

# FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería de Minas

“ESTIMACIÓN GEOESTADÍSTICA DEL RQD, RCU, JRC Y DENSIDAD APLICADA A ENTENDER EL COMPORTAMIENTO GEOMECÁNICO DEL CERRO LA FALDA, LA ENCAÑADA – CAJAMARCA, 2019”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autor:

Juan Omar Gálvez Caballero

Asesor:

Ing. Óscar Vásquez Mendoza

Cajamarca - Perú

2019



## DEDICATORIA

A mis padres y hermanos por el apoyo incondicional que me brindaron durante mi formación profesional.

A Samyl por sus palabras de aliento permanente que me motivaron para plasmar la presente investigación. A ustedes va dirigido este trabajo

Juan Omar Gálvez Caballero

## AGRADECIMIENTO

A Dios por bendecir cada uno de mis días a lo largo de mi carrera profesional.

A mis padres y hermanos por sus principios, consejos y su apoyo constante en los momentos difíciles.

Al ingeniero Óscar Vásquez Mendoza por su apoyo y asesoría permanente durante el desarrollo de la presente investigación.

También quiero expresar mi gratitud al ingeniero Víctor Rivasplata Melgar por la orientación y apoyo para encaminar de la mejor manera la parte analítica desarrollada.

Juan Omar Gálvez Caballero

## Tabla de contenidos

<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>2</b>
<b>AGRADECIMIENTO.....</b>	<b>3</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>5</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>6</b>
<b>ÍNDICE DE ABREVIATURAS .....</b>	<b>12</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>16</b>
<b>CAPÍTULO II. METODOLOGÍA .....</b>	<b>31</b>
<b>CAPÍTULO III. RESULTADOS .....</b>	<b>49</b>
<b>CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>86</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>92</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>98</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla N° 1.</b> Valores de densidad para cada una de las muestras tomadas en campo. ....	46
<b>Tabla N° 2.</b> Análisis de los parámetros de tendencia central de los valores con distribución normal.....	47
<b>Tabla N° 3.</b> Análisis de los parámetros de tendencia central de los valores con distribución log normal.....	47
<b>Tabla N° 4.</b> Análisis de los parámetros de dispersión de los valores con distribución normal.....	48
<b>Tabla N° 5.</b> Análisis de los parámetros de dispersión de los valores con distribución log normal.....	48
<b>Tabla N° 6.</b> Valores del RQD para cada uno de los puntos de muestreo. ....	50
<b>Tabla N° 7.</b> Valores del RCU para cada uno de los puntos de muestreo. ....	53
<b>Tabla N° 8.</b> Valores del JRC para cada uno de los puntos de muestro .....	56
<b>Tabla N° 9.</b> Acceso al área de estudio .....	66
<b>Tabla N° 10.</b> Coordenadas de puntos de muestreo .....	72

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ocurrencia de riesgos geológicos inventariados _____	18
<b>Figura 2.</b> Variabilidad de la DE en relación a la media de los datos. _____	22
<b>Figura 3.</b> Trend Analysis _____	24
<b>Figura 4.</b> Ubicación de la zona de estudio _____	37
<b>Figura 5.</b> Ábaco para calcular la resistencia a la compresión uniaxial _____	52
<b>Figura 6.</b> Profundidad de la rugosidad vs lon. del peine de Barton - cálculo del JRC. ____	54
<b>Figura 7.</b> Relación del parámetro JRC de Barton and Choubey (1977) con la descripción de Bienawski (1976). _____	55
<b>Figura 8.</b> Histograma de distribución normal para el RQD _____	57
<b>Figura 9.</b> Histograma de distribución normal para el RCU _____	58
<b>Figura 10.</b> Histograma de distribución Log - normal para el RCU _____	58
<b>Figura 11.</b> Correlación lineal baja entre el RQD y JRC _____	59
<b>Figura 12.</b> Correlación lineal baja entre el RQD y RCU _____	60
<b>Figura 13.</b> Correlación lineal baja entre el JRC y RCU _____	60
<b>Figura 14.</b> Trend Analysis del RQD _____	61
<b>Figura 15.</b> Trend Analysis del RCU _____	62
<b>Figura 16.</b> Trend Analysis del JRC _____	62
<b>Figura 17.</b> Variograma del RQD _____	63
<b>Figura 18.</b> Variograma del RCU. _____	64
<b>Figura 19.</b> Variograma del JRC. _____	65
<b>Figura 20.</b> Correlación lineal entre el valor real del RQD y el valor predictivo también para el RQD en el mismo punto. _____	75

<b>Figura 21.</b> Sectorización de la zona de estudio según el análisis del RQD. _____	77
<b>Figura 22.</b> Correlación lineal entre el valor real del RCU y el valor predictivo también para el RCU en el mismo punto. _____	78
<b>Figura 23.</b> Sectorización de la zona de estudio según el análisis del RCU. _____	80
<b>Figura 24.</b> Correlación lineal entre el valor real del JRC y el valor predictivo también para el JRC en el mismo punto. _____	81
<b>Figura 25.</b> Sectorización de la zona de estudio según el análisis del JRC. _____	<b>¡Error!</b>
<b>Marcador no definido.</b>	
<b>Figura 26.</b> Sectorización de la zona de estudio según el análisis de densidad. _____	86
<b>Figura 27.</b> Sectorización de la zona de estudio según el análisis geoestadístico del RCU. _____	89

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1.</b> Conceptos de análisis estadístico.....	26
<b>Gráfico 2.</b> Tipos de Variograma .....	27
<b>Gráfico 3.</b> Geoestadística y los tipos de interpoladores.....	28
<b>Gráfico 4.</b> Secuencia metodológica de análisis de muestras mediante técnicas Geoestadísticas. ....	34

## ÍNDICE DE PLANOS

<b>Plano N° 1:</b> Plano de imagen de Google Earth .....	36
<b>Plano N° 2:</b> Plano de ubicación .....	67
<b>Plano N° 3:</b> Plano de geología.....	71
<b>Plano N° 4:</b> Plano de ubicación de puntos de muestreo .....	73
<b>Plano N° 5:</b> Plano de estimación del RQD .....	76
<b>Plano N° 6:</b> Plano de estimación del RCU .....	79
<b>Plano N° 7:</b> Plano de estimación del JRC.....	82
<b>Plano N° 8:</b> Plano de estimación de la densidad .....	85

## ÍNDICE DE FOTOS

<b>Foto 1.</b> Deslizamiento de rocas, en la vía Celendín - Cajamarca, km 43. _____	17
<b>Foto 2.</b> Con vista al SW. Afloramientos dispersos en el sector La Falda con presencia de calizas y una delgada cobertura de suelo orgánico e ichu. _____	38
<b>Foto 3.</b> Con vista al N. Presencia de afloramientos en el punto de muestreo N°30. _____	38
<b>Foto 4.</b> Reconocimiento del área y visualización de afloramientos. _____	39
<b>Foto 5.</b> Toma de datos para el RQD _____	40
<b>Foto 6.</b> Toma de discontinuidades por metro lineal _____	40
<b>Foto 7.</b> Muestra del Nreb con el martillo SCHMIDT en sentido perpendicular. _____	41
<b>Foto 8.</b> Muestra del Nreb con el martillo SCHMIDT en sentido horizontal. _____	42
<b>Foto 9.</b> Muestra del Nreb con el martillo SCHMIDT en sentido vertical. _____	42
<b>Foto 10.</b> Muestra de rugosidad con el peine de BARTON sobre la discontinuidad del macizo rocoso. _____	43
<b>Foto 11.</b> Medición de rugosidad con el peine de BARTON _____	44
<b>Foto 12.</b> Muestra de PRug con el peine de BARTON en el punto de muestreo N°10. ____	44
<b>Foto 13.</b> Pliegue parásito (anticlinal) desarrollado en la Fm. Pariatambo _____	69
<b>Foto 14.</b> Calizas wackestone de la Fm. Yumagual _____	70
<b>Foto 15.</b> Caracterización de las zonas de estudio según el valor del RQD _____	74

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo N° 1:</b> Criterios para la estimación de la Resistencia .....	95
<b>Anexo N° 2:</b> Valorización de los parámetros Q.....	96
<b>Anexo N° 3:</b> Valor real vs. Valor predictivo RQD .....	97
<b>Anexo N° 4:</b> Valor real vs. Valor predictivo RCU .....	98
<b>Anexo N° 5:</b> Procedimiento de laboratorio para determinar la densidad del macizo rocoso. .....	99

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

$X$	Media Aritmética
Me	Mediana
DE	Desviación Estándar
CV	Coefficiente de Variación
$\rho$	Análisis de coeficiente de correlación
$\rho_{rank}$	Análisis de coeficiente de correlación de Spearman
Trend Analysis	Análisis de tendencia central
Ki-chu	Formación Chúlec
Ki-pa	Formación Pariatambo
Ki-yu	Formación Yumagual
km.	Kilómetro
RQD	Designación de la calidad de la roca
Mpa	Mega – pascal
RCU	Resistencia a la compresión Uniaxial
JRC	Coefficiente de rugosidad de las juntas
$N/m^2$	Newton/metro – cuadrado
E	Este

NE	Noreste
S	Sur
SO	Suroeste
N	Norte
M	Metros
Cm	Centímetros
NReb	Número de rebotes con el martillo de SCHMIDT
PRug	Profundidad de la rugosidad
$g/cm^3$	Gramos/ centímetro cúbico
$KN/m^3$	Kilo Newton/ metro cúbico
$\lambda$	Número de fracturas por metro lineal
Ln	Logaritmo neperiano
$R^2$	índice de determinación, valor cuadrado del índice de correlación bivariada

## RESUMEN

En la actualidad existen diversos métodos geotécnicos y clásicos que permiten estimar, diseñar y evaluar los macizos rocosos.

En la presente investigación aplicare técnicas geoestadísticas como el método de Kriging, análisis de tendencia de datos (Trend Analysis) procedimientos de análisis de la normalidad de datos, variogramas, estadística univariada y bivariada para analizar el macizo rocoso del cerro la Falda- La Encañada, Cajamarca.

Se analizaron cuatro tipos de parámetros:

RQD (%): “Designación de la calidad de la roca”, este parámetro nos brindará el resultado de tipo de calidad de roca que existe en la zona, el cual fue medido a partir de la ocurrencia de fracturas por metro lineal.

RCU: “Resistencia a la compresión uniaxial, se obtuvo a partir de la medición del rebote obtenido del martillo de SCHMIDT y se trabajó en base a un ábaco (Miller, 1996) este parámetro nos proporcionará la resistencia del macizo rocoso.

JRC: “Coeficiente de rugosidad de las juntas, este parámetro nos dará el tipo de rugosidad presente en el macizo rocoso, los resultados se obtuvieron con el peine de BARTON.

Densidad: Se obtendrá a partir de los análisis realizados a las muestras obtenidas en campo.

Al obtener estos parámetros y analizar las muestras obtenidas de todos los puntos de muestreo en campo, se determinó cual es el comportamiento del macizo rocoso mediante la estimación geoestadística, en la cual se incluye técnicas de reducción del error y consideraciones previas de hipótesis intrínseca e hipótesis estacionaria.

**Palabras clave:** Designación de la calidad de la roca (RQD), Resistencia a la compresión uniaxial (RCU), Coeficiente de rugosidad de las juntas (JRC), densidad, técnicas geoestadísticas.

## ABSTRACT

At present there are various geotechnical and classical methods that for estimating, design and assess rock mass.

In the present investigation, I will apply geostatistical techniques as the method of Kriging, trend analysis data (Trend Analysis), analysis procedures normality of the data, variograms, univariate and bivariate statistics to analyze the rock mass of La Falda-La Encañada, Cajamarca

Four types of parameters were analyzed:

RQD (%): "Designation of the quality of the rock", this parameter will give us the result of type of rock quality that exists in the area, which was measured from the occurrence of fractures per linear meter.

RCU: "Resistance to uniaxial compression, was obtained from the measurement of the rebound obtained from the hammer of SCHMIDT and worked on the basis of an abacus (Miller, 1996) this parameter will provide us with the strength of the rock mass.

JRC: "Coefficient of roughness of the joints, this parameter will give us the type of roughness present in the rock mass, the results were obtained with the comb BARTON.

Density: It will be obtained from the analyzes made to the samples obtained in the field. When obtaining these parameters and analyzing the samples obtained from all the sampling points in the field, the behavior of the rock mass was determined by means of geostatistical estimation, which includes error reduction techniques and previous considerations of intrinsic hypothesis and hypothesis. stationary

Key words: Designation of rock quality (RQD), Uniaxial compression resistance (RCU), Joint roughness coefficient (JRC), density, geostatistical techniques.

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Realidad problemática

La región de Cajamarca presenta zonas geográficas con diversas características geotécnicas, en dichas zonas se han establecido importantes obras civiles, vías de comunicación que conectan las principales ciudades de la región sin haberse diagnosticado de manera óptima el comportamiento geomecánico de la zona ante la ocurrencia de posibles fenómenos naturales, como fallas, deslizamientos. (Carhuanambo, 2017)

Actualmente existen diversos medios disponibles para reducir los factores de riesgos geológicos que afectan a las diversas poblaciones y los limita económicamente en cuanto al traslado y comercialización de sus mercancías, en este contexto la presente investigación busca obtener una caracterización geomecánica adecuada aplicando técnicas geoestadísticas en el sector la Falda - La Encañada, Cajamarca, de tal manera que la información obtenida sirva como guía y ayude a prevenir eventos naturales en futuros trabajos civiles que se puedan realizar en la zona de estudio. (Carhuanambo, 2017)

Mediante las técnicas geoestadísticas como el análisis estructural (variografía), y el interpolador inezgado (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)

La ocurrencia de riesgos geológicos inventariados por el (INGEMMET, 2011) muestran una clara tendencia a la susceptibilidad de movimientos en masa, asociados a los taludes más cercanos y las vías de acceso entre distritos, provincias, centros

poblados, etc. Un porcentaje considerable de esos movimientos (22.5%) está asociado a macizos rocosos.

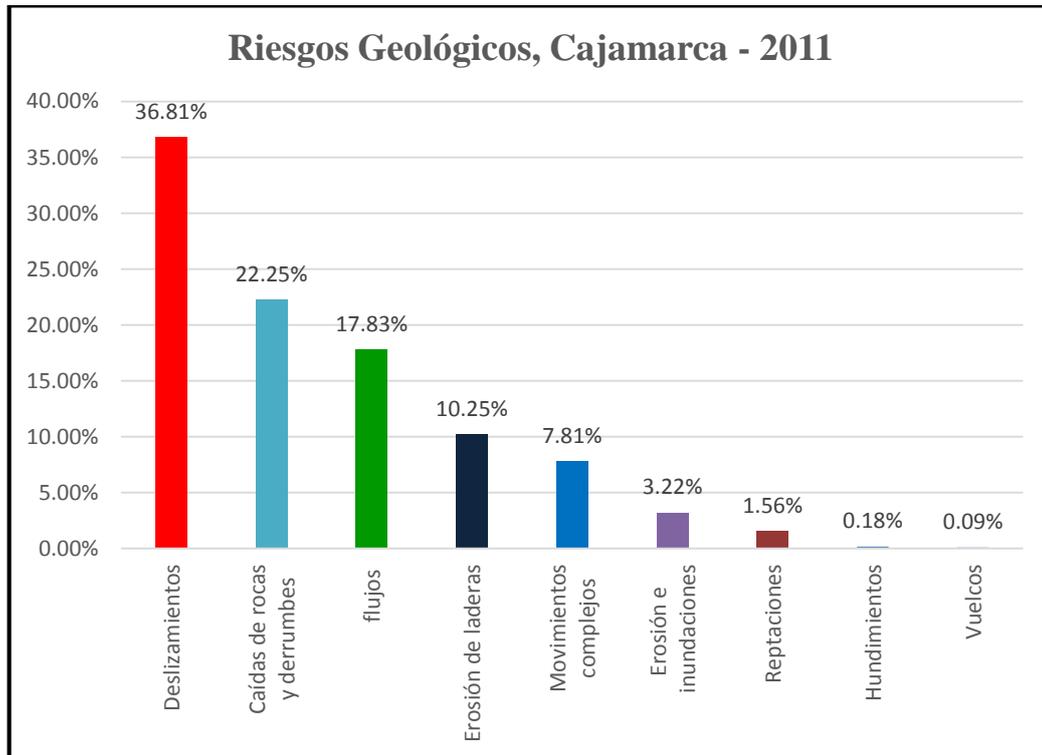


*Foto 1.* Deslizamiento de rocas, en la vía Celendín - Cajamarca, km 43.

