



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Geológica

“ESTIMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO,
MEDIANTE MÉTODO DE KRIGING PARA EL MACIZO
ROCOSO DEL CERRO CALLACPUMA - SECTOR
HUAYRAPONGO, 2020”

Tesis para optar el título profesional de:

INGENIERO GEÓLOGO

Autor:

Bach. Alex Fredy Valdivia Donayre

Asesor:

Ing. Daniel Alva Huamán

Cajamarca - Perú

2020

DEDICATORIA

A Dios, quien me brindó salud y resiliencia frente a un 2020 que será recordado como el año de muchos desafíos.

A mi padre Fredy y mi madre Yovanna, quienes son mi principal motivo para poder cumplir mis metas y son quienes siempre están presentes para mí, ante cualquier adversidad.

A mis hermanas Johanna y Karla, quienes siempre me demuestran su afecto y brindan su apoyo incondicional.

Alex Valdivia Donayre

AGRADECIMIENTO

A mis padres, mi profundo agradecimiento por haberme encaminado a convertirme en la persona que soy hoy en día. Muchos de mis logros se los debo a ustedes.

A mis hermanas, por sus palabras de apoyo y respaldo en cada objetivo mío trazado.

A mi alma mater, mis docentes, mis colegas, mi total agradecimiento por compartir conmigo la vida universitaria.

A mi asesor y amigo ing. Daniel Alva, por su tiempo y dedicación en esta investigación.

“La gratitud es la memoria del corazón” L. T.

Alex Valdivia Donayre

Tabla de contenidos

DEDICATORIA.....	2
AGRADECIMIENTO.....	3
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS	7
RESUMEN.....	9
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	10
1.1. Realidad problemática.....	10
1.2. Formulación del problema.....	13
1.3. Objetivos	13
1.3.1. Objetivo general.....	13
1.3.2. Objetivos específicos	13
1.4. Hipótesis.....	13
1.4.1. Hipótesis general.....	13
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	14
2.1. Tipo de investigación.....	14
2.2. Población y muestra (Materiales y métodos)	14
2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos	15
2.4. Procedimiento	16
2.5. Aspectos generales.....	26
2.6. Geología local	29
CAPÍTULO III. RESULTADOS	31
3.1. Geología estructural.....	31
3.2. Caracterización granulométrica	34
3.3. Caracterización de pendientes	35
3.4. Registro de estimación	38
3.5. Análisis geoestadístico	46
3.5.1. Análisis exploratorio de datos.....	52
3.5.2. Análisis de correlación bivariar y multivariar	59
3.5.3. Variografía	66
3.5.3.1. Comportamiento estructural y definición del modelo del variograma teórico	82
3.5.3.2. Predicción mediante Kriging de los parámetros geomecánicos	88
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	97
REFERENCIAS.....	102
ANEXOS.....	104
ANEXO N°1. Pendientes promedio en la zona de estudio.....	104
ANEXO N°2. Viviendas cercanas a las laderas del cerro Callacpuma.	105
ANEXO N°3. Desprendimiento de roca	106

ANEXO N°4. Presencia de turistas en el cerro Callacpuma.....	107
ANEXO N°5. Coordenadas de las estaciones geomecánicas.	108
ANEXO N°6 Plano geológico de la zona de estudio.....	110
ANEXO N°7 Rumbos y buzamientos de los estratos.....	111
ANEXO N°8 Probabilidad de precipitación.....	113
ANEXO N°9 Vegetación en la zona de estudio.....	114
ANEXO N°10 Estación geomecánica N° 7.....	115
ANEXO N°11. Validación cruzada RCU	116
ANEXO N°12. Validación cruzada JRC	118
ANEXO N°13. Validación cruzada RQD Lineal	120
ANEXO N°14. Validación cruzada de Espaciado de las discontinuidades	122

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Valores típicos del peso específico y porosidad de las rocas.....	17
Tabla 2 Estimación en terreno de la resistencia en compresión uniaxial.....	20
Tabla 3 Correlación del JRC	22
Tabla 4 Clasificación de la calidad del macizo rocoso según RQD	24
Tabla 5 Descripción del espaciado	25
Tabla 6 Coordenadas UTM WGS84 del área de estudio.....	27
Tabla 7 Accesibilidad al área de estudio	28
Tabla 8 Valores RCU de cada estación geomecánica.....	38
Tabla 9 Valores JRC de cada estación geomecánica	40
Tabla 10 Valores RQD obtenidos en cada estación geomecánica	42
Tabla 11 Valores de Espaciado obtenidos en cada estación geomecánica	44
Tabla 12 Coordenadas UTM WGS84 de las estaciones geomecánicas.....	108
Tabla 17 Rumbos y buzamientos de los estratos	111
Tabla 13 Validación cruzada RCU	116
Tabla 14 Validación cruzada JRC	118
Tabla 15 Validación cruzada de RQD Lineal.....	120
Tabla 16 Validación cruzada de Espaciado de las discontinuidades	122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Malla de muestreo.....	15
Figura 2 Toma de datos para RCU.....	18
Figura 3 Gráfico de correlación para el martillo Schmidt.	19
Figura 4 Diagrama para determinar JRC.	21
Figura 5 Toma de datos JRC.....	22
Figura 6 Toma de datos para RQD Lineal.....	23
Figura 7 Toma de datos para Espaciamiento de las discontinuidades.....	25
Figura 8 Plano de ubicación del área de estudio.....	27
Figura 9 Accesibilidad al área de estudio.....	28
Figura 10 Formación Farrat (Ki-fa).....	30
Figura 11 Plano estructural del área de estudio.....	32
Figura 12 Diagrama de rosas de la zona de estudio.....	33
Figura 13 Diagrama de polos de la zona de estudio.....	33
Figura 14 Arenisca blanca de grano fino.....	34
Figura 15 Microconglomerado.....	34
Figura 16 Pendientes pronunciadas de la zona de estudio.....	36
Figura 17 Plano de pendientes.....	37
Figura 18 Análisis estadístico de RCU.....	47
Figura 19 Histograma de RCU.....	47
Figura 20 Análisis estadístico de JRC.....	48
Figura 21 Histograma de JRC.....	49
Figura 22 Análisis estadístico de RQD.....	49
Figura 23 Histograma de RQD Lineal.....	50
Figura 24 Análisis estadístico de Espaciado de las discontinuidades.....	51
Figura 25 Histograma de Espaciado de las discontinuidades.....	51
Figura 26 Test de normalidad RCU (Mpa).....	53
Figura 27 Test de normalidad JRC.....	54
Figura 28 Test de normalidad RQD Lineal (%).	55
Figura 29 Test de normalidad Espaciado (m).....	56
Figura 30 Análisis de tendencia RCU (Mpa).	57
Figura 31 Análisis de tendencia JRC.....	57
Figura 32 Análisis de tendencia RQD Lineal (%).	58
Figura 33 Análisis de tendencia Espaciado (m).....	59
Figura 34 Análisis bivariado JRC vs. RCU (Mpa).	60
Figura 35 Análisis bivariado RQD Lineal vs. RCU (Mpa).	61
Figura 36 Análisis bivariado Espaciado (m) vs. RCU (Mpa).....	62
Figura 37 Análisis bivariado JRC vs. RQD Lineal %.	63
Figura 38 Análisis bivariado JRC vs. Espaciado (m).	64
Figura 39 Análisis bivariado RQD Lineal % vs. Espaciado (m).	65
Figura 40 Matriz de correlación multivariable.....	66
Figura 41 Modelo esférico con ángulo de 0°.....	67
Figura 42 Modelo esférico con ángulo de 45°.....	67
Figura 43, Modelo esférico con ángulo de 90°.....	67
Figura 44 Modelo esférico con ángulo de 135°.....	68
Figura 45 Modelo exponencial con ángulo de 0°.....	68
Figura 46 Modelo exponencial con ángulo de 45°.....	68
Figura 47 Modelo Exponencial con ángulo de 90°.....	69
Figura 48 Modelo exponencial con ángulo de 135°.....	69
Figura 49 Modelo Gaussiano con ángulo de 0°.....	69
Figura 50 Modelo Gaussiano con ángulo de 45°.....	70
Figura 51 Modelo Gaussiano con ángulo de 90°.....	70
Figura 52 Modelo Gaussiano con ángulo de 135°.....	70
Figura 53 Modelo esférico con ángulo de 0°.....	71
Figura 54 Modelo esférico con ángulo de 45°.....	71

Figura 55 Modelo esférico con ángulo de 90°.....	71
Figura 56 Modelo esférico con ángulo de 135°.....	72
Figura 57 Modelo exponencial con ángulo de 0°.....	72
Figura 58 Modelo exponencial con ángulo de 45°.....	72
Figura 59 Modelo exponencial con ángulo de 90°.....	73
Figura 60 Modelo exponencial con ángulo de 135°.....	73
Figura 61 Modelo gaussiano con ángulo de 0°.....	73
Figura 62 Modelo gaussiano con ángulo de 45°.....	74
Figura 63 Modelo gaussiano con ángulo de 90°.....	74
Figura 64 Modelo gaussiano con ángulo de 135°.....	74
Figura 65 Modelo esférico con ángulo de 0°.....	75
Figura 66 Modelo esférico con ángulo de 45°.....	75
Figura 67 Modelo esférico con ángulo de 90°.....	75
Figura 68 Modelo esférico con ángulo de 135°.....	76
Figura 69 Modelo exponencial con ángulo de 0°.....	76
Figura 70 Modelo exponencial con ángulo de 45°.....	76
Figura 71 Modelo exponencial con ángulo de 90°.....	77
Figura 72 Modelo exponencial con ángulo de 90°.....	77
Figura 73 Modelo gaussiano con ángulo de 0°.....	77
Figura 74 Modelo gaussiano con ángulo de 45°.....	78
Figura 75 Modelo gaussiano con ángulo de 90°.....	78
Figura 76 Modelo gaussiano con ángulo de 135°.....	78
Figura 77 Modelo esférico con ángulo de 0°.....	79
Figura 78 Modelo esférico con ángulo de 45°.....	79
Figura 79 Modelo esférico con ángulo de 90°.....	79
Figura 80 Modelo esférico con ángulo de 135°.....	80
Figura 81 Modelo exponencial con ángulo de 0°.....	80
Figura 82 Modelo exponencial con ángulo de 45°.....	80
Figura 83 Modelo exponencial con ángulo de 90°.....	80
Figura 84 Modelo exponencial con ángulo de 135°.....	81
Figura 85 Modelo gaussiano con ángulo de 0°.....	81
Figura 86 Modelo gaussiano con ángulo de 45°.....	81
Figura 87 Modelo gaussiano con ángulo de 90°.....	82
Figura 88 Modelo gaussiano con ángulo de 135°.....	82
Figura 89 Variograma de RCU.....	83
Figura 90 Reporte final del método, RCU.....	84
Figura 91 Variograma de JRC.....	84
Figura 92 Reporte final del método, JRC.....	85
Figura 93 Variograma de RQD lineal.....	86
Figura 94 Reporte final del método, RQD Lineal.....	87
Figura 95 Variograma de Espaciado de las discontinuidades.....	87
Figura 96 Reporte final del método, Espaciado de las discontinuidades.....	88
Figura 97 Plano de estimación RCU.....	89
Figura 98 Plano de variación RCU.....	90
Figura 99 Plano de estimación JRC.....	91
Figura 100 Plano de variación JRC.....	92
Figura 101 Plano de estimación RQD Lineal.....	93
Figura 102 Plano de variación RQD Lineal.....	94
Figura 103 Plano de estimación de Espaciado de las discontinuidades.....	95
Figura 104 Plano de variación de Espaciado de las discontinuidades.....	96
Figura 105 Pendientes moderadas a empinadas.....	104
Figura 106 Viviendas aledañas al macizo rocoso.....	105
Figura 107 Desprendimiento de roca.....	106
Figura 108 Afluencia de turistas en el cerro Callacpuma.....	107
Figura 109 Plano geológico del área de estudio.....	110
Figura 110 Probabilidad diaria de precipitación en Llacanora.....	113
Figura 111 Vegetación arbustiva y arbórea en la zona de estudio.....	114
Figura 112 Estación geomecánica N°7.....	115

RESUMEN

En esta investigación se estimó mediante el método geoestadístico de Kriging, el comportamiento geomecánico del macizo rocoso del cerro Callacpuma en el sector Huayrapongo. Se consideró como muestra a las 43 estaciones geomecánicas macizo rocoso del cerro Callacpuma y la población total del macizo.

La investigación es aplicada, con alcance descriptivo y diseño no experimental. Se fundamenta en el análisis cuantitativo de los parámetros geomecánicos tales como: el coeficiente de rugosidad de las juntas (JRC) empleando el Peine de Barton, la resistencia a la compresión uniaxial (RCU) empleando el martillo Schmidt, la designación de la calidad de la roca (RQD) presente en un metro cuadrado, el espaciado de las discontinuidades representativas de los estratos. Se integró estos valores en una data geoestadística para finalmente analizarlos mediante planos de estimación. El tratamiento de la data se hizo con los softwares Excel, ArcGIS y Minitab 19. Los resultados fueron RCU (resistente a muy resistente), JRC (rugosa), RQD (media a buena), espaciado (medianamente junto). Los planos de estimación representan una fuente confiable para identificar las zonas críticas del macizo; y así ser tomadas en cuenta por parte de las autoridades pertinentes para establecer las medidas preventivas necesarias.

Palabras clave: Geoestadística, Kriging, Comportamiento Geomecánico.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

“La estimación consiste en pronosticar el comportamiento y los valores de una variable regionalizada, en un área, partiendo de medidas puntuales y dispersas. El conocimiento de los valores RMR en un área completa pueden tener una aplicación interesante en la planificación del uso de la tierra, como en el mapeo de susceptibilidad a deslizamientos de tierra y en la identificación de los puntos críticos”. (Ferrari, 2014). “Los taludes de la carretera Baños del Inca – Llacanora no son estables ya que en condiciones secas son mayores a 1 ($F.S >1$) pero con la presencia de agua se vuelven inestables y en caso de sismos estos presentan una falla inminente ($F.S <1$)”. (Tarrillo, 2018).

“Según los pobladores, los eventos de caída de rocas se vienen registrando desde el 15 de agosto del 2007 después del terremoto de Pisco, iniciándose el proceso en la cima del cerro Huamatambo. Mencionan que el evento ocurrió el día 6 de abril del 2015 a 12:40 am, se desprendieron bloques de rocas provenientes del cerro Huamatambo, sector Virgen Ccacca, provocando un fuerte ruido y polvo que llegó hasta las inmediaciones del poblado de Huamatambo, en este último evento se desplazaron bloques de roca hasta 3 m de diámetro y llegaron a aproximarse hasta 20 m de la población urbana. Este evento afectó a cancha deportiva y los tramos de carreteros de Huamatambo-Yllapaza y Pariacancha-Yanaranra, quedando bloqueadas”. (Luza & Sosa, 2016). El flanco sur del cerro Callacpuma presenta pendientes que van de moderadas a empinadas (Anexo 1); principalmente las zonas con mayor inclinación presentan un fracturamiento y alteración de moderado a intenso, siendo estas consideradas como zonas de interés particular para el análisis del comportamiento geomecánico.

“Un escenario geográfico de condiciones geomorfológicas complejas, conduce a la ejecución de cortes y nivelaciones del terreno con maquinarias, que conlleva a un debilitamiento del macizo geológico, con daños inmediatos en las estructuras habitacionales adyacentes” (Ordaz, et al., 2019). El desarrollo urbano del caserío no ha cumplido con medidas propias de las políticas del ordenamiento territorial; esto ha generado una expansión de las viviendas, así como, áreas agrícolas que distan incluso menos de 50 m con respecto al inicio de la ladera del cerro Callacpuma, en algunos casos incluso evidenciándose que existen hogares coexistiendo en inmediaciones del macizo rocoso (Anexo 2).

La investigación se fundamenta en el análisis cuantitativo de los parámetros geomecánicos tales como: el coeficiente de rugosidad de las juntas (JRC) empleando el Peine de Barton, la resistencia a la compresión uniaxial (RCU) empleando el martillo Schmidt, la designación de la calidad de la roca (RQD) presente en un metro lineal y el Espaciado de las discontinuidades. “Mediante las técnicas geoestadísticas como el análisis estructural (variografía), y el interpolador insesgado (Kriging) que utiliza análisis de variables regionalizadas se determina el comportamiento geomecánico, partiendo de los parámetros de rugosidad, densidad, resistencia a la compresión y su RQD” (Egaña, 2008). Los datos procesados han sido obtenidos durante los meses de agosto y setiembre del 2020.

El riesgo a un posible desprendimiento de rocas vuelve susceptibles a todas las viviendas de las familias del caserío, incluso se han encontrado rocas desprendidas que han llegado hasta las cunetas de la carretera aledaña al cerro Callacpuma (Anexo 3). Así mismo, la zona de estudio abarca un atractivo turístico conocido como las pinturas rupestres de Callacpuma, el cual es frecuentado en demasía por los visitantes foráneos (Anexo 4). Por tal motivo, es necesario efectuar una estimación geoestadística del

comportamiento geomecánico en el macizo rocoso, para obtener planos de estimación geomecánica confiables. “La identificación de sectores críticos sobre áreas de mayor peligro y la evaluación y calificación de su condición de vulnerabilidad y riesgo, permitirá determinar y priorizar las intervenciones para mitigar el impacto de estos fenómenos y mejorar así el establecimiento de la población y la expansión de la ciudad sobre espacios geográficos seguros” (INDECI, 2005) Así pues, la presente investigación generará una significativa contribución en cuanto a conocimiento, desarrollo y prevención a mediano y largo plazo para las autoridades del caserío en Huayrapongo.

1.2. Formulación del problema

¿Cuál es el comportamiento geomecánico del macizo rocoso del cerro Callacpuma en el sector Huayrapongo; aplicando el método de Kriging como estimación geoestadística?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Estimar geoestadísticamente mediante el método de Kriging, el comportamiento geomecánico del cerro Callacpuma en el sector Huayrapongo, 2020.

1.3.2. Objetivos específicos

- Interpolar el comportamiento geomecánico del macizo rocoso del cerro Callacpuma en el sector Huayrapongo.
- Identificar las zonas geomecánicas críticas, mediante los planos de estimación geoestadística.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

El método geoestadístico de Kriging permitirá estimar el comportamiento geomecánico del macizo rocoso del cerro Callacpuma en el sector Huayrapongo, 2020.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

La presente investigación tiene como finalidad ser aplicada. (Rojas, 2011) indica que el objetivo de la investigación descriptiva es describir la realidad objeto de estudio, con el fin de corroborar un enunciado; por lo tanto, esta investigación de acuerdo con el alcance es descriptiva – predictiva, ya que se describirán los parámetros geomecánicos y se estimará el comportamiento. La investigación es cuantitativa conforme a su naturaleza porque se utilizan variables numéricas, perfectamente estimable. El diseño es no experimental, ya que no se manipulan variables solo se describen. Es de corte transversal, por caracterizarse de un muestreo realizado por única vez.

2.2. Población y muestra (Materiales y métodos)

Población: Todo el macizo rocoso del cerro Callacpuma.

Muestra: Las “43” estaciones geomecánicas establecidas en la malla de muestreo del cerro Callacpuma sector Huayrapongo.

Elaboración malla de muestreo Se estableció 43 estaciones geomecánicas. Según (McBratney, Webster, & Burgess, 1981) señalan que, un enmallado triangular representa una buena distribución de puntos muestrales, lo cual generará una menor varianza de predicción. Los puntos establecidos en la etapa de gabinete y recolección de datos fueron, en algunos casos, reubicados como máximo 15m con respecto al punto inicial; esto fue debido a que la topografía del área de estudio presenta zonas con difícil accesibilidad o por falta de afloramiento rocoso.

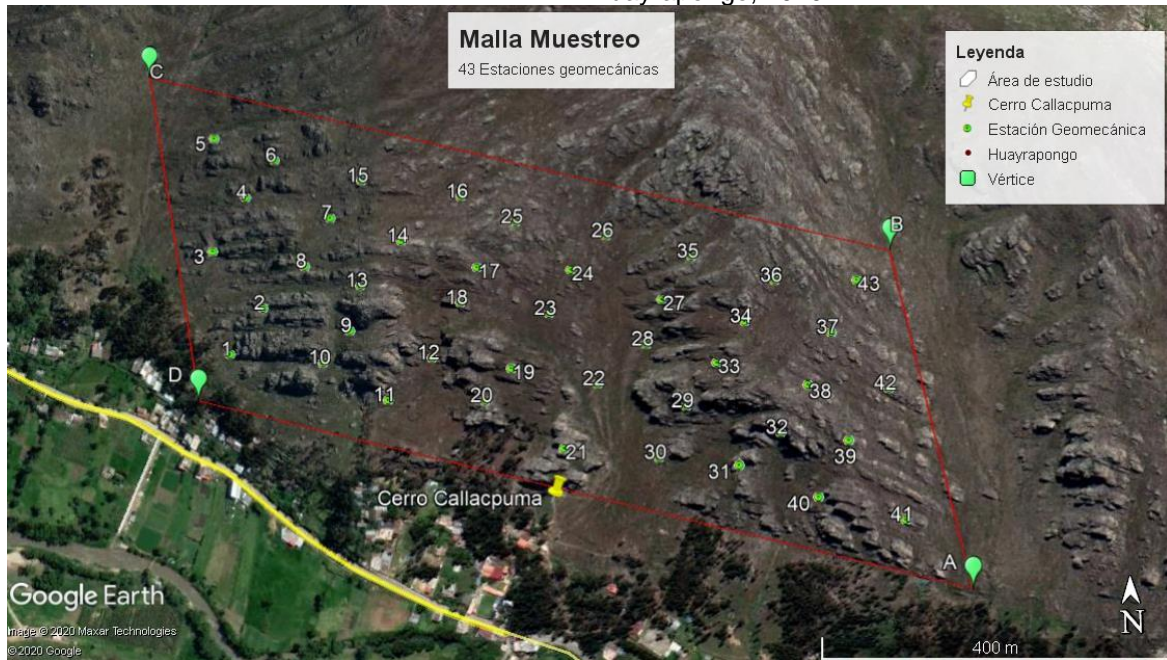


Figura 1 Malla de muestreo

Ubicación de las 43 estaciones (Anexo 5) geomecánicas reubicadas debido a la accesibilidad o afloramiento rocoso del área de estudio. En todo momento se trató de mantener la malla regular, sin embargo; algunas estaciones fueron reubicadas en la etapa de campo.

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

Técnicas

Conforme a la presente investigación se utilizó las técnicas de análisis documental, observación directa, muestreo, análisis, procesamiento e interpretación de los parámetros geomecánicos para alcanzar un óptimo desempeño.

(McBratney, et al, 1981) señala que, “para cualquier densidad muestral, la distancia máxima entre un punto de observación y un punto a interpolar es mínima cuando la configuración de los puntos es hecha en un enmallado triangular, por lo cual bajo esta distribución de puntos se obtendrán las menores varianzas de predicción”.

Instrumentos

En la etapa de campo se utilizaron los formatos de registro de datos geomecánicos y estructurales, tales como el gráfico de correlación para el martillo de Schmidt, para el caso del RCU; diagrama correlativo para determinar JRC; formatos establecidos en la etapa de gabinete para registro de datos. Finalmente, con esta data se analizan cuantitativamente las variables; estudiando su asociación y/o relación, para posteriormente ser descritos en función de su análisis geoestadístico.

2.4. Procedimiento

Etapa de gabinete y recopilación de datos:

Se buscó sin éxito estudios previos o antecedentes de la zona que puedan aportar a la investigación. Con ayuda de las imágenes satelitales se logró definir la zona de estudio, se elaboró y aplicó técnicas específicas tales como mapas geológicos, imágenes satelitales, columna estratigráfica, etc. Se gestionó los requerimientos mínimos para poder solicitar la logística necesaria para las salidas de campo. Además, se buscó un permiso de ingreso al cerro Callacpuma en la municipalidad de Llacanora para evitar posibles conflictos sociales.

Etapa de campo:

Usando los equipos adecuados de campo, se recopiló los datos geomecánicos RCU, RQD, JRC y espaciado de las discontinuidades. Los cuales serán descritas a continuación.

Resistencia a la compresión uniaxial (RCU)

Para la obtención del RCU se debe tener en cuenta la densidad (KN/m^3) de la roca. En esta investigación se utilizará el promedio de las densidades de las areniscas (Gonzales de Vallejo, Ferrer, Ortuño , & Oteo , 2002); obteniendo un valor de 24.5 KN/m^3 .

Tabla 1

Valores típicos del peso específico y porosidad de las rocas.

ROCA	PESO ESPECÍFICO (g/cm^3)
Andesita	2,2-2,35
Anfibolita	2,9-3.0
Arenisca	2,3-2,6
Basalto	2,7-2,9
Caliza	2,3-2,6
Carbón	1,0-2.0
Cuarcita	2,6-2,7

Fuente: (Gonzales de Vallejo, Ferrer, Ortuño , & Oteo , 2002).



Figura 2 Toma de datos para RCU.

Para este procedimiento se debe limpiar la cara representativa del macizo en estudio y dejar expuesta una zona sin obstrucciones. (ISRM, 1978) Estipula que de las 20 medidas del rebote, se eliminan los 10 menores y luego se promedia, posterior a ellos se relaciona con la resistencia a compresión simple mediante el gráfico de correlación (Miller, 1966) para el martillo Schmidt; en el cual interviene la densidad de la roca y la orientación del martillo en función al plano del macizo rocoso. Finalmente se obtendrá el valor de la resistencia a la compresión simple de la roca en Mpa.

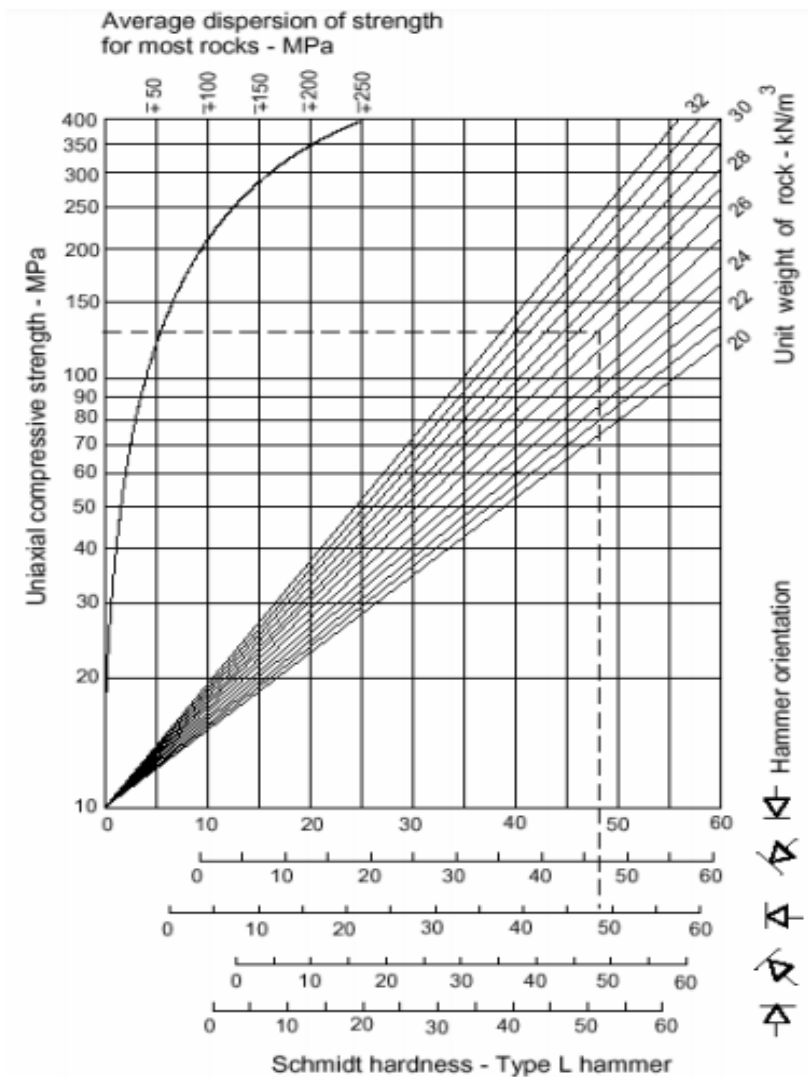


Figura 3 Gráfico de correlación para el martillo Schmidt. Fuente: (Miller, 1966).

Una vez obtenido el valor del RCU se relaciona con la tabla de estimación en terreno de la resistencia compresión uniaxial (Hoek & Brown, 1997), para hallar la clasificación del macizo rocoso según su resistencia.

Tabla 2

Estimación en terreno de la resistencia en compresión uniaxial.

Clase (a)	Clasificación de la roca según su resistencia	Resistencia uniaxial (Mpa)
R6	Extremadamente resistente	>250
R5	Muy resistente	100-250
R4	Resistente	50-100
R3	Moderadamente resistente	25-50
R2	Débil	5-25
R1	Muy débil	1-5
R0	Extremadamente débil	0.25-1

Fuente: (Hoek & Brown, 1997).

Coefficiente de rugosidad de las juntas (JRC)

Este parámetro se obtuvo a partir de la representación que forma la longitud del perfil de la profundidad rugosa de la junta en el peine de Barton. Una vez perfilado, se coloca sobre una superficie plana y se mide (en mm.) la profundidad obtenida. Paso siguiente, utilizamos el diagrama para determinar el JRC.

En la presente investigación por temas logísticos se utilizó un peine de 15 cm de largo; sin embargo, se tomaron 2 medidas consecutivas en un mismo punto para simular un

peine de 30 cm. Adicional a ello, se consideró la toma de 3 puntos representativos del macizo para su posterior promedio.

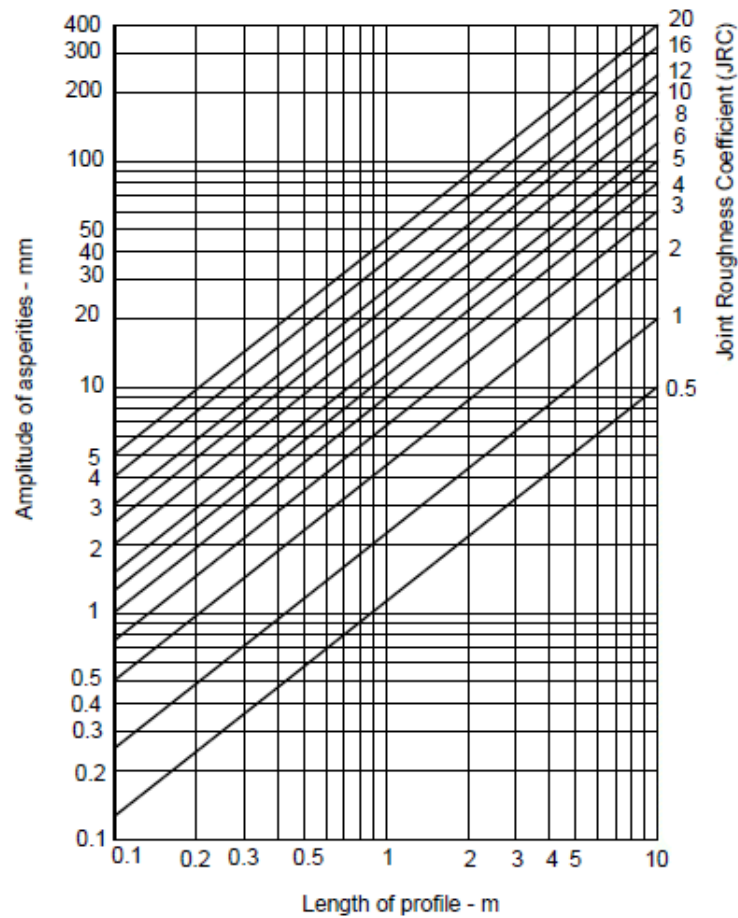


Figura 4 Diagrama para determinar JRC. Fuente: (Barton & Bandis, 1982).







