronales artificiales (artificial neural network - ANN) ([Hastie et al., 2009](#); [Rojas, 1996](#)). Las ANN (Figura 7) están compuestas por una red de neuronas artifi-

ciales (funciones primitivas), que fueron descritas por primera vez por [McCulloch y Pitts \(1943\)](#). Estas neuronas llamadas McCulloch-Pitts constan de dos componentes, una suma ponderada de sus entradas seguida de una función de activación, que puede generalizarse a la forma ([Rohwer et al., 1994](#); [MacKay, 2003](#)):

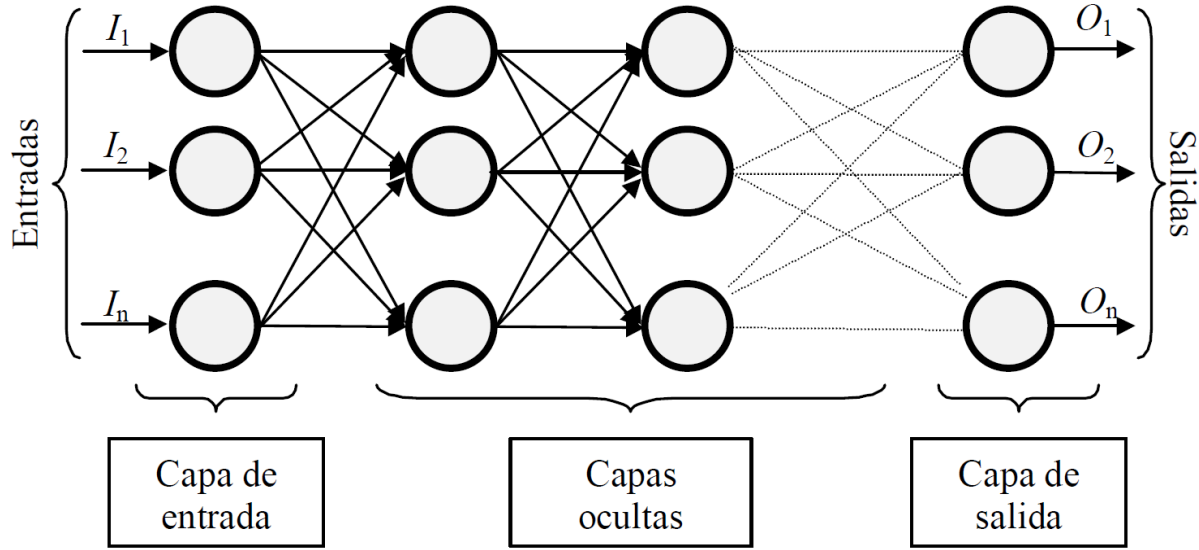


Figura 7. Ejemplo de una red neuronal totalmente conectada. Tomado de [Matich \(2001\)](#).

$$y_i = f_k \left(\sum_i w_{ji} x_i \right) \quad (21)$$

donde w_{ji} es el peso ajustable para la i^{th} instancia y x_i indica una de las variables de entrada. La función de “activación”, f_k puede ser cualquier función no lineal, por ejemplo, escalonado o sigmoideal ([Rojas, 1996](#); [Rohwer et al., 1994](#)), capaz de recibir múltiples entradas ponderadas. [Cracknell \(2014\)](#) expresa que muchos problemas del mundo real no se pueden representar con este simple sistema lineal. Por lo tanto, la estimación de estructuras de decisión no lineales se

logra combinando una o más capas ocultas en una red, los perceptrones multicapa (multilayer perceptron-MLP) ([Rohwer et al., 1994](#)).

En una red neuronal se requieren de tres componentes: funcione de entrada, funcione de activación y funcione de salida. La función de entrada trata a muchos valores de entrada como si fueran uno solo (entrada global), la cual toma los valores de entrada y los multiplican por sus respectivos coeficiente llamados pesos (estos pueden ir variando conforme se entrena la red). Los pesos (Figura 8) son valores que generalmente no están restringidos y cambian la influencia que tienen los valores de entrada, permitiendo que un gran valor de entrada tenga solamente una pequeña influencia, si estos son lo suficientemente pequeños. La función de activación asemeja el concepto en una neurona biológica de estar activa (excitada) o inactiva (no excitada), tener un “estado de activación” ([Matich, 2001](#)).

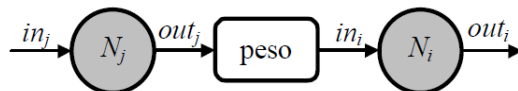


Figura 8. Influencia de la salida de la neurona N_j en la entrada de la neurona N_i . Tomado de [Matich \(2001\)](#).

La función activación calcula el estado de actividad de una neurona; transformando la entrada global en un valor (estado) de activación, cuyo rango normalmente va de (0 a 1) o de (−1 a 1). Esto es así, porque una neurona puede estar totalmente inactiva (0 o −1) o activa (1); las funciones de activación más usadas son la función lineal, función sigmoidea, función tangente hiperbólica y la función ReLU. La función de salida toma el valor resultante de la neurona anterior y determina qué valor se transfiere a las neuronas vinculadas. Si la función de activación está por debajo de un

umbral determinado, ninguna salida se pasa a la neurona subsiguiente ([Matich, 2001](#)).

4. Metodología

En la revisión bibliográfica se determinaron estaciones preliminares para ser visitadas en campo, las cuales corresponden a [Pinto V. et al. \(2007\)](#) (convenio INGEOMINAS-UIS), del cual el trabajo de [Vargas Jerez \(2008\)](#) también hace parte. Localizadas las estaciones con datos de diaclasas y estrías se procedió en una campaña de campo a la revisión de estos puntos y búsqueda de nuevas estaciones.

El registro de datos estructurales en campo se realizó considerando afloramientos de rocas competentes con un grado de meteorización entre medio a bajo (Tabla 5). Para la toma de datos estructurales se empleó una brújula Brunton Geo, la cual se ajustó con una declinación magnética de -8° , valor calculado en [World Magnetic Model](#). En los afloramientos expuestos en la MLS se identificaron y registraron por ventana de muestreo las diaclasas y estrías, se tomó un registro fotográfico paralelo a los afloramientos poco cubiertos con su respectiva orientación para el posterior análisis en FracPaQ.

4.1. Cinemática de fallas

[Velandia \(2017\)](#) presenta una metodología de trabajo para el análisis cinemático a partir de los tensores logrados empleando datos de planos estriados, considerando las variaciones del campo de esfuerzos en tiempo y espacio ([Angelier, 1994](#)), además de considerar la importancia de tensores locales distribuidos en una extensa región, los cuales ayudan en la interpretación de un tensor regional ([Sassi y Faure, 1996](#); [Tripathy y Saha, 2013](#)). La metodología de [Velandia \(2017\)](#) ha sido replicada por [Tarazona Lizcano y Vargas López \(2020\)](#); [Tarazona-Lizcano et al. \(2021\)](#) en

Tabla 5

Estimación de la meteorización del macizo rocoso. Tomado de [ISRM \(1978\)](#).

Termino	Descripción	Grado
Fresca	No hay señales visibles de erosión del material rocoso; tal vez haya una ligera decoloración en superficies con discontinuidades importantes.	I
Levemente degradado	La decoloración indica erosión del material rocoso y superficies discontinuas. Todo el material rocoso puede decolorarse por la intemperie y puede ser algo más débil externamente que en estado fresco.	II
Moderadamente degradado	Menos de la mitad del material rocoso se descompone y/o se desintegra en suelo. La roca fresca o descolorida está presente ya sea como un bloque continuo o como corestones.	III
Muy degradado	Más de la mitad del material rocoso está descompuesto. y/o desintegrado a suelo. La roca fresca o descolorida está presente como un marco discontinuo o como corestones.	IV
Completamente degradado	Toda la roca está descompuesta y/o desintegrada a suelo. La estructura original del macizo está aun en gran parte intacta.	V
Suelo residual	Toda la roca esta convertida a suelo. La estructura del macizo y la fábrica esta destruida. Hay un gran cambio en el volumen, pero el suelo no ha sido transportado significativamente.	VI

el estudio del sector sur de la MLS, considerando la Falla Potreros como centro de la MLS

El registro de los datos cinemáticos se realizó considerando para cada estación la búsqueda de los planos estriados, los cuales permiten definir el desplazamiento relativo de los bloques involucrados. A cada plano estriado se le realizó el registro de la localización de la estación, litología sobre la cual se encuentra el plano, orientación e inclinación del plano (Dip-direction/Dip), cabeceo o pitch y dirección de la estría, sentido de deslizamiento o cinemática de la estría (I:inversa, N:normal, S:sinestral, D:dextral), nivel de confianza del dato de estría medido (C:certero, P:probable, S:supuesto, X:desconocido), intensidad de la estría (0:no estriado, 1:débilmente marcado, 2:bien marcado, 3:profunda, 4:corrugación), finalmente observaciones como indicador cinemático (riedel, antiriedel, estría, recristalización, etc).

[Velandia \(2017\)](#) recomienda realizar manualmente una separación en conjuntos de datos estriados en aquellos que muestren relaciones de corte o superposición lo cual podría indicar multitemporalidad. Posterior a ello realizar un procesamiento automatizado de los datos usando el software Win-Tensor 5.9.2 ([Delvaux, 2001](#); [Delvaux y Sperner, 2003](#)), el cual permite la inversión de datos obtenidos en planos estriados, fracturas de cizalla, venas, estilolitos, entre otros.

La metodología para el análisis de los datos de estrías se toma textualmente de [Velandia \(2017\)](#):

1. Definir e ingresar en el formato del programa el o los conjuntos de datos a analizar según los criterios de campo (temporalidad).
2. Aplicar un primer procesamiento con el método de Diedros Rectos Mejorado (I. R. Dihedr.)

- filtrando los datos hasta alcanzar valores de conteo (Counting value) de 0% y 100% para σ_1 y σ_3 , respectivamente, y una desviación de conteo (Counting deviation) < 30 . Esto permite filtrar los planos en el círculo de Mohr.
3. Si la distribución de los datos está en el campo de neoformados y reactivados se puede pasar del método de Diedros Rectos a R. Optim., si no, se pueden retirar manualmente del subconjunto los planos que se ubiquen en el campo estable o aplicar de nuevo un filtro en Diedros Rectos.
 4. Aplicar el método R. Optim. (Optimización Rotacional) con el respectivo filtro hasta alcanzar valores mínimos de α que en todo caso debe ser < 30 (ángulo promedio de desajuste entre las direcciones de deslizamiento modeladas y observadas) y al mismo tiempo la mejor calidad posible según los criterios incorporados por el programa: QRt (Tensor quality rank, por [Delvaux y Sperner \(2003\)](#)) y QRw (World Stress Map quality rank, a partir de [Zoback \(1992\)](#)).
 5. La solución de tensor obtenida se controla con el histograma de la Función F5 (probada por el programa como la mejor opción para la inversión de esfuerzos) buscando que la mayor población de los datos se acerque a cero.
 6. Para verificar la compatibilidad mecánica de los datos en el subconjunto del tensor obtenido se revisa de nuevo círculo de Mohr, con apoyo de orientaciones estereográficas tanto en Planos-estrías (proyección de Angelier) como en Tangent lineation (proyección de Hoeppe-ner).

7. Según la supervisión de estos aspectos es posible volver a incluir datos desechados por el software, controlando que no se afecten negativamente los criterios de calidad del tensor, como el histograma.
8. Al final del procesamiento, los datos de una determinada estación pueden arrojar un solo tensor o múltiples tensores con distintas características en su régimen de esfuerzos.

4.2. Patrones de fractura

Para la caracterización de diaclasas en afloramientos de rocas competentes (grado de meteorización entre medio a bajo) se registró la localización de la estación, litología, orientación e inclinación del plano de diaclasa (Dip-direction/Dip). [Tarazona Lizcano y Vargas López \(2020\)](#); [Tarazona-Lizcano et al. \(2021\)](#) realizan el procesamiento e interpretación de los datos empleando los softwares GeoRose, Stereonet y FracPaQ. El software GeoRose 0.5.1 ([Yong Technology Inc., 2014](#)) permite generar diagramas rosas de la orientación de los planos medidos en campo, los cuales permiten observar la variación en la orientación de los datos que complementan los resultados de Win-Tensor y FracPaQ. El software Stereonet ([Allmendinger et al., 2011](#); [Cardozo y Allmendinger, 2013](#)) se empleó para la generación de diagramas de densidad de polos para los planos de fracturas y planos de estrías de falla medidos en campo. FracPaQ ([Healy et al., 2017](#)) es un software de código abierto escrito en MATLABTM el cual permite cuantificar patrones de fracturas en dos dimensiones (2D) a partir de datos digitales. Los archivos de entrada de las trazas de fracturas pueden ser de formato: *.jpg, *.jpeg, *.tif, *.tiff, *.txt, *.svg ([Healy et al., 2017, 2019](#)). Para el actual trabajo de investigación se usó del formato *.svg, a semejanza de lo realizado por [Tarazona](#)

[Lizcano y Vargas López \(2020\)](#); [Tarazona-Lizcano et al. \(2021\)](#), cada archivo de entrada se generó en el software de diseño gráfico vectorial CorelDRAW 2019.

FracPaQ permite realizar varios análisis a las fracturas mediante seis opciones disponibles: Maps, Lengths, Angles, Fluid flow, Wavelets y Graph; permitiendo cuantificar las longitudes, orientación (se requiere realizar una corrección del norte empleando la orientación de la fotografía registrada), intensidad, densidad, conectividad y permeabilidad del patrón de fracturas, con estos dos últimos un análisis preliminar del flujo de fluidos ([Tarazona Lizcano y Vargas López, 2020](#)). Solo cuatro de las opciones se utilizaron, Maps, Lengths, Angles, Fluid flow. Los cálculos se realizan con valores de píxel, si se desea obtener valores en unidad de metros se requiere especificar la cantidad de píxeles que conforman un metro en la imagen y así ajustar la escala.

La opción Maps permite obtener resultados de la traza de los segmentos, la que permite ver todos los lineamientos realizados y cada uno de los nodos que conforman la fractura (opcional). También permite generar los mapas de intensidad y densidad de fracturas para el afloramiento, para ello FracPaQ utiliza un análisis por ventana circular, por la que se puede especificar la cantidad de ventanas a usar, esta cantidad de círculos (12 es el valor por defecto) se disponen a lo largo del eje de menor longitud y se completa en proporción en el eje de mayor longitud.

La opción Lengths permite hacer un análisis estadístico de los lineamientos trazados, dividiéndolos en análisis del trazo total o por segmentos (un lineamiento o trazo se constituye de múltiples trazos). Los resultados corresponden a histogramas de longitud, frecuencia y longitud de los segmentos contra el ángulo del segmento.

En la opción Angles se encuentra el espacio para hacer la corrección del Norte, esta correc-

ción afecta los resultados de las gráficas, por lo que se debe realizar desde un comienzo. FracPaQ interpreta el Norte sobre el eje Y, siendo un valor de 0° a las 12 horas (análogo a un reloj) y aumenta su valor hasta 180° (6 horas en el reloj), por lo que si se desea tratar ángulos mayores a 180° se debe proceder a colocar valores negativos (apertura anti horaria). Ejemplo: corrección del norte es de 186° , se debe ingresar el valor de -174° . En esta opción también permite obtener el histograma de los ángulos (rumbo) de los segmentos y generar un diagrama rosa; para este último se puede realizar un ajuste por longitud, dando mayor importancia a los segmentos más largos, e incluir un vector que indica la media de los resultados.

FracPaQ permite realizar un análisis preliminar para el flujo de fluidos en la opción Fluis flow considerando los trabajos realizados por [Oda \(1982\)](#); [Oda et al. \(1987\)](#); [Suzuki et al. \(1998\)](#), donde considera el tensor de fracturas y su influencia en la matriz de roca. Los resultados generados por FracPaQ corresponden a un gráfico ternario de conectividad de los trazos realizados, una elipse de permeabilidad en dirección del flujo y una elipse de gradiente de presión.

4.3. Propiedades físicas de la roca

[Bohórquez López y Duque Garcés \(2020\)](#) realizan un análisis a los valores de resistividad y porosidad a muestras de roca de la formación Rosablanca en el municipio de Zapatos. [Ulloque Ardila \(sf\)](#) analiza las propiedades de porosidad, densidad, resistividad, cargabilidad, velocidad de la onda P y ensayo de carga puntual a las formaciones al sur de la MLS. Las consideraciones y metodología empleada por [Bohórquez López y Duque Garcés \(2020\)](#); [Ulloque Ardila \(sf\)](#) son consideradas para el actual trabajo de investigación.

Los análisis de las propiedades en laboratorio se realizan con los equipos disponibles en la

Universidad Industrial de Santander, usados en los trabajos de [Bohórquez López y Duque Garcés \(2020\)](#); [Ulloque Ardila \(sf\)](#), adicional se usa el equipo de susceptibilidad magnética:

- El equipo BLP-630 Automated Gas Porosimeter fue diseñado para medir de manera rápida y precisa la porosidad efectiva de una muestra de núcleo, se coloca una muestra en un portamuestras hermético y se aplica presión a un depósito de volumen conocido. Una vez que la presión se ha estabilizado, se abre una válvula, lo que permite que el gas dentro del depósito se expanda hacia el portamuestras. Cuando se alcanza el equilibrio, se mide y registra la nueva presión del sistema. La porosidad efectiva de la muestra de núcleo se puede calcular mediante el uso de la ley de Boyle ($P_1V_1 = P_2V_2$) junto con el volumen total de la muestra. Las variables V_1 y V_2 son constantes, que dependen de la geometría de la unidad y la porosidad efectiva del núcleo ([OFI Testing Equipment, Inc. \(OFITE\), 2015](#)).
- El Probador SCIP (Sample Core Induced Polarization) es un instrumento eficaz, compacto, ligero y de bajo consumo diseñado para medir la resistividad. El Probador SCIP (Sample Core Induced Polarization) mide las propiedades geofísicas del mineral como la resistividad y la cargabilidad. El SCIP 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 de 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 Inc., 2018](#)).

- El PLT-2W Wireless Point Load Test System permite para muestras de núcleos de roca o fragmentos de roca irregulares analizar el índice de resistencia de carga puntual y la resistencia a la compresión no confinada de la roca. Esta prueba no requiere una preparación costosa de la muestra y es una prueba rápida y sencilla. Con las placas ultrasónicas opcionales, la velocidad de la onda de compresión (P) también se mide antes de alcanzar la carga de falla ([GCTS Testing Systems, 2018](#)).
- El sensor de frecuencia dual MS2B es un sensor de laboratorio diseñado para medir muestras en contenedores que se colocan en la cavidad de la muestra. Los recipientes de muestras alojados por este sensor son los que se utilizan comúnmente en la mayoría de los laboratorios paleomagnéticos y magnéticos minerales; por tanto, las mediciones de NRM (magnetización remanente natural), IRM (magnetización remanente inducida), ARM (magnetización remanente anhistórica), etc. se pueden llevar a cabo sin ningún tratamiento adicional de la muestra ([Bartington Instruments, 2019a](#)). El MS3 es un medidor de susceptibilidad magnética que se puede utilizar con la gama de sensores MS2 para medir la susceptibilidad magnética de muchos tipos de materiales, incluidos suelos, rocas, polvos y líquidos ([Bartington Instruments, 2019b](#)).

Para la medición de las propiedades físicas de las rocas de la MLS se inició extrayendo los plugs de las muestras. El proceso de extracción del núcleo requiere que la muestra este en contacto con agua, por lo que extraído el núcleo se dejó secar por dos (2) días para que el agua se evaporara

y no genere un volumen no requerido en la medición. Con la muestra seca se procede a medir las dimensiones de cada uno de los plugs y el peso del mismo. La porosidad de los plugs se realiza con la unidad de referencia 40cc, entre los resultados del BLP-630 Automated Gas Porosimeter esta los valores de densidad.

Se realizó una primera medición de resistividad y cargabilidad de los plugs en seco, por indicaciones del manual del equipo cuando la resistencia de contacto de las placas con la muestra es mayor a $1\text{ k}\Omega$ se empleó una medición con tensión constante, de lo contrario se usó corriente constante. El manual del SCIP recomienda humedecer previamente las muestras en agua (al menos dos días sumergidas en agua de grifo) por lo que se registró una segunda medición con los plugs húmedos. El peso de los plugs en húmedo fue registrado para el cálculo del porcentaje de agua que retuvo la muestra durante la medición.

Para el ensayo de carga puntual y velocidad de onda P los plugs se dejaron secar por dos (2) días. El ensayo en el PLT-2W requiere definir previamente el tipo de prueba a realizar para cada plug, axial, diametral o irregular, posterior, se registra las dimensiones del plug y se ubica en medio de las dos puntas cónicas, se procede a ejercer presión hasta que falle el plug, al final la APP entrega los resultados de la carga de fallo y la velocidad de onda P medida durante el ensayo.

El equipo de susceptibilidad magnética MS2B tiene dos frecuencias de operación, la baja frecuencia (LF) es de 0.465kHz y la alta frecuencia de 4.65kHz, este equipo permite muestras con un volumen de 10cc. Los plugs fueron llevamos al volumen de referencia y se procedió a la medición en ambas frecuencias, el equipo entrega información de los valores de susceptibilidad magnética registrados y el porcentaje de cambio entre los valores de baja y alta frecuencia, o

dependencia de la frecuencia la cual es considerada principalmente para la exploración minera.

Los plugs fueron clasificados las formaciones aflorantes propuestas por [Pinto V. et al. \(2007\)](#) como Esquistos del Silgará (OSs), Granito de Pescadero (J1gp), formación Jordán (J1-2j), Formación Los Santos miembro inferior (K1ls_mi), Formación Los Santos miembro medio (K1ls_mm), Formación Los Santos miembro superior (K1ls_ms), Formación Rosablanca (K1r), Formación Paja (K1p). La clasificación litológica considera de manera general el trabajo de [Pinto V. et al. \(2007\)](#), por lo que se considera Ar=areniscas, Ld=lodolitas, Cg=conglomerados, Lc=lodos calcáreos, Ca=calizas, Bm=biomicritas, Ac=areniscas calcáreas, Gr=granito, Ma=meta-arenisca, Es=esquisto. Considerando esta clasificación se procede a representan por subgrupos de litología y formación los resultados haciendo uso de diagramas de cajas y enjambres.

Un diagrama de caja (boxplot) es un gráfico utilizado para representar una variable cuantitativa (variable numérica), este gráfico es una herramienta que permite visualizar, a través de los cuartiles, cómo es la distribución, su grado de asimetría, los valores extremos, la posición de la mediana, etc. Se compone de:

- Un rectángulo (caja) delimitado por el primer y tercer cuartil (Q1 y Q3). Dentro de la caja una línea indica dónde se encuentra la mediana (segundo cuartil Q2)
- Dos brazos, uno que empieza en el primer cuartil y acaba en el mínimo, y otro que empieza en el tercer cuartil y acaba en el máximo.
- Los datos atípicos (o valores extremos) que son los valores distintos que no cumplen ciertos requisitos de heterogeneidad de los datos.

Un diagrama de enjambre (swarm plot, beeswarm plot) es otra forma de representar gráficamente la distribución de un atributo o la distribución conjunta de un par de atributos, es un buen complemento para un diagrama de caja o de violín en los casos en los que se desea evaluar todas las observaciones (información de los BoxPlots) junto con alguna representación de la distribución subyacente.

4.4. Modelos de red neuronal

Scikit-learn ([Pedregosa et al., 2011](#)) es un módulo de Python en el que se disponen de varios algoritmos de aprendizaje automático para problemas supervisados y no supervisados de mediana escala. Este módulo es una herramienta que permite dar inicios en el aprendizaje automático para facilidad de nuevos usuarios.

Scikit-learn ofrece modelos de redes neuronales de entrenamiento supervisado, para ello emplea el Multi-layer Perceptron ([MLP](#)) el cual se entrena mediante un conjunto de datos seleccionados previamente. Dependiendo del objetivo se puede hacer uso de un aproximador de función no lineal para clasificación o regresión. Se debe tener presente que la herramienta usada no está destinada a aplicaciones a gran escala, por lo que realizar implementaciones mucho más rápidas, así como poder tener mucha más flexibilidad para construir arquitecturas de aprendizaje profundo se puede hacer uso de otros módulos adicionales desarrollados en Python.

El Multi-layer Perceptron regressor ([MLPRegressor](#)) implementa un algoritmo el cual hace una predicción (salida) a partir de los unos datos de entrada con los que fue entrenado. El Multi-layer Perceptron classifier ([MLPClassifier](#)) genera una salida de en la cual clasifica los datos de entrada considerando las etiquetas con las que fue entrenada, ambos algoritmos consideran la re-

tropagación en su ejecución. El Perceptron multicapa es sensible al escalado de características, por lo que se recomienda encarecidamente escalar los datos, se debe tener en cuenta que la misma escala se debe aplicar al conjunto de prueba para resultados significativos (Pedregosa et al., 2011). Para cada propiedad física a predecir se realizó de manera individual un modelo.

Para el entrenamiento se procedió iniciando con la selección de los datos de entrada, los cuales corresponden a las coordenadas X, Y y Z de cada una de las muestras, adicionalmente la unidad geológica a la cual corresponda y la distancia a la falla más cercana, estos dos últimos parámetros son tomados considerando los mapas de Pinto V. et al. (2007). Los valores a predecir, valores de salida, corresponden a las respectivas propiedades físicas de la roca obtenidas en laboratorio. El parámetro de unidad litológica debe ser de carácter numérico, por lo que a cada unidad se le asignó un número ('K1t':8, 'K1p':7, 'K1r':6, 'K1ls_ms':5, 'K1ls_mm':4, 'K1ls_mi':3, 'J1-2j':2, 'J1gp':1, 'OSs':0). Siguiendo las recomendaciones se estandarizan los datos de entrada de la localización, y distancia a la falla, al ser números de gran magnitud, empleando valores mínimos y máximos de referencia (Tabla 6) y con la siguiente ecuación:

$$X_{normalizado} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (22)$$

Para mejorar el rendimiento de la red, a los valores de resistividad, cargabilidad y velocidad de onda P se les calculó el \log_{10} el cual será el valor a predecir. Ajustados los datos de entrada para cada modelo, se procede a dividirlos en datos de entrenamientos y datos de prueba los cuales corresponden al 80% y 20% respectivamente. Para la predicción de las propiedades se

Tabla 6

Valores mínimos y máximos considerados para estandarizar las Coordenada X, Coordenada Y, Coordenada Z y la Distancia a la Falla en la etapa de entrenamiento de la red neuronal, este proceso de estandarizar se debe repetir cuando se desea predecir una propiedad.

Parámetro	Valor mínimo [m]	Valor máximo [m]
Coordenada X	1096700	1120100
Coordenada Y	1235500	1260100
Coordenada Z	-150	1830
Dist. Falla	0	3000

emplea el MLPRegressor, el cual dispone de varios elementos que regulan su ejecución, siendo `hidden_layer_sizes`, `activation` y `solver` los elementos a modificar principalmente.

- `hidden_layer_sizes`: define el número de capas y cantidad de neuronas en cada una de ellas.

Ejemplo, (10,5,3,2) corresponde a un total de 4 capas ocultas, donde la primera (capa entrada) está constituida de 10 neuronas, las segunda por 5, la tercera capa con 3 neuronas y la última capa oculta con 2.

- `activation`: es la función de activación de las capas ocultas. Las disponibles son:
 - ‘identity’: activación no operativa, útil para implementar cuellos de botella lineales, $f(x) = x$.
 - ‘logistic’: la función sigmoidea logística, $f(x) = 1/(1 + \exp(-x))$.
 - ‘tanh’: la función de tangente hiperbólica, $f(x) = \tanh(x)$.
 - ‘relu’: la función de unidad lineal rectificada, $f(x) = \max(0, x)$.
- `solver`: El solucionador para la optimización del peso. Las disponibles son:

- ‘lbfgs’: es un optimizador de la familia de métodos cuasi-Newton.
- ‘sgd’: se refiere al descenso de gradiente estocástico.
- ‘adam’: se refiere a un optimizador estocástico basado en gradientes propuesto por [Kingma y Ba \(2014\)](#).

Existen diferentes maneras de evaluar un modelo entrenado, entre ellos uno rápido es empleando la opción score para los MLP. El cual devuelve el coeficiente de determinación R^2 de la predicción:

$$R^2 = \left(1 - \frac{u}{v}\right) \quad (23)$$

Donde u es la suma residual de cuadrados $((y_{\text{true}} - y_{\text{pred}}) ** 2).sum()$, y v es la suma total de cuadrados $((y_{\text{true}} - y_{\text{true}.mean()}) ** 2).sum()$. La mejor puntuación posible es 1.0 y puede ser negativa (porque el modelo puede ser arbitrariamente peor). Un modelo constante que siempre predice el valor esperado de y , sin tener en cuenta las características de entrada, obtendría una puntuación R^2 de 0.0 ([Pedregosa et al., 2011](#)).

El encontrar la función de activación, el solucionador, numero de capas y neuronas de las mismas adecuado es una labor empírica, mediante prueba y error. Considerando los trabajos de [Allo et al. \(2021\)](#); [Parra et al. \(2014\)](#); [You et al. \(2020\)](#) se parte de una red neuronal inicial con 5 entradas, 1 salida y en medio 2 capas ocultas, para un total de 4 capas. Las primeras tres capas inician con 5 nodos iniciales los cuales fueron aumentando hasta una cantidad de nodos máxima de 100, 50 y 25 respectivamente, la capa de salida corresponde a 1 nodo o neurona. Por lo que se

generaron diferentes modelos variando los parámetros de la red, todos los modelos con un score mayor o igual a 0.30 fueron guardados para ser comparados posteriormente.

Al considerar la unidad geológica en la predicción de las propiedades físicas de la roca, se empleó el MLPClassifier para obtener un modelo que permita establecer la unidad geológica de un punto (con coordenadas X, Y y Z) localizado en la MLS. Para ello se consideraron el mapa y los cortes geológicos propuestos por [Pinto V. et al. \(2007\)](#), los valores de salida de unidad geológica considerando la secuencia numérica previamente establecida. Los parámetros del MLPClassifier a considerar son los mismos que el MLPRegressor y se procedió de la misma manera, adicionalmente se evaluó de manera visual todos los modelos que lograran un score de 0.70 y poder tomar el más adecuado. Se debe considerar que el modelo geológico siempre quedará a la interpretación y consideración del geólogo o persona que haga uso de las redes.

5. Resultados

5.1. Patrones de fracturas y cinemática de fallas

Un total de setenta y dos (72) estaciones fueron visitadas durante la campaña de campo (Anexo 1). Considerando el modelo geológico presentado por [Pinto V. et al. \(2007\)](#) y las evidencias en campo la distribución litológica de las estaciones corresponde a seis (6) estaciones en los Esquistos del Silgará, cinco (5) estaciones en el Granito de Pescadero, diez (10) estaciones en la Formación Jordán, cuarenta y una (41) estaciones en la Formación Los Santos, ocho (8) estaciones en la Formación Rosablanca, una (1) estación en la Formación Paja, y una (1) estación en la Formación Tablazo.

[Pinto V. et al. \(2007\)](#) dividen el área de la MLS en cuatro (4) bloques estructurales (Bloque Montes, Bloque Tabacal, Bloque Mojarra y Bloque Minas) considerando la importancia de las fallas principales. Para el actual trabajo de investigación se considera el cambio de rumbo de las fallas evidenciado desde la Falla Potreros, proponiendo cuatro bloques estructurales (Figura 9) y se nombran como Bloque Cuchilla (corresponde al Bloque Montes), Bloque Mirados (corresponde al Bloque Tabacal hasta la Falla Potreros del Bloque Mojarra), Bloque Agudo (corresponde al Bloque Mojarra iniciando en la Falla Potreros) y Bloque Minas (se mantuvo el nombre propuesto por [Pinto V. et al. \(2007\)](#)).

5.1.1. Análisis de diaclasas. En cuarenta (40) estaciones se identificaron planos asociados a estratificación o a foliación, donde un 87 % presentan un buzamiento menor a los 30°. Un total de 1187 planos fracturas se midieron en cuarenta y cinco (45) estaciones en la MLS,

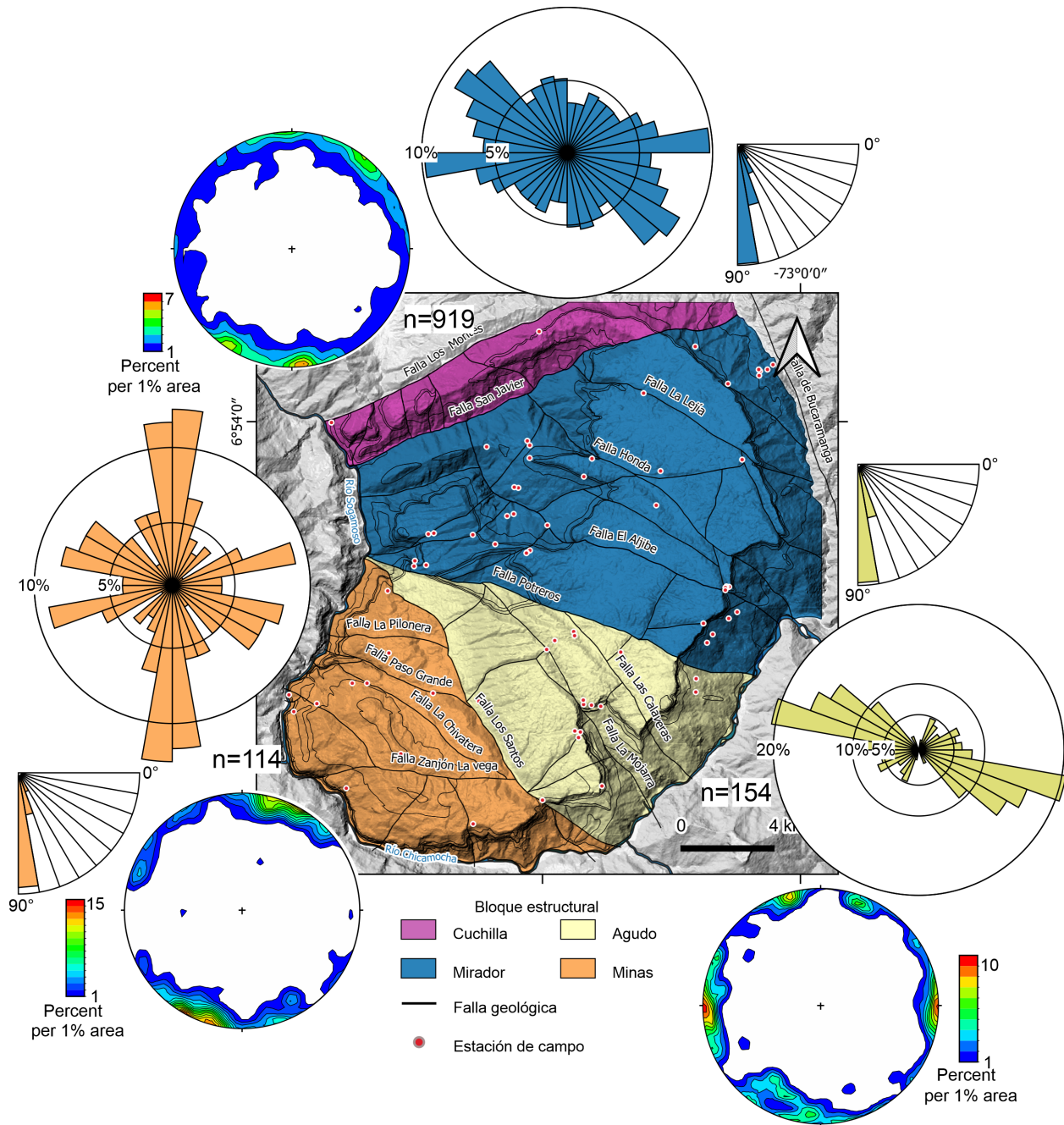


Figura 9. Diagramas rosas y diagramas de densidad de polos, generados en el software GeoRose y Stereonet, de los planos de fracturas medidos en campo para cada uno de los bloques estructurales modificados de Pinto V. et al. (2007).

más del 75 % de los planos de fracturas tiene un buzamiento mayor de los 70° (Figura 9). Para el Bloque Cuchilla no se realizó la medición de planos de fracturas debido a las limitantes de acceso, 919 planos de fractura fueron medidos en el Bloque Mirador, 154 planos de fracturas en el Bloque Agudo y 114 planos de fracturas para el Bloque Minas (Figura 9). Empleando el software GeoRose es posible generar diagramas de rosas para visualizar las direcciones de rumbo de los planos de diaclasas, fallas y estratificación.

El Bloque Cuchilla se encuentra limitado por la Falla Los Montes al norte y la Falla San Javier al sur, estas fallas tienen un azimut de rumbo de 60° aproximadamente. El Bloque Mirador se limita al norte por la Falla San Javier y al sur por la Falla Potreros, al este la Falla de Bucaramanga esta próxima a este bloque; las fallas La Lejía y Honda se localizan en el bloque y presentan un azimut de rumbo paralelo a la Falla El Aljibe de 120° aproximadamente. Los planos de fracturas medidos en el Bloque Mirador generalizan dos tendencias en el azimut de rumbo, la principal entre los 80° – 90°, la secundaria entre los 120° – 140°, la diferencia entre los dos rumbos es aproximadamente de 60° considerando los valores extremos (Figura 9).

El Bloque Agudo presenta una forma de cuña, limitada al norte por la Falla Potreros y al Sur por la Falla Los Santos, esta última se considera como un límite geológico al diferenciar de manera lateral las formaciones Los Santos y Rosablanca. Las fallas Los Santos, La Mojarra y Las Calaveras tienen un azimut de rumbo próximo a los 150°. El azimut de rumbo de los planos de fracturas para este bloque se concentra en el rango de los 100° – 130°, con una tendencia mayor a los 100° – 110° (Figura 9).

En el Bloque Minas afloran principalmente las unidades carbonatadas, la Formación Rosa-

blanca es la que cubre mayor área. Los planos de fracturas en este bloque presentan tres direcciones preferenciales, la mayor concentración de azimut de rumbo están entre los $350^{\circ} - 10^{\circ}$, las otras dos tendencias son entre los $70^{\circ} - 80^{\circ}$ y $100^{\circ} - 130^{\circ}$. Las fallas La Pilonera, Paso Grande y La Chivatera presentan un azimut de rumbo cercano a los 110° , la Falla Zanjón de la Vega tiene un azimut de rumbo cercano a los 95° (Figura 9).

5.1.2. Análisis cinemático. En diecinueve (19) estaciones se identificaron planos estriados (Anexo 1), registrándose un total de ciento veinte seis (126) datos, solo en seis (6) estaciones (el nombre del tensor alude a la respectiva estación) se realizó el registro de más de cuatro datos de planos estriados para garantizar un tensor local confiable. Los resultados del procesamiento de los planos estriados, direcciones de esfuerzo y planos involucrados para el cálculo del tensor, son localizados espacialmente en la MLS (Figura 10). Los resultados se localizan sobre la Formación Los Santos, por la naturaleza kárstica de la Formación Rosablanca la superficie de posibles planos estriados se evidenciaba disolución y meteorización afectando en la confiabilidad de los mismos por lo cual no se registró información al sector sur de la MLS.

En las 6 estaciones donde se obtuvo una orientación del tensor de esfuerzos la coherencia de los resultados se garantizó a partir de la distribución de los datos en el círculo de Mohr, tomando los datos asociados a fallas neoformadas o reactivadas, evitando los datos de la zona estable (Figura 10). Esto en consideración de que en una estación de campo pueden coexistir fallas de rumbo, normales o inversas que darán un régimen transcurrente, de distensión o compresión, respectivamente.

El resultado de los tensores locales y un tensor general obtenido (Tabla 7) es considerado

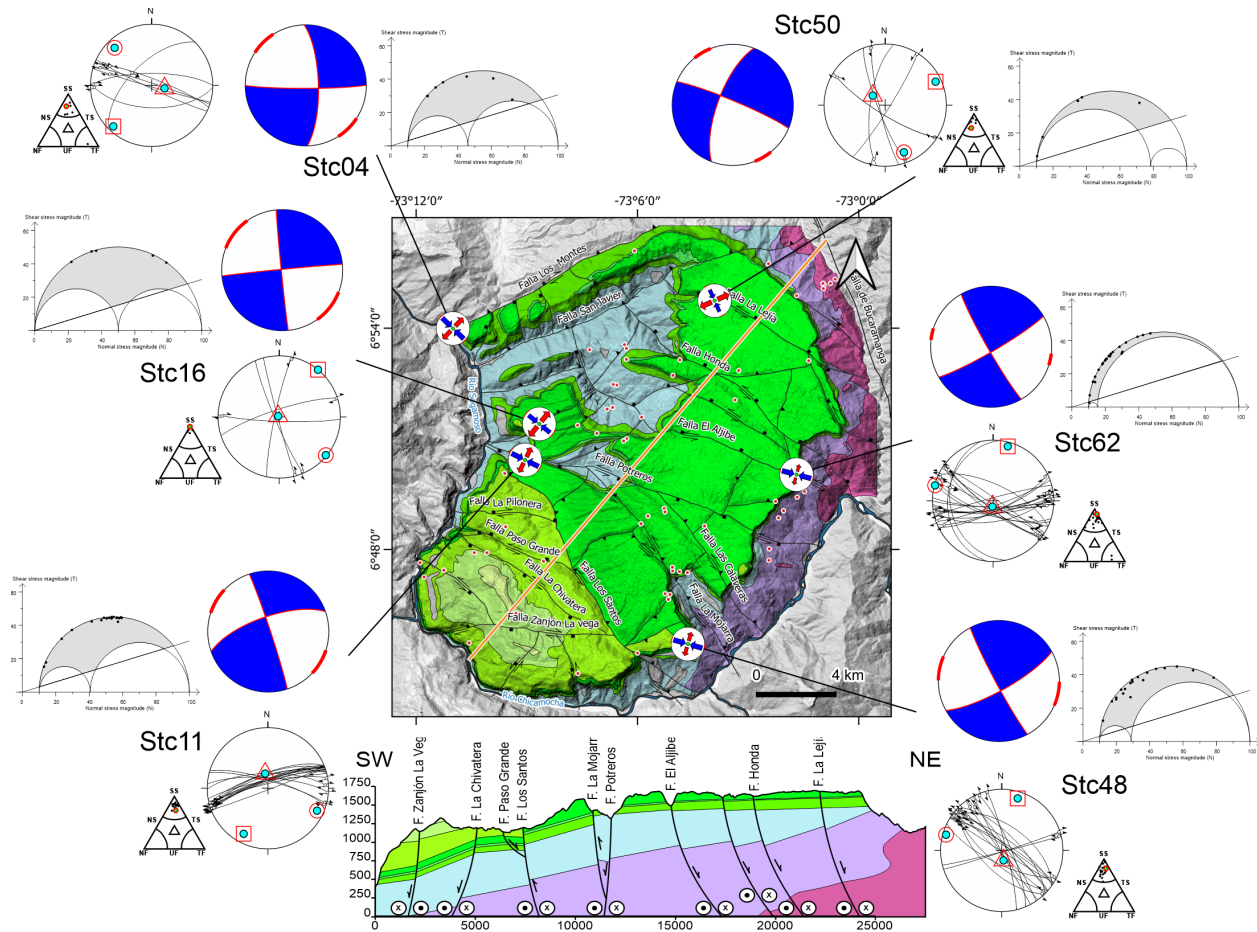


Figura 10. Seis tensores locales se obtuvieron los cuales explican la cinemática de las fallas mayores y menores en la MLS. El tensor general obtenido empleando todos los datos de estrías generaliza una orientación del esfuerzo principal de 290° para la MLS. El corte geológico esquemático considerando el nuevo modelo estructural y la geología propuesta por Pinto V. et al. (2007).

junto con las evidencias en campo para realizar el ajuste cinemático de los trazos de falla. En un primer paso para la generación del tensor general cuarenta y cuatro (44) datos fueron descartados en el método de Diedros Rectos Mejorado, de los ochenta y dos (82) restantes solo se conservaron setenta y cuatro (74) en el método Optimización Rotacional. El esfuerzo principal obtenido corresponde a una orientación de 290° y un R' de 1.50 considerado como un régimen de esfuerzos de

Transcurrencia pura (Figura 11).