**Fuente:** <http://www-bambamarcaaldia.blogspot.com/2016/12/colapsa-carretera-cajamarca-celendin.html>

#### Antecedentes

Zavala y Rosado (2011), “Boletín 44” del INGEMMET, realizan el estudio de Riesgos Geológico en la Región Cajamarca en el que se indica que Cajamarca es afectada frecuentemente por inundaciones, huaycos y deslizamientos; se indica la ocurrencia de peligros geológicos y geohidrológicos inventariados mostrando en primer lugar deslizamientos (36.81%), caídas de rocas y derrumbes (22.25%), flujos (17.83 %), erosión de laderas (10.25%), movimientos complejos (7.81%), erosión e inundación fluviales (3.22%), reptaciones (1,56%), hundimientos (0.18%) y vuelcos (0.09%). Concluyendo con la elaboración de mapas de inventario de peligros geológicos, susceptibilidad a movimientos en masa, susceptibilidad a las inundaciones y erosión fluvial, zonas críticas por peligros geológicos.



**Figura 1.** Ocurrencia de riesgos geológicos inventariados

Fuente: (INGEMMET, 2011)

Según (Villada & Londoño, 2014) en el paper titulado: “aplicación de métodos geoestadísticos para la caracterización de la calidad química de un depósito de material calcáreo”, realizada en la Universidad de San Buenaventura Facultad de Ingenierías sede Medellín, llega a las siguientes conclusiones:

- ✓ Las técnicas geoestadísticas en comparación con las tradicionales presentan mayores confiabilidades, ya que consideran la correlación espacial para predecir un valor asignando pesos o ponderaciones a los puntos que se consideran cercanos para la estimación. Para este caso, el kriging constituye una técnica ideal para representar las variables del fenómeno objeto de estudio, las confiabilidades que se pueden obtener están por encima del 90%.

- ✓ El modelo espacial propuesto para este trabajo, en especial la escogencia de los tipos de estimadores kriging, responde a los objetivos planteados para realizar las predicciones y caracterizar la calidad química del depósito, convirtiéndose en una metodología útil para el tratamiento de otros casos de estudio.

Según (Egaña, 2008) en su tesis titulada: “Geoestadística aplicada a parámetros geotécnicos”, realizada en la Universidad de Chile facultad de ciencias físicas y matemáticas departamento de Ingeniería de Minas, concluye:

- ✓ 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, claramente en este caso el promedio es un estimador perfecto.
- ✓ En general, los variogramas muestran muy poca continuidad, lo que posiblemente se asocie a la multipoblacionalidad de las variables. Además, en ningún caso se encontraron direcciones preferenciales, pues los variogramas experimentales calculados en la N-S, W-E y en la vertical se entrecruzaban constantemente, por lo que se trabajó siempre con variogramas omnidireccionales.
- ✓ Para variables no aditivas y que dependen de varios factores, como el RMR, Q de Barton, GSI, etc., se recomienda que se modelen a partir de los modelos de cada uno de los factores, tal como se hizo en este trabajo con el RMR, y no aplicando geoestadística directamente a la variable. Esto permite evitar el error asociado a involucrar el promedio de variables no aditivas en la estimación.

## Conceptos Necesarios de Estadística

Con el objetivo de conocer la naturaleza de la data obtenida en campo, se procede a hacer un análisis de la estadística descriptiva (Krajewski y Gibbs, 1993; Journel y Huijbregts, 1978; David, 1977). A continuación, se presenta un resumen de los conceptos y parámetros estadísticos necesarios empleados en dicha evaluación:

Las medidas de tendencia central son: La media, la mediana y quedan definidas a continuación:

### a) Media Aritmética (X):

Sensible a valores extremos. Se calcula mediante la expresión:

#### Ecuación N° 1. Media aritmética

$$\mu = E[Z(u)] \quad ; \quad m = \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n Z(U_{\alpha})$$

### b) Mediana (Me)

No sensible a valores extremos. Es el dato central cuando los datos se ordenan de menor a mayor. El 50% de los demás datos son menores que ella y el 50% de los demás datos son mayores a ella.

Una vez calculadas las medidas de tendencia central, es posible analizar qué tan simétrica es la distribución de los datos, teniendo en cuenta que una distribución completamente simétrica es una distribución normal.

Las medidas de dispersión, permiten determinar qué tan alejados están los datos con relación a las medidas de tendencia central, las más comunes son la desviación estándar (DE) y el coeficiente de variación (CV).

**c) Desviación estándar (DE):**

Es sensible a valores extremos.

Es una normalización de la varianza mediante la transformación raíz cuadrada. Una varianza y una desviación estándar altas indican un alto nivel de dispersión de los datos en torno a la media y viceversa. Se calcula de la siguiente manera.

**Ecuación N° 2. Desviación estándar**

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

**d) Coeficiente de variación (CV):**

Es sensible a valores extremos.

Expresa la dispersión porcentual en términos relativos. Se calcula mediante la siguiente expresión.

**Ecuación N° 3. Coeficiente de variación**

$$CV = 100\left(\frac{\sigma}{\mu}\right)$$

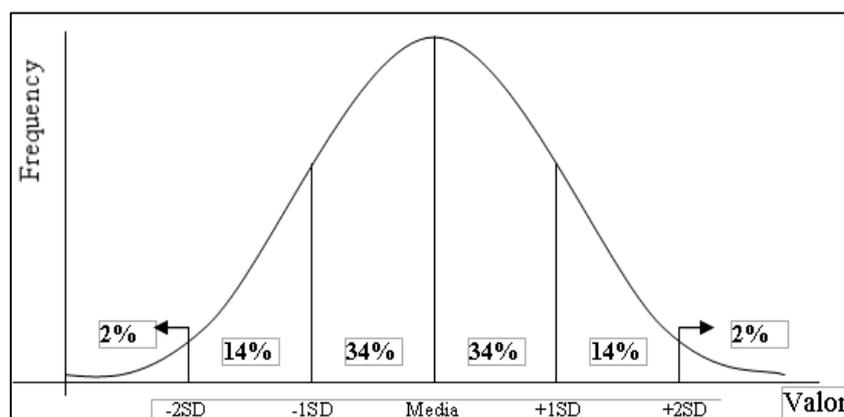
En el cálculo de las medidas de caracterización de los datos se debe tener en cuenta que unos pocos valores muy pequeños o muy grandes pueden afectar fuertemente las estadísticas como la media, la varianza, el coeficiente de correlación lineal o las medidas de continuidad espacial (la covarianza o el semivariograma), a estos valores se les denomina: valores extremos y *outliers*.

## Procedimiento de análisis de la normalidad de datos

### ✓ Análisis de desviación estándar

La desviación estándar es un índice numérico de la dispersión de un conjunto de datos (o población). Mientras mayor es la desviación estándar, mayor es la dispersión de la población. Así, la desviación estándar mide el grado de dispersión o variabilidad. La desviación estándar es un indicador en extremo valioso con muchas aplicaciones. Por ejemplo, los estadísticos saben que cuando un conjunto de datos se distribuye de manera “normal”, el 68% de las observaciones de la distribución tiene un valor que se encuentra a menos a menos de una desviación estándar de la media. También saben que el 96% de todas las observaciones tiene un valor no es mayor a la media más o menos dos desviaciones estándar. (ver figura 2)

(Londoño & Valdés, 2012)



**Figura 2.** Variabilidad de la DE en relación a la media de los datos.

#### ✓ **Análisis del coeficiente de variación**

Para conocer la posible normalidad de una distribución de una base de datos de ocurrencia aleatoria se analiza el coeficiente de variación y el valor que éste toma. Según Koch y Link (1970) el valor del CV debe ser inferior a 0.5 (o 50%) para que una distribución pueda considerarse como gaussiana de distribución normal, mientras que valores superiores indican un carácter log-normal o un conjunto de datos con distribución errática. Otros autores como Carras (1984) por el contrario, admite valores del CV de hasta uno (o 100%). Para fines de este estudio de investigación emplearemos el criterio de Koch y Link (1970).

#### ✓ **Análisis de la diferencia entre el promedio y la mediana**

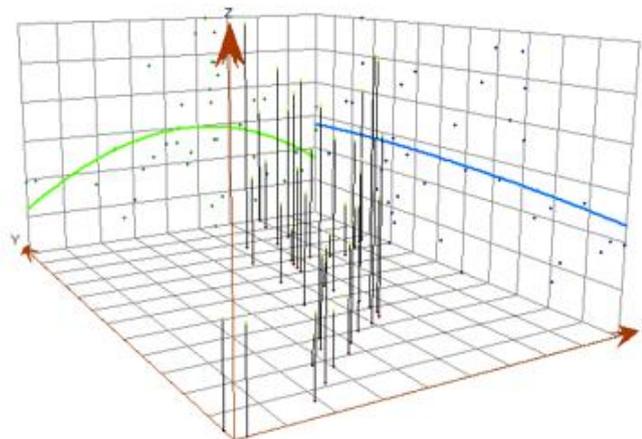
Para asumir una distribución normal los valores de la media aritmética (promedio) y la mediana deben ser los mismos o diferir en un valor menor o igual a la unidad (1), por lo que un valor superior a la unidad se asume como una distribución log-normal. (Koch & Link, 1970)

#### ✓ **Estadística bivariada**

Cuando se tiene más de una variable de estudio, es importante tratar de describir que posible relación puede haber entre ellas, esto se hace por medio de diagramas de dispersión (scatterplots), histogramas bivariados, distribuciones marginales, gráficos intercuantiles, distribuciones condicionales, análisis de regresión, de covarianza y de coeficientes de correlación. (Henao, 2003)

### ✓ **Análisis de tendencia de datos (Trend Analysis)**

La herramienta de análisis de tendencias proporciona una perspectiva tridimensional de los datos. Las ubicaciones de los puntos de muestreo se representan en el plano x, y. Por encima de cada punto de muestra, el valor viene dado por la altura de una línea vertical en la dimensión z. característica única de la herramienta de análisis de tendencias es que los valores se proyectan en el plano x, z, y la y, z plano que los diagramas de dispersión. Esto puede ser pensado como vistas de lado a través de los datos tridimensionales. Los polinomios se tienen que montar a través de los diagramas de dispersión en los planos de proyección. (ver figura 3)



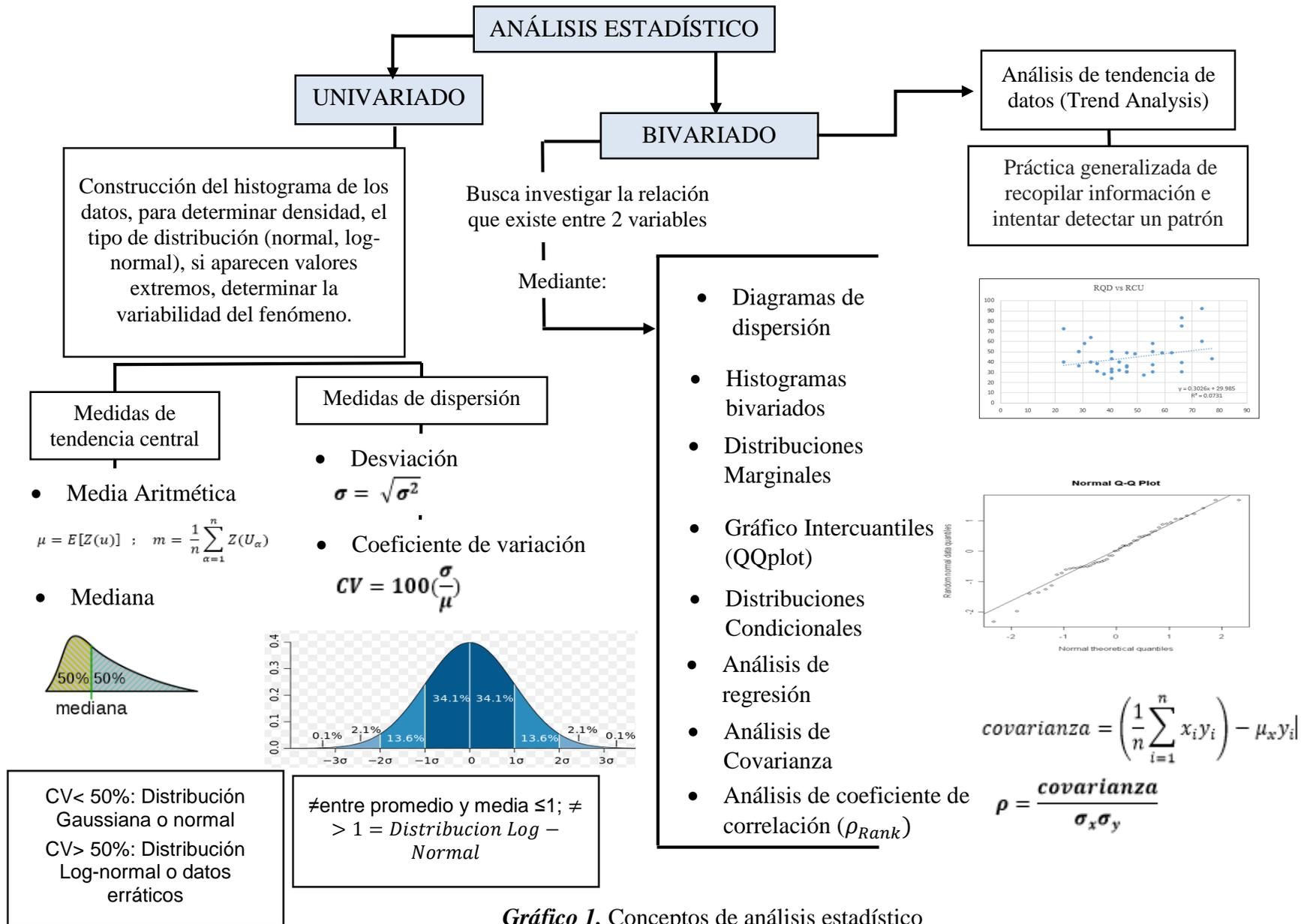
**Figura 3.** Trend Analysis

Una característica adicional es que se pueden rotar los datos para aislar las tendencias direccionales. De forma predeterminada, la herramienta seleccionará polinomios de segundo orden para mostrar las tendencias en los datos, pero puede que desee investigar polinomios de orden uno y tres para evaluar lo bien que encajan los datos. (Esri, 2010)

En los análisis se hace uso de la estadística univariada (Media, mediana, desviación estándar, coeficiente de variación), las correlaciones bivariadas, el uso del variograma esférico y del interpolador Kriging ordinario.