Figura 5 Toma de datos JRC.

El valor obtenido del JRC se analiza con la tabla de correlación del JRC, para hallar la clasificación de la rugosidad que se presenta en la zona de investigación.

Tabla 3

Correlación del JRC

PERFIL ESTIMADO	JRC	RUGOSIDAD RMR
	0-2	Espejo de falla
	2-4	Lisa
	4-6	Lisa
	6-8	Ligeramente rugosa
	8-10	Ligeramente rugosa
	10-12	Rugosa

	12-14	Rugosa
	14-16	Rugosa
	16-18	Muy rugosa
	18-20	Muy rugosa

Fuente: Adecuado de (Barton & Choubey, 1977) con descripción de (Bieniawski, 1976).

Designación de la calidad de la roca (RQD)

(Palmstrom, 1982) señala que cuando no hay perforaciones disponibles, el RQD puede ser estimado a partir del número de juntas por unidad de volumen. Así mismo, puede ser hallado en campo en un tramo longitudinal de pared expuesta. Se contabilizó en un metro cuadrado representativo, el número de fracturas contenidas en un metro lineal.



Figura 6 Toma de datos para RQD Lineal.

Posteriormente se utilizó la siguiente fórmula (Priest & Hudson, 1976) para hallar el valor de RQD:

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1)$$

Donde:

$$\lambda = \frac{\text{Número de discontinuidades}}{\text{Longitud}}$$

Finalmente, el valor obtenido de RQD se analiza con la tabla de clasificación de la calidad del macizo rocoso según el índice RQD que se presenta en la zona de investigación.

Tabla 4

Clasificación de la calidad del macizo rocoso según RQD

RQD %	CALIDAD
<25	Muy mala
25-50	Mala
50-75	Media
75-90	Buena
90-100	Muy buena

Fuente: (Gonzales de Vallejo, Ferrer, Ortuño , & Oteo , 2002)

Espaciado de las discontinuidades

Según (Gonzales de Vallejo, Ferrer, Ortuño , & Oteo , 2002) es la distancia media perpendicular entre los planos de discontinuidad de una misma familia. La medida del espaciado se obtiene con ayuda de un flexómetro, en un espacio representativo de la consecuencia de discontinuidades. En la mayoría de las estaciones geomecánicas se

encontró 3 familias de discontinuidades, de las cuales se promedió para tener un único
 valor.



Figura 7 Toma de datos para Espaciamiento de las discontinuidades.

El valor obtenido de Espaciado se analiza con la siguiente tabla de descripción del
 espaciado.

Tabla 5

Descripción del espaciado

DESCRIPCIÓN	ESPACIADO (m)
Extremadamente junto	<0.02
Muy junto	0.02-0.06

Junto	0.06-0.2
Moderadamente junto	0.2-0.6
Separado	0.6-2
Muy separado	2-6
Extremadamente Separado	>6

Fuente: (Gonzales de Vallejo, Ferrer, Ortuño , & Oteo , 2002)

Etapas de gabinete post campo:

Con la información “cruda” obtenida en campo se digitalizó y revisó; mediante los softwares Minitab y ArcGIS se procedió a realizar el análisis estadístico descriptivo y posteriormente geoestadístico, analizando sus gráficas generadas. Con ayuda del software ArcGIS se generó los planos de estimación con su respectivo plano de variación para distinguir la confiabilidad de cada uno de ellos. Finalmente se identificó y sectorizó las zonas de acuerdo con las tablas de clasificación correspondientes a cada parámetro geomecánico.

2.5. Aspectos generales

El área de estudio corresponde al flanco sur del cerro Callacpuma, el cual se ubica en el caserío Huayrapongo, distrito Llacanora, departamento y provincia de Cajamarca (Zona 17), Perú. Perteneciente al cuadrángulo 15-g San Marcos.

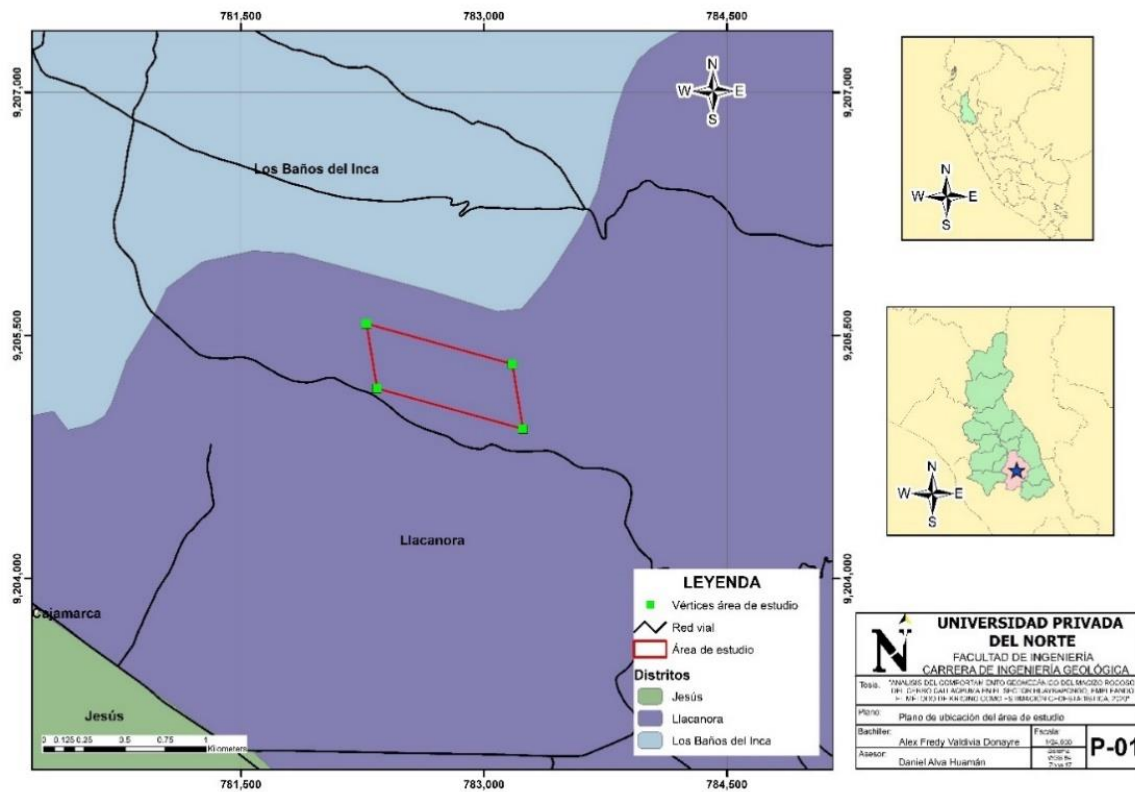


Figura 8 Plano de ubicación del área de estudio.

El cerro Callacpuma se encuentra ubicado entre los distritos de Baños del Inca y Llacanora, altura promedio de 2885 msnm. Y abarca una extensión de 280 ha. aproximadamente.

El área de estudio se encuentra delimitado por las siguientes coordenadas:

Tabla 6

Coordenadas UTM WGS84 del área de estudio.

VÉRTICE	ESTE	NORTE
1	783241.00	9204924.00
2	783175.00	9205324.00
3	782275.00	9205573.00
4	782341.00	9205173.00

El acceso a la zona de estudio, partiendo desde la plaza de armas de Cajamarca, es mediante la carretera asfaltada que une el distrito de Cajamarca con Baños del Inca y esta con el distrito de Llacanora. Accediendo por la zona de ingreso a las pinturas rupestres Callacpuma.

Tabla 7

Accesibilidad al área de estudio

De	A	Vía	Distancia	Tiempo
Cajamarca	Baños del Inca	Terrestre	6 km	13 mins
Baños del Inca	Huayrapongo	Terrestre	6.5 km	15 mins

Detalle de vía, distancia y tiempo (aproximadamente) en acceder al área de estudio.

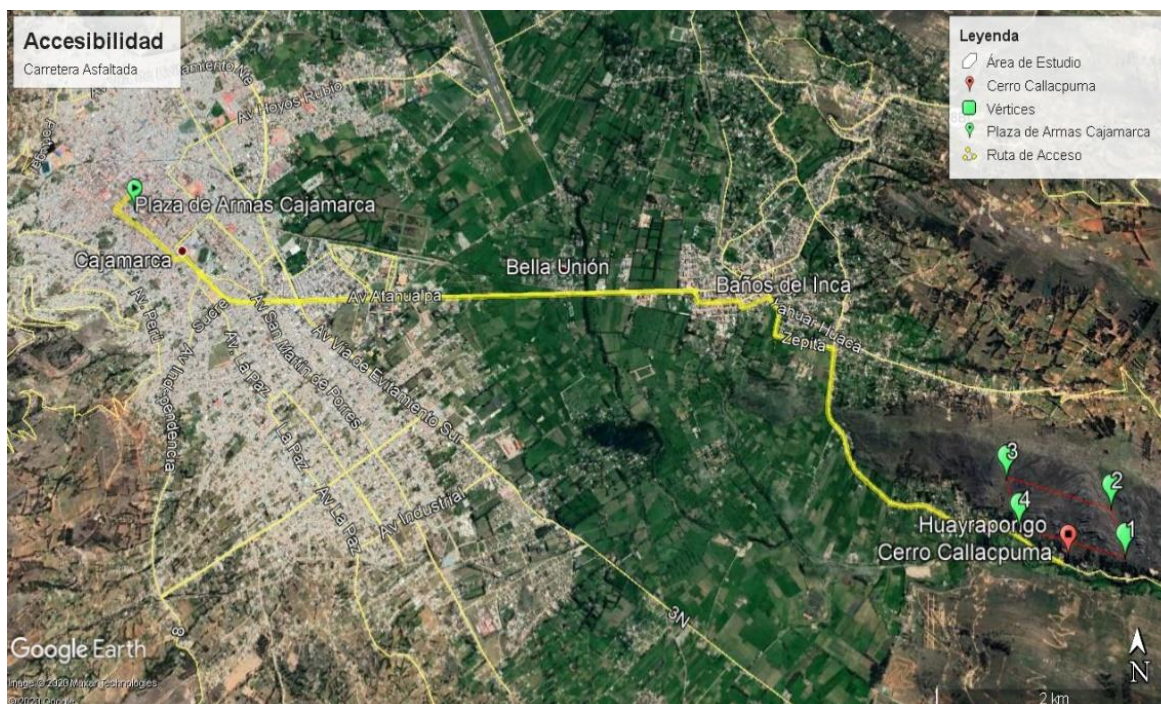


Figura 9 Accesibilidad al área de estudio.

2.6. Geología local

La geología local presente en el área de estudio (Anexo 6) corresponde a rocas sedimentarias pertenecientes al cretáceo inferior. Principalmente, en el 95% del área de estudio, se encuentra aflorando la formación Farrat (Ki-fa). Mientras que en la zona Sureste el 5% corresponde a la formación Carhuaz (Ki-ca).

Formación Farrat (Ki-fa)

Abarca casi la totalidad del área en estudio. Consiste en areniscas de color blancas a cremas, en algunos sectores presenta mayor alteración que otras. La formación Farrat es caracterizada por ser clástica, se identificó granulometría fina, media y gruesa.

Dicha formación en general presenta 500m de potencia. En el área de estudio se reconoció estratos que buzaban hacia el Suroeste con 66° en promedio, estos van de muy potentes a potentes. En algunas zonas se evidenció mayor fracturamiento del macizo que en otras; agentes geológicos externos influyen en demasía sobre la zona de estudio, haciendo que en algunos sectores las areniscas presentes, sean más alteradas que en otras.

Los estratos presentes llegan a tener inclinación muy pronunciadas, dificultando la toma de datos en cada estación geomecánica. Se observó también la gran cantidad de plegamiento, fallamiento local y diaclasas presentes debido al esfuerzo compresivo de dirección Noreste Sureste en los estratos.



Figura 10 Formación Farrat (Ki-fa). (Vista al NE).

Formación Carhuáz (Ki-ca)

La formación Carhuáz únicamente fue reconocida mediante un contacto inferido infrayacente con la formación Farrat en cercanía con los depósitos cuaternarios aluviales; de mínimas proporciones (5%) con respecto al área de estudio. Localizándose en la parte Sureste del área definida, la cual no es considerada de mucha influencia sobre esta. En general, la formación Carhuáz presenta intercalación de areniscas con lutitas, de tonalidades que van desde cobrizos a cremas; está conformada por limolitas de tonalidad amarillenta y lutitas grisáceas.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

3.1. Geología estructural

El fuerte plegamiento y fracturamiento del macizo rocoso de la zona de estudio ubicada en el flanco Sur del anticlinal del cerro Callacpuma; es por movimiento del ciclo andino, además de la presencia de un anticlinal erosionado con eje perteneciente a la Formación Farrat. Debido a ello es que presenta diaclasas, alto grado de fracturamiento en algunas zonas y gran deformación. El esfuerzo principal (σ_1) presenta una dirección NW – SE, generando una compresión en la zona de estudio. El grado de fracturamiento fue clasificado como leve, moderado e intenso.

El depósito cuaternario aluvial está enmarcando un depósito fluvial, en el cual fluye las aguas del río Cajamarquino; se pudo identificar una posible falla inversa inferida cercana a él; debido a que en la parte sur de la zona de estudio se observó una repetición de los estratos (formación Farrat y Carhuáz).

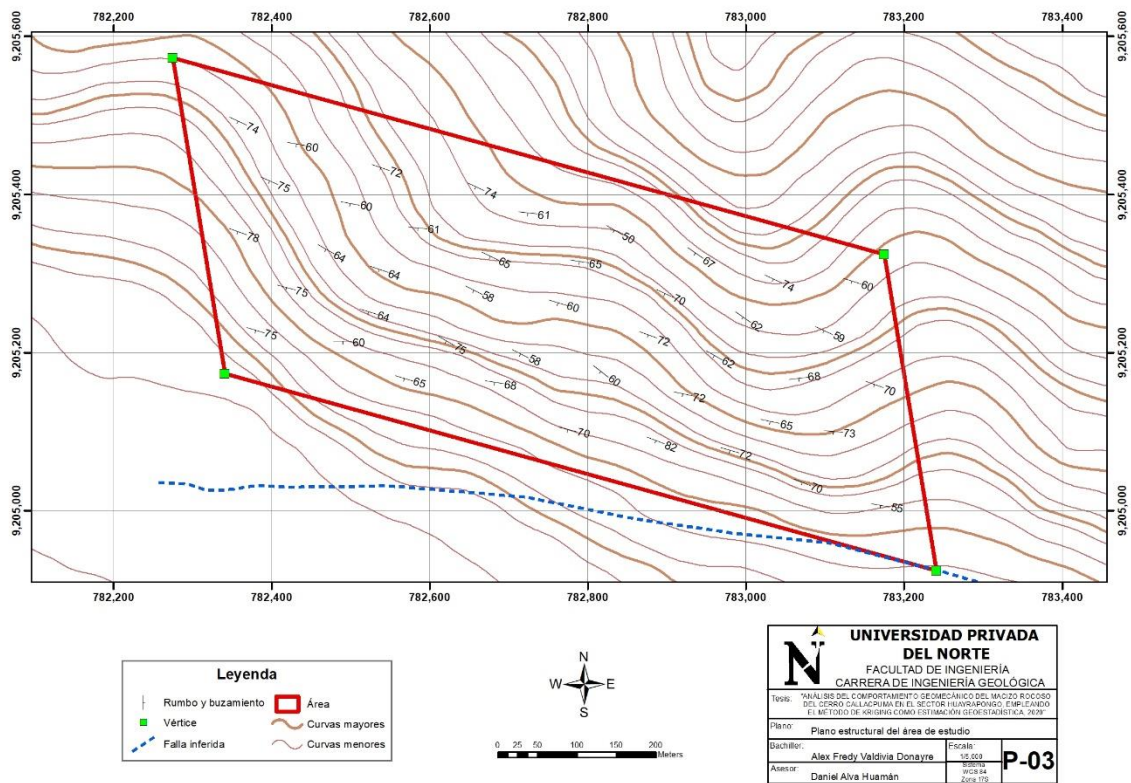


Figura 11 Plano estructural del área de estudio.

Utilizando el software Dips se pudo generar el siguiente diagrama de rosas con la información de rumbo y buzamiento de los estratos (Anexo 7). Se nota claramente que existe un esfuerzo compresivo con dirección Noreste – Sureste, siendo autor directo del anticlinal presente.

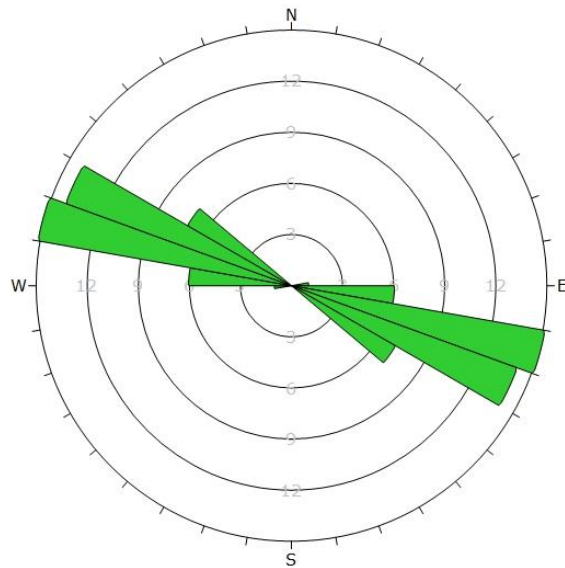


Figura 12 Diagrama de rosas de la zona de estudio.

Los estratos presentan un rumbo promedio de 107°N y un rumbo de 66° . Además, se puede visualizar 3 posibles familias.

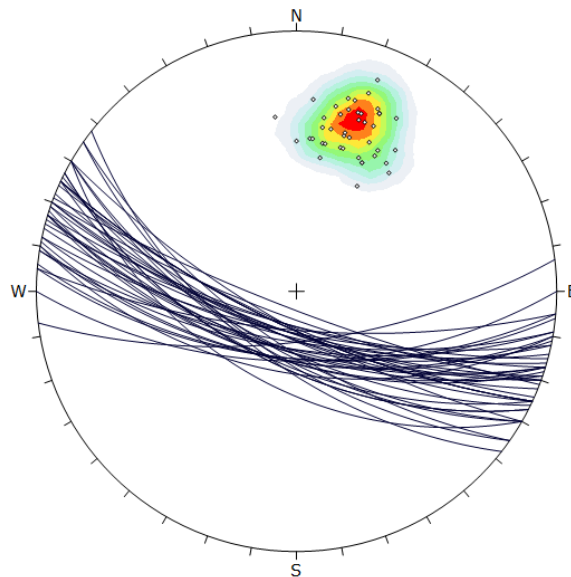


Figura 13 Diagrama de polos de la zona de estudio.

Se representa los datos de los estratos del cerro Callacpuma, juntamente con sus planos de los polos.

3.2. Caracterización granulométrica

La formación Farrat, que comprende casi la totalidad de la zona de estudio, está compuesta por areniscas y cuarcitas con tonalidades que, debido al intemperismo varían de blanquecinas a cremosas. En muchos casos la fuerte meteorización y alteración generan parcialmente halos de oxidación o en algunos casos total cambio de la roca. En general, la textura de las areniscas es intergranular; algunas zonas con mayor característica deleznable que otras. También se evidenció la presencia de microconglomerados con clastos de bordes subredondeados a redondeados.



Figura 14 Arenisca blanca de grano fino.

Los depósitos cuaternarios aluviales infrayacen a la formación Farrat, evidenciándose en algunos casos suelos no consolidados.



Figura 15 Microconglomerado.

Muestra de mano correspondiente a la zona de estudio, clastos subredondeados a redondeados. Presencia de Limonitas relleno la matriz. Halos de FeO.

3.3. Caracterización de pendientes

Se evidenció la presencia de una topografía muy variable; siendo ratificada con ayuda de imágenes satelitales los abundantes plegamientos y fallas presentes.

En campo se pudo corroborar que existen pendientes muy pronunciadas y en algunos casos haciendo totalmente inaccesible su estudio; por tal motivo, se reubicó algunas estaciones geomecánicas in situ por motivo de seguridad.

El caserío Huayrapongo se encuentra expuesto a un posible desprendimiento de roca; ya que se encuentra está localizado a favor de la pendiente del flanco sur del Cerro Callacpuma. Pese a ello el desarrollo urbano ha venido incrementando con el pasar de los años.

Se realizó un mapa de pendientes con ayuda del software ArcGIS, para poder identificar las potenciales zonas con mayor inclinación; ya que estas favorecerían el desarrollo potencial de un desprendimiento de rocas, llegando a impactar los hogares, cultivos, moradores o incluso a la carretera misma.

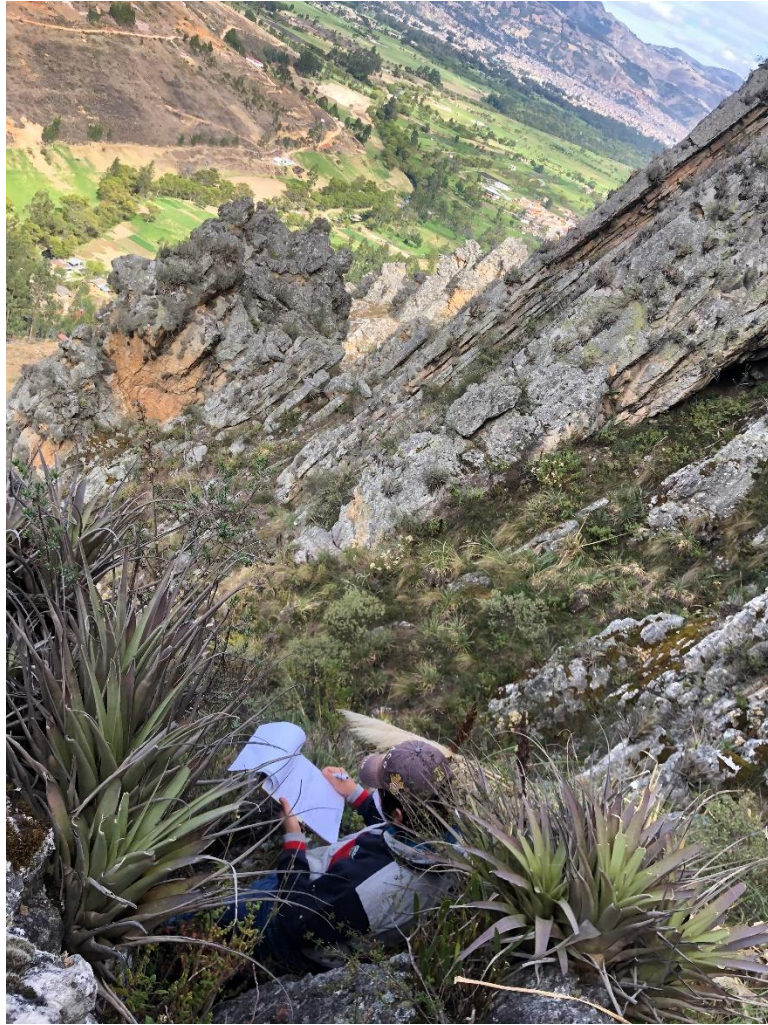


Figura 16 Pendientes pronunciadas de la zona de estudio. (Vista al Suroeste).

Para dicho propósito se empleó la clasificación de unidades morfogénicas establecidas por (Rodríguez , 2018). En la zona de estudio se llegó a presentar en promedio pendientes que van de 21° a 50° de pendiente (Laderas), las cuales se caracterizan por presentar entre 200 a 300 metros de altura (base-tope) y que pueden impactar cualquier tipo de litología. Se evidencia que el desarrollo urbano se encuentra frente a una gran exposición de desprendimientos de rocas del cerro Callacpuma.

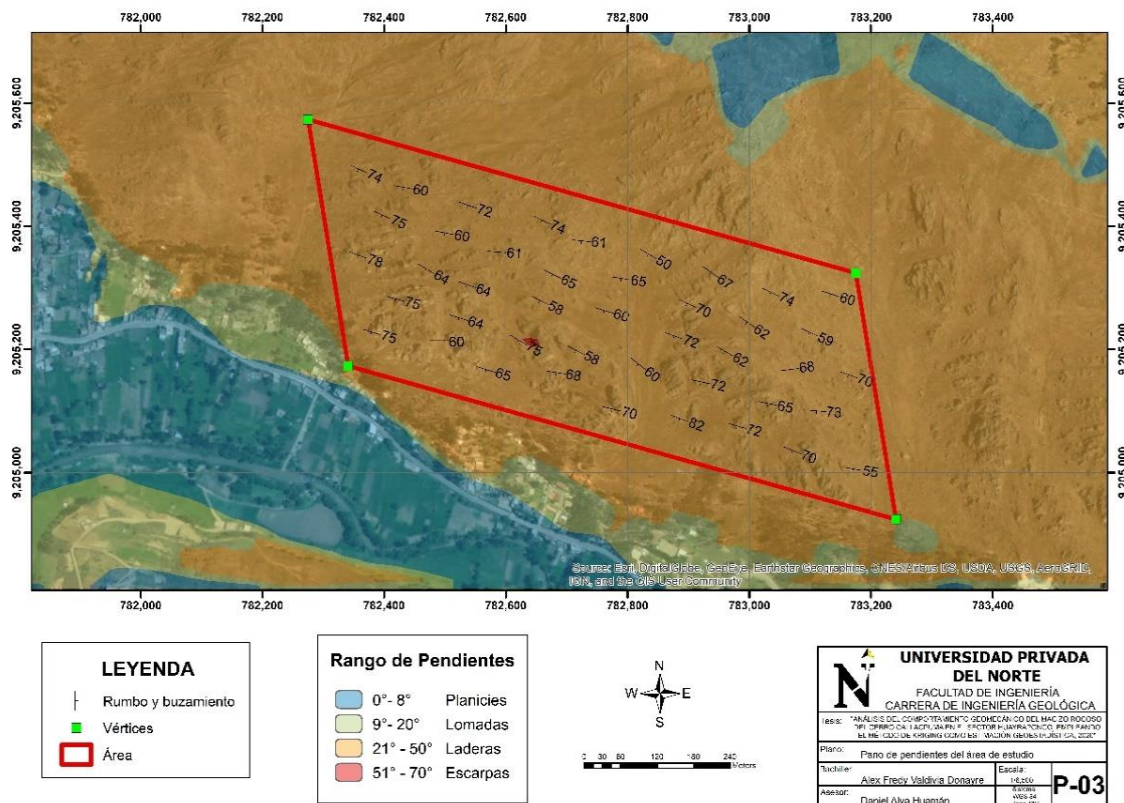


Figura 17 Plano de pendientes.

El área de estudio se encuentra representada por laderas con pendientes de 21° a 50°; siendo el desarrollo urbano y el sector agrícola los principales expuestos a un posible desprendimiento de roca. El plano representa el área de estudio con tonalidades que van de tenues a intensas; siendo planicies (celeste), lomadas (verde), laderas (naranja claro), escarpas (rojo). Se debe considerar zonas de riesgo las que presenten coloraciones naranja claro y rojo; así mismo evaluar sus medidas de contingencia.

3.4. Registro de estimación

Resistencia a la compresión uniaxial (RCU)

A continuación, se presentan los valores obtenidos en cada estación geomecánica.

Tabla 8

Valores RCU de cada estación geomecánica

Punto de Muestreo	X	Y	Z	RCU (Mpa)
1	782379	9205226	2680	133
2	782418	9205280	2729	133
3	782357	9205351	2721	110
4	782396	9205416	2789	90
5	782357	9205491	2771	105
6	782431	9205461	2815	108
7	782499	9205387	2825	100
8	782468	9205329	2787	123
9	782522	9205249	2770	85
10	782490	9205212	2719	133
11	782567	9205165	2710	110
12	782620	9205213	2750	84
13	782535	9205303	2832	128
14	782585	9205356	2849	135
15	782537	9205432	2848	86
16	782658	9205408	2878	68
17	782676	9205320	2882	74

18	782655	9205278	2855	80
19	782714	9205197	2804	100
20	782682	9205160	2763	96
21	782774	9205101	2740	100
22	782816	9205175	2763	98
23	782761	9205261	2836	110
24	782789	9205313	2878	65
25	782724	9205374	2909	88
26	782833	9205353	2890	128
27	782897	9205273	2870	118
28	782876	9205220	2811	100
29	782920	9205145	2822	113
30	782885	9205086	2752	105
31	782979	9205074	2770	110
32	783030	9205110	2783	85
33	782959	9205195	2861	84
34	782995	9205243	2894	65
35	782935	9205324	2892	100
36	783034	9205291	2910	93
37	783098	9205226	2890	98
38	783066	9205165	2860	55
39	783110	9205098	2800	75
40	783070	9205034	2745	84
41	783170	9205004	2708	57

42	783162	9205157	2820	80
43	783133	9205288	2898	100

Coeficiente de rugosidad de las juntas (JRC)

La siguiente tabla contiene los valores de JRC obtenidos en la zona de estudio.

Tabla 9

Valores JRC de cada estación geomecánica.

Punto de Muestreo	X	Y	Z	JRC
1	782379	9205226	2680	16
2	782418	9205280	2729	12
3	782357	9205351	2721	8
4	782396	9205416	2789	10
5	782357	9205491	2771	14
6	782431	9205461	2815	12
7	782499	9205387	2825	10
8	782468	9205329	2787	10
9	782522	9205249	2770	8
10	782490	9205212	2719	10
11	782567	9205165	2710	12
12	782620	9205213	2750	12
13	782535	9205303	2832	10
14	782585	9205356	2849	12

15	782537	9205432	2848	6
16	782658	9205408	2878	5
17	782676	9205320	2882	10
18	782655	9205278	2855	10
19	782714	9205197	2804	10
20	782682	9205160	2763	12
21	782774	9205101	2740	12
22	782816	9205175	2763	6
23	782761	9205261	2836	10
24	782789	9205313	2878	12
25	782724	9205374	2909	8
26	782833	9205353	2890	6
27	782897	9205273	2870	12
28	782876	9205220	2811	14
29	782920	9205145	2822	16
30	782885	9205086	2752	15
31	782979	9205074	2770	15
32	783030	9205110	2783	16
33	782959	9205195	2861	14
34	782995	9205243	2894	17
35	782935	9205324	2892	14
36	783034	9205291	2910	12
37	783098	9205226	2890	14
38	783066	9205165	2860	12

39	783110	9205098	2800	17
40	783070	9205034	2745	17
41	783170	9205004	2708	12
42	783162	9205157	2820	12
43	783133	9205288	2898	12

Designación de la calidad de la roca (RQD)

La siguiente tabla contiene los valores de RQD obtenidos en la zona de estudio.

Tabla 10

Valores RQD obtenidos en cada estación geomecánica

Punto de Muestreo	X	Y	Z	RQD LINEAL (%)
1	782379	9205226	2680	76
2	782418	9205280	2729	74
3	782357	9205351	2721	70
4	782396	9205416	2789	81
5	782357	9205491	2771	88
6	782431	9205461	2815	59
7	782499	9205387	2825	81
8	782468	9205329	2787	52
9	782522	9205249	2770	77
10	782490	9205212	2719	41
11	782567	9205165	2710	41

12	782620	9205213	2750	70
13	782535	9205303	2832	46
14	782585	9205356	2849	56
15	782537	9205432	2848	70
16	782658	9205408	2878	74
17	782676	9205320	2882	59
18	782655	9205278	2855	31
19	782714	9205197	2804	49
20	782682	9205160	2763	74
21	782774	9205101	2740	49
22	782816	9205175	2763	88
23	782761	9205261	2836	74
24	782789	9205313	2878	29
25	782724	9205374	2909	43
26	782833	9205353	2890	77
27	782897	9205273	2870	74
28	782876	9205220	2811	77
29	782920	9205145	2822	77
30	782885	9205086	2752	84
31	782979	9205074	2770	74
32	783030	9205110	2783	88
33	782959	9205195	2861	77
34	782995	9205243	2894	84
35	782935	9205324	2892	77

36	783034	9205291	2910	81
37	783098	9205226	2890	81
38	783066	9205165	2860	70
39	783110	9205098	2800	52
40	783070	9205034	2745	77
41	783170	9205004	2708	84
42	783162	9205157	2820	74
43	783133	9205288	2898	88

Espaciado de las discontinuidades

La siguiente tabla contiene los valores de Espaciado de las discontinuidades obtenidos en la zona de estudio.