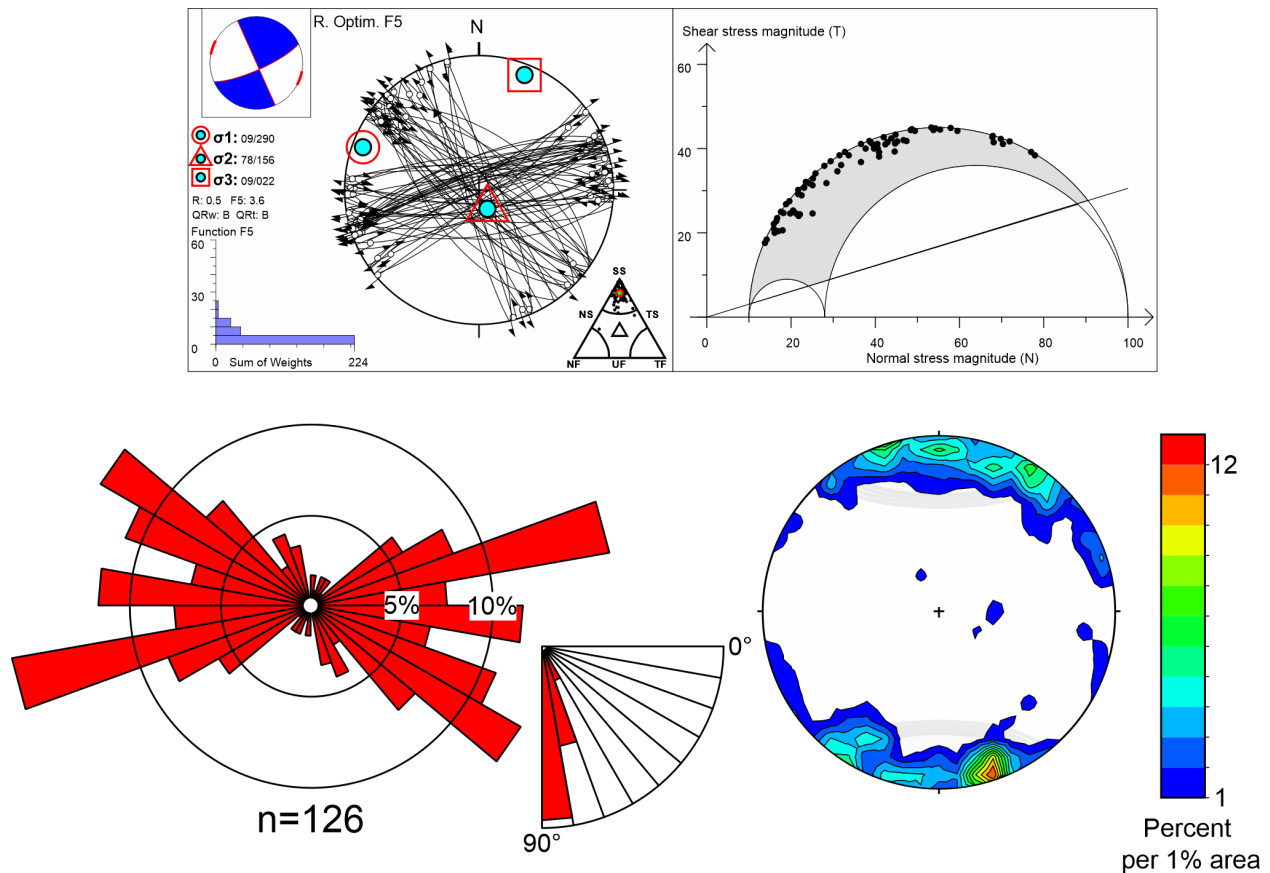


Figura 11. El tensor general obtenido empleando todos los datos de estrías generaliza una orientación del esfuerzo principal de 290° para la MLS. Se generan los diagramas rosas y densidad de polos para los planos estriados, evidenciando la presencia de planos conjugados asociables a un sistema de cizalla.

El *Tensor Stc50* se localiza en el Bloque Mirador en cercanía a la Falla La Lejía ($\approx 125^\circ$ azimut de rumbo), de los seis (6) datos medidos en la estación ninguno fue descartado por el software durante el método de Diedros Rectos Mejorados o el método Optimización Rotacional. El esfuerzo principal obtuvo una orientación de 158° y un R' de 1.24 considerado como un régimen de esfuerzos de Transtensión, este esfuerzo presenta una orientación casi paralela a La Falla de

Bucaramanga (azimut de rumbo de $\approx 160^\circ$) por lo que se puede considerar la influencia de esta falla al NE de la MLS. El régimen de esfuerzos de este tensor explica el fallamiento de rumbo con componente normal de la Falla La Lejía, Falla Honda y fallas menores con rumbo NW en el Bloque Mirador, estas fallas presentan un comportamiento sintético respecto a la Falla de Bucaramanga; las otras fallas menores de rumbo NE y NS corresponden a fallas inversas.

El *Tensor Stc62* localizado en el Bloque Mirador en cercanía de la Falla El Aljibe ($\approx 295^\circ$ azimut de rumbo) de los treinta (30) planos estriados iniciales se conservaron durante el método de Diedros Rectos Mejorado, en el método de Optimización Rotacional se descartaron ocho (8) conservando veintidós (22) datos. El esfuerzo principal para este tensor obtuvo una orientación de 285° y un R' de 1.94 considerado como un régimen de esfuerzos de Transpresión. Este tensor presenta un rumbo paralelo a la Falla El Aljibe y Falla Potreros, con un el comportamiento de fallas de rumbo con componente normal para estas fallas, este tensor explica el fallamiento inverso de las fallas menores al sur del Bloque Mirador con rumbo NE. La diferencia en la dirección de esfuerzos de este tensor respecto al *Tensor Stc50* es de 53° .

En el Bloque Agudo se localiza el *Tensor Stc48* entre las fallas La Mojarra y Los Santos ($\approx 330^\circ$ azimut de rumbo para ambas fallas). Cinco (5) datos de los veinticuatro (24) iniciales fueron descartados en el método de Diedros Rectos Mejorado, los diecinueve (19) restantes se conservaron durante el método de Optimización Rotacional. El esfuerzo principal obtuvo una orientación de 286° y un R' de 1.79 considerado como un régimen de esfuerzos de Transpresión. Esta orientación de esfuerzo del tensor es semejante a la del *Tensor Stc62* presentando una diferencia de 1° . La solución del *Tensor Stc48* expresa para las fallas con orientación de rumbo NW (fallas Las Ca-

laveras, La Mojarra y Los Santos) una cinemática de cizalla con componente inverso, y las fallas menores con orientación de rumbo NE una cinemática inversa en el Bloque Agudo.

El *Tensor Stc11* y *Tensor Stc16* se localizan al Oeste en el Bloque Mirador, ambos en cercanía de la Falla Potreros ($\approx 115^\circ$ azimut de rumbo). El *Tensor Stc16* está retirado de la Falla Potreros, ninguno de los cinco (5) datos fueron descartados durante el proceso para generar un tensor; para el *Tensor Stc11* cercano a la falla, cinco (5) datos fueron descartados de los veintitrés (23) iniciales durante el método de Diedros Rectos Mejorado, los dieciocho (18) restante se conservaron durante el método de Optimización Rotacional. El esfuerzo principal para el *Tensor Stc16* obtuvo una orientación de 129° y un R' de 1.40 y para el *Tensor Stc11* una orientación de 115° y un R' de 1.66, considerado como un régimen de esfuerzos de Transcurrecia pura para ambos tensores. La diferencia en la orientación de esfuerzo entre estos dos tensores es de 14° ; respecto al *Tensor Stc62* localizado al Este del Bloque Mirador el *Tensor Stc16* difiere en 24° en y 10° con el *Tensor Stc11*. Los resultados de los *Tensores Stc16* y *Stc11* corroboran la cinemática de rumbo con componente normal de las fallas mayores, y un fallamiento inverso para las fallas menores con rumbo NE en el Bloque Mirador.

Para el *Tensor Stc04* localizado en el Bloque Cuchilla en cercanía de la Falla Los Montes ($\approx 245^\circ$ azimut de rumbo) seis (6) datos fueron descartados de los trece (13) iniciales durante el método de Diedros Rectos Mejorado, los siete (7) restantes se mantuvieron en el método de Optimización Rotacional. El esfuerzo principal obtenido es de una orientación 315° y un R' de 1.60 considerado como un régimen de esfuerzos de Transcurrencia pura. Este tensor difiere en 6° respecto al *Tensor Stc16* y 23° con el *Tensor Stc50* del Bloque Mirador, en el Bloque Cuchilla

Tabla 7

Resultados para los 6 tensores locales y el tensor generalizado durante el procesamiento de los conjuntos de planos estriados asociados a fallamiento. Obteniendo la orientación de los esfuerzos principales, el número de datos estructurales medidos, las relaciones R y R' , los parámetros estadísticos: α (ángulo promedio de error entre la dirección de deslizamiento observada y modelada), y $F5$ (valor medio de la función de optimización), la orientación del esfuerzo horizontal máximo (Sh_{max}) y mínimo (Sh_{min}), y el régimen de esfuerzos deducidos por el programa (Tabla 3).

Tensor	n	nt	σ_1	σ_2	σ_3	R	R'	Shmax	Shmin	α	F5	QRw	QRt	Régimen de esfuerzos
Stc50	6	6	18/158	69/307	10/065	0.76	1.24	156	66	3.8	1.8	D	D	Transtensión
Stc62	23	30	01/285	82/187	08/015	0.06	1.94	105	15	7.1	2.1	B	C	Transpresión
Stc48	19	24	06/286	77/170	12/017	0.21	1.79	106	16	6.0	1.7	B	C	Transpresión
Stc11	18	23	12/115	70/350	16/208	0.34	1.66	116	26	4.4	1.2	C	E	Transcurrencia pura
Stc16	5	5	02/129	88/307	00/039	0.60	1.50	129	39	3.1	1.9	E	E	Transcurrencia pura
Stc04	7	13	15/315	72/103	09/223	0.40	1.60	134	44	7.7	3.0	D	D	Transcurrencia pura
Todos	74	126	09/290	78/156	09/022	0.50	1.50	111	21	9.0	3.6	B	B	Transcurrencia pura

las fallas principales corresponden a la Falla Montes y Falla San Javier, las cuales considerando al tensor obtenido corresponde a fallas de rumbo con componente inverso, las fallas menores del bloque con orientación NS y NW corresponden a un fallamiento normal.

La cinemática al sur de la MLS se considera a partir del resultado del Tensor general (Figura 11), las fallas La Pilonera, Paso Grande y La Chivatera con una orientación de rumbo NW corresponde a fallas de rumbo con un componente normal al presentar trazos de falla cercanos a la orientación de rumbo del esfuerzo principal de 290° ; estas fallas presentan una cinemática sintética respecto a la Falla Los Santos.

Los tensores obtenidos presentan una orientación del esfuerzo principal EW al centro de La MLS en cercanías a las Falla Potreros, y una orientación con tendencia NW al norte y sureste de la MLS.

5.1.3. Cuantificación de patrones de fractura. En sesenta y dos (62) estaciones fue posible la obtención de una evidencia fotográfica de un afloramiento despejado y con escala de referencia para ser procesadas en FracPaQ (Anexo 1), al no ser posible visualizar todas las estaciones en el mapa se presentan las estaciones que permiten correlacionar y contrasta información. Una (1) estación fue analizada en FracPaQ para el Bloque Cuchilla (Figura 12), treinta y cuatro (34) para el Bloque Mirador (Figura 12), diecisiete (17) para el Bloque Agudo (Figura 13) y diez (10) para el Bloque Minas (Figura 14).

Para los análisis realizados en FracPaQ no se tuvo discriminación de lineamientos, se consideraron los lineamientos asociados con estratificación y fracturamiento, solamente los lineamientos asociados al fracturamiento fueron representados en FracPaQ empleando el diagrama rosa, este diagrama es comparando con los resultados de los planos medidos en campo (Figura 9) y ver la similitud de los mismos.

El diagrama rosa de FracPaQ de la estación Stc32 localizada entre la Falla Los Montes y Falla San Javier, Bloque Cuchilla (Figura 12), presenta dos direcciones preferenciales, uno de ellos semejante al rumbo de las fallas mayores y el otro perpendicular a este rumbo, la orientación de flujo estimado es EW.

Las fallas La Lejía, Honda, El Aljibe y Potreros en el Bloque Mirador (Figura 12) presentan un trazo casi paralelo entre ellas, la orientación de los lineamientos asociados al fracturamiento es similar al rumbo de estas fallas mayores (ejemplo Stc20, Stc50, Stc52, Stc60, Stc67). Una segunda orientación con un ángulo agudo respecto al trazo de falla se presenta en los diagramas, los

cuales puede corresponder con la orientación los trazos de fallas menores (ejemplo Stc26, Stc45, Stc67) o posibles evidencias de las direcciones asociables a planos sintéticos o antitéticos de las fallas mayores. Las direcciones de flujo estimadas por FracPaQ para cada una de las estaciones no siempre es semejante a la orientación preferencia de los lineamientos asociados al fracturamiento principal (ejemplo Stc28, Stc50, Stc51), aun así, la orientación de flujo es semejante a los trazos de falla cercanos a la respectiva estación analizada.

En el sector centro-sur de la MLS, Bloque Agudo (Figura 13), se presenta un cambio en el rumbo de las fallas mayores, en este sector las estaciones cercanas a las fallas Las Calaveras (ejemplo Stc37, Stc37), La Mojarra (ejemplo Stc36, Stc46, Stc47) y Los Santos (ejemplo Stc19) presentan una tendencia en la orientación de los lineamientos asociados al fracturamiento concordante con el rumbo de estas fallas, y una segunda orientación casi ortogonal respecto a la primera orientación. Al sur, Bloque Minas (Figura 14), donde afloran las formaciones carbonatadas se mantiene la relación entre las fallas y las orientaciones de los lineamientos (ejemplo Stc01, Stc03, Stc10, Stc18); la dirección de flujo estimada por FracPaQ para las estaciones localizada en el Bloque Minas (ejemplo Stc01, Stc02, Stc03) y Bloque Agudo (ejemplo Stc19, Stc33, Stc36, Stc38, Stc41, Stc46) presentan una orientación similar a los trazos de fallas cercano a la respectiva estación.

Las fallas La Lejía, Honda, El Aljibe y Potreros presentan un rumbo semejante al tensor de esfuerzos, y con una componente de cinemática normal, bajo estas consideraciones planos de fracturas semejantes a los trazos de fallas y tensor presentarían una apertura y predisposición al flujo de agua. Las fallas de ángulo agudo respecto al tensor y de cinemática normal como La Pilonera, Paso Grande, La Chivatera y Zanjón La Vega serian preferenciales para el flujo de agua.

Para las fallas compresivas como las fallas Las Calaveras, La Mojarra y Los Santos, fracturas de tensión son generadas de manera perpendicular al trazo de falla.

Los resultados de intensidad y densidad de los lineamientos en FracPaQ (Figura 15) presentan un patrón semejante entre ellos. Valores bajos en la intensidad ($<16 \text{ lineamientos} \cdot \text{m}^{-1}$) y densidad ($<287 \text{ lineamientos} \cdot \text{m}^{-2}$) son estimados para el sector norte (Bloque Cuchilla y Bloque Mirador), los valores más bajos se asocian al miembro superior de la Formación Los Santos y áreas cercanas a las fallas La Lejía, Honda y El Aljibe. El sector entre la Falla El Aljibe y la Falla Potreros (Bloque Mirador) y sector sur donde afloran unidades carbonatadas (Bloque Minas), se estiman valores intermedios de intensidad ($16\text{-}28 \text{ lineamientos} \cdot \text{m}^{-1}$) y densidad ($287\text{-}1065 \text{ lineamientos} \cdot \text{m}^{-2}$); estas áreas de baja-media intensidad y densidad de fracturamiento corresponden con la localización de fallas con una componente normal en su cinemática. Entre la Falla Potreros y Falla Los Santos (Bloque Agudo) los trazos de falla se asocian a un comportamiento más compresivo, se estiman valores altos de intensidad ($>20 \text{ lineamientos} \cdot \text{m}^{-1}$) y densidad ($>616 \text{ lineamientos} \cdot \text{m}^{-2}$), las estaciones cercanas a la Falla La Mojarra son las de mayores valores, estas estaciones corresponden a las areniscas del miembro superior de la Formación Los Santos.

La conectividad de los lineamientos asociados al fracturamiento y estratificación en FracPaQ es representado empleando un gráfico ternario (Figura 16) considerando la correlación de los nodos I (extremos aislados), nodos Y (puntos de ramificación), y nodos X (intersecciones); donde una mayor cantidad de nodos Y y X implican una mayor conectividad de los lineamientos y su localización más cerca de la base del gráfico ternario. Las estaciones analizadas correspondientes al Granito de Pescadero, Esquistos del Silgará y Formación Jordán presentan una baja conecti-

vidad, localizados en la parte alta del gráfico ternario; algunas estaciones de la Formación Los Santos se localizan en esta área del gráfico. En su mayoría las estaciones analizadas corresponden a la Formación Los Santos, localizándose en todo el rango de conectividad obtenidos; por lo que valores altos de conectividad son asociados con esta formación, la única estación de la Formación Tablazo presenta un valor alto en la conectividad de los lineamientos, las estaciones localizadas en la Formación Rosablanca presentan una conectividad intermedia respecto al área que cubren en el gráfico ternario.

En el análisis cuantitativo de la conectividad de los lineamientos se considera que resultados mayores a 2 son las mejores conectividades (Figura 17); el sector norte de la MLS presenta una baja conectividad por línea (<1.40) hasta las cercanías de la Falla El Aljibe (Bloque Mirador), este sector se correlaciona con las estaciones localizadas en la parte alta del gráfico ternario. Entre la Falla El Aljibe y la Falla Potreros (Bloque Mirador) los valores son intermedios (1.40-1.73), y los valores altos (>1.73) se asocian al sector sur (Bloque Agudo y Bloque Minas), donde los valores de mayor conectividad corresponden a las estaciones asociadas a la Formación Los Santos entre las fallas Potreros y Los Santos, en menor medida las estaciones localizadas en las unidades carbonatadas visitadas, Formación Rosablanca y Formación Tablazo.

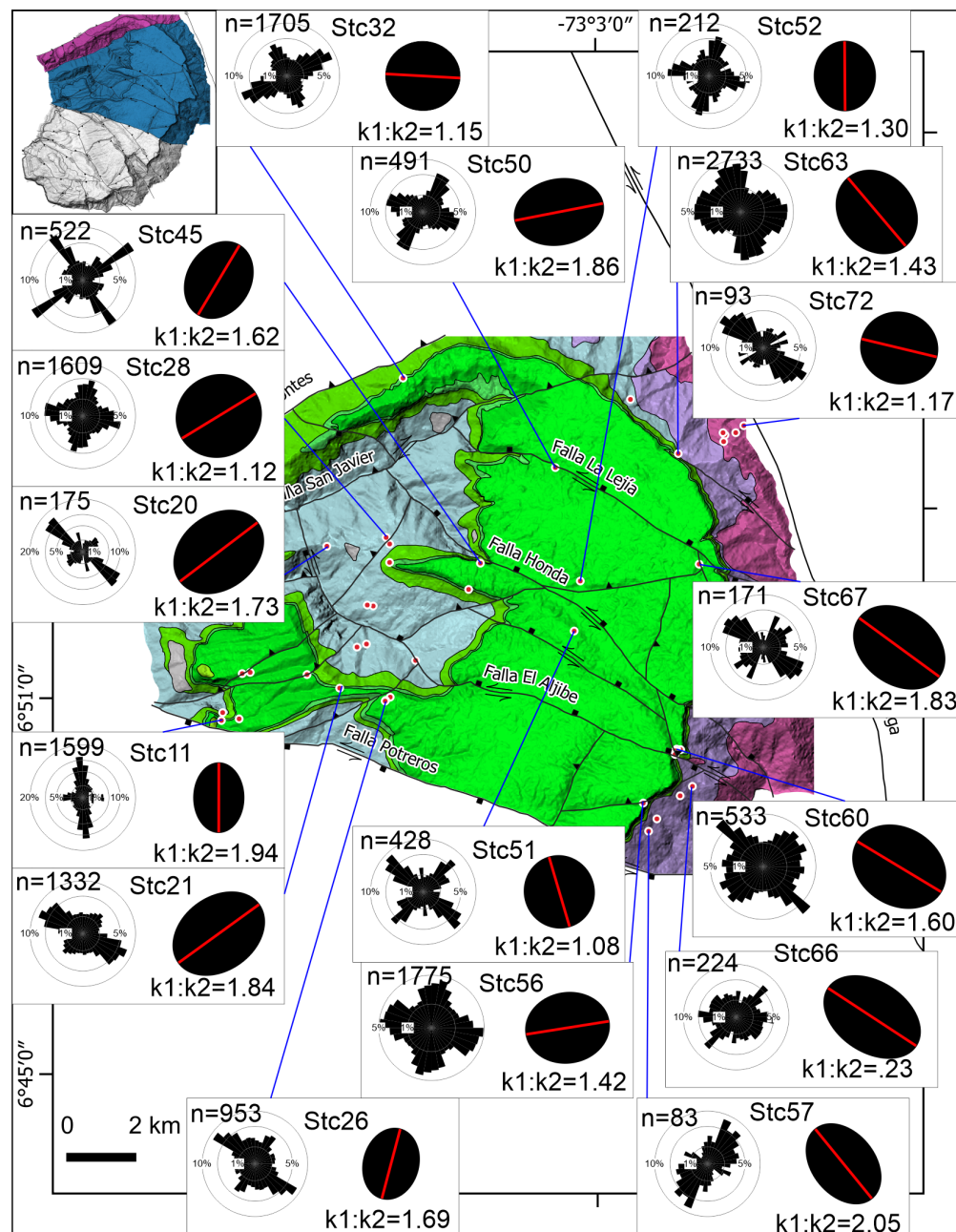


Figura 12. Resultados del análisis de los patrones de fractura empleando FracPaQ para el Bloque Cuchilla y Mirador de las estaciones con un registro fotográfico adecuado, los diagramas rosas corresponden a los lineamientos asociados al fracturamiento, para la generación de la elipse de la dirección de flujo se consideraron los lineamientos asociados al fracturamiento y estratificación. El eje mayor de la elipse (línea roja) corresponde a la dirección de flujo estimada en FracPaQ. Los puntos rojos corresponden a todas las estaciones visitadas en la actividad de campo.

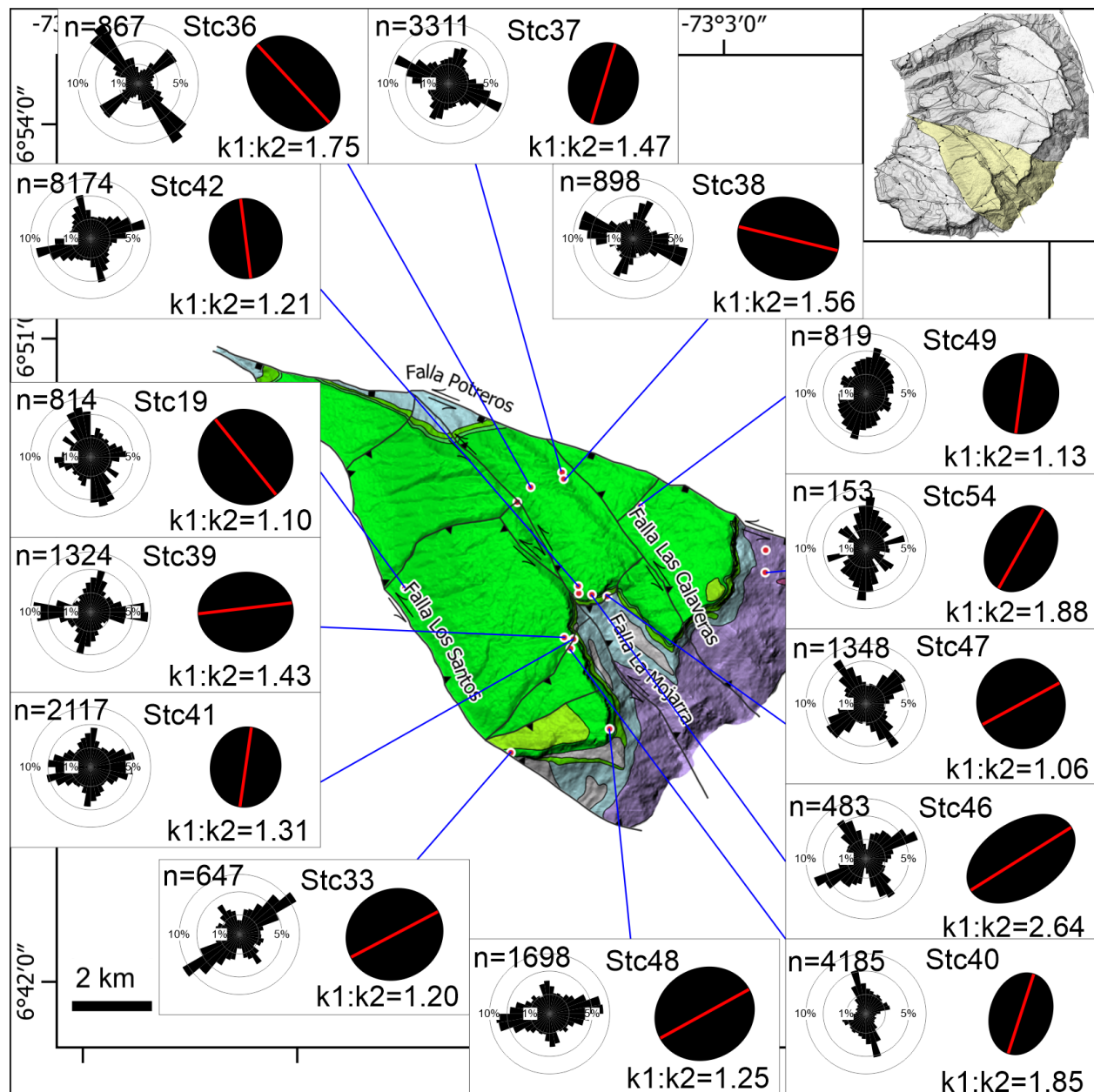


Figura 13. Resultados del análisis de los patrones de fractura empleando FracPaQ para el Bloque Agudo de las estaciones con un registro fotográfico adecuado, los diagramas rosas corresponden a los lineamientos asociados al fracturamiento, para la generación de la elipse de la dirección de flujo se consideraron los lineamientos asociados al fracturamiento y estratificación. El eje mayor de la elipse (línea roja) corresponde a la dirección de flujo estimada en FracPaQ. Los puntos rojos corresponden a todas las estaciones visitadas en la actividad de campo.

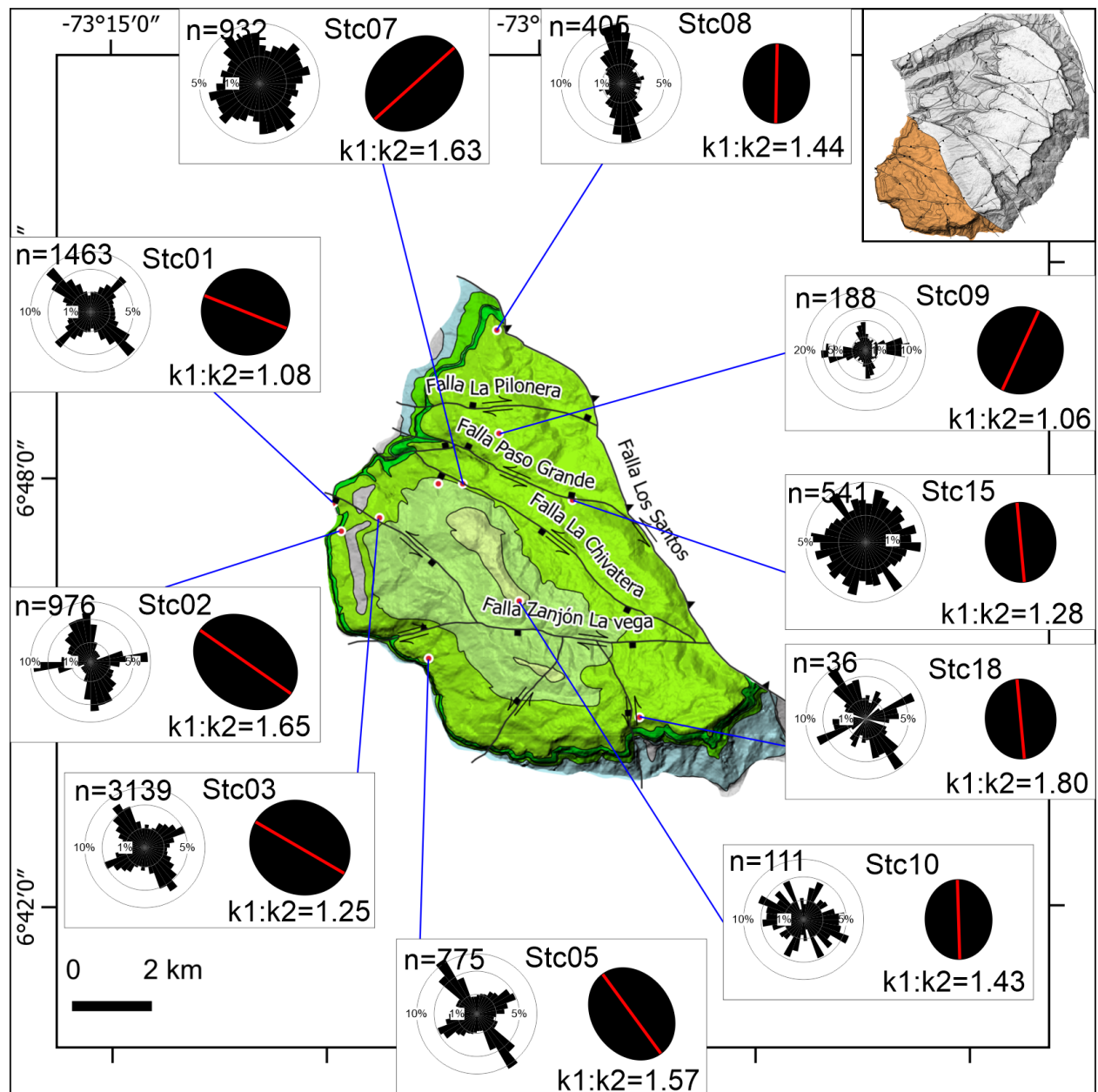


Figura 14. Resultados del análisis de los patrones de fractura empleando FracPaQ para el Bloque Minas de las estaciones con un registro fotográfico adecuado, los diagramas rosas corresponden a los lineamientos asociados al fracturamiento, para la generación de la elipse de la dirección de flujo se consideraron los lineamientos asociados al fracturamiento y estratificación. El eje mayor de la elipse (línea roja) corresponde a la dirección de flujo estimada en FracPaQ. Los puntos rojos corresponden a todas las estaciones visitadas en la actividad de campo.

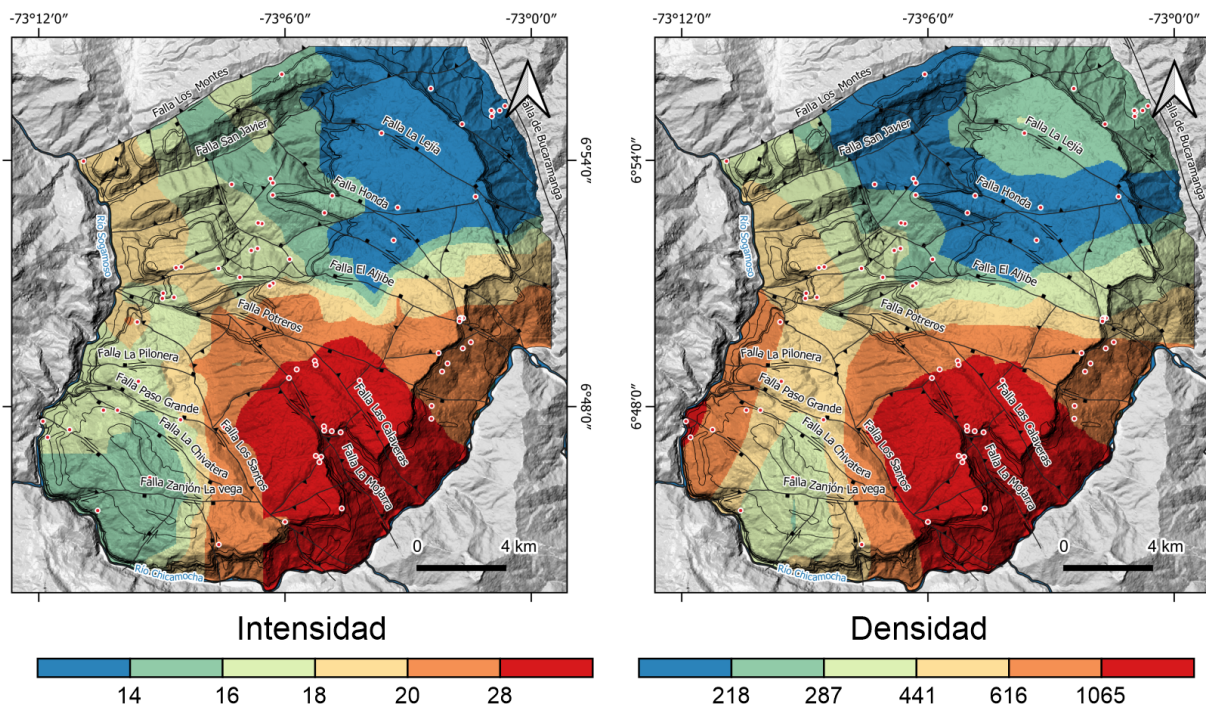


Figura 15. Mapas de intensidad y densidad de lineamientos obtenidos mediante interpolación por el método de Kriging considerando los resultados individuales de cada una de las estaciones visitadas en campo.

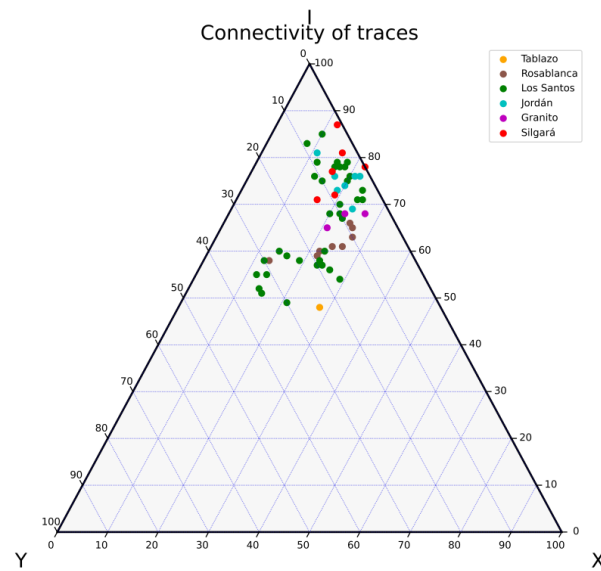


Figura 16. Diagrama ternario de conectividad de los lineamientos asociados a fracturamiento y estratificación estimados por FracPaQ considerando la correlación de los nodos I (extremos aislados), nodos Y (puntos de ramificación), y nodos X (intersecciones); donde una mayor cantidad de nodos Y y X implican una mayor conectividad de los lineamientos y se localización más cerca de la base del gráfico ternario.

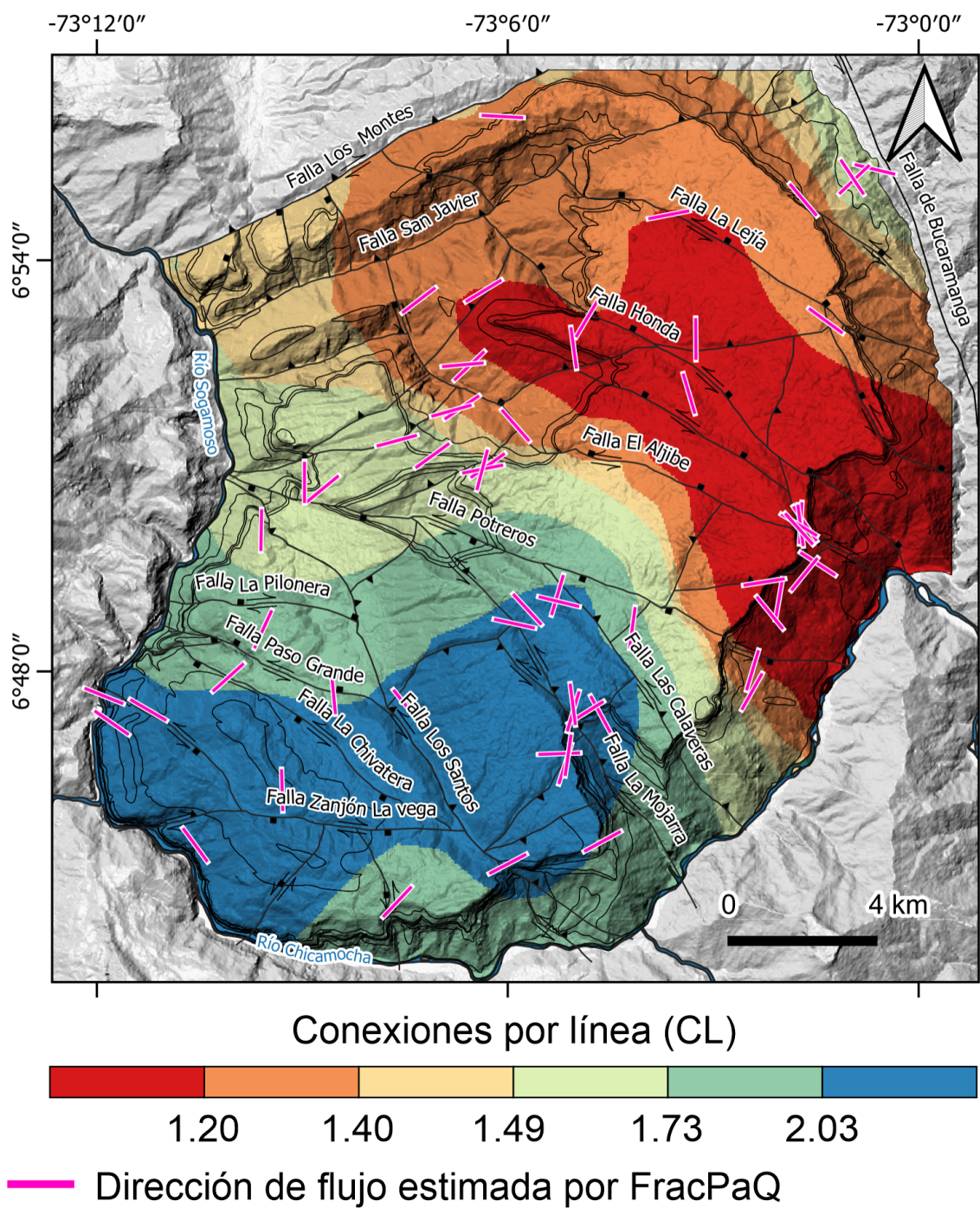


Figura 17. Mapa de conectividad de lineamientos obtenido mediante interpolación por el método Kriging considerando los resultados individuales de cada una de las estaciones visitadas en campo, la dirección de flujo (eje mayor de la elipse) se ubican para cada una de las estaciones (línea negra).

5.2. Propiedades físicas de las rocas

Un total de 358 plugs (189 estaciones, Figura 18) fueron analizados (Anexo 2), las formaciones y litologías de referencia fueron consideradas de los trabajos de [Pinto V. et al. \(2007\)](#); [Ulloque Ardila \(sf\)](#). Las litologías analizadas corresponden con areniscas (150 plugs), lodolitas (27 plugs), conglomerados (19 plugs), lodos calcáreos (18 plugs), calizas (44 plugs), biomicritas (48 plugs), areniscas calcáreas (18 plugs), granito (8 plugs), meta-arenisca (6 plugs) y esquisto (20 plugs). En el presente proyecto de investigación se incluye las muestras analizadas por [Ulloque Ardila \(sf\)](#) en el sector sur, el cual fue complementado con estaciones de muestreo adicionales.