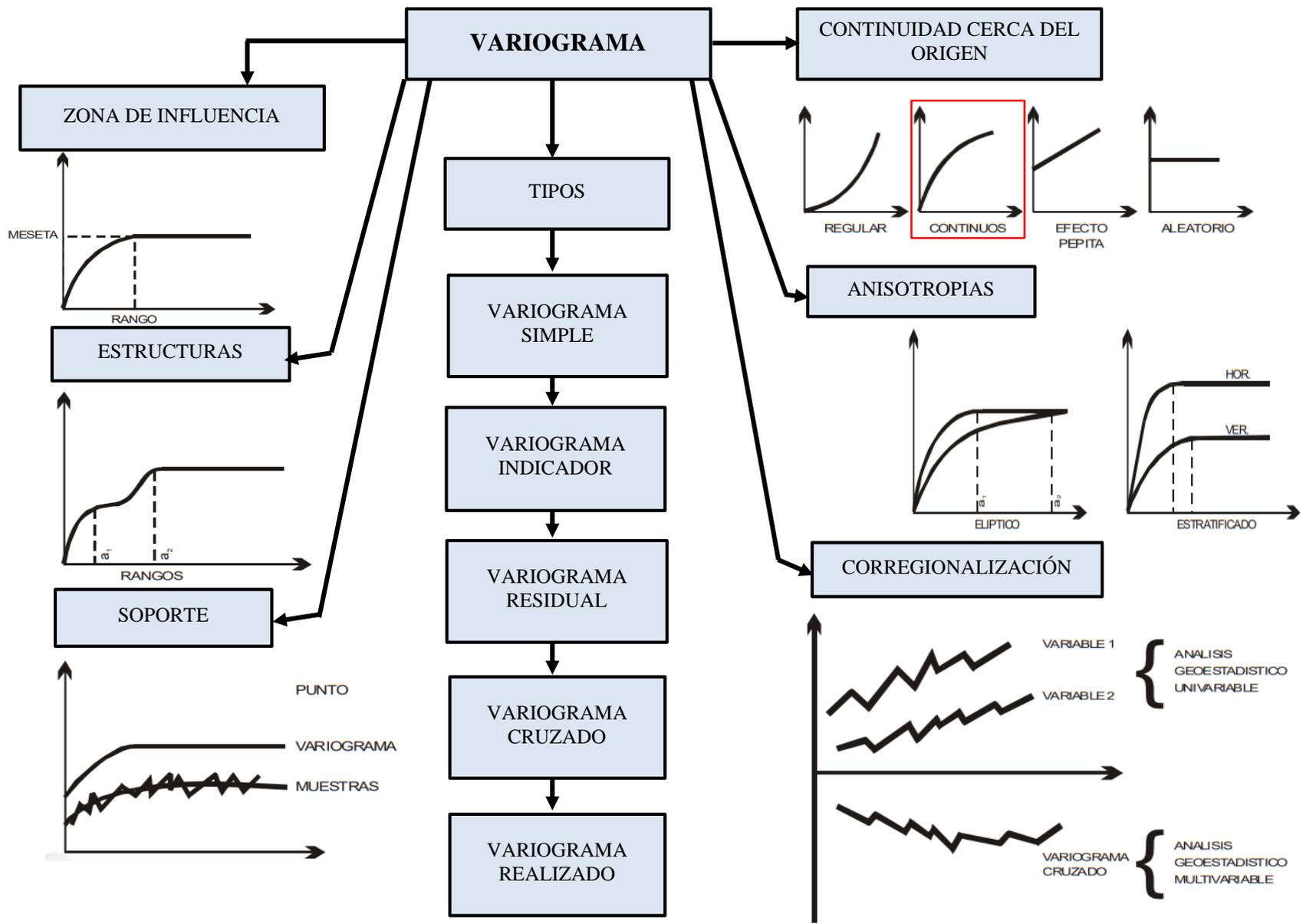
En la mayoría de estudios de naturaleza geomecánica se utiliza Kriging debido a que es una técnica de interpolación que realiza un análisis geoestadístico previo de las variables que se van a analizar (RQD, JRC, RCU, Densidad).

La secuencia de análisis Geoestadístico, las correlaciones, los diagramas, tipo de variograma que han sido utilizados en dicha investigación, se detallan en los siguientes gráficos:



**Gráfico 1.** Conceptos de análisis estadístico

Fuente: Elaboración Propia



**Gráfico 2.** Tipos de Variograma  
Fuente: (Emery & Alfaro, 2012)

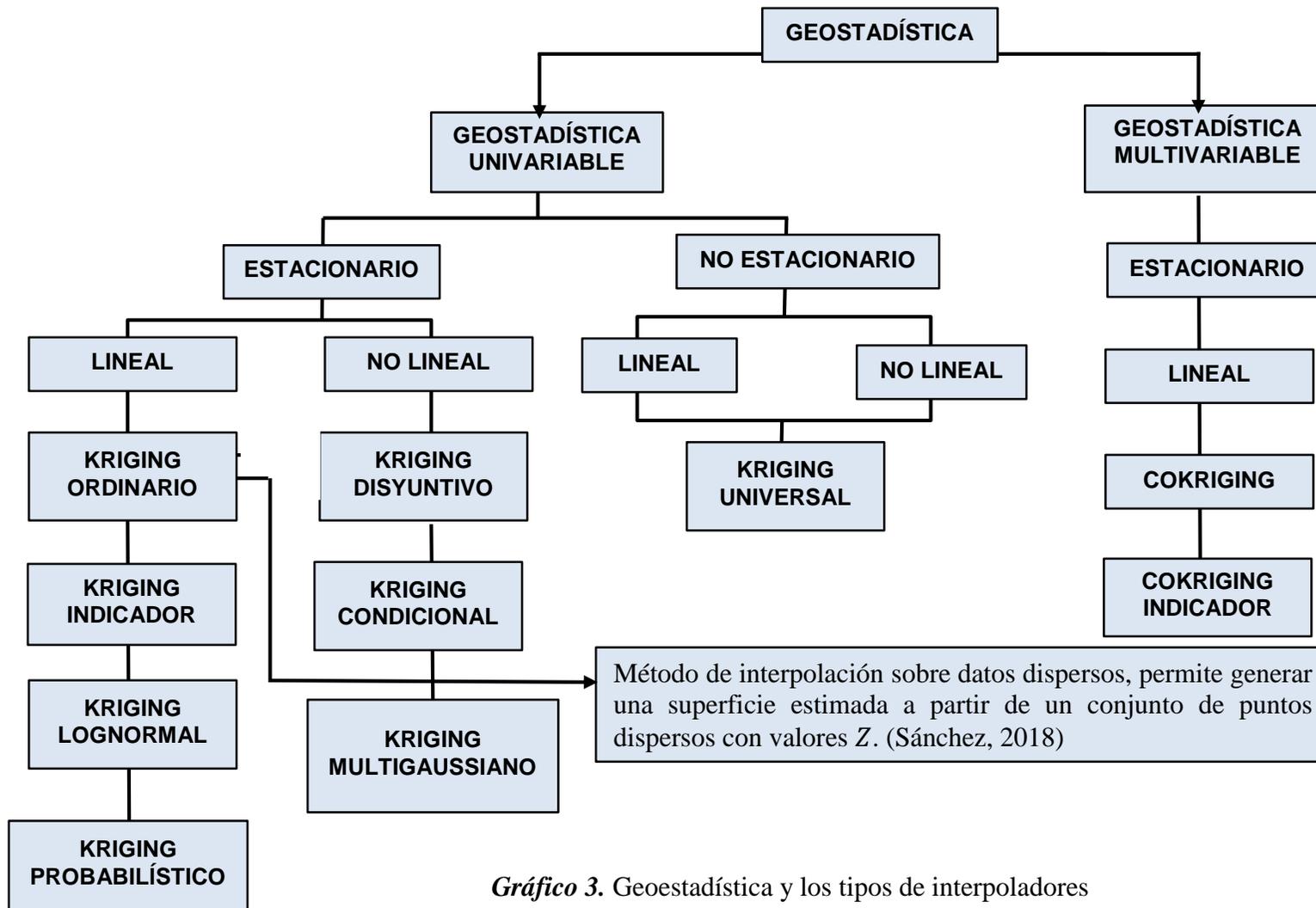


Gráfico 3. Geoestadística y los tipos de interpoladores

Fuente: (Emery & Alfaro, 2012)

## **1.2. Justificación:**

Cajamarca, tiene una economía dinámica, parte de ello se debe a la actividad minera, agrícola, ganadera, y como consecuencia a la venta de materias primas que se realiza a las principales ciudades del país gracias al transporte de productos. Para lo cual se hace necesario contar con vías de comunicación en condiciones técnicas adecuadas durante todo el año, para cumplir con estas características técnicas amerita de un adecuado estudio para permitir el normal desarrollo de la población.

## **1.3. Limitaciones:**

Escasa disponibilidad de equipos de laboratorio por parte de la Universidad Privada del Norte, los equipos e instrumentos de laboratorio no pueden ser usados fuera del campus universitario, debido a políticas internas de dicha institución.

Esta limitación se solucionará recolectando las muestras en campo y con su posterior traslado al laboratorio para realizar los análisis correspondientes de: RQD, Resistencia a la compresión uniaxial, Densidad.

## **1.4. Formulación del problema**

¿Cuál es el comportamiento geomecánico del cerro la Falda a partir de la estimación geoestadística del RQD, RCU, JRC y densidad?

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo general**

Realizar una estimación geoestadística del RQD, RCU, JRC y densidad aplicada a entender el comportamiento geomecánico del cerro la Falda, La Encañada – Cajamarca.

### 1.5.2. Objetivos específicos

- ✓ Estimar el RQD a partir de la interpolación con el método de Kriging
- ✓ Analizar los valores del martillo de Schmidt en un plano de estimación
- ✓ Estimar los valores del peine de Barton según la ubicación de los puntos muestreados en campo.
- ✓ Determinar la densidad del macizo rocoso del cerro la Falda, a partir de la toma de muestras aleatorias comprendidas en la zona de estimación.

## 1.6. Hipótesis

### 1.6.1. Hipótesis general

La estimación de los parámetros geomecánicos ayudan a predecir el comportamiento geomecánico de los macizos rocosos como el RQD, resistencia a la compresión uniaxial, rugosidad y densidad, pueden ser modelados con softwares especializados aplicando modelos geoestadísticos que realicen el análisis estructural de las variables regionalizadas y que tengan una tendencia a minimizar el error del análisis.

### 1.6.2. Hipótesis específicas

- ✓ La adecuada estimación geoestadística del RQD permitirá entender mejor el comportamiento geomecánico del cerro la Falda.
- ✓ La secuencia ordenada de toma de datos permitirá tener resultados correctos del RCU.
- ✓ Una correcta interpretación del JRC dará resultados técnicos confiables del macizo rocoso.
- ✓ La densidad del macizo rocoso del cerro la Falda tendrá una tendencia uniforme debido a la distribución de los puntos de muestreo.

## CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

La caracterización geomecánica de los macizos rocosos facilita en forma significativa y hace más confiable el pronóstico sobre el comportamiento del macizo rocoso, lo que disminuye la probabilidad de que se produzcan afectaciones de diferentes índoles que puedan atentar tanto la economía como la seguridad de las obras y los trabajadores que se encuentran en ellas. Para complementar la tarea planteada se emplea una metodología integral de investigación que consta de trabajos analíticos y experimentales. La metodología que se desarrolla puede ser aplicada en la caracterización geomecánica de diversos macizos rocosos en obras de superficie. Como tal esta metodología constituye un aporte científico, ya que incluye aspectos de gran importancia que permiten evaluar y pronosticar el comportamiento del macizo rocoso. (López Jimeno, 1998)

### 2.1. Tipo de investigación

El tipo de diseño de investigación es no experimental - Aplicativa.

### 2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos)

#### 2.2.1. Población

Macizo rocoso del sector La Falda

#### 2.2.2. Muestra

El macizo rocoso que se encuentra en los taludes del tramo comprendido entre el km. 29+062 y km.31+082 de la Carretera que une el distrito de La Encañada y la provincia de Celendín

#### 2.2.3. Equipos y materiales

✓ **Martillo de SCHMIDT:** Este instrumento sirve para calcular la resistencia a la compresión uniaxial en el macizo rocoso.

- ✓ **Peine de BARTON:** Para calcular el índice de rugosidad de la junta o JRC.
- ✓ **GPS:** Navegadorio Garmin Mal 60 Cx, utilizado para la obtención de coordenadas para la ubicación de puntos y estaciones geomecánicas.
- ✓ **Brújula Brunton:** Utilizado para la toma de datos de direcciones de discontinuidades y planos de estratificación.
- ✓ **Picota de Geólogo:** Para sacar muestras representativas de cada punto y llevarlas a laboratorio para saber la densidad de la roca.
- ✓ **Flexómetro (5m),** usado para para calcular el número de discontinuidades por *metro lineal*.
- ✓ **Cámara fotográfica digital Leica S-007,** utilizada para el registro fotográfico.
- ✓ **Picota geológica y bolsas de muestreo.** Herramientas utilizadas para sacar muestras y calcular la resistencia del macizo rocoso respectivamente.
- ✓ **Libreta de campo, lapiceros y lápiz,** utilizados para anotaciones y cartografiado.
- ✓ **Software Arcgis V 10.5, Minitab, Google Earth,** usados para crear los planos, calcular parámetros de resistencia del macizo rocoso.
- ✓ **Laptop,** máquina usada para el procesamiento de datos y redacción de informes.
- ✓ **Balanza graduada:** Equipo utilizado para pesar las muestras representativas tomadas en la zona de estudio.
- ✓ **Vaso de laboratorio de 600ml,** para medir el volumen del agua, de tal manera que se obtengan datos para obtener la densidad de las muestras.

## **2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos**

### **Procedimiento**

El presente trabajo de investigación se trabajará en 4 etapas:

#### **Etapas de Gabinete**

Elaboración del plan de trabajo; recolección, estructuración, diseño, análisis y procesamiento de la información.

#### **Etapas de Campo**

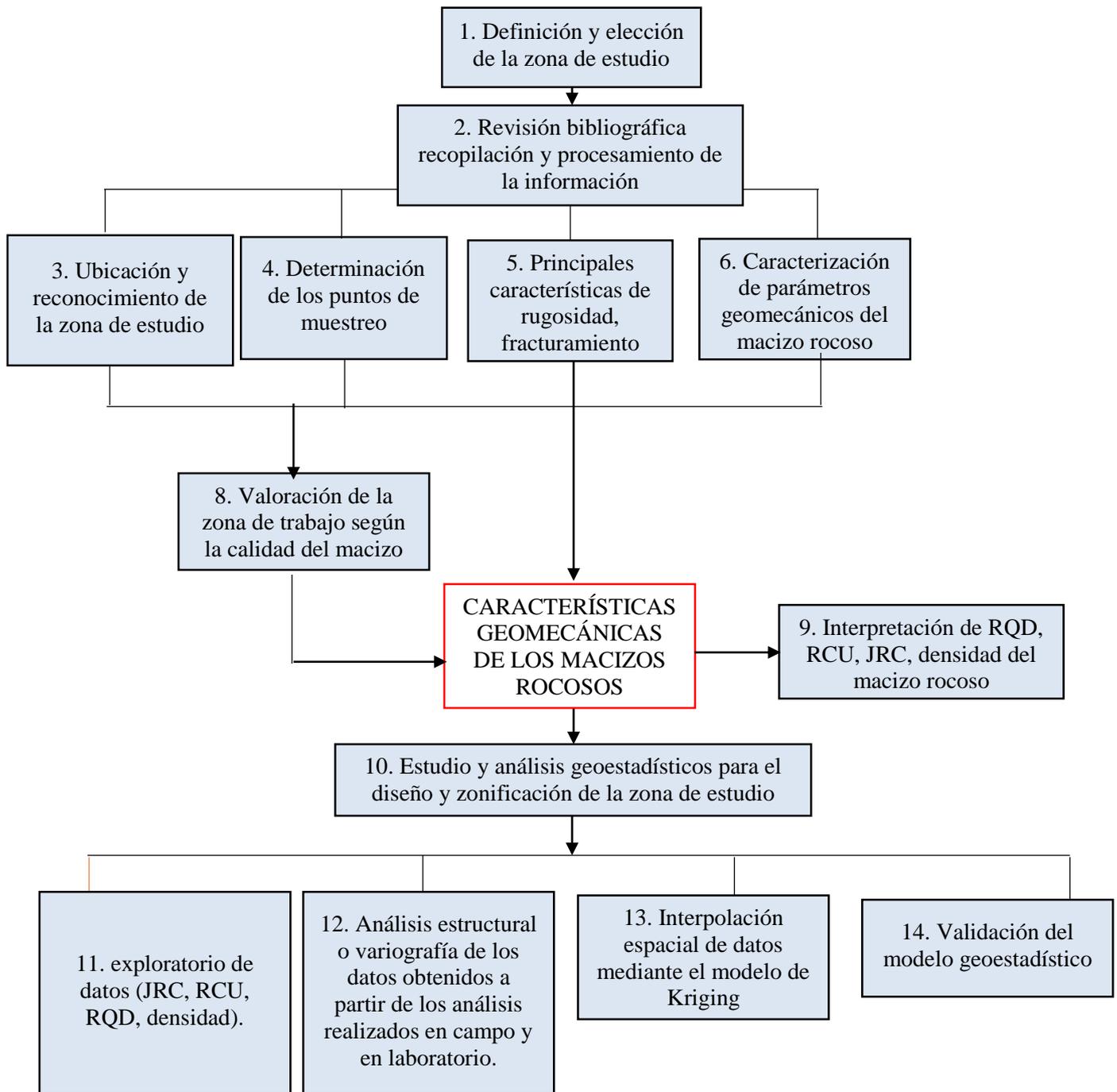
Recolección de datos geomecánicos, los que serán analizados permitiéndose definir el comportamiento geoestadístico/geomecánico del lugar.