Tabla 11

Valores de Espaciado obtenidos en cada estación geomecánica

Punto de Muestreo	X	Y	Z	Espaciado (m)
1	782379	9205226	2680	0.48
2	782418	9205280	2729	0.48
3	782357	9205351	2721	0.43
4	782396	9205416	2789	0.52
5	782357	9205491	2771	0.56
6	782431	9205461	2815	0.38
7	782499	9205387	2825	0.55

8	782468	9205329	2787	0.33
9	782522	9205249	2770	0.47
10	782490	9205212	2719	0.26
11	782567	9205165	2710	0.24
12	782620	9205213	2750	0.46
13	782535	9205303	2832	0.28
14	782585	9205356	2849	0.36
15	782537	9205432	2848	0.44
16	782658	9205408	2878	0.47
17	782676	9205320	2882	0.37
18	782655	9205278	2855	0.2
19	782714	9205197	2804	0.32
20	782682	9205160	2763	0.49
21	782774	9205101	2740	0.32
22	782816	9205175	2763	0.58
23	782761	9205261	2836	0.48
24	782789	9205313	2878	0.16
25	782724	9205374	2909	0.28
26	782833	9205353	2890	0.48
27	782897	9205273	2870	0.45
28	782876	9205220	2811	0.48
29	782920	9205145	2822	0.47
30	782885	9205086	2752	0.53
31	782979	9205074	2770	0.48

32	783030	9205110	2783	0.57
33	782959	9205195	2861	0.46
34	782995	9205243	2894	0.55
35	782935	9205324	2892	0.47
36	783034	9205291	2910	0.53
37	783098	9205226	2890	0.54
38	783066	9205165	2860	0.45
39	783110	9205098	2800	0.32
40	783070	9205034	2745	0.47
41	783170	9205004	2708	0.53
42	783162	9205157	2820	0.48
43	783133	9205288	2898	0.56

3.5. Análisis geoestadístico

Según (Cely Pulido, Siabato Vaca, Sánchez Ipia, & Rangel Sotter, 2002) definen como una técnica estadística usada para la estimación, predicción y simulación de datos correlacionados espacialmente. Así mismo, su utilización imprescindible se basa en que permite describir la continuidad espacial de las variables y estimar valores muy cercanos a los reales en puntos desconocidos.

Medidas de tendencia central y medidas de dispersión

Mediante el uso del software Minitab 19 se realizó el análisis de los parámetros geomecánicos obtenidos en campo. Se consideró el estudio principalmente de la media, desviación estándar, varianza, valor mínimo, mediana, valor máximo, moda, sesgo y curtosis. Logrando obtener los siguientes resultados.

Resistencia a la compresión uniaxial (RCU)

Statistics

Variable	Total				N for					
	Count	Mean	StDev	Variance	Minimum	Median	Maximum	Mode	Mode	Skewness
RCU (Mpa)	43	97.49	20.99	440.59	55.00	100.00	135.00	100	6	-0.01
Variable	Kurtosis									
RCU (Mpa)	-0.52									

Figura 18 Análisis estadístico de RCU.

La diferencia de valores de la media y la mediana es de 2.51 (se aproximan); por lo tanto, es un buen pronóstico para la estimación. Presenta un rango de 80. En cuanto al sesgo, tiene un valor negativo lo cual indica cierta distribución hacia la derecha. La curtosis al presentar un valor negativo se entiende que es platicúrtica y presenta una curva ligeramente aplanada.

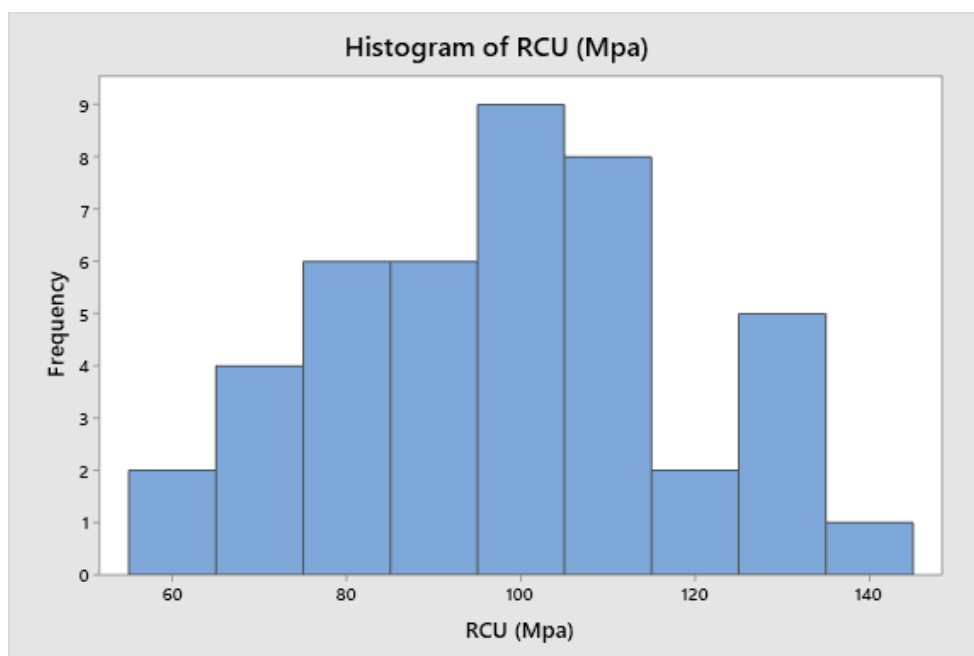


Figura 19 Histograma de RCU.

En el histograma presentado se observa la frecuencia de datos en ciertos intervalos. El pico de la gráfica presentada se encuentra en la parte central; por lo que se demuestra que el histograma aproximadamente sigue la curva de Gauss. Los datos tienden a agruparse con respecto a una media.

Los datos a pesar de estar distribuidos de una forma gaussiana están dispuestos ligeramente hacia la derecha. El grado de aplastamiento de la gráfica de distribución tiende ligeramente a estar por debajo de la curva estándar. La varianza al ser de 440.59, nos indica que hay una gran dispersión de la distribución de datos.

Coefficiente de rugosidad de las juntas (JRC)

Statistics

Variable	Total							N for		Skewness
	Count	Mean	StDev	Variance	Minimum	Median	Maximum	Mode	Mode	
JRC	43	11.721	3.081	9.492	5.000	12.000	17.000	12	14	-0.22
Variable Kurtosis										
JRC	-0.30									

Figura 20 Análisis estadístico de JRC.

El valor de la media y mediana difieren en 0.28, lo cual hace pronosticar una buena estimación. La diferencia entre el valor máximo y mínimo nos da un rango de 12. En cuanto a la moda (12), está representada por 14 muestras. El sesgo al poseer un valor negativo, nos indica que la distribución tiende hacia la derecha. La curtosis tiene por ser negativa, se entiende que es platicúrtica y presenta una curva ligeramente aplanada.

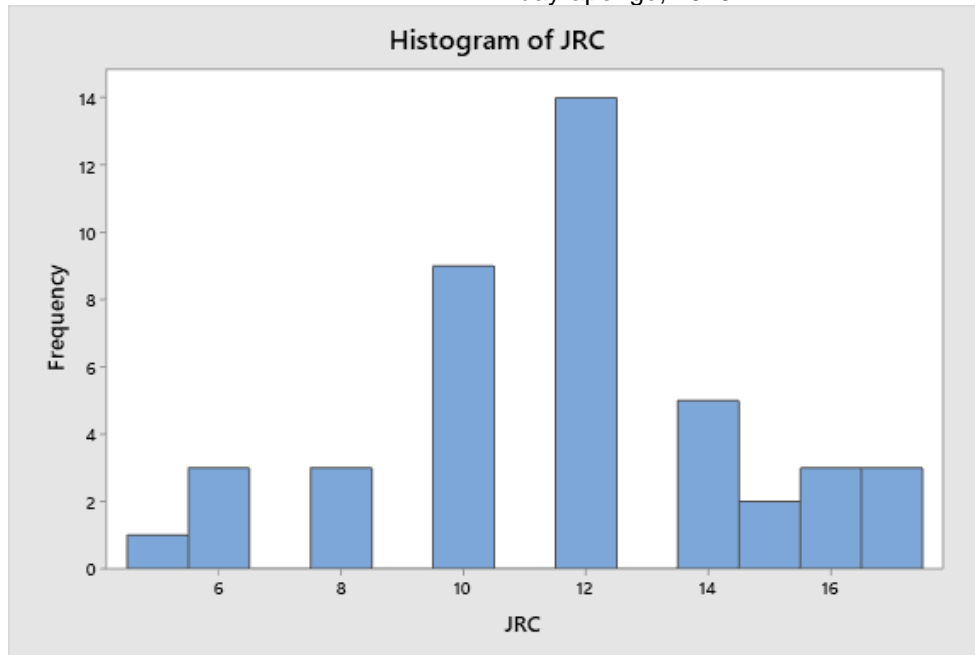


Figura 21 Histograma de JRC.

En el histograma se presenta una mayor concentración de datos en la parte central, lo cual pronostica una curva gaussiana. El tener un sesgo de -0.22, indica que la distribución de los datos se encuentra ubicados ligeramente hacia la derecha. La gráfica presenta una curtosis de -0.30, hace referencia a una platicúrtica; es decir, un histograma algo aplanado indicando que los datos se encuentran dispersos. La varianza es de 9.49, se entiende que hay un mejor agrupamiento de los datos.

Designación de la calidad de la roca (RQD)

Statistics

Variable	Total				Minimum	Median	Maximum	Mode	N for Mode
	Count	Mean	StDev	Variance					
RQD LINEAL %	43	68.56	16.13	260.16	29.00	74.00	88.00	74; 77	7
Variable	Skewness Kurtosis								
RQD LINEAL %	-0.94 -0.12								

Figura 22 Análisis estadístico de RQD.

Se observa que el conjunto de datos es bimodal (74% y 77%), siendo 7 el número de veces que se produce la frecuencia más alta. La diferencia entre mediana y media (5.44) nos indica un histograma que no va a seguir una curva gaussiana. Presenta un rango de 59 y un sesgo de -0.94; lo cual hace referencia a una asimetría negativa, alineando la curva ligeramente hacia la derecha. La variabilidad de los datos es moderada. El valor de la curtosis al ser negativo se puede afirmar que es platicúrtica.

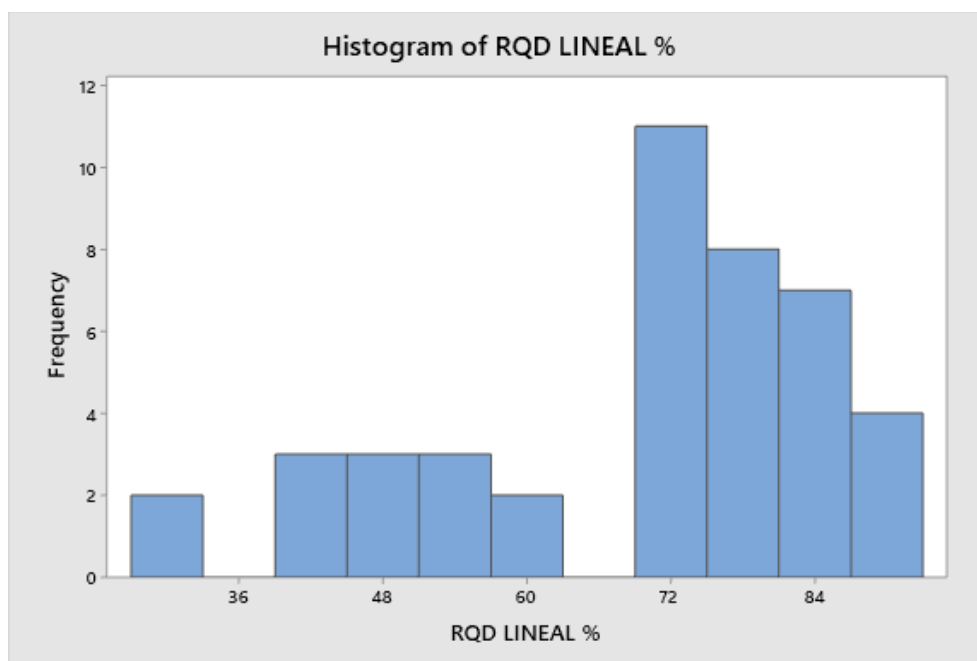


Figura 23 Histograma de RQD Lineal.

La gráfica presenta una distribución con tendencia hacia la derecha; lo cual confirma que se está presentando una asimetría o sesgo negativo. La desviación estándar al ser de 16.13 (baja), nos demuestra que los datos están agrupados cerca de la media. La curtosis por ser negativa (-0.12) hace referencia a una platicúrtica, es decir, una gráfica sutilmente aplanada. La varianza indica la existencia de una alta dispersión de datos.

Espaciado de las discontinuidades

Statistics

Variable	Total Count	Mean	StDev	Variance	Minimum	Median	Maximum	Mode	N for Mode
ESPACIADO (m)	43	0.4356	0.1067	0.0114	0.1600	0.4700	0.5800	0.48	7
Variable	Skewness		Kurtosis						
ESPACIADO (m)	-0.89		-0.01						

Figura 24 Análisis estadístico de Espaciado de las discontinuidades.

La moda (0.48 m) está contenida 7 veces en la distribución de los datos. Al poseer el sesgo un valor negativo, se deduce que la curva se generará una cierta concentración hacia el lado derecho. La curtosis tiene un valor negativo, entonces se puede afirmar que es Platicúrtica, es decir, no evidencia un apuntamiento significativo central de la gráfica. La desviación estándar presenta un valor muy bajo (0.10), indicando que los datos se encuentran muy cercanos a la media. El rango de los datos es de 0.42 m.

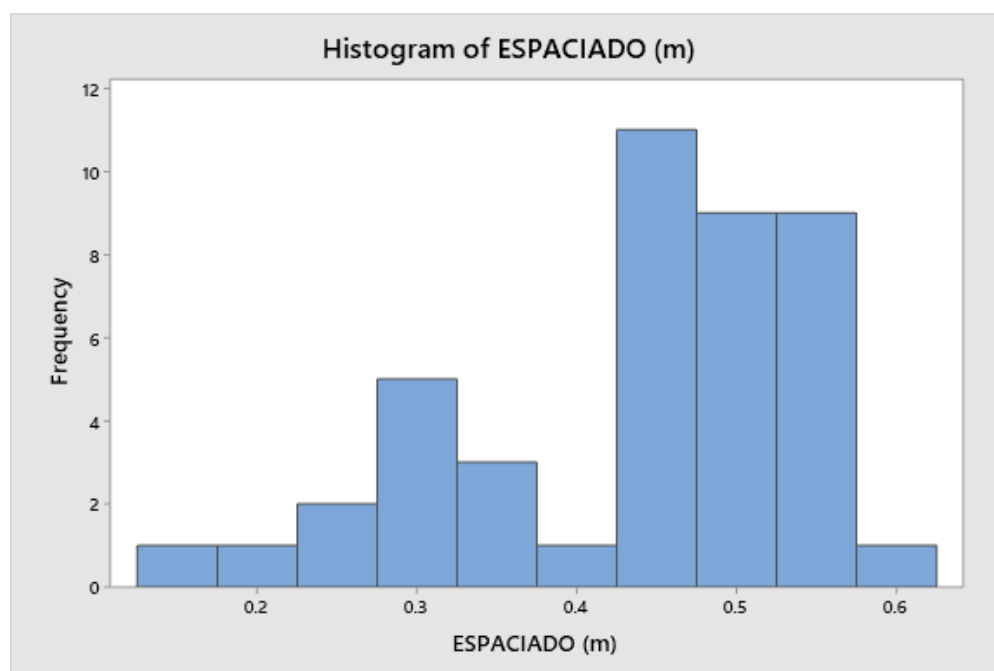


Figura 25 Histograma de Espaciado de las discontinuidades.

El gráfico presenta un ligero grado de inclinación hacia la derecha debido a que presenta un sesgo negativo (-0.89). Así mismo el grado de apuntamiento es bajo por tener una curtosis negativa (Platicúrtica) de 0.01; quiere decir que presenta una moderada concentración de los datos cercanos a la media. En cuanto a la desviación estándar (0.10) nos indica una buena agrupación de datos con respecto a la media.

3.5.1. Análisis exploratorio de datos

A través de este análisis podremos, mediante gráficas, hacer un comprensible estudio de los parámetros geomecánicos. Cada herramienta de análisis exploratorio de datos espaciales proporciona una vista diferente de los datos (Johnston, Ver Hoef, Krivoruchko, & Lucas, 2004).

Normalidad de datos

Para dicho propósito se consideró el uso del test de normalidad estadístico de Anderson-Darling; el cual nos determinó si los datos cumplen el supuesto de normalidad. Comparamos el valor p con el de significancia (α). Según (Minitab, 2019) por lo general, un valor de significancia de 0.05 funciona adecuadamente. El valor α indica un riesgo de 5% en concluir que:

- Valor $p \leq \alpha$: Los datos no siguen una distribución normal.
- Valor $p > \alpha$: Los datos siguen una distribución normal.

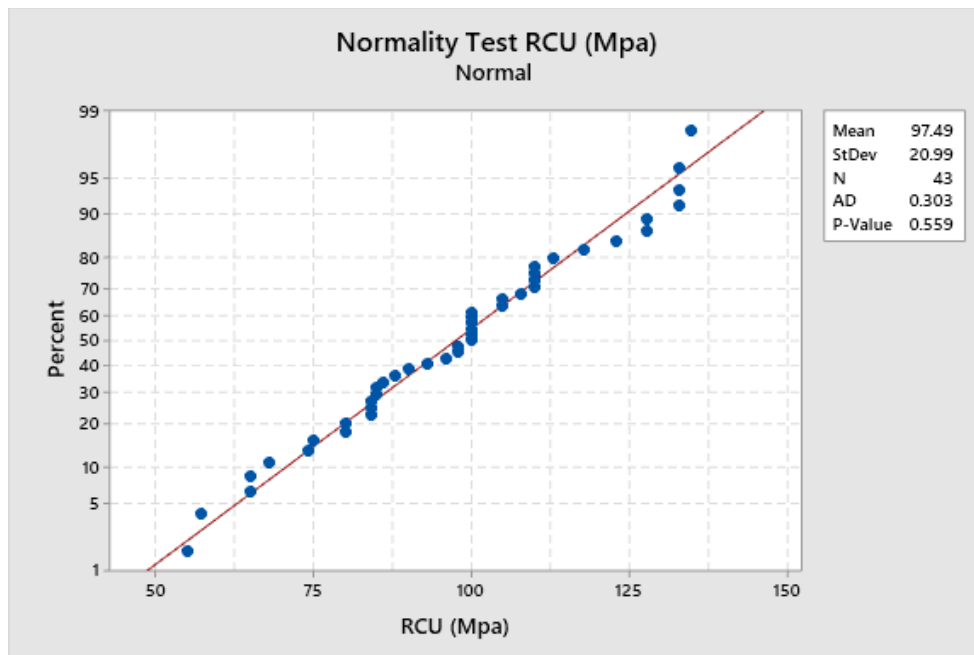


Figura 26 Test de normalidad RCU (Mpa).

La gráfica contiene una distribución de los datos moderadamente organizada con respecto a la línea de normalidad. El valor de probabilidad es $0.559 > \alpha$; por lo tanto, se puede afirmar que los datos de la muestra se ajustan a una distribución normal.

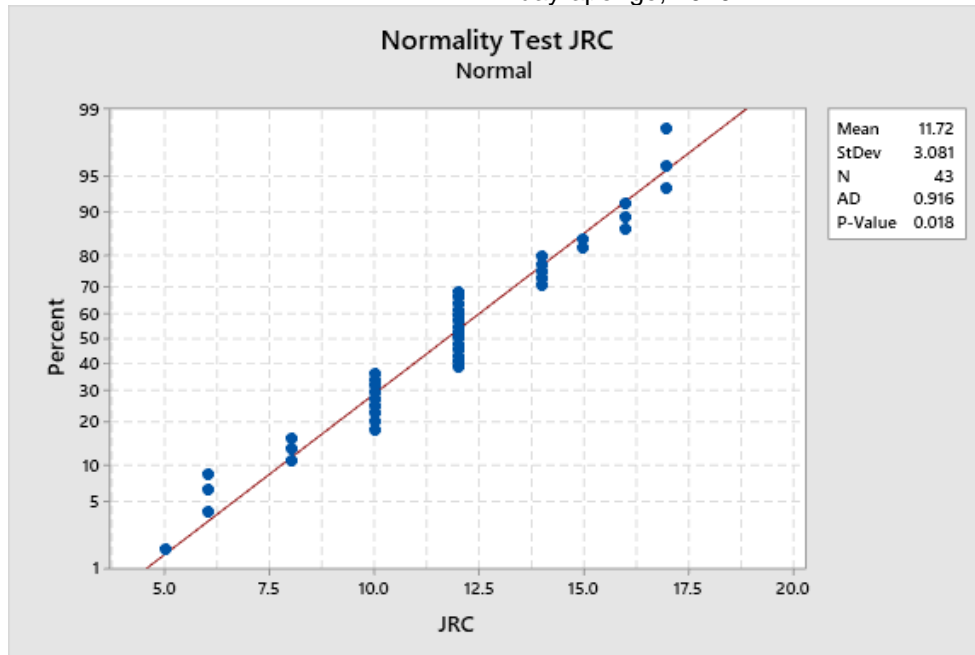


Figura 27 Test de normalidad JRC.

La distribución de los datos se encuentra débilmente organizada con respecto a la línea de normalidad. El valor de probabilidad es $0.018 \leq \alpha$; por lo tanto, se puede afirmar que los datos de la muestra no se ajustan a una distribución normal

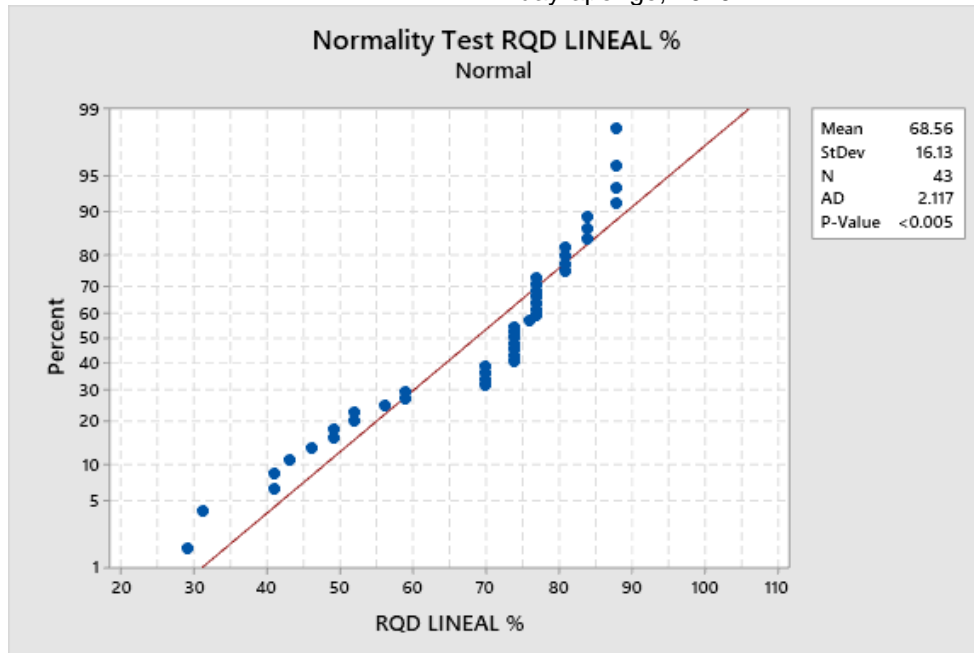


Figura 28 Test de normalidad RQD Lineal (%).

La distribución de los datos no sigue un comportamiento simétrico respecto a la línea de normalidad. El valor de probabilidad es $<0.005 \leq \alpha$; por lo tanto, se puede afirmar que los datos de la muestra no siguen un comportamiento normal.

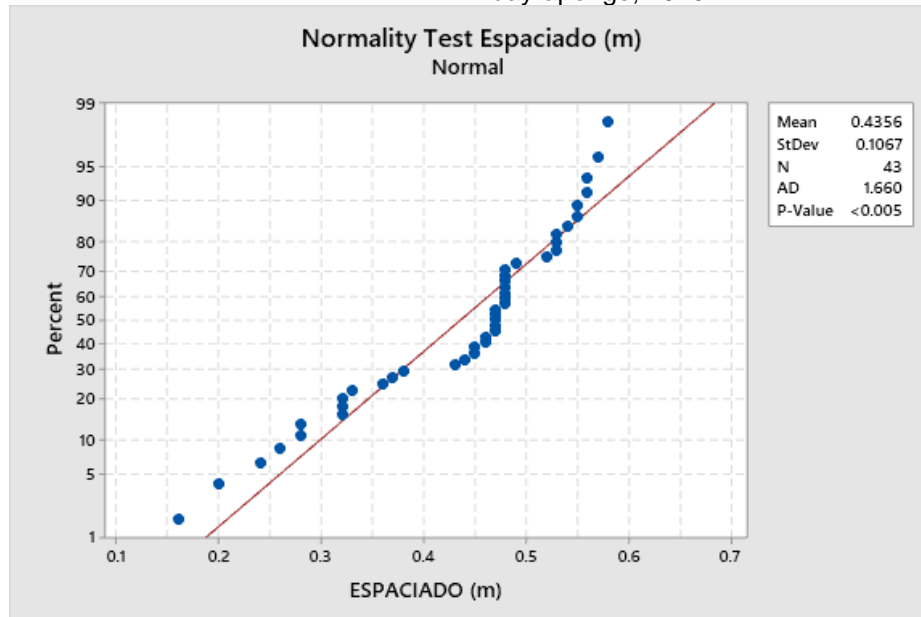


Figura 29 Test de normalidad Espaciado (m).

Se observa una distribución de datos que no se ajustan a la línea de normalidad, existen valores extremos dispersos con respecto a los demás. El valor de probabilidad es $<0.005 \leq \alpha$; por lo tanto, se puede afirmar que los datos de la muestra no siguen un comportamiento normal.

Análisis de tendencia

Esta herramienta proporciona una perspectiva tridimensional de los datos. Por lo tanto, es muy útil para poder identificar si existe alguna tendencia en el conjunto de datos muestreados. (Johnston, Ver Hoef, Krivoruchko, & Lucas, 2004). En el presente estudio se determinó que los parámetros geomecánicos analizados presentan una tendencia de cuadrática o de segundo orden.

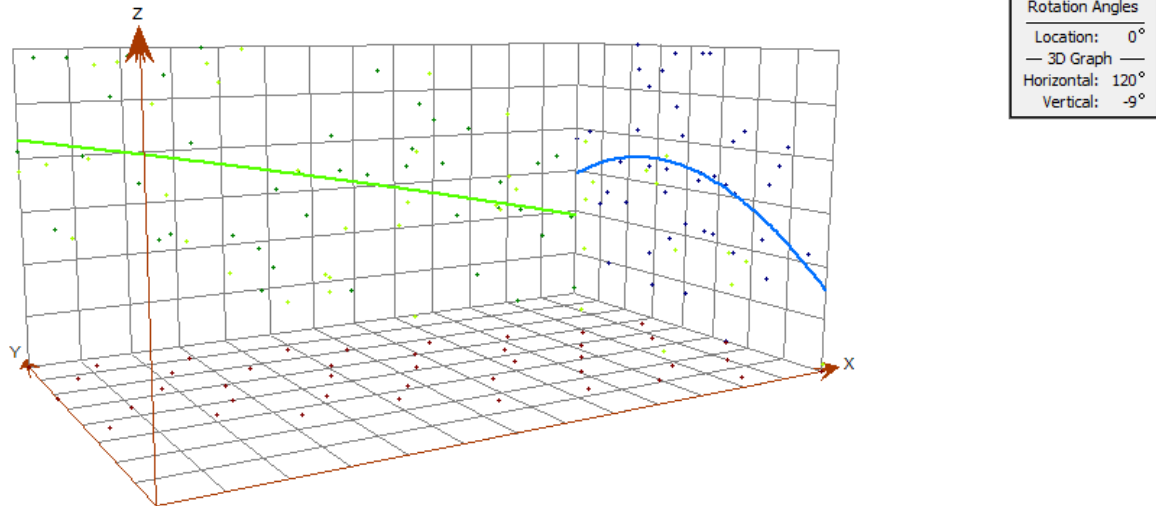


Figura 30 Análisis de tendencia RCU (Mpa).

La línea verde representada en el eje XZ nos indica la tendencia de Este a Oeste; por lo tanto, se afirma que los valores de los datos van disminuyendo conforme nos desplazamos de Oeste a Este. La línea azul del eje YZ representa la tendencia de Norte a Sur; por lo tanto, se afirma que los valores de los datos van disminuyendo conforme nos desplazamos al Sur.

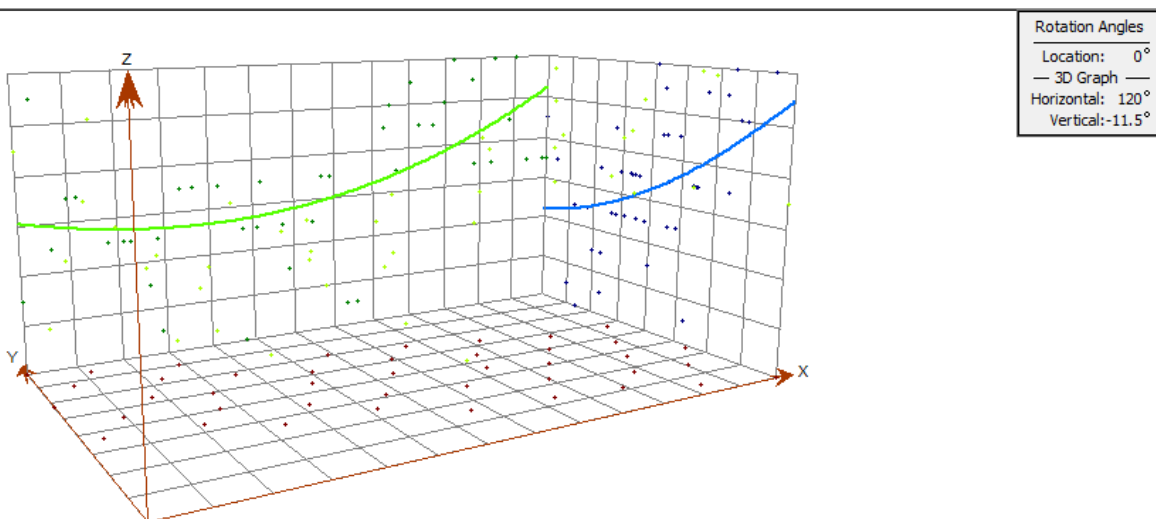


Figura 31 Análisis de tendencia JRC.

La línea verde indica la tendencia de Este a Oeste; por lo tanto, se afirma que los valores de los datos van aumentando conforme nos desplazamos de Oeste

a Este. La línea azul representa la tendencia de Norte a Sur; por lo tanto, se afirma que los valores de los datos van aumentando conforme nos desplazamos al Sur.