La porosidad es una de las propiedades de principal interés para el potencial hidrogeológico de las formaciones, los rangos más amplios de porosidad (Figura 19) se asocian a las areniscas calcáreas de la Fm. Rosablanca (0-33 %) y las areniscas del miembro superior de la Fm. Los Santos (0-25 %), las areniscas de la Fm. Rosablanca presentan valores de 10-15 %. Las litologías carbonatadas en su mayoría presentan porosidades inferiores al 5 % al igual que las lodolitas, con valores cercanos a 0 %. Los conglomerados de las Fms. Jordán y Los Santos (miembro inferior) presentan porosidades inferiores al 7 %.

Considerando que las muestras se sumergieron en agua por dos días, la diferencia en peso de los plugs en húmedo y seco se calculó el porcentaje del volumen de agua que retuvo el plug (Figura 19), estos valores son inferiores al compararse con los de porosidad (al no garantizar que la muestra este completamente saturada), las litologías lodosas presentan un incremento en este valor asociado a una mayor cantidad de agua absorbida.

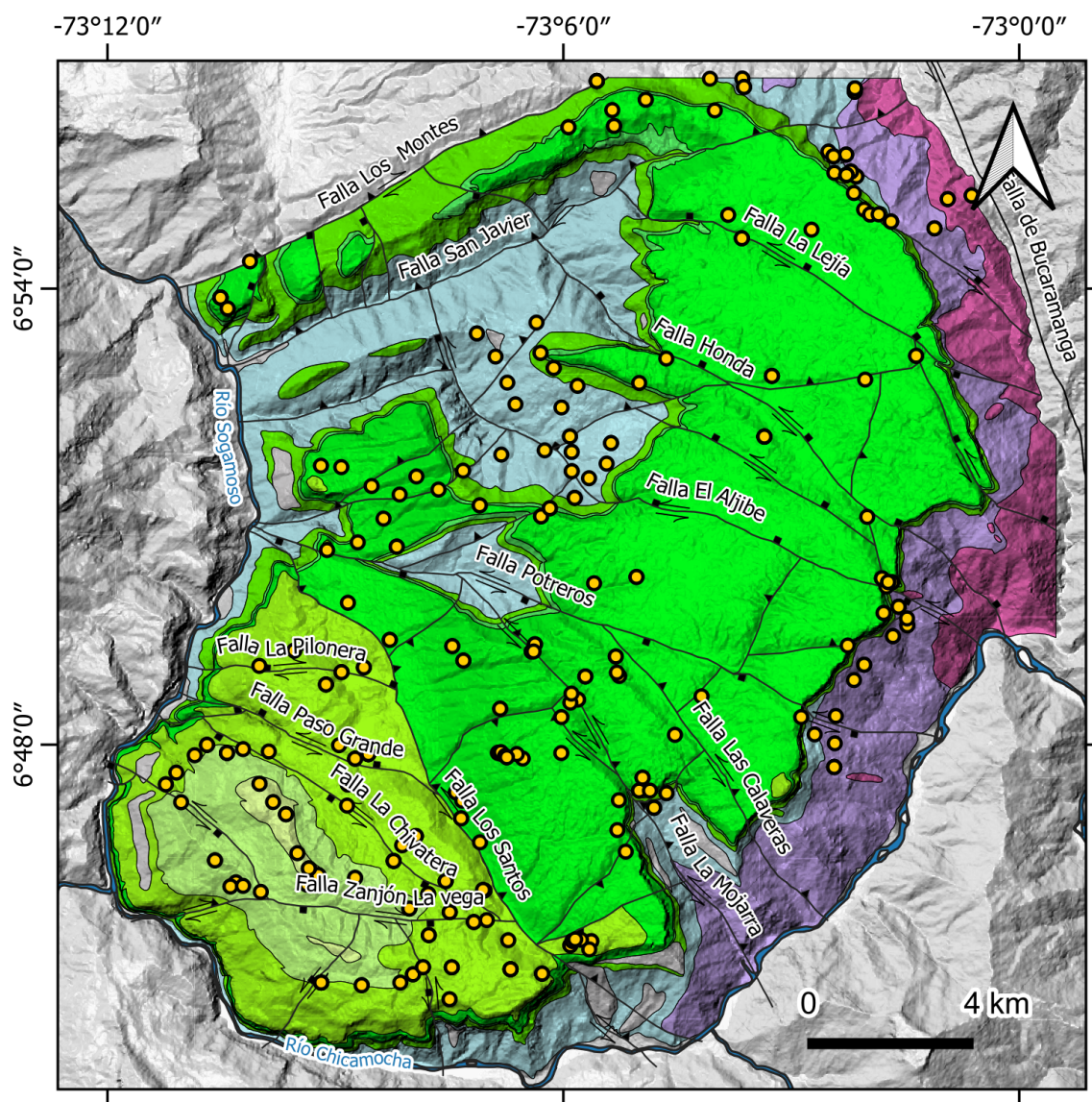
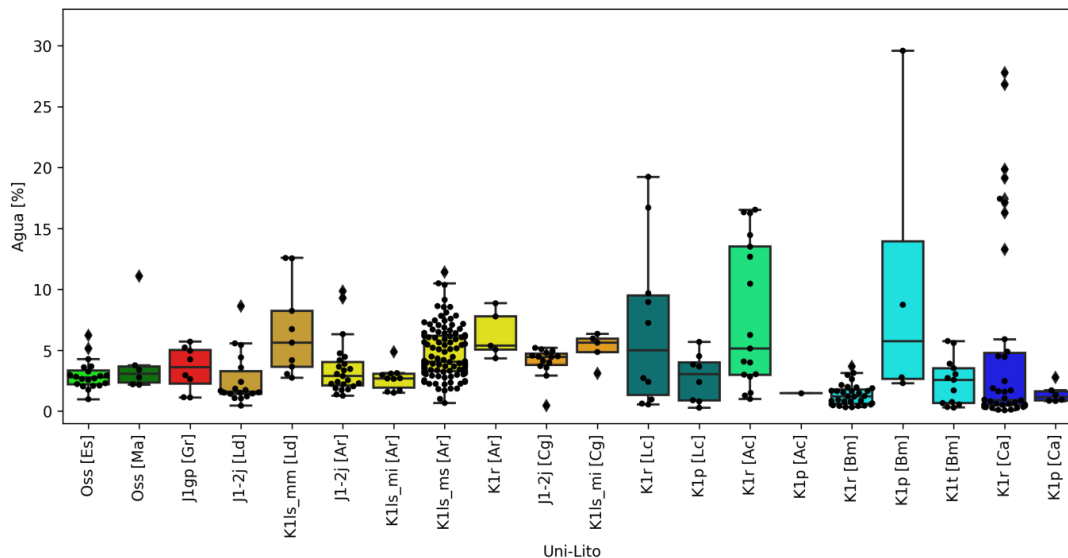
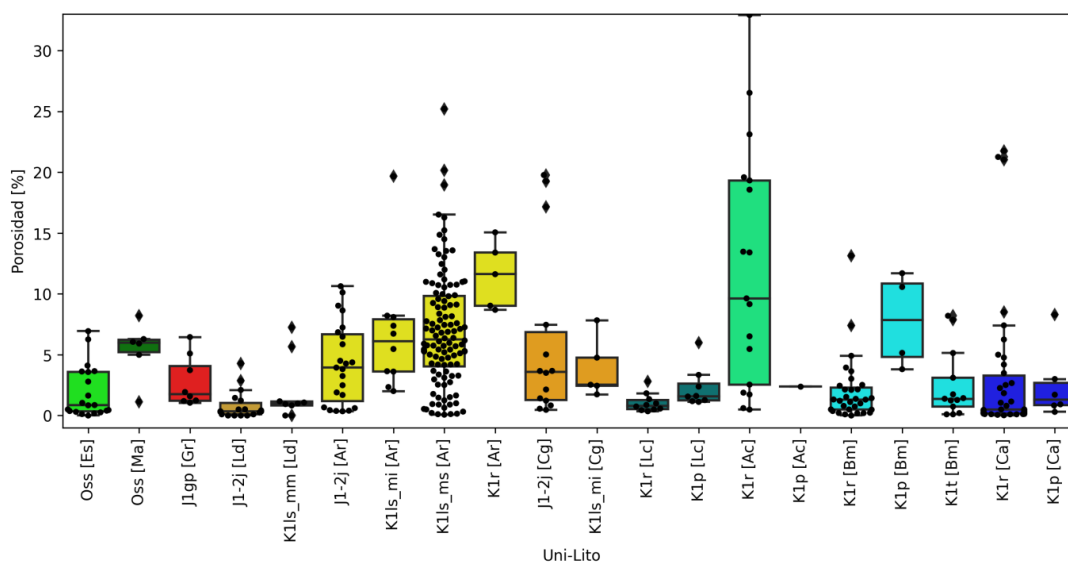


Figura 18. Localización de las estaciones donde se extrajo una muestra de roca para posterior ser extraído un plug. Para cada uno de los plugs extraído se procedió a medir en laboratorio las propiedades físicas de la roca.

Las densidades (Figura 20) general de las areniscas es de $2.35\text{-}2.65\text{ gr}\cdot\text{cm}^{-3}$; la densidad de las lodolitas asociadas a la Fm. Jordán es mayor ($2.50\text{-}2.70\text{ gr}\cdot\text{cm}^{-3}$) que las del miembro medio



(a) Agua



(b) Porosidad

Figura 19. (a) Rangos de porcentaje de Agua, producto de la diferencia entre el peso de los plugs en húmedo y seco; (b) porosidad para cada una de las formaciones agrupadas por litología. Ar=areniscas, Ld=lodolitas, Cg=conglomerados, Lc=lodos calcáreos, Ca=calizas, Bm=biomicritas, Ac=areniscas calcáreas, Gr=granito, Ma=meta-arenisca, Es=esquistos.

de Los Santos ($2.00\text{-}2.50\text{gr} \cdot \text{cm}^{-3}$). Los conglomerados de la Fm. Jordán presentan un rango más amplio ($2.20\text{-}3.10\text{gr} \cdot \text{cm}^{-3}$) que el del miembro inferior de Los Santos ($2.40\text{-}2.65\text{gr} \cdot \text{cm}^{-3}$). Las litologías carbonatadas presentan una media general de $2.65\text{gr} \cdot \text{cm}^{-3}$, siendo las de la Fm. Paja más densas ($2.80\text{gr} \cdot \text{cm}^{-3}$).

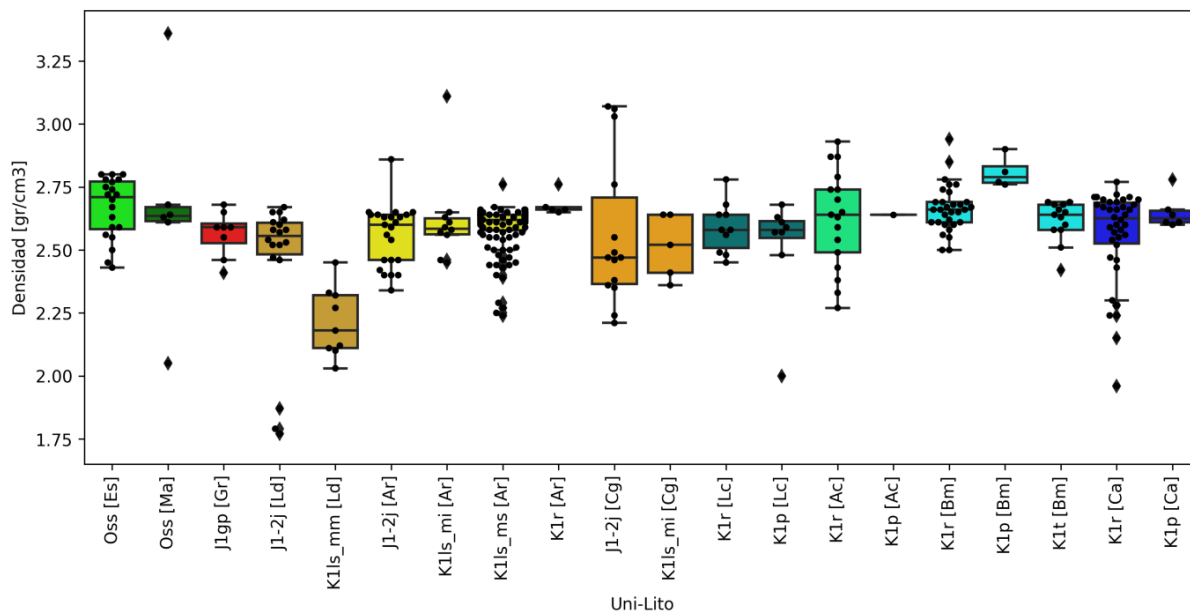


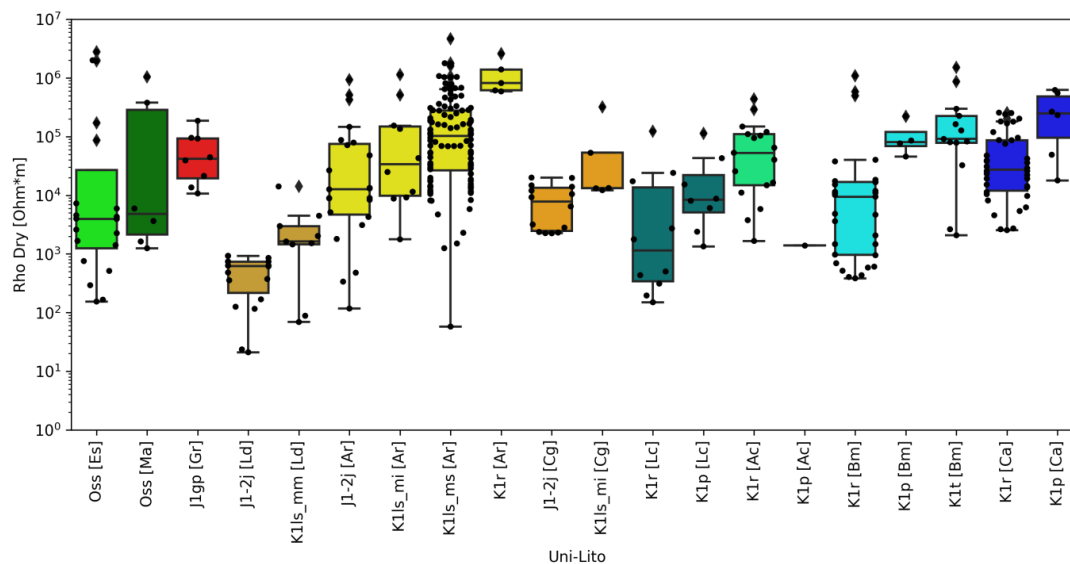
Figura 20. Rangos de densidad de cada una de las formaciones agrupadas por litología. Ar=areniscas, Ld=lodolitas, Cg=conglomerados, Lc=lodos calcáreos, Ca=calizas, Bm=biomicritas, Ac=areniscas calcáreas, Gr=granito, Ma=meta-arenisca, Es=esquistos.

Los valores de resistividad fueron medidos cuando el plug estaba seco y posterior a estar los dos días sumergido en agua, todas las litologías presentan un cambio en los valores de resistividad (Figura 21) después de este proceso, variaciones inferiores al 80 % en algunas litologías son asociadas con las Fms. Jordán, Rosablanca y los esquistos del Silgará. Las resistividades en seco (Figura 21) de las areniscas es de 10^2 y $2 \times 10^6 \Omega \cdot m$, las correspondientes a la Fm. Rosablanca presentan el rango de valores más altos entre 6×10^5 y $3 \times 10^6 \Omega \cdot m$. Las lodolitas tienen un rango

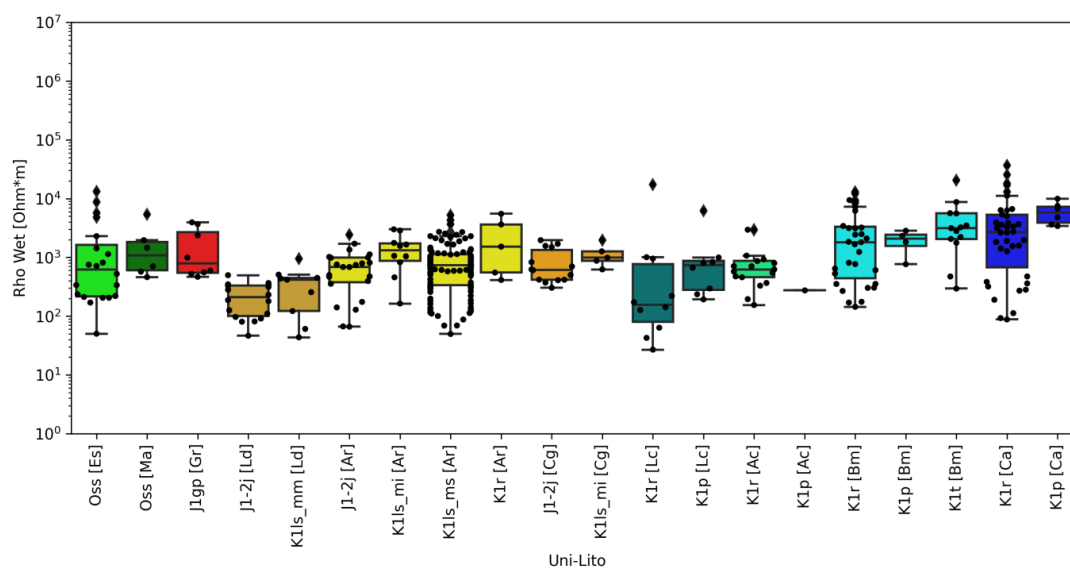
inferior comparado con las areniscas, entre 5×10^1 y $4 \times 10^3 \Omega \cdot m$. Los conglomerados un rango medio entre 2×10^3 y $3 \times 10^4 \Omega \cdot m$, las litologías carbonatadas presentan un rango parecido al de las areniscas, entre 2×10^2 y $5 \times 10^5 \Omega \cdot m$. Los rangos medidos con los plug húmedos es entre 5×10^1 y $5 \times 10^3 \Omega \cdot m$ para las areniscas, 4×10^1 y $5 \times 10^2 \Omega \cdot m$ para las lodolitas, 3×10^2 y $2 \times 10^3 \Omega \cdot m$ para los conglomerados, 4×10^1 y $10^4 \Omega \cdot m$ para las litologías carbonatadas.

Los rangos de la cargabilidad también presentan un comportamiento similar al de los de resistividad disminuyendo al ser humedecido el plug (Figura 23). El rango en seco para las areniscas de la Fm. Los Santos es entre 2 y $80 mV \cdot V^{-1}$, las areniscas de la Fm. Rosablanca está entre 20 y $100 mV \cdot V^{-1}$. Las lodolitas presentan valores inferiores a $7 mV \cdot V^{-1}$, los conglomerados un rango entre 3 y $8 mV \cdot V^{-1}$, las litologías carbonatadas entre 2 y $30 mV \cdot V^{-1}$. La presencia de agua en los plugs dio como resultado mediciones de cargabilidad inferiores a $30 mV \cdot V^{-1}$, disminuyendo los rangos de las litologías de manera general entre 2 y $30 mV \cdot V^{-1}$ para las areniscas, 2 y $10 mV \cdot V^{-1}$ para las lodolitas, 8 y $18 mV \cdot V^{-1}$ para los conglomerados, 3 y $10 mV \cdot V^{-1}$ para las litologías carbonatadas.

El test de carga puntual evalúa la carga máxima (Peak Load) que soporta una muestra de roca, pero al existir diferencias en las dimensiones de los plugs se es adecuado hacer un ajuste a una escala de referencia Is_{50} (Figura 24). Las lodolitas del miembro medio de la Fm. Los Santos presentan una resistencia a la compresión baja (Tabla 4), las asociadas a la Fm. Jordán tiene un rango más amplio llegando a ser de muy alta resistencia. Los conglomerados de las Fms. Jordán y Los Santos son medianamente resistentes, las areniscas tienen una baja a alta resistencia. Los lodos calcáreos tienen una resistencia a la compresión media-baja, y las demás litologías carbonatadas



(a) Seco



(b) Mojado

Figura 21. Rangos de resistividades de los plugs en seco y en húmedo después de estar dos días sumergidos en agua para cada una de las formaciones agrupadas por litología. Ar=areniscas, Ld=lodolitas, Cg=conglomerados, Lc=lodos calcáreos, Ca=calizas, Bm=biomicritas, Ac=areniscas calcáreas, Gr=granito, Ma=meta-arenisca, Es=esquistos.

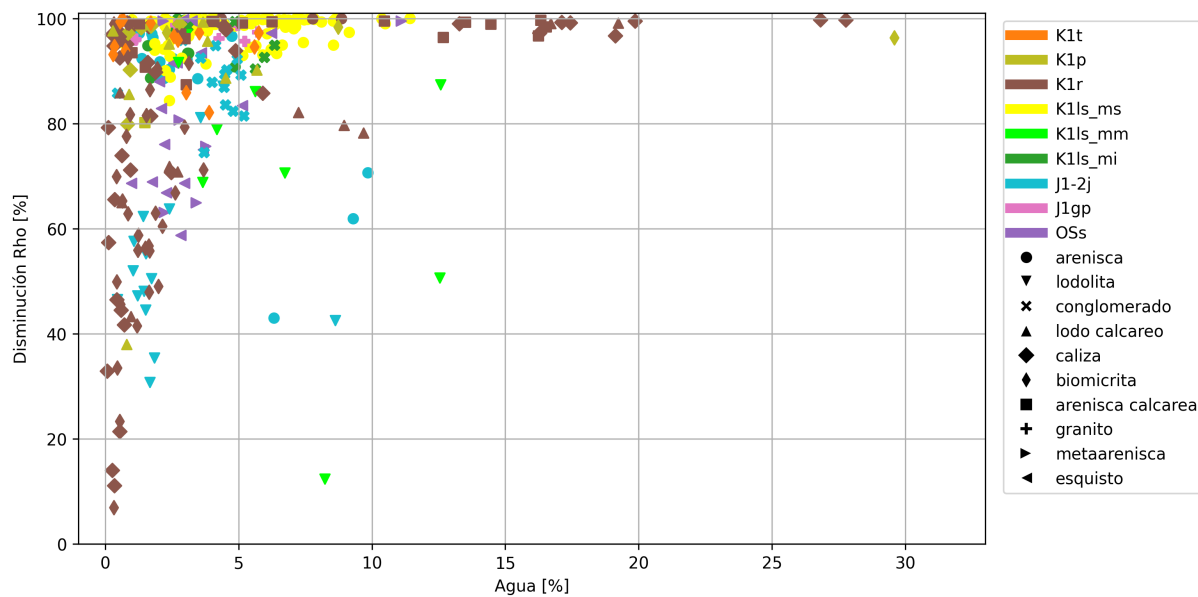
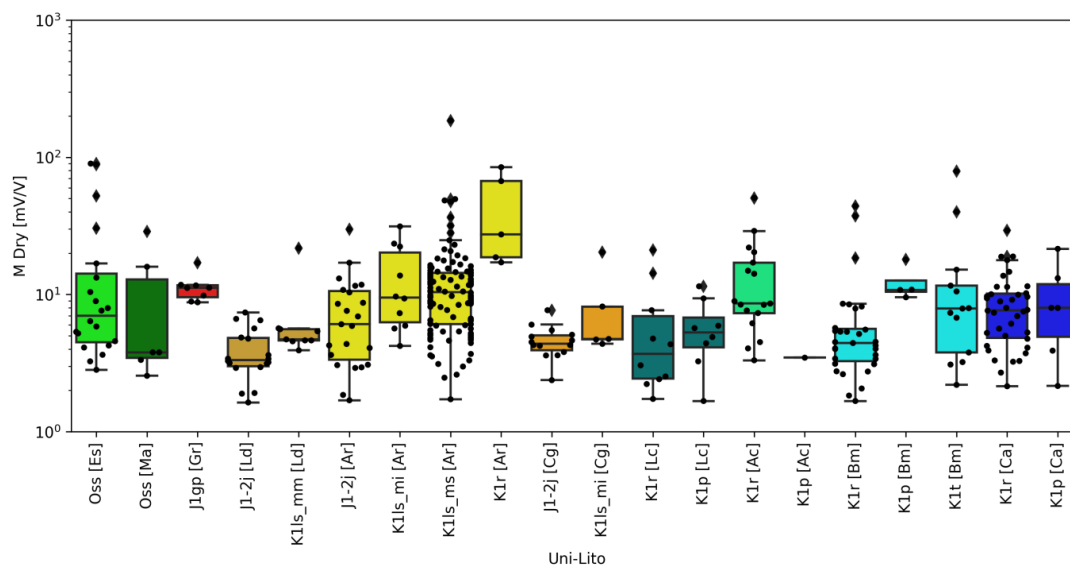


Figura 22. Relación entre el porcentaje de Agua en la muestra y la variación porcentual de los valores de resistividad en del plug húmedo y seco ($100 - \frac{100 * RhoWet}{RhoDry} [\%]$).

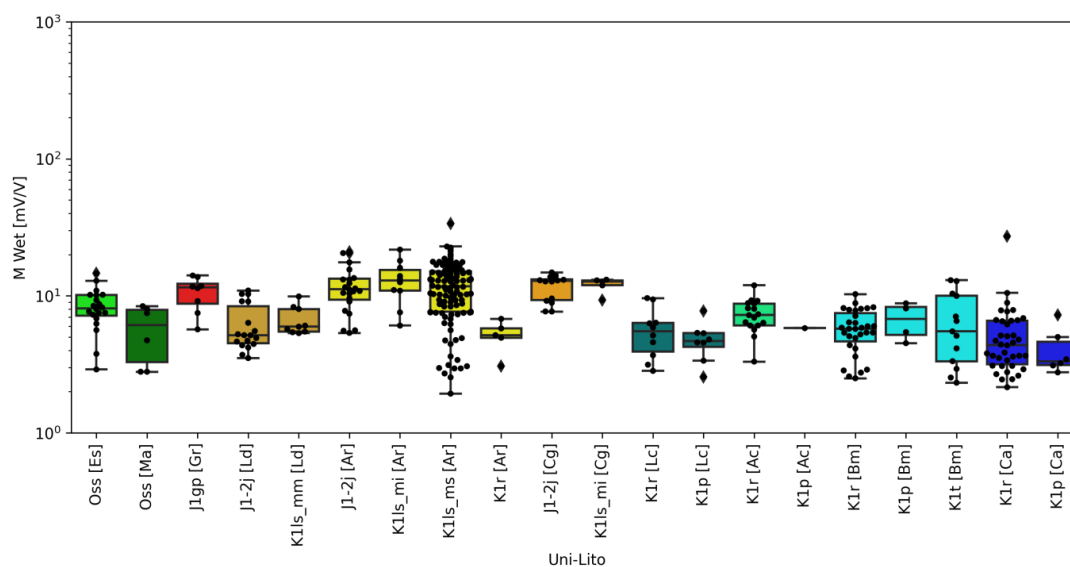
una resistencia a la compresión media-alta.

Las velocidades de onda P (Figura 25) en general cubre un rango amplio entre los 1000 y $6000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Las lodolitas del miembro medio de la Fm. Los Santos tiene valores entre 900 y $2000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, las de la Fm. Jordan llegan hasta los $4500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Las areniscas de las Fms. Jordán, miembro inferior de Los Santos, y Rosablanca presentan valores inferiores a los $3500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Los lodos calcáreos tienen un rango entre 3000 y $5500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

La susceptibilidad magnética (Figura 26) medida en alta y baja frecuencia mantienen un rango similar, el manual de usuario del sensor de frecuencia dual MS2B recomienda usar los valores de baja frecuencia cuando solo se hace una única medida. El rango en baja frecuencia de las areniscas es amplio entre 2×10^{-8} y 3×10^{-4} ; los límites inferiores para las Fm. Jordán, miembro

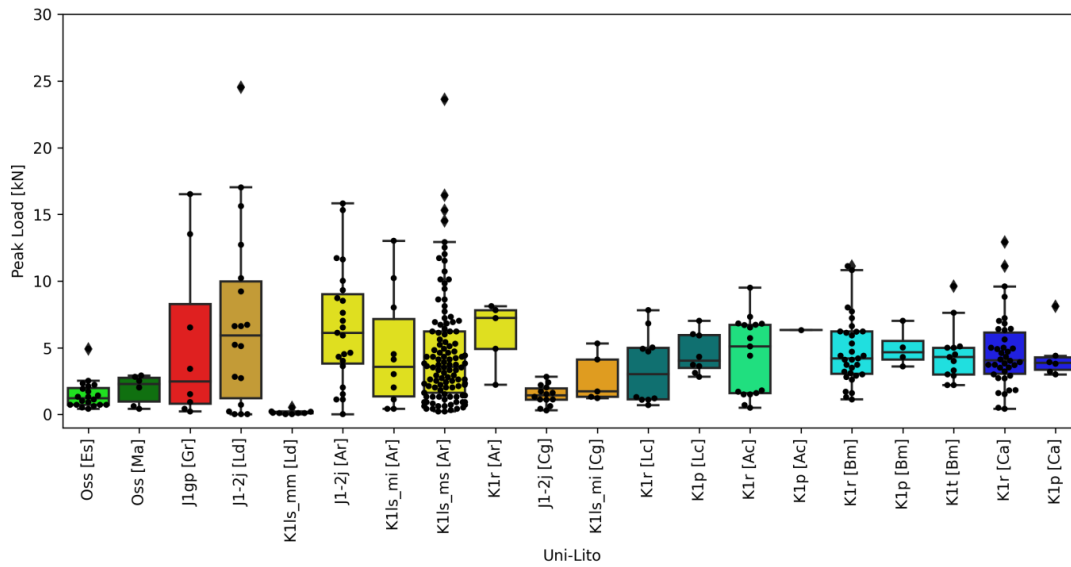


(a) Seco



(b) Mojado

Figura 23. Rangos de cargabilidad de los plugs en seco y en húmedo después de estar dos días sumergidos en agua para cada una de las formaciones agrupadas por litología. Ar=areniscas, Ld=lodolitas, Cg=conglomerados, Lc=lodos calcáreos, Ca=calizas, Bm=biomicritas, Ac=areniscas calcáreas, Gr=granito, Ma=meta-arenisca, Es=esquistos.



(a) Peak Load

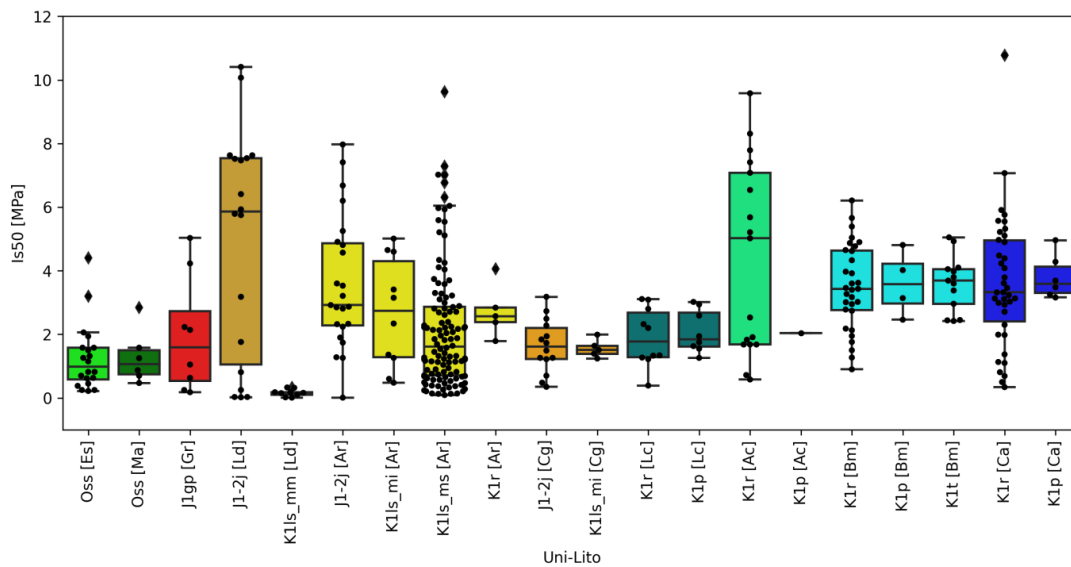
(b) Is₅₀

Figura 24. Rangos de Is₅₀ de cada una de las formaciones agrupadas por litología. Ar=areniscas, Ld=lodolitas, Cg=conglomerados, Lc=lodos calcáreos, Ca=calizas, Bm=biomicritas, Ac=areniscas calcáreas, Gr=granito, Ma=meta-arenisca, Es=esquisto.

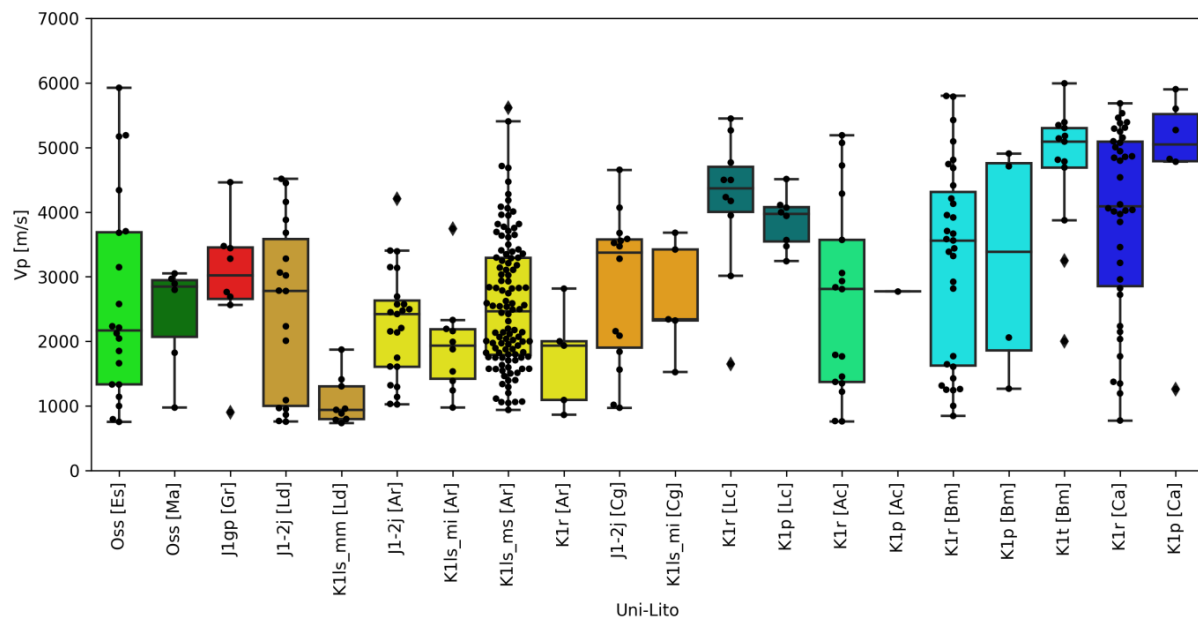
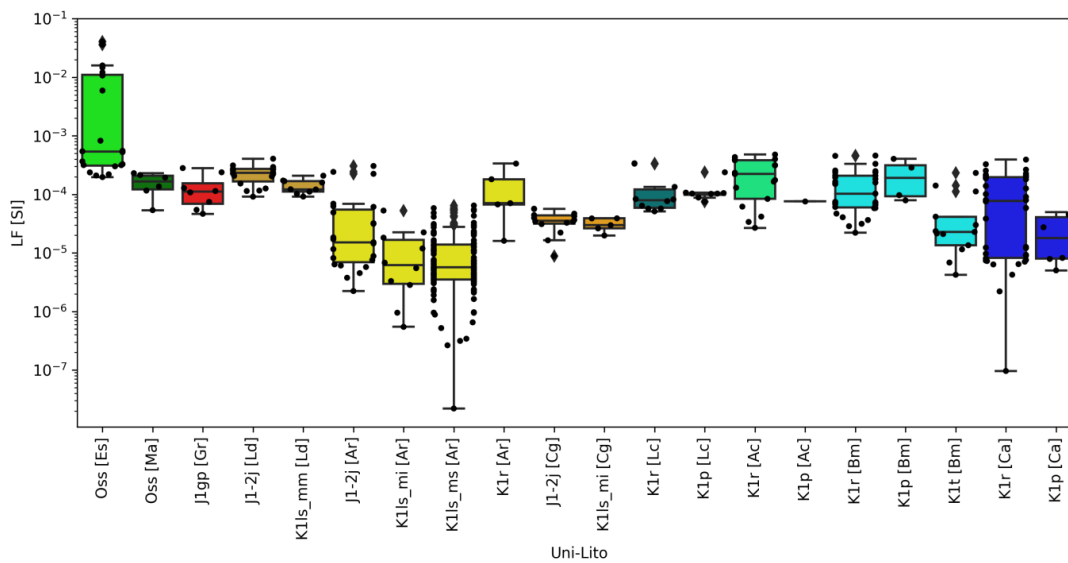
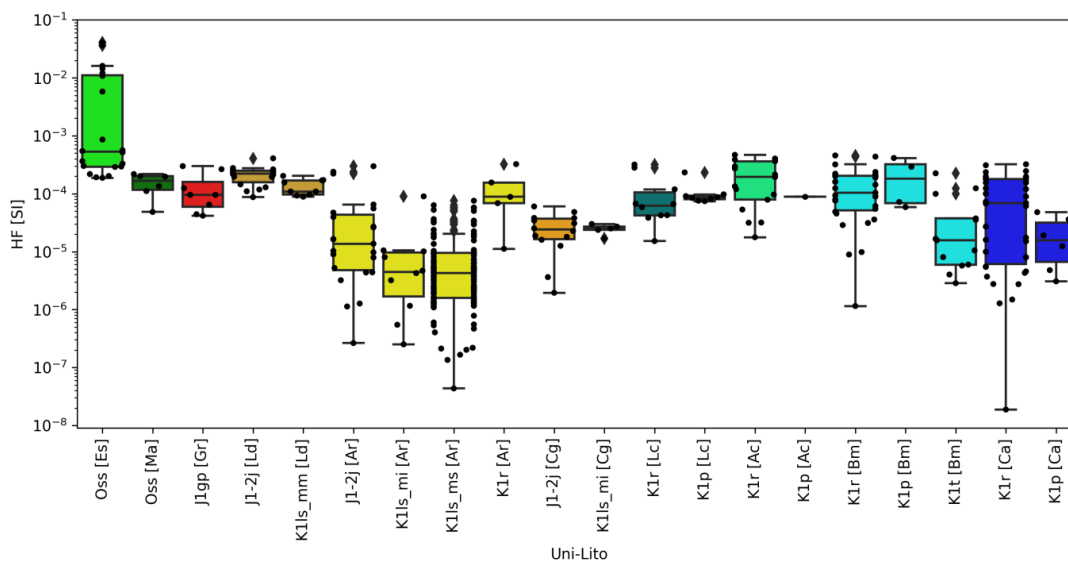


Figura 25. Rangos de velocidad de onda P de cada una de las formaciones agrupadas por litología. Ar=areniscas, Ld=lodolitas, Cg=conglomerados, Lc=lodos calcáreos, Ca=calizas, Bm=biomicritas, Ac=areniscas calcáreas, Gr=granito, Ma=meta-arenisca, Es=esquisto.

inferior de la Fm. Los Santos y la Fm. Rosablanca varían, siendo 2×10^{-6} , 9×10^{-7} y 2×10^{-5} respectivamente. Las lodolitas presentan un rango corto entre 8×10^{-5} y 4×10^{-4} . Los conglomerados un rango entre 2×10^{-5} y 6×10^{-5} . Las litologías carbonatadas un rango entre 2×10^{-6} y 3×10^{-4} .



(a) LF



(b) HF

Figura 26. Rangos de susceptibilidad magnética de cada una de las formaciones agrupadas por litología. Ar=areniscas, Ld=lodolitas, Cg=conglomerados, Lc=lodos calcáreos, Ca=calizas, Bm=biomicritas, Ac=areniscas calcáreas, Gr=granito, Ma=meta-arenisca, Es=esquistos.

5.3. Redes neuronales

La interpolación es una técnica usada comúnmente en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para crear una superficie continua a partir de puntos discretos. El software QGIS ([QGIS Development Team, 2009](#)) permite realizar la interpolación de datos, se debe considerar que los resultados de la interpolación pueden variar dependiendo del método y parámetros que se elijan. QGIS ofrece los métodos Red Irregular Triangulada (TIN) y Peso Distancia Inversa (IDW), el método TIN es comúnmente usado para datos de elevación mientras que el método IDW es usado para interpolar otros tipos de datos como concentraciones minerales, poblaciones, etc. Las redes neuronales pueden ser una herramienta útil para generalizar modelos en los cuales se consideren parámetros adicionales como lo son la geología y la distancia a la falla más cercana.

Los diagramas de dispersión permiten visualizar si un parámetro (variable dependiente) incrementa o disminuye al variar el parámetro de control (variable independiente), también existen fórmulas matemáticas que permiten para conocer si existe una relación entre los parámetros estudiados. El coeficiente de correlación de Pearson permite analizar la relación de dos variables, reflejando la existencia o no de una relación lineal y la dirección de la relación, este es calculado para los valores medidos en laboratorio junto con la localización del plug (Figura 27). Su interpretación se relaciona con el resultado obtenido, el cual se encuentra en un rango de valores de +1 a -1. Un valor de 0 indica que no hay asociación lineal entre las dos variables, pero esto no necesariamente implica que las variables son independientes, ya que puede existir una relación no lineal entre las dos variables. Valores mayores a 0 corresponden con una asociación positiva, a

medida que aumenta el valor de una variable también lo hace el valor de la otra. Valores inferiores a 0 corresponden con una asociación negativa, a medida que aumenta el valor de una variable el valor de la otra disminuye.

Los coeficientes resultantes en general no evidencian una linealidad marcada entre las propiedades, pero propiedades como la Porosidad y el Agua su valor es de 0.46, ya que a mayor porosidad un mayor porcentaje de agua que pueda llegar a ser almacenada. Al igual con el valor de Peak Load y el Is_{50} con un coeficiente de 0.68, que evidencie linealidad al ser el Is_{50} un ajuste según el tamaño de la muestra.