#### **Etapas de análisis en Laboratorio**

Se realizó en el laboratorio de Mecánica de Rocas de la Universidad Privada del Norte, los análisis, interpretación, toma de datos y registros respectivos de los valores de densidad de cada una de las 5 muestras obtenidas en el campo de estudio.

#### **Etapas final**

La información obtenida en campo es procesada e interpretada en gabinete, haciendo uso de la metodología de experimentación se determinará el mejor modelo geoestadístico para las variables geomecánicas, haciendo uso de softwares especializados y criterios técnicos, se logrará delinear y construir los modelos geoestadísticos.



**Gráfico 4.** Secuencia de análisis de parámetros geomecánicos

Fuente: Elaboración propia

## **PROCEDIMIENTO EN GABINETE**

### **✓ Revisión bibliográfica del comportamiento geomecánico/estructural de la zona de estudio**

Se realizó la investigación bibliográfica del tema, en la que se analiza los diversos estudios y trabajos efectuados en nuestro país, los cuales proporcionan una información importante para caracterizar el objeto de estudio, se ha identificado zonas con alto índice de riesgos geomecánicos, eligiéndose el macizo rocoso ubicado en el tramo de la vía que une la ciudad de La Encañada con la Provincia de Celendín (sector La Falda), distrito de la Encañada, Cajamarca - Perú.

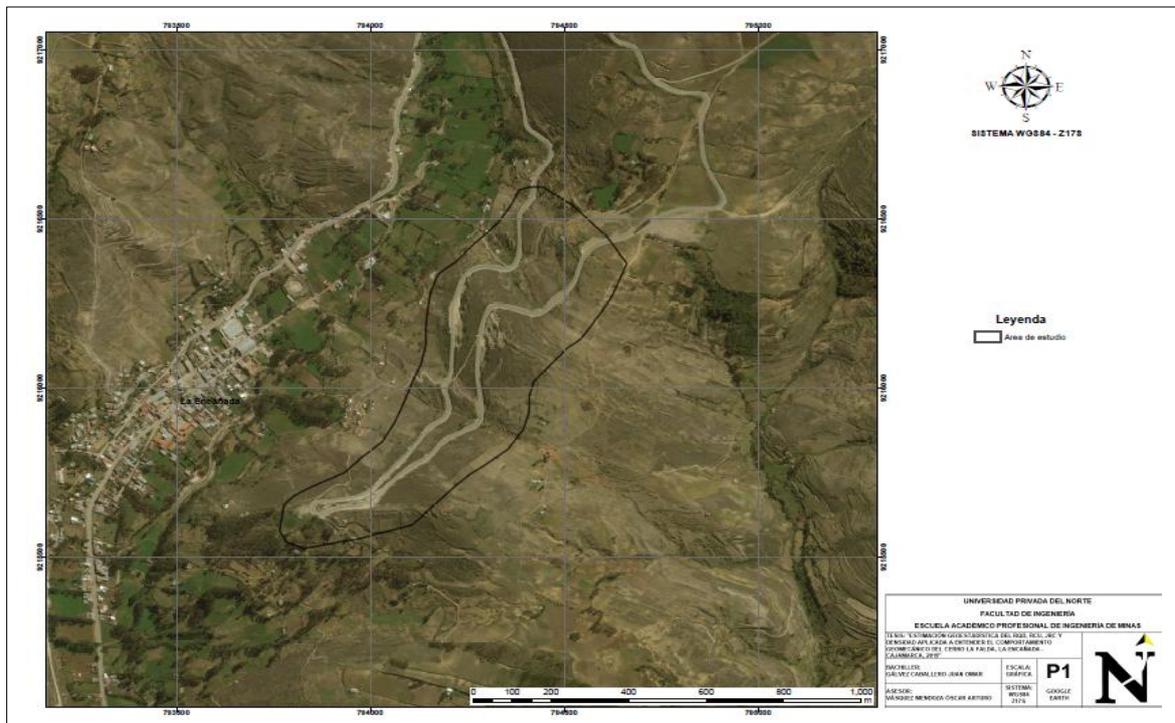
Sobre la base de esta información existente se determinó el conjunto de métodos de investigación a aplicar.

### **✓ Análisis de imágenes satelitales en gabinete**

Para poder determinar la zona de muestreo y/o toma de datos técnicos sobre los diversos parámetros del macizo rocoso, se empleó la plataforma del servidor Google Earth, el cual proporcionó información relevante para el diseño del tipo de muestreo, que fue el del tipo irregular, debido a la poca ocurrencia de afloramientos en el sector de estudio, sin embargo, en la carretera se mostraba como mejor fuente para realizar los estudios y tomar muestras para los ensayos de densidad.

### **✓ Google Earth**

En el plano N° 1 Se puede observar que los afloramientos expuestos sobre el tramo la carretera que une La Encañada con la provincia de Celendín (km.29+062 – km.31+082) presentan una distribución aleatoria, lo cual nos ayudará a definir de manera clara el diseño de la malla que utilizaremos para el muestreo de las variables regionalizadas. (Ver plano 1)



*Plano N° 1:* Plano de imagen de Google Earth

#### ✓ **Diseño de la malla de muestreo**

Una vez analizada la imagen del servidor de Google Earth, se definió y optó por la toma de datos técnicos del macizo rocoso del sector La Falda en una malla irregular, distribuidos a lo largo de los taludes de la vía La Encañada - Celendín (Km.29+062-km.31+082).

(Ver figura 4)



**Figura 4.** Ubicación de la zona de estudio

Fuente: Google Earth

#### ✓ **Reconocimiento de afloramientos rocosos in situ**

Se procedió a determinar la extensión del área y corroborar los afloramientos observados en campo. Concluyendo que existe una buena correlación entre las observaciones de afloramientos de Google Earth con las observaciones de campo. (Ver fotos 2 y 3)



**Foto 2.** Con vista al SW. Afloramientos dispersos en el sector La Falda con presencia de calizas y una delgada cobertura de suelo orgánico e ichu.



**Foto 3.** Con vista al N. Presencia de afloramientos en el punto de muestreo N°30.

### ✓ Toma de datos en afloramientos rocosos

Se ha realizado un muestreo detallado de los afloramientos ubicados en el sector la Falda, se han recolectado datos, como número de fracturas por metro lineal, número de rebotes empleando el martillo de SCHMIDT y datos de la profundidad de la rugosidad de las discontinuidades. A continuación, se detallan los muestreos en campo.

### PROCEDIMIENTO EN CAMPO

Una vez revisado la zona en gabinete se procedió a la toma de datos en campo.



*Foto 4.* Reconocimiento del área y visualización de afloramientos.

### ✓ Número de fracturas por metro lineal ( $\lambda$ )

Toma de datos para el cálculo del RQD

En las fotos (5 y 6), se toman el mayor número de discontinuidades para cada muestra tomada en un rango de 1m.



*Foto 5.* Toma de datos para el RQD



*Foto 6.* Toma de discontinuidades por metro lineal

✓ **Número de rebotes (NReb)**

Para calcular el número de rebotes hemos usado el martillo de SCHMIDT tipo L.

Se ha tomado 10 muestras para cada punto de muestreo o estación, se ha utilizado el martillo de SCHMIDT en 3 orientaciones:

- ✓ Perpendicular
- ✓ Vertical
- ✓ Horizontal

(Ver fotos 7, 8 y 9)

Luego para obtener los valores en Mpa se ha utilizado el ábaco de la figura 5 y a partir de ello se obtuvo un promedio general para cada punto de muestreo.



**Foto 7.** Muestra del Nreb con el martillo SCHMIDT en sentido perpendicular.



*Foto 8.* Muestra del Nreb con el martillo SCHMIDT en sentido horizontal.



*Foto 9.* Muestra del Nreb con el martillo SCHMIDT en sentido vertical.

✓ **Profundidad de la rugosidad (PRug)**

Para calcular las PRug se ha usado el peine de BARTON, se ha tomado una muestra para cada punto de muestreo o estación.

La rugosidad de las muestras tomadas ha tenido una variabilidad de 0,6cm a 4.8cm.

(Ver fotos 10, 11 y 12)



**Foto 10.** Muestra de rugosidad con el peine de BARTON sobre la discontinuidad del macizo rocoso.



*Foto 11.* Medición de rugosidad con el peine de BARTON



*Foto 12.* Muestra de PRug con el peine de BARTON en el punto de muestreo N°10.

## **PROCEDIMIENTO EN LABORATORIO**

Análisis para determinar la densidad del macizo rocoso:

En esta etapa se procedió a analizar c/u de las 5 muestras obtenidas en campo, y se obtuvo la densidad, dicho análisis se realizó haciendo uso los materiales de Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Universidad Privada del Norte, a continuación, se detallan los materiales, el procedimiento y los resultados obtenidos:

### **Materiales**

- ✓ 5 muestras de rocas con dimensiones aproximadas de 7cm. Las cuales han sido obtenidas directamente de la zona de estudio.
- ✓ Balanza calibrada
- ✓ Vaso graduado de laboratorio (600ml.)

### **Productos**

- ✓ Agua

### **Procedimiento**

- ✓ Se midió con la ayuda de la balanza, la masa de cada una de las 5 muestras, dichas medidas obtenidas han sido debidamente registradas.
- ✓ Llenamos el vaso graduado de laboratorio con un determinado volumen de agua, este procedimiento lo repetimos para las 5 muestras
- ✓ Introducimos c/u de las 5 muestras en el vaso con agua.
- ✓ Medimos el volumen que alcanza el agua con la muestra sumergida, este paso se repite para todas las muestras.
- ✓ Calculamos el volumen de la roca.

✓ Se realiza el cálculo de densidad de la roca, para lo cual utilizamos los datos de las mediciones realizadas en el laboratorio, dichos datos lo reemplazamos en la siguiente fórmula:

**Ecuación N° 4: Fórmula de densidad**

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

Los resultados obtenidos para cada muestra se muestran a continuación:

**Tabla N° 1.** Valores de densidad para cada una de las muestras tomadas en campo.

MUESTRA	X	Y	Z	PARÁMETROS DE DENSIDAD			ΔV	DENSIDAD (g/cm <sup>3</sup> )
				MASA (g)	VOLUMEN INICIAL	VOLUMEN FINAL		
1	794470	9216242	3264	478.82	360	552	192	2.4938
2	794300	9216008	3260	153.41	480	540	60	2.5568
3	794217	9215856	3246	285.15	480	590	110	2.5922
4	794127	9215824	3226	364.17	480	610	130	2.8013
5	794392	9216380	3198	345.68	480	603	123	2.8104
Densidad promedio:								2.6509

Las imágenes de este procedimiento se presentan en la parte final (Anexo N°5)

**PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE DATOS: ETAPA FINAL**

La información obtenida en campo es procesada e interpretada en gabinete, haciendo uso de la metodología de experimentación se determinará los valores de los parámetros analizados (RQD, RCU, JRC, Densidad), el mejor modelo geoestadístico para las variables geomecánicas, haciendo uso de softwares especializados (ARCGIS, Minitab) y criterios técnicos, se logrará delinear y construir los modelos geoestadísticos.

## Fundamentación del procedimiento

### Análisis de los parámetros de tendencia central y normalidad de los datos

El resumen de los parámetros de tendencia central se muestra en las tablas 2 y 3. Se puede observar que los parámetros geomecánicos no siguen una distribución normal, por lo que para el análisis geoestadístico se hará una transformación a una base de logaritmo neperiano (ln).

**Tabla N° 2.** *Análisis de los parámetros de tendencia central de los valores con distribución normal.*

PARÁMETRO GEOMECÁNICO/ESTADÍ GRAFO	MEDIA	MEDIANA	DIFERENCIA	CONCLUSIÓN	N° DE MUES TRAS
RQD (%)	47.05	46	>1	No cumple con la hipótesis de normalidad	40
JRC	19.22	20	<1	Cumple con la hipótesis de normalidad	40
RCU (Mpa)	44.22	40	>1	No cumple con la hipótesis de normalidad	40

**Tabla N° 3.** *Análisis de los parámetros de tendencia central de los valores con distribución log normal.*

PARÁMETRO GEOMECÁNICO/ ESTADÍGRAFO	Ln (MEDIA)	Ln (MEDIANA)	DIFERENCIA	CONCLUSIÓN	N° DE MUESTRAS
RQD (%)	3.80	3.82	<1	Cumple con la hipótesis de normalidad	40
RCU (Mpa)	3.73	3.68	<1	Cumple con la hipótesis de normalidad	40

### Análisis de los parámetros de dispersión y normalidad de los datos

El resumen de los parámetros de dispersión se observa en las tablas 4 y 5. Se puede corroborar que los parámetros geomecánicos no siguen una distribución normal, por lo que para el análisis geoestadístico se hará una transformación a una base de logaritmo neperiano.

**Tabla N° 4.** *Análisis de los parámetros de dispersión de los valores con distribución normal*

PARÁMETRO GEOMECÁNICO/ ESADÍGRAFO	DESV. ESTÁNDAR	COEFICIENTE DE VARIACIÓN	CONCLUSIÓN	N° DE MUESTRAS
RQD (%)	14.29	30.36%	Cumple parcialmente con la hipótesis de normalidad	40
JRC	2.60	13.55%	Cumple parcialmente con la hipótesis de normalidad	40
RCU (Mpa)	15.99	36.15%	Cumple parcialmente con la hipótesis de normalidad	40

**Tabla N° 5.** *Análisis de los parámetros de dispersión de los valores con distribución log normal.*

PARÁMETRO GEOMECÁNICO/ ESADÍGRAFO	DESV. ESTÁNDAR	COEFICIENTE DE VARIACIÓN	CONCLUSIÓN	N° DE MUESTRAS
RQD (%)	0.31	8.20%	Cumple con la hipótesis de normalidad	40
JRC	0.18	6.34%	Cumple con la hipótesis de normalidad	40
RCU (Mpa)	0.32	8.83%	Cumple con la hipótesis de normalidad	40

## CAPÍTULO III. RESULTADOS

### Cálculo del RQD

Para este ítem se ha tomado la relación matemática de Hudson and Priest (1979) y analizada por Palmstron (2005) el cual detalla el cálculo del RQD en función a la cantidad de fracturas contabilizadas por metro lineal, al cual lo representa por la letra griega lambda ( $\lambda$ ), expresada mediante siguiente fórmula Matemática:

**Ecuación N° 5.** Relación matemática de Hudson and Priest

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

Los datos obtenidos para cada punto muestreado, los reemplazamos en dicha fórmula y obtenemos el RQD para cada una de las 40 muestras. Dichos datos encontrados se combinan con la tabla (Anexo N°2). Y se tiene una descripción general de la caracterización del macizo.

En la tabla N°6 se observan los resultados del RQD para cada uno de los puntos muestreados.