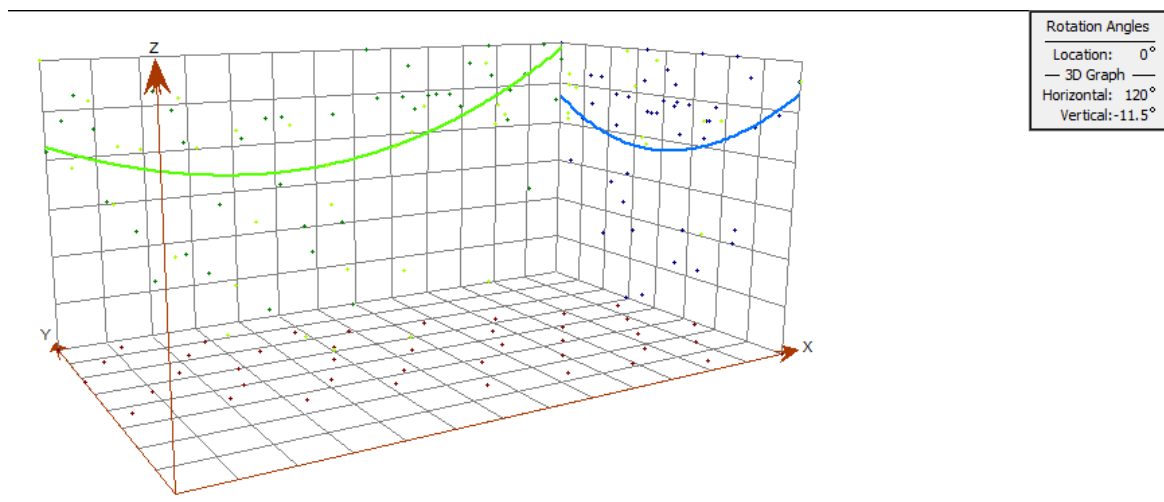


Figura 32 Análisis de tendencia RQD Lineal (%).

La línea verde representada en el eje XZ nos indica la tendencia de Este a Oeste; por lo tanto, se afirma que los valores de los datos van aumentando conforme nos desplazamos al Este. La línea azul del eje YZ representa la tendencia de Norte a Sur; por lo tanto, se afirma que los valores de los datos van aumentando conforme nos desplazamos al Sur.

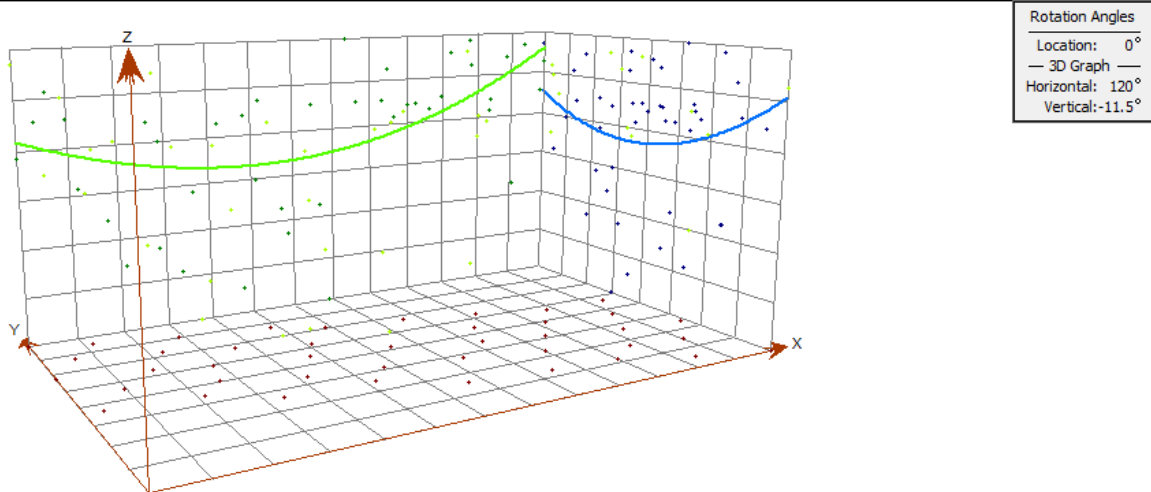


Figura 33 Análisis de tendencia Espaciado (m).

La línea verde representada en el eje XZ evidencian que los valores de los datos van aumentando conforme nos desplazamos al Este. La línea azul del eje YZ representa un aumento de Norte a Sur; por lo tanto, se afirma que los valores de los datos van aumentando conforme nos desplazamos al Sur.

3.5.2. Análisis de correlación bivarial y multivarial

Este análisis mide la fuerza y dirección de la asociación de dos variables. Se optó por el coeficiente de correlación de Pearson (r), siendo el método más común y que mide la relación lineal entre dos variables continuas (Minitab, 2019).

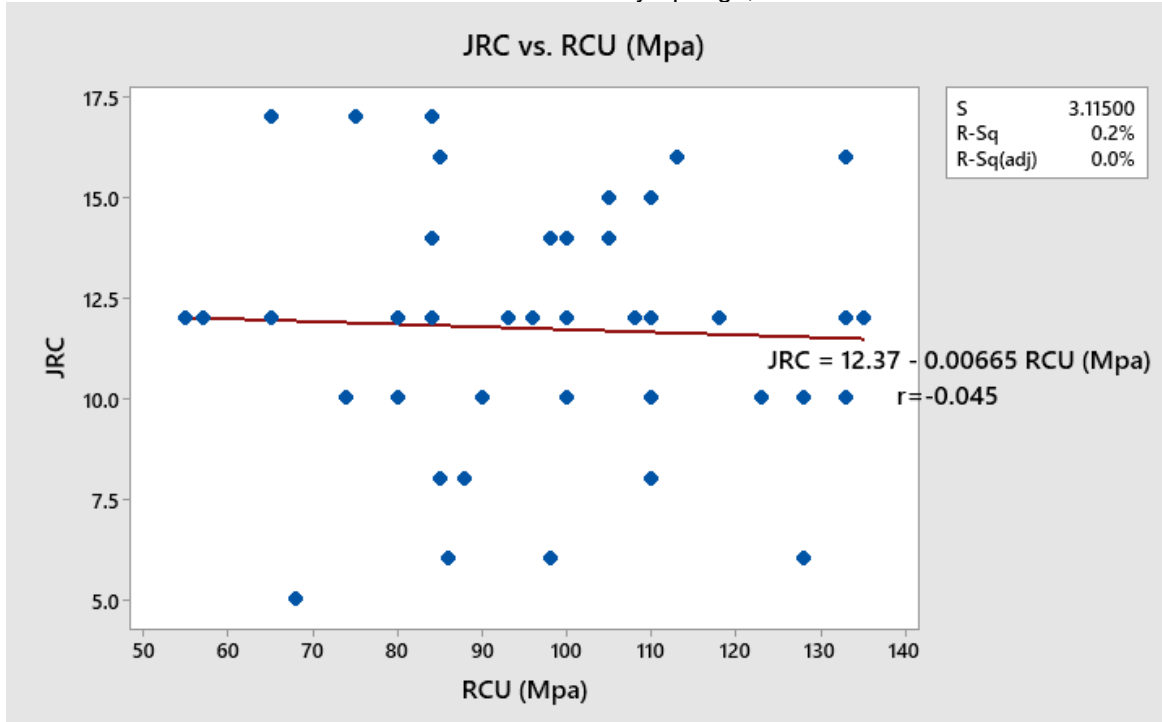


Figura 34 Análisis bivariado JRC vs. RCU (Mpa).

El gráfico presenta una correlación cercana a cero (0.045), por lo que se afirma que las variables son independientes o no existe una buena relación lineal entre ellas. El valor negativo de r hace referencia a una mínima relación inversa de las variables. El valor de S 3.15 (error típico) indica la distancia que existe entre los valores de las variables y la línea de regresión.

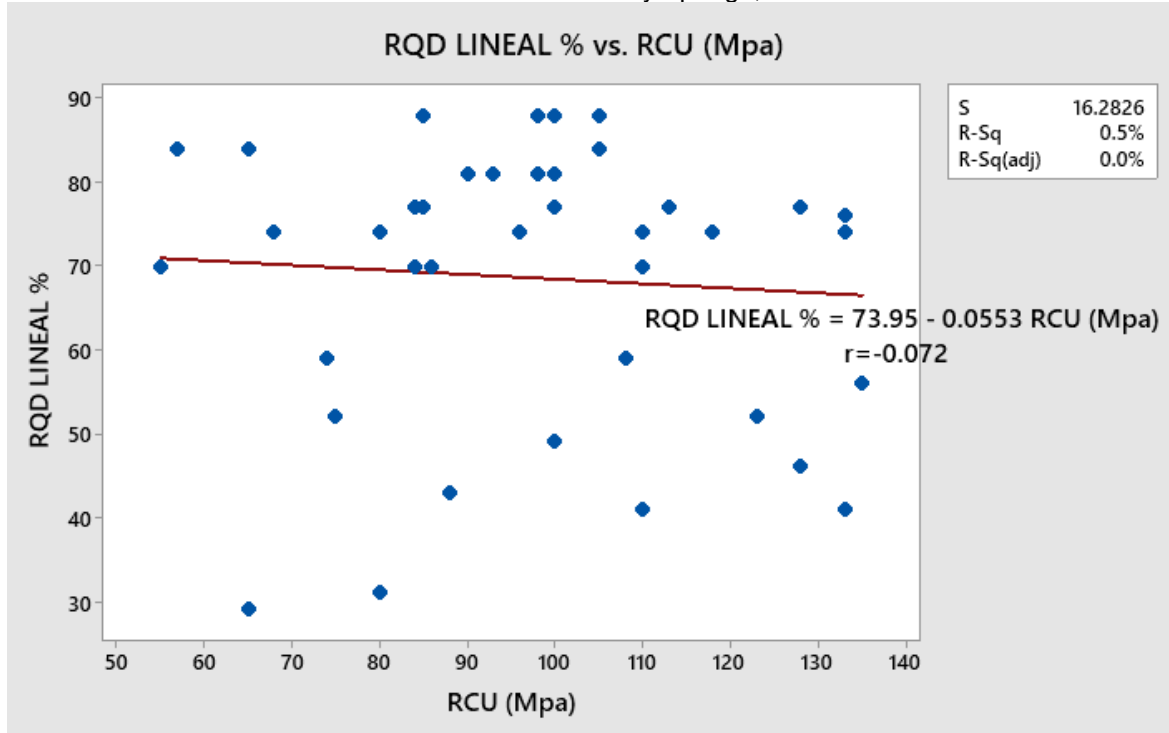


Figura 35 Análisis bivariado RQD Lineal vs. RCU (Mpa).

El gráfico presenta una correlación cercana a cero (0.072), por lo que se afirma que las variables son independientes o no existe una buena relación lineal entre ellas. El valor negativo de r hace referencia a una mínima relación inversa de las variables. El valor de S 16.28 (error típico) indica la distancia que existe entre los valores de las variables y la línea de regresión.

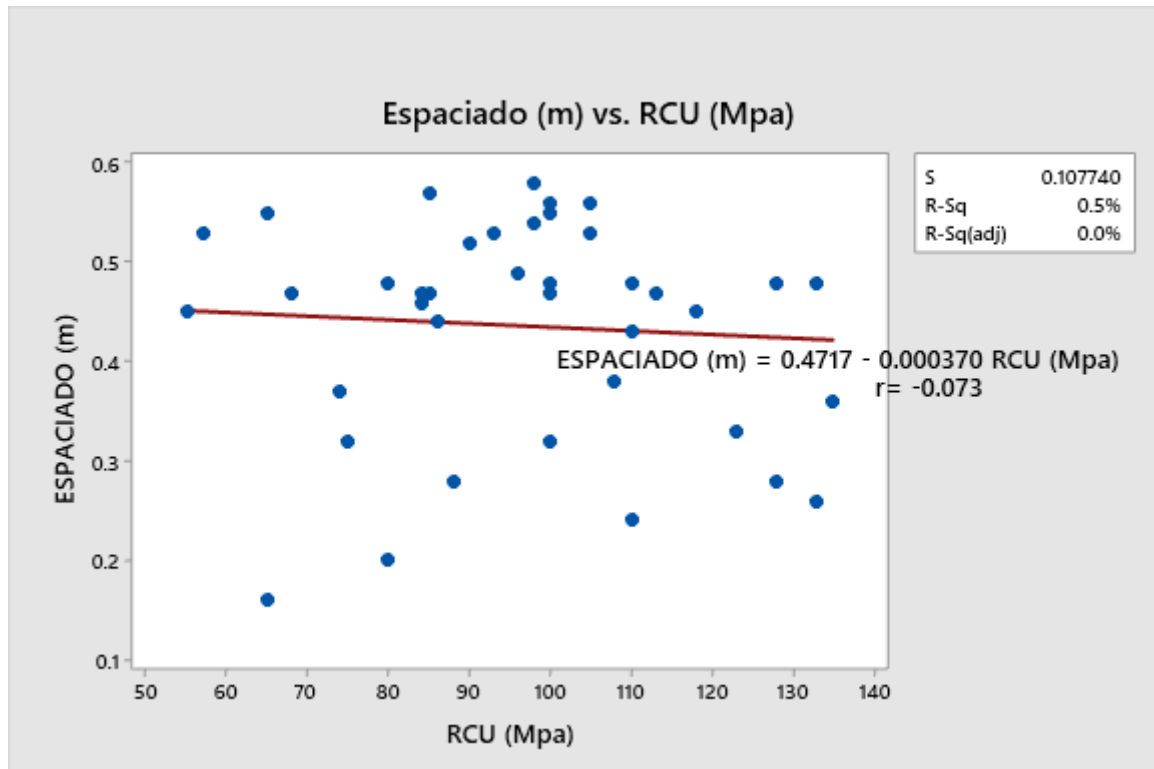


Figura 36 Análisis bivariado Espaciado (m) vs. RCU (Mpa).

El gráfico presenta una correlación cercana a cero (0.073), por lo que se afirma que las variables son independientes o no existe una buena relación lineal entre ellas. El valor negativo de r hace referencia a una mínima relación inversa de las variables. El valor de S 0.10 (error típico) indica la distancia que existe entre los valores de las variables y la línea de regresión.

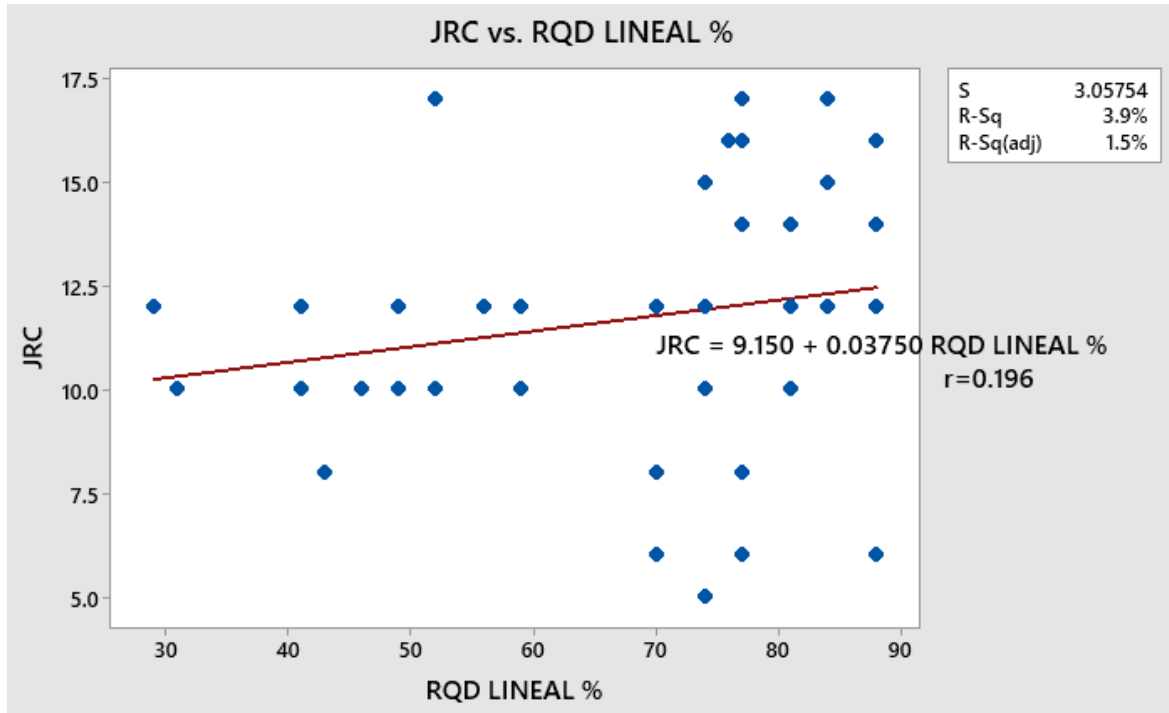


Figura 37 Análisis bivariado JRC vs. RQD Lineal %.

El gráfico presenta una correlación cercana a cero (0.196), por lo que se afirma que las variables son independientes o no existe una buena relación lineal entre ellas. El valor positivo de r hace referencia a una mínima relación positiva de las variables. El valor de S 3.05 (error típico) indica la distancia que existe entre los valores de las variables y la línea de regresión.

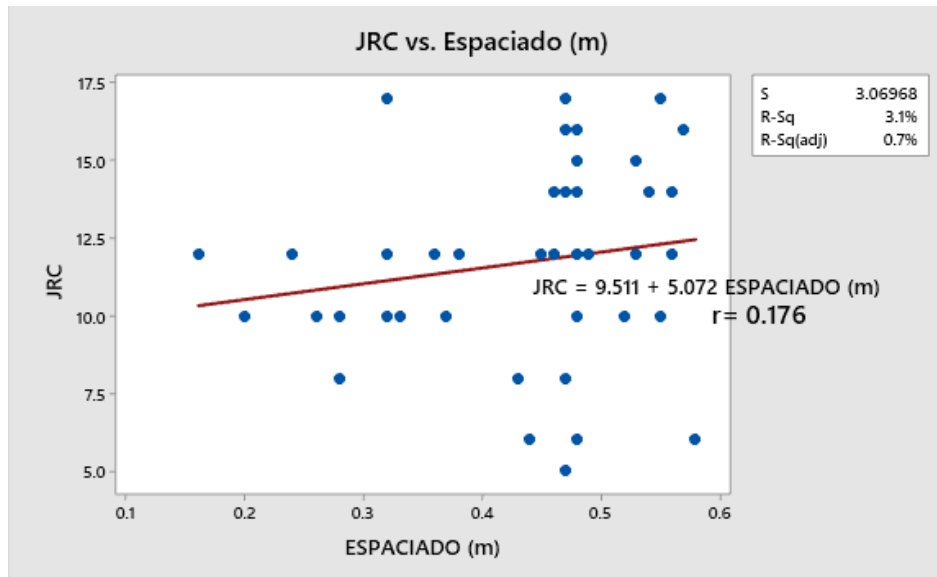


Figura 38 Análisis bivariado JRC vs. Espaciado (m).

El gráfico presenta una correlación cercana a cero (0.176). R-sq por ser 3.1%, indica que el modelo matemático obtenido no es muy confiable, por lo que se afirma que las variables son independientes o no existe una buena relación lineal entre ellas. El valor de S 3.06 (error típico) indica la distancia que existe entre los valores de las variables y la línea de regresión.

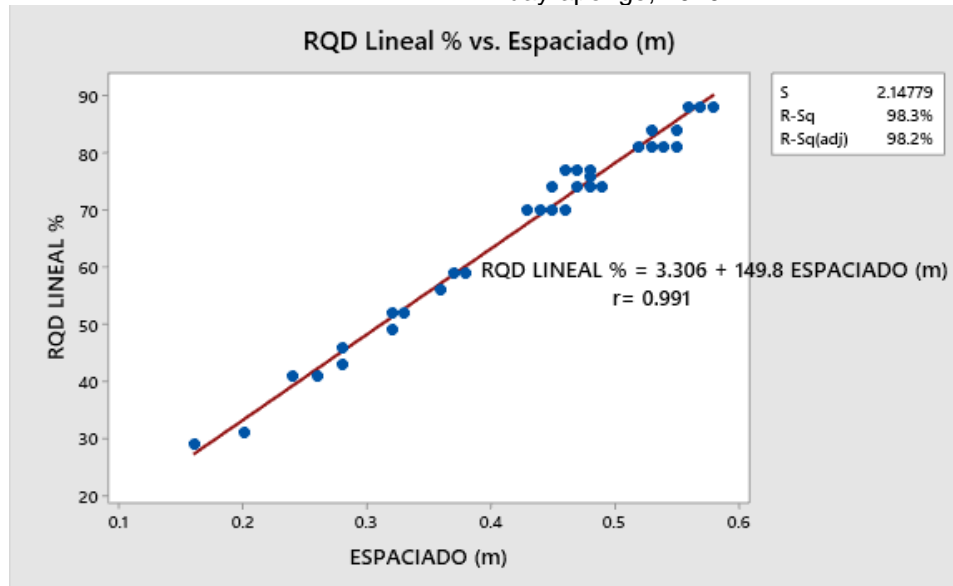


Figura 39 Análisis bivariado RQD Lineal % vs. Espaciado (m).

El gráfico presenta una muy buena correlación (0.991). R-sq por ser 98.3%, indica que el modelo matemático obtenido es muy confiable, por lo que se afirma que las variables son dependientes o existe una buena relación lineal entre ellas. El valor de S 2.14 (error típico) indica la baja distancia que existe entre los valores de las variables y la línea de regresión.

Correlation Matrix

	RCU (Mpa)	JRC	RQD LINEAL %
JRC	-0.045		
RQD LINEAL %	-0.072	0.196	
ESPACIADO (m)	-0.073	0.176	0.991

Cell Contents
Pearson correlation

Figura 40 Matriz de correlación multivariable.

Las únicas variables que presentan una muy buena correlación es RQD Lineal % y Espaciado (m). Mientras que en las demás variables evidencian una baja correlación entre ellas; por lo tanto, no presentan una buena relación lineal entre ellas o son independientes.

3.5.3. Variografía

Uno de los principales objetivos de la variografía es explorar y cuantificar la dependencia espacial, también llamada autocorrelación espacial. La autocorrelación espacial cuantifica la suposición de que las cosas que están más cerca son más parecidas que las que están más separadas de las variables regionalizadas (Johnston, Ver Hoef, Krivoruchko, & Lucas, 2004).

Para el análisis de variogramas experimentales de cada parámetro geomecánico generado con el software ArcGIS, se consideró 3 tipos de modelos (Esférico, Exponencial y Gaussiano). A cada uno de ellos se les hizo un ajuste angular de 0°, 45°, 90° y 135°, para poder determinar cuál es el que se adecúa mejor al variograma.

Resistencia a la compresión uniaxial (RCU)

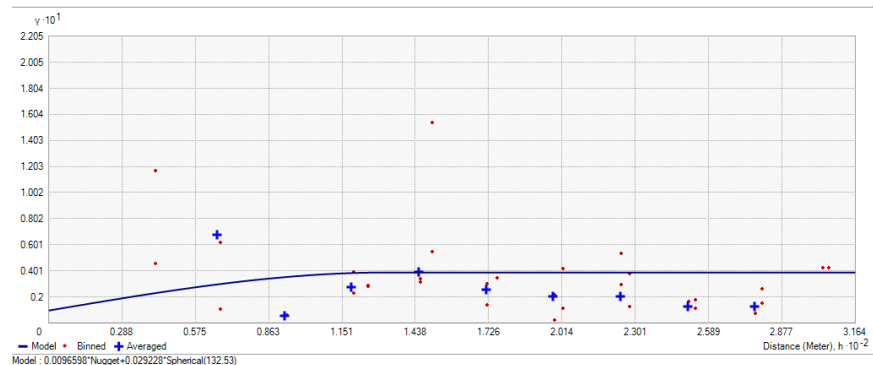


Figura 41 Modelo esférico con ángulo de 0°.

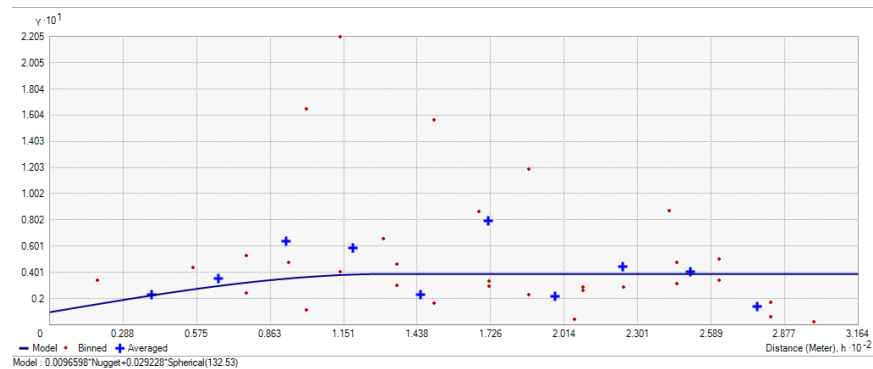


Figura 42 Modelo esférico con ángulo de 45°.

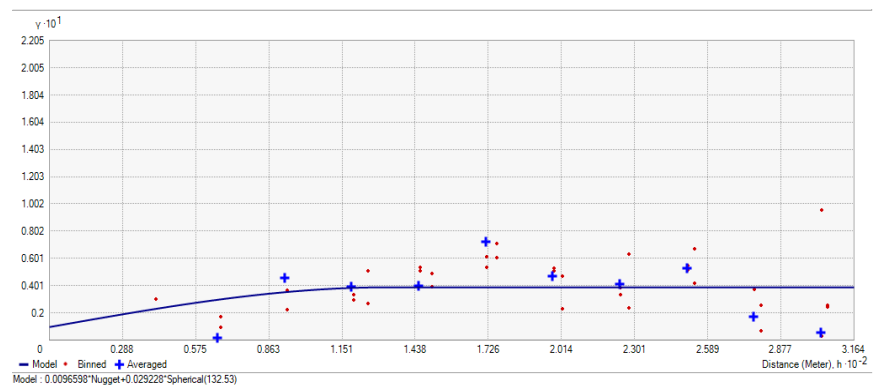


Figura 43, Modelo esférico con ángulo de 90°.

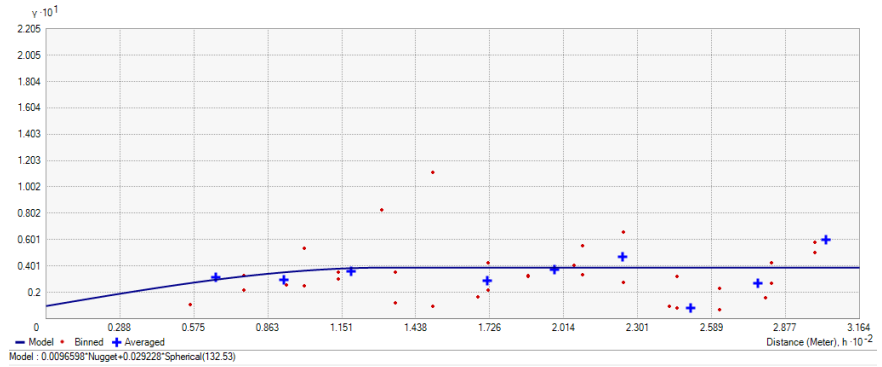


Figura 44 Modelo esférico con ángulo de 135° .

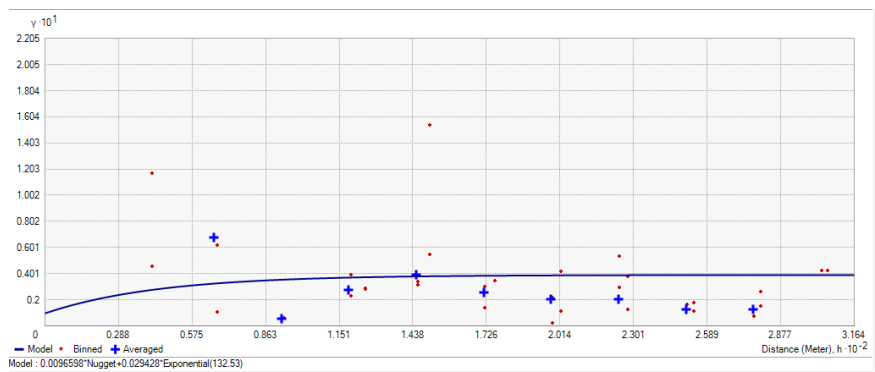


Figura 45 Modelo exponencial con ángulo de 0° .

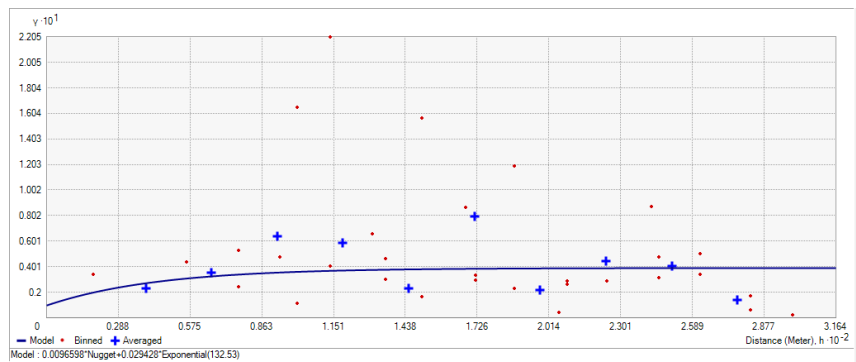


Figura 46 Modelo exponencial con ángulo de 45° .

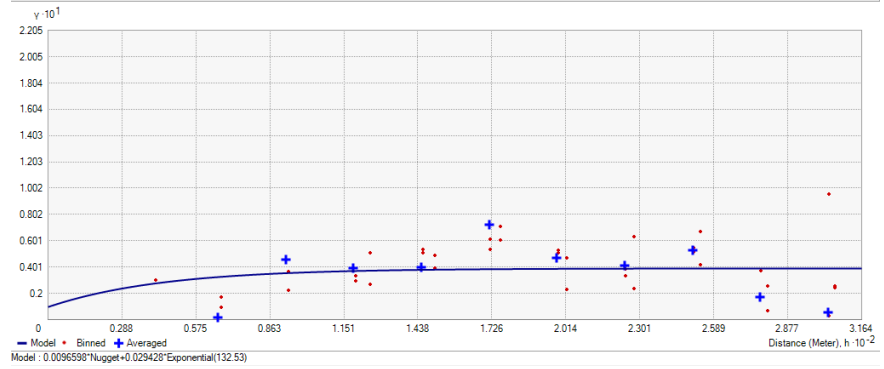


Figura 47 Modelo Exponencial con ángulo de 90°.

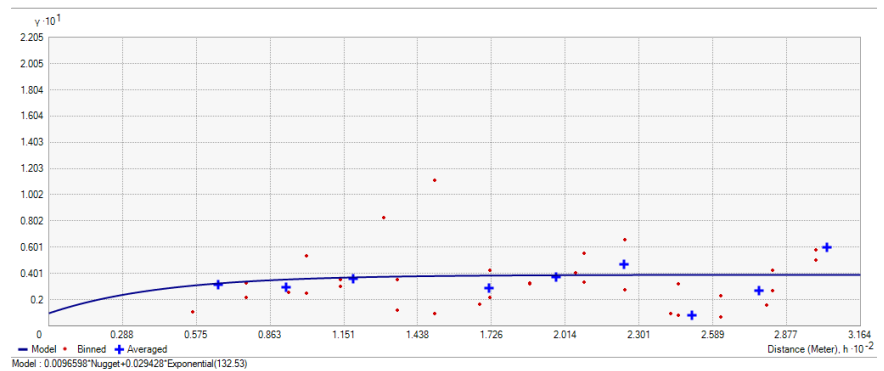


Figura 48 Modelo exponencial con ángulo de 135°.