Aunque se calculan los coeficientes entre todas las propiedades, algunas no son de relacionar, como lo puede ser la influencia del porcentaje de Agua y la Velocidad de onda P, ya que la velocidad de onda P solo fue medida con la muestra en seco, solo la resistividad y cargabilidad pueden ser analizas por la influencia de la presencia del agua.

La Porosidad es una de las propiedades que directamente tiene influencia en las demás, para los valores de velocidad afecta de manera negativa, evidenciado con un coeficiente de -0.16. La porosidad también hace más débil la roca y susceptible al fracturamiento, un coeficiente de -0.27 con el Is_{50} lo evidencia. Un mayor porcentaje de porosidad es un mayor de espacio que puede ser llenado con algún fluido, si es de aire los valores de resistividad aumentarían, coeficiente de 0.17 con Rho_{Dry} , o de ser con agua los valores disminuirán, coeficiente de -0.26.

Para la evaluación por RN se requiere de un modelo geológico, se consideró el de [Pinto V. et al. \(2007\)](#), usando el MLPClassifier se entrenó una RN que permita clasificar un punto localizado en la MLS a una de las litologías aflorantes en el área (Figura 28) propuestas por [Pinto](#)

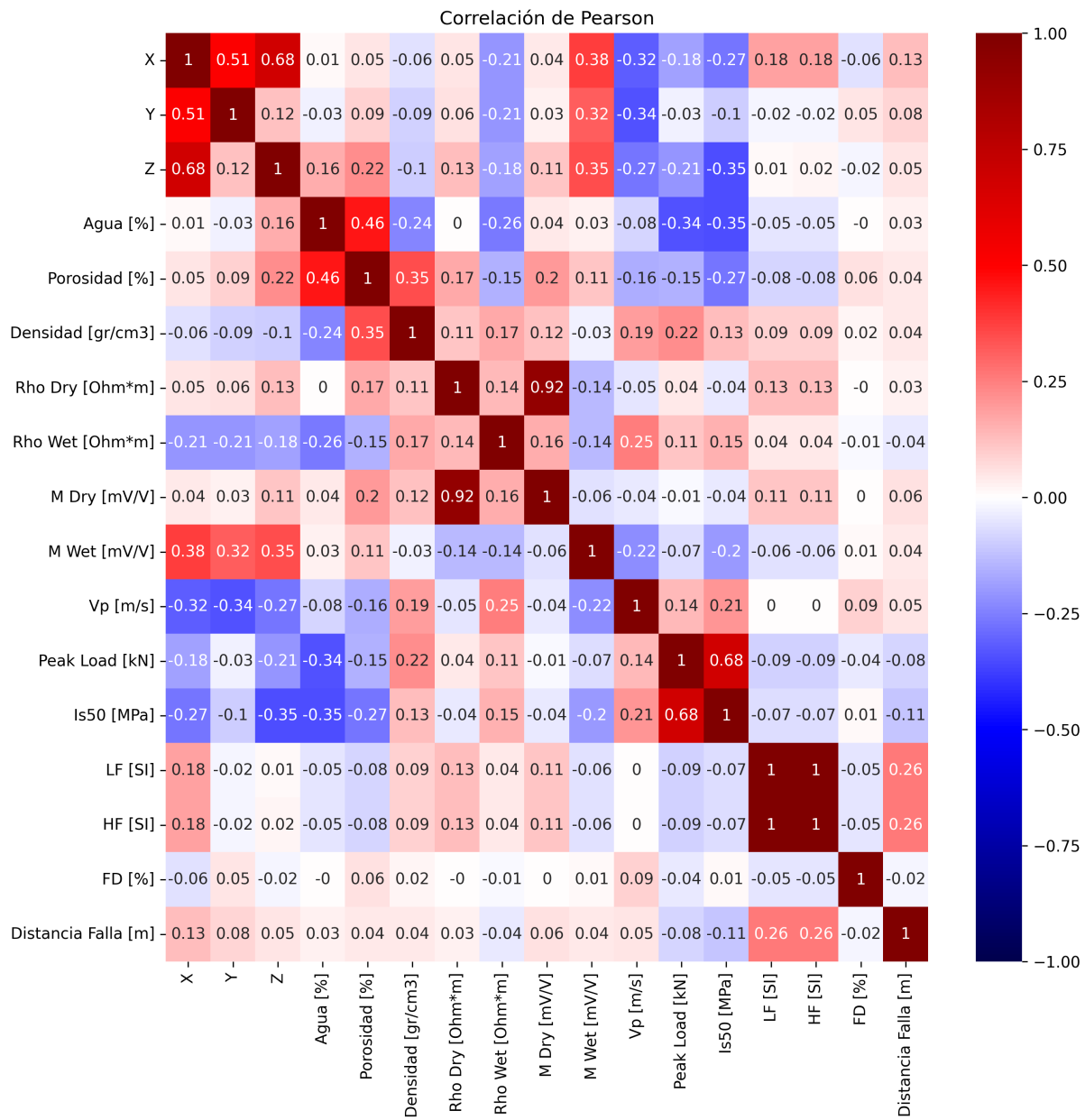


Figura 27. Matriz de correlación de Pearson de los plugs analizados.

V. et al. (2007). Generar un único modelo de red que estime las propiedades no fue posible, por lo que se generaron catorce (14) redes neuronales (Tabla 8) para predecir de manera individual las propiedades medidas en laboratorio. La salida de algunas de las redes corresponde a un valor exponencial, al haberse escalado empleando logaritmo base 10 a la propiedad física de interés.

Tabla 8

Parámetros de las redes neuronales generadas para la predicción de las propiedades físicas y geología en la MLS.

Red Neuronal	Log_{10}	Función de activación	Capas ocultas	Score
Agua [%]	no	relu	(15,7,5)	0.51
Porosidad [%]	no	relu	(25,8,5)	0.32
Densidad [$gr \cdot cm^{-3}$]	no	relu	(35,11,5)	0.45
Resistividad seco [$\Omega \cdot m^{-1}$]	si	relu	(25,9,5)	0.53
Resistividad húmedo [$\Omega \cdot m^{-1}$]	si	relu	(10,6,5)	0.33
Cargabilidad seco [$mV \cdot V^{-1}$]	no	relu	(5,5,5)	0.31
Cargabilidad húmedo [$mV \cdot V^{-1}$]	no	relu	(15,5,5)	0.40
Velocidad onda P [$m \cdot s^{-1}$]	si	relu	(15,13,5)	0.41
Peak Load [kN]	no	relu	(15,5,5)	0.37
Is ₅₀ [MPa]	no	relu	(20,6,5)	0.36
Susceptibilidad LF [SI]	si	relu	(10,6,5)	0.61
Susceptibilidad HF [SI]	si	relu	(30,10,5)	0.61
Dependencia de la frecuencia [%]	no	logistic	(70,18,5)	0.39
Geología	no	logistic	(45,45,45,45)	0.91

Por medio de la integración de la información geológica y geofísica se puede evaluar las áreas con potencial hidrológico y estimar la respuesta geofísica de las unidades geológicas en la MLS usando redes neuronales. Los mapas generados empleando la respectiva red neuronal comparado con los de interpolación IDW evidencian una mayor diferenciación de la distribución espacial de los valores de las propiedades al considerar la formación aflorante. Se puede considerar la poro-

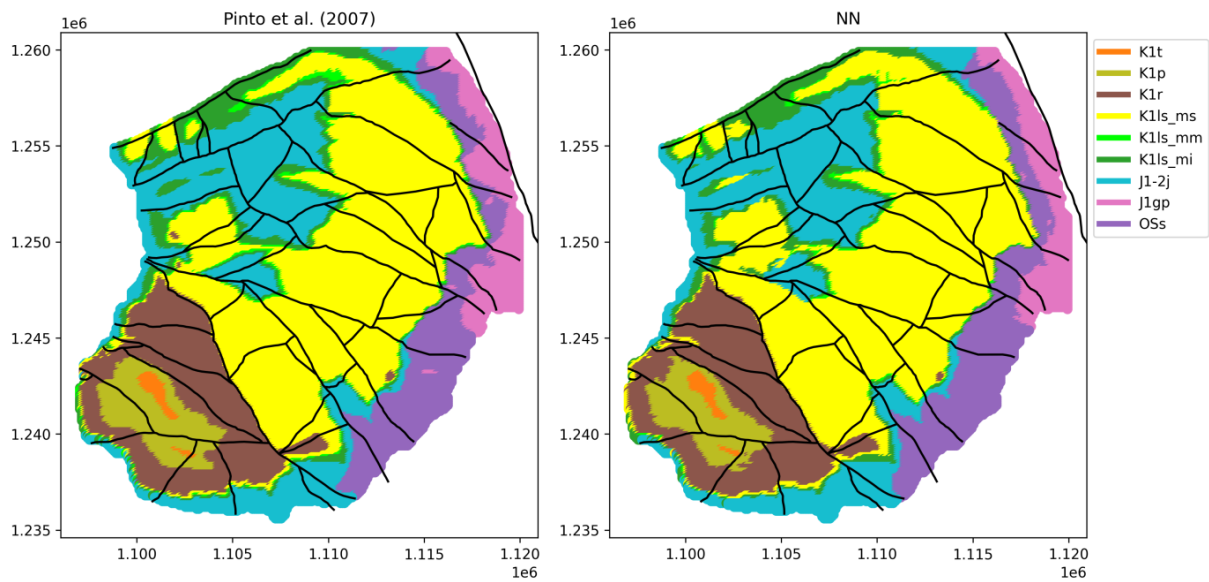


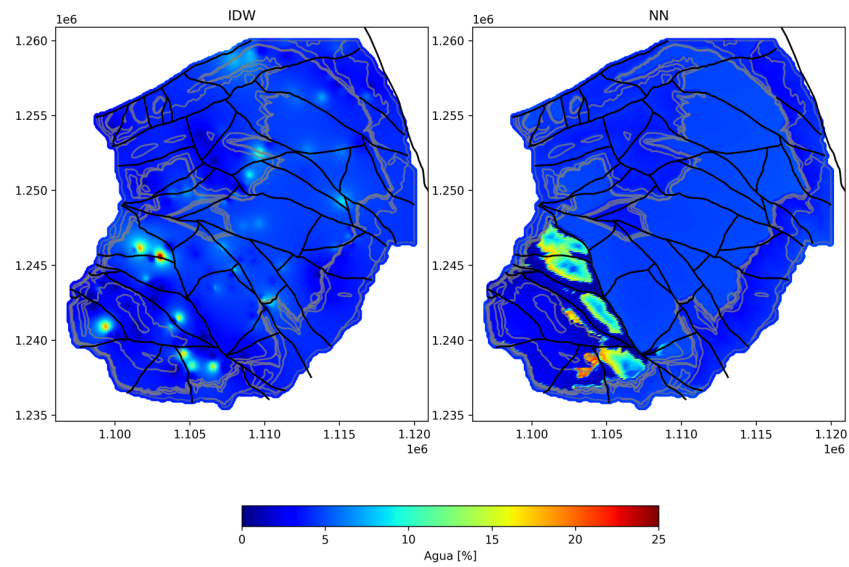
Figura 28. Mapa de geológico de [Pinto V. et al. \(2007\)](#), izquierda, y mapa estimado por la red neuronal a partir del mapa geológico y cortes geológicos generados por [Pinto V. et al. \(2007\)](#). OSs: Esquistos del Silgará, J1gp: Granito de Pescadero, J1-2j: Formación Jordán, K1ls_mi: miembro inferior Formación Los Santos, K1ls_mm: miembro medio Formación Los Santos, K1ls_ms: miembro superior Formación Los Santos, K1r: Formación Rosablanca, K1p: Formación Paja, K1t: Formación Tablazo.

sidad, densidad, resistividad y velocidad de onda P como las propiedades a considerar para evaluar el potencial hidrogeológico.

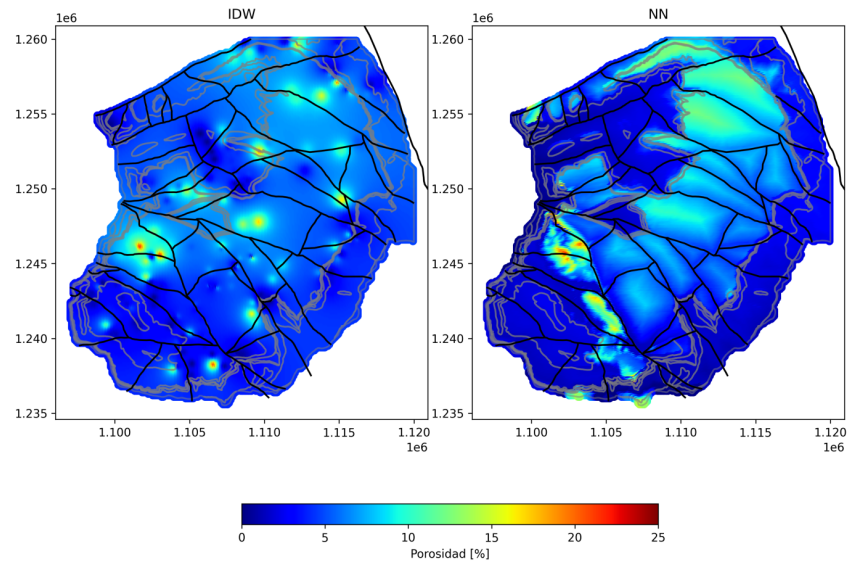
El mapa de la red neuronal para el porcentaje de agua (Figura 29) estima áreas con un valor $>10\%$ en la Fm. Rosablanca cerca a la Falla Los Santos, la Fm. Los Santos se generaliza con valores de 5% . En el mapa de porosidad (Figura 29) predicho por la red neuronal para la Fm. Los Santos es de una media de 10% , con valores mayores al norte de la MLS, las áreas de la Fm. Rosablanca cercanas a la Falla Los Santos predice valores mayores al 10% de porosidad. Se resalta el interés en las formaciones Los Santos y Rosablanca, la primera por su naturaleza detrítica y la segunda por su potencial kárstico, siendo la Fm. Rosablanca la que se estima con una mayor disposición para el porcentaje de agua que puede contener.

Los mapas de densidades (Figura 30) estiman una densidad media de $2.55 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-3}$ para las unidades sedimentarias, las unidades metamórficas e ígneas el mapa de la red neuronal estima valores mayores a $2.75 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-3}$. Entre la Fm. Los Santos y Fm. Rosablanca no se observa un contraste entre sus valores, algo que tampoco se observó en los diagramas de caja, aunque al sector sur se observan pequeñas áreas con densidades inferiores $2.55 \text{ gr} \cdot \text{cm}^{-3}$, este sector tiene una disposición a la disolución por lo que en profundidad se pueden localizar cavidades.

Las velocidades de onda P (Figura 30) estimadas para la Fm. Los Santos son inferiores a los $3000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, para la Fm. Rosablanca los valores están entre los 3000 y $4500 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. La Fm. Los Santos presenta una velocidad inferior respecto a la Fm. Rosablanca, la porosidad se considera influyente en este resultado, aunque la red no se entrenó considerando este criterio, evaluando el mapa estimado de porosidad refleja como las áreas cerca de la Falla Los Santos con una baja

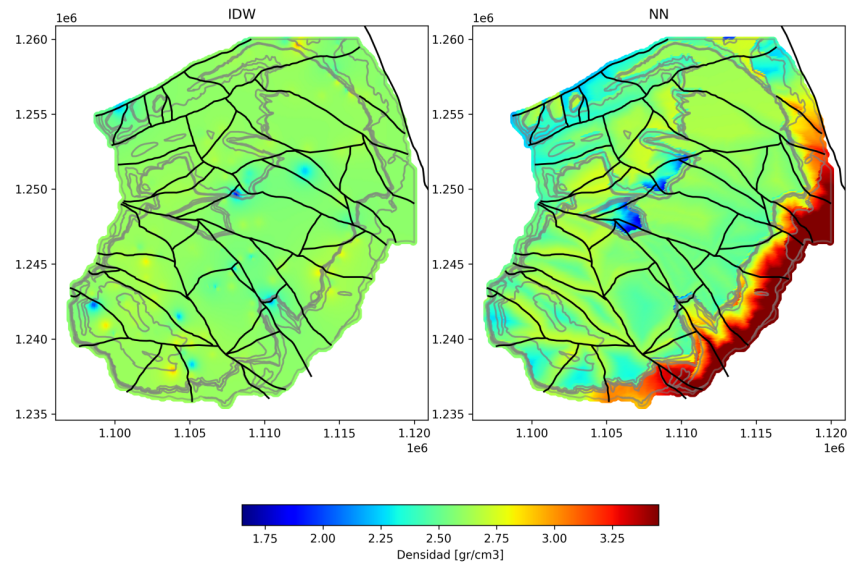


(a) Agua

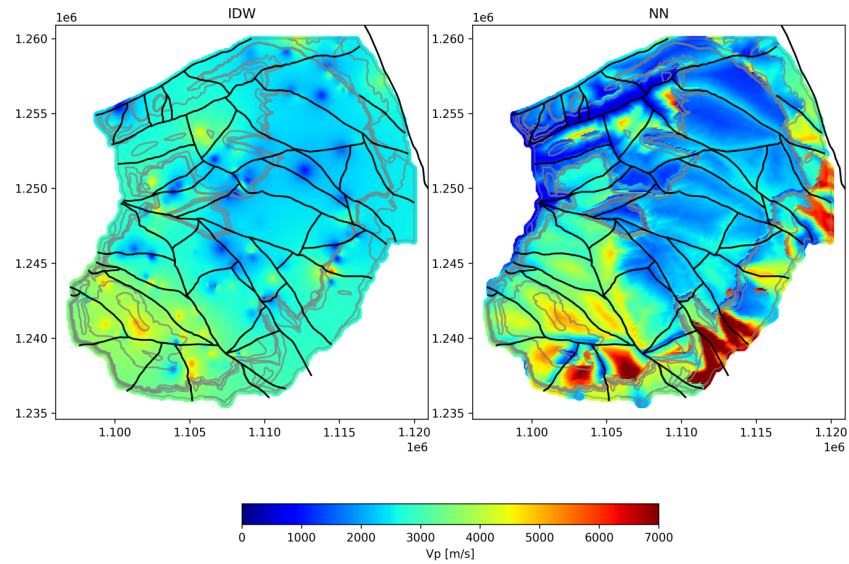


(b) Porosidad

Figura 29. (A) Mapa de interpolación IDW, izquierda, y mapa estimado por la red neuronal para el porcentaje de agua. (B) Mapa de interpolación IDW, izquierda, y mapa estimado por la red neuronal para la porosidad.



(a) Densidad

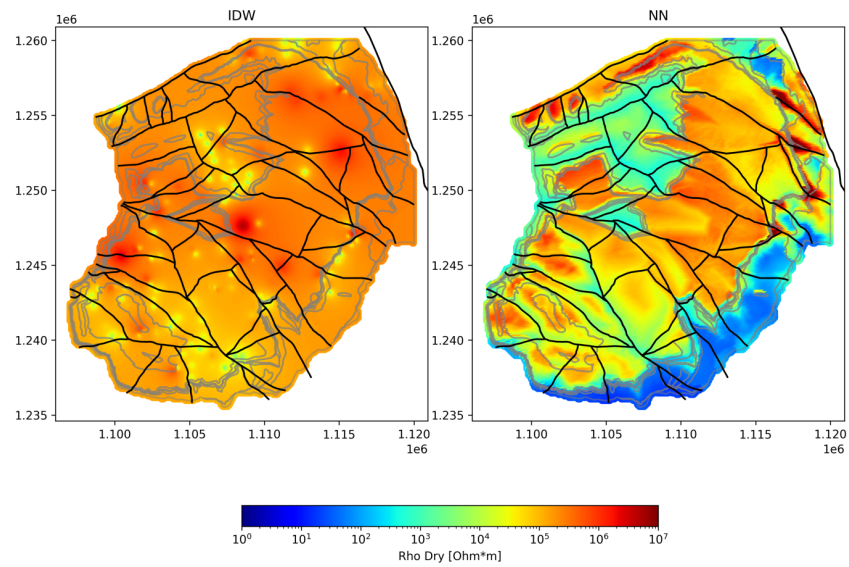


(b) Velocidad onda P

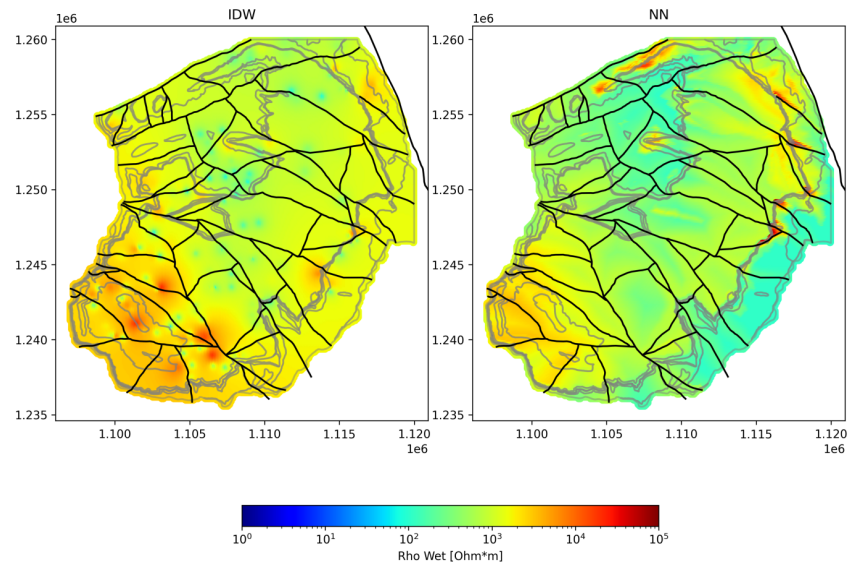
Figura 30. (A) Mapa de interpolación IDW, izquierda, y mapa estimado por la red neuronal para la densidad. (B) Mapa de interpolación IDW, izquierda, y mapa estimado por la red neuronal para la velocidad de onda P.

porosidad para la Fm. Los Santos presentan una mayor velocidad respecto a áreas con mayor porosidad. En la Fm. Rosablanca también se refleja una influencia de la porosidad en los valores de V_p , aun así, esta formación presenta velocidades mayores que la Fm. Los Santos, considerable por la naturaleza de las rocas que lo conforman (Tabla 1 y Tabla 2).

Los mapas de resistividad (Figuras 31) en las unidades de interés se observa una influencia de las fallas semejante a lo observado en el mapa de porosidad generado por red neuronal, donde los valores de resistividad en seco aumentan conforme se aleja de las fallas (disminuyen en el caso de la resistividad en húmedo). El fluido de poro tiene influencia en los valores de resistividad, por lo que las áreas con una mayor porosidad corresponden con valores bajos de resistividad cuando la muestra es húmeda, y valores de resistividad altos cuando está seca, nuevamente, aunque la red neuronal no fue entrenada considerando la porosidad los resultados se asocian con áreas con presencia de porosidad y un posible interés hidrogeológico. Valores de resistividad en húmedo inferiores a los $10^3 \Omega \cdot m$ serían registrados en áreas con presencia de agua, siendo de interés el sector entre la Falla El Aljibe y la Falla Los Santos para la Fm. Los Santos.



(a) Resistividad en seco



(b) Resistividad en húmedo

Figura 31. (A) Mapa de interpolación IDW, izquierda, y mapa estimado por la red neuronal para la resistividad en seco. (B) Mapa de interpolación IDW, izquierda, y mapa estimado por la red neuronal para la resistividad en húmedo.

6. Discusión

La casi baja información para el Bloque Cuchilla corresponde a la dificultad para acceder en áreas de sector privado que se localizan en el bloque. Al comparar los resultados de los planos de fracturas y los lineamientos asociados trazados para interpretar en FracPaQ presentan semejanza, al tener una correlación los trazos de fallas cercanos.

Vargas Jerez (2008) ubica el esfuerzo principal para la MLS en sentido NS con σ_1 : 345/14, σ_2 : 225/64 y σ_3 : 081/21, asociándolo a un patrón cinemático normal de rumbo. Araque Gómez y Otero Ramírez (2016) establecen a la Falla Los Montes, para el sector W de esta falla una dirección de esfuerzos NE-SW, y WNW-ESE en el sector centro de la falla. El tensor general resultante para la MLS es σ_1 : 290/09, σ_2 : 156/78 y σ_3 : 022/09. El esfuerzo principal de 290° se aproxima a la bisectriz de los ángulos agudos de los planos de fractura medidos para el Bloque Mirador, para el Bloque Agudo esta dirección es semejante a la tendencia de dirección preferencial de los planos de fractura. Para el Bloque Minas tres direcciones preferenciales se evidencian, uno de ellos concuerda con la dirección del esfuerzo principal.

La Falla Potreros es el trazo de falla que más se asemeja con la dirección del esfuerzo principal; las fallas El Aljibe, Honda y La Lejía al norte del área de estudio presentan un rumbo casi paralelo a la Falla Potreros, con una diferencia angular menor a los 20° . La diferencia angular del esfuerzo principal respecto a las fallas Los Montes y San Javier es de 50° . Por lo que al norte las fallas El Aljibe, Honda y La Lejía se pueden asociar a trazos sintéticos o Riedel a la Falla Potreros, y las fallas Los Montes y San Javier trazos antitéticos o Anti-Riedel a la Falla Potreros.

Respecto al sector sur el esfuerzo principal tiene una diferencia angular inferior a los 20° para las fallas La Pilonera, Paso Grande, La Chivatera y Zanjón de la Vega, asociables a trazos sintéticos o Riedel. Las fallas Los Santos, La Mojarra y Las Calaveras tiene una diferencia angular de 45° respecto al esfuerzo principal, llegándose a considerar como posibles trazos antitéticos o Anti-Riedel.

La Falla Potreros se puede considerar como un límite estructural al considerarse como la falla principal asociada al esfuerzo local, los *Tensores Stc62*, *Stc11* y *Stc16* cercanos a las fallas Potreros y El Aljibe (Bloque Agudo) presentan una dirección del esfuerzo principal cercano a los 290° . El *Tensor Stc04* en el Bloque Cuchilla tiene una dirección del esfuerzo principal de 315° , y 158° para el *Tensor Stc50* en el Bloque Mirador, este último tiene una dirección semejante a la Falla de Bucaramanga. El *Tensor Stc48* en el Bloque Agudo tiene una dirección del esfuerzo principal de 286° , para el Bloque Minas por la naturaleza calcárea de las rocas aflorantes no fue posible encontrar planos estriados confiables.

Los resultados obtenidos en la intensidad y densidad de lineamientos también evidencian un contraste en los valores, demarcando la importancia de la Falla Potreros en el área de estudio. Los valores de intensidad y densidad son mayores en el sector sur (bloques Mirador, Minas y Agudo) respecto a los del norte (bloques Cuchilla y Mirador). El Bloque Agudo obtuvo los valores más altos en estos dos parámetros, los cuales son influyentes en la consideración de posibles áreas para el flujo del agua. La conectividad por línea resalta la importancia del sector sur (bloques Mirador, Minas y Agudo) como áreas de mayor interés para este parámetro.

Considerando los resultados obtenidos por FracPaQ denota al sector sur con mayor interés

hidrogeológico, pero actualmente el sector norte es el que cuenta con una mayor disponibilidad de acceder al recurso hídrico subterráneo. El fracturamiento de la roca es uno de los parámetros para la infiltración, flujo y acumulación de aguas, la precipitación es la principal fuente de recarga del sistema acuífero en la MLS. [Becerra Hernández y Parra Estepa \(2016\)](#) hacen uso de la base de datos del IDEAM para estimar la precipitación anual promedio en la Mesa de Los Santos, esta estimación se replica para la precipitación entre los años 2000-2020 considerando las estaciones localizadas en el departamento de Santander, con un total de 101 estaciones (Figura 32). [Becerra Hernández y Parra Estepa \(2016\)](#) concluyen en del análisis del valor de precipitación multianual promedio que el sector norte de la MLS presenta mayor predisposición de lluvias respecto al sector sur, esta conclusión es consistente al evaluar la precipitación promedio entre los años 2000-2020 en el área de estudio, donde las mayores precipitaciones están sobre el Bloque Tabacal y los valores más bajos están en el Bloque Agudo y Bloque Minas.

Al comparar los valores de las propiedades de porosidad, resistividad, densidad y velocidad de onda P de las formaciones Los Santos (Tabla 1) y Rosablanca (Tabla 2) compiladas en literatura se considera que las porosidades medidas de los plugs se encuentra en el rango en literatura de la Fm. Los Santos, considerando al miembro inferior con valores inferiores al 10 %, para el miembro medio valores inferiores al 7 %, y el miembro superior presenta valores hasta de un 25 %. La Fm. Rosablanca se generaliza en literatura una porosidad de 3 %, esta formación la diferencian en diferentes unidades, los resultados en laboratorio en su mayoría son de valores de porosidad inferiores al 3 % para las unidades de la Fm. Rosablanca. Con diferencia las muestras correspondientes a litologías arenosas de la Fm. Rosablanca son las que presentan los valores más altos de porosidad,

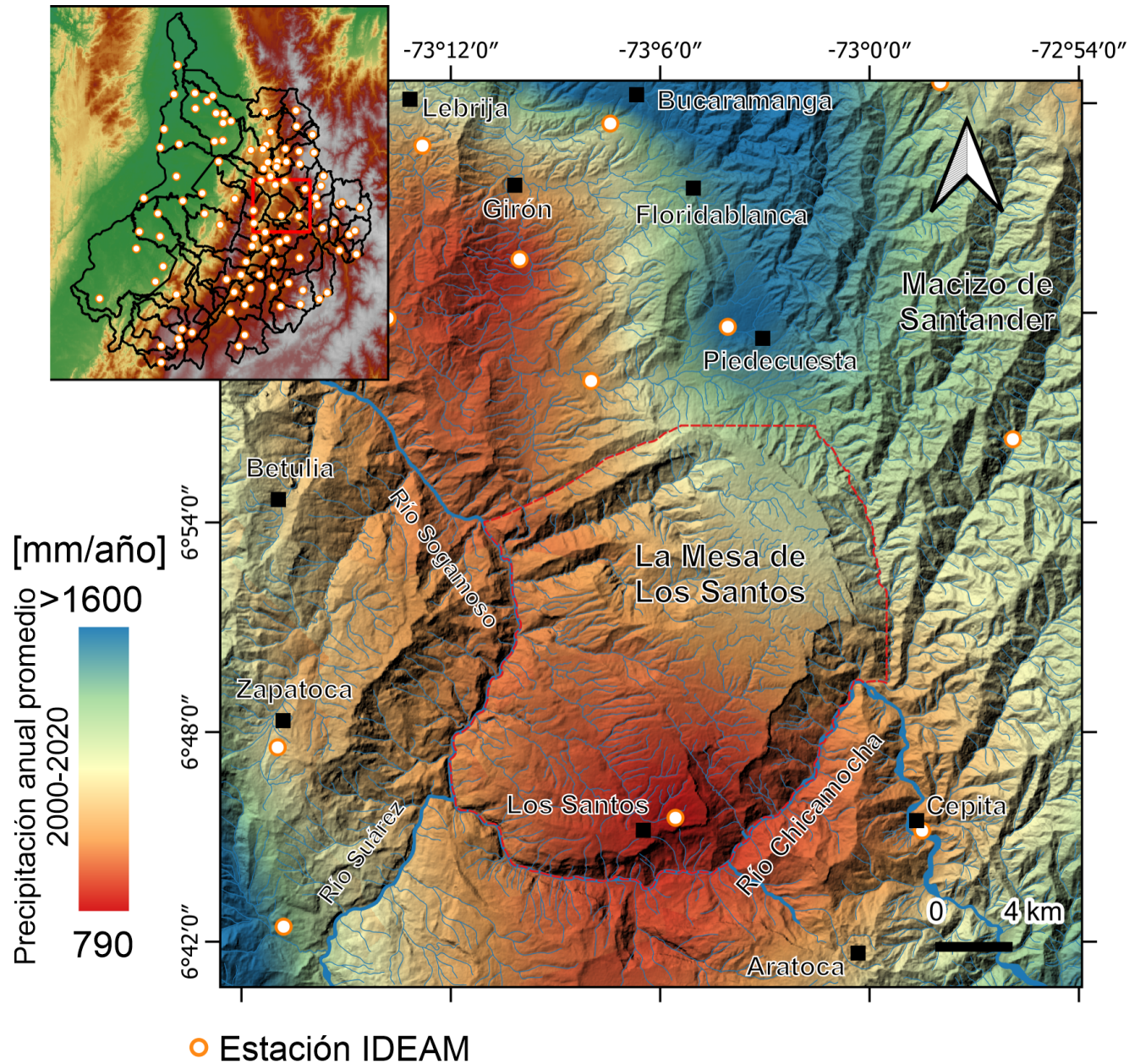


Figura 32. Mapa de precipitación (mm/año) en la Mesa de Los Santos por interpolación del método Kriging para el rango 2000-2020, considerando las estaciones meteorológicas del IDEAM en el departamento de Santander.

con valores mayores al 10 %, lo que corrobora el potencial del nivel arenoso de esta formación para el almacenamiento de agua subterránea.

La resistividad es una de las principales propiedades estimadas por los métodos geoelectricos cuando se trabaja en la búsqueda de aguas subterráneas. Para la Fm. Los Santos y la Fm. Rosablanca en literatura se generaliza un rango de $10 - 10^4 \Omega \cdot m$, pero los trabajos geofísicos en la MLS acotan a valores inferiores a los $500 \Omega \cdot m$ para la Fm. Rosablanca y resistividades inferiores a los $8000 \Omega \cdot m$ para la Fm. Los Santos. En laboratorio los resultados de resistividad de los plugs de estas dos formaciones pueden llegar a superar los $10^4 \Omega \cdot m$, por lo que se consideran los resultados de los plugs en húmedo. Para ambas formaciones el rango de resistividad general está entre los $10^2 - 10^4 \Omega \cdot m$, las unidades con presencia de lodos en ambas formaciones presentan resistividades inferiores a los $10^3 \Omega \cdot m$, algunos de los plugs asociados a unidades con presencia de arenas o conglomerados presentan un rango de bajas resistividades, el cual puede ser relacionado con una mayor cantidad de agua retenida por la muestra infiriendo a su vez la influencia de la porosidad.

Los rangos de densidad en literatura para la Fm. Los Santos, $1,61 - 2,71 gr \cdot cm^{-3}$, y Fm. Rosablanca, $1,92 - 2,90 gr \cdot cm^{-3}$, son semejantes con los medidos en laboratorio de $2,00 - 2,85 gr \cdot cm^{-3}$ para la Fm. Los Santos (las litologías de menor densidad corresponden a las lodolitas del miembro medio) y $2,25 - 2,90 gr \cdot cm^{-3}$ para la Fm. Rosablanca. La influencia de la porosidad en los valores de densidad no es apreciable, como si es evidente al evaluar la influencia de la porosidad contra la velocidad de onda P.

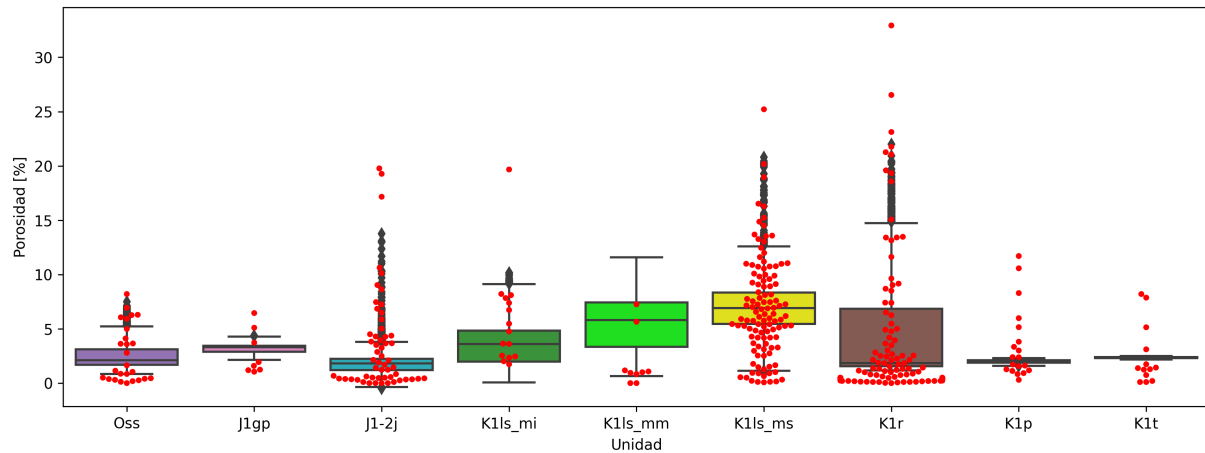
En literatura la Fm. Los Santos se estiman velocidades de onda P entre los $1.5-5.4 km \cdot s^{-1}$, y de $1.1-7.0 km \cdot s^{-1}$ para la Fm. Rosablanca, considerando una porosidad del 40 % al 0 %. En laboratorio la velocidad de onda P para la Fm. Los Santos no supera los $5.0 km \cdot s^{-1}$ y $6.0 km \cdot s^{-1}$ para las litologías asociadas con la Fm. Rosablanca. Las litologías asociadas con la presencia de

arenas son las que se predisponen a presentar porosidad, a su vez estas son las que demuestran una disminución clara en los valores de velocidad de onda P.

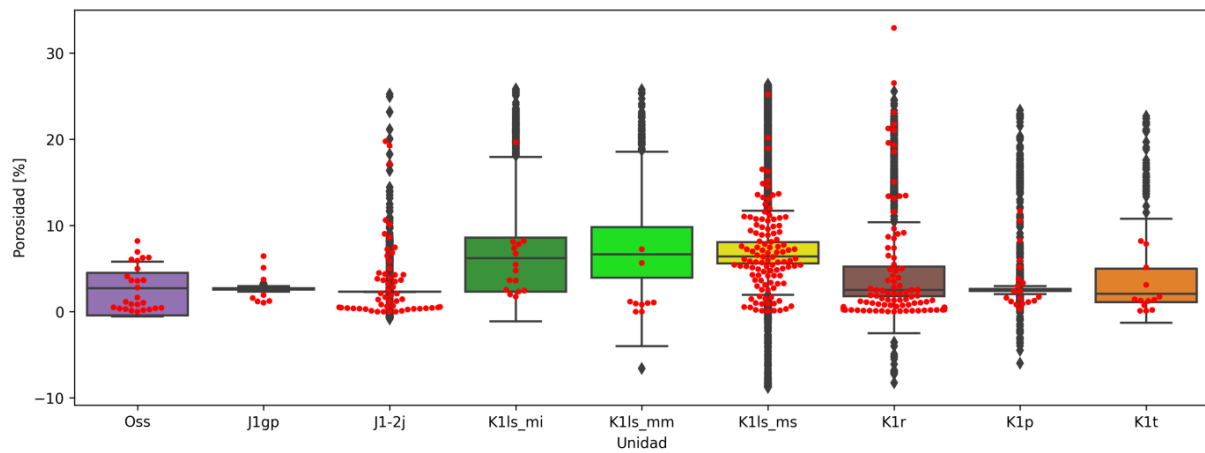
Se puede considerar que una red logró ajustarse mejor a los datos con los que se entrenó al obtener un mayor Score, mas no garantiza que al momento de predecir puede generalizar un valor óptimo, objetivo del actual trabajo de investigación. Por lo que emplear otros métodos estadísticos para evaluar la calidad de la red es adecuado, por ellos cada uno de los modelos generados se predijo las propiedades para el mapa geológico de [Pinto V. et al. \(2007\)](#), estos resultados se grafican por diagramas de cajas y por medio del diagrama de enjambre se superponen los resultados obtenidos en laboratorio para cada propiedad (Figura 33).

Este proceso fue realizado para escoger el mejor modelo que generalizara cada una de las propiedades considerando las formaciones de interés, formaciones Los Santos y Rosablanca principalmente. Los resultados de los mapas de las RN presentan resultados que concuerdan con las zonas de interés hidrogeológico de [Pinto V. et al. \(2007\)](#), donde la Fm. Los Santos tiene un alto interés al norte de la MLS, para la Fm. Rosablanca las áreas cercanas a la Falla Los Santos, que a su vez concuerdan con las microcuencas 2 y 5 consideradas como interés por [Arguello Diaz et al. \(2018\)](#).

Los modelos de RN fueron entrenados considerando el modelo geológico y estructural de [Pinto V. et al. \(2007\)](#), de ser considerado o ajustado alguno de los dos modelos, en la industria minera y petrolera esta labor siempre está en ejecución, sería necesario entrenar una nueva red con los nuevos criterios partiendo de los pesos y topología obtenidos en el actual trabajo de investigación. Aun así, con el modelo actual se es posible estimar en profundidad el comportamiento de



(a) Score 32



(b) Score 73

Figura 33. Ejemplo de comparación entre dos modelos de red neuronal para la porosidad con diferente Score, donde los resultados predichos por la red de mayor Score no generalizan adecuadamente los resultados en laboratorio.

las propiedades, [Moyano Nieto \(2010\)](#) realizó mapas de interpolación de resistividad considerando profundidades de 25, 50, 100, 150 y 200 metros a partir de los resultados obtenidos en de los SEV realizados.

Para predecir en profundidad con un modelo de RN se debe partir en estimar la geología empleando la red neuronal de clasificación (Figura 34), posterior hacer uso de la red de la propiedad deseada, para el caso de la porosidad (Figura 35) al ser una de las propiedades con mayor influencia en el interés hidrogeológico se predice que a los 100 metros se encontraría los miembros medio e inferior de la Fm. Los Santos al norte de la MLS, para el miembro superior se estima una porosidad media de 8%. Al sur y cerca a la Falla Los Santos a los 100m de profundidad se predice que el miembro superior estaría presente, en las áreas donde la Fm. Rosablanca aflora en superficie a 100m de profundidad empezaría a evidenciarse el tope de la Fm. Los Santos, y las porosidades más altas se encontrarían cerca a la Falla Los Santos. Por lo que se considera la existencia de corredores que permita la conexión y flujo del agua entre las diferentes unidades de la Fm. Los Santos y Fm. Rosablanca.