**Tabla N° 6.** Valores del RQD para cada uno de los puntos de muestreo.

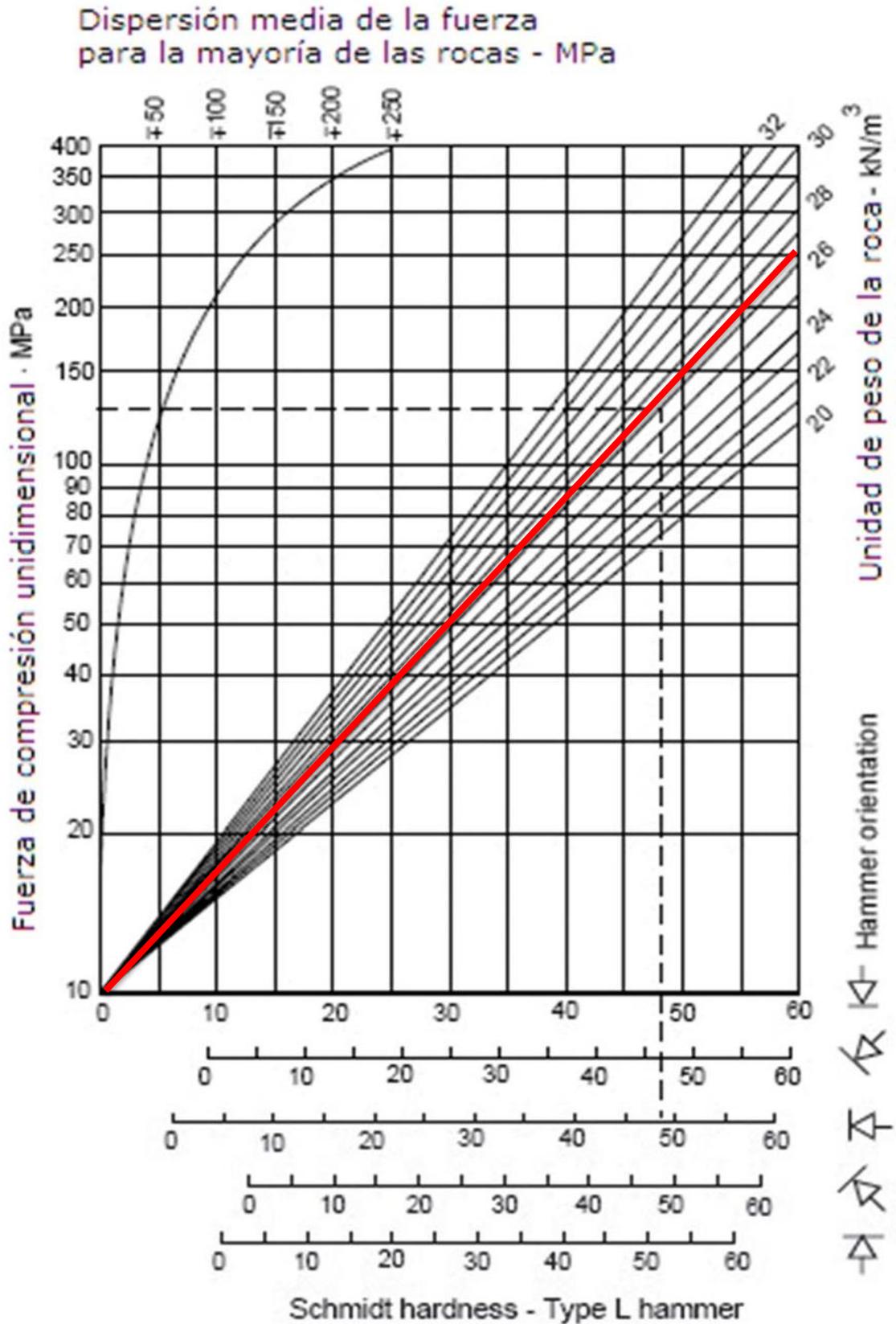
Puntos de muestreo	X	Y	Z	Litología	Fract/ml	Valor	RQD Lineal
1	794402	9216386	3209	caliza	15	15	56
2	794396	9216534	3198	caliza	16	16	52
3	794399	9216462	3196	caliza	20	20	41
4	794392	9216380	3198	caliza	15	15	56
5	794341	9216358	3208	caliza	12	12	66
6	794277	9216352	3209	caliza	9	9	77
7	794251	9216254	3209	caliza	19	19	43
8	794229	9216124	3210	caliza	20	20	41
9	794206	9216004	3219	caliza	18	18	46
10	794181	9216900	3225	caliza	18	18	46
11	794127	9215824	3226	caliza	20	20	41
12	794088	9215770	3227	caliza	25	25	29
13	793880	9215662	3234	caliza	20	20	41
14	793892	9215636	3242	caliza	20	20	41
15	794025	9215674	3243	caliza	21	21	38
16	794129	9215772	3248	caliza	23	23	33
17	794152	9215786	3249	caliza	19	19	43
18	794168	9215796	3249	caliza	18	18	46
19	794145	9215836	3248	caliza	12	12	66
20	794217	9215856	3246	caliza	15	15	56
21	794267	9215880	3252	caliza	10	10	74
22	794283	9215892	3252	caliza	14	14	59
23	794295	9215894	3252	caliza	18	18	46
24	794303	9215916	3253	caliza	10	10	74
25	974300	9215972	3247	caliza	12	12	66
26	794291	9215020	3256	caliza	18	18	46
27	974293	9216044	3258	caliza	15	15	56
28	794287	9216068	3256	caliza	25	25	29
29	794300	9216008	3260	caliza	28	28	23
30	794305	9216186	3263	caliza	12	12	66
31	974304	9216192	3259	caliza	18	18	46
32	794305	9216210	3258	caliza	13	13	63
33	794322	9216233	3274	caliza	24	24	31
34	794325	9216242	3267	caliza	28	28	23
35	794355	9216236	3262	caliza	17	17	49
36	794404	9216222	3268	caliza	25	25	29
37	794420	9216218	3262	caliza	22	22	35
38	794470	9216242	3264	caliza	23	23	33
39	794494	9216282	3269	caliza	20	20	41
40	794496	9216283	3270	caliza	22	22	35

### **Cálculo de la Resistencia a la compresión uniaxial**

Este procedimiento requiere de un valor auxiliar el cual es la densidad del macizo rocoso, por consiguiente, se han utilizado los datos obtenidos a partir de las pruebas de laboratorio, a la cuales han sido sometidas las muestras obtenidas en el campo de estudio.

El valor de la densidad obtenido a partir de los análisis de laboratorio, es igual a 26.50 Kilo-Newton sobre metro cúbico ( $\text{KN}/\text{m}^3$ ), para calcular el valor de la RCU en Mega-Pascales (Mpa) se ha empleado el ábaco de la figura 5, el cual combina en el eje de las abscisas el sentido de la interacción del martillo de Schmidt con la cara de la discontinuidad; y, en el eje de las ordenadas del ábaco la densidad en  $\text{KN}/\text{m}^3$  del geomaterial. Posteriormente se combinan los dos datos y se obtiene un valor y se obtiene un valor de la resistencia a la compresión unidimensional en Mpa ubicado en las ordenadas del lado izquierdo del ábaco.

El valor obtenido del RCU se lo combina con la tabla (Anexo N° 1) para determinar el tipo de macizo que presenta la zona de estudio.



**Figura 5.** Ábaco para calcular la resistencia a la compresión uniaxial

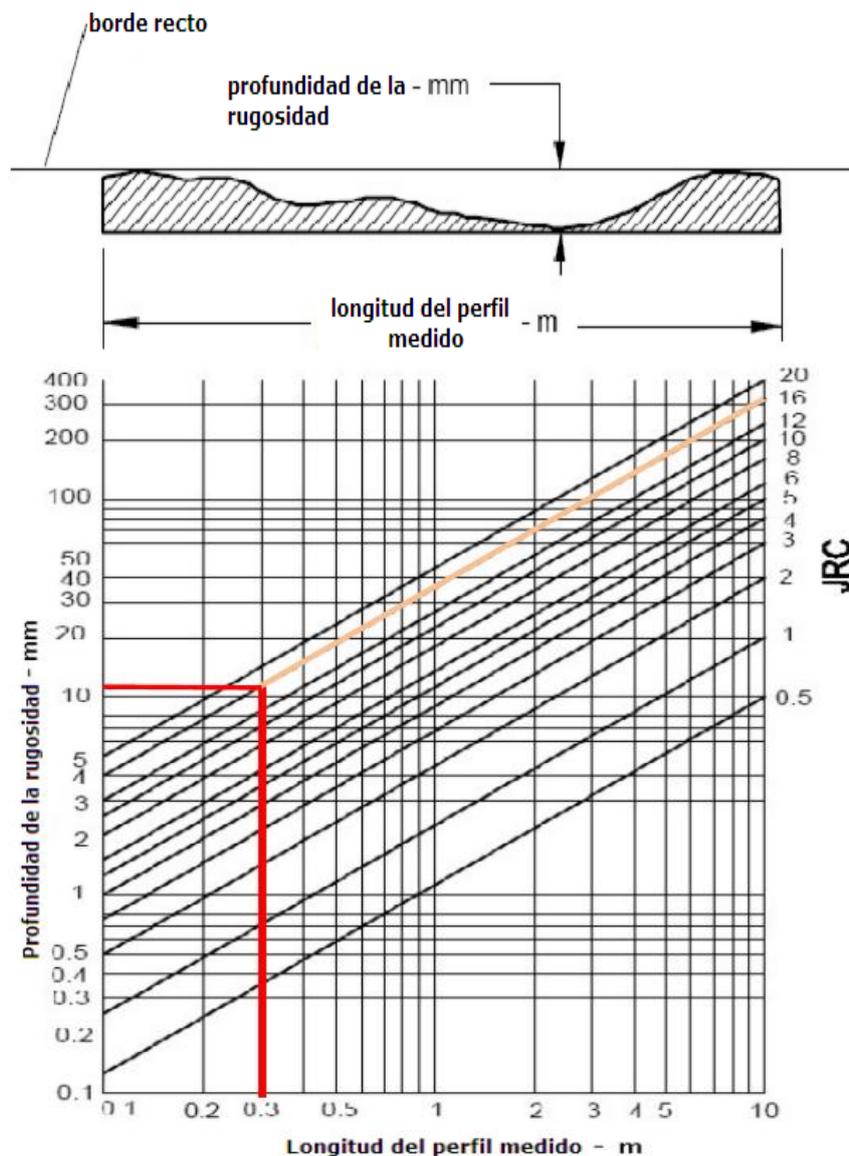
En la tabla N°7, se presentan los valores obtenidos para el RCU en cada uno de los puntos muestreados.

**Tabla N° 7.** Valores del RCU para cada uno de los puntos de muestreo.

Punto de Muestreo	X	Y	Z	Litología	Orientacion del Martillo Schmidt	Prom. Rebotes	Resist. Compres Uniaxial (Mpa)
1	794402	9216386	3209	caliza	Horizontal	15	30
2	794396	9216534	3198	caliza	Horizontal	14	27
3	794399	9216462	3196	caliza	Horizontal	12	24
4	794392	9216380	3198	caliza	Horizontal	20	37
5	794341	9216358	3208	caliza	Horizontal	15	30
6	794277	9216352	3209	caliza	Horizontal	24	43
7	794251	9216254	3209	caliza	Vertical hacia arriba	20	40
8	794229	9216124	3210	caliza	Horizontal	15	30
9	794206	9216004	3219	caliza	Vetical hacia abajo	13	30
10	794181	9216900	3225	caliza	Horizontal	20	36
11	794127	9215824	3226	caliza	Horizontal	18	33
12	794088	9215770	3227	caliza	Horizontal	20	36
13	793880	9215662	3234	caliza	Diagonal hacia arriba	20	43
14	793892	9215636	3242	caliza	Horizontal	15	30
15	794025	9215674	3243	caliza	Horizontal	14	28
16	794129	9215772	3248	caliza	Vertical hacia arriba	17	40
17	794152	9215786	3249	caliza	Horizontal	18	32
18	794168	9215796	3249	caliza	Horizontal	20	35
19	794145	9215836	3248	caliza	Horizontal	38	83
20	794217	9215856	3246	caliza	Horizontal	30	58
21	794267	9215880	3252	caliza	Diagonal hacia abajo	28	60
22	794283	9215892	3252	caliza	Horizontal	26	49
23	794295	9215894	3252	caliza	Horizontal	15	30
24	794303	9215916	3253	caliza	Vertical hacia abajo	40	92
25	974300	9215972	3247	caliza	Horizontal	35	75
26	794291	9215020	3256	caliza	Horizontal	15	30
27	974293	9216044	3258	caliza	Horizontal	28	50
28	794287	9216068	3256	caliza	Diagonal hacia abajo	25	50
29	794300	9216008	3260	caliza	Horizontal	35	72
30	794305	9216186	3263	caliza	Horizontal	22	39
31	974304	9216192	3259	caliza	Horizontal	26	49
32	794305	9216210	3258	caliza	Horizontal	26	49
33	794322	9216233	3274	caliza	Horizontal	30	58
34	794325	9216242	3267	caliza	Diagonal hacia arriba	18	40
35	794355	9216236	3262	caliza	Horizontal	27	48
36	794404	9216222	3268	caliza	Horizontal	28	50
37	794420	9216218	3262	caliza	Horizontal	17	31
38	794470	9216242	3264	caliza	Vertical hacia arriba	30	64
39	794494	9216282	3269	caliza	Horizontal	28	50
40	794496	9216283	3270	caliza	Horizontal	22	38

### Cálculo del JRC

Para calcular el JRC se ha empleado el ábaco de la figura 6 (Barton, 1982), el cuál combina en el eje de las ordenadas el tamaño del peine de Barton, que para este caso tuvo una longitud de 0.30m, y en el eje de las abscisas se ubica la profundidad de la rugosidad. Combinando ambos ejes se obtiene el valor del JRC, parámetro geomecánico para el cálculo del RMR de Bieniawski o Q de Barton (Bienwaski, 1976; Barton et al. 1974).



**Figura 6.** Profundidad de la rugosidad vs lon. del peine de Barton - cálculo del JRC.

Posteriormente el dato obtenido del JRC se lo combina con la figura 6 para determinar el tipo de rugosidad de las discontinuidades.

	JRC	Rugosidad RMR
	JRC = 0 - 2	Espejo de falla
	JRC = 2 - 4	Lisa
	JRC = 4 - 6	
	JRC = 6 - 8	Ligeramente Rugosa
	JRC = 8 - 10	
	JRC = 10 - 12	
	JRC = 12 - 14	Rugosa
	JRC = 14 - 16	
	JRC = 16 - 18	Muy Rugosa
	JRC = 18 - 20	

**Figura 7.** Relación del parámetro JRC de Barton and Choubey (1977) con la descripción de Bienawski (1976).

Finalmente, en la tabla N°8 se presentan los valores obtenidos para el JRC en cada uno de los puntos muestreados.