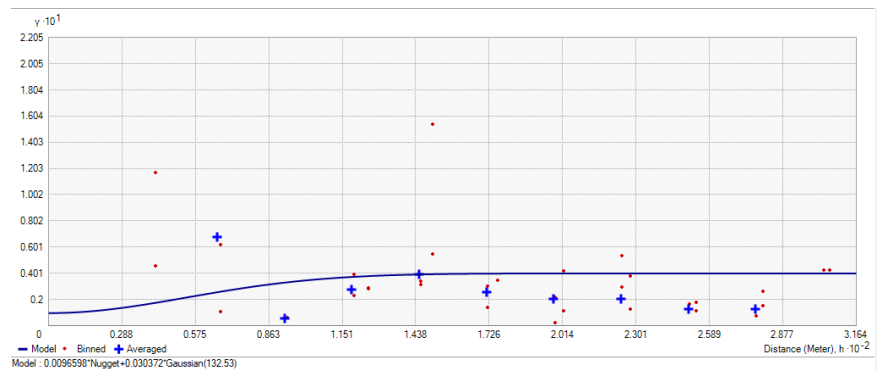


Figura 49 Modelo Gaussiano con ángulo de 0°.

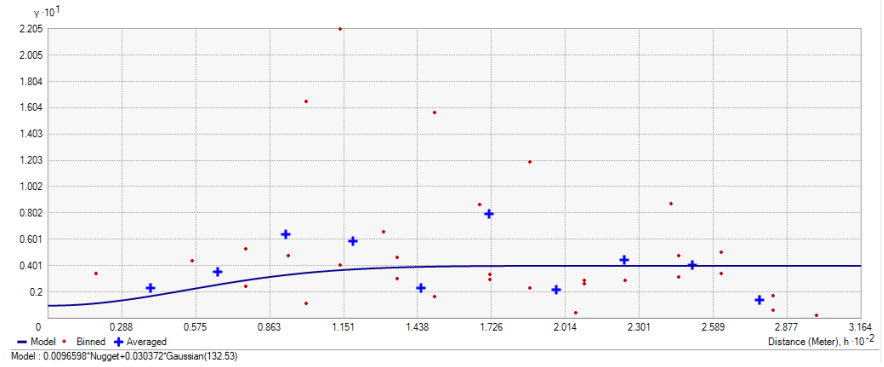


Figura 50 Modelo Gaussiano con ángulo de 45°.

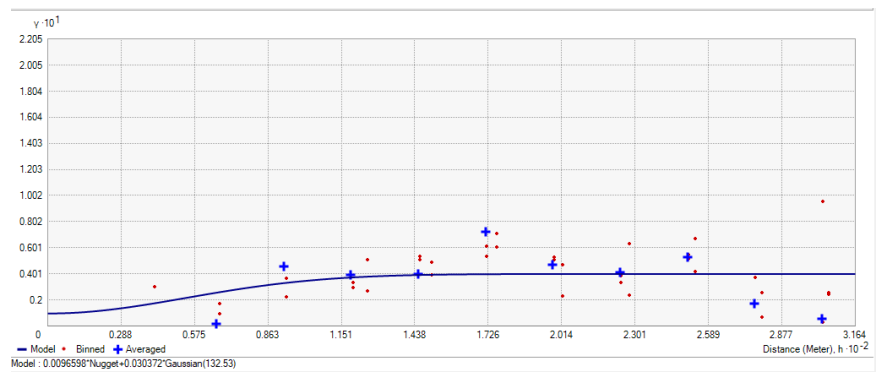


Figura 51 Modelo Gaussiano con ángulo de 90°.

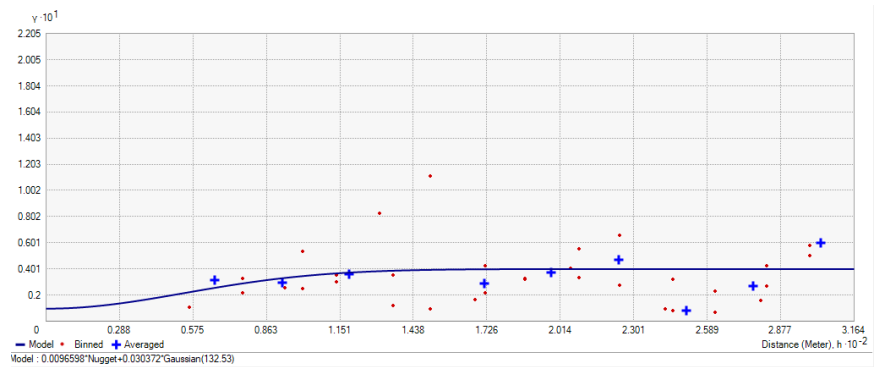


Figura 52 Modelo Gaussiano con ángulo de 135°.

Coefficiente de rugosidad de las juntas (JRC)

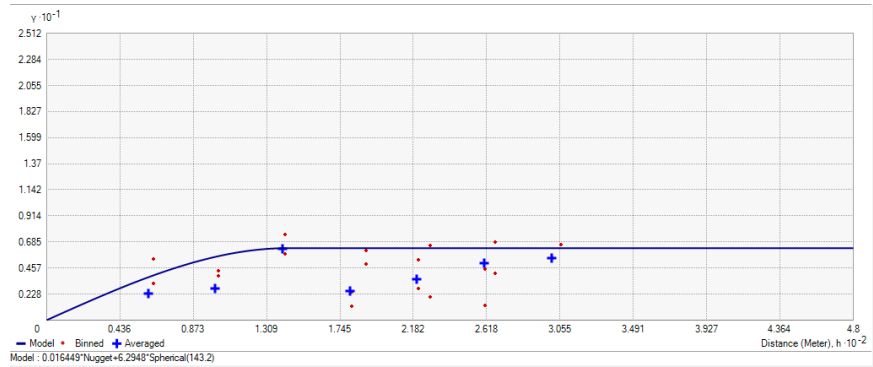


Figura 53 Modelo esférico con ángulo de 0° .

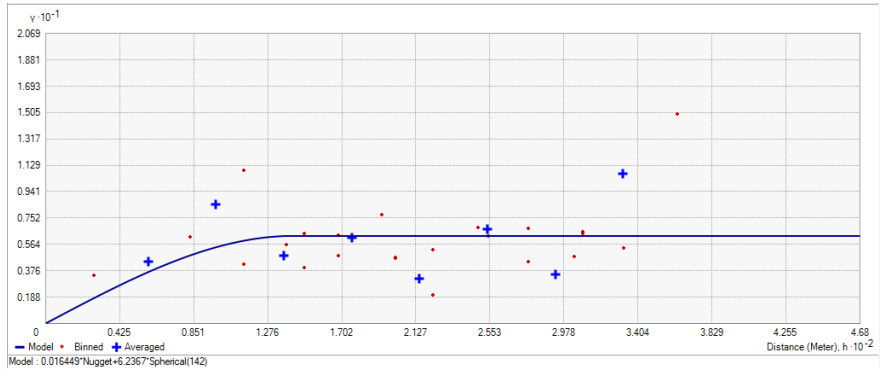


Figura 54 Modelo esférico con ángulo de 45° .

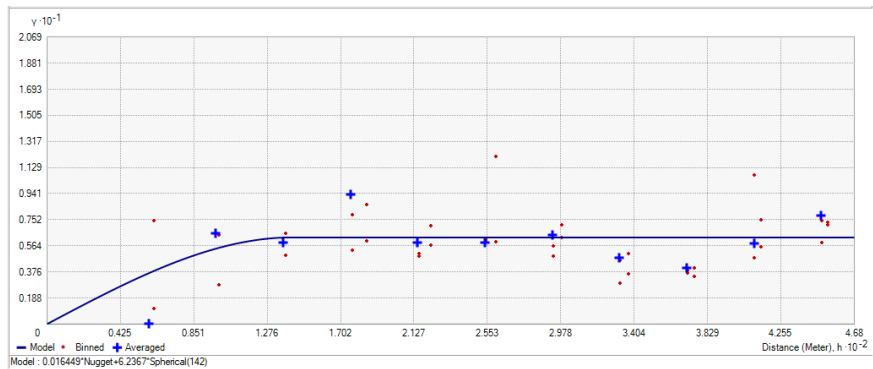


Figura 55 Modelo esférico con ángulo de 90° .

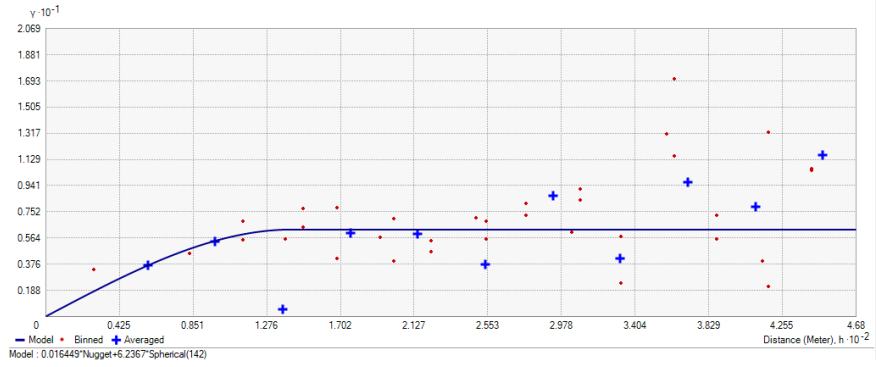


Figura 56 Modelo esférico con ángulo de 135°.

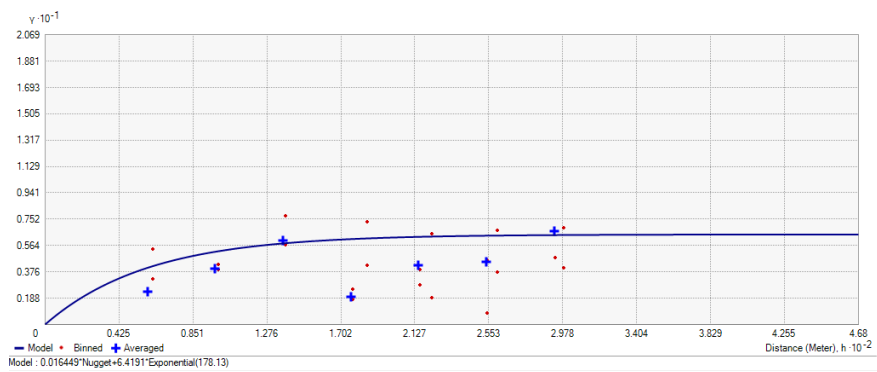


Figura 57 Modelo exponencial con ángulo de 0°.

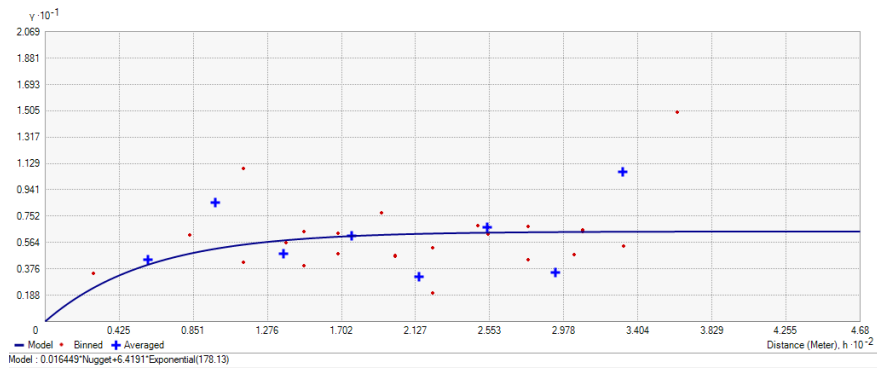


Figura 58 Modelo exponencial con ángulo de 45°.

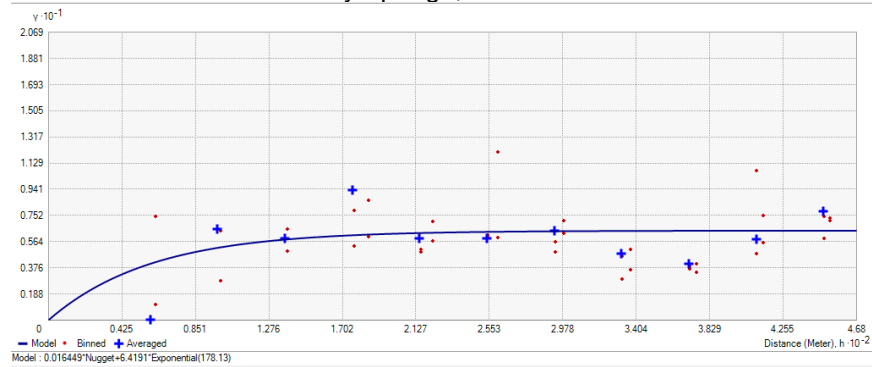


Figura 59 Modelo exponencial con ángulo de 90° .

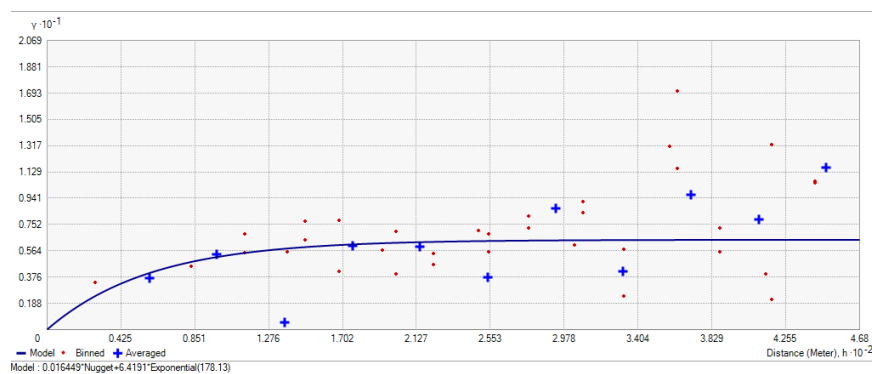


Figura 60 Modelo exponencial con ángulo de 135° .

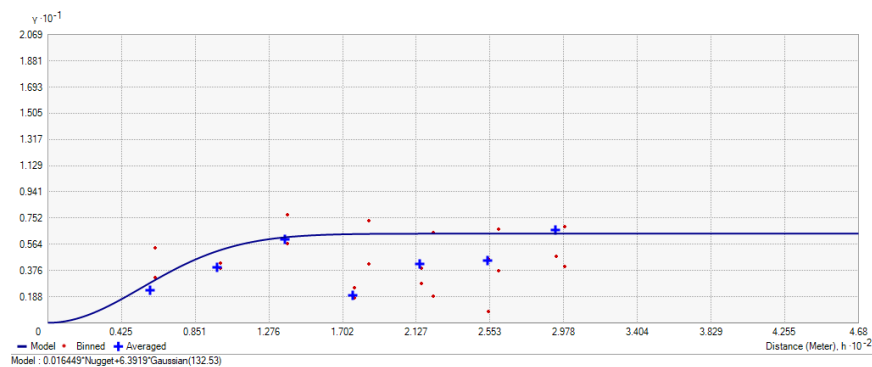


Figura 61 Modelo gaussiano con ángulo de 0° .

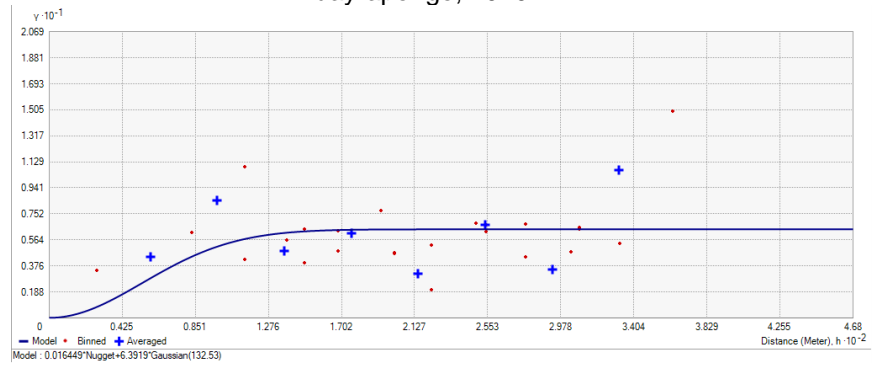


Figura 62 Modelo gaussiano con ángulo de 45° .

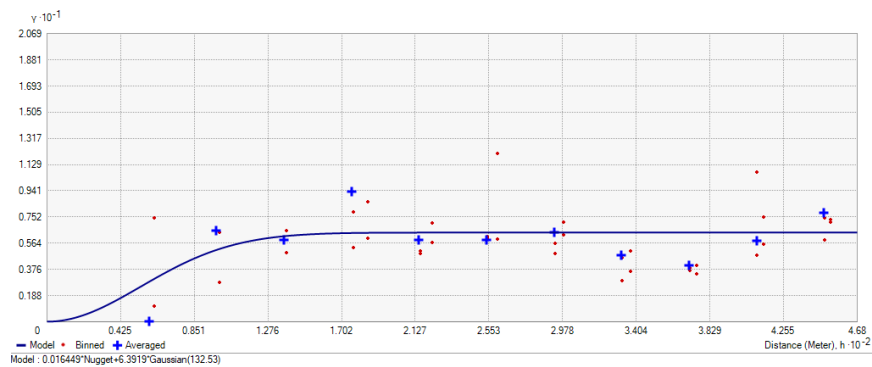


Figura 63 Modelo gaussiano con ángulo de 90° .

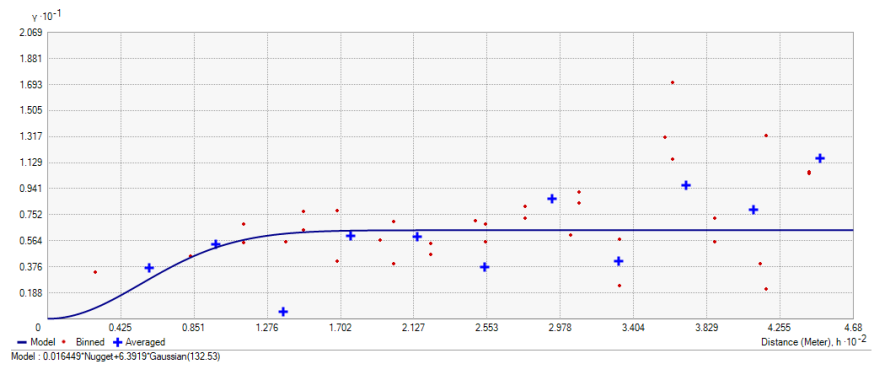


Figura 64 Modelo gaussiano con ángulo de 135° .

Designación de la calidad de la roca (RQD)

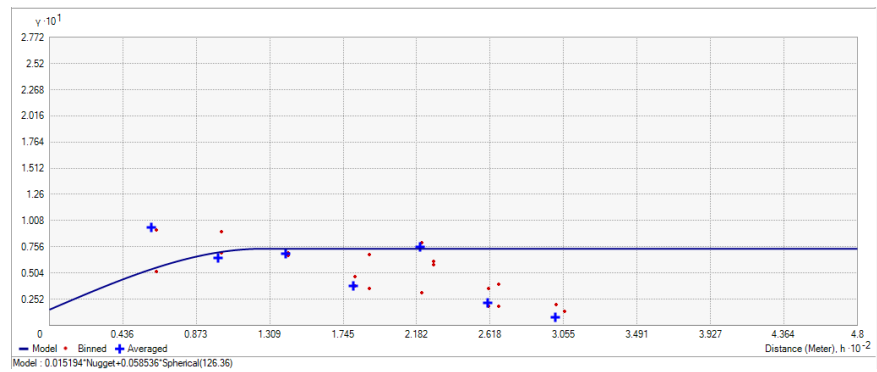


Figura 65 Modelo esférico con ángulo de 0°.

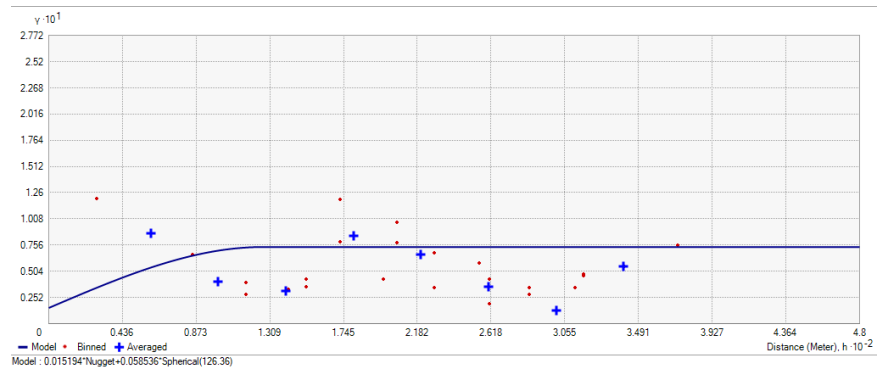


Figura 66 Modelo esférico con ángulo de 45°.

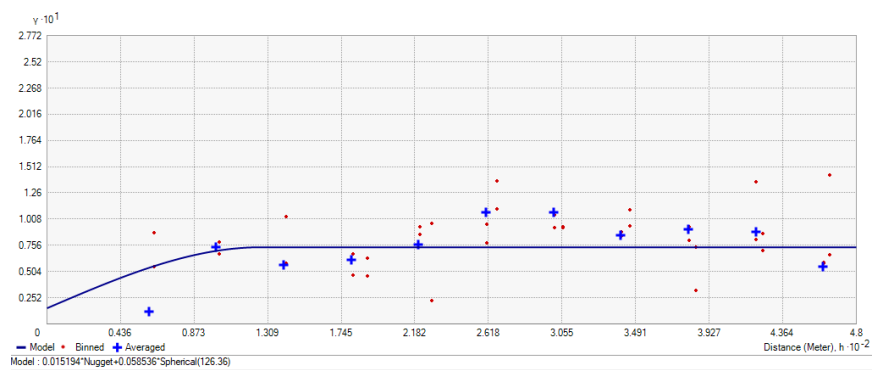


Figura 67 Modelo esférico con ángulo de 90°.

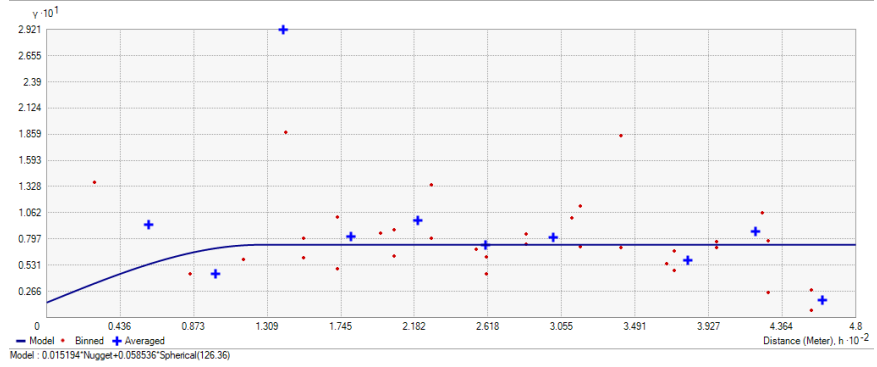


Figura 68 Modelo esférico con ángulo de 135°.

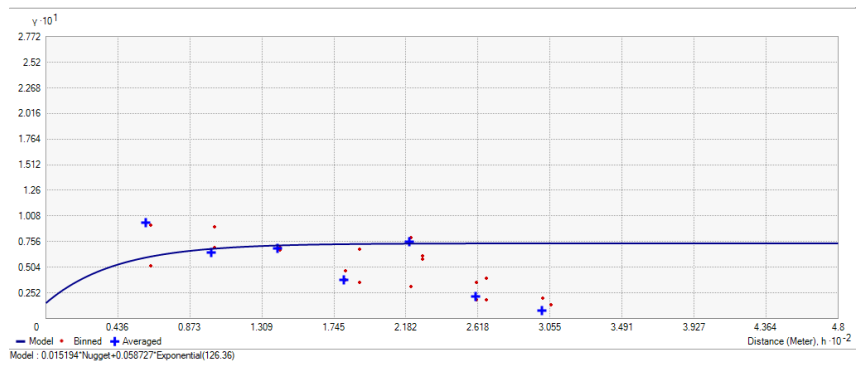


Figura 69 Modelo exponencial con ángulo de 0°.

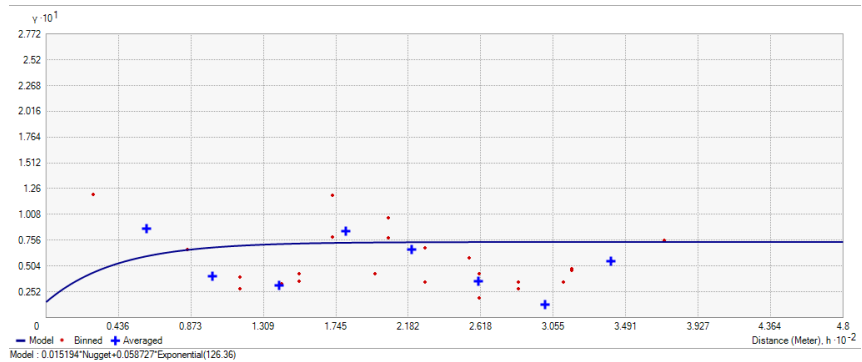


Figura 70 Modelo exponencial con ángulo de 45°.

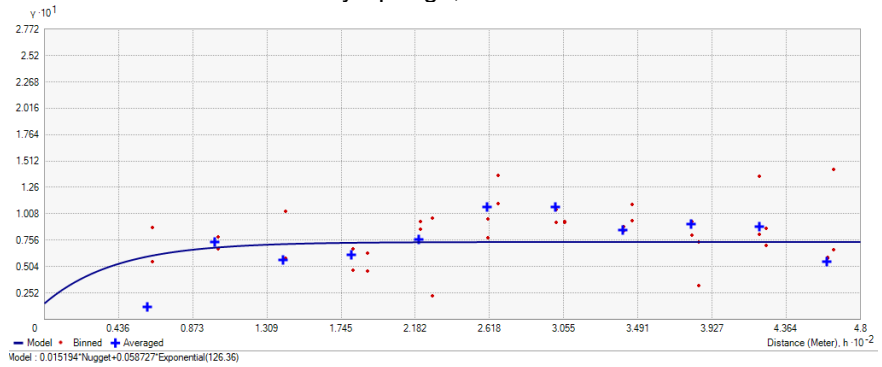


Figura 71 Modelo exponencial con ángulo de 90°.

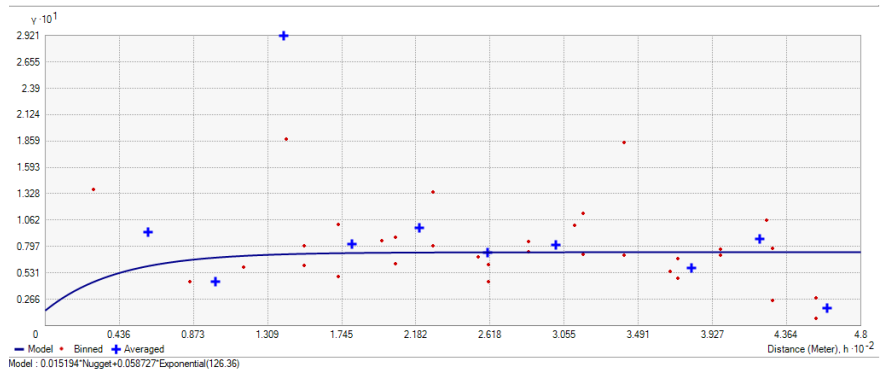


Figura 72 Modelo exponencial con ángulo de 90°.

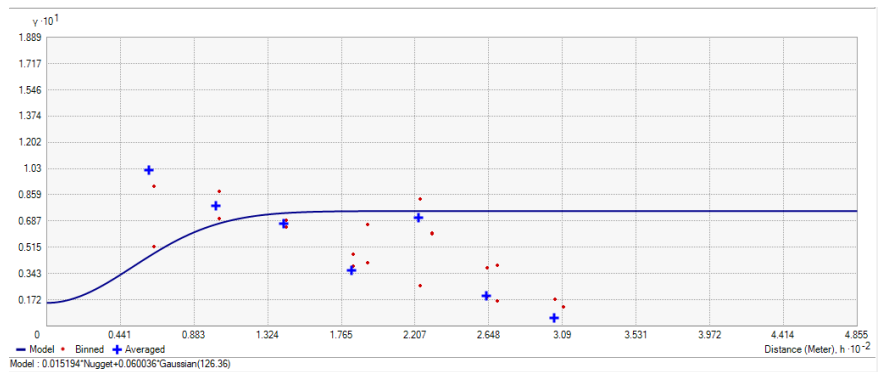


Figura 73 Modelo gaussiano con ángulo de 0°.

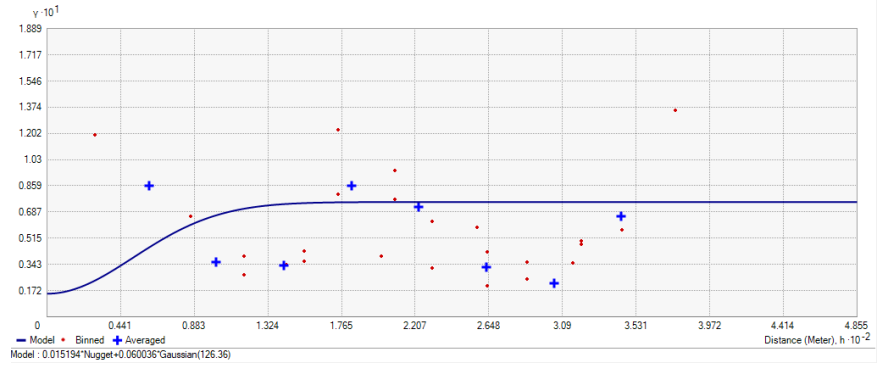


Figura 74 Modelo gaussiano con ángulo de 45°.

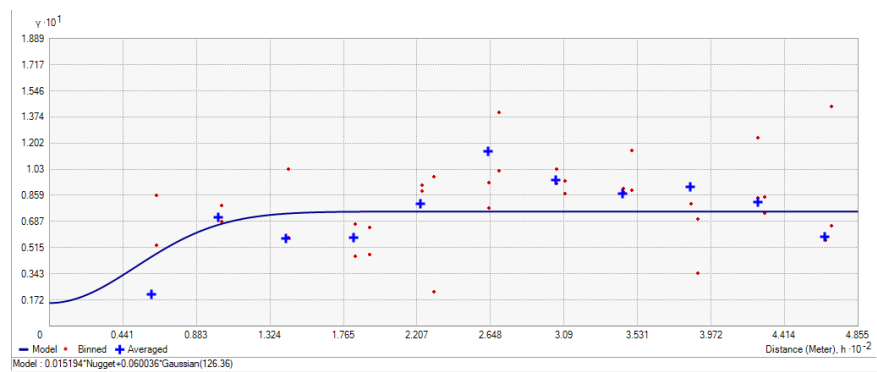


Figura 75 Modelo gaussiano con ángulo de 90°.