En los resultados de los mapas generados por RN se evidencia que algunos sectores cercanos a las fallas mayores la porosidad disminuye (Figura 36), siendo que en el análisis estructural se evidencio que las fallas mayores tendrían un mayor potencial para el flujo del agua. La razón de esto se debe a la incertidumbre en información que se genera al solo tener muestras de roca con un grado de meteorización medio a bajo, ya que muestras meteorizadas y fracturadas al momento de extraer el plug se dañaron. También, la litología influye al momento de extraer el plug ya que los lodos del miembro medio de la Fm. Los Santos tenían una mayor predisposición a desintegrarse,

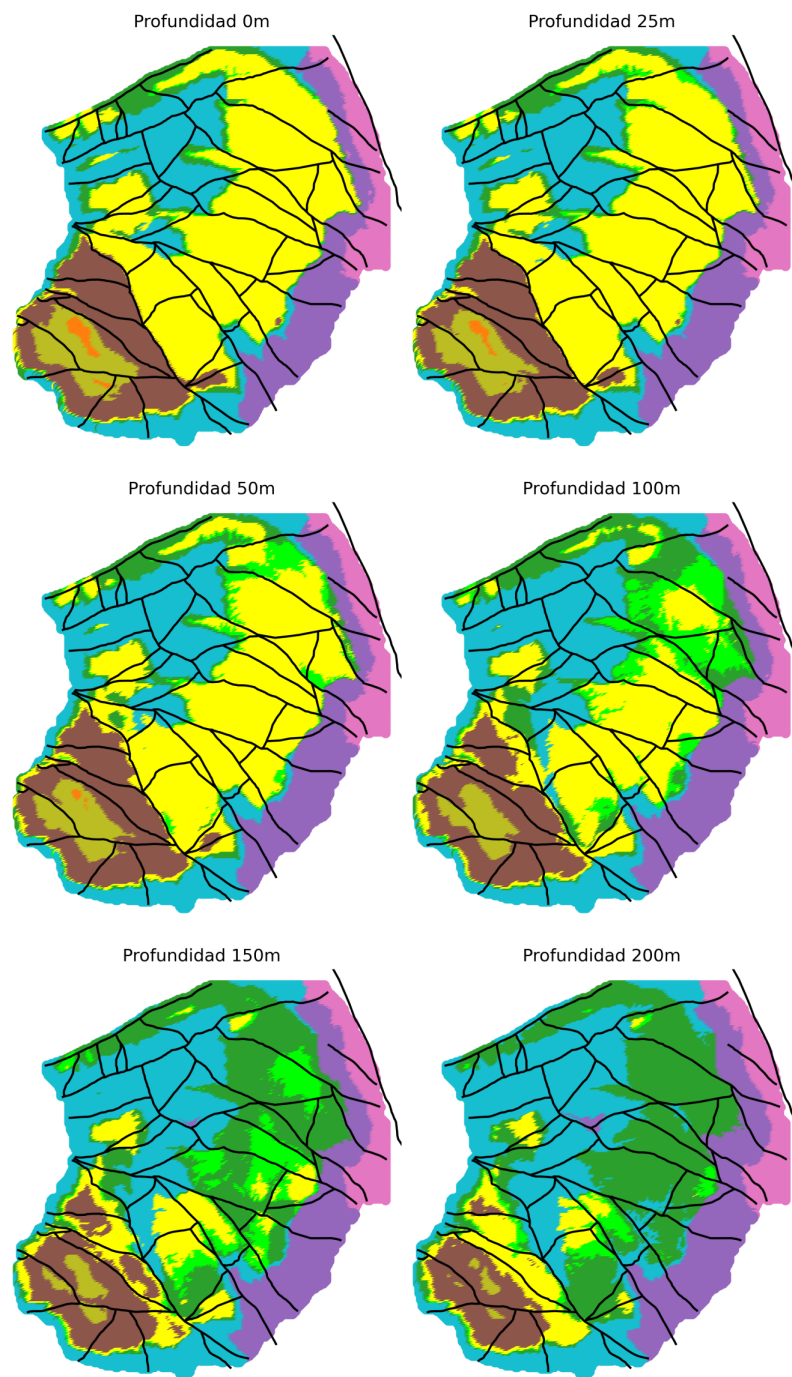


Figura 34. Mapas geológicos predichos para diferentes valores de profundidad en la Mesa de Los Santos.

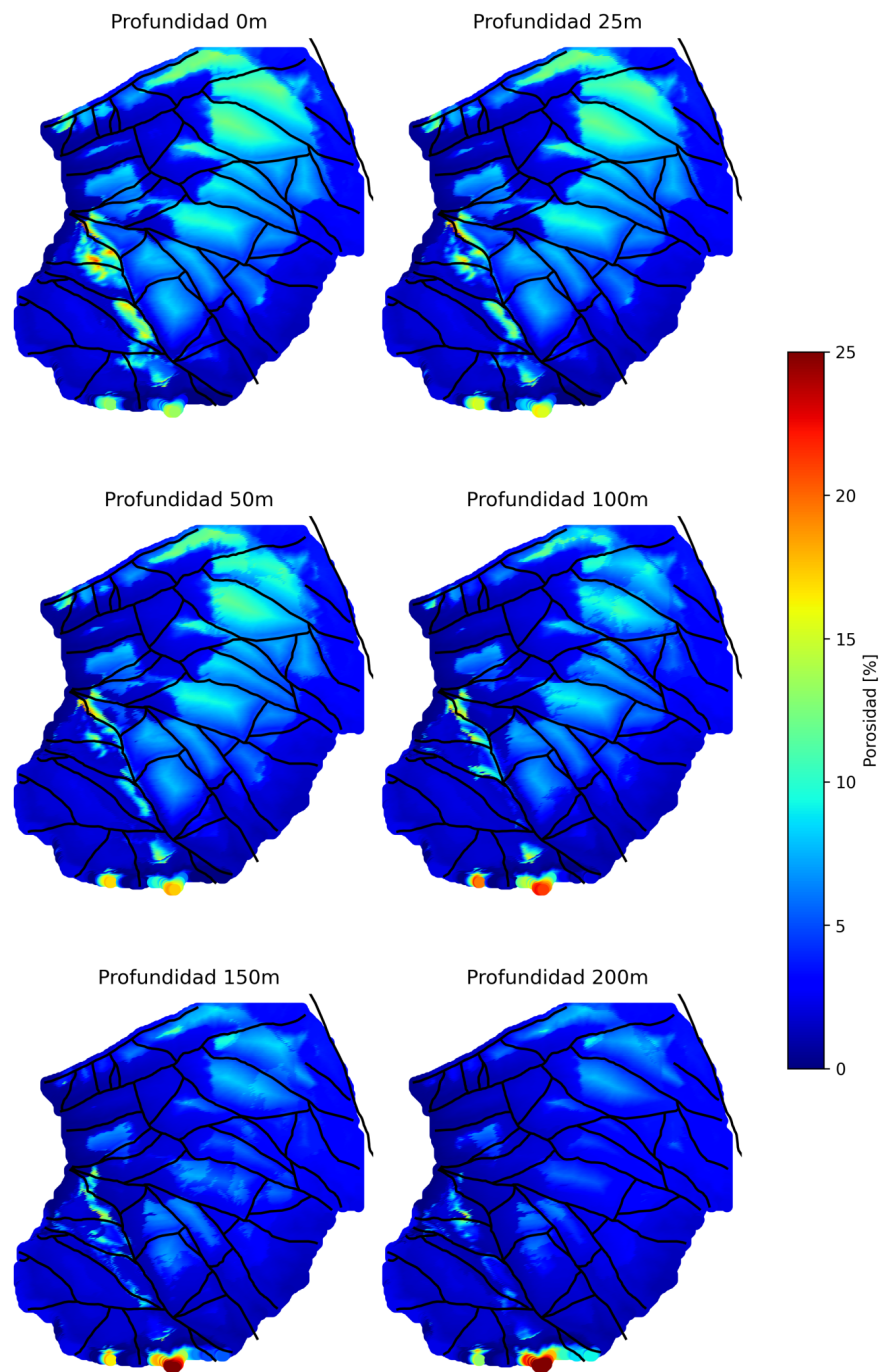


Figura 35. Valores de Porosidad predichos para diferentes valores de profundidad en la Mesa de Los Santos.

al igual que los conglomerados. Otra consideración para obtener bajas porosidades cerca de las fallas mayores, aunque se espera un incremento a la porosidad secundaria por fracturamiento, se debe a que el plug extraído su dimensión no superaba las 1.5x3 pulgadas, por lo que la presencia de fracturas puede no verse reflejado en el plug extraído, por lo que el análisis en conjunto de los resultados de la información de campo y laboratorio permiten disminuir la incertidumbre de ares con interés hidrogeológico.

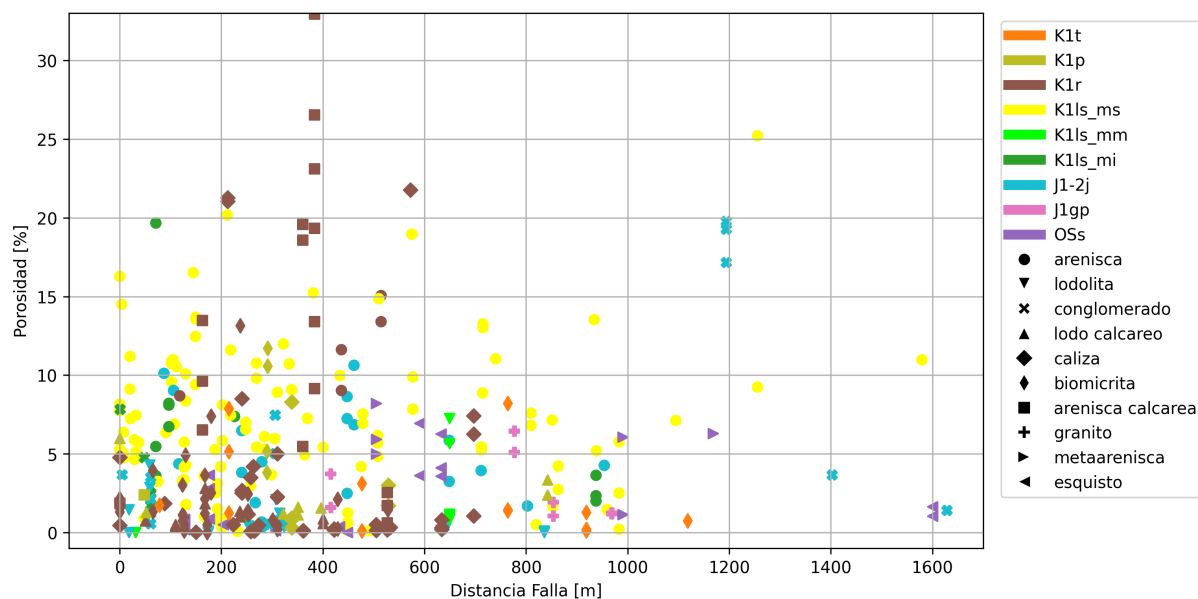


Figura 36. Relación de los valores de Porosidad medidos en laboratorio para los plugs extraídos de la MLS y la distancia al trazo de falla más cercano. Los plugs extraídos corresponden a rocas con meteorización baja a media, por lo que no se tendría información de muestras meteorizadas, las cuales se esperaría que presenten una mayor porosidad.

7. Conclusiones

El análisis de fracturas y tensores de esfuerzo para la Mesa de Los Santos permitió identificar una dirección principal WNW (SHmax a los 111°) asociado a un movimiento horizontal de los bloques adyacentes, o sistema Transcurrente. Los planos de fracturas medidos en campo presentan tendencias asociables con el tensor de esfuerzos. Los tensores obtenidos en el sector centro o cercano a la Falla Potreros conservan esta dirección WNW, los tensores más retirados al norte de la Falla Potreros presentan un cambio en la dirección de esfuerzos a NW. El paralelismo aproximado entre las fallas con rumbo NW-SE y la orientación del tensor de esfuerzos recalca que estas estructuras tienen un carácter transtensivo y entre más paralelas al tensor tienden a estar más abiertas.

Considerando los tensores locales se catalogan como Fallas de Rumbo Sinestrales con componente Normal a las Fallas La Lejía, Honda, El Aljibe, Potreros, Paso Grande y La Chivatera. Se catalogan como Fallas de Rumbo Dextral con componente Normal a las Fallas Zanjón de La Vega y La Pilonera. Se catalogan como Fallas de Rumbo Sinestrales con componente Inverso a las Fallas Los Santos, Las Calaveras y La Mojarra. Se catalogan como Fallas de Rumbo Dextral con componente Inverso a las Fallas Los Montes y San Javier.

Las fallas Los Montes y San Javier (Bloque Cuchilla) se constituye en un trazo anti-Riedel (R') por su ángulo de convergencia respecto al trazo principal de la Falla de Bucaramanga, lo cual está de acuerdo con una cinemática dextral para estas estructuras de la Mesa de Los Santos. Mientras que las fallas en el Bloque Mirador que presentan ángulos menores de convergencia a la Falla

de Bucaramanga son consideradas como estructuras sintéticas o Riedel (R), con igual cinemática sinistral, tal es el caso de las fallas Potreros, El Aljibe, Honda y La Lejía. Las estructuras del Bloque Agudo (fallas de Los Santos, La Mojarra y Las Calaveras) son paralelas entre sí y con la Falla de Bucaramanga, por lo cual muestran una similar cinemática transpresiva sinistral. El Bloque Minas se caracteriza por una mayor complejidad geológica, con estructuras en distintas orientaciones, donde se distinguen trazos subparalelos a la Falla Los Santos, con componente normal (ejemplo Falla La Chivatera) considerando el tensor general obtenido y trazos casi W-E que se definen como fallas transtensivas de componente normales (ejemplo fallas La Pilonera, Paso Grande y Zanjón La Vega).

El fracturamiento en la Mesa de Los Santos presenta dos direcciones preferenciales cercanas al NW-SE y SW-NE, el cual al ser comparado con el análisis cuantitativo de los patrones de fractura realizado con FracPaQ, muestra que en general los afloramientos analizados reproducen las orientaciones de las fallas geológicas de la Mesa de Los Santos, especialmente las que tienen tendencia NW-SE, con otra población de fracturas NE-SW que en la mayoría de los casos se encuentra en relación ortogonal, coincidente también con fallas geológicas, pero de menor extensión.

Los mapas de intensidad, densidad y conectividad de líneas generados de los resultados obtenidos en FracPaQ permitieron determinar posibles áreas de interés. Los valores más altos se encuentran hacia el sur de la Mesa de Los Santos, especialmente en el Bloque Agudo donde afloran las areniscas del miembro superior de la Formación Los Santos. Para el Bloque minas, donde afloran las unidades carbonatadas, se estiman las mayores conectividades de los lineamientos evaluados.

Las direcciones de flujo preferencial estimados por FracPaQ se asocian con los trazos de falla cercanos a las estaciones, presentando en general tres direcciones para el flujo del agua: NE-SW, NW-SE y N-S, semejantes a las direcciones preferenciales de fracturamiento. Se destaca la importancia de las fracturas en la hidrogeología de la Mesa de Los Santos, la dirección de flujo se puede ver influenciada por la estratificación al ser el fracturamiento casi vertical. Aunque el sector sur en la Mesa de Los Santos evidencia condiciones algo mayores para la acumulación e infiltración de aguas, la precipitación es menor en este sector, lo que limita la recarga y flujo del agua subterránea.

Las propiedades de porosidad y resistividad son unas de las más evaluadas en trabajos anteriores en la búsqueda de aguas subterráneas en la Mesa de Los Santos. Las resistividades en los trabajos por otros autores para la Mesa de Los Santos generalizan que valores inferiores a los $8000\Omega \cdot m$ y $500\Omega \cdot m$ se asocian con la Fm. Los Santos y la Fm. Rosablanca respectivamente, en laboratorio ambas formaciones el rango de resistividad (plugs en húmedo) general está entre los $10^2 - 10^4\Omega \cdot m$ influenciados principalmente por el fluido de poro, siendo el agua el de interés, por lo que valores más bajos de resistividad obtenidos se asocian con material de roca más poroso.

Los resultados en laboratorio generalizan que la Fm. Los Santos puede llegar a presentar porosidades de 25 %, mientras que la Fm. Rosablanca se generaliza porosidades inferiores al 5 % en unidades carbonatadas, las litologías arenosas asociadas a la Fm. Rosablanca llegan a presentar porosidades de hasta un 30 %, lo que corrobora el potencial del nivel arenoso de esta formación para el almacenamiento de agua subterránea. La porosidad influye en los valores de la velocidad de onda tipo P, la carga máxima que soporta y la densidad de la roca, aun así, se debe considerar la

influencia del contenido mineralógico, ya que al ser una roca un material heterogéneo en su contenido mineral este puede afectar el resultado, lo que correspondería con variaciones sectorizadas en las propiedades.

Los plugs extraídos de las muestras de roca en la Mesa de Los Santos no evidencian de manera representativa el fracturamiento del afloramiento, y afloramientos con un grado de meteorización alto no permitieron la extracción de plugs. Generando incertidumbre para los sectores cercanos a las fallas, áreas donde se espera una mayor predisposición al flujo de agua implicando un mayor grado de meteorización de la roca. En los resultados de las redes neuronales se evidencia en parte esta incertidumbre en cercanías a las fallas. Aun así, considerando la cantidad de plugs empleados para el entrenamiento y la homogeneidad de los mismos, esta influencia de las fallas localmente puede ser limitada, por lo que se generarían variaciones laterales y en profundidad de las propiedades, lo que se puede aumentar o disminuir el flujo y almacenamiento del recurso hídrico.

La interpretación en conjunto del análisis estructural, las propiedades físicas de la roca y los mapas generados por redes neuronales se complementan, permitiendo definir áreas de interés. Para el sector norte (Bloque Mirador y Bloque Agudo), donde aflora el miembro superior de la Formación Los Santos, sus características litológicas (porosidad principalmente) mas el fracturamiento permiten el almacenamiento y flujo del agua subterránea con preferencia a lineamientos asociados a fallas, siendo las Falla Potreros y Falla Mojara los lineamientos de mayor interés. Para el sector sur (Bloque Minas) áreas cercanas a la Falla Los Santos y la cabecera municipal de Los Santos, donde aflora principalmente la Formación Rosablanca, el nivel arenoso de esta formación es de interés hidrológico y los resultados del análisis del fracturamiento son mayores respecto al sector

norte; por lo que procesos naturales de disolución (karstificación) pueden ser influyentes para el flujo del agua en esta formación, generando de manera lateral y profundidad una posible conexión con el miembro superior la Formación Los Santos, evidenciado en los mapas de redes neuronales, esto producto de la discontinuidad lateral en la secuencia estratigráfica generada por la Falla Los Santos.

8. Recomendaciones

Para mejorar la caracterización del sistema de fracturas en la Mesa de Los Santos se recomienda replicar la metodología propuesta por [Tarazona-Lizcano et al. \(2021\)](#), empleada en el actual trabajo de investigación, para el procesamiento de datos con la herramienta informática FracPaQ y Win-Tensor, en los sectores de poca información, principalmente Bloque Cuchilla.

Realizar una labor de adquisición geofísica en cercanía de la Falla Los Santos y Falla La Mojarra (Bloque Minas y Bloque Agudo), evaluando modelos iniciales geofísicos obtenidos por los modelos de red neuronal. Los métodos recomendados a implementar corresponden a microgravimetría para la evaluación de cavidades, sondeos eléctricos azimutales para la estimación de direcciones de fracturamiento y sondeos electromagnéticos en dominio del tiempo para la estimación de espesores de las unidades geológicas y nivel freático.

Hacer un análisis de microscopia óptica a secciones delgadas de los plugs estudiados y ser complementados con geología de campo para evaluar la secuencia de las unidades aflorantes principalmente al sector norte (Bloque Cuchilla y Mirador) y sur (Bloque Minas) de la MLS.

La información del actual trabajo de investigación y entre otros documentos trabajados se disponen en: [Drive-Los Santos](#). Email sergio.garcia.910815@gmail.com

Referencias Bibliográficas

- Alarcón, C. M., Clavijo-Torres, J., Mantilla-Figueroa, L. C., y Rodríguez, J. G. (2020). Nueva propuesta de edades para el registro sedimentario de las formaciones Bocas y Jordán y su relación con el desarrollo de la actividad magmática del Grupo Plutónico de Santander (Cordillera Oriental, Colombia). *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 44(173):1137–1151.
- Aldana Martínez, S. C. (2008). *Estratigrafía de la Formación Los Santos en Las Secciones de la Navarra y el Calicho en la Mesa de Los Santos (Departamento de Santander)*. Trabajo de grado para optar por el título de geólogo, Universidad Industrial de Santander.
- Allmendinger, R., Cardozo, N., y Fisher, D. (2011). *Structural Geology Algorithms: Vectors and Tensors*. Cambridge University Press.
- Allo, F., Coulon, J.-P., Formento, J.-L., Reboul, R., Capar, L., Darnet, M., Issautier, B., Marc, S., y Stopin, A. (2021). Characterization of a carbonate geothermal reservoir using rock-physics-guided deep neural networks. *The Leading Edge*, 40(10):751–758.
- Angelier, P. (1994). Fault slip analysis and palaeostress reconstruction. In *Continental Deformation*, chapter 4, pages 53—100. Oxford: Pergamon Press.
- Araque Gómez, C. N. y Otero Ramírez, J. L. (2016). *ZONAS TRANSVERSALES Y SU RELACIÓN*

CON ESTRUCTURAS REGIONALES, FLANCO O - CORDILLERA ORIENTAL. Trabajo de grado para optar al título de geólogo, Universidad Industrial de Santander.

Arguello Diaz, A. S., Becerra Figueredo, N., Herrera Torres, L. Y., y Prada Avellaneda, F. (2018). *Estudio del Recurso Hídrico Subterráneo en la Zona Sur Occidental del Municipio de los Santos, Santander.* Trabajo de grado para optar por el título de geólogo, Universidad Industrial de Santander.

Baneshi, M., Behzadijo, M., Schaffie, M., y Nezamabadi-Pour, H. (2013). Predicting Log Data by Using Artificial Neural Networks to Approximate Petrophysical Parameters of Formation. *Petroleum Science and Technology*, 31(12):1238–1248.

Bartington Instruments (2019a). *Operation Manual for MS2 Magnetic Susceptibility System.* Witney, Oxford. England.

Bartington Instruments (2019b). *Operation Manual for MS3 Magnetic Susceptibility Meter.* Witney, Oxford. England.

Becerra Hernández, N. J. y Parra Estepa, C. G. (2016). *Balance Hídrico Para Estimar Recarga Potencial en la Mesa de Los Santos y Dirección de Flujo de Aguas Subterráneas.* Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero civil, Universidad Industrial de Santander.

Bohórquez López, J. D. y Duque Garcés, N. (2020). *Evaluación Preliminar del Potencial Hidrogeológico de la Formación Rosa Blanca a partir de su Caracterización en el Municipio de*

- Zapatoca, Santander*. Trabajo de grado para optar por el título de geólogo, Universidad Industrial de Santander.
- Cardozo, N. y Allmendinger, R. W. (2013). Spherical projections with osxstereonet. *Computers & Geosciences*, 51:193–205.
- Cediel, F. (1698). El grupo girón, una molasa mesozoica de la cordillera oriental. *Boletín Geológico*, 16(1-3):5–96.
- Contreras Vásquez, N. M. (2008). *Análisis Del Fracturamiento Presente en la Formación Los Santos al Norte y Centro de la Mesa de Los Santos, Departamento de Santander*. Trabajo de grado para optar por el título de geólogo, Universidad Industrial de Santander.
- Cracknell, M. J. (2014). *Machine Learning For Geological Mapping: Algorithms And Applications*. Submitted in fulfilment of the requirements for the degree of doctor of philosophy, University of Tasmania.
- Davis, G. H., Reynolds, S. J., y Kluth, C. F. (2011). *Structural geology of rocks and regions*. John Wiley & Sons, Inc., United States of America, 3 edition.
- Delvaux, D. (2001). Win-Tensor 5.9.0. Royal Museum for Central Africa, Dept. Geology & Mineralogy. [Software] Last Update: 2020-07-31.
- Delvaux, D., Moeys, R., Stapel, G., Petit, C., Levi, K., Miroshnichenko, A., Ruzhich, V., y San'kov, V. (1997). Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part 2. Cenozoic rifting. *Tectonophysics*, 282(1-4):1–38.

- Delvaux, D. y Sperner, B. (2003). New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. *Geological Society, London, Special Publications*, 212(1):75–100.
- Díaz, E. J., Contreras, N. M., Pinto, J. E., Velandia, F., Morales, C. J., y Hincapie, G. (2009). Evaluación Hidrogeológica Preliminar de Las Unidades Geológicas de la Mesa de Los Santos, Santander. *Boletín de Geología*, 31.
- Díaz Alvarez, E. J. (2008). *Analisis Preliminar Del Potencial Hidrogeológico en la Mesa de Los Santos, Region Central Del Departamento de Santander*. Trabajo de grado para optar por el título de geólogo, Universidad Industrial de Santander.
- Díaz Duarte, A. J. y Duarte Tarazona, A. F. (2019). *Evaluación Geofísica en Rocas Cretácicas Sedimentarias de Los Municipios de Barichara, Mogotes y el Sector Conocido Como la Mesa de Los Santos en el Departamento de Santander, Mediante Sondeos Electromagnéticos en el Dominio Del Tiempo (SEDIT) y Sondeos El*. Trabajo de grado para optar por el título de geólogo, Universidad Industrial de Santander.
- Drams, J. S. (2020). 70 years of machine learning in geoscience in review. In *Advances in Geophysics*, pages 1–55. Elsevier Inc.
- FitzGerald, D. (2019). Artificial intelligence techniques to the interpretation of geophysical measurements. *ASEG Extended Abstracts*, 2019(1):1–5.
- Fossen, H. (2010). *Structural Geology*. Cambridge University Press, Cambridge.

- Friedman, J. H. (1997). On bias, variance, 0/1-loss, and the curse-of-dimensionality. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 1(1):55–77.
- Galviz Gómez, M. A. (2018). *Mapa de Potencial Kárstico Del Departamento de Santander (Colombia)*. Proyecto de geomática aplicada para optar el título de especialista en geomática, Universidad Militar Nueva Granada.
- García Arias, S. A. y Gómez García, E. A. (2015). *Modelo Conceptual Hidrogeofísico para evaluar el Potencial Hidrogeológico de la Formación Los Santos en la Mesa de Los Santos-Santander, Colombia*. Trabajo de grado para optar por el título de geólogo, Universidad Industrial de Santander.
- GCTS Testing Systems (2018). *Brochure. PLT-2W GCTS Wireless Point Load Test System*. Arizona, EE. UU.
- Gelvez, J., Rodríguez, K., Tarazona, J., y Castellanos, C. (2018). Cueva el Borboso (Los Santos, Santander, Colombia): Vestigios de un Pasado Arrebatado.
- Gómez Sánchez, C. F., Wandurraga Jiménez, L., Molina Narváez, M., y Sarmiento Romero, M. (2014). *Análisis de la Situación Hidrogeológica de la Mesa de Los Santos, Departamento de Santander*. Trabajo de grado para obtener el título de especialista en recursos hídricos., Universidad Católica de Colombia.
- Hastie, T., Tibshirani, R., y Friedman, J. (2009). *The Elements of Statistical Learning*. Springer Series in Statistics. Springer New York, New York, NY.

- Healy, D., Rizzo, R., Timms, N., Cornwell, D., Alcalde, J., Ogaya, X., Belshaw, M., Knight, D., y Andrianov, N. (2019). Fracture Pattern Quantification User Guide (v2.6).
- Healy, D., Rizzo, R. E., Cornwell, D. G., Farrell, N. J., Watkins, H., Timms, N. E., Gómez-Rivas, E., y Smith, M. (2017). FracPaQ: A MATLAB™ toolbox for the quantification of fracture patterns. *Journal of Structural Geology*, 95:1–16.
- Huang, Q. y Angelier, J. (1989). Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress-II. Using conjugate fault sets within heterogeneous families for computing palaeostress axes. *Geophysical Journal International*, 96(1):139–149.
- IDEAM (2019). Estudio nacional del agua 2018. Technical report, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Bogotá, Colombia.
- IngeoExploraciones (2016). Elaboración y Formulación Del Plan de Manejo de Aguas Subterráneas en el Sector de la Mesa, Municipio de Los Santos. Fase III. Technical report, IngeoExploraciones S.A.S., Bucaramanga.
- Instrumentation GDD Inc. (2018). *Manual del usuario. PROBADOR SCIP (Sample Core Induced Polarization) Modelo TDLV*. Québec (QC), Canadá.
- ISRM (1978). International society for rock mechanics commission on standardization of laboratory and field tests: Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 15(6):319–368.

- Julivert, Z. (1963). Estudio petrográfico de las calizas de la Formación Rosablanca de la región de la Mesa de Los Santos (Cordillera Oriental, Colombia). *Boletín de Geología*, 15.
- Kearey, P., Brooks, M., y Hill, I. (2002). An Introduction to Geophysical Exploration THIRD EDITION. Technical report.
- Kingma, D. P. y Ba, J. (2014). Adam: A Method for Stochastic Optimization.
- Kirsch, R. (2009). *Groundwater Geophysics*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Kotsiantis, S. B. (2007). Supervised Machine Learning : A Review of Classification Techniques. *Informatica*, 31:249–268.
- Kuncheva, L. I. (2004). *Combining Pattern Classifiers*. Wiley.
- Laverde Montano, F. (1985). La formacion los santos : un deposito continental anterior al ingreso marino del cretácico < proyecto cretácico : capitulo xx >. Technical report, Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras, Bogotá, Colombia.
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics, second edition*. Cambridge University Press.
- Lu, P., Zhang, Y., Chen, J., Xiao, Y., y Zhao, G. (2019). Enhanced Seismic Imaging with Predictive Neural Networks for Geophysics.
- MacKay, D. (2003). *Information Theory, Inference, and Learning Algorithms*. Cambridge University Press, Cambridge.

- Manzocchi, T. (2002). The connectivity of two-dimensional networks of spatially correlated fractures. *Water Resources Research*, 38(9):1–1–1–20.
- Marrett, R. y Peacock, D. C. (1999). Strain and stress. *Journal of Structural Geology*, 21(8-9):1057–1063.
- Marsland, S. (2009). *Machine Learning: An Algorithmic Perspective*. CRC Press, New Jersey, USA.
- Match, D. J. (2001). Redes neuronales: Conceptos básicos y aplicaciones. Cátedra: Informática Aplicada a la Ingeniería de Procesos – Orientación I. Universidad Tecnológica Nacional-Grupo de Investigación Aplicada a la Ingeniería Química (GIAIQ).
- Mauldon, M., Dunne, W., y Rohrbaugh, M. (2001). Circular scanlines and circular windows: new tools for characterizing the geometry of fracture traces. *Journal of Structural Geology*, 23(2-3):247–258.
- McCulloch, W. S. y Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The Bulletin of Mathematical Biophysics*, 5(4):115–133.
- Milsom, J. (2003). *Field Geophysics. The geological field guide series. (3er Ed.)*. John Wiley & Sons Ltd.
- Moreno, G. y García, O. (2006). Caracterización Cuantitativa de Patrones de Fracturamiento mediante Ventanas Circulares y Análisis Fractal. *Geología Colombiana*, 31:73–90.

- Moyano Nieto, I. E. (2010). Prospección Geoeléctrica en La Mesa de Los Santos (Santander). Procesamiento e Interpretación de Sondeos Eléctricos verticales. Technical report, Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS, Bogotá, Colombia.
- Oda, M. (1982). Fabric Tensor for Discontinuous Geological Materials. *Soils and Foundations*, 22(4):96–108.
- Oda, M., Hatsuyama, Y., y Ohnishi, Y. (1987). Numerical experiments on permeability tensor and its application to jointed granite at Stripa Mine, Sweden. *Journal of Geophysical Research*, 92(B8):8037.
- OFI Testing Equipment, Inc. (OFITE) (2015). *Instruction Manual. BLP-630 Automated Gas Porosimeter*. Houston, Texas, U.S.A.
- Osorio Afanador, D. y Velandia, F. (2021). Late Jurassic syn-extensional sedimentary deposition and Cenozoic basin inversion as recorded in The Girón Formation, northern Andes of Colombia. *Andean Geology*, 48(2):237.
- Parra, J. O., Iturrarán-Viveros, U., Parra, J. S., y Xu, P.-C. (2014). Neural network and rock physics for predicting and modeling attenuation logs. In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2014*, pages 633–637. Society of Exploration Geophysicists.
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M.,

- Perrot, M., y Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12:2825–2830.
- Petit, J. (1987). Criteria for the sense of movement on fault surfaces in brittle rocks. *Journal of Structural Geology*, 9(5-6):597–608.
- Pinto V., J. E., Clavijo Torres, J., Gómez Isidro, S., Gutiérrez Toledo, D., Mora Ortiz, J. P., Rojas Parra, N. R., Adarme, I. R., Aldana, S. C., Contreras, N. M., Díaz, E. J., Melo, L. F., Tarazona, G. R., Rincón, M. A., Vargas J., C. Y., Morales A., C. J., Velandia P., F., Hincapié V., G., Forero O., H., Duarte, R., Consuelo Vargas, M., y de Bermoudes, O. (2007). Proyecto de investigación geológica e hidrogeológica en la Mesa de Los Santos, sector noreste de Curití y borde occidental del Macizo de Santander, departamento de Santander. (Memoria explicativa de la investigación geológica e hidrogeológica en la Mesa d. Technical report, INGEOMINAS-UIS, Bucaramanga.
- QGIS Development Team (2009). *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation.
- Riedel, W. (1929). Zur mechanik geologischer brucherscheinungen. *Zentralblatt fuer Mineralogie, Geologie und Palaeontologie*, pages 354–368.
- Rincon Gómez, M. A. (2008). *Estratigrafia de la Formación Los Santos en las Secciones Estratigraficas la Punta, Carrizal (Mesa de Los Santos) y la Cueva (Curiti), Departamento de Santander*. Trabajo de grado para optar por el título de geólogo, Universidad Industrial de Santander.

Ripley, B. D. (1996). *Pattern Recognition and Neural Networks*. Cambridge University Press.

Rohrbaugh, M. B., Dunne, W. M., y Mauldon, M. (2002). Estimating fracture trace intensity, density, and mean length using circular scan lines and windows. *AAPG Bulletin*, 86.

Rohwer, R., Wynne-Jones, M., y Wysotzki, F. (1994). *Neural networks*, pages 84–106. Ellis Horwood series in artificial intelligence. Ellis Horwood. The above book (originally published in 1994 by Ellis Horwood) is now out of print. The copyright now resides with the editors who have decided to make the material freely available on the web. <http://www1.maths.leeds.ac.uk/charles/statlog/>.

Rojas, R. (1996). *Neural Networks: A Systematic Introduction*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.

Sanderson, D. J. y Nixon, C. W. (2015). The use of topology in fracture network characterization. *Journal of Structural Geology*, 72:55–66.

Sassi, W. y Faure, J.-L. (1996). Role of faults and layer interfaces on the spatial variation of stress regimes in basins: inferences from numerical modelling. *Tectonophysics*, 266(1-4):101–119.

Suarez-Burgoa, L. (2015). *Descripción del macizo rocoso: introducción a la ingeniería de rocas de superficie y subterránea*. Sin editorial aún.

Suzuki, K., Oda, M., Yamazaki, M., y Kuwahara, T. (1998). Permeability changes in granite with crack growth during immersion in hot water. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35(7):907–921.

Tarazona Lizcano, Y. y Vargas López, M. C. (2020). *Análisis Cuantitativo de Sistemas de Fracturas como Aporte al Conocimiento Hidrogeológico de la zona Sur de la Mesa de Los Santos, Santander – Colombia*. Trabajo de grado para optar por el título de geólogo, Universidad Industrial de Santander.

Tarazona-Lizcano, Y., Vargas-López, M. C., y Velandia, F. (2021). Análisis cuantitativo de sistemas de fracturas y sus implicaciones hidrogeológicas en la zona sur de la Mesa de Los Santos, Santander - Colombia. *Boletín de Geología*, 43(3).

Telford, W. M., Geldart, L. P., y Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press.

Tripathy, V. y Saha, D. (2013). Plate margin paleostress variations and intracontinental deformations in the evolution of the Cuddapah basin through Proterozoic. *Precambrian Research*, 235:107–130.

Ulloque Ardila, M. T. (s.f.). Análisis geofísico del nivel freático y la influencia de la falla de los santos (santander) con base en métodos resistivos [en desarrollo.]. Trabajo de grado para optar por el título de magister en geofísica, Universidad Industrial de Santander.

van der Baan, M. y Jutten, C. (2000). Neural networks in geophysical applications. *GEOPHYSICS*, 65(4):1032–1047.

Vargas Jerez, C. Y. (2008). *Cartografía Geológica a Escala 1:25.000 de la Mesa de Los Santos*,

Departamento de Santander. Trabajo de grado para optar por el título de geólogo, Universidad Industrial de Santander.

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*. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Doctorado en geociencias, Universidad Nacional de Colombia.

Velandia, F., Cetina, M., Castellanos, E., y Gómez, S. (2016). Análisis de fracturas y cinemática de fallas geológicas como primer aporte al modelo conceptual de aguas subterráneas en la zona de Charta, Macizo de Santander-Colombia. *Revista de la Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela*, 31(2):37–56.

Ward, D., Goldsmith, R., Jimeno, A., Cruz, J., Restrepo, H., y Gómez, E. (1977). Mapa geológico del cuadrángulo h-12 bucaramanga. escala 1:100.000. Technical report, Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS.

Wilches Sánchez, L. y Corzo Farfán, A. F. (2015). *Caracterización Geoelectrica en la Vereda "La Esperanza" Sector de la Mesa de Los Santos, Municipio de Piedecuesta, Santander*. Trabajo de grado para optar por el título de geólogo, Universidad Industrial de Santander.

Yong Technology Inc. (2014). *GeoRose*. Edmonton, Canada.

You, N., Li, Y. E., y Cheng, A. (2020). Shale Anisotropy Model Building Based on Deep Neural Networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(2).

Zeeb, C., Gómez-Rivas, E., Bons, P. D., y Blum, P. (2013). Evaluation of sampling methods for fracture network characterization using outcrops. *AAPG Bulletin*, 97(9):1545–1566.

Zoback, M. L. (1992). First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map Project. *Journal of Geophysical Research*, 97(B8):11703.

Apéndices

Apéndice A. Datos estructurales.

Planos estriados

Tabla 9

Planos asociados a estrías de falla medidos en campo por Tarazona Lizcano y Vargas López (2020) y el autor del actual trabajo de investigación en la MLS. Cinemática de la estría I: inversa, N:normal, S:sinestral, D:dextral. Coordenadas en EPSG:3116.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.	Pitch	Cinemática
Stc04	1098995.635	1254824.147	5	80	05E	D	
			0	74	05W	D	
			225	72	27N	S	
			34	65	50N	S	
			315	60	84S	I	
			330	60	85W	I	
			182	60	08W	D	
			205	86	14W	D	
			196	88	30W	D	
			21	81	26N	D	
			18	87	12N	D	
			7	76	47N	D	
			356	82	14N	D	
			146	84	20S	D	
			346	84	12W	D	
Stc11	1102543.422	1248667.495	159	88	16E	D	
			140	86	02S	D	
			345	72	02W	D	
			4	76	02E	D	
			350	80	02E	D	
			324	86	02E	D	
			342	82	02W	D	
			344	80	06W	D	
			338	78	08W	D	
			344	84	10W	D	
Stc12	1102580	1248900	340	78	04W	D	

Continúa en la siguiente página

Tabla 9 – continuación Tabla de planos estriados.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Pitch	Cinemática
			341	70	04W	D
			342	74	02W	D
			340	80	02W	D
			339	80	06W	D
			338	70	06W	D
			25	70	02E	D
			15	80	04E	D
			17	78	04E	D
			359	70	06E	D
			343	78	02W	D
Stc16	1103389.353	1250083.257	282	84	04E	S
			255	88	02E	S
			247	84	04E	S
			342	80	02E	D
			182	84	08W	D
Stc24	1106833.245	1252064.902	325	84	10W	D
Stc44	1109821	1242751	185	80	04E	S
			182	76	04E	S
			168	88	10W	S
			162	88	10W	S
			195	82	04W	S
			156	89	11E	D
			228	74	06W	S
			229	86	04W	S
			218	86	06W	S
Stc45	1110158.793	1253297.236	173	88	06E	S
Stc48	1110616	1239254	33	83	22N	S
			212	89	20W	S
			42	82	15N	S
			41	82	24N	S
			224	86	10W	S
			208	84	28W	S
			202	74	10W	S
			32	80	10N	S
			67	78	03N	S
			35	56	03N	S
			206	72	04E	S
			234	88	13N	S

Continúa en la siguiente página

Tabla 9 – continuación Tabla de planos estriados.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Pitch	Cinemática
			242	89	10N	S
			225	62	04E	S
			56	83	18N	S
			340	78	10W	S
			221	72	03W	S
			76	84	02N	S
			35	74	04N	S
			35	70	06E	S
			162	88	02E	D
			34	88	20E	S
			166	88	04E	D
			45	68	02N	S
Stc50	1112363.416	1256109.784	249	80	06S	S
			122	84	02N	S
			212	78	04S	D
			278	70	12S	S
			212	78	10W	D
			257	82	04N	S
Stc53	1114571.804	1258116.287	24	62	20W	S
Stc57	1115105.513	1245409.706	158	20	82N	I
Stc62	1115930.966	1247825.277	180	82	18E	D
			35	86	06E	S
			25	68	03W	S
			213	86	04E	S
			218	80	07W	S
			187	88	04W	S
			171	78	06E	D
			186	88	18E	S
			167	72	17E	D
			183	81	12E	D
			187	72	06W	D
			193	76	08W	D
			142	66	10W	D
			157	76	11W	D
			197	70	25E	S
			177	73	02E	D
			160	83	02W	D
			154	76	06E	D

Continúa en la siguiente página

Tabla 9 – continuación Tabla de planos estriados.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Pitch	Cinemática
			276	26	80N	I
			306	20	79E	I
			345	86	10W	D
			258	30	64W	I
			200	72	02W	S
			172	78	03W	D
			200	68	15W	S
			171	62	02W	D
			175	76	04E	D
			217	80	12W	S
			205	83	05W	S
			215	76	12E	S
Stc63	1115978.299	1256522.036	342	86	14W	D
			186	66	24W	S
			200	68	14W	S
			292	84	02E	D
			115	88	04W	D
			159	76	02W	S
Stc69	1117313.384	1256874.614	28	68	24E	S
Stc71	1117668.834	1257136.967	141	80	20E	D
			143	82	28W	S
			15	82	30E	D
Stc72	1117905.438	1257343.475	235	58	24W	S
			245	80	90W	N

Planos de foliación

Tabla 10

*Planos de foliación medidos en campo por el autor del actual trabajo de investigación en la MLS.
Coordenadas en EPSG:3116.*

Estación	X	Y	Azim. Buzam.	Buzam.
Stc57	1115105.513	1245409.706	5	20
			107	32
			183	10
Stc58	1115350.147	1245772.735	184	38
Stc64	1116033.758	1246451.55	145	36
			356	46
			30	38
			24	26
			7	30
			92	30
			37	48
			21	36
			72	30
			76	30
			164	18

Planos de estratificación

Tabla 11

Planos de estratificación medidos en campo por Tarazona Lizcano y Vargas López (2020) y el autor del actual trabajo de investigación en la MLS. Coordenadas en EPSG:3116.