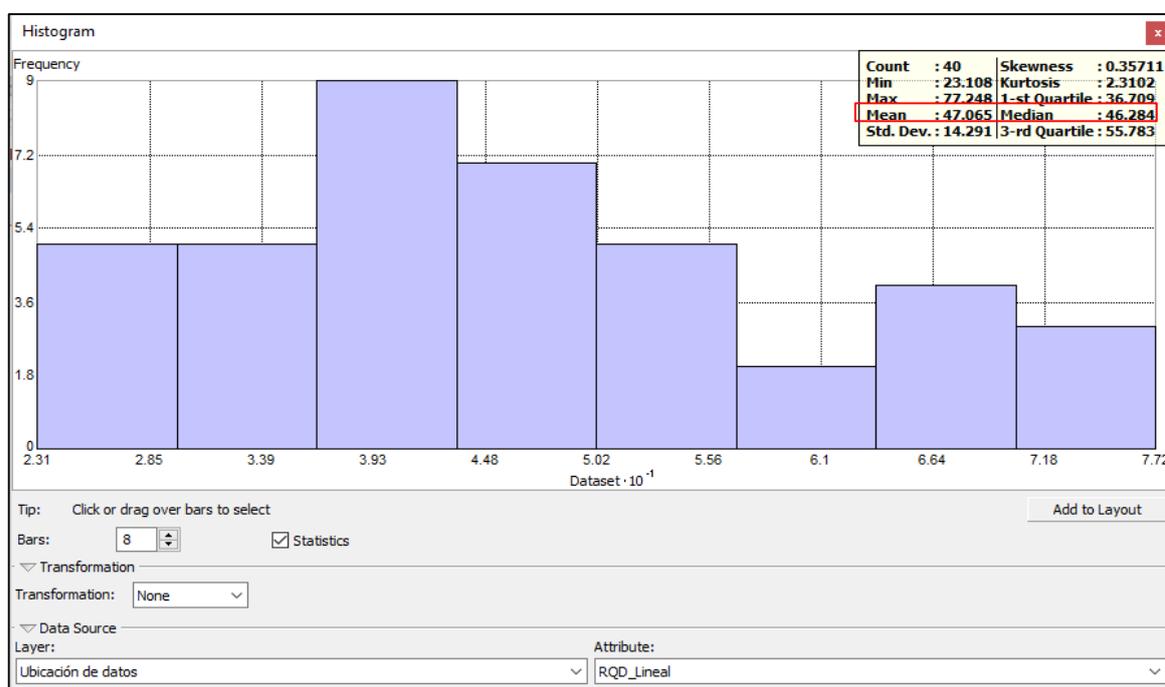
**Tabla N° 8.** *Valores del JRC para cada uno de los puntos de muestreo*

Punto de Muestreo	X	Y	Z	Litología	Profundidad de la Rugosidad (mm)	JRC	Rugosidad RMR
1	794402	9216386	3209	caliza	20	20	muy rugosa
2	794396	9216534	3198	caliza	25	20	muy rugosa
3	794399	9216462	3196	caliza	28	20	muy rugosa
4	794392	9216380	3198	caliza	15	20	muy rugosa
5	794341	9216358	3208	caliza	32	20	muy rugosa
6	794277	9216352	3209	caliza	20	20	muy rugosa
7	794251	9216254	3209	caliza	15	20	muy rugosa
8	794229	9216124	3210	caliza	15	20	muy rugosa
9	794206	9216004	3219	caliza	32	20	muy rugosa
10	794181	9216900	3225	caliza	26	20	muy rugosa
11	794127	9215824	3226	caliza	35	20	muy rugosa
12	794088	9215770	3227	caliza	38	20	muy rugosa
13	793880	9215662	3234	caliza	26	20	muy rugosa
14	793892	9215636	3242	caliza	28	20	muy rugosa
15	794025	9215674	3243	caliza	35	20	muy rugosa
16	794129	9215772	3248	caliza	45	20	muy rugosa
17	794152	9215786	3249	caliza	42	20	muy rugosa
18	794168	9215796	3249	caliza	32	20	muy rugosa
19	794145	9215836	3248	caliza	48	20	muy rugosa
20	794217	9215856	3246	caliza	30	20	muy rugosa
21	794267	9215880	3252	caliza	32	20	muy rugosa
22	794283	9215892	3252	caliza	24	20	muy rugosa
23	794295	9215894	3252	caliza	20	20	muy rugosa
24	794303	9215916	3253	caliza	48	20	muy rugosa
25	974300	9215972	3247	caliza	45	20	muy rugosa
26	794291	9215020	3256	caliza	12	17	muy rugosa
27	974293	9216044	3258	caliza	6	8	ligeramente rugosa
28	794287	9216068	3256	caliza	22	20	muy rugosa
29	794300	9216008	3260	caliza	42	20	muy rugosa
30	794305	9216186	3263	caliza	40	20	muy rugosa
31	974304	9216192	3259	caliza	10	14	rugosa
32	794305	9216210	3258	caliza	8	10	ligeramente rugosa
33	794322	9216233	3274	caliza	30	20	muy rugosa
34	794325	9216242	3267	caliza	35	20	muy rugosa
35	794355	9216236	3262	caliza	36	20	muy rugosa
36	794404	9216222	3268	caliza	24	20	muy rugosa
37	794420	9216218	3262	caliza	26	20	muy rugosa
38	794470	9216242	3264	caliza	45	20	muy rugosa
39	794494	9216282	3269	caliza	32	20	muy rugosa
40	794496	9216283	3270	caliza	28	20	muy rugosa

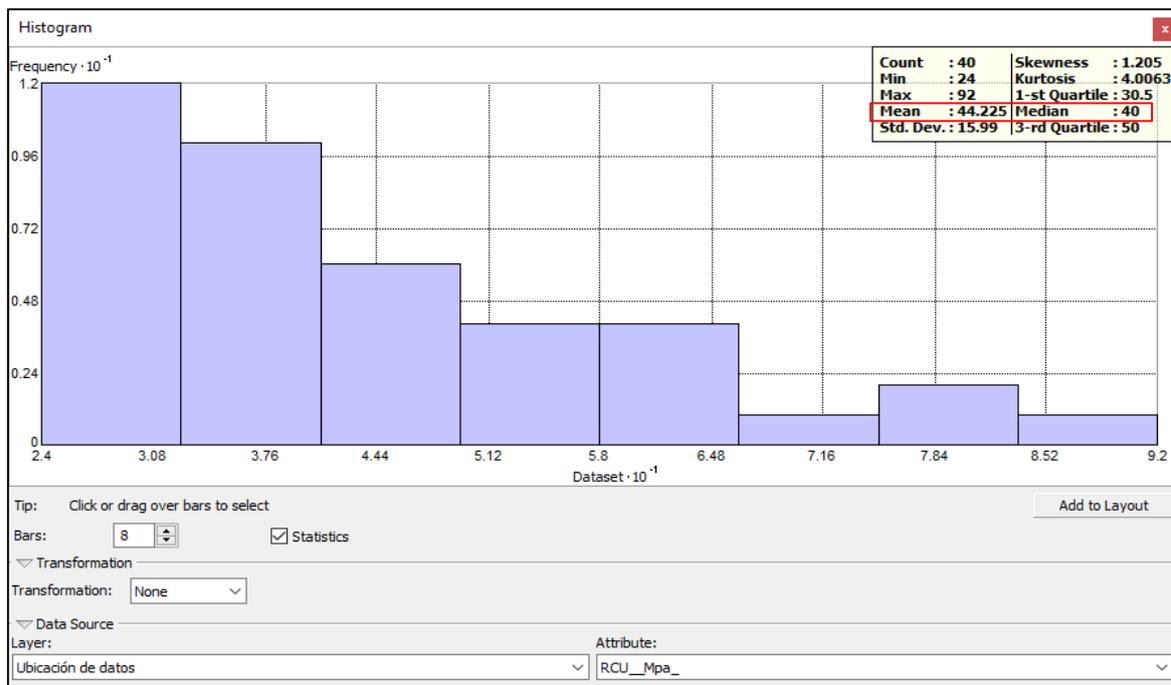
## Estadísticas Univariadas (RQD y RCU)

Para determinar la distribución de los datos de los parámetros geomecánicos analizados (RQD y RCU) es necesario someter la data obtenida en campo a un análisis estadístico univariado, de tal manera que nos permita obtener la distribución normal o log – normal de los datos, si la diferencia entre media y la mediana es mayor a la unidad, se ajusta a una distribución log – normal para evitar errores en los análisis posteriores. (Ver Figura 8, 9 y 10)

Este análisis no se ha aplicado a los parámetros de JRC y Densidad, debido a que la data obtenida es constante, los resultados muestran una rugosidad ( $JRC > 20$ ), es decir es un macizo muy rugoso; y la densidad obtenida es  $2.65 \text{ g/cm}^3$



**Figura 8.** Histograma de distribución normal para el RQD



**Figura 9.** Histograma de distribución normal para el RCU



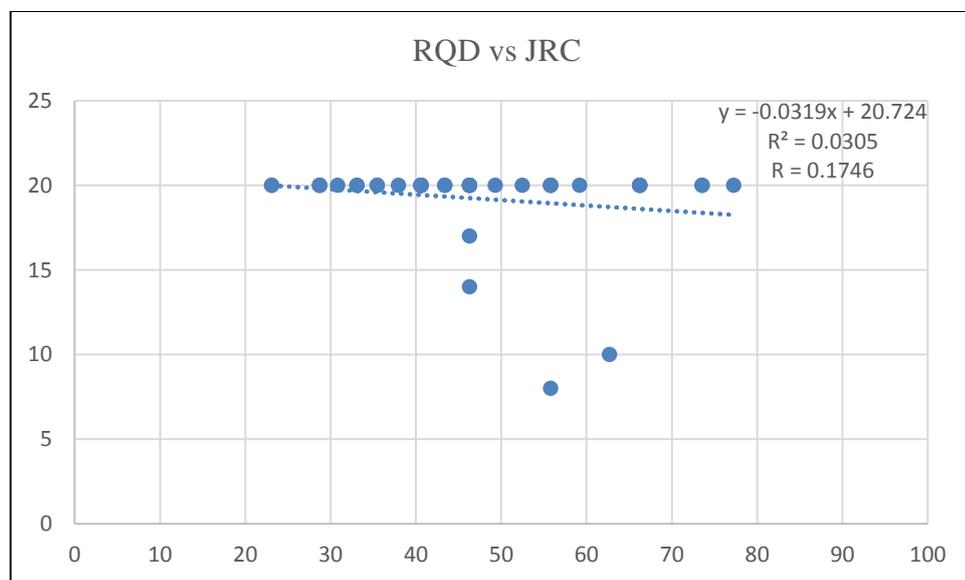
**Figura 10.** Histograma de distribución Log - normal para el RCU

## Análisis Bivariado

Se han considerado tres pares de parámetros para el análisis bivariado, los cuales son:

### ✓ RQD vs JRC

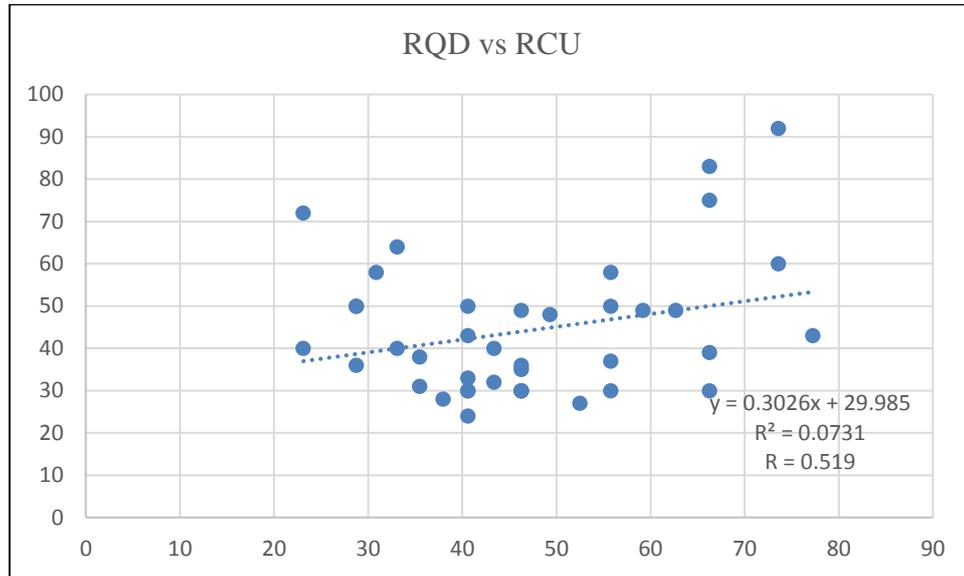
Existe nula correlación entre las variables regionalizadas RQD y JRC, esto lo evidencia el valor de  $R^2$  el cual es igual a 0.03 (Ver Figura 11)



**Figura 11.** Correlación lineal baja entre el RQD y JRC

### ✓ RQD vs RCU

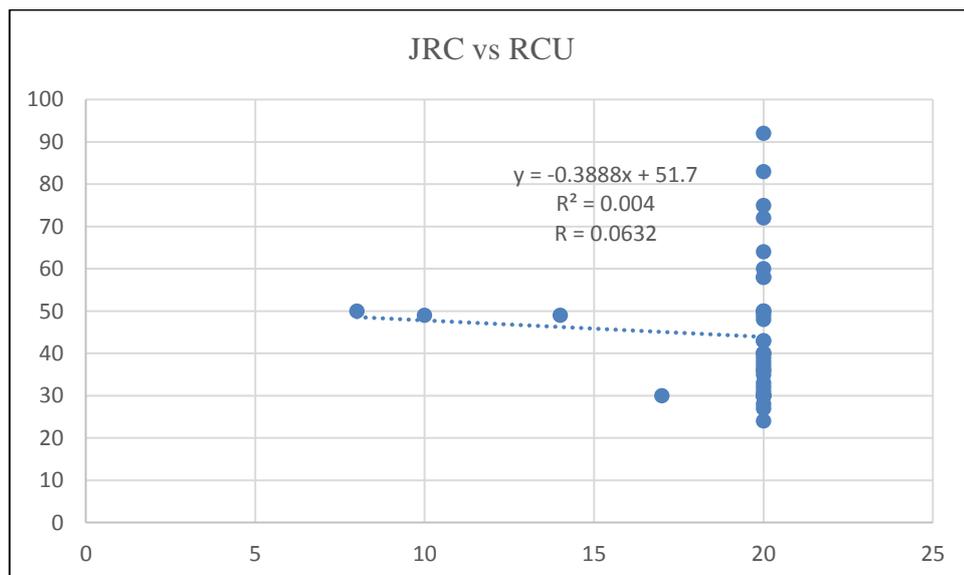
Existe una muy baja correlación entre las variables regionalizadas RQD y RCU, esto lo evidencia el valor de  $R^2$  el cual es igual a 0.07 (Ver Figura 12)



**Figura 12.** Correlación lineal baja entre el RQD y RCU

✓ **JRC vs RCU**

Existe nula correlación entre las variables regionalizadas JRC y RCU, esto lo evidencia el valor de  $R^2$  el cual es igual a 0.004 (Ver Figura 13)



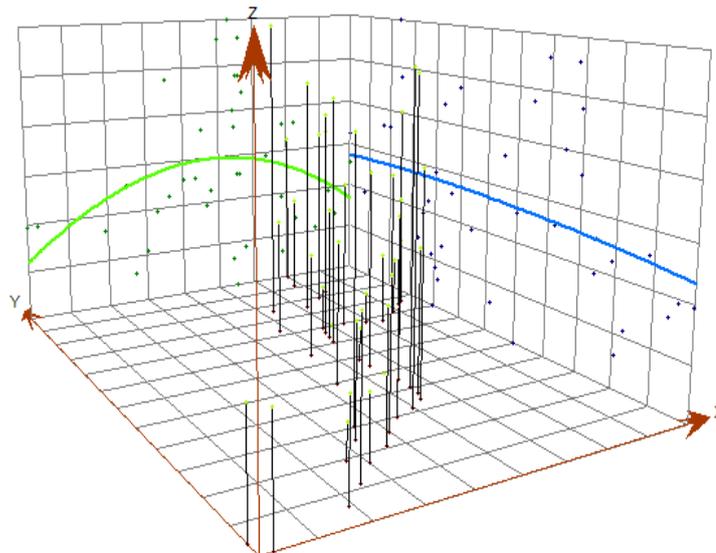
**Figura 13.** Correlación lineal baja entre el JRC y RCU

Analizando las correlaciones bivariadas (Figuras 11, 12 y 13) se observa que los parámetros geomecánicos del macizo rocoso en el sector La Falda son totalmente independientes, por lo tanto, es importante siempre tratarlos de manera separada y no asumir dependencia entre dichos parámetros.

### **Análisis de la tendencia de los datos**

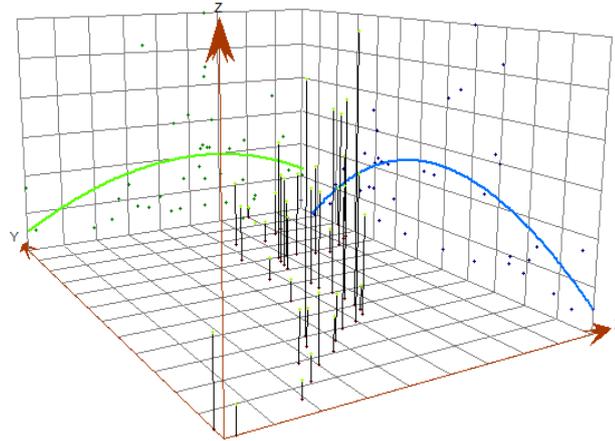
En el análisis de la tendencia de los datos se indican que las curvas de los parámetros del RQD, RCU y JRC tienen una tendencia de segundo orden. Es decir, son ecuaciones cuadráticas es por ello que la geoestadística evita la tendencia de los datos (Trend Analysis) porque sesgan el resultado.