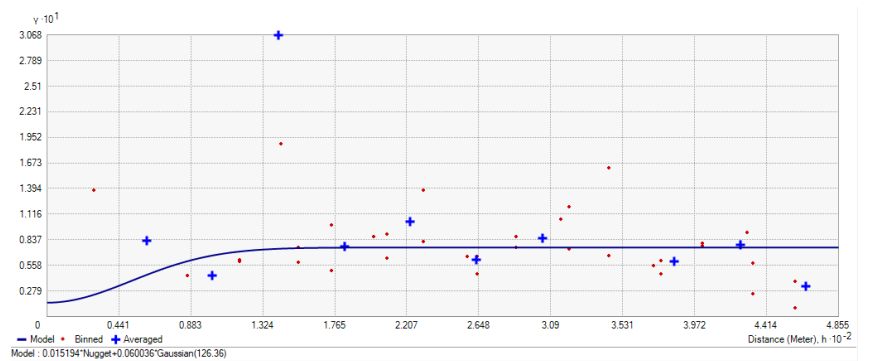


Figura 76 Modelo gaussiano con ángulo de 135°.

Espaciado de las discontinuidades

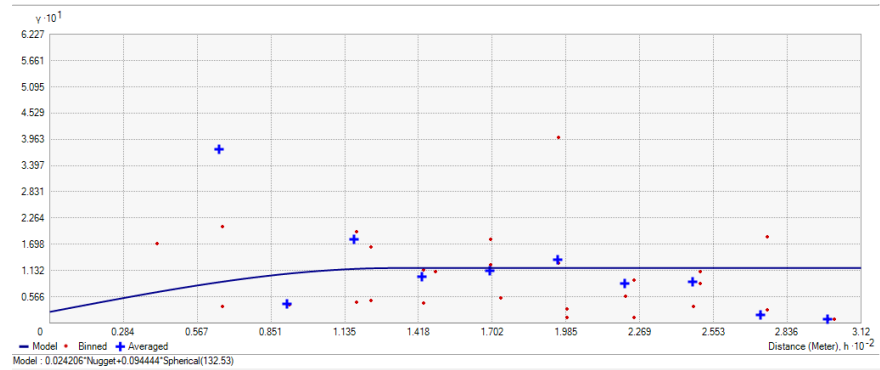


Figura 77 Modelo esférico con ángulo de 0°.

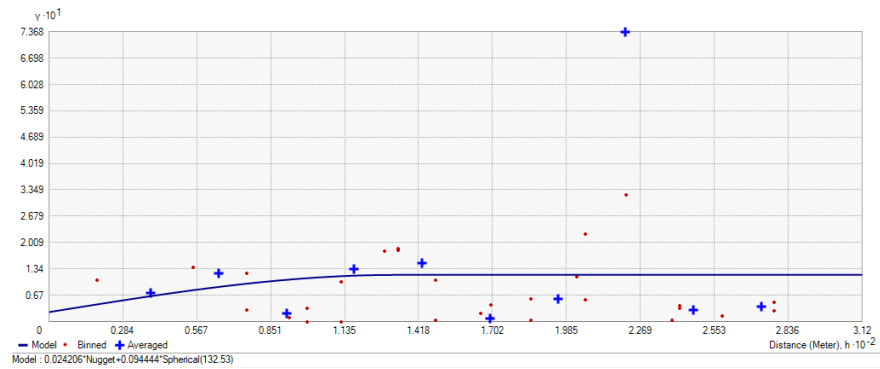


Figura 78 Modelo esférico con ángulo de 45°.

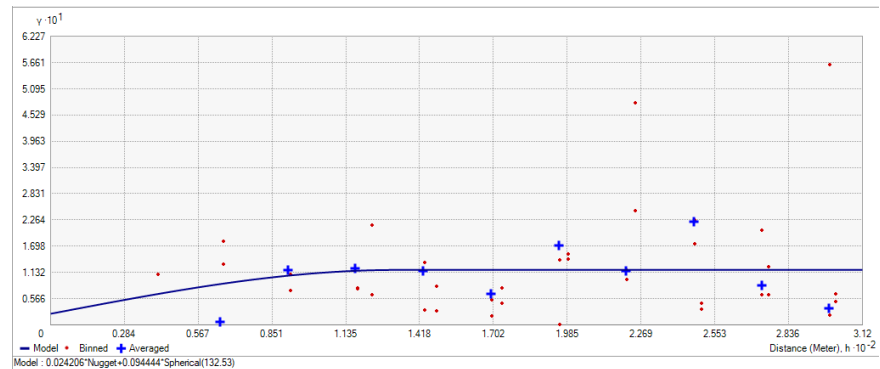


Figura 79 Modelo esférico con ángulo de 90°.

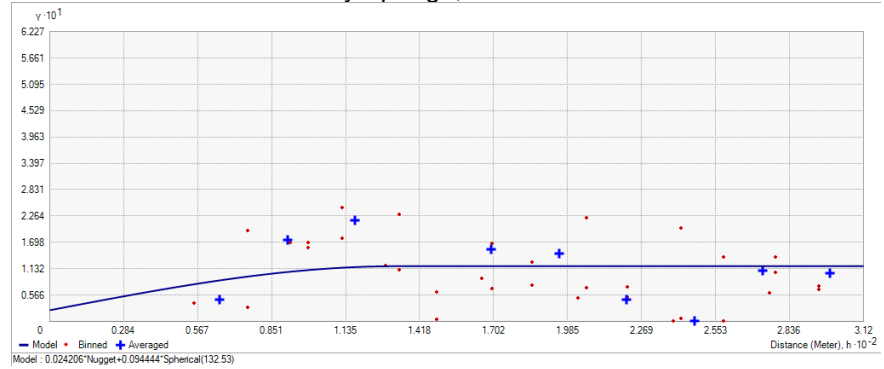


Figura 80 Modelo esférico con ángulo de 135°.

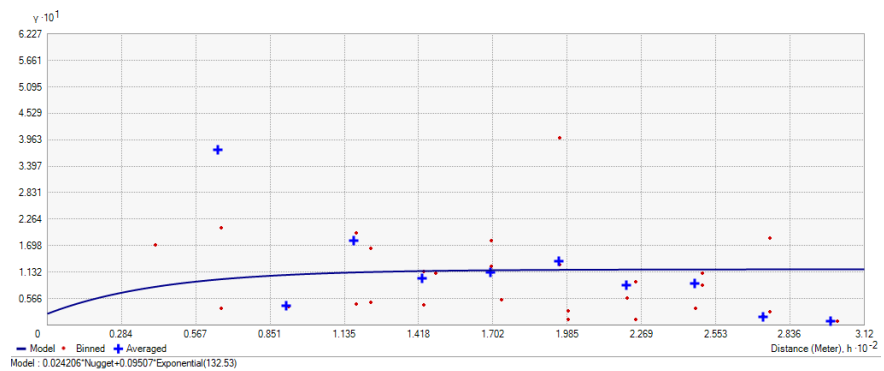


Figura 81 Modelo exponencial con ángulo de 0°.

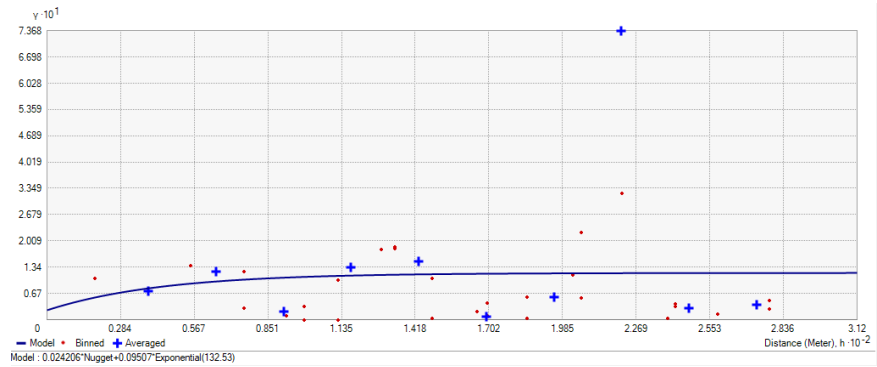


Figura 82 Modelo exponencial con ángulo de 45°.

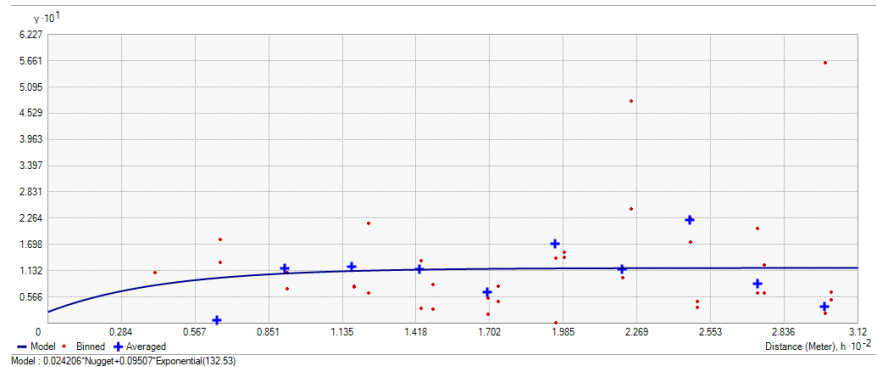


Figura 83 Modelo exponencial con ángulo de 90°.

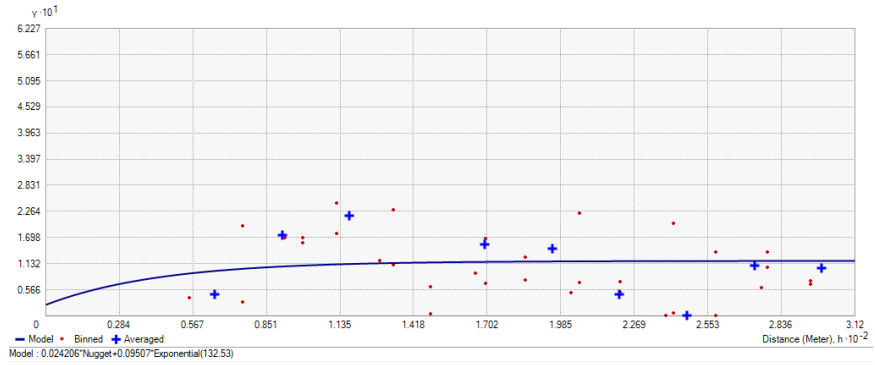


Figura 84 Modelo exponencial con ángulo de 135°.

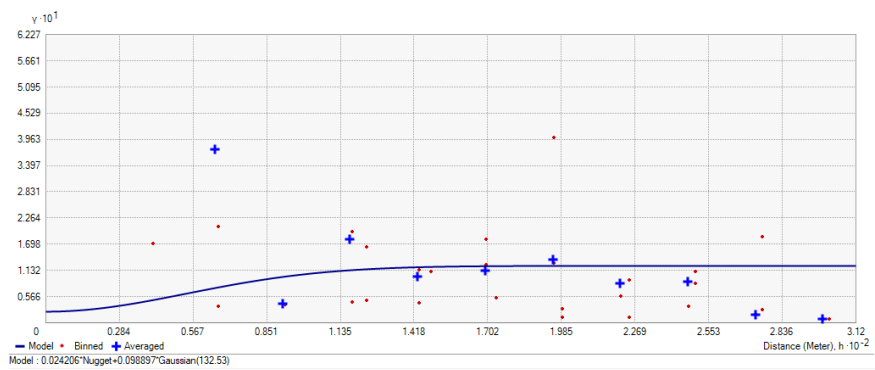


Figura 85 Modelo gaussiano con ángulo de 0°.

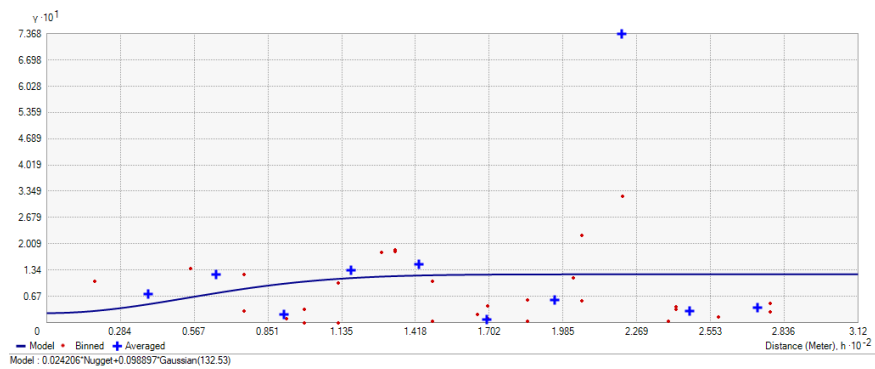


Figura 86 Modelo gaussiano con ángulo de 45°.

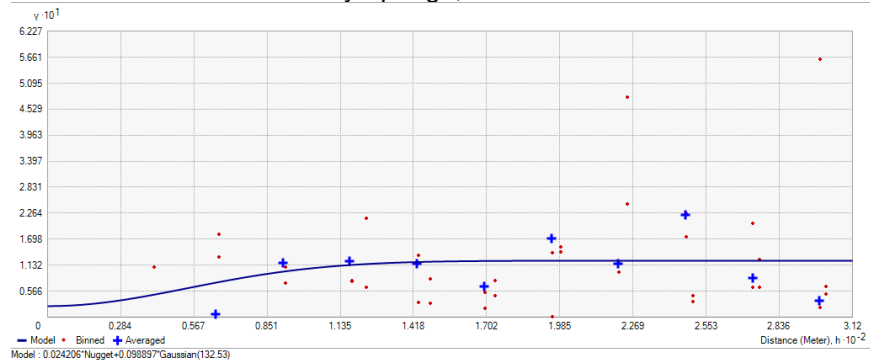


Figura 87 Modelo gaussiano con ángulo de 90°.

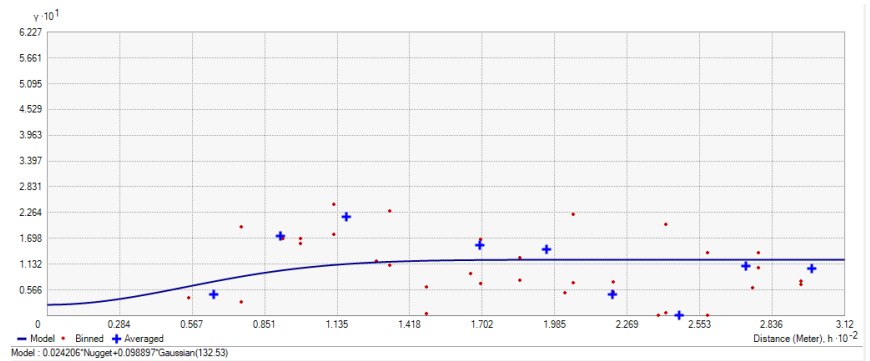


Figura 88 Modelo gaussiano con ángulo de 135°.

De todos los modelos presentados, se realiza un análisis minucioso para determinar cuál o cuáles serían los modelos tentativos de variogramas que se adecúen mejor en cierto ángulo de dirección, a cada uno de los parámetros geomecánicos.

3.5.3.1. Comportamiento estructural y definición del modelo del variograma teórico

(Ortiz, 2006) indica que el variograma permite calcular la variabilidad del fenómeno regionalizado. Se sabe que el variograma es la diferencia al cuadrado estimada entre dos valores de datos separados por un vector distancia.

De todos los variogramas presentados anteriormente, se escogieron los que más se aproximan al modelo de cada parámetro geomecánico. Por lo tanto;

seguidamente se presenta los variogramas que una vez analizados, reúnen las características necesarias para generar el modelo final y a partir de ello ajustarlo a la mejor disposición posible, creando un reporte de método final.

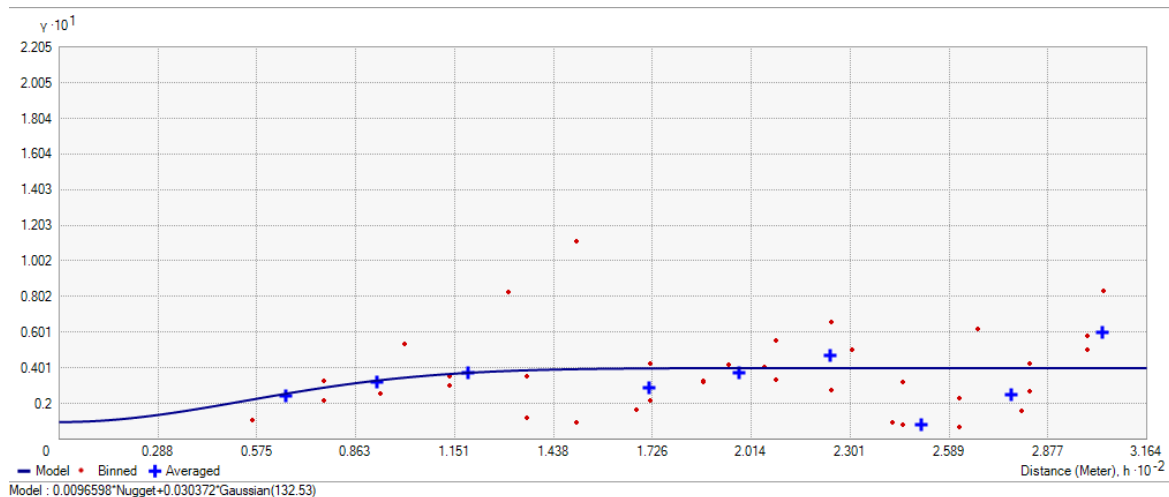


Figura 89 Variograma de RCU.

Modelo: Gaussiano / Nugget: 0.009659767 / Ángulo: 134° /

Tolerance: 22.5 / Bandwidth: 2

El modelo gaussiano es el designado para este parámetro. Ya que, podemos notar que los 3 primeros puntos promedios tienden a seguir perfectamente a la línea del modelo variográfico. El ángulo exacto que genera una muy buena alineación del modelo es 134°.

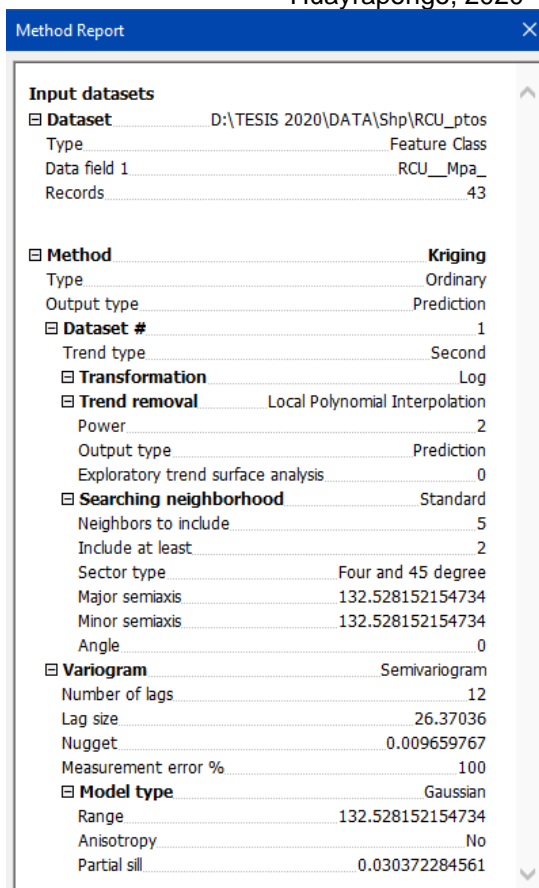


Figura 90 Reporte final del método, RCU.

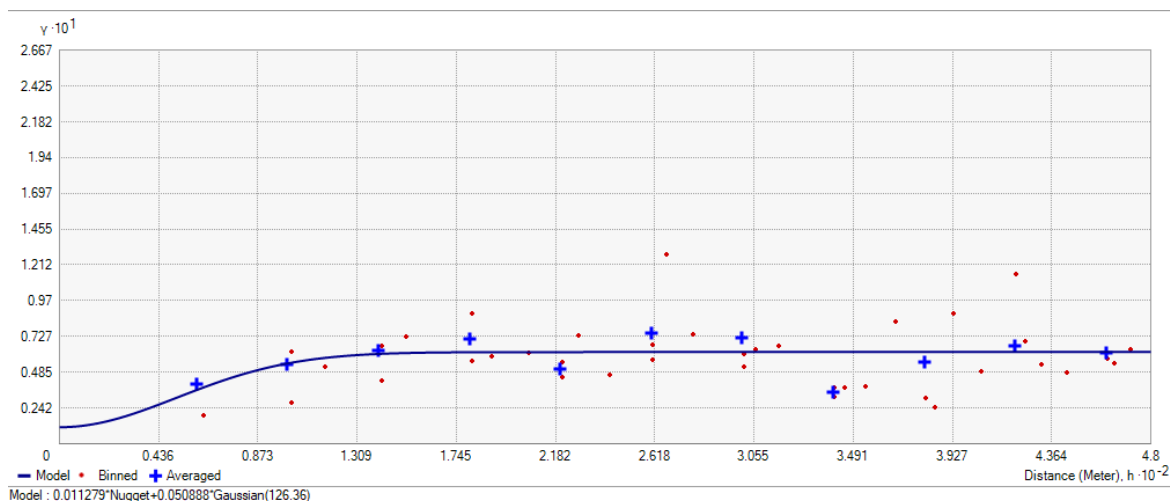


Figura 91 Variograma de JRC.

Modelo: Gaussiano / Nugget: 0.011278876 / Ángulo: 100° /

Tolerance: 22.5 / Bandwidth: 2

El modelo gaussiano es el elegido para este parámetro. Ya que, podemos notar que los 3 primeros puntos promedios tienden a seguir perfectamente a la línea del modelo variográfico. El ángulo exacto que genera una muy buena alineación del modelo es 100°.

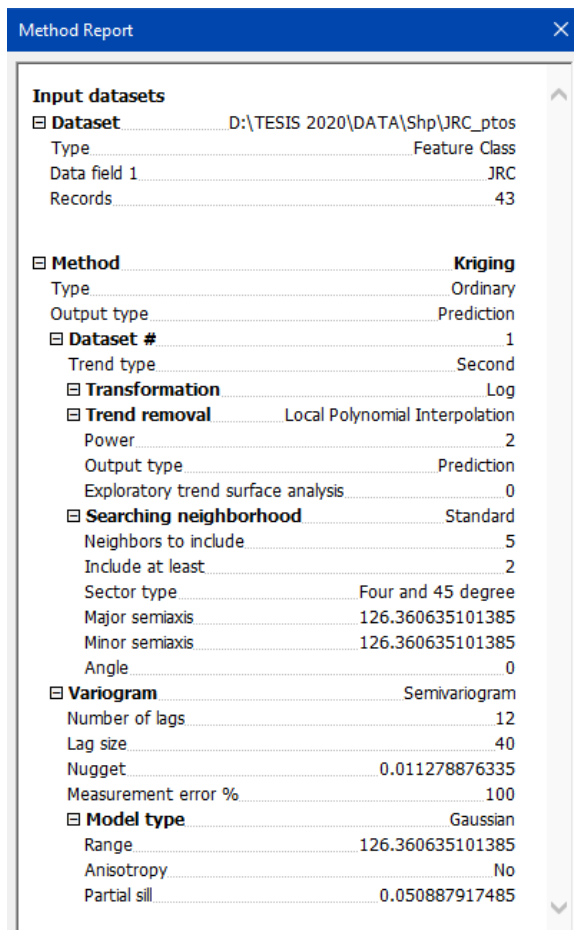


Figura 92 Reporte final del método, JRC.

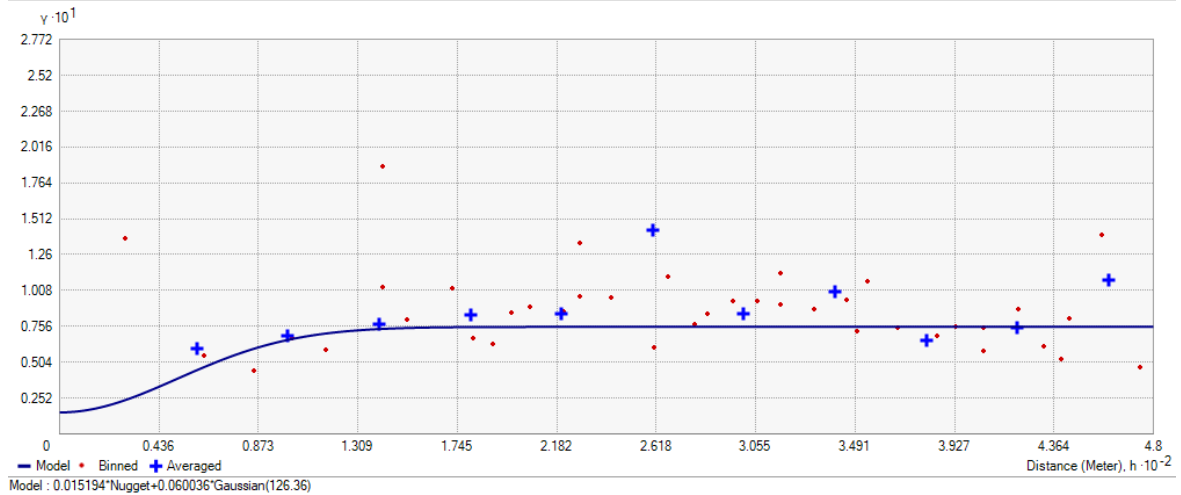


Figura 93 Variograma de RQD lineal.

Modelo: Gaussiano / Nugget: 0.01519395 / Ángulo: 113° /

Tolerance: 22.5 / Bandwidth: 2

El modelo gaussiano es el que medianamente se ajusta para este parámetro. Ya que, podemos notar que en el primer punto promedio se aleja ligeramente de la línea del modelo variográfico; sin embargo, los dos siguientes si se alinean en mejor proporción. El ángulo exacto que genera una muy buena alineación del modelo es 113°.

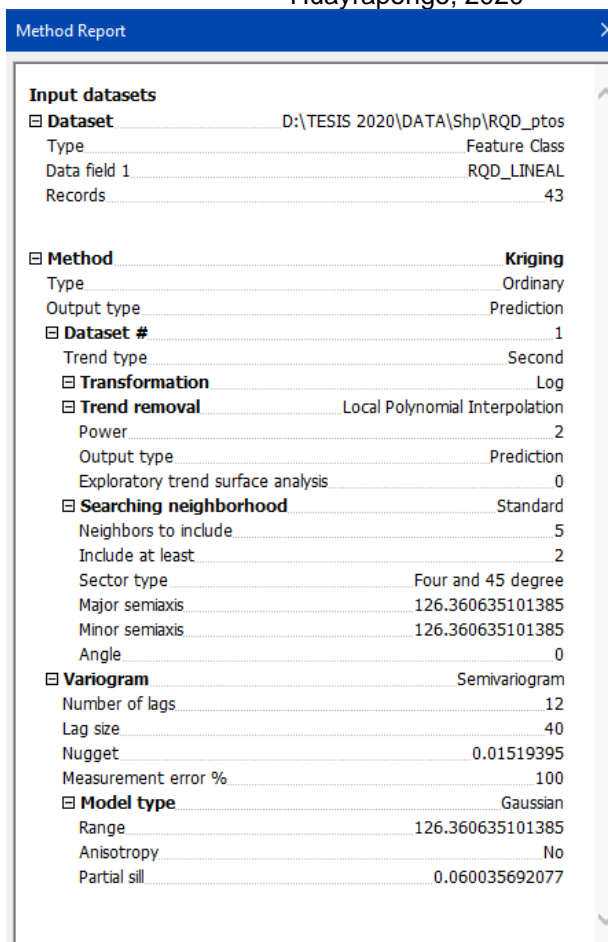


Figura 94 Reporte final del método, RQD Lineal.

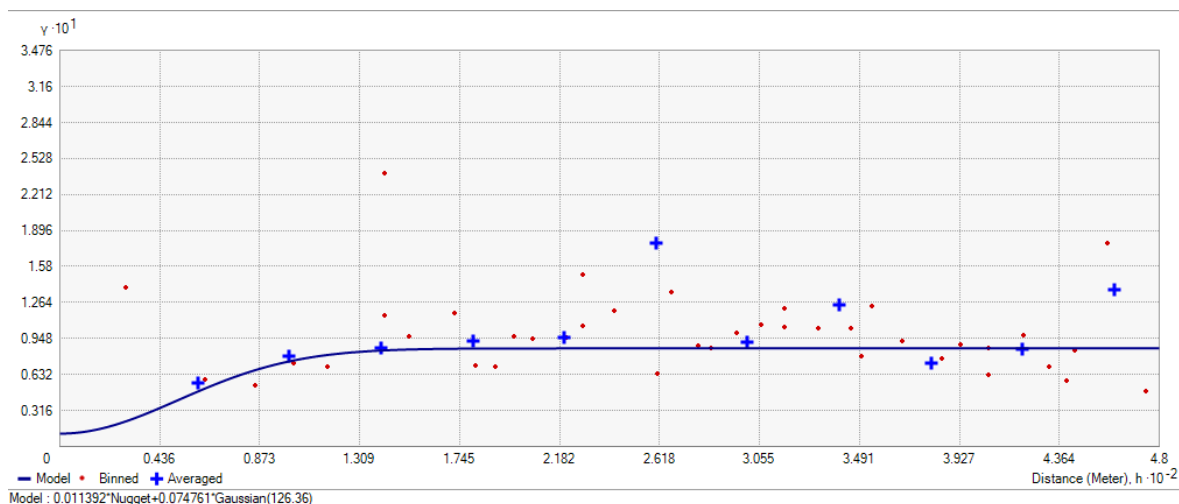


Figura 95 Variograma de Espaciado de las discontinuidades.

El modelo gaussiano es el que más se aproxima para este parámetro. Ya que, podemos notar que en el primer y segundo punto promedio se aleja

ligeramente de la línea del modelo variográfico; sin embargo, el tercero si se alinea en mayor proporción. El ángulo exacto que genera una muy buena alineación del modelo es 115°.

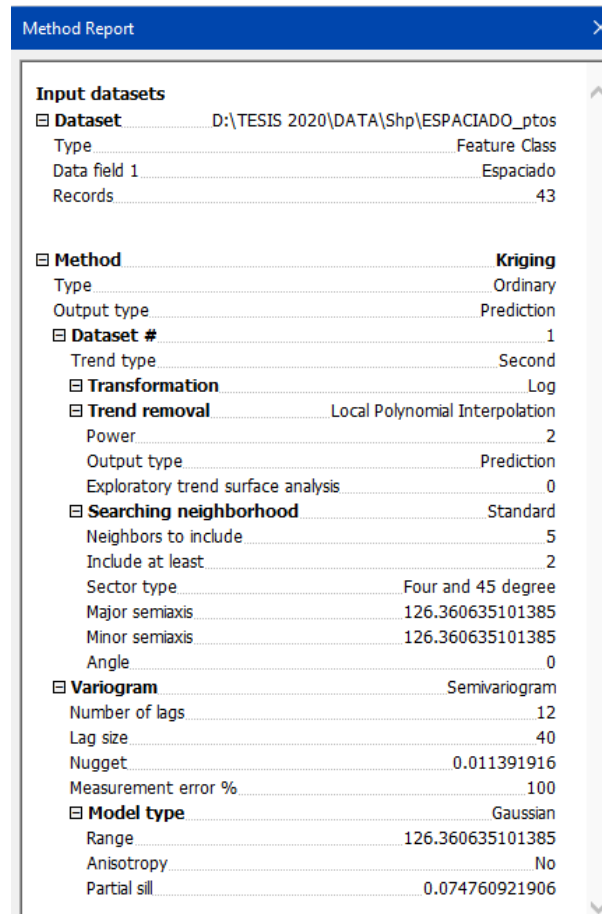


Figura 96 Reporte final del método, Espaciado de las discontinuidades.

3.5.3.2. Predicción mediante Kriging de los parámetros geomecánicos

Según (Londoño & Valdés, 2012) afirma que el método de Kriging se basa en determinar un valor desconocido a partir de otros conocidos. (Ferrari, Apuani, & Giani, 2014) señala que la predicción nos permite estimar los valores de RMR en un todo dominio, a partir de datos disponibles. La mayoría de los métodos de estimación

calculan el valor estimado como un promedio ponderado de las muestras en el dominio (Ortiz, 2006).