Estación	X	Y	Azim. Buzam.	Buzam.
Stc01	1097195	1243139	284	8
			295	10
			299	8
Stc02	1097404	1242419	239	6
			300	10
			295	6
			239	6
			300	10
			295	6
			267	6
			350	4
			239	6
Stc03	1098392	1242764	345	6
Stc05	1099659	1239136	272	8
			278	8
			278	8
			278	8
Stc06	1099908	1243643	225	10
			237	8
Stc07	1100539	1243643	336	18
			170	18
			140	16
			205	18
Stc08	1101418.979	1247605.519	14	22
Stc12	1102580	1248900	241	14
Stc15	1103370.239	1243219.582	21	43
			20	50
Stc18	1105098.79	1237616.909	1	3
Stc21	1106020	1249619.356	215	25
			262	10
			237	10
			215	16
			277	20

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 11 – continuación Tabla de planos de estratificación.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
Stc22	1106529.916	1250828.168	218		8
			207		18
			203		18
			189		4
Stc23	1106809.19	1250916.755	219		14
			217		12
			218		12
			195		12
			214		12
			221		8
			22		12
Stc24	1106833.245	1252064.902	220		16
			110		28
			252		28
			215		14
			223		24
			184		24
			196		22
Stc25	1107006.698	1252036.677	195		14
			5		18
			230		30
Stc26	1107359	1249239	220		30
			72		8
			290		4
			35		11
			320		11
			351		4
			290		4
			171		8
			272		8
			276		6
			270		2
			260		8
Stc29	1107489.008	1253319.012	280		11
			151		4
			302		26
			294		18
			315		24

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 11 – continuación Tabla de planos de estratificación.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
			265		18
			300		18
			310		10
			225		10
			254		8
Stc30	1107491.716	1253862.226	280		24
Stc31	1107507.642	1249355.17	294		18
			268		24
			65		4
			320		18
			302		10
Stc32	1105644.731	1253794.787	188		18
			195		24
			181		22
			180		22
			204		30
			182		24
			187		14
Stc33	1108069	1238642	210		13
Stc35	1108253.214	1250434.805	350		28
			332		28
			315		26
			310		30
			294		22
Stc36	1108580	1245491	30		4
Stc37	1109391	1245876	141		6
			134		6
			141		6
			134		6
			141		6
			134		6
			141		6
			134		6
Stc38	1109431	1245700	131		6
			150		10
Stc39	1109447	1241611	315		18
Stc40	1109608	1241330	225		6
			306		24

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 11 – continuación Tabla de planos de estratificación.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
			284		22
			270		12
Stc41	1109686	1241568	295		6
Stc42	1109809	1242937	146		11
			125		8
			195		4
Stc43	1109813.518	1252524.152	136		17
			280		16
			235		6
			295		18
			293		24
			39		2
			220		8
			190		8
			185		14
			60		22
			17		18
			180		4
			222		10
			228		12
			135		8
			235		8
Stc44	1109821	1242751	225		10
			315		10
			210		10
Stc46	1110160	1242720	190		18
			195		11
Stc48	1110616	1239254	170		8
Stc56	1114950.207	1246238.579	139		28
			175		14
			136		17
			266		14
			231		8
			261		10
			219		8
			343		8
Stc61	1115925.385	1247763.43	68		58
			72		58

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 11 – continuación Tabla de planos de estratificación.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
Stc62	1115930.966	1247825.277		35	38
				32	8
				5	10
				359	10
				349	10
				12	10
				42	40
				59	24
Stc63	1115980.126	1256526.146		77	28
				75	20
				252	18

Planos de fractura

Tabla 12

Planos de fractura medidos en campo por Tarazona Lizcano y Vargas López (2020) y el autor del actual trabajo de investigación en la MLS. Coordenadas en EPSG:3116.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.
Stc01	1097195	1243139	41	84
			23	86
			19	88
			35	88
Stc02	1097404	1242419	92	84
			84	88
			164	80
			165	88
			165	80
			106	82
			105	84
			115	86
			116	84
			155	72
			100	88
			270	89
			91	82
			80	82
			115	82
			112	89
			96	76
			99	72
			92	89
			97	89
			90	82
			349	81
			354	84
			332	89
			324	89
			164	80
			165	88
			165	80
Stc03	1098392	1242764	163	86

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
Stc05	1099659	1239136	159		90
			3		80
			165		90
			150		88
			272		84
			235		86
			280		84
			220		88
			275		76
			262		88
			268		84
			258		86
			266		86
			270		82
			268		70
			268		88
			240		86
			274		88
			257		88
			258		88
Stc06	1099908	1243643	248		84
			280		82
			10		86
			5		86
			6		76
			35		86
			15		86
			355		88
			358		70
			10		76
Stc07	1100539	1243643	35		60
			65		80
			70		76
			341		62
			15		68
			64		60
			197		80
			40		72

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
			42		74
			35		68
			32		60
			308		86
			310		88
			330		90
			30		60
			25		70
			23		66
			23		70
			15		68
Stc08	1101418.979	1247605.519	174		88
			14		86
			196		80
			200		82
			200		80
			210		88
			206		78
			206		78
			156		80
Stc09	1101474.18	1244940.903	80		79
			4		78
			85		84
Stc10	1101995.085	1240615.719	33		77
			260		76
			314		74
			48		89
			277		80
			68		88
			235		80
			134		82
			78		76
			67		85
Stc12	1102580	1248900	25		84
			222		88
			10		78
			20		88
			13		66

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
Stc15	1103370.239	1243219.582	17		60
			25		70
			15		70
			285		87
			97		89
Stc16	1106529.916	1250828.168	300		86
			100		70
			280		86
			226		74
			282		84
			230		74
			102		90
			309		80
			123		89
			197		60
Stc18	1105098.79	1237616.909	350		60
			128		76
			72		86
			87		81
			81		81
			87		80
			138		72
Stc19	1105335	1242881	125		62
			55		90
			60		84
			62		82
			45		88
			48		70
			45		78
Stc20	1105644.731	1253794.787	120		82
			252		86
			254		88
			251		80
			30		80
			314		76
			265		74
			32		84
			172		84

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim. Buzam.	Buzam.
			296	74
			354	78
			5	80
			285	50
			265	79
			305	59
			5	80
			310	72
			37	80
			2	84
			6	84
			215	80
			5	84
			215	80
			200	82
			297	80
			358	88
			218	82
			187	90
			353	80
			218	82
			187	90
			353	80
			225	84
			344	70
			240	88
			40	88
			323	78
			317	84
			1	80
			214	82
			345	70
			35	88
			224	78
			315	74
			220	89
			316	80
Stc21	1106020	1249619.356	47	68

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim. Buzam.	Buzam.
			355	88
			192	21
			350	84
			47	72
			35	72
			354	84
			41	78
			41	72
			14	80
			40	72
			15	78
			32	82
			100	62
			38	80
			32	84
			40	88
			32	76
			34	86
			196	88
			32	80
			30	82
			180	90
			35	80
			25	80
			20	82
			25	82
			30	82
			30	80
			295	86
			105	70
			19	86
			97	86
			112	88
			19	88
			20	70
			60	56
			25	70
Stc22	1106529.916	1250828.168	357	80

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim. Buzam.	Buzam.
			62	50
			262	86
			21	80
			84	88
			110	52
			355	86
			75	80
			347	88
			347	80
			95	70
			282	60
			100	86
			100	68
			168	88
			24	90
			16	84
			40	90
			272	88
			175	86
			226	86
			221	86
			13	74
			8	72
			266	86
			60	74
			236	86
			247	82
			91	84
			207	88
			87	86
			179	76
			355	88
			90	88
			357	70
			167	60
			355	80
			355	90
			44	90

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
			162		88
			14		86
			13		68
			57		68
			94		86
			94		88
			346		86
Stc23	1106809.19	1250916.755	36		72
			71		83
			132		78
			49		84
			42		78
			28		70
			70		84
			57		80
			337		82
			97		42
			32		78
			40		84
			33		82
			29		88
			36		78
			25		76
			223		80
			215		80
			224		84
			34		84
			163		88
			340		90
			340		84
			96		74
			270		72
			260		82
			107		78
			343		90
			104		78
			102		74
			334		74

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
			34		82
			35		86
			115		56
			40		74
			74		86
			347		80
			339		80
			336		82
			60		80
			73		82
			336		66
			60		86
			340		82
			25		78
			339		84
			40		80
			116		68
			252		88
			32		68
			336		80
			37		84
			335		62
Stc24	1106833.245	1252064.902	83		68
			159		86
			300		47
			15		84
			357		90
			100		78
			188		18
			11		90
			167		80
			302		72
			101		88
			225		84
			2		90
			15		82
			2		70
			97		82

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim. Buzam.	Buzam.
			136	64
			355	90
			353	88
			358	88
			75	48
			47	58
			45	68
			18	72
			1	90
			234	90
			352	68
			277	76
			65	88
			316	38
			85	70
			222	88
			8	76
			160	70
			78	72
			159	82
			12	84
			358	88
			355	60
			301	32
			271	60
			355	88
			256	58
			155	86
			325	84
			155	88
			170	86
			338	80
			82	72
			70	78
			332	76
			250	78
			256	78
Stc25	1107006.698	1252036.677	263	52

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
			33		83
			68		90
			222		84
			20		82
			156		76
			25		76
			337		88
			123		84
			156		84
			86		74
			114		72
			345		74
			22		62
			349		78
			32		70
			114		72
			155		80
			202		26
			86		72
			342		84
			350		64
			123		56
			275		70
			345		54
			216		60
			112		64
			44		44
			246		44
			80		74
			352		62
			350		70
			67		62
			164		86
			155		86
Stc26	1107359	1249239	219		76
			221		74
			225		86
			179		84

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
			198		88
			20		82
			230		70
			180		78
			230		80
			240		88
			111		82
			240		64
Stc29	1107489.008	1253319.012	104		38
			40		86
			2		88
			25		74
			58		72
			130		60
			116		82
			27		88
			75		70
			110		58
			318		88
			57		86
			284		16
			296		38
			143		86
			162		58
			170		58
			263		90
			137		64
			196		74
			342		44
			193		78
			200		72
			107		76
			124		72
			352		86
			95		72
			242		88
			348		52
			215		70

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
			107		80
			132		50
			151		80
			25		54
			283		56
			165		56
			197		72
			155		72
			184		84
			180		90
			242		80
			177		74
			45		74
			211		86
			287		68
			325		82
			354		84
			330		74
			90		52
			277		82
			220		58
			106		88
			270		84
			202		86
			294		64
			282		88
			13		88
			205		88
Stc30	1107491.716	1253862.226	166		56
			212		88
			345		68
			165		72
			160		60
			215		82
			150		68
			234		80
			16		80
			32		88

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim. Buzam.	Buzam.
			150	66
			60	60
			350	46
			180	84
			36	88
			197	86
			210	90
			85	64
			34	90
			221	88
			350	40
			203	88
			26	88
			335	78
			357	48
			73	72
			51	90
			232	80
			187	84
			1	86
			197	76
			50	90
			356	88
			358	86
			47	88
			54	82
			200	80
			230	86
			355	86
			355	56
			197	60
			215	82
			163	82
			40	78
			205	86
			183	78
			207	82
Stc31	1107507.642	1249355.17	355	74

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
			204		74
			317		62
			221		76
			180		84
			207		74
			350		88
			60		80
			352		82
			352		88
			20		80
			164		82
			10		80
			9		74
			325		90
			9		72
			5		88
			184		82
			325		78
			15		86
			355		80
			160		80
			355		76
			146		82
			85		80
			292		60
			182		88
Stc33	1108069	1238642	312		82
			304		88
			105		84
			107		82
Stc34	1108235	1245105	203		78
			200		84
			200		36
			210		78
			210		88
			208		78
			293		89
			210		78

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
Stc35	1108253.214	1250434.805	190		88
			205		90
			200		90
			224		86
			88		40
			210		80
			227		74
			130		86
			143		82
			245		76
			356		90
			246		80
			255		78
			87		88
			85		62
			180		88
			294		88
			215		82
			225		84
			350		88
			231		76
			242		80
			342		80
			250		78
			168		72
			354		84
			295		78
			75		88
			354		82
			74		76
			89		86
			102		70
			221		82
			234		76
			228		88
			170		88
			162		90
			294		62

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
			224		70
			170		90
			356		30
			247		80
			41		48
			1		78
			352		84
			208		86
			345		88
			246		82
			244		70
			356		88
			89		90
			255		80
			242		80
Stc36	1108580	1245491	30		88
			20		88
			20		90
			25		90
			15		88
			208		86
			32		86
			25		88
			24		74
			25		70
			30		70
Stc37	1109391	1245876	17		88
			12		86
			16		76
			17		78
			20		80
			8		86
			14		90
			110		74
			193		72
			194		78
			195		76
			195		70

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
			191		80
			177		68
			180		78
			189		74
			174		80
			189		84
			22		82
			7		89
			354		89
			357		89
			193		88
			202		86
			189		80
Stc38	1109431	1245700	7		76
			340		86
			345		82
			333		90
			350		80
			346		76
			340		88
Stc39	1109447	1241611	125		88
			126		80
			129		90
			115		84
Stc40	1109608	1241330	28		85
			30		88
			32		88
			213		83
			217		88
			215		88
			185		85
			176		86
			190		88
Stc41	1109686	1241568	215		80
			225		76
			209		74
			210		84
			195		74

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
			292		88
			286		89
			228		74
			130		90
			291		88
			215		80
			187		78
			210		82
			2		88
			109		70
			111		70
Stc42	1109809	1242937	195		74
			200		80
			340		88
			358		86
			12		82
			15		84
			220		78
			45		88
			225		88
			195		84
Stc43	1109813.518	1252524.152	220		84
			112		84
			175		82
			254		82
			170		90
			62		74
			218		54
			192		88
			77		74
			110		60
			170		82
			179		82
			70		60
			250		58
			267		80
			95		80
			162		90

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim. Buzam.	Buzam.
			180	84
			237	76
			350	76
			257	86
			220	44
			30	62
			15	58
			355	88
			335	86
			2	86
			35	86
			222	78
			46	72
			277	88
			165	54
			205	68
			302	74
			262	84
			358	82
			236	66
			225	62
			347	76
			265	88
			41	78
			196	66
			358	74
			220	28
			215	82
			24	64
			356	80
			356	88
			237	60
			242	84
			227	76
			4	88
			190	70
			243	85
			246	76

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
Stc44	1109821	1242751	114		88
			270		86
			7		88
			355		88
			352		60
			278		86
			208		88
			207		90
			30		80
			197		80
			210		74
			187		68
			30		78
			195		80
			203		84
			189		78
			195		80
			331		66
			350		88
			178		89
			332		74
			331		72
			16		58
			35		80
Stc46	1110160	1242720	345		70
			16		80
			18		72
			331		80
			342		84
			344		88
			65		78
			46		82
			44		80
			152		82
			226		78
			112		78
			140		82
			227		82

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
Stc47	1110557	1242672	227		86
			15		89
			17		82
			7		84
			19		82
			157		80
			26		64
			15		73
			10		88
			22		80
			35		82
			31		90
			35		78
			29		86
Stc48	1110616	1239254	34		88
			30		88
			296		71
			299		81
			110		80
			329		74
			120		74
			272		80
			153		74
			145		86
			151		89
			149		89
			17		86
			12		78
Stc50	1112363.416	1256109.784	135		86
			132		86
			248		80
			248		80
			214		80
			77		88
			297		70
			245		90
			310		88
			212		82

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
			304		76
			297		80
			223		82
			226		80
			265		82
			312		88
			245		80
			215		70
			272		70
			262		68
			20		86
			216		90
			260		90
			244		68
			262		76
			137		84
			320		90
			268		70
			224		74
			212		78
			257		82
			214		88
			307		90
			217		90
			122		84
			212		78
			140		80
			256		80
			10		82
			230		84
			262		76
			151		38
Stc56	1114950.207	1246238.579	3		81
			356		75
			2		73
			13		66
			146		10
			199		88

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim. Buzam.	Buzam.
			25	68
			215	87
			163	79
			180	84
			167	80
			165	88
			264	66
			192	82
			336	86
			47	88
			317	86
			24	86
			336	86
			3	84
			196	82
			204	76
			31	80
			196	82
			14	84
			26	88
			352	80
			207	80
			7	72
			163	54
			306	84
			197	84
			42	84
			185	88
			217	86
			337	86
			196	78
			195	82
			130	90
			190	80
			24	62
			354	84
			24	80
			25	70

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
			9		86
			27		64
			215		90
			175		74
			209		70
			30		80
			137		80
			215		90
			324		90
			35		86
			122		70
			192		90
			307		86
			309		88
			30		76
			20		76
			211		64
			20		88
			17		90
			131		90
Stc57	1115105.513	1245409.706	340		56
			80		70
			3		78
			285		72
			326		58
			187		88
			125		43
			306		90
			153		44
			160		88
			96		78
			157		82
			174		84
			124		80
			29		64
			335		58
			354		60
			76		74

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
			181		18
			125		48
			292		44
			247		58
			353		80
			142		82
			63		30
			84		64
			337		84
			7		74
Stc58	1115350.147	1245772.735	97		82
			267		90
			150		50
			97		88
			327		90
			124		86
			71		80
			144		62
			89		88
			301		72
			136		50
Stc61	1115925.385	1247763.43	159		72
			79		60
			245		28
			165		64
			142		82
			149		52
			165		48
			142		72
			190		22
			142		54
			294		82
			82		64
			85		62
			194		54
			141		80
			197		40
			54		90

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
Stc62	1115930.966	1247825.277	172		58
			213		40
			252		74
			346		70
			62		68
			1		74
			250		14
			265		2
			296		9
			223		58
			32		82
			203		66
			230		82
			152		76
			235		72
			286		86
			202		81
			358		86
			159		86
			182		76
			216		74
			196		64
			204		78
			162		76
			164		62
			226		56
			159		82
			237		52
			141		60
			204		68
			161		70
			71		82
			181		68
			192		78
			236		76
			214		66
			157		58
			226		74

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
			160		76
			93		90
			354		82
			205		88
			237		80
			176		82
			160		86
			204		88
			243		50
			195		78
			90		88
			72		86
			354		86
			40		72
			170		68
			222		86
			225		80
			85		72
			204		48
			210		60
			170		78
Stc63	1115980.126	1256526.146	200		74
			106		82
			321		88
			228		44
			291		82
			292		90
			74		66
			226		90
			312		64
			175		80
			214		74
			209		64
			6		24
			195		62
Stc64	1116033.758	1246451.55	142		32
			139		64
			18		82

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim. Buzam.	Buzam.
			345	72
			334	74
			268	64
			223	80
			227	86
			250	22
			118	88
			247	80
			117	88
			117	28
			305	64
			44	70
			296	68
			225	72
			124	76
			134	80
			102	64
			219	88
			300	82
			236	78
			237	72
			232	80
			292	80
			234	68
			320	64
			192	86
			316	80
			232	82
			307	76
			232	64
			310	88
			32	86
			125	76
			30	88
			124	80
			228	72
			44	88
			152	56

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
			138		76
			76		78
			224		64
			127		72
			269		78
			31		78
			285		86
			234		58
			110		76
			239		58
			25		62
			83		82
			324		88
			216		82
			252		72
			301		72
			290		88
			260		60
			315		78
			127		68
			204		86
			119		58
			149		66
Stc66	1116394.994	1246729.986	315		84
			62		48
			315		60
			354		74
			70		54
			250		30
			85		30
			60		38
			150		84
			136		80
			152		88
			342		88
			145		76
			144		78
			70		18

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
			146		74
			139		40
			64		68
			64		50
			152		82
			69		76
			150		76
			54		36
			156		78
			74		30
			327		86
			322		76
			277		22
			122		68
			137		72
			144		88
			25		44
			124		70
			105		62
			200		42
			325		70
			180		74
			272		82
			149		44
			149		50
			286		82
			306		64
			312		62
			187		86
			313		64
			356		88
			154		48
			258		86
Stc68	1117295.235	1257135.599	261		50
			297		66
			95		48
			145		88
			257		38

Continúa en la siguiente pagina

Tabla 12 – continuación Tabla de planos de fractura.

Estación	X	Y	Azim.	Buzam.	Buzam.
			166		80
			201		54
			145		78
			137		86
			158		54
			172		86
			79		40
			328		58
			264		32
			150		72
			122		82
			280		78
Stc72	1117905.438	1257343.475	190		60
			222		45
			65		84
			44		66
			352		74
			57		66
			235		58
			212		32
			356		68
			50		86
			32		80
			168		66
			215		90
			199		80
			120		88
			212		40
			42		70
			292		76

Resultados FracPaQ

Tabla 13

Resultados de FracPaQ de las estaciones con registro fotográfico de la MLS tomadas por Tarazona Lizcano y Vargas López (2020) y el autor del actual trabajo de investigación. Coordenadas en EPSG:3116.

Estación	X	Y	Formación	Intensidad	Densidad	k1 azimut	K1/k2	I nodos	X nodos	Y nodos	CI
Stc01	1097195.00	1243139.00	Los Santos	34.45	3550.00	111.86	1.08	268	78	184	2.32
Stc02	1097404.00	1242419.00	Rosablanca	15.85	262.00	-55.06	1.65	536	207	136	2.04
Stc03	1098392.00	1242764.00	Rosablanca	13.66	632.00	-59.86	1.25	1103	241	571	1.94
Stc05	1099659.00	1239136.00	Rosablanca	11.07	130.00	-36.24	1.57	428	162	132	2.10
Stc07	1100539.00	1243643.00	Rosablanca	11.95	290.00	47.98	1.63	361	129	109	2.03
Stc08	1101418.98	1247605.52	Rosablanca	33.36	797.69	1.10	1.44	330	44	126	1.49
Stc09	1101474.18	1244940.90	Rosablanca	11.13	76.31	24.70	1.06	136	29	58	1.79
Stc10	1101995.09	1240615.72	Tablazo	4.95	34.10	-1.72	1.43	56	27	33	2.70
Stc12	1102580.00	1248900.00	Los Santos	21.66	1299.92	0.02	1.94	443	103	198	1.88
Stc13	1103064.26	1248715.60	Los Santos	5.60	21.88	230.50	1.27	1211	394	44	1.40
Stc15	1103370.24	1243219.58	Rosablanca	6.84	0.58	-5.27	1.28	512	204	72	1.89
Stc17	1105061.06	1250019.08	Los Santos	21.28	213.11	74.92	1.1	295	103	42	1.72
Stc18	1105098.79	1237616.91	Rosablanca	4.73	14.64	-316.83	1.8	42	7	18	1.67
Stc19	1105335.00	1242881.00	Los Santos	27.46	1410.00	141.22	1.1	333	111	126	2.07
Stc21	1106020.00	1249619.36	Los Santos	17.72	210.77	54.05	1.84	1917	644	130	1.51
Stc22	1106529.92	1250828.17	Jordán	41.25	1091.14	254.29	1.35	546	146	57	1.35
Stc23	1106809.19	1250916.76	Jordán	4.32	7.39	235.85	3.08	310	108	30	1.62
Stc24	1106833.25	1252064.90	Jordán	24.40	389.04	-95.08	2.04	2574	680	226	1.29
Stc25	1107006.70	1252036.68	Jordán	16.70	300.42	46.22	2.23	314	42	31	0.85
Stc26	1107359.00	1249239.00	Los Santos	20.95	356.00	14.82	1.69	524	201	152	2.09
Stc27	1107372.88	1249259.62	Los Santos	9.57	58.16	258.81	1.18	2165	504	56	1.01
Stc28	1107387.49	1254053.50	Jordán	17.27	214.71	-121.41	1.12	2353	535	192	1.14
Stc31	1107507.64	1249355.17	Los Santos	13.33	86.77	-125.40	2.35	521	181	28	1.52
Stc32	1107884.13	1258743.42	Los Santos	11.53	79.52	-86.83	1.15	2270	676	294	1.51
Stc33	1108069.00	1238642.00	Los Santos	18.36	353.00	62.31	1.2	293	115	100	2.19
Stc34	1108235.00	1245105.00	Los Santos	32.59	1240.00	-77.75	1.39	626	168	262	1.94
Stc35	1108253.21	1250434.81	Jordán	14.39	86.63	-41.33	3.25	105	31	3	1.26
Stc36	1108580.00	1245491.00	Los Santos	34.38	1220.00	137.21	1.75	356	143	122	2.22

Continúa en la siguiente página

Tabla 13 – continuación Tabla de resultados de FracPaQ.

Estación	X	Y	Formación	Intensidad	Densidad	k1 azimut	K1/k2	I nodos	X nodos	Y nodos	CI
Stc37	1109391.00	1245876.00	Los Santos	18.59	791.00	-163.40	1.47	1126	239	691	2.05
Stc38	1109431.00	1245700.00	Los Santos	27.23	537.00	-76.34	1.56	427	199	132	2.37
Stc39	1109447.00	1241611.00	Los Santos	18.18	510.00	87.90	1.43	366	153	227	2.56
Stc40	1109608.00	1241330.00	Los Santos	49.67	6060.00	17.87	1.85	1207	253	615	1.91
Stc41	1109686.00	1241568.00	Los Santos	20.71	842.00	-171.74	1.31	752	189	419	2.08
Stc42	1109809.00	1242937.00	Los Santos	33.31	2130.00	-7.28	1.21	2134	591	1389	2.25
Stc43	1109813.52	1252524.15	Los Santos	13.65	254.34	-7.71	4.26	347	33	36	0.72
Stc44	1109821.00	1242751.00	Los Santos	25.05	922.00	16.57	1.06	645	350	195	2.60
Stc45	1110158.79	1253297.24	Los Santos	0.65	0.29	30.80	1.62	769	228	135	1.61
Stc46	1110160.00	1242720.00	Los Santos	43.63	2340.00	57.91	2.64	161	67	53	2.24
Stc47	1110557.00	1242672.00	Los Santos	52.95	2390.00	-208.43	1.06	645	350	195	2.60
Stc48	1110616.00	1239254.00	Los Santos	38.19	2540.00	-118.86	1.25	772	208	333	1.96
Stc49	1111407.79	1244998.87	Los Santos	29.15	1096.72	187.66	1.13	459	147	72	1.65
Stc50	1112363.42	1256109.78	Los Santos	29.80	618.58	78.98	1.86	735	156	55	1.07
Stc51	1112917.93	1251300.51	Los Santos	4.04	16.70	163.59	1.08	636	138	42	1.06
Stc52	1113097.21	1252772.15	Los Santos	7.10	47.49	179.59	1.3	369	97	17	1.18
Stc54	1114629.24	1243290.94	Silgará	21.69	495.85	29.43	1.88	591	152	76	1.37
Stc55	1114642.59	1243865.40	Silgará	35.13	1299.66	196.73	1.46	1226	350	1	1.14
Stc56	1114950.21	1246238.58	Los Santos	21.77	570.48	-99.03	1.42	1586	276	228	1.11
Stc57	1115105.51	1245409.71	Silgará	17.19	146.56	140.85	2.05	95	20	9	1.12
Stc58	1115350.15	1245772.74	Silgará	42.57	2021.12	189.77	2.75	1917	258	25	0.58
Stc59	1115885.56	1247669.26	Los Santos	13.84	196.40	138.13	1.07	1150	271	52	1.07
Stc60	1115888.49	1247776.05	Los Santos	18.42	502.11	121.06	1.6	497	99	68	1.18
Stc61	1115925.39	1247763.43	Los Santos	9.42	81.24	172.51	2.59	489	59	29	0.68
Stc62	1115930.97	1247825.28	Los Santos	14.90	310.12	3.41	1.32	793	125	90	0.97
Stc63	1115978.30	1256522.04	Los Santos	11.55	212.68	139.74	1.43	3200	662	166	0.98
Stc64	1116033.76	1246451.55	Silgará	32.30	940.85	38.97	2.81	791	174	151	1.38
Stc65	1116046.36	1247810.15	Los Santos	1.37	1.06	145.77	1.45	1081	289	67	1.24
Stc66	1116394.99	1246729.99	Silgará	34.09	887.06	123.25	2.23	1775	349	58	0.89
Stc67	1116592.86	1253267.49	Los Santos	15.50	214.31	-53.78	1.83	309	87	11	1.23
Stc68	1117295.24	1257135.60	Granito	17.42	164.19	146.30	1.82	154	53	19	1.66

Continúa en la siguiente página

Tabla 13 – continuación Tabla de resultados de FracPaQ.

Estación	X	Y	Formación	Intensidad	Densidad	k1 azimut	K1/k2	I nodos	X nodos	Y nodos	Cl
Stc70	1117352.24	1257070.44	Granito	14.10	225.10	226.43	1.09	727	234	160	1.78
Stc72	1117905.44	1257343.48	Granito	20.87	294.77	103.53	1.17	129	52	9	1.77

Apéndice B. Propiedades físicas de las rocas.**Localización plugs**

Tabla 14

Localización plugs extraídos por [Ulloque Ardila \(sf\)](#) y el autor del actual trabajo de investigación en la MLS. Coordenadas en EPSG:3116.

Plug	X	Y	Z	Unidad	Litología	Distancia Falla [m]
LSN-01	1114949.39	1246238.02	1745.00	K1ls-ms	arenisca	1579.23
LSN-02a	1115819.32	1247030.08	1761.00	K1ls-ms	arenisca	577.10
LSN-02b	1115819.32	1247030.08	1761.00	K1ls-ms	arenisca	577.10
LSN-03	1115324.37	1256812.13	1677.00	K1ls-ms	arenisca	21.24
LSN-04	1115076.27	1257212.30	1608.00	K1ls-ms	arenisca	211.66
LSN-05	1114601.39	1257700.61	1523.00	K1ls-mi	arenisca	226.09
LSN-06a	1115132.61	1257617.41	1443.00	J1-2j	arenisca	447.67
LSN-06b	1115132.61	1257617.41	1443.00	J1-2j	arenisca	447.67
LSN-06c	1115132.61	1257617.41	1443.00	J1-2j	arenisca	447.67
LSN-07a	1115089.35	1259669.04	1195.00	J1gp	granito	777.10
LSN-07b	1115089.35	1259669.04	1195.00	J1gp	granito	777.10
LSN-08a	1117932.04	1257159.17	1335.00	J1gp	granito	415.39
LSN-08b	1117932.04	1257159.17	1335.00	J1gp	granito	415.39
LSN-09a	1117352.24	1257070.44	1466.00	J1gp	granito	968.88
LSN-09b	1117352.24	1257070.44	1466.00	J1gp	granito	968.88
LSN-10a	1117031.75	1256359.59	1546.00	Oss	metaarenisca	505.42
LSN-10b	1117031.75	1256359.59	1546.00	Oss	metaarenisca	505.42
LSN-10c	1117031.75	1256359.59	1546.00	Oss	metaarenisca	505.42
LSN-11a	1115978.30	1256522.04	1595.00	K1ls-mi	arenisca	71.11
LSN-11b	1115978.30	1256522.04	1595.00	K1ls-mi	arenisca	71.11
LSN-11c	1115978.30	1256522.04	1595.00	K1ls-mi	arenisca	71.11
LSN-12a	1115350.15	1245772.74	1332.00	Oss	esquisto	1600.39
LSN-12b	1115350.15	1245772.74	1332.00	Oss	esquisto	1600.39
LSN-13a	1116394.99	1246729.09	1423.00	Oss	esquisto	590.57
LSN-13b	1116394.99	1246729.09	1423.00	Oss	esquisto	590.57
LSN-14	1115885.56	1247669.26	1600.00	K1ls-mi	conglomerado	48.51
LSN-15	1115415.29	1249359.05	1656.00	K1ls-ms	arenisca	144.59
LSN-16	1109213.89	1259211.57	1571.00	K1ls-ms	arenisca	105.37
LSN-17a	1108151.94	1258793.79	1526.00	K1ls-ms	arenisca	20.17
LSN-17b	1108151.94	1258793.79	1526.00	K1ls-ms	arenisca	20.17
LSN-18a	1109258.15	1258826.80	1545.00	K1ls-ms	arenisca	129.74
LSN-18b	1109258.15	1258826.80	1545.00	K1ls-ms	arenisca	129.74
LSN-19a	1110025.20	1259463.75	1581.00	K1ls-ms	arenisca	863.16

Continúa en la siguiente página

Tabla 14 – continuación Tabla localización plugs.

Plug	X	Y	Z	Unidad	Litología	Distancia Falla [m]
LSN-19b	1110025.20	1259463.75	1581.00	K1ls-ms	arenisca	863.16
LSN-20	1111699.38	1259207.81	1584.00	K1ls-ms	arenisca	851.33
LSN-21	1112028.87	1256675.12	1611.00	K1ls-ms	arenisca	333.67
LSN-22a	1112361.89	1256109.06	1589.03	K1ls-ms	arenisca	102.00
LSN-22b	1112361.89	1256109.06	1589.03	K1ls-ms	arenisca	102.00
LSN-22c	1112361.89	1256109.06	1589.03	K1ls-ms	arenisca	102.00
LSN-23	1110535.96	1253188.04	1633.00	K1ls-ms	arenisca	107.45
LSN-24	1109880.50	1252594.78	1590.00	K1ls-ms	arenisca	574.99
LSN-25	1108385.44	1252522.79	1383.00	J1-2j	arenisca	953.90
LSN-26a	1107487.32	1253319.25	1457.00	J1-2j	arenisca	461.24
LSN-26b	1107487.32	1253319.25	1457.00	J1-2j	arenisca	461.24
LSN-27	1107387.49	1254053.50	1278.00	J1-2j	arenisca	105.95
LSN-28	1107997.27	1251996.17	1239.00	J1-2j	arenisca	711.47
LSN-29	1106396.09	1253228.59	1019.00	J1-2j	lodolita	323.77
LSN-30	1106682.22	1252596.31	1038.00	J1-2j	lodolita	284.06
LSN-31	1106881.53	1252072.45	1102.00	J1-2j	lodolita	641.81
LSN-32a	1108246.64	1250919.31	1169.00	J1-2j	arenisca	240.21
LSN-32b	1108246.64	1250919.31	1169.00	J1-2j	arenisca	240.21
LSN-33	1108668.83	1250282.58	1327.00	J1-2j	lodolita	253.73
LSN-34	1107592.39	1250955.82	1111.00	J1-2j	arenisca	116.25
LSN-35	1106540.62	1250850.90	1173.00	J1-2j	lodolita	307.58
LSN-36	1105616.34	1250458.87	1289.00	K1ls-mi	conglomerado	0.81
LSN-37	1104484.19	1250316.36	1281.00	K1ls-ms	arenisca	305.26
LSN-38	1103397.64	1250082.58	1158.00	K1ls-ms	arenisca	37.14
LSN-39	1102661.78	1250539.55	1090.00	K1ls-ms	arenisca	298.84
LSN-40	1102168.63	1250573.14	1015.00	K1ls-ms	arenisca	257.66
LSN-41	1104077.83	1249877.14	1244.00	K1ls-ms	arenisca	111.59
LSN-42	1105020.14	1249999.08	1330.00	K1ls-ms	arenisca	3.87
LSN-43a	1106020.00	1249619.36	1485.00	K1ls-ms	arenisca	715.05
LSN-43b	1106020.00	1249619.36	1485.00	K1ls-ms	arenisca	715.05
LSN-44a	1107507.64	1249355.17	1604.00	K1ls-ms	arenisca	148.99
LSN-44b	1107507.64	1249355.17	1604.00	K1ls-ms	arenisca	148.99
LSN-45	1102322.29	1248526.51	1002.00	K1ls-ms	arenisca	90.96
LSN-46	1103064.26	1248715.60	1012.00	K1ls-ms	arenisca	400.34
LSN-47a	1104009.50	1248612.11	1151.00	K1ls-ms	arenisca	507.91
LSN-47b	1104009.50	1248612.11	1151.00	K1ls-ms	arenisca	507.91
LSN-47c	1104009.50	1248612.11	1151.00	K1ls-ms	arenisca	507.91
LSN-48	1103688.14	1249293.04	1141.00	K1ls-ms	arenisca	475.38
LSN-49a	1112917.93	1251300.51	1673.00	K1ls-mm	lodolita	649.44
LSN-49b	1112917.93	1251300.51	1673.00	K1ls-mm	lodolita	649.44
LSN-49c	1112917.93	1251300.51	1673.00	K1ls-mm	lodolita	649.44

Continúa en la siguiente página

Tabla 14 – continuación Tabla localización plugs.

Plug	X	Y	Z	Unidad	Litología	Distancia Falla [m]
LSN-49d	1112917.93	1251300.51	1673.00	K1ls-mm	lodolita	649.44
LSN-49e	1112917.93	1251300.51	1673.00	K1ls-mm	lodolita	649.44
LSN-49f	1112917.93	1251300.51	1673.00	K1ls-mm	lodolita	649.44
LSN-50a	1113097.21	1252772.15	1644.00	K1ls-ms	arenisca	269.21
LSN-50b	1113097.21	1252772.15	1644.00	K1ls-ms	arenisca	269.21
LSN-50c	1113097.21	1252772.15	1685.00	K1ls-ms	arenisca	269.21
LSN-51	1114050.20	1256321.70	1642.01	K1ls-ms	arenisca	380.96
LSN-52a	1116592.86	1253267.49	1743.00	K1ls-ms	arenisca	28.95
LSN-52b	1116592.86	1253267.49	1743.00	K1ls-ms	arenisca	28.95
LSN-53	1115358.82	1252687.88	1705.00	K1ls-ms	arenisca	740.06
LSN-54a	1109824.55	1247890.39	1659.00	K1ls-ms	arenisca	1255.53
LSN-54b	1109824.55	1247890.39	1659.00	K1ls-ms	arenisca	1255.53
LSN-55	1108795.82	1247734.55	1636.00	K1ls-ms	arenisca	933.96
LSN-56	1111580.38	1259976.68	1266.00	J1-2j	conglomerado	1628.54
LSN-57	1112365.69	1259982.90	1233.00	J1-2j	conglomerado	1402.59
LSN-58a	1112406.72	1259777.38	1263.00	J1-2j	conglomerado	1194.08
LSN-58b	1112406.72	1259777.38	1263.00	J1-2j	conglomerado	1194.08
LSN-58c	1112406.72	1259777.38	1263.00	J1-2j	conglomerado	1194.08
LSN-59a	1108837.49	1259914.55	1296.00	K1ls-mi	conglomerado	61.04
LSN-59b	1108837.49	1259914.55	1296.00	K1ls-mi	conglomerado	61.04
LSN-59c	1108837.49	1259914.55	1296.00	K1ls-mi	conglomerado	61.04
LSN-59d	1108837.49	1259914.55	1296.00	J1-2j	conglomerado	61.04
LSN-59e	1108837.49	1259914.55	1296.00	J1-2j	conglomerado	61.04
LSN-59f	1108837.49	1259914.55	1296.00	J1-2j	conglomerado	61.04
LSN-59g	1108837.49	1259914.55	1296.00	J1-2j	conglomerado	61.04
LSN-60a	1099725.20	1254644.77	719.00	K1r	caliza	526.82
LSN-60b	1099725.20	1254644.77	719.00	K1r	caliza	526.82
LSN-60c	1099725.20	1254644.77	719.00	K1r	caliza	526.82
LSN-60d	1099725.20	1254644.77	719.00	K1r	arenisca calcarea	526.82
LSN-60e	1099725.20	1254644.77	719.00	K1r	arenisca calcarea	526.82
LSN-60f	1099725.20	1254644.77	719.00	K1r	arenisca calcarea	526.82
LSN-60g	1099725.20	1254644.77	719.00	K1r	arenisca calcarea	526.82
LSN-61a	1099899.14	1254380.04	779.00	K1r	caliza	505.15
LSN-61b	1099899.14	1254380.04	779.00	K1r	caliza	505.15
LSN-62	1100438.56	1255525.40	852.00	J1-2j	conglomerado	4.83
LSN-63a	1115095.80	1259750.99	1164.00	J1gp	granito	853.64
LSN-63b	1115095.80	1259750.99	1164.00	J1gp	granito	853.64
LSN-64a	1114886.21	1258144.82	1389.00	Oss	esquisto	127.99
LSN-64b	1114886.21	1258144.82	1389.00	Oss	esquisto	127.99
LSN-65a	1115000.85	1257730.96	1420.00	J1-2j	arenisca	279.75
LSN-65b	1115000.85	1257730.96	1420.00	J1-2j	arenisca	279.75

Continúa en la siguiente página

Tabla 14 – continuación Tabla localización plugs.