### **Análisis de la tendencia de los datos RQD**



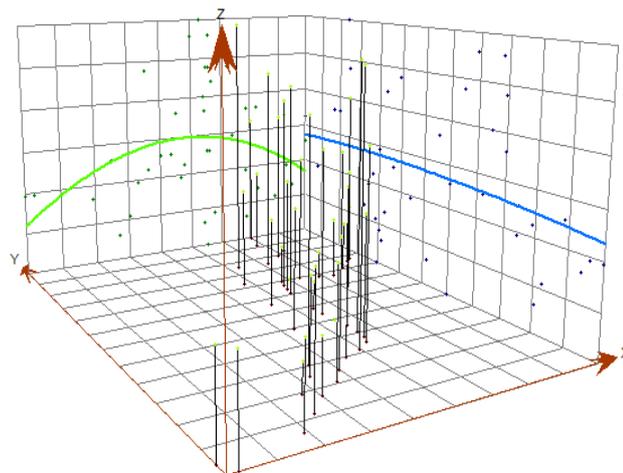
*Figura 14.* Trend Analysis del RQD

### Análisis de la tendencia de los datos RCU



*Figura 15.* Trend Analysis del RCU

### Análisis de la tendencia de los datos JRC



*Figura 16.* Trend Analysis del JRC

## Análisis estructural (variogramas de cada parámetro)

### Variograma RQD

Tipo de modelo: Esférico

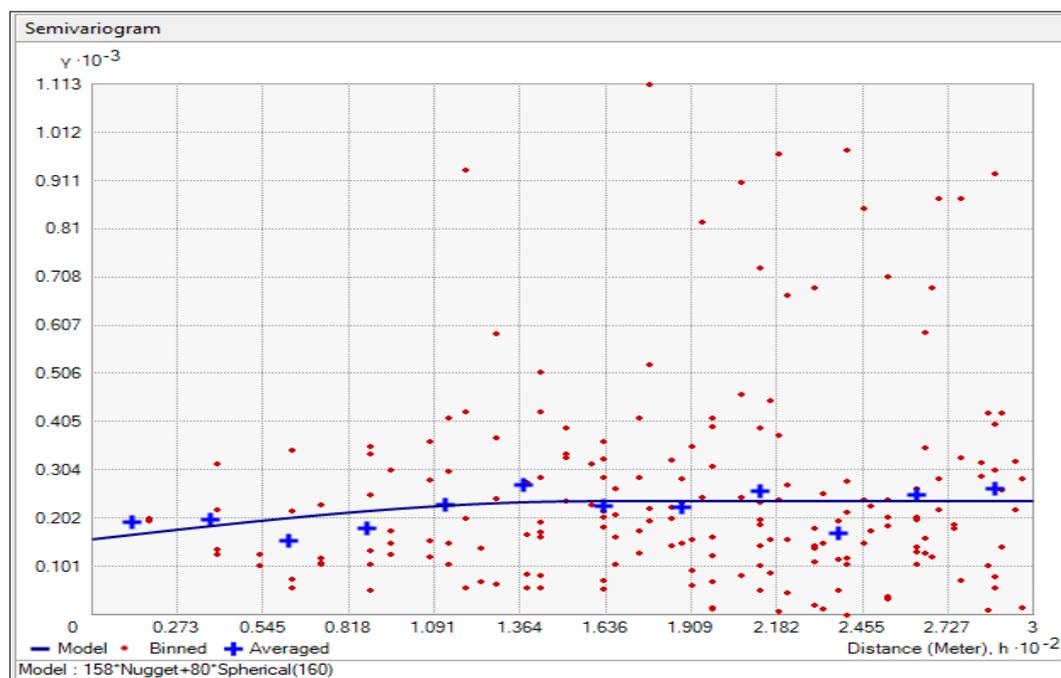
Alcance (Rango): 160

Sill (Varianza): 80

Nugget (Efecto pepita): 158

Distancia de los pasos (Lag): 25

Numero de pasos (Lag): 12



*Figura 17.* Variograma del RQD

## Variograma RCU

Tipo de modelo: Esférico

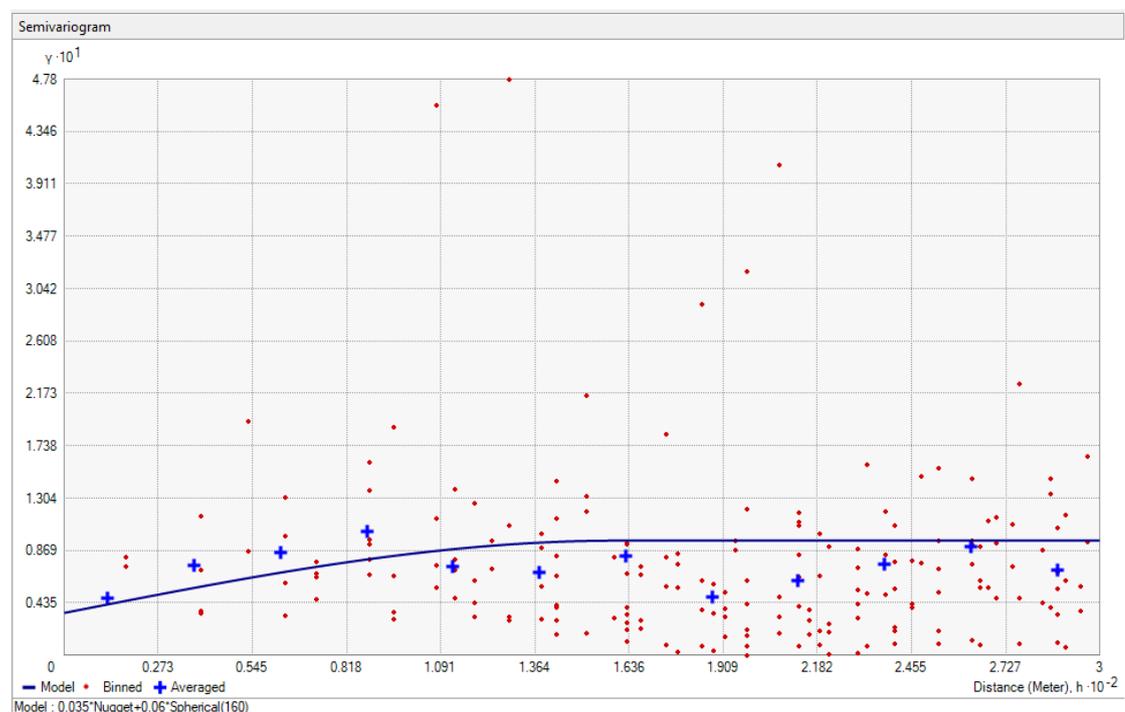
Alcance (Rango): 160

Sill (Varianza): 0.06 (escala log)

Nugget (Efecto pepita): 0.035 (escala log)

Distancia de los pasos (Lag): 25

Numero de pasos (Lag): 12



**Figura 18.** Variograma del RCU.

## Variograma JRC

Tipo de modelo: Esférico

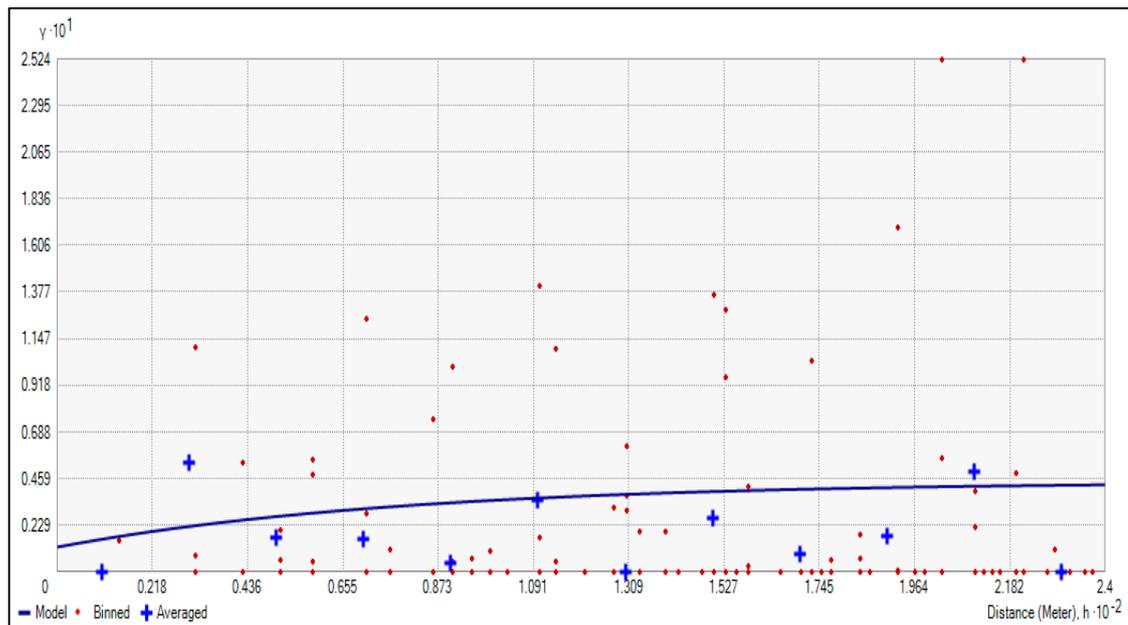
Alcance (Rango): 160

Sill (Varianza): 0.03 (escala log)

Nugget (Efecto pepita): 0.012 (escala log)

Distancia de los pasos (Lag): 25

Numero de pasos (Lag): 12



**Figura 19.** Variograma del JRC.

## GENERALIDADES DE LA ZONA DE ESTUDIO

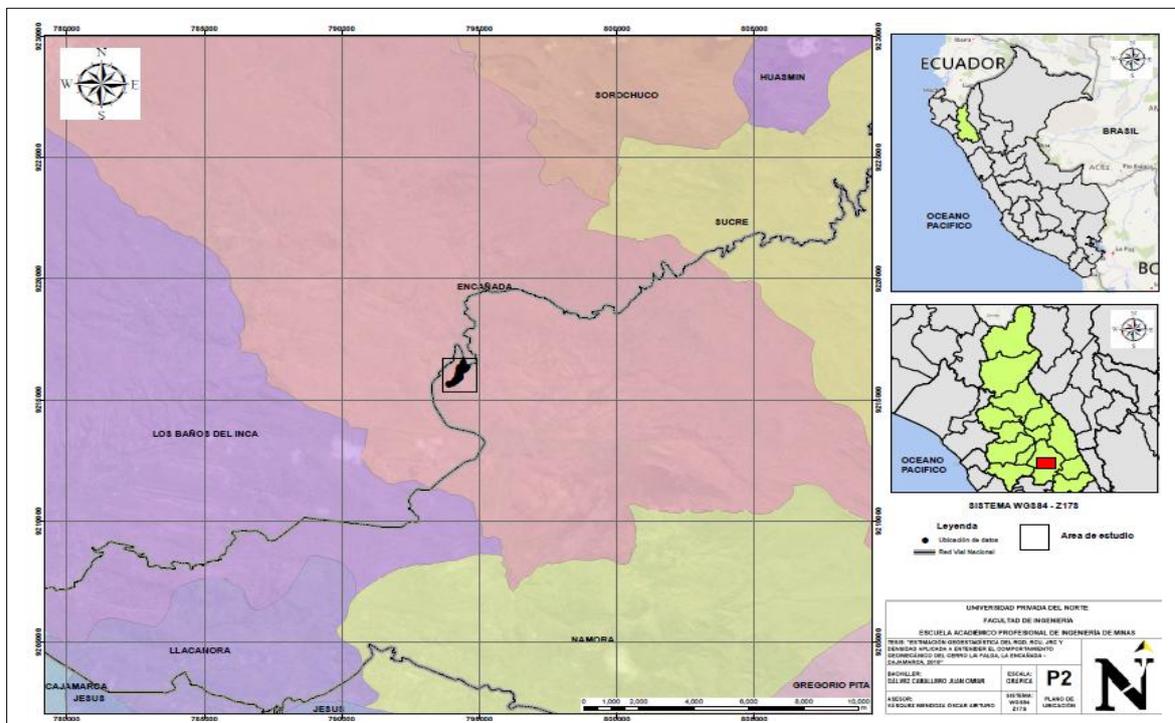
### a. Ubicación y acceso

El presente estudio se realizó en la zona Norte del Territorio Peruano, específicamente en el sector La Falda, perteneciente al distrito de La Encañada – provincia y departamento de Cajamarca. El área de estudio está ubicada en el lado SW de los proyectos mineros de Minas Conga y Lumina Copper, corresponde a los cuadrángulos 15-g San Marcos y 14-g Celendín. El acceso a los puntos de la zona de estudio está comprendido desde el Km. 29+062 hasta el km.31+082 de la carretera que une el distrito de la Encañada con la Provincia de Celendín, dicho acceso se lo puede realizar mediante la misma carretera mencionada. (ver plano N°2)

**Tabla N° 9.** *Acceso al área de estudio*

Ruta terrestre	Distancia (Km.)	Tiempo (hr.)	Vía	Condiciones técnicas
Cajamarca-Encañada	27	0.50	Asfaltado	Buena
Encañada-Zona de estudio	2.62	0.08	Asfaltado	Buena

Fuente: Elaboración propia



*Plano N° 2: Plano de ubicación*

## **b. Clima y vegetación**

El sector de estudio se encuentra sobre una superficie puna de rasgos geomorfológicos accidentados. El clima es frío con lluvias estacionales que duran desde Noviembre a Marzo (verano austral), con temperaturas que oscila entre 3° y 21°C. La vegetación típica es el ichu y pastos naturales que son usados por los lugareños en la crianza de vacunos, ovinos y en menor proporción auquénidos.

## **c. Marco geológico local**

El área de estudio está enmarcada dentro de un basamento de edad cretácica, caracterizada por unidades de formaciones silicoclásticas (Wilson, 1980) representada por las formaciones Chulec, Pariatambo y Yumagual, pertenecientes a los grupos (Crisnejas y Puillucana respectivamente) cubiertas por flujos de lavas y piroclásticos ambos de la edad terciaria.

### ✓ **Formación Chúlec (Ki-chu)**

Esta formación suprayace concordantemente a la Formación Inca e infrayace con la misma relación a la Formación Pariatambo (Benavides, 1956).

Litológicamente, consta de una secuencia bastante fosilífera de calizas arenosas, lutitas calcáreas y margas, la que por intemperismo adquieren un color crema-amarillento.

### ✓ **Formación Pariatambo (Ki-pa)**

La Formación Pariatambo aflora ampliamente en la parte sur del distrito de Minas Conga desde la comunidad de Alforjacocho hasta la comunidad de San Nicolás. Esta secuencia se caracteriza por la coloración gris en superficie y por el arreglo de la estratificación en forma tabular de las capas, está constituida por margas arcillosas y calizas bituminosas en capas delgadas de 20 cm hasta 1 m de potencia y presenta

alternancia rítmica (Jacay J.; 2007). Esta formación tiene una baja resistencia a la compresión uniaxial de la picota de geólogo.