Como último paso se procedió a generar los planos de estimación juntamente con su plano de estimación de la varianza para cada uno de los parámetros geomecánicos.

Resistencia a la compresión uniaxial (RCU)

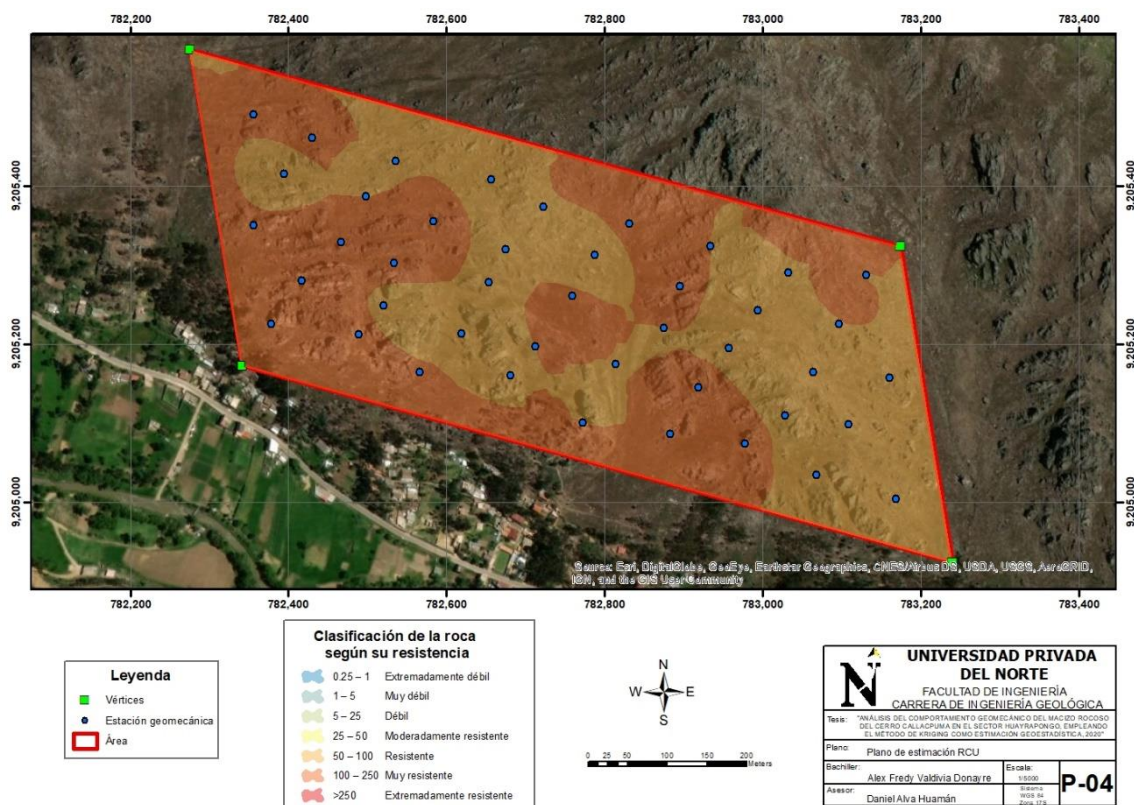


Figura 97 Plano de estimación RCU.

A partir del análisis geoestadístico se generó el plano de estimación para el parámetro RCU, llegando a zonificar principalmente 2 tipos de clasificación (resistente y muy resistente). El cual guarda relación con la geología de la zona, que se encuentra conformado por areniscas cuarzosas.

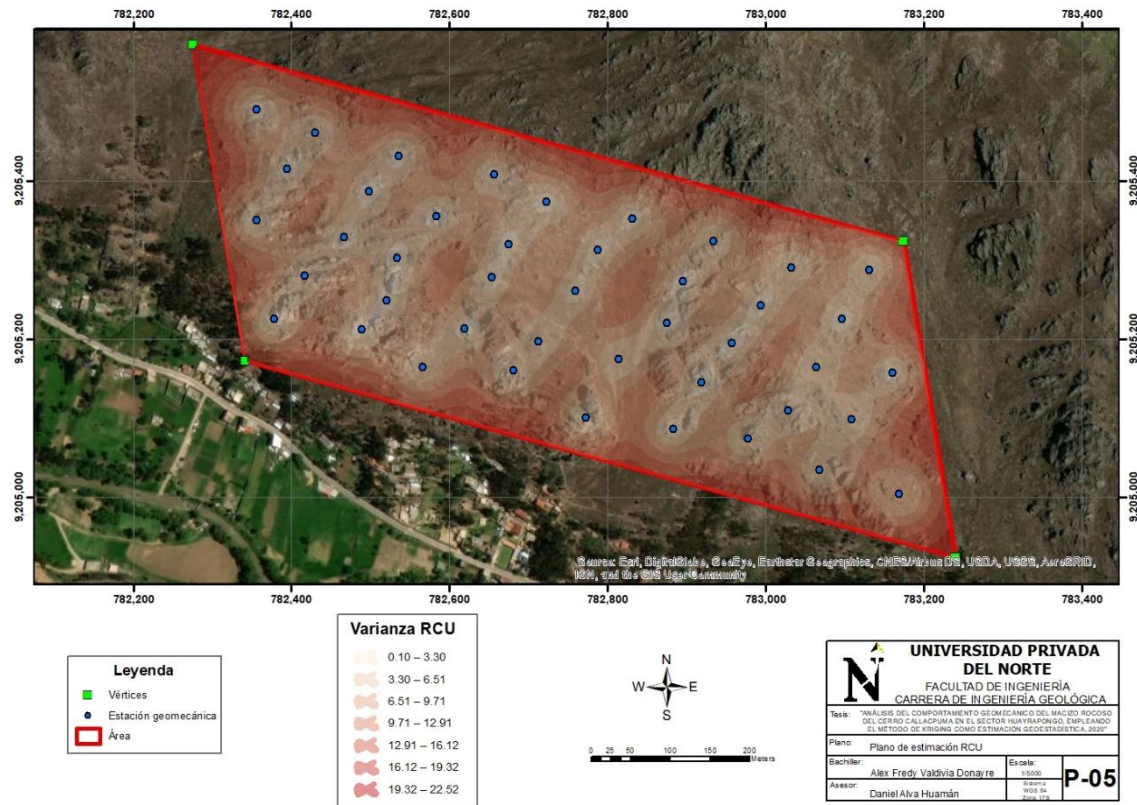


Figura 98 Plano de variación RCU.

Con respecto al diseño de malla elaborada para realizar la toma de muestras, está uniformemente distribuida; ya que en la figura se muestra un error de varianza pequeño entre las distancias de los puntos muestreados, indicando un eficiente muestreo para la estimación del RCU. En algunos sectores se observa una mayor variación debido a que hubo una reubicación de los puntos de muestreo por afloramiento o integridad física.

Coefficiente de rugosidad de las juntas (JRC)

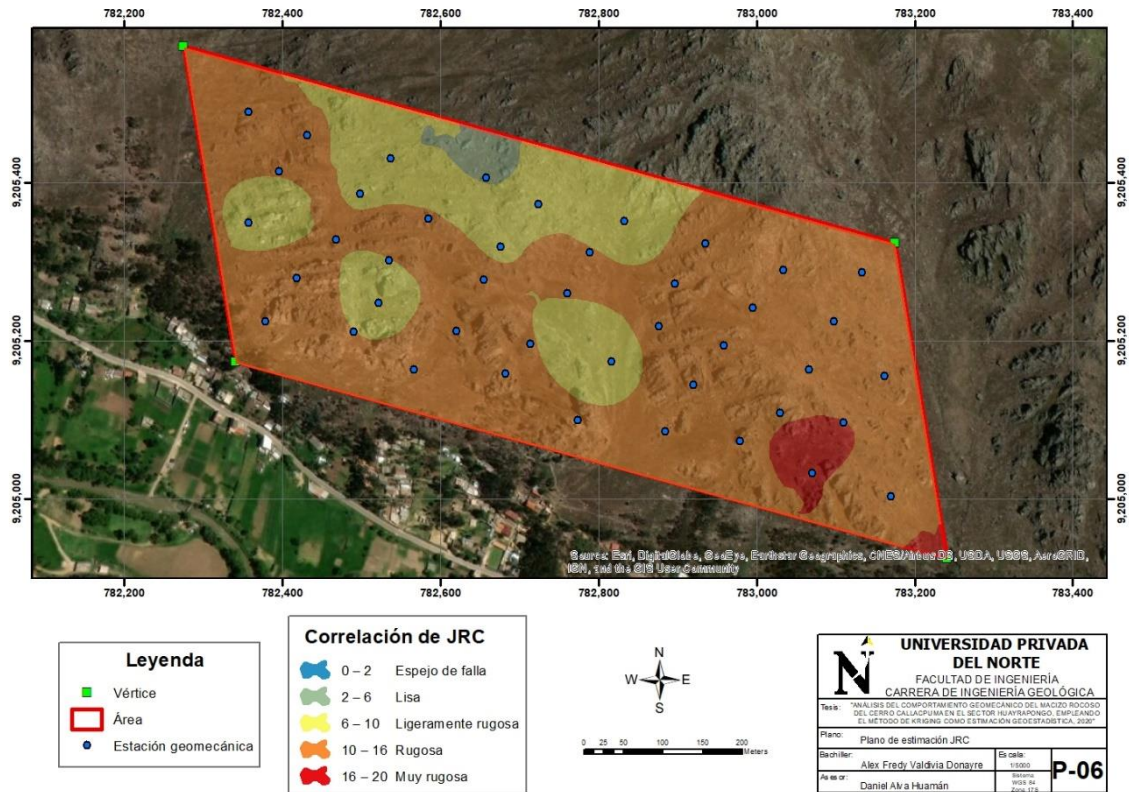


Figura 99 Plano de estimación JRC.

En la zona de estudio predominan la clasificación de rugosa (10-16) seguido de ligeramente rugosa (6-10). En la zona Sureste se encuentra la rugosidad más alta debido a la presencia de areniscas cuarzosas. En la zona Norte se encuentra una correlación de JRC (0-2), que pertenece a espejo de falla, el cual ha sido corroborado en campo con una falla local.

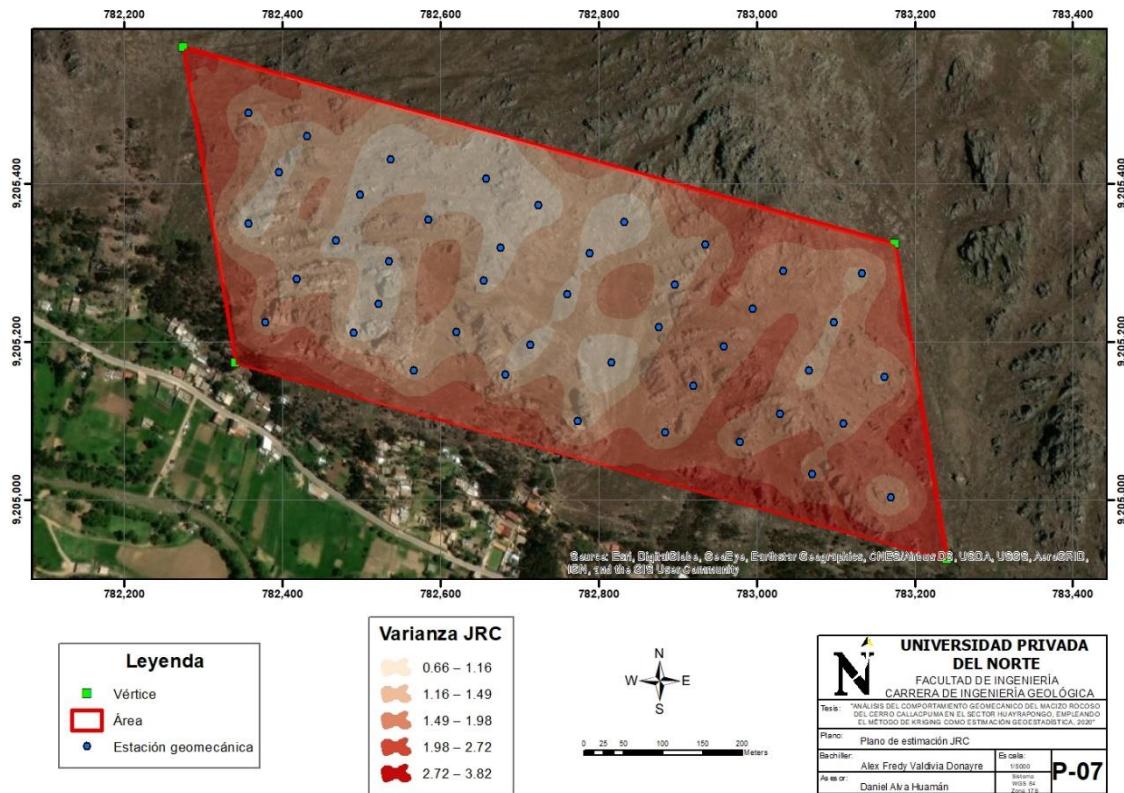


Figura 100 Plano de variación JRC.

En la zona Este se aprecia que el grado de variabilidad de los datos es fuerte, debido a que hay mayor variabilidad en los datos y necesitaría un mayor muestreo; por lo que se debe hacer un ajuste en el diseño de la malla para reducir el grado de incertidumbre. En la zona central oeste hay una baja variabilidad, el cual nos confirma una buena distribución de los datos en la malla de muestreo.

Designación de la calidad de la roca (RQD)

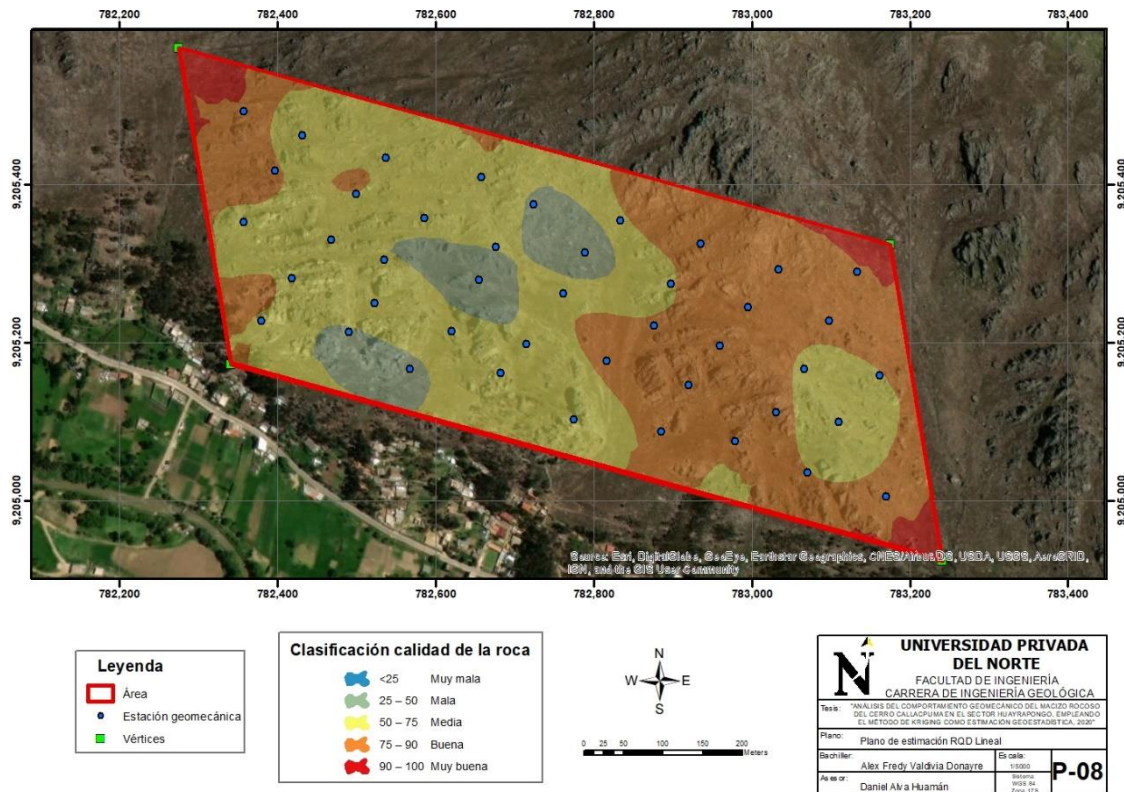


Figura 101 Plano de estimación RQD Lineal.

La zona de estudio presenta en general una calidad de roca de media a buena. Existe 3 zonas de mala calidad; debido al contexto estructural local, es decir, alto grado de fracturamiento y plegamiento que hacen al macizo disminuir su buena calidad. Se deben tomar en consideración esas zonas para asumir las medidas preventivas necesarias.

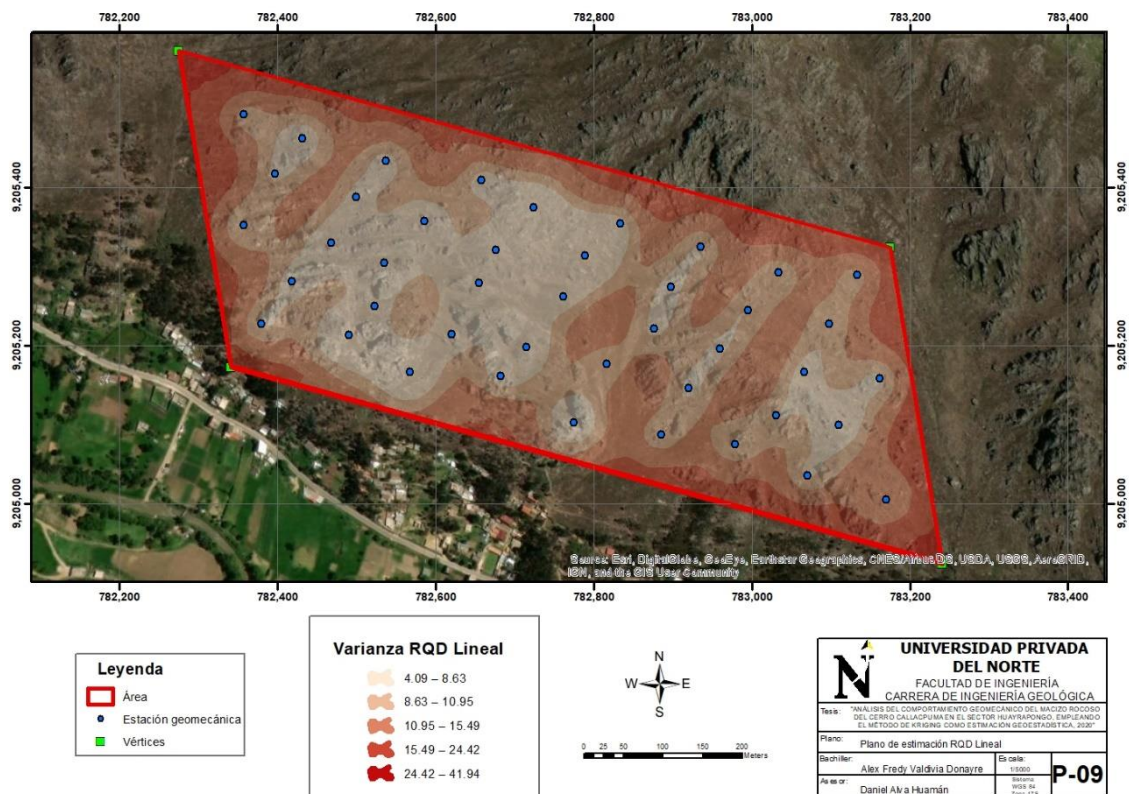


Figura 102 Plano de variación RQD Lineal.

En la zona Este del área de estudio se presenta una mayor variación de los datos, esto se debe al alto grado de fracturamiento y plegamiento. En la zona Noroeste se evidencia una baja variación de los datos, comparado con al valor promedio del RQD lineal. Se debe muestrear a más detalle en la zona Este.

Espaciado de las discontinuidades

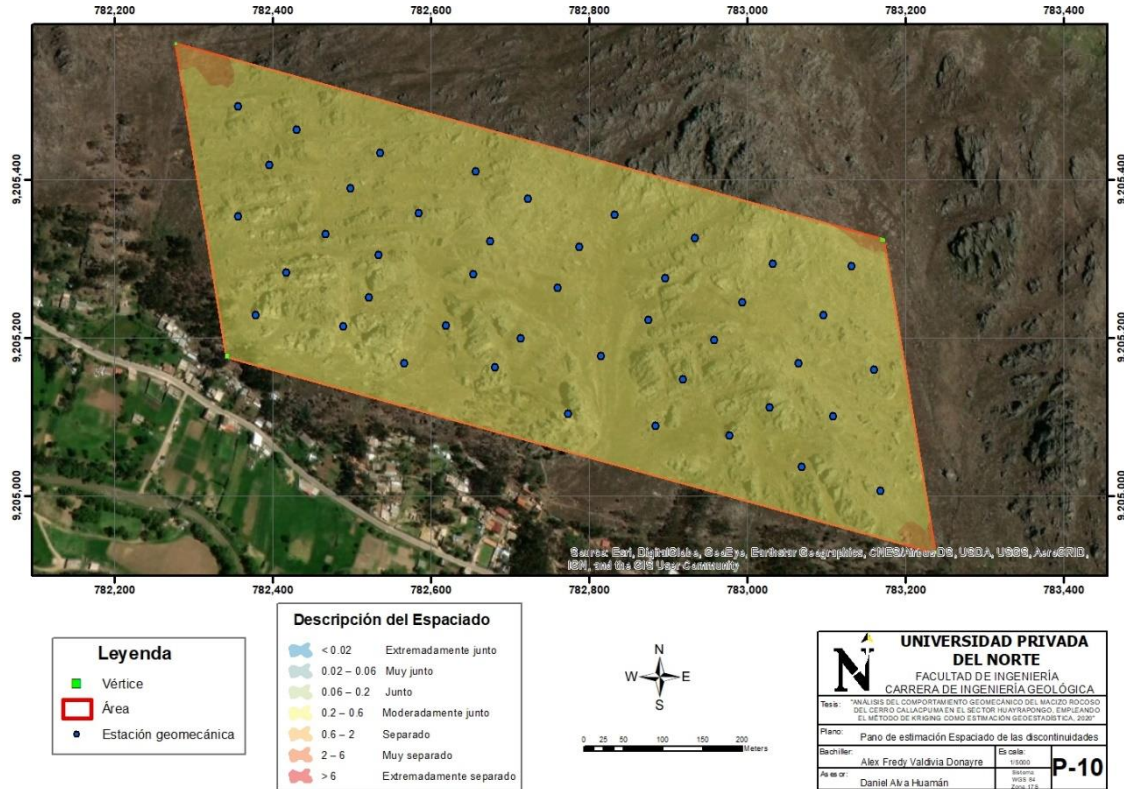


Figura 103 Plano de estimación de Espaciado de las discontinuidades.

Mediante el plano de estimación se observa que existe una clasificación homogénea predominante en el área, moderadamente junto. El parámetro geomecánico de espaciado de las discontinuidades guarda relación con el alto grado de fracturamiento presente en la zona.

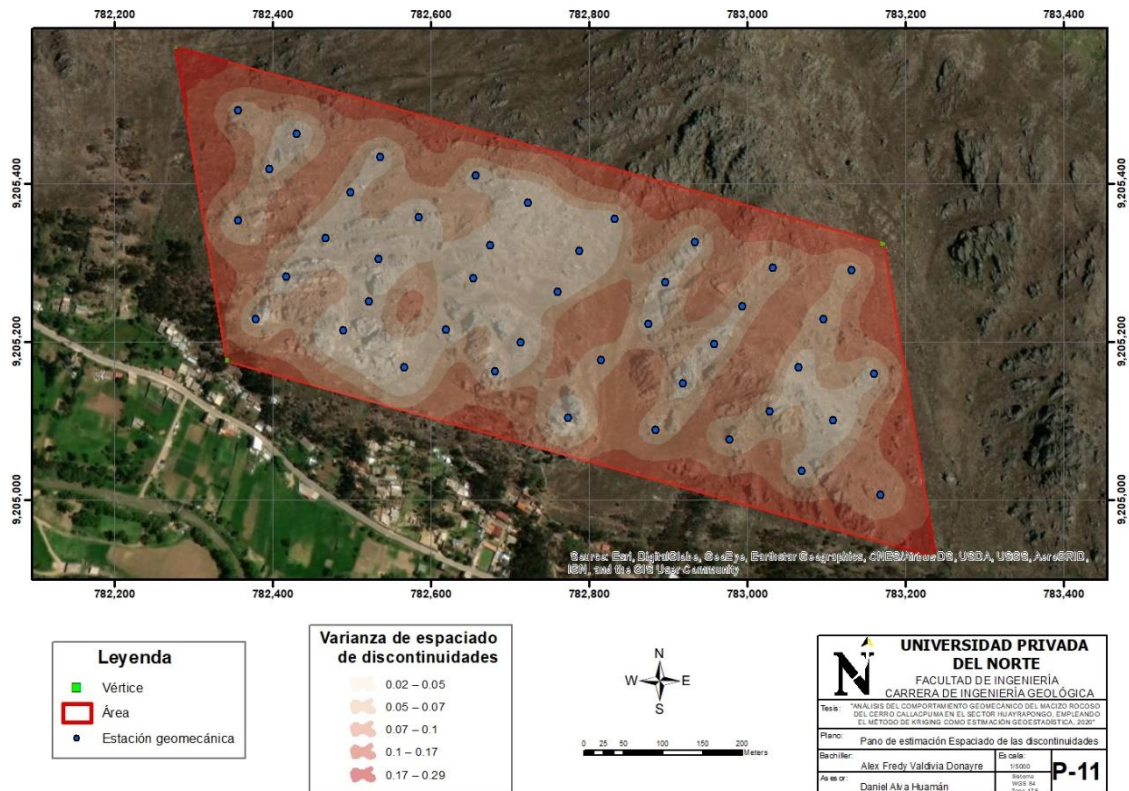


Figura 104 Plano de variación de Espaciado de las discontinuidades.

En la zona Oeste hay una baja variabilidad de los datos respecto al promedio; a diferencia de la zona Este donde se presenta mayor variabilidad debido a fracturamiento y micro plegamientos. Se recomienda hacer un mayor muestreo a detalle en la zona Este.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 Discusión

Según (Emery, 2007) “Cuando disminuye la dispersión de los datos, aumenta la calidad del promedio como estimador. Esto queda más claro si tomamos el ejemplo extremo de una base de datos con varianza cero, es decir todos los valores iguales”. Todos los parámetros geomecánicos presentaron una modera dispersión de datos debido al contexto estructural de la zona. Existe una tendencia de segundo orden en todos los parámetros.

Según (McBratney, Webster, & Burgess, 1981), un enmallado triangular generará una menor varianza de predicción, se corrobora que los planos de variación presentados para cada parámetro geomecánico están uniformemente distribuidos, por lo que muestran un error de varianza pequeño entre las distancias de los puntos muestreados (muestreo aceptable). Contrastando la hipótesis presentada se establece que el método geoestadístico de Kriging permitió estimar el comportamiento geomecánico del macizo rocoso del cerro Callacpuma en el sector Huayrapongo.

Las areniscas fueron clasificadas debido a su tamaño de grano (fino, medio y grueso), ya que éstas influyen en gran manera sobre la estabilidad del talud debido a que una arenisca con grano grueso ofrece menor resistencia por la porosidad. (Zavala & Roxana, 2007) indica que “la mayor cantidad de movimientos en masa ocurridos en la región se asocian a eventos extremos hidroclimáticos y escasos relacionados a movimientos sísmicos”. En cuanto a la precipitación (Anexo 8) que es un aspecto fundamental para considerar, debido a la influencia respecto a la meteorización del macizo rocoso; ya que, aumenta las potenciales zonas críticas frente a un

desprendimiento. La temporada más mojada dura 6,7 meses, de 6 de octubre a 28 de abril; es decir, considerando lluvia, nieve o ambos.

“Los taludes de la carretera Baños del Inca – Llacanora no son estables ya que en condiciones secas son mayores a 1 ($F.S >1$) pero con la presencia de agua se vuelven inestables y en caso de sismos estos presentan una falla inminente ($F.S <1$)” (Tarrillo, 2018). Las precipitaciones en la zona dejaron intensas alteraciones sobre la roca, debilitándolas, haciéndolas ver fuertemente propensas a algún tipo de desprendimiento. Así mismo, la zona de estudio se caracteriza de suelo fértil que favorece el crecimiento de vegetación arbórea tales como eucalipto, pinos, sauce, ciprés. La vegetación (Anexo 9) presente puede ayudar a mitigar posibles desprendimientos de rocas al caserío Huayrapongo.

La zona de estudio presenta un esfuerzo principal (σ_1) compresivo con dirección NW-SE; siendo responsable del intenso fracturamiento, plegamiento y fallas locales. Además de estar localiza en el flanco sur de un anticlinal. Las areniscas de la formación Farrat presentan mucha variabilidad en cuanto a fracturamiento, alteración y meteorización.

Según la clasificación de unidades morfogénicas por (Rodríguez , 2018) el área de estudio está categorizado como Laderas (pendientes promedio que van de 21° a 50°). Se evidenció un sector cercano a las pinturas rupestres de Callacpuma que presentan pendiente de 75° , haciéndola de alto riesgo a los visitantes.

(Ferrari, 2014) dice que para el modelo gaussiano para un variograma con lag pequeños muestra una mayor continuidad que otros. Se puede corroborar, ya que el modelo de variograma que mejor se representa es el gaussiano para todos los parámetros geomecánicos y presentan un lag pequeño de 40.

El análisis geoestadístico para la resistencia a la compresión uniaxial (RCU), los datos siguen una distribución normal. El modelo variográfico elegido para su análisis fue el Gaussiano, con un ángulo de dirección de 134° . (Heras, 2017) señala que la formación Farrat presenta un mayor RCU (79 Mpa) en comparación a la formación Carhuaz. En esta investigación la categoría de la roca según su resistencia fluctúa entre resistente y muy resistente (97 Mpa). La varianza demuestra una buena distribución de los puntos de muestreo.

El análisis geoestadístico para coeficiente de rugosidad de las juntas (JRC), los datos no siguen una distribución normal. El modelo variográfico elegido para su análisis fue el Gaussiano, con un ángulo de dirección de 100° . La correlación de JRC predominantemente es rugosa. La zona Norte presenta categorización (lisa – ligeramente rugosa) los cuales tienen que ser tomados en cuenta; ya que las caras del macizo no presentarían resistencia al corte frente a algún posible desprendimiento.

El análisis geoestadístico para Designación de la calidad de la roca (RQD), los datos no siguen una distribución normal. En la parte central existen 4 estaciones que categorizaron como calidad mala al macizo, punto clave para tener en cuenta. (Palmstrom, 1982) señala que cuando no hay perforaciones disponibles, el RQD puede ser estimado a partir del número de juntas por unidad de volumen. La clasificación predominante es de roca que está entre media a buena. La variabilidad del parámetro geomecánico se encuentra en la zona Sur Este.

(Ferrer & Gonzales, 2007) señalan que la continuidad de las discontinuidades define si la matriz rocosa se verá afectada en procesos de rotura. En esta investigación el análisis geoestadístico para Espaciamiento de las discontinuidades indica homogeneidad predominando medianamente junto. Este parámetro geomecánico

presentó una muy buena correlación con el RQD Lineal. La mayor variabilidad del parámetro geomecánico se encuentra en la zona Noroeste.

Las limitaciones esta investigación se evidencian en los planos de variación; ya que existen zonas con mayor variabilidad debido a que algunos puntos fueron reubicados, ya sea por afloramiento o por accesibilidad al punto.

Con esta investigación se ha contrastado la hipótesis, indicando que el método geoestadístico de Kriging permitirá estimar el comportamiento geomecánico del macizo rocoso del cerro Callacpuma en el sector Huayrapongo, a partir de los planos de estimación generados en función a los parámetros geomecánicos.