Plug	X	Y	Z	Unidad	Litología	Distancia Falla [m]
LSN-65c	1115000.85	1257730.96	1420.00	J1-2j	arenisca	279.75
LSN-65d	1115000.85	1257730.96	1420.00	J1-2j	arenisca	279.75
LSN-66a	1114894.64	1257649.26	1473.00	J1-2j	conglomerado	306.19
LSN-66b	1114894.64	1257649.26	1473.00	J1-2j	conglomerado	306.19
LSN-66c	1114894.64	1257649.26	1473.00	J1-2j	conglomerado	306.19
LSN-66d	1114894.64	1257649.26	1473.00	J1-2j	conglomerado	306.19
LSN-66e	1114894.64	1257649.26	1473.00	J1-2j	arenisca	306.19
LSN-66f	1114894.64	1257649.26	1473.00	J1-2j	arenisca	306.19
LSN-66g	1114894.64	1257649.26	1473.00	J1-2j	arenisca	306.19
LSN-67a	1115472.04	1256693.16	1627.00	K1ls-ms	arenisca	7.54
LSN-67b	1115472.04	1256693.16	1627.00	K1ls-ms	arenisca	7.54
LSN-67c	1115472.04	1256693.16	1627.00	K1ls-ms	arenisca	7.54
LSN-68	1115676.69	1256695.71	1606.00	K1ls-ms	arenisca	75.44
LSN-69	1114457.42	1258216.39	1408.00	J1-2j	lodolita	291.58
LSN-70a	1114579.66	1258103.27	1423.00	Oss	esquisto	176.50
LSN-70b	1114579.66	1258103.27	1423.00	Oss	esquisto	176.50
LSN-70c	1114579.66	1258103.27	1423.00	Oss	esquisto	176.50
LSN-71a	1115777.95	1247868.71	1742.00	K1ls-ms	arenisca	198.60
LSN-71b	1115777.95	1247868.71	1742.00	K1ls-ms	arenisca	198.60
LSN-71c	1115777.95	1247868.71	1742.00	K1ls-ms	arenisca	198.60
LSN-72a	1116020.61	1247773.73	1668.00	K1ls-ms	arenisca	192.49
LSN-72b	1116020.61	1247773.73	1668.00	K1ls-ms	arenisca	192.49
LSN-72c	1116020.61	1247773.73	1668.00	K1ls-ms	arenisca	192.49
LSN-73a	1115927.18	1247779.67	1646.00	K1ls-ms	arenisca	166.49
LSN-73b	1115927.18	1247779.67	1646.00	K1ls-ms	arenisca	166.49
LSN-74a	1116182.80	1247181.34	1514.00	Oss	esquisto	306.90
LSN-74b	1116182.80	1247181.34	1514.00	Oss	esquisto	306.90
LSN-74c	1116182.80	1247181.34	1514.00	Oss	esquisto	306.90
LSN-75	1116387.99	1246897.45	1473.00	Oss	esquisto	448.40
LSN-76a	1116045.79	1246468.65	1375.00	Oss	metaarenisca	990.86
LSN-76b	1116045.79	1246468.65	1375.00	Oss	metaarenisca	990.86
LSN-77	1115103.65	1245400.08	1291.00	Oss	metaarenisca	1168.62
LSN-78	1114665.18	1244528.87	1278.00	Oss	esquisto	203.92
LSN-79a	1109981.05	1243022.06	1654.00	K1ls-ms	arenisca	448.98
LSN-79b	1109981.05	1243022.06	1654.00	K1ls-ms	arenisca	448.98
LSN-79c	1109981.05	1243022.06	1654.00	K1ls-ms	arenisca	448.98
LSN-80a	1109897.30	1242710.40	1585.00	K1ls-ms	arenisca	231.90
LSN-80b	1109897.30	1242710.40	1585.00	K1ls-ms	arenisca	231.90
LSN-81a	1110563.08	1242647.83	1465.00	K1ls-mm	lodolita	31.50
LSN-81b	1110563.08	1242647.83	1465.00	K1ls-mm	lodolita	31.50
LSN-82a	1110261.72	1242293.57	1384.00	J1-2j	lodolita	174.44

Continúa en la siguiente página

Tabla 14 – continuación Tabla localización plugs.

Plug	X	Y	Z	Unidad	Litología	Distancia Falla [m]
LSN-82b	1110261.72	1242293.57	1384.00	J1-2j	lodolita	174.44
LSN-82c	1110261.72	1242293.57	1384.00	J1-2j	lodolita	174.44
LSN-83	1110161.60	1242708.93	1566.00	K1ls-mm	lodolita	247.51
LSN-84a	1107720.17	1249552.50	1529.00	K1ls-mi	arenisca	96.72
LSN-84b	1107720.17	1249552.50	1529.00	K1ls-mi	arenisca	96.72
LSN-84c	1107720.17	1249552.50	1529.00	K1ls-mi	arenisca	96.72
LSN-85a	1108322.53	1249803.67	1350.00	J1-2j	lodolita	315.15
LSN-85b	1108322.53	1249803.67	1350.00	J1-2j	lodolita	315.15
LSN-85c	1108322.53	1249803.67	1350.00	J1-2j	lodolita	315.15
LSN-86a	1108248.87	1250451.41	1189.00	J1-2j	lodolita	18.42
LSN-86b	1108248.87	1250451.41	1189.00	J1-2j	lodolita	18.42
LSN-87	1109094.27	1250636.58	1370.00	J1-2j	arenisca	802.70
LSN-88a	1109200.50	1251136.20	1331.00	J1-2j	arenisca	648.62
LSN-88b	1109200.50	1251136.20	1331.00	J1-2j	arenisca	648.62
LSN-89a	1108203.75	1251294.22	1146.00	J1-2j	lodolita	59.46
LSN-89b	1108203.75	1251294.22	1146.00	J1-2j	lodolita	59.46
LSN-90a	1105942.74	1253787.80	1088.00	J1-2j	lodolita	836.02
LSN-90b	1105942.74	1253787.80	1088.00	J1-2j	lodolita	836.02
LSN-91a	1107806.92	1252954.20	1444.00	K1ls-mi	arenisca	937.65
LSN-91b	1107806.92	1252954.20	1444.00	K1ls-mi	arenisca	937.65
LSN-91c	1107806.92	1252954.20	1444.00	K1ls-mi	arenisca	937.65
LSS-01a	1104424.00	1238243.00	1309.00	K1r	biomicrita	252.62
LSS-01b	1104424.00	1238243.00	1309.00	K1r	biomicrita	252.62
LSS-02	1101869.57	1246232.58	1083.00	K1r	caliza	572.59
LSS-03a	1101531.18	1246087.94	1075.00	K1r	arenisca	436.41
LSS-03b	1101531.18	1246087.94	1075.00	K1r	arenisca	436.41
LSS-04a	1102311.26	1244211.09	1146.00	K1r	arenisca	514.53
LSS-04b	1102311.26	1244211.09	1146.00	K1r	arenisca	514.53
LSS-05	1102620.44	1243795.70	1147.00	K1r	caliza	273.42
LSS-06a	1103010.33	1243469.20	1130.00	K1r	biomicrita	123.73
LSS-06b	1103010.33	1243469.20	1130.00	K1r	biomicrita	123.73
LSS-06c	1103010.33	1243469.20	1130.00	K1r	biomicrita	123.73
LSS-07a	1103331.80	1243580.93	1136.00	K1r	biomicrita	310.50
LSS-07b	1103331.80	1243580.93	1136.00	K1r	biomicrita	310.50
LSS-07c	1103331.80	1243580.93	1136.00	K1r	caliza	310.50
LSS-07d	1103331.80	1243580.93	1136.00	K1r	caliza	310.50
LSS-08a	1106150.25	1240278.30	1305.00	K1r	caliza	240.86
LSS-08b	1106150.25	1240278.30	1305.00	K1r	caliza	240.86
LSS-08c	1106150.25	1240278.30	1305.00	K1r	caliza	240.86
LSS-09a	1106119.08	1240293.09	1288.00	K1r	caliza	263.18
LSS-09b	1106119.08	1240293.09	1288.00	K1r	caliza	263.18

Continúa en la siguiente página

Tabla 14 – continuación Tabla localización plugs.

Plug	X	Y	Z	Unidad	Litología	Distancia Falla [m]
LSS-10	1106212.48	1239560.56	1274.00	K1r	arenisca calcarea	0.02
LSS-11	1106732.03	1239074.16	1274.00	K1r	lodo calcareo	50.76
LSS-12	1105455.21	1242654.81	1200.00	K1ls-ms	arenisca	188.95
LSS-13	1105454.20	1242659.38	1200.00	K1ls-ms	arenisca	187.52
LSS-14	1105609.13	1242455.38	1229.00	K1ls-ms	arenisca	364.37
LSS-15a	1105584.28	1242026.85	1200.00	K1ls-ms	arenisca	130.16
LSS-15b	1105584.28	1242026.85	1200.00	K1ls-ms	arenisca	130.16
LSS-16	1106042.32	1241446.25	1227.00	K1ls-ms	arenisca	123.54
LSS-17a	1105631.60	1245853.74	1445.00	K1ls-ms	arenisca	284.93
LSS-17b	1105631.60	1245853.74	1445.00	K1ls-ms	arenisca	284.93
LSS-18a	1105360.96	1246203.34	1363.00	K1ls-ms	arenisca	712.11
LSS-18b	1105360.96	1246203.34	1363.00	K1ls-ms	arenisca	712.11
LSS-19a	1103217.64	1245683.03	1129.00	K1r	caliza	212.75
LSS-19b	1103217.64	1245683.03	1129.00	K1r	caliza	212.75
LSS-20a	1102677.88	1245568.34	1127.00	K1r	biomicrita	0.20
LSS-20b	1102677.88	1245568.34	1127.00	K1r	biomicrita	0.20
LSS-21	1100916.85	1243639.17	1069.00	K1r	biomicrita	129.80
LSS-22	1100292.42	1243696.33	1016.00	K1r	caliza	88.66
LSS-23	1099120.06	1243545.79	897.00	K1p	lodo calcareo	0.25
LSS-24	1098676.62	1243123.62	829.00	K1r	caliza	253.06
LSS-25a	1098421.74	1242837.88	788.00	K1r	biomicrita	172.29
LSS-25b	1098421.74	1242837.88	788.00	K1r	biomicrita	172.29
LSS-26	1102817.86	1242330.66	1173.00	K1r	biomicrita	0.15
LSS-27a	1101844.00	1240416.96	1295.00	K1p	caliza	529.00
LSS-27b	1101844.00	1240416.96	1295.00	K1p	caliza	529.00
LSS-28	1100125.04	1240466.32	1065.00	K1p	lodo calcareo	396.44
LSS-29a	1099992.70	1240364.52	1033.00	K1p	lodo calcareo	351.22
LSS-29b	1099992.70	1240364.52	1033.00	K1p	lodo calcareo	351.22
LSS-30	1100299.52	1240380.12	1083.00	K1p	lodo calcareo	321.97
LSS-31a	1107287.17	1246076.16	1604.00	K1ls-ms	arenisca	32.07
LSS-31b	1107287.17	1246076.16	1604.00	K1ls-ms	arenisca	32.07
LSS-32a	1107365.45	1246252.27	1638.00	K1ls-ms	arenisca	149.64
LSS-32b	1107365.45	1246252.27	1638.00	K1ls-ms	arenisca	149.64
LSS-33a	1108237.92	1238952.98	1355.00	K1r	caliza	258.14
LSS-33b	1108237.92	1238952.98	1355.00	K1r	caliza	258.14
LSS-34a	1108288.95	1239060.92	1376.00	K1r	lodo calcareo	168.08
LSS-34b	1108288.95	1239060.92	1376.00	K1r	lodo calcareo	168.08
LSS-35a	1108746.87	1239054.53	1427.00	K1r	lodo calcareo	400.67
LSS-35b	1108746.87	1239054.53	1427.00	K1r	lodo calcareo	400.67
LSS-36	1109577.65	1241228.24	1588.00	K1ls-ms	arenisca	433.44
LSS-37	1109373.95	1241750.62	1613.00	K1ls-ms	arenisca	0.18

Continúa en la siguiente página

Tabla 14 – continuación Tabla localización plugs.

Plug	X	Y	Z	Unidad	Litología	Distancia Falla [m]
LSS-38	1109408.61	1242475.75	1669.00	K1ls-ms	arenisca	310.11
LSS-39	1108010.09	1243616.04	1667.00	K1ls-ms	arenisca	982.97
LSS-40	1107074.64	1243480.22	1603.00	K1ls-ms	arenisca	1094.58
LSS-41a	1106473.27	1243617.84	1534.00	K1ls-ms	arenisca	809.60
LSS-41b	1106473.27	1243617.84	1534.00	K1ls-ms	arenisca	809.60
LSS-42	1108010.80	1244487.58	1675.00	K1ls-ms	arenisca	369.44
LSS-43a	1108413.14	1244914.45	1650.00	K1ls-ms	arenisca	0.07
LSS-43b	1108413.14	1244914.45	1650.00	K1ls-ms	arenisca	0.07
LSS-44a	1108589.39	1245474.21	1701.00	K1ls-ms	arenisca	478.54
LSS-44b	1108589.39	1245474.21	1701.00	K1ls-ms	arenisca	478.54
LSS-45	1110764.64	1244062.69	1660.00	K1ls-ms	arenisca	338.39
LSS-46	1109410.57	1245488.11	1681.00	K1ls-ms	arenisca	509.99
LSS-47a	1109326.40	1245961.58	1658.00	K1ls-ms	arenisca	247.89
LSS-47b	1109326.40	1245961.58	1658.00	K1ls-ms	arenisca	247.89
LSS-48a	1103845.55	1246352.62	1122.00	K1ls-ms	arenisca	218.33
LSS-48b	1103845.55	1246352.62	1122.00	K1ls-ms	arenisca	218.33
LSS-49	1102828.94	1247249.91	1045.00	K1ls-ms	arenisca	322.07
LSS-50	1100682.97	1245715.33	1062.00	K1r	arenisca	118.09
LSS-51	1104154.90	1241372.42	1234.00	K1r	biomicrita	301.39
LSS-52a	1103015.67	1240579.45	1278.00	K1p	lodo calcareo	842.50
LSS-52b	1103015.67	1240579.45	1278.00	K1p	lodo calcareo	842.50
LSS-53	1101615.45	1241174.80	1272.00	K1t	biomicrita	1118.32
LSS-54	1101022.97	1242413.54	1225.00	K1t	biomicrita	78.43
LSS-55	1098792.84	1242406.13	923.00	K1p	lodo calcareo	52.11
LSS-56a	1099616.07	1240997.17	1127.00	K1p	biomicrita	291.46
LSS-56b	1099616.07	1240997.17	1127.00	K1p	biomicrita	291.46
LSS-57	1100729.20	1240235.66	1115.00	K1p	arenisca calcarea	48.63
LSS-58	1111407.79	1244998.87	1644.00	K1ls-ms	arenisca	714.26
LSS-59a	1106524.97	1244688.60	1610.00	K1ls-ms	arenisca	201.88
LSS-59b	1106524.97	1244688.60	1610.00	K1ls-ms	arenisca	201.88
LSS-60a	1114629.24	1243290.94	1271.00	Oss	esquisto	632.64
LSS-60b	1114629.24	1243290.94	1271.00	Oss	esquisto	632.64
LSS-60c	1114629.24	1243290.94	1271.00	Oss	esquisto	632.64
LSS-60d	1114629.24	1243290.94	1271.00	Oss	esquisto	632.64
LSS-60e	1114629.24	1243290.94	1271.00	Oss	esquisto	632.64
LSS-64a	1105897.39	1239513.62	1312.00	K1r	biomicrita	65.28
LSS-64b	1105897.39	1239513.62	1312.00	K1r	biomicrita	65.28
LSS-65a	1105363.91	1238414.81	1400.00	K1r	caliza	634.09
LSS-65b	1105363.91	1238414.81	1400.00	K1r	caliza	634.09
LSS-65c	1105363.91	1238414.81	1400.00	K1r	caliza	634.09
LSS-66	1114642.59	1243865.40	1246.00	Oss	esquisto	432.72

Continúa en la siguiente página

Tabla 14 – continuación Tabla localización plugs.

Plug	X	Y	Z	Unidad	Litología	Distancia Falla [m]
LSS-66a	1104668.28	1238416.91	1400.00	K1r	caliza	0.35
LSS-66b	1104668.28	1238416.91	1400.00	K1r	caliza	0.35
LSS-67	1114152.38	1244080.74	1422.00	J1-2j	arenisca	266.89
LSS-67a	1102197.82	1238038.33	1212.00	K1ls-ms	arenisca	127.06
LSS-67b	1102197.82	1238038.33	1212.00	K1ls-ms	arenisca	127.06
LSS-67c	1102197.82	1238038.33	1212.00	K1ls-ms	arenisca	127.06
LSS-67d	1102197.82	1238038.33	1212.00	K1r	biomicrita	127.06
LSS-67e	1102197.82	1238038.33	1212.00	K1r	biomicrita	127.06
LSS-67f	1102197.82	1238038.33	1212.00	K1r	biomicrita	127.06
LSS-67g	1102197.82	1238038.33	1212.00	K1r	biomicrita	127.06
LSS-68	1113826.28	1244500.01	1631.00	J1-2j	arenisca	87.10
LSS-68a	1103179.90	1237976.17	1301.00	K1r	biomicrita	180.15
LSS-68b	1103179.90	1237976.17	1301.00	K1r	biomicrita	180.15
LSS-69	1104116.94	1238041.90	1365.00	K1r	biomicrita	237.47
LSS-70a	1104805.25	1239193.39	1368.00	K1r	lodo calcareo	236.57
LSS-70b	1104805.25	1239193.39	1368.00	K1r	lodo calcareo	236.57
LSS-71a	1105311.78	1239752.84	1322.00	K1r	biomicrita	167.72
LSS-71b	1105311.78	1239752.84	1322.00	K1r	biomicrita	167.72
LSS-71c	1105311.78	1239752.84	1322.00	K1r	biomicrita	167.72
LSS-72a	1105211.10	1240503.71	1306.00	K1r	arenisca calcarea	162.54
LSS-72b	1105211.10	1240503.71	1306.00	K1r	arenisca calcarea	162.54
LSS-72c	1105211.10	1240503.71	1306.00	K1r	arenisca calcarea	162.54
LSS-73a	1104332.24	1239836.35	1336.00	K1p	biomicrita	290.07
LSS-73b	1104332.24	1239836.35	1336.00	K1p	biomicrita	290.07
LSS-74a	1104788.97	1240191.17	1288.00	K1r	caliza	265.83
LSS-74b	1104788.97	1240191.17	1288.00	K1r	caliza	265.83
LSS-75a	1104486.53	1241596.10	1279.00	K1r	caliza	697.04
LSS-75b	1104486.53	1241596.10	1279.00	K1r	caliza	697.04
LSS-75c	1104486.53	1241596.10	1279.00	K1r	caliza	697.04
LSS-76a	1102121.95	1240645.11	1318.00	K1t	biomicrita	764.15
LSS-76b	1102121.95	1240645.11	1318.00	K1t	biomicrita	764.15
LSS-76c	1102121.95	1240645.11	1318.00	K1t	biomicrita	764.15
LSS-77a	1101893.72	1240805.04	1318.00	K1t	biomicrita	918.79
LSS-77b	1101893.72	1240805.04	1318.00	K1t	biomicrita	918.79
LSS-77c	1101893.72	1240805.04	1318.00	K1t	biomicrita	918.79
LSS-78a	1101336.42	1242118.74	1258.00	K1t	biomicrita	215.05
LSS-78b	1101336.42	1242118.74	1258.00	K1t	biomicrita	215.05
LSS-78c	1101336.42	1242118.74	1258.00	K1t	biomicrita	215.05
LSS-79a	1100692.75	1242856.87	1191.00	K1t	biomicrita	476.91
LSS-79b	1100692.75	1242856.87	1191.00	K1t	biomicrita	476.91
LSS-80a	1099903.42	1243601.96	1025.00	K1p	caliza	338.92

Continúa en la siguiente página

Tabla 14 – continuación Tabla localización plugs.

Plug	X	Y	Z	Unidad	Litología	Distancia Falla [m]
LSS-80b	1099903.42	1243601.96	1025.00	K1p	caliza	338.92
LSS-80c	1099903.42	1243601.96	1025.00	K1p	caliza	338.92
LSS-80d	1099903.42	1243601.96	1025.00	K1p	caliza	338.92
LSS-81a	1099418.41	1243797.27	982.00	K1r	caliza	361.49
LSS-81b	1099418.41	1243797.27	982.00	K1r	caliza	361.49
LSS-81c	1099418.41	1243797.27	982.00	K1r	caliza	361.49
LSS-82a	1102835.09	1242844.48	1153.00	K1r	caliza	422.39
LSS-82b	1102835.09	1242844.48	1153.00	K1r	caliza	422.39
LSS-83a	1102299.70	1245266.86	1195.00	K1r	arenisca calcarea	360.58
LSS-83b	1102299.70	1245266.86	1195.00	K1r	arenisca calcarea	360.58
LSS-83c	1102299.70	1245266.86	1195.00	K1r	arenisca calcarea	360.58
LSS-84a	1107554.41	1238265.37	1360.00	K1r	biomicrita	528.10
LSS-84b	1107554.41	1238265.37	1360.00	K1r	biomicrita	528.10
LSS-84c	1107554.41	1238265.37	1360.00	K1r	biomicrita	528.10
LSS-85a	1106789.62	1238370.52	1407.00	K1r	arenisca calcarea	383.25
LSS-85b	1106789.62	1238370.52	1407.00	K1r	arenisca calcarea	383.25
LSS-85c	1106789.62	1238370.52	1407.00	K1r	arenisca calcarea	383.25
LSS-85d	1106789.62	1238370.52	1407.00	K1r	arenisca calcarea	383.25
LSS-85e	1106789.62	1238370.52	1407.00	K1r	arenisca calcarea	383.25
LSS-85f	1106789.62	1238370.52	1407.00	K1r	arenisca calcarea	383.25
LSS-86a	1105311.69	1237639.21	1333.00	K1r	biomicrita	429.34
LSS-86b	1105311.69	1237639.21	1333.00	K1r	biomicrita	429.34
LSS-87a	1103949.12	1240990.96	1241.00	K1r	lodo calcareo	110.12
LSS-87b	1103949.12	1240990.96	1241.00	K1r	lodo calcareo	110.12
LSS-87c	1103949.12	1240990.96	1241.00	K1r	lodo calcareo	110.12
LSS-88	1107332.32	1246077.60	1620.00	K1ls-ms	arenisca	0.24
LSS-89	1108494.89	1239088.49	1403.00	K1r	caliza	223.61
LSS-90	1108698.18	1238854.11	1420.00	K1r	caliza	532.88
LSS-91	1106930.84	1243588.70	1621.00	K1ls-ms	arenisca	959.60
LSS-92	1106536.58	1243597.27	1558.00	K1ls-ms	arenisca	852.72
LSS-93	1106546.36	1243635.30	1562.00	K1ls-ms	arenisca	819.92
LSS-94	1108356.00	1239098.18	1376.00	K1r	caliza	150.39
LSS-95	1106649.60	1243545.54	1594.00	K1ls-ms	arenisca	938.18
LSS-96a	1106688.92	1243510.55	1600.00	K1ls-ms	arenisca	982.91
LSS-96b	1106688.92	1243510.55	1600.00	K1ls-ms	arenisca	982.91
LSS-97	1108226.39	1244837.57	1666.00	K1ls-ms	arenisca	201.24
LSS-98	1108252.99	1245057.94	1688.00	K1ls-ms	arenisca	48.40
LSS-99	1109354.30	1245570.42	1702.00	K1ls-ms	arenisca	492.37

Propiedades físicas de las rocas.

Tabla 15

Valores de las propiedades físicas de las rocas medidas en laboratorio realizada por *Ulloque Ardila (sf)* y el autor del actual trabajo de investigación. Agua retenida por el plug [%], Porosidad [%], Densidad [gr/cm³], Resistividad en seco [Ohm·m], Resistividad plug mojado [Ohm·m], Cargabilidad eléctrica en seco [mV/V], Cargabilidad eléctrica plug mojado [mV/V], Velocidad de onda P [m/s], Peak Load [kN], Is₅₀ [MPa], Susceptibilidad magnética en baja frecuencia [SI], Susceptibilidad magnética en alta frecuencia [SI], y Dependencia de la frecuencia magnética [%].

Plug	Agua	Porosidad	Densidad	Rho Dry	Rho Wet	M Dry	M Wet	Vp	Peak Load	Is ₅₀	LF	HF	FD
LSN-01	6.39	10.98	2.66	81106.66	916.49	8.65	22.49	1059.00	1.32	0.41	1.47E-05	2.38E-05	-61.45
LSN-02a	6.07	9.89	2.65	27840.54	816.88	9.65	21.16	1294.00	1.82	0.61	7.52E-06	3.03E-06	59.76
LSN-02b	6.76	7.84	2.61	18728.80	315.44	9.83	14.52	2550.00	0.52	0.33	2.12E-05	3.18E-05	-49.71
LSN-03	4.07	7.24	2.64	1600804.29	497.95	47.46	7.52	3297.00	0.72	0.24	3.39E-06	1.66E-06	50.98
LSN-04	0.68	20.17	2.76	14030.35	662.24	9.74	33.65	2175.00	0.42	0.13	2.14E-05	3.64E-05	-69.97
LSN-05	4.87	7.38	2.65	1773.65	163.71	13.72	13.94	3745.00	4.52	1.36	1.19E-05	8.04E-06	32.71
LSN-06a	2.30	8.64	2.64	514420.48	1354.95	17.02	10.78	2138.00	8.72	2.85	3.76E-06	4.36E-06	-15.79
LSN-06b	2.25	7.24	2.63	424014.55	1708.79	13.07	13.13	1607.00	10.02	3.21	8.17E-06	1.03E-05	-25.97
LSN-06c	1.75	2.49	2.63	13364.01	395.97	6.91	9.08	2476.00	11.62	3.53	5.74E-06	7.90E-06	-37.51
LSN-07a	5.71	6.45	2.68	21361.68	556.40	16.99	13.73	3475.00	0.42	0.18	1.08E-04	9.55E-05	11.97
LSN-07b	5.23	5.10	2.65	10746.13	466.50	11.15	11.69	3443.00	1.52	0.63	4.65E-05	6.49E-05	-39.63
LSN-08a	2.96	1.59	2.55	39274.21	990.86	8.76	5.69	4464.00	3.42	2.14	1.28E-04	1.24E-04	2.64
LSN-08b	2.64	3.73	2.59	185999.77	2371.57	11.75	11.38	2691.00	6.52	2.23	1.14E-04	9.55E-05	15.85
LSN-09a	1.15	1.24	2.59	92732.03	3674.43	8.87	7.49	2764.00	16.52	5.03	2.38E-04	2.65E-04	-11.23
LSN-09b	1.13	1.19	2.59	95388.76	3943.40	11.63	9.15	3280.00	13.52	4.23	2.81E-04	2.99E-04	-6.34
LSN-10a	3.77	8.20	2.68	5955.15	1449.81	3.33	2.79	2969.00	2.82	1.25	1.36E-04	1.35E-04	0.86
LSN-10b	2.17	4.99	2.64	378354.84	1964.42	15.91	2.79	2893.00	2.52	1.58	1.94E-04	1.97E-04	-1.50
LSN-10c	11.10	5.92	2.63	1052003.40	5371.57	28.76	4.73	1823.00	2.02	0.87	1.16E-04	1.11E-04	3.95
LSN-11a	2.71	5.47	2.63	1135279.79	1565.94	31.31	7.57	2330.00	13.02	4.60	5.49E-06	1.05E-05	-91.71
LSN-11b	2.69	3.61	2.61	154014.84	822.71	7.30	6.06	1992.00	8.02	5.01	6.80E-06	4.26E-06	37.37
LSN-11c	2.98	19.67	3.11	513938.96	1760.45	22.33	11.02	1878.00	10.22	3.15	9.51E-07	2.51E-07	73.59
LSN-12a	2.08	1.64	2.80	154.12	205.46	3.63	7.66	999.00	2.52	1.58	4.08E-02	4.10E-02	-0.55
LSN-12b	1.77	1.04	2.80	755.21	235.02	3.25	7.51	5172.00	0.72	0.25	3.60E-02	3.64E-02	-1.19
LSN-13a	2.70	3.62	2.77	3991.85	337.80	13.25	6.26	5191.00	1.92	0.63	1.46E-02	1.44E-02	1.42
LSN-13b	6.24	6.94	2.72	7265.90	205.23	10.41	7.52	1141.00	0.52	0.25	1.97E-04	1.88E-04	4.71
LSN-14	3.10	4.76	2.64	52997.47	875.56	8.16	11.92	1523.00	5.32	1.64	3.88E-05	2.51E-05	35.47
LSN-15	8.63	16.52	2.64	284470.00	423.59	11.86	7.51	1574.00	0.42	0.13	6.58E-06	1.92E-06	70.84
LSN-16	7.83	10.99	2.64	811348.12	336.06	24.81	7.32	2004.00	1.52	0.46	5.32E-06	4.41E-06	17.09
LSN-17a	7.46	11.19	2.64	109009.52	314.29	13.37	17.71	3348.00	2.02	0.82	1.64E-05	3.67E-06	77.60
LSN-17b	8.55	9.12	2.64	35134.75	181.57	10.50	13.03	1707.00	1.42	0.65	3.27E-05	1.56E-05	52.37
LSN-18a	7.59	10.08	2.65	163010.98	329.54	14.65	10.72	2134.00	2.62	0.90	1.11E-05	9.54E-06	13.91
LSN-18b	7.85	8.37	2.60	69197.49	130.83	11.40	6.32	1831.00	2.52	0.57	1.11E-05	6.33E-06	42.89
LSN-19a	2.54	4.23	2.64	114405.27	1061.49	15.72	16.15	3295.00	11.52	3.70	5.58E-06	4.68E-06	16.00
LSN-19b	2.40	2.74	2.61	113779.79	1168.82	15.04	16.68	1823.00	10.72	3.74	4.02E-06	5.12E-06	-27.24
LSN-20	2.48	7.15	2.65	12104.69	487.48	4.60	11.84	1463.00	7.32	2.23	2.25E-06	3.80E-06	-68.99
LSN-21	5.67	10.72	2.64	775607.95	110.44	16.34	2.95	1747.00	3.72	1.13	7.44E-06	1.46E-06	80.41
LSN-22a	4.33	9.58	2.63	645172.88	300.56	5.92	2.71	1798.00	4.32	2.69	2.22E-06	2.25E-06	-1.29

Continúa en la siguiente página

Tabla 15 – continuación Tabla de propiedades físicas de las rocas medidas en laboratorio.

Plug	Agua	Porosidad	Densidad	Rho Dry	Rho Wét	M Dry	M Wét	Vp	Peak Load	Is50	LF	HF	FD
LSN-22b	2.25	10.88	2.61	702955.82	258.12	6.67	2.95	2930.00	3.32	2.07	4.27E-06	2.01E-06	52.95
LSN-22c	10.37	10.74	2.62	1025529.03	797.73	23.02	1.93	2937.00	4.32	1.32	4.23E-06	2.40E-06	43.22
LSN-23	3.42	6.88	2.66	248674.20	1879.81	14.54	13.18	2139.00	7.22	2.24	5.15E-06	7.15E-06	-38.97
LSN-24	11.43	18.96	2.66	481460.77	125.98	16.52	9.05	1880.00	0.22	0.09	1.65E-05	2.87E-06	82.64
LSN-25	2.89	4.27	2.64	146491.07	1122.32	11.56	12.35	3138.00	8.52	2.92	4.52E-06	2.64E-07	94.15
LSN-26a	3.36	6.85	2.61	932321.51	2418.12	29.82	5.56	4209.00	11.72	3.60	3.21E-05	2.62E-05	18.12
LSN-26b	4.46	10.63	2.60	79011.88	685.14	11.77	11.16	2206.00	3.62	2.24	1.71E-05	1.65E-05	3.64
LSN-27	4.75	9.03	2.65	5127.65	174.45	1.85	11.31	3394.00	0.02	0.01	1.45E-05	3.21E-06	77.91
LSN-28	3.66	3.94	2.64	47883.38	499.37	3.62	13.49	2573.00	9.32	2.87	7.57E-06	4.39E-06	42.01
LSN-29	1.43	0.35	2.65	923.23	347.97	1.63	3.51	4159.00	24.52	7.54	4.06E-04	4.08E-04	-0.38
LSN-30	2.41	0.33	2.65	636.82	230.89	1.91	4.45	2779.00	10.22	6.41	3.12E-04	2.77E-04	11.28
LSN-31	0.46	0.25	2.67	928.44	496.63	1.89	3.71	1089.00	17.02	7.63	2.73E-04	2.57E-04	6.00
LSN-32a	4.19	6.48	2.65	87402.75	789.43	10.79	17.57	1294.00	6.12	1.90	3.14E-05	3.96E-05	-26.16
LSN-32b	3.89	3.82	2.59	71522.58	472.80	10.35	9.60	1139.00	4.52	2.81	1.84E-05	2.70E-05	-46.60
LSN-33	1.08	0.42	2.62	740.53	314.09	2.95	4.70	3881.00	15.62	5.79	1.53E-04	1.45E-04	4.90
LSN-34	1.79	4.37	2.65	1799.11	66.02	1.69	5.60	2451.00	7.62	2.33	2.23E-06	1.13E-06	49.44
LSN-35	1.68	2.10	2.61	115.86	80.25	3.39	4.35	2233.00	2.72	1.76	2.52E-04	2.30E-04	8.65
LSN-36	4.86	7.83	2.64	320030.27	1958.78	20.28	12.96	2341.00	4.12	1.24	2.97E-05	3.00E-05	-0.76
LSN-37	4.21	5.97	2.64	536152.90	1653.22	19.27	14.45	1399.00	3.92	2.14	2.01E-05	2.25E-05	-12.11
LSN-38	3.30	5.73	2.64	192614.79	1016.73	15.66	13.15	2787.00	6.92	2.14	4.62E-06	1.16E-06	74.85
LSN-39	2.36	3.67	2.59	44419.84	2295.7	4.81	7.66	4686.00	23.62	9.63	4.26E-06	3.82E-06	10.35
LSN-40	1.01	2.97	2.64	1041042.16	2717.31	28.12	12.91	2588.00	16.42	5.59	1.25E-05	5.23E-06	58.31
LSN-41	6.51	10.54	2.65	277874.26	761.68	14.69	14.63	1046.00	15.32	5.21	2.64E-07	2.02E-07	23.63
LSN-42	7.30	14.50	2.65	361473.23	49.64	18.27	4.45	3034.00	0.92	0.28	2.30E-05	1.76E-05	23.69
LSN-43a	6.41	13.02	2.66	428071.70	2685.50	21.31	18.67	3709.00	1.32	0.42	2.30E-05	1.76E-05	23.69
LSN-43b	6.19	13.26	2.65	498019.13	2540.59	20.69	17.73	3107.00	1.62	0.53	2.21E-05	7.15E-06	67.59
LSN-44a	6.25	9.41	2.64	11310.03	112.70	1.72	2.97	1067.00	3.32	1.21	3.42E-06	5.41E-06	-58.12
LSN-44b	7.09	12.46	2.62	57.67	141.40	9.89	3.61	2827.00	0.92	0.57	5.83E-06	1.03E-05	-76.76
LSN-45	3.04	6.35	2.63	19852.07	544.09	2.98	10.20	1974.00	10.12	3.10	3.27E-06	5.02E-06	-53.35
LSN-46	3.39	5.42	2.61	1077009.00	4270.46	36.59	12.83	4715.00	10.12	3.28	5.29E-05	6.33E-05	-19.57
LSN-47a	3.30	6.17	2.64	234628.57	768.71	12.16	10.02	4010.00	5.12	1.54	5.20E-07	1.35E-07	74.04
LSN-47b	3.68	5.70	2.62	206052.50	891.79	14.26	11.07	3423.00	4.92	1.69	3.83E-06	5.72E-06	-49.52
LSN-47c	3.53	4.84	2.61	175617.26	338.04	12.95	4.72	3499.00	2.62	1.64	1.32E-05	5.34E-06	59.58
LSN-48	2.25	4.19	2.63	115371.92	1694.64	10.47	17.26	2066.00	11.72	3.61	6.89E-06	3.31E-06	51.90
LSN-49a	3.06	5.65	2.27	14123.72	437.16	21.79	5.48	1411.00	0.52	0.33	1.59E-04	1.72E-04	-8.67
LSN-49b	2.75	7.25	2.45	1453.16	121.88	5.66	8.29	939.00	0.02	0.01	1.22E-04	1.09E-04	11.06
LSN-49c	5.63	0.83	2.12	2982.48	415.53	5.58	5.42	1304.00	0.20	0.18	1.02E-04	9.68E-05	5.19
LSN-49d	4.19	1.07	2.11	4467.93	944.58	4.70	6.05	957.00	0.10	0.10	1.21E-04	1.09E-04	10.35
LSN-49e	3.66	1.17	2.18	1626.49	507.60	5.39	5.34	735.00	0.10	0.16	1.11E-04	8.88E-05	20.04
LSN-49f	6.74	0.94	2.33	1520.16	447.18	4.62	5.95	797.00	0.10	0.15	1.68E-04	1.56E-04	7.14
LSN-50a	8.11	10.76	2.64	17529.51	121.16	5.96	8.35	2838.00	0.62	0.39	4.31E-05	5.77E-05	-33.87
LSN-50b	5.53	9.81	2.65	42538.67	138.47	12.43	8.77	2745.00	0.92	0.37	2.77E-05	3.23E-05	-16.71
LSN-50c	5.21	5.43	2.67	68616.08	906.56	17.67	20.10	1061.00	3.72	1.16	5.48E-05	5.04E-05	7.95
LSN-51	7.17	15.23	2.65	671695.67	87.45	12.38	3.06	1113.00	2.02	0.62	3.89E-06	2.47E-06	36.62
LSN-52a	3.29	5.90	2.65	161706.46	1376.49	9.01	16.81	2443.00	8.62	2.61	4.18E-06	1.13E-06	72.85
LSN-52b	3.03	4.65	2.65	617052.13	2235.58	17.23	18.60	2591.00	9.82	3.22	4.22E-06	1.60E-06	62.20

Continúa en la siguiente página

Tabla 15 – continuación Tabla de propiedades físicas de las rocas medidas en laboratorio.

Plug	Agua	Porosidad	Densidad	Rho Dry	Rho Wet	M Dry	M Wet	Vp	Peak Load	Is50	LF	HF	FD
LSN-53	6.16	11.04	2.65	1782697.05	880.79	49.55	13.84	1571.00	2.42	0.74	3.58E-06	6.69E-06	-86.89
LSN-54a	6.13	25.21	2.61	28921.27	100.42	6.06	6.77	2560.00	1.32	0.82	7.29E-06	5.33E-07	92.69
LSN-54b	6.87	9.25	2.64	85990.64	264.56	8.54	10.13	1935.00	2.72	0.94	4.64E-06	1.09E-06	76.59
LSN-55	6.07	13.53	2.64	4680623.90	186.63	185.44	2.54	2424.00	2.22	0.67	2.38E-06	1.90E-06	20.03
LSN-56	4.95	1.41	2.46	6454.13	501.37	4.27	9.56	3279.00	1.10	1.22	2.22E-05	3.63E-06	83.66
LSN-57	5.09	3.66	2.47	2807.57	303.11	3.60	7.68	4656.00	0.30	0.35	5.62E-05	4.83E-05	14.08
LSN-58a	4.14	17.16	3.07	12000.69	624.07	5.48	13.09	3556.00	2.20	2.49	3.66E-05	1.26E-05	65.62
LSN-58b	2.92	19.27	3.06	19741.49	828.74	5.08	12.95	3472.00	2.40	2.73	1.64E-05	2.28E-05	-39.00
LSN-58c	3.58	19.77	3.03	9250.34	698.90	4.22	13.76	3586.00	2.02	2.28	3.27E-05	1.60E-05	50.87
LSN-59a	5.63	2.45	2.52	13144.13	1265.88	4.36	13.11	3681.00	1.72	1.99	3.89E-05	2.70E-05	30.60
LSN-59b	6.35	2.53	2.36	12213.72	624.16	4.73	9.33	2322.00	1.32	1.51	1.98E-05	1.69E-05	14.59
LSN-59c	5.97	1.74	2.41	13268.77	986.48	4.69	12.71	3422.00	1.22	1.39	2.62E-05	2.37E-05	9.57
LSN-59d	4.01	0.56	2.49	13955.82	1697.27	4.62	8.90	4070.00	1.12	1.26	3.96E-05	2.52E-05	36.22
LSN-59e	0.46	3.51	2.76	10495.07	1495.01	4.27	9.19	2157.00	1.62	1.84	3.44E-05	3.80E-05	-10.64
LSN-59f	4.48	1.22	2.35	14730.87	1568.53	4.49	12.99	1839.00	0.62	0.70	3.40E-05	1.80E-05	47.03
LSN-59g	4.56	2.14	2.36	19993.77	1959.83	4.92	12.74	1562.00	0.42	0.48	3.10E-05	1.88E-05	39.48
LSN-60a	5.91	0.30	2.67	22091.67	3148.81	10.21	3.85	3971.00	4.32	4.97	1.96E-04	1.75E-04	10.85
LSN-60b	0.81	0.42	2.66	25876.35	1274.58	7.50	3.08	3215.00	2.72	3.13	2.11E-04	1.97E-04	6.49
LSN-60c	3.04	0.49	2.52	23353.76	1960.80	7.71	3.38	4035.00	3.92	4.48	1.81E-04	1.55E-04	14.53
LSN-60d	1.60	0.17	2.54	3761.79	474.62	8.43	11.92	2809.00	5.72	6.54	8.36E-05	7.87E-05	5.91
LSN-60e	1.50	0.61	2.49	1664.79	154.27	3.31	9.20	761.00	6.82	7.79	4.16E-05	3.15E-05	24.36
LSN-60f	3.00	1.73	2.43	14814.28	574.72	4.49	7.23	766.00	7.32	8.31	3.38E-05	3.18E-05	5.73
LSN-60g	2.83	2.54	2.33	11090.69	329.80	4.04	8.04	1220.00	6.52	7.41	2.68E-05	1.77E-05	33.77
LSN-61a	1.06	0.13	2.57	252218.28	3330.29	18.84	3.07	4025.00	3.82	4.39	4.24E-06	4.30E-06	-1.27
LSN-61b	1.64	0.50	2.46	167560.81	2650.01	18.90	6.19	1373.00	3.72	4.23	2.20E-06	1.28E-06	41.64
LSN-62	3.71	3.67	2.24	2369.20	604.94	2.37	7.69	972.00	2.82	3.18	8.84E-06	1.95E-06	77.99
LSN-63a	4.97	1.93	2.41	44516.634	593.645	11.184	11.802	2563.00	0.22	0.25	5.44E-05	4.17E-05	23.34
LSN-63b	4.26	1.05	2.46	13600.94	522.33	9.80	14.06	903.00	0.92	1.05	7.43E-05	4.42E-05	40.57
LSN-64a	3.61	0.84	2.43	86595.05	5689.19	16.82	10.17	2234.00	2.32	3.20	5.54E-04	5.63E-04	-1.48
LSN-64b	4.28	0.18	2.45	170511.04	2293.75	30.47	7.27	1661.00	1.32	2.06	5.43E-04	5.45E-04	-0.42
LSN-65a	1.89	0.40	2.56	4273.88	468.07	3.07	7.40	2574.00	4.62	5.25	6.36E-06	8.98E-06	-41.06
LSN-65b	2.21	0.35	2.54	3106.31	354.62	2.91	7.77	2694.00	6.52	7.41	6.08E-06	1.27E-06	79.10
LSN-65c	2.41	4.50	2.42	8352.80	810.47	4.35	10.85	1023.00	5.92	6.68	4.90E-05	1.63E-05	66.84
LSN-65d	2.05	0.67	2.40	8976.50	742.39	5.89	11.56	2423.00	7.02	7.97	6.92E-05	4.71E-05	31.91
LSN-66a	4.80	7.46	2.55	2314.70	408.88	6.02	14.03	3678.00	1.52	1.73	5.68E-05	6.02E-05	-6.02
LSN-66b	5.20	5.02	2.47	2248.94	417.68	3.80	13.26	3524.00	1.12	1.26	4.42E-05	3.44E-05	22.07
LSN-66c	4.51	0.83	2.38	2259.95	372.15	3.59	12.72	2087.00	1.72	1.94	4.24E-05	3.81E-05	10.11
LSN-66d	4.46	0.47	2.21	3171.22	416.06	7.67	14.81	1017.00	1.32	1.49	4.68E-05	3.08E-05	34.21
LSN-66e	3.47	0.61	2.46	8860.93	1017.05	8.54	20.48	2154.00	1.12	1.26	1.52E-05	5.21E-06	65.77
LSN-66f	2.55	0.44	2.46	13047.73	999.41	8.69	20.52	1320.00	4.32	4.91	1.16E-05	1.37E-05	-18.00
LSN-66g	3.07	0.38	2.40	12630.13	984.27	7.59	21.01	2497.00	4.02	4.57	8.82E-06	9.72E-06	-10.13
LSN-67a	4.49	5.01	2.56	31905.37	612.63	12.75	18.16	2040.00	2.92	3.30	2.24E-05	3.33E-06	85.13
LSN-67b	4.05	6.38	2.62	131587.50	941.14	13.78	15.30	2070.00	3.62	4.11	1.38E-05	9.12E-06	33.83
LSN-67c	4.46	4.76	2.57	109526.66	1137.20	12.95	19.50	1763.00	3.82	4.34	1.12E-05	3.70E-06	67.11
LSN-68	3.78	3.25	2.44	2291.54	198.75	6.14	15.05	3106.00	2.52	2.81	2.98E-05	1.93E-05	35.28
LSN-69	1.85	0.51	2.46	125.59	81.15	4.76	6.35	953.00	0.72	0.81	2.93E-04	2.49E-04	14.83

Continúa en la siguiente página

Tabla 15 – continuación Tabla de propiedades físicas de las rocas medidas en laboratorio.