**Edad y correlación:** La formación Pariatambo contiene restos de moluscos, estas especies son típicamente del Albiano medio. Se correlaciona con la parte superior de la formación Crisnejas y con la formación Yacu Ushco. Se extiende ampliamente en los andes centrales del Perú. (Laughlin, 1925)



**Foto 13.** Pliegue parásito (anticlinal) desarrollado en la Fm. Pariatambo

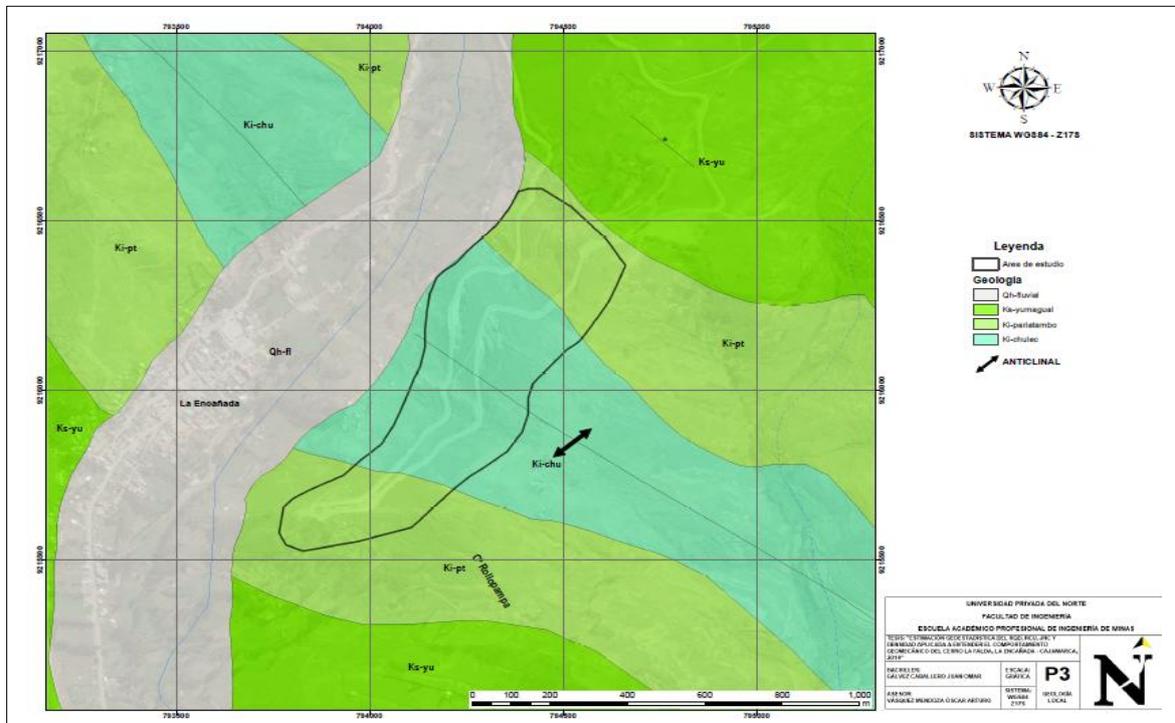
✓ **Formación Yumagual (Ks – yu)**

Estas calizas presentan una textura matriz-soportada con un bajo porcentaje de granos (>10%), y tienen alta resistencia a la compresión uniaxial de la picota de geólogo. Generalmente consiste en una secuencia de margas y calizas gris parduzcas en bancos más o menos uniformes, destacando un miembro medio lutáceo margoso, amarillento, dentro de un conjunto homogéneo presenta escarpas debido a su dureza uniforme. En algunos horizontes se observan nodulaciones calcáreas. Tiene un grosor aproximado de 700m.

**Edad y correlación:** Se han encontrado especímenes del Albiano y parte temprana del Cenomaniano. Se correlaciona con la parte inferior del grupo Pulluicana y con la parte baja de la formación Jumasha del centro del Perú. (Benavides,1956)



**Foto 14.** Calizas wackestone de la Fm. Yumagual



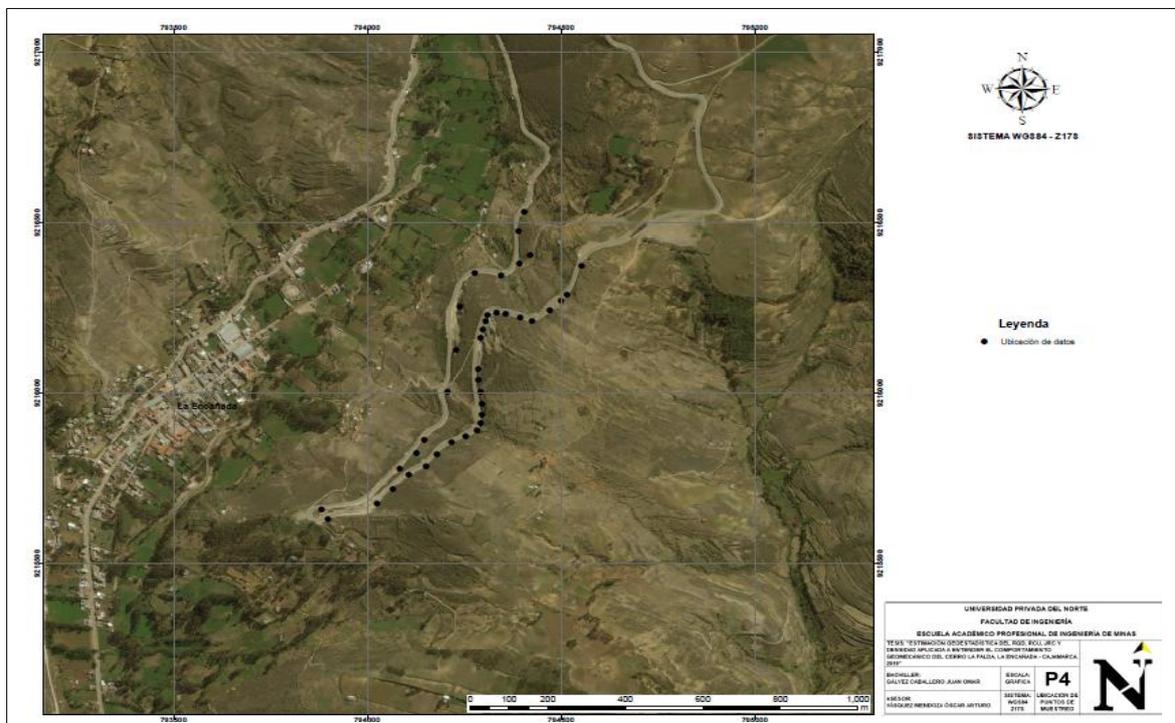
*Plano N° 3: Plano de geología*

## Plano de ubicación de los puntos de muestreo

Se tomaron las coordenadas de 40 puntos de muestreo en campo.

**Tabla N° 10.** *Coordenadas de puntos de muestreo*

Puntos de Muestreo	X	Y	Z
1	794402	9216386	3209
2	794396	9216534	3198
3	794399	9216462	3196
4	794392	9216380	3198
5	794341	9216358	3208
6	794277	9216352	3209
7	794251	9216254	3209
8	794229	9216124	3210
9	794206	9216004	3219
10	794181	9216900	3225
11	794127	9215824	3226
12	794088	9215770	3227
13	793880	9215662	3234
14	793892	9215636	3242
15	794025	9215674	3243
16	794129	9215772	3248
17	794152	9215786	3249
18	794168	9215796	3249
19	794145	9215836	3248
20	794217	9215856	3246
21	794267	9215880	3252
22	794283	9215892	3252
23	794295	9215894	3252
24	794303	9215916	3253
25	974300	9215972	3247
26	794291	9215020	3256
27	974293	9216044	3258
28	794287	9216068	3256
29	794300	9216008	3260
30	794305	9216186	3263
31	974304	9216192	3259
32	794305	9216210	3258
33	794322	9216233	3274
34	794325	9216242	3267
35	794355	9216236	3262
36	794404	9216222	3268
37	794420	9216218	3262
38	794470	9216242	3264
39	794494	9216282	3269
40	794496	9216283	3270



*Plano N° 4:* Plano de ubicación de puntos de muestreo

## Plano de estimación geoestadística para el RQD

### INTERPRETACIÓN

La interpolación con el método del Kriging, para el RQD, ha sido dividido en cuatro (4) zonas. Las zonas 2 y 4 evidencian un RQD bajo, asociada a un moderado a fuerte fracturamiento.

En los tramos de la carretera con RQD bajo (<50%), se deben tener los cuidados técnicos adecuados, como la geometría del talúd y el ingreso de agua debido al intenso fracturamiento. Históricamente esas zonas muestran constantes deslizamientos como el ocurrido en el año 2016.

Las zonas 1 y 3, muestran un RQD mayor al 50%, evidenciando una zona con menor fracturamiento asociada a la zona con mayor estabilidad en los tramos de la carretera.

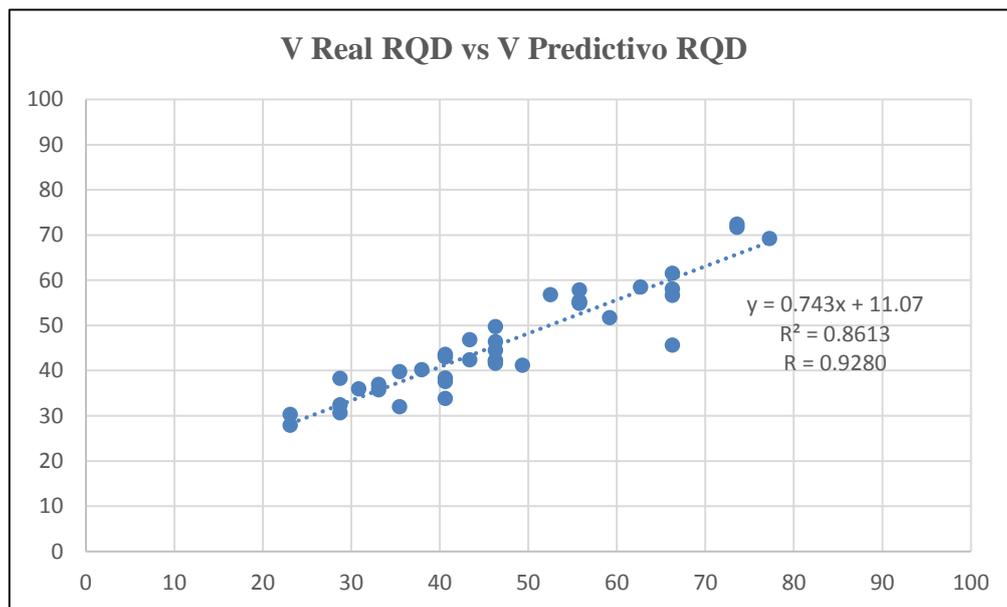


**Foto 15.** Caracterización de las zonas de estudio según el valor del RQD

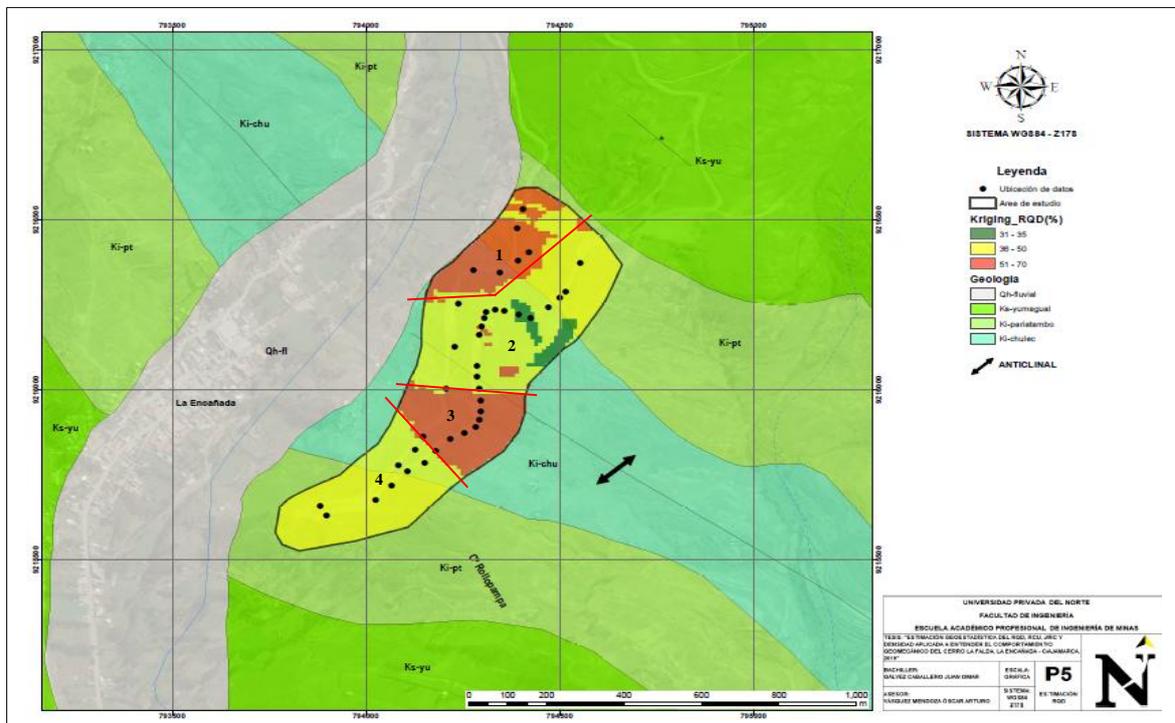
El RQD bajo (<50%) no está asociado a una formación en particular, sino que se asocia a las formaciones geológicas de Chúlec y Pariatambo, esto probablemente debido a la cercanía al núcleo de un pliegue (sinclinal) el cual muestra en el núcleo y los flancos mayor deformación y fracturamiento asociado.

### Validación de datos

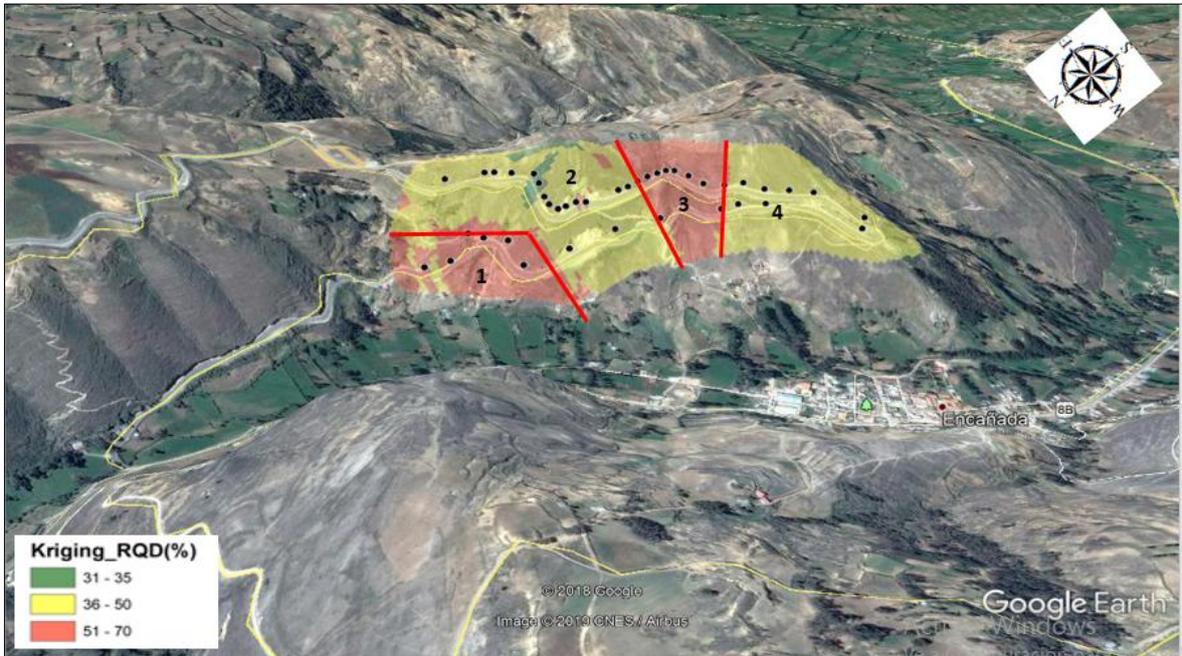
Se observa claramente una buena correlación ( $R^2 = 0.861$ ) entre los valores reales del RQD tomados en campo a partir del muestreo del macizo rocoso con los valores predictivos obtenidos en la plataforma del software ArcGis 10.5 para el mismo punto (Ver figura N°19).



**Figura