Finalmente, se recomienda que futuros estudios que se realicen se haga un análisis estructural detallado de la zona. La reforestación sería un aspecto para considerar; ya que puede mitigar un posible desprendimiento. Se recomienda realizar un mayor muestreo en las zonas que indican mayor variabilidad de los planos de varianza. Se recomienda la culminación de los parámetros faltantes para hallar el valor RMR. Las autoridades pertinentes deben tener en cuenta la expansión urbana de Huayrapongo, evitando las construcciones en inmediaciones del cerro Callacpuma. Se debe considerar gestionar las medidas preventivas necesarias frente a las zonas indicadas como propensas a desprendimiento.

4.2 Conclusiones

Geoestadísticamente se analizó, mediante el método de Kriging, el comportamiento geomecánico del cerro Callacpuma en el sector Huayrapongo, durante los meses de agosto y setiembre del 2020.

La zona de estudio presenta un esfuerzo principal (σ_1) compresivo con dirección NW-SE.

En cuanto a la clasificación RCU del macizo rocoso la roca RCU en el cerro Callacpuma se clasificó entre resistente y muy resistente, guardando relación con la geología presente (areniscas cuarzosas).

En la correlación de JRC del cerro Callacpuma predominó la correlación rugosa. Sin embargo, en la zona central y Norte existen estaciones geomecánicas que indican ligeramente rugosa a lisa. En cuanto a variabilidad, la zona Sureste requiere un mayor muestreo a detalle para disminuir el error predictivo.

La clasificación de la calidad de la roca (RQD Lineal), se encontró entre media a buena. Cabe resaltar que existe 3 zonas con calidad de roca mala, la cual debe considerarse para tomar las medidas de seguridad respectivas. La zona Sureste presenta una alta variabilidad, requiere un mayor muestreo.

El espaciado de las discontinuidades presentó una clasificación homogénea de moderadamente junto. Así mismo, demostró una muy buena correlación con el RQD Lineal debido a que es una variable dependiente. Los demás parámetros geomecánicos son variables independientes, no existe correlación alguna entre ellos.

La tendencia promedio del rumbo de la estratificación es 108° .

REFERENCIAS

- Barton, N. R., & Bandis, S. C. (1982). *Effects of block size on the shear behavior of*. 23rd U.S. symp. on rock mechanics, 739-760.
- Barton, N., & Choubey, V. (1977). *The shear strength of rock joints in theory and practice*. Rock mechanics. *Rock mechanics*, 10(1-2), 1-54.
- Bieniawski, Z. (1976). *Rock Mass Classification in Rock Engineering*. Symposium Proceedings of Exploration for Rock Engineering. 1, 97-106.
- Cely Pulido, J., Siabato Vaca, W., Sánchez Ipiá, A., & Rangel Sotter, A. (2002). *Geoestadística Aplicada a Estudios de Contaminación Ambiental*. Ciencia Investigación Academia Desarrollo, 2(2), 31-38.
- Egaña E., M. (2008). *Geoestadística Aplicada a Parámetros Geotécnicos (Tesis de Pregrado)*. Santiago de Chile.
- Emery, X. (2007). *Apunte de Geoestadística*. Santiago: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.
- Ferrari, F. (2014). *Rock Mass Characterization And Spatial Estimation Of Geomechanical Properties Through Geostatistical Techniques (Tesis Doctoral)*. Milano.
- Ferrari, F., Apuani, T., & Giani, G. P. (2014). *Rock Mass Rating spatial estimation by geostatistical analysis*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 70, 162-176. doi:10.1016/j.ijrmms.2014.04.016
- Ferrer, M., & Gonzales, L. (2007). *Manual de campo para la descripción y caracterización de macizos rocosos en afloramientos (2° ed) Serie: guías y manuales, N° 4*. Madrid: Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España.
- Gonzales de Vallejo, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.
- Heras, K. (2017). *Estudio de las estructuras de emplazamiento de cuerpos ígneos plutónicos entre la comunidad de Michiquillay y el sector el Punre*. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca.
- Hoek, E., & Brown, E. (1997). *Practical estimates of rock mass strength*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34(8), 1165-1186. doi: 10.1016/S1365-1609(97)80069-X.
- Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI); *Programa De Prevención Y Medidas De Mitigación Ante Desastres Ciudad De Cajamarca*. Cajamarca.
- ISRM. (1978). *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. International Journal of Rock Mechanics and, 15(6):319–368.
- Johnston, K., Ver Hoef, J., Krivoruchko, K., & Lucas, N. (2004). *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*. ESRI, 300.
- Londoño, L., & Valdés, J. C. (2012). *Geoestadística Aplicada: Generación de Mapas de Interpolación para el Estudio de Fenómenos Distribuidos Espacialmente*. Alemania: Academia Española.
- Luza, C., & Sosa, N. (2016). *Caída de rocas en el sector de Huamatambo. Distrito Huamatambo, provincia Castrovirreyna, departamento Huancavelica. N° A6702*. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/1183>. Huancavelica: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
- McBratney, A., Webster, R., & Burgess, T. (1981). *The Design of Optimal Sampling Schemes for Local Estimation and Mapping of Regionalized Variables I*. Computers and Geosciences. 7(4), 331-334.

- Miller, R. P. (1966). *Engineering classification and index properties for intact rock*. Ph. D. thesis Universidad de Illinois. EEUU. Illinois.
- Minitab. (2019). <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/how-to/normality-test/interpret-the-results/key-results/#:~:text=Por%20lo%20general%2C%20un%20nivel,s%C3%AD%20siguen%20una%20distribuci%C3%B3n%20normal>.
- Ordaz, A., Esquivel, R., Hernández, J., & Cabadas, H. (2019). *Susceptibilidad A Desprendimientos De Rocas En La Urbanización La Teresona-Zopilocalco Norte, Toluca*: Premisas Para El Desarrollo Comunitario. Investigaciones Geográficas • Instituto de Geografía • UNAM, 99(59888), 2448-7279. doi:10.14350/ig.59888.
- Ortiz, J. (2006). *Apuntes de Simulación Geoestadística*. Cátedra CODELCO de Evaluación de Yacimientos. Santiago: Depto. de Ingeniería de Minas, Universidad de Chile.
- Palmstrom, A. (1982). *The volumetric joint count: a useful and simple measure of the degree of rock mass jointing*. Proceedings of the IAEG congress. New Delhi, 221–28.
- Priest, S. D., & Hudson, J. A. (1976). *Discontinuity spacings in rock*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics. 13, 135–148.
- Rodríguez, S. (2018). *Impactos Geotécnico-Ambientales En Cabeceras De Subcuencas Por Implantación De Minas Conga Cajamarca-Perú*. (Tesis Doctoral). Universidad Nacional de Cajamarca .
- Rojas, V. M. (2011). *Metodología de la investigación. Diseño y ejecución*. Bogotá: Ediciones de la U.
- Tarrillo, R. (2018). *Grado De Estabilidad De Los Taludes Críticos De La Carretera Baños Del Inca - Llacanora (Tesis de Pregrado)*. Cajamarca.
- Weather Spark. (s.f. de s.f. de s.f.). © Cedar Lake Ventures, Inc. Obtenido de <https://weatherspark.com/>
- Zavala, B., & Roxana, B. (2007). *Zonas Críticas Por Peligros Geológicos Y Geohidrológicos En La Región Cajamarca*. Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.

ANEXOS

ANEXO N°1. Pendientes promedio en la zona de estudio.



Figura 105 Pendientes moderadas a empinadas. Vista al Sureste.

ANEXO N°2. Viviendas cercanas a las laderas del cerro Callacpuma.



Figura 106 Viviendas aledañas al macizo rocoso. Vista al Norte.

ANEXO N°3. Desprendimiento de roca



Figura 107 Desprendimiento de roca. Vista al Sureste.

ANEXO N°4. Presencia de turistas en el cerro Callacpuma.



Figura 108 Afluencia de turistas en el cerro Callacpuma. Vista al Noroeste.

ANEXO N°5. Coordenadas de las estaciones geomecánicas.

Tabla 12

Coordenadas UTM WGS84 de las estaciones geomecánicas.

Estación geomecánica	ESTE	NORTE	COTA
1	782379.00	9205226.00	2680
2	782418.00	9205280.00	2729
3	782357.00	9205351.00	2721
4	782396.00	9205416.00	2789
5	782357.00	9205491.00	2771
6	782431.00	9205461.00	2815
7	782499.00	9205387.00	2825
8	782468.00	9205329.00	2787
9	782522.00	9205249.00	2770
10	782490.00	9205212.00	2719
11	782567.00	9205165.00	2710
12	782620.00	9205213.00	2750
13	782535.00	9205303.00	2832
14	782585.00	9205356.00	2849
15	782537.00	9205432.00	2848
16	782658.00	9205408.00	2878
17	782676.00	9205320.00	2882
18	782655.00	9205278.00	2855
19	782714.00	9205197.00	2804

20	782682.00	9205160.00	2763
21	782774.00	9205101.00	2740
22	782816.00	9205175.00	2763
23	782761.00	9205261.00	2836
24	782789.00	9205313.00	2878
25	782724.00	9205374.00	2909
26	782833.00	9205353.00	2890
27	782897.00	9205273.00	2870
28	782876.00	9205220.00	2811
29	782920.00	9205145.00	2822
30	782885.00	9205086.00	2752
31	782979.00	9205074.00	2770
32	783030.00	9205110.00	2783
33	782959.00	9205195.00	2861
34	782995.00	9205243.00	2894
35	782935.00	9205324.00	2892
36	783034.00	9205291.00	2910
37	783098.00	9205226.00	2890
38	783066.00	9205165.00	2860
39	783110.00	9205098.00	2800
40	783070.00	9205034.00	2745
41	783170.00	9205004.00	2708
42	783162.00	9205157.00	2820
43	783133.00	9205288.00	2898

ANEXO N°6 Plano geológico de la zona de estudio.

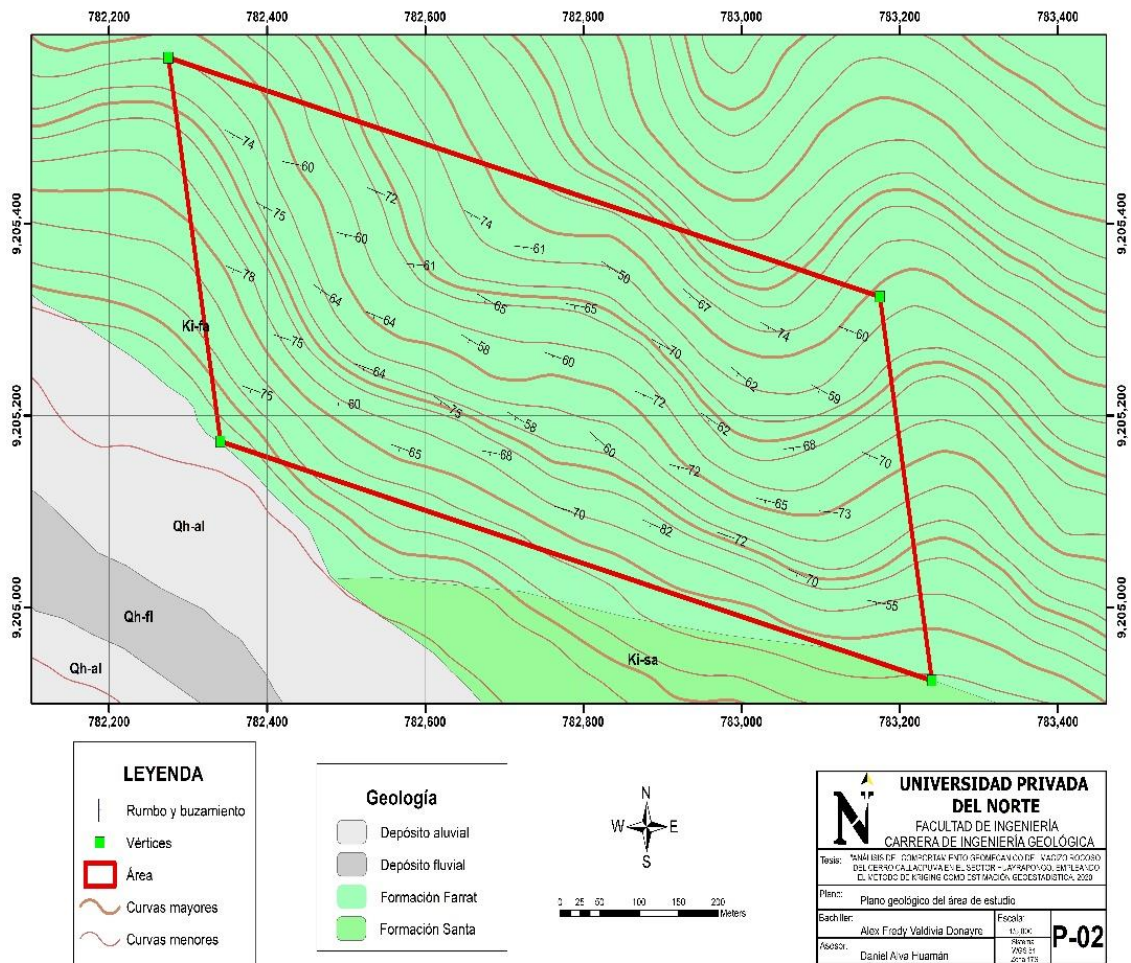


Figura 109 Plano geológico del área de estudio.

ANEXO N°7 Rumbos y buzamientos de los estratos.

Tabla 13

Rumbos y buzamientos de los estratos.

Punto de Muestreo	X	Y	Z	Rumbo N	Bz (°)
1	782379	9205226	2680	107	75
2	782418	9205280	2729	105	75
3	782357	9205351	2721	110	78
4	782396	9205416	2789	114	75
5	782357	9205491	2771	115	74
6	782431	9205461	2815	100	60
7	782499	9205387	2825	101	60
8	782468	9205329	2787	120	64
9	782522	9205249	2770	107	64
10	782490	9205212	2719	90	60
11	782567	9205165	2710	107	65
12	782620	9205213	2750	120	75
13	782535	9205303	2832	109	64
14	782585	9205356	2849	95	61
15	782537	9205432	2848	109	72
16	782658	9205408	2878	115	74
17	782676	9205320	2882	116	65
18	782655	9205278	2855	117	58
19	782714	9205197	2804	117	58

20	782682	9205160	2763	99	68
21	782774	9205101	2740	104	70
22	782816	9205175	2763	128	60
23	782761	9205261	2836	107	60
24	782789	9205313	2878	99	65
25	782724	9205374	2909	96	61
26	782833	9205353	2890	120	50
27	782897	9205273	2870	115	70
28	782876	9205220	2811	110	72
29	782920	9205145	2822	102	72
30	782885	9205086	2752	111	82
31	782979	9205074	2770	106	72
32	783030	9205110	2783	102	65
33	782959	9205195	2861	120	62
34	782995	9205243	2894	125	62
35	782935	9205324	2892	125	67
36	783034	9205291	2910	115	74
37	783098	9205226	2890	115	59
38	783066	9205165	2860	83	68
39	783110	9205098	2800	95	73
40	783070	9205034	2745	112	70
41	783170	9205004	2708	100	55
42	783162	9205157	2820	110	70
43	783133	9205288	2898	108	60

ANEXO N°8 Probabilidad de precipitación.

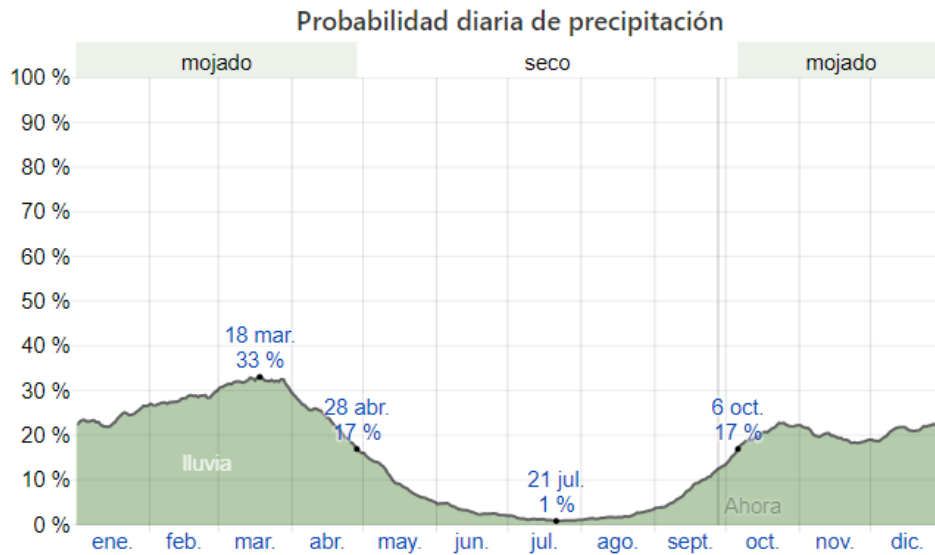


Figura 110 Probabilidad diaria de precipitación en Llacanora. Fuente: (Weather Spark, s.f.)

ANEXO N°9 Vegetación en la zona de estudio.



Figura 111 Vegetación arbustiva y arbórea en la zona de estudio. (Vista al N).

ANEXO N°10 Estación geomecánica N° 7



Figura 112 Estación geomecánica N°7. Vista al Noreste.

ANEXO N°11. Validación cruzada RCU

Tabla 14

Validación cruzada RCU

FID	Measured	Predicted	Error	StdError	Stdd_Error	NormValue
0	133	146.93376	13.933763	30.237962	0.4608036	0.6929003
1	133	123.64833	-9.351668	21.652889	-0.43189	-0.551348
2	110	112.34091	2.3409086	22.746846	0.1029113	0.0583267
3	90	109.12375	19.123747	18.811112	1.0166197	1.0314591
4	105	96.89321	-8.10679	20.796466	-0.389816	-0.484675
5	108	95.031723	-12.96828	17.255663	-0.751537	-0.6929
6	100	105.57319	5.5731871	17.711395	0.3146667	0.3572158
7	123	115.65126	-7.34874	19.642483	-0.374125	-0.357216
8	85	123.05058	38.050584	18.983546	2.0043981	1.570585
9	133	104.1466	-28.8534	18.193046	-1.585958	-1.255486
10	110	113.50719	3.5071852	22.326188	0.1570884	0.1168527
11	84	94.880313	10.880313	16.826076	0.646634	0.7690553
12	128	103.14698	-24.85302	16.856027	-1.474429	-1.136341
13	135	93.02011	-41.97989	17.175902	-2.444116	-1.813418
14	86	100.10992	14.109924	18.776527	0.7514661	0.8499573
15	68	97.823401	29.823401	19.216706	1.5519517	1.395747
16	74	86.431223	12.431223	13.86341	0.896693	0.9368471
17	80	84.42218	4.4221804	13.695259	0.3228986	0.4846749
18	100	97.241018	-2.758982	16.181153	-0.170506	-0.116853

19	96	101.34892	5.3489201	17.635467	0.3033047	0.2957227
20	100	107.03246	7.0324612	22.263296	0.3158769	0.4200915
21	98	101.42024	3.4202367	19.073646	0.1793174	0.1757821
22	110	77.190888	-32.80911	13.488576	-2.432363	-1.570585
23	65	112.57161	47.571606	18.444983	2.5791082	2.2692058
24	88	77.087011	-10.91299	14.379313	-0.758937	-0.769055
25	128	79.200493	-48.79951	14.969788	-3.259866	-2.269206
26	118	96.427881	-21.57212	15.978521	-1.35007	-1.031459
27	100	106.65437	6.6543685	17.985942	0.3699761	0.5513477
28	113	97.092371	-15.90763	16.589093	-0.958921	-0.936847
29	105	109.20931	4.2093065	21.265705	0.1979387	0.2353289
30	110	94.748725	-15.25128	17.606193	-0.866245	-0.849957
31	85	79.869213	-5.130787	13.39284	-0.383099	-0.420092
32	84	84.84301	0.8430102	14.087327	0.0598417	0
33	65	86.155556	21.155556	14.3138	1.4779833	1.2554862
34	100	108.5893	8.5892978	20.749623	0.4139496	0.6205683
35	93	84.046226	-8.953774	15.692274	-0.570585	-0.620568
36	98	76.100669	-21.89933	13.453475	-1.627783	-1.395747
37	55	84.085695	29.085695	14.46083	2.0113434	1.8134176
38	75	71.951733	-3.048267	12.996578	-0.234544	-0.235329
39	84	80.573712	-3.426288	15.870427	-0.215891	-0.175782
40	57	80.770387	23.770387	18.597124	1.2781754	1.1363408
41	80	75.767556	-4.232444	15.390634	-0.275001	-0.295723
42	100	97.452094	-2.547906	20.283125	-0.125617	-0.058327

ANEXO N°12. Validación cruzada JRC

Tabla 15

Validación cruzada JRC

FID	Measured	Predicted	Error	StdError	Stdd_Error	NormValue
0	16	10.656298	-5.343702	2.7671254	-1.931139	-1.395747
1	12	11.612695	-0.387305	2.5516564	-0.151786	0
2	8	12.493768	4.4937675	3.2037042	1.4026786	1.1363408
3	10	11.057074	1.0570736	2.3819647	0.4437822	0.4846749
4	14	8.9930076	-5.006992	2.4464076	-2.046671	-1.813418
5	12	9.755154	-2.244846	2.2175358	-1.012316	-0.936847
6	10	8.627713	-1.372287	1.8037944	-0.760778	-0.6929
7	10	10.956262	0.9562623	2.3252861	0.411245	0.2957227
8	8	10.200266	2.2002661	1.9160518	1.1483333	1.0314591
9	10	10.134077	0.1340775	2.1914641	0.0611817	0.1168527
10	12	11.458428	-0.541572	2.8472846	-0.190207	-0.116853
11	12	11.012233	-0.987767	2.4561207	-0.402166	-0.295723
12	10	9.674646	-0.325354	1.9547539	-0.166442	-0.058327
13	12	8.1545515	-3.845448	1.904494	-2.019144	-1.570585
14	6	9.4587199	3.4587199	2.2241471	1.5550769	1.395747
15	5	8.9837248	3.9837248	2.2323717	1.7845257	1.570585
16	10	9.0855263	-0.914474	1.7913361	-0.510498	-0.484675
17	10	10.931153	0.9311534	2.1801111	0.4271128	0.3572158
18	10	10.861332	0.8613318	2.2382626	0.3848216	0.2353289

19	12	10.955754	-1.044246	2.3632583	-0.441867	-0.357216
20	12	10.318657	-1.681343	2.7203546	-0.61806	-0.620568
21	6	12.938733	6.9387328	3.0782178	2.2541397	2.2692058
22	10	11.228254	1.2282538	2.458072	0.4996818	0.5513477
23	12	8.1478632	-3.852137	1.6534286	-2.329787	-2.269206
24	8	7.7867244	-0.213276	1.8321234	-0.116409	0.0583267
25	6	11.881248	5.8812485	2.817308	2.0875419	1.8134176
26	12	13.480804	1.4808036	2.7798166	0.5326983	0.6205683
27	14	10.279715	-3.720285	2.1610471	-1.72152	-1.255486
28	16	13.727877	-2.272123	2.9339411	-0.774427	-0.769055
29	15	13.296009	-1.703991	3.2662022	-0.521704	-0.551348
30	15	15.487562	0.487562	3.6195838	0.1347011	0.1757821
31	16	14.772827	-1.227173	3.0925244	-0.396819	-0.235329
32	14	16.767926	2.7679261	3.4655615	0.7986948	0.7690553
33	17	13.058435	-3.941565	2.6930928	-1.463583	-1.136341
34	14	10.609774	-3.390226	2.5535206	-1.327667	-1.031459
35	12	14.569347	2.5693469	3.425491	0.7500667	0.6929003
36	14	12.608053	-1.391947	2.8049855	-0.49624	-0.420092
37	12	15.460194	3.460194	3.3349705	1.0375486	0.9368471
38	17	14.405989	-2.594011	3.284702	-0.789725	-0.849957
39	17	15.69072	-1.30928	3.9118534	-0.334696	-0.175782
40	12	20.523378	8.523378	5.9982921	1.4209675	1.2554862
41	12	16.040249	4.040249	4.1256365	0.9793032	0.8499573
42	12	13.580246	1.5802465	3.5739638	0.4421551	0.4200915

ANEXO N°13. Validación cruzada RQD Lineal

Tabla 16

Validación cruzada de RQD Lineal

FID	Measured	Predicted	Error	StdError	Stdd_Error	NormValue
0	76	66.2613975	-9.73860248	19.1301344	-0.50907131	-0.48467491
1	74	62.050588	-11.949412	15.1967498	-0.78631366	-0.62056828
2	70	79.0243728	9.02437281	22.4954221	0.40116486	0.48467491
3	81	67.208347	-13.791653	16.1416003	-0.85441671	-0.69290034
4	88	78.570629	-9.42937102	23.7226892	-0.39748323	-0.42009153
5	59	84.1581588	25.1581588	21.3044889	1.18088535	0.84995727
6	81	61.1676572	-19.8323428	14.2673058	-1.39005522	-0.93684709
7	52	69.0733442	17.0733442	16.3600268	1.04360124	0.69290034
8	77	44.8496433	-32.1503567	9.47289487	-3.39393154	-1.81341758
9	41	71.8191866	30.8191866	17.3623336	1.77506016	1.57058504
10	41	65.2439763	24.2439763	17.998533	1.34699735	1.03145908
11	70	44.2696451	-25.7303549	10.9968731	-2.33978828	-1.25548616
12	46	67.105867	21.105867	15.184738	1.38993949	1.395747
13	56	57.0191614	1.01916136	14.7960316	0.06888072	-0.11685273
14	70	75.0266804	5.02668043	19.6296252	0.25607623	0.42009153
15	74	51.7970746	-22.2029255	14.2857418	-1.55420179	-1.03145908
16	59	38.8153363	-20.1846637	8.57962311	-2.35262825	-1.395747
17	31	62.1257077	31.1257077	13.8906185	2.24077191	1.81341758
18	49	68.7510024	19.7510024	15.8322117	1.24752011	0.93684709

19	74	53.2433725	-20.7566275	12.8259047	-1.61833633	-1.13634081
20	49	81.2968998	32.2968998	23.756329	1.35950718	1.13634081
21	88	65.6285196	-22.3714804	17.3362943	-1.2904419	-0.84995727
22	74	40.3715903	-33.6284097	9.85527545	-3.41222423	-2.2692058
23	29	70.3529569	41.3529569	15.9642605	2.5903459	2.2692058
24	43	61.2027701	18.2027701	16.012145	1.13681022	0.76905532
25	77	44.6784088	-32.3215912	11.7923856	-2.74088655	-1.57058504
26	74	75.5432861	1.54328609	17.4025436	0.08868164	-0.05832673
27	77	79.3413816	2.34138162	18.6325617	0.12566075	0.11685273
28	77	79.487654	2.48765398	18.9477893	0.13128993	0.17578211
29	84	70.4811836	-13.5188164	19.2221595	-0.70329332	-0.5513477
30	74	86.7970844	12.7970844	22.5581627	0.56729285	0.62056828
31	88	70.3357873	-17.6642127	16.425233	-1.07543148	-0.76905532
32	77	81.2647282	4.26472819	18.7765361	0.22713072	0.35721585
33	84	78.123433	-5.87656696	18.017735	-0.32615459	-0.35721585
34	77	76.5139744	-0.48602558	20.4733506	-0.02373943	-0.17578211
35	81	86.0336761	5.0336761	22.5128888	0.22359086	0.29572271
36	81	79.8589087	-1.14109133	19.7695423	-0.05771966	-0.23532887
37	70	78.0721573	8.07215728	18.7668609	0.43012826	0.5513477
38	52	79.9898236	27.9898236	20.2716455	1.38073762	1.25548616
39	77	72.8850148	-4.11498524	20.1659821	-0.20405578	-0.29572271
40	84	88.9249702	4.92497017	28.8262152	0.17085039	0.23532887
41	74	76.6566964	2.65669636	21.8672359	0.1214921	0.05832673
42	88	90.4543199	2.45431993	26.4482962	0.0927969	0

ANEXO N°14. Validación cruzada de Espaciado de las discontinuidades

Tabla 17

Validación cruzada de Espaciado de las discontinuidades

FID	Measured	Predicted	Error	StdError	Stdd_Error	NormValue
0	0.48	0.42279	-0.05721	0.129375	-0.442201	-0.420092
1	0.48	0.388349	-0.091651	0.098483	-0.930631	-0.6929
2	0.43	0.5223	0.0923	0.157849	0.584736	0.620568
3	0.52	0.425725	-0.094275	0.10571	-0.891823	-0.620568
4	0.56	0.506955	-0.053045	0.163738	-0.323964	-0.357216
5	0.38	0.543274	0.163274	0.143368	1.138845	0.849957
6	0.55	0.387872	-0.162128	0.093109	-1.741276	-1.136341
7	0.33	0.449559	0.119559	0.109561	1.091257	0.769055
8	0.47	0.275714	-0.194286	0.058051	-3.346838	-1.570585
9	0.26	0.452465	0.192465	0.112153	1.716103	1.570585
10	0.24	0.420756	0.180756	0.122884	1.47094	1.255486
11	0.46	0.270509	-0.189491	0.069772	-2.715868	-1.395747
12	0.28	0.42968	0.14968	0.098532	1.519091	1.395747
13	0.36	0.355133	-0.004867	0.096734	-0.050314	-0.175782
14	0.44	0.50401	0.06401	0.138096	0.463514	0.420092
15	0.47	0.332911	-0.137089	0.097273	-1.409331	-0.936847
16	0.37	0.24199	-0.12801	0.053995	-2.370761	-1.255486
17	0.2	0.394556	0.194556	0.089089	2.183839	1.813418
18	0.32	0.458651	0.138651	0.108046	1.283266	1.031459

19	0.49	0.347248	-0.142752	0.086127	-1.65746	-1.031459
20	0.32	0.529578	0.209578	0.165315	1.26775	0.936847
21	0.58	0.418897	-0.161103	0.116516	-1.38267	-0.849957
22	0.48	0.231725	-0.248275	0.058442	-4.24825	-2.269206
23	0.16	0.451811	0.291811	0.104568	2.790619	2.269206
24	0.28	0.377281	0.097281	0.103555	0.939413	0.6929
25	0.48	0.248389	-0.231611	0.068616	-3.375475	-1.813418
26	0.45	0.469085	0.019085	0.110645	0.172484	0.058327
27	0.48	0.49579	0.01579	0.119358	0.132295	0
28	0.47	0.49244	0.02244	0.121029	0.185407	0.175782
29	0.53	0.44748	-0.08252	0.129016	-0.639612	-0.551348
30	0.48	0.554825	0.074825	0.151125	0.495123	0.551348
31	0.57	0.446901	-0.123099	0.107464	-1.145495	-0.769055
32	0.46	0.516503	0.056503	0.121894	0.463543	0.484675
33	0.55	0.488862	-0.061138	0.115035	-0.531473	-0.484675
34	0.47	0.481733	0.011733	0.135498	0.086595	-0.058327
35	0.53	0.559763	0.029763	0.153267	0.194189	0.235329
36	0.54	0.513956	-0.026044	0.13255	-0.196483	-0.295723
37	0.45	0.508613	0.058613	0.126518	0.463276	0.357216
38	0.32	0.508815	0.188815	0.135064	1.397968	1.136341
39	0.47	0.457277	-0.012723	0.134111	-0.094869	-0.235329
40	0.53	0.565372	0.035372	0.197637	0.178973	0.116853
41	0.48	0.483837	0.003837	0.146949	0.026109	-0.116853
42	0.56	0.596913	0.036913	0.185561	0.198926	0.295723