Plug	Agua	Porosidad	Densidad	Rho Dry	Rho Wet	M Dry	M Wet	Vp	Peak Load	Is50	LF	HF	FD
LSN-70a	2.30	2.79	2.67	2258.81	749.67	7.62	9.31	3682.00	0.62	0.70	3.28E-04	3.01E-04	8.09
LSN-70b	3.68	3.65	2.63	4557.40	1138.99	7.95	8.22	1851.00	1.12	1.26	2.20E-04	1.92E-04	12.65
LSN-70c	2.98	0.86	2.59	1668.48	523.47	4.24	8.00	794.00	1.32	1.50	3.01E-04	2.90E-04	3.75
LSN-71a	5.65	4.19	2.56	14011.37	730.83	3.60	16.79	3248.00	2.12	2.39	3.11E-05	4.26E-06	86.34
LSN-71b	5.16	0.94	2.40	10548.54	746.41	3.11	17.88	3357.00	1.62	1.82	2.18E-05	1.81E-05	16.95
LSN-71c	5.91	0.54	2.39	8056.40	560.62	2.47	16.48	3409.00	2.02	2.28	2.12E-05	3.22E-05	-51.99
LSN-72a	6.64	3.11	2.44	13758.46	699.60	13.49	21.84	1895.00	1.12	1.27	4.82E-05	3.43E-05	28.72
LSN-72b	6.22	0.90	2.48	13089.56	772.99	7.69	16.78	1970.00	0.92	1.04	4.13E-05	5.73E-05	-38.87
LSN-72c	6.43	1.51	2.44	14477.22	968.46	6.09	17.63	2543.00	0.82	1.15	6.45E-05	7.56E-05	-17.27
LSN-73a	2.45	3.62	2.50	331433.54	2291.39	16.06	11.64	2818.00	5.22	5.93	9.48E-07	2.12E-07	77.66
LSN-73b	1.82	1.01	2.50	327736.91	2121.51	14.44	11.48	4472.00	6.42	7.29	1.56E-06	1.26E-06	19.49
LSN-74a	2.90	0.12	2.50	1941338.80	8715.64	89.94	6.83	3148.00	1.02	1.15	1.21E-02	1.21E-02	-0.01
LSN-74b	3.26	0.30	2.55	2793018.58	13291.98	88.65	3.77	2044.00	2.22	4.40	1.59E-02	1.61E-02	-1.33
LSN-74c	2.94	0.26	2.59	2000987.18	4803.06	52.44	2.90	1332.00	1.72	1.94	1.07E-02	1.08E-02	-1.11
LSN-75	5.15	0.00	2.56	4299.98	714.22	4.56	10.11	754.00	0.72	0.82	5.92E-03	5.79E-03	2.29
LSN-76a	3.41	1.14	3.36	1628.78	571.49	3.78	8.02	2798.00	0.62	0.70	2.14E-04	2.01E-04	6.00
LSN-76b	2.21	6.06	2.05	1248.44	461.01	3.78	7.47	3051.00	2.92	2.84	2.30E-04	2.18E-04	5.23
LSN-77	2.77	6.29	2.61	3640.05	703.74	2.55	8.40	974.00	0.42	0.47	5.37E-05	4.84E-05	9.86
LSN-78	2.23	0.50	2.72	5931.98	1422.75	8.93	8.46	5926.00	0.72	0.82	8.24E-04	8.60E-04	-4.34
LSN-79a	8.56	1.25	2.24	18192.84	927.60	8.63	10.16	1756.00	0.32	0.37	4.40E-06	3.87E-06	12.06
LSN-79b	1.86	0.15	2.51	17297.90	1048.45	10.29	12.92	3025.00	5.62	6.31	2.35E-05	2.95E-05	-25.87
LSN-79c	2.43	0.64	2.54	15469.94	1115.15	8.83	13.24	4184.00	6.22	7.02	2.24E-05	2.04E-05	9.13
LSN-80a	3.90	0.11	2.51	109195.23	737.38	12.38	11.96	4061.00	0.62	0.71	6.50E-06	1.69E-06	73.98
LSN-80b	3.48	0.07	2.55	144211.46	1338.67	11.88	14.75	2114.00	2.62	2.99	1.05E-05	1.85E-05	-75.69
LSN-81a	12.55	0.00	2.10	88.20	43.57	4.62	8.01	1872.00	0.02	0.02	1.72E-04	1.70E-04	1.30
LSN-81b	8.24	0.00	2.03	69.02	60.50	4.55	5.71	884.00	0.12	0.18	2.08E-04	2.03E-04	2.36
LSN-82a	1.55	0.00	2.57	739.10	329.82	3.13	5.24	3681.00	5.22	5.93	2.65E-04	2.42E-04	8.79
LSN-82b	1.52	0.00	2.47	614.10	340.78	3.40	4.92	2009.00	0.22	0.25	2.67E-04	2.63E-04	1.62
LSN-82c	1.46	0.10	2.52	630.92	327.60	3.16	5.16	2785.00	12.72	10.07	2.72E-04	2.41E-04	11.06
LSN-83	12.58	1.00	2.32	2019.47	255.28	3.91	9.89	784.00	0.22	0.32	9.16E-05	9.26E-05	-1.05
LSN-84a	1.52	8.21	2.57	11480.29	1058.65	5.64	12.57	1240.00	1.12	1.26	1.82E-05	1.01E-05	44.47
LSN-84b	1.70	8.10	2.46	9172.44	1042.13	4.21	10.89	1534.00	0.42	0.48	2.24E-05	3.20E-06	85.73
LSN-84c	1.60	6.73	2.45	8778.11	457.14	9.34	13.26	975.00	0.42	0.60	5.28E-05	8.99E-05	-70.23
LSN-85a	5.43	0.30	1.79	23.55	46.36	6.63	9.12	863.00	0.02	0.03	2.22E-04	1.97E-04	11.07
LSN-85b	5.57	1.23	1.87	21.05	125.88	7.38	10.93	756.00	0.02	0.02	2.28E-04	2.18E-04	4.59
LSN-85c	8.63	0.50	1.77	168.18	96.69	3.61	10.31	967.00	0.02	0.03	2.03E-04	1.95E-04	4.21
LSN-86a	1.74	0.00	2.52	738.05	365.48	3.20	5.53	767.00	6.62	7.52	1.14E-04	1.10E-04	2.81
LSN-86b	1.53	1.45	2.58	626.30	280.55	4.85	5.15	3280.00	6.72	7.63	1.26E-04	1.29E-04	-2.39
LSN-87	6.33	1.69	2.40	117.14	66.80	4.25	5.36	1031.00	1.12	1.28	3.05E-04	2.98E-04	2.30
LSN-88a	9.30	5.86	2.46	336.93	128.44	3.05	10.38	1746.00	2.02	2.32	2.42E-04	2.39E-04	1.52
LSN-88b	9.85	3.25	2.34	478.11	140.46	2.94	10.50	1610.00	1.52	1.74	2.24E-04	2.22E-04	0.97
LSN-89a	3.58	4.29	2.58	482.02	90.99	5.65	9.09	3065.00	9.22	10.41	1.16E-04	1.18E-04	-1.72
LSN-89b	4.42	2.87	2.53	853.68	110.01	6.48	10.30	3021.00	2.82	3.18	9.13E-05	8.73E-05	4.35
LSN-90a	1.05	0.00	2.60	373.56	179.40	2.91	4.19	4516.00	6.62	7.47	2.07E-04	2.11E-04	-1.95
LSN-90b	1.22	0.10	2.54	354.82	187.31	3.27	4.63	4451.00	5.12	5.75	2.35E-04	2.28E-04	3.20
LSN-91a	3.09	3.64	2.59	24931.49	1653.50	23.46	21.74	1386.00	2.02	2.34	3.30E-06	4.68E-06	-41.90

Continúa en la siguiente página

Tabla 15 – continuación Tabla de propiedades físicas de las rocas medidas en laboratorio.

Plug	Agua	Porosidad	Densidad	Rho Dry	Rho Wet	M Dry	M Wet	Vp	Peak Load	Is50	LF	HF	FD
LSN-91b	3.13	2.34	2.58	42997.456	2859.678	5.912	18.049	2159.00	3.02	3.409561236	5.45E-07	5.46E-07	-0.13
LSN-91c	2.66	2.01	2.56	135556.98	2997.76	9.65	16.01	2193.00	4.12	4.65	2.83E-06	1.16E-06	59.07
LSS-01a	0.55	1.37	2.64	11010.60	8444.46	4.01	5.23	3955.00	3.72	2.78	1.83E-04	1.61E-04	11.73
LSS-01b	0.33	2.45	2.69	10145.14	9444.46	2.74	5.84	1427.00	5.32	4.33	1.03E-04	9.35E-05	9.42
LSS-02	19.87	21.76	2.54	35752.28	189.73	11.37	6.52	2147.00	1.82	1.37	1.26E-05	9.97E-06	20.87
LSS-03a	5.07	9.03	2.66	818754.45	3634.26	27.38	5.78	861.00	8.12	4.06	1.81E-04	1.56E-04	13.73
LSS-03b	5.38	11.62	2.65	1395098.84	5522.10	67.07	6.79	1934.00	7.22	2.57	6.73E-05	8.82E-05	-30.90
LSS-04a	7.78	15.06	2.67	612851.28	550.71	17.13	4.94	2816.00	4.92	2.84	7.06E-05	6.85E-05	3.03
LSS-04b	8.86	13.40	2.76	589378.17	411.71	18.65	3.07	1091.00	2.22	1.79	3.35E-04	3.24E-04	3.23
LSS-05	0.44	0.46	2.66	2631.56	1409.05	2.69	6.66	5007.00	12.92	4.90	5.85E-05	6.90E-05	-18.00
LSS-06a	0.58	1.11	2.60	972.64	529.38	1.67	2.50	2923.00	10.82	5.66	4.06E-05	3.12E-05	23.25
LSS-06b	1.20	0.74	2.60	516.59	302.35	2.75	4.36	3440.00	7.72	3.92	5.84E-05	6.13E-05	-4.95
LSS-06c	2.63	3.02	2.61	433.39	143.92	2.06	4.12	1315.00	1.12	0.90	7.45E-05	7.92E-05	-6.20
LSS-07a	0.65	0.19	2.68	37768.18	13122.12	8.46	8.14	2817.00	8.02	3.62	4.54E-04	4.57E-04	-0.63
LSS-07b	0.43	0.48	2.67	40224.75	12113.09	7.89	7.80	3562.00	5.92	2.95	4.59E-04	4.36E-04	5.04
LSS-07c	0.13	2.26	2.70	86769.46	37015.69	3.23	3.65	4857.00	4.02	3.23	2.54E-04	2.35E-04	7.34
LSS-07d	0.12	5.00	2.72	87222.62	18133.93	7.61	5.13	5076.00	3.72	2.99	3.27E-04	3.10E-04	5.26
LSS-08a	0.08	2.67	2.71	38115.28	25584.99	29.27	27.21	2821.00	7.22	3.61	1.39E-04	1.20E-04	13.94
LSS-08b	0.55	8.50	2.70	14239.50	11194.38	2.14	2.68	4539.00	4.12	3.32	2.06E-04	1.92E-04	6.64
LSS-08c	0.35	2.51	2.69	19186.70	17060.83	3.72	2.15	4012.00	6.42	2.30	2.07E-04	1.97E-04	4.92
LSS-09a	0.36	0.12	2.69	19272.17	6645.53	3.90	4.79	4944.00	11.12	5.91	1.26E-04	1.24E-04	1.95
LSS-09b	0.27	4.19	2.66	15186.70	13060.83	3.27	3.52	4798.00	6.32	5.10	9.05E-05	8.93E-05	1.31
LSS-10	1.01	1.88	2.63	16412.50	1069.68	7.31	7.33	2837.00	6.72	2.53	6.17E-05	5.33E-05	13.50
LSS-11	0.56	0.74	2.68	122772.72	17385.51	21.07	5.87	4500.00	4.72	2.32	1.34E-04	1.19E-04	11.16
LSS-12	2.87	2.54	2.57	27794.60	2102.90	3.53	7.54	2831.00	8.62	4.25	5.23E-06	1.29E-06	75.22
LSS-13	3.83	5.26	2.62	55924.18	1351.22	8.09	22.91	3637.00	6.22	2.20	5.00E-06	6.29E-06	-25.67
LSS-14	2.77	4.94	2.61	29712.23	517.25	6.83	8.98	2826.00	6.82	3.58	4.45E-06	5.62E-06	-26.37
LSS-15a	2.92	1.77	2.59	70208.40	1225.67	11.75	15.83	4084.00	12.02	7.01	3.14E-06	4.94E-06	-57.51
LSS-15b	3.64	4.28	2.59	95492.64	610.78	11.19	13.17	4279.00	4.62	2.04	9.57E-06	9.53E-06	0.34
LSS-16	1.86	3.28	2.61	11655.94	561.06	3.30	14.85	3179.00	4.42	2.81	2.32E-06	1.33E-06	42.83
LSS-17a	3.13	5.30	2.61	10938.75	370.96	5.20	7.01	2536.00	5.42	1.88	1.20E-05	2.64E-06	78.06
LSS-17b	3.36	6.10	2.62	14015.64	306.93	4.67	5.61	2313.00	4.22	1.85	1.53E-05	2.04E-05	-32.69
LSS-18a	3.84	5.26	2.63	184555.83	1176.64	12.78	17.48	3960.00	6.22	2.17	1.41E-05	1.35E-06	90.42
LSS-18b	3.60	5.44	2.63	301849.84	993.59	14.31	15.05	1704.00	7.02	2.71	2.74E-05	3.42E-05	-24.83
LSS-19a	26.82	21.04	2.60	39023.52	112.42	9.61	4.41	2959.00	1.52	0.69	9.61E-08	1.88E-08	80.44
LSS-19b	27.77	21.26	2.55	29023.52	92.42	10.03	3.80	2722.00	0.42	0.34	1.21E-05	1.74E-05	-43.63
LSS-20a	0.44	1.31	2.67	3610.81	1810.29	3.40	3.60	845.00	6.22	2.18	2.08E-04	2.00E-04	3.74
LSS-20b	0.46	2.15	2.65	4834.80	3216.30	1.83	2.85	1001.00	6.62	5.39	1.64E-04	1.60E-04	2.74
LSS-21	3.14	4.91	2.62	9449.68	808.19	2.62	7.13	3668.00	3.72	1.27	1.54E-04	1.43E-04	7.30
LSS-22	0.33	1.84	2.68	95645.82	5011.72	5.28	7.83	3459.00	3.22	1.10	3.84E-05	2.70E-05	29.57
LSS-23	5.69	5.98	2.59	2392.20	235.48	4.40	7.77	3473.00	3.62	1.26	8.82E-05	8.44E-05	4.38
LSS-24	0.60	1.15	2.68	9726.46	5401.35	6.12	7.87	3849.00	5.62	1.98	1.88E-04	1.55E-04	17.67
LSS-25a	0.94	0.50	2.61	11429.69	2093.99	8.55	5.07	3321.00	6.12	2.13	1.59E-04	1.24E-04	22.20
LSS-25b	0.80	0.00	2.61	10849.19	2435.21	5.35	4.92	1770.00	6.22	5.04	2.49E-04	2.05E-04	17.93
LSS-26	1.55	1.53	2.68	16935.29	3131.84	5.41	8.84	3708.00	7.22	2.74	7.14E-05	8.91E-05	-24.73
LSS-27a	0.94	1.71	2.64	49059.33	4810.74	3.89	5	4781.00	8.12	3.25	4.95E-05	4.80E-05	2.95

Continúa en la siguiente página

Tabla 15 – continuación Tabla de propiedades físicas de las rocas medidas en laboratorio.

Plug	Agua	Porosidad	Densidad	Rho Dry	Rho Wet	M Dry	M Wet	Vp	Peak Load	Is50	LF	HF	FD
LSS-27b	0.84	3.00	2.66	17911.36	3610.62	2.15	7.24	4824.00	3.92	3.16	4.54E-05	3.61E-05	20.51
LSS-28	4.52	1.56	2.48	8737.69	994.62	5.68	4.80	3241.00	3.12	1.63	7.45E-05	7.42E-05	0.36
LSS-29a	2.40	1.61	2.57	6042.39	295.81	11.46	5.33	3943.00	4.32	1.55	1.05E-04	7.56E-05	28.00
LSS-29b	0.81	1.12	2.63	1342.88	833.29	1.67	2.56	3568.00	3.72	3.02	2.38E-04	2.33E-04	1.98
LSS-30	0.90	1.18	2.68	42893.73	6205.22	9.35	5.36	4513.00	7.02	2.94	1.03E-04	9.07E-05	11.98
LSS-31a	3.99	5.12	2.63	89461.75	713.35	9.61	10.77	1545.00	3.52	1.17	3.42E-07	4.68E-07	-36.96
LSS-31b	3.94	7.45	2.61	281539.34	625.68	12.16	8.35	1597.00	4.32	2.71	2.20E-08	4.35E-08	-97.94
LSS-32a	7.14	13.58	2.62	23412.44	371.85	5.36	17.45	1503.00	0.42	0.14	1.29E-05	1.36E-05	-5.06
LSS-32b	10.50	13.68	2.64	53367.30	545.41	4.42	15.85	1823.00	1.32	0.47	1.08E-05	4.23E-06	60.88
LSS-33a	0.95	0.06	2.64	5382.92	1553.53	13.68	10.49	5294.00	3.52	1.13	2.64E-04	2.45E-04	7.01
LSS-33b	1.71	3.49	2.60	2543.99	473.27	6.95	8.90	4061.00	8.82	3.03	3.92E-04	3.22E-04	17.89
LSS-34a	2.41	1.83	2.78	501.93	141.46	1.73	3.68	3013.00	7.82	2.80	8.31E-05	6.73E-05	19.01
LSS-34b	2.72	2.81	2.58	433.94	126.77	2.52	4.58	3950.00	5.02	3.11	5.12E-05	4.24E-05	17.15
LSS-35a	0.97	0.57	2.64	1771.36	1005.16	2.22	2.83	4769.00	6.82	2.20	3.39E-04	3.18E-04	6.13
LSS-35b	0.63	0.87	2.64	2717.61	952.88	2.41	3.14	4499.00	4.92	3.09	3.34E-04	2.81E-04	15.92
LSS-36	5.65	9.98	2.64	165891.06	543.84	10.96	9.70	2497.00	0.72	0.26	1.12E-05	2.03E-05	-80.66
LSS-37	3.24	16.28	2.64	69611.62	643.84	15.45	8.70	1997.00	0.62	0.21	5.88E-06	1.55E-06	73.57
LSS-38	3.84	8.91	2.62	13111.59	726.31	14.94	4.75	3141.00	12.92	6.04	3.04E-06	2.32E-06	23.56
LSS-39	4.04	5.77	2.63	71051.37	222.22	11.71	7.56	3288.00	6.72	2.36	6.51E-07	4.04E-07	37.91
LSS-40	5.91	7.12	2.64	215718.70	505.80	13.75	11.60	3949.00	4.12	1.30	3.14E-07	5.99E-07	-90.68
LSS-41a	4.10	7.59	2.63	278506.69	1252.46	8.64	13.03	3816.00	3.82	1.24	2.92E-06	1.37E-06	53.07
LSS-41b	3.63	6.81	2.63	132129.75	948.48	5.48	10.36	3755.00	4.82	1.58	4.97E-06	1.16E-06	76.60
LSS-42	2.84	7.26	2.65	4707.74	165.35	2.60	13.70	2624.00	2.32	0.76	1.02E-05	8.11E-06	20.39
LSS-43a	6.71	8.16	2.64	307703.05	719.02	13.35	11.56	1956.00	2.12	0.69	3.62E-06	2.05E-06	43.33
LSS-43b	5.47	7.75	2.58	84271.86	862.70	6.44	9.31	2142.00	3.52	2.22	5.68E-06	1.25E-06	78.06
LSS-44a	3.32	6.94	2.62	1754373.31	1061.59	48.45	9.35	2491.00	6.12	1.96	7.63E-06	9.28E-06	-21.58
LSS-44b	3.72	7.54	2.62	157792.29	288.28	8.85	4.91	1200.00	3.52	2.21	1.63E-06	1.17E-06	28.34
LSS-45	3.94	9.08	2.63	308869.64	1379.77	6.48	3.40	3817.00	12.52	4.04	3.04E-06	5.11E-06	-68.25
LSS-46	3.11	14.86	2.64	8288.11	115.13	4.78	7.47	1575.00	0.22	0.14	5.55E-06	1.31E-06	76.37
LSS-47a	4.12	7.00	2.62	51212.1	590.1	9.53	13.33	3612.00	3.12	1.45	6.95E-06	8.55E-06	-23.07
LSS-47b	3.95	6.56	2.64	187115.72	1364.94	10.63	14.87	3649.00	3.32	1.32	3.52E-06	7.83E-07	77.77
LSS-48a	1.70	7.46	2.63	463241.77	2418.57	18.37	15.53	3210.00	9.42	2.89	6.36E-06	2.18E-06	65.71
LSS-48b	2.20	11.60	2.57	33321.09	1953.93	4.12	11.59	2020.00	4.62	2.86	4.33E-06	6.28E-06	-45.06
LSS-49	5.43	11.99	2.64	1251.52	68.89	5.05	6.21	3389.00	4.72	2.20	5.82E-05	5.26E-05	9.68
LSS-50	4.35	8.69	2.66	2582162.39	1523.14	84.69	5.16	2001.00	7.82	2.38	1.61E-05	1.12E-05	30.74
LSS-51	0.86	0.79	2.66	2067.04	768.62	5.69	10.29	3583.00	11.12	3.43	6.99E-05	9.05E-05	-29.40
LSS-52a	3.67	3.34	2.61	113938.02	800.63	5.91	4.54	4111.00	6.02	1.94	1.02E-04	8.72E-05	14.60
LSS-52b	3.84	2.38	2.57	15257.22	664.40	4.89	4.56	3999.00	2.82	1.75	1.07E-04	9.74E-05	9.31
LSS-53	0.30	0.74	2.68	297345.86	20440.74	10.51	3.33	5348.00	7.62	2.44	2.35E-05	3.54E-05	-50.40
LSS-54	0.76	1.74	2.69	91121.52	5592.77	3.08	13.00	3875.00	9.62	3.98	2.10E-05	5.74E-06	72.67
LSS-55	0.29	1.27	2.00	8060.75	192.48	3.25	3.36	4071.00	5.92	2.59	1.03E-04	8.22E-05	19.90
LSS-56a	8.74	11.70	2.90	45763.08	764.22	10.78	5.43	4711.00	7.02	2.46	4.04E-04	4.13E-04	-2.29
LSS-56b	29.59	10.57	2.81	76532.99	2836.10	10.83	4.51	4908.00	5.02	3.14	2.86E-04	2.91E-04	-1.68
LSS-57	1.49	2.39	2.64	1391.68	275.78	3.47	5.83	2775.00	6.32	2.04	7.55E-05	8.87E-05	-17.47
LSS-58	6.03	8.87	2.65	1034276.27	775.63	31.67	12.72	2197.00	2.22	0.68	3.71E-06	6.42E-06	-73.29
LSS-59a	3.51	5.84	2.64	139472.51	1054.76	8.55	14.61	3774.00	6.92	2.13	9.53E-07	2.19E-07	77.03

Continúa en la siguiente página

Tabla 15 – continuación Tabla de propiedades físicas de las rocas medidas en laboratorio.

Plug	Agua	Porosidad	Densidad	Rho Dry	Rho Wet	M Dry	M Wet	Vp	Peak Load	Is50	LF	HF	FD
LSS-59b	4.14	8.11	2.58	125955.80	593.37	8.13	10.25	1633.00	1.42	0.88	8.84E-07	1.66E-07	81.25
LSS-60a	2.11	4.11	2.74	292.46	50.15	6.38	8.69	2212.00	0.72	0.45	2.10E-04	2.02E-04	4.09
LSS-60b	2.65	6.26	2.75	165.76	219.81	4.10	10.91	1331.00	2.12	1.32	2.37E-04	2.18E-04	7.93
LSS-60c	2.57	3.58	2.70	3944.13	336.52	5.20	12.88	2578.00	0.92	0.38	3.15E-04	3.30E-04	-4.74
LSS-60d	2.84	0.40	2.78	513.27	211.95	5.83	14.60	3705.00	1.42	0.62	3.65E-04	3.64E-04	0.39
LSS-60e	2.04	0.45	2.78	1411.16	170.07	5.33	10.18	4341.00	0.42	0.22	5.26E-04	5.16E-04	1.98
LSS-64a	1.23	3.94	2.65	606.30	267.56	5.15	5.39	5800.00	4.40	4.87	7.32E-05	1.04E-04	-42.58
LSS-64b	1.65	1.32	2.58	585.03	304.85	5.34	5.99	1243.00	4.10	4.62	6.56E-05	7.61E-05	-15.99
LSS-65a	4.89	0.20	2.15	4554.81	281.15	3.30	6.64	5532.00	1.60	0.81	9.66E-06	2.74E-06	71.66
LSS-65b	16.29	0.30	2.28	13630.27	382.64	4.21	6.87	5248.00	3.50	4.08	8.03E-06	5.44E-06	32.23
LSS-65c	17.44	0.80	2.24	42134.36	360.49	5.24	6.58	5309.00	3.00	3.46	8.98E-06	1.60E-05	-78.13
LSS-66	0.99	0.37	2.80	2593.46	814.06	2.82	5.62	2124.00	4.92	1.58	3.16E-04	2.94E-04	6.95
LSS-66a	4.46	4.77	2.47	256244.33	3852.70	17.77	2.91	774.00	5.00	5.55	1.23E-05	1.51E-05	-22.53
LSS-66b	4.53	0.45	2.43	180043.97	3898.44	11.47	2.77	1347.00	4.70	5.32	7.57E-06	3.70E-06	51.16
LSS-67	1.38	1.90	2.63	8950.41	684.46	4.07	13.16	3405.00	15.32	6.20	6.27E-05	5.57E-05	11.19
LSS-67a	2.26	3.37	2.58	5811.39	578.39	3.68	10.44	5406.00	6.00	6.77	2.99E-05	3.18E-06	89.38
LSS-67b	2.44	4.16	2.60	32728.37	3658.44	4.90	7.62	3694.00	5.30	5.97	6.31E-06	9.10E-06	-44.31
LSS-67c	2.41	5.75	2.64	33301.74	5211.36	5.20	7.28	5618.00	2.80	3.16	3.95E-06	2.44E-06	38.19
LSS-67d	2.98	1.00	2.55	15221.25	3151.18	4.24	5.39	4130.00	2.90	3.27	2.10E-04	2.00E-04	4.96
LSS-67e	3.69	0.20	2.50	11877.52	3424.65	3.12	5.73	1645.00	1.30	1.50	1.50E-04	2.15E-04	-43.18
LSS-67f	1.68	0.10	2.56	18350.58	2489.72	3.62	5.38	4212.00	2.60	3.02	2.36E-04	2.11E-04	10.79
LSS-67g	2.15	0.50	2.69	4652.67	1840.47	3.10	5.74	5096.00	3.50	3.97	3.32E-04	3.20E-04	3.55
LSS-68	1.28	10.12	2.86	26583.43	756.03	6.06	15.55	3149.00	15.82	4.81	6.11E-05	6.50E-05	-6.37
LSS-68a	0.49	2.52	2.74	496176.16	7236.97	18.45	2.75	3918.00	4.20	4.77	2.86E-05	3.58E-05	-24.89
LSS-68b	0.82	7.39	2.85	1096692.68	9189.87	44.12	2.89	4811.00	3.10	3.46	2.21E-05	1.15E-06	94.80
LSS-69	0.33	13.14	2.94	582745.72	6217.81	37.30	2.58	1607.00	4.40	4.90	3.14E-05	9.82E-06	68.78
LSS-70a	19.24	1.00	2.49	24075.02	221.22	7.67	9.41	4174.00	1.20	1.34	5.71E-05	1.52E-05	73.44
LSS-70b	16.71	1.35	2.48	17304.37	172.18	14.24	9.62	4233.00	0.70	0.39	5.72E-05	3.84E-05	32.77
LSS-71a	1.25	1.21	2.78	1466.66	605.34	4.04	6.40	4414.00	1.60	1.76	2.55E-04	2.21E-04	13.37
LSS-71b	1.89	2.14	2.76	950.74	352.46	4.49	7.91	3387.00	1.70	1.95	1.94E-04	1.90E-04	2.30
LSS-71c	1.51	3.64	2.76	1470.42	643.17	4.00	8.04	4684.00	4.70	3.01	2.37E-04	2.37E-04	0.05
LSS-72a	4.08	13.47	2.74	103799.47	624.41	8.93	5.04	5191.00	6.70	7.08	1.65E-04	1.34E-04	18.44
LSS-72b	4.00	6.51	2.64	120122.78	702.25	8.58	5.66	3571.00	6.80	5.21	1.30E-04	9.66E-05	25.65
LSS-72c	5.15	9.63	2.59	64666.72	547.31	6.16	6.07	1790.00	4.40	5.02	1.75E-04	1.20E-04	31.27
LSS-73a	2.31	3.81	2.77	85513.88	2318.32	9.53	8.09	1267.00	3.60	4.02	7.89E-05	5.86E-05	25.71
LSS-73b	2.78	5.15	2.76	222953.81	1820.32	17.95	8.81	2059.00	4.30	4.81	9.69E-05	7.20E-05	25.69
LSS-74a	0.53	0.20	2.71	240314.68	6306.36	14.62	3.09	4866.00	4.60	5.22	7.56E-05	6.75E-05	10.71
LSS-74b	0.50	0.10	2.77	75531.34	3264.79	9.95	3.65	5462.00	5.00	5.76	8.03E-05	6.13E-05	23.66
LSS-75a	17.12	7.41	2.24	11314.34	87.68	8.89	5.13	4121.00	1.80	1.99	7.27E-06	7.97E-06	-9.73
LSS-75b	13.28	6.25	2.30	30965.81	319.00	9.38	5.07	5155.00	4.90	5.57	6.35E-06	5.53E-06	12.97
LSS-75c	19.13	1.05	1.96	8144.93	271.06	4.75	4.35	5685.00	0.50	0.50	7.07E-06	4.55E-06	35.65
LSS-76a	2.73	1.38	2.63	78583.73	3250.51	6.76	4.13	4692.00	4.50	5.05	1.12E-04	9.94E-05	10.98
LSS-76b	5.60	8.20	2.66	32514.81	1768.59	7.89	5.11	5393.00	5.00	3.60	1.41E-04	1.24E-04	11.85
LSS-76c	5.76	1.43	2.42	80206.67	2221.70	11.59	5.50	5093.00	4.00	4.05	2.32E-04	2.25E-04	3.11
LSS-77a	0.67	1.28	2.64	1520721.64	3141.68	79.03	2.32	4812.00	3.00	3.38	3.00E-05	1.05E-05	64.86
LSS-77b	0.56	0.20	2.60	863528.61	5646.77	40.10	2.53	5305.00	4.30	4.93	2.28E-05	8.04E-06	64.76

Continúa en la siguiente página

Tabla 15 – continuación Tabla de propiedades físicas de las rocas medidas en laboratorio.

Plug	Agua	Porosidad	Densidad	Rho Dry	Rho Wet	M Dry	M Wet	Vp	Peak Load	Is50	LF	HF	FD
LSS-77c	0.35	0.10	2.58	162796.64	8724.49	15.14	2.93	5181.00	5.10	4.10	1.15E-05	4.02E-06	65.09
LSS-78a	3.53	7.87	2.68	127366.73	3492.62	7.34	10.38	4785.00	2.20	2.42	1.35E-05	1.57E-05	-16.04
LSS-78b	1.71	5.14	2.69	225497.95	2060.40	7.94	6.55	3249.00	2.20	2.45	6.84E-06	2.85E-06	58.34
LSS-78c	2.58	1.24	2.65	82629.29	2807.53	3.77	7.06	5142.00	2.90	2.96	4.23E-06	5.96E-06	-40.97
LSS-79a	3.90	3.11	2.58	2634.70	472.19	2.19	9.99	2004.00	3.30	3.69	4.15E-05	3.74E-05	9.67
LSS-79b	3.04	0.10	2.51	2078.76	293.81	3.21	12.81	5995.00	5.00	3.80	2.15E-05	1.66E-05	22.57
LSS-80a	1.35	0.92	2.61	552936.80	9937.68	21.50	3.10	5904.00	4.40	4.96	8.20E-06	3.07E-06	62.50
LSS-80b	1.72	8.29	2.78	232926.21	3412.66	7.98	3.22	1260.00	3.80	4.28	7.88E-06	1.24E-05	-57.97
LSS-80c	2.79	0.83	2.61	622279.12	6745.08	13.14	3.44	5272.00	3.20	3.69	2.74E-05	1.91E-05	30.29
LSS-80d	0.86	0.30	2.60	266240.46	7511.75	7.97	2.76	5602.00	3.00	3.48	5.03E-06	4.79E-06	4.77
LSS-81a	0.89	0.10	2.58	202529.42	1898.11	7.98	2.61	5393.00	2.90	3.32	7.39E-06	2.76E-06	62.70
LSS-81b	0.27	0.11	2.62	119410.40	3670.72	4.99	2.46	5098.00	3.70	3.79	6.43E-06	1.49E-06	76.77
LSS-81c	0.53	0.12	2.59	181192.62	6363.72	7.36	2.45	5380.00	2.70	3.13	9.27E-06	8.01E-06	13.64
LSS-82a	0.63	0.16	2.71	10459.12	2731.28	4.09	3.65	1194.00	6.40	7.07	1.96E-04	1.80E-04	8.22
LSS-82b	0.55	0.23	2.70	47578.475	3582.258	9.681	3.597	4843.00	9.60	10.78	2.16E-04	1.96E-04	9.36
LSS-83a	10.47	19.59	2.74	148230.65	797.19	20.33	6.41	1372.00	1.50	1.68	2.34E-04	2.14E-04	8.36
LSS-83b	6.26	18.57	2.87	440459.41	2932.24	50.54	8.12	3058.00	5.10	5.68	2.22E-04	1.94E-04	12.51
LSS-83c	1.29	5.47	2.87	292160.36	2956.38	29.04	3.31	4287.00	9.50	9.58	4.78E-04	4.68E-04	2.08
LSS-84a	1.64	1.43	2.69	404.09	175.01	4.51	5.85	1261.00	4.10	4.65	6.83E-05	5.47E-05	19.95
LSS-84b	1.67	0.37	2.66	384.18	169.99	5.54	6.34	1251.00	3.20	3.60	6.08E-05	4.88E-05	19.72
LSS-84c	2.00	0.21	2.50	693.97	353.97	8.16	8.12	5789.00	6.20	6.21	5.80E-05	4.54E-05	21.67
LSS-85a	12.68	9.16	2.38	25642.29	923.63	8.40	8.76	1350.00	1.60	1.68	4.00E-04	3.87E-04	3.29
LSS-85b	16.33	32.93	2.93	110223.91	366.77	21.97	6.35	1454.00	0.50	0.58	4.33E-04	4.04E-04	6.69
LSS-85c	14.46	26.53	2.79	40362.26	458.59	14.88	6.93	5073.00	1.50	1.68	3.82E-04	3.63E-04	4.90
LSS-85d	13.51	19.33	2.65	94643.67	708.15	17.07	6.06	2933.00	1.70	1.91	3.12E-04	2.96E-04	5.12
LSS-85e	16.25	13.41	2.27	5822.74	194.55	7.63	9.27	4723.00	0.70	0.72	3.15E-04	2.73E-04	13.23
LSS-85f	16.54	23.12	2.70	52969.92	867.227	14.147	8.842	1767.00	1.80	1.83	3.96E-04	3.70E-04	6.67
LSS-86a	0.85	0.23	2.73	16660.19	1238.31	4.42	8.25	4745.00	3.00	3.40	3.64E-05	8.91E-06	75.50
LSS-86b	1.96	2.11	2.66	17409.41	1669.84	3.39	6.00	5426.00	2.80	3.17	4.69E-05	2.87E-05	38.85
LSS-87a	8.96	0.35	2.58	311.92	63.53	3.04	5.14	1651.00	1.10	1.27	8.18E-05	5.86E-05	28.42
LSS-87b	7.25	0.50	2.56	149.95	26.88	4.33	6.30	5267.00	1.10	1.22	6.40E-05	4.26E-05	33.39
LSS-87c	9.69	0.44	2.45	195.28	42.61	4.76	6.36	5449.00	1.30	1.33	7.65E-05	6.62E-05	13.51
LSS-88	7.07	5.30	2.45	8155.38	161.24	6.54	9.32	937.73	3.73	1.14	1.90E-06	2.55E-06	-33.96
LSS-89	1.89	0.50	2.63	25852.49	2651.92	9.15	4.55	1767.96	7.01	2.93	1.01E-04	1.00E-04	0.57
LSS-90	0.72	0.32	2.67	2717.19	1584.83	5.63	4.70	2235.81	4.94	3.11	2.26E-04	1.96E-04	13.20
LSS-91	7.43	1.47	2.29	1505.99	69.23	4.65	13.21	1338.21	1.33	0.49	5.29E-06	9.77E-06	-84.54
LSS-92	3.84	1.65	2.46	35356.64	756.65	5.05	8.54	1512.11	7.72	1.85	2.39E-06	1.87E-06	21.68
LSS-93	4.87	0.50	2.43	52216.391	764.32	9.065	12.821	1875.40	2.30	0.74	3.28E-06	2.36E-06	27.91
LSS-94	2.48	0.02	2.56	6223.126	1825.45	11.338	7.695	2034.98	8.82	2.71	7.96E-05	7.26E-05	8.90
LSS-95	5.08	5.20	2.55	188402.00	903.40	9.33	10.29	1796.98	8.12	5.11	3.09E-06	1.42E-06	54.08
LSS-96a	2.99	0.21	2.50	53634.02	1468.61	5.37	14.15	2000.98	4.12	1.23	2.10E-06	1.29E-06	38.44
LSS-96b	3.70	2.51	2.55	68937.50	1223.77	8.39	14.07	1749.03	4.32	1.12	7.27E-06	4.44E-06	38.95
LSS-97	9.15	0.32	2.25	23200.45	619.24	5.62	15.38	1393.58	0.92	0.21	8.31E-06	7.42E-06	10.79
LSS-98	5.10	0.90	2.47	181150.64	658.51	14.23	7.58	1575.38	14.52	5.54	4.44E-06	4.77E-06	-7.46
LSS-99	5.44	0.12	2.27	680500.52	840.55	10.50	3.12	1747.44	2.93	1.41	5.69E-06	1.07E-05	-88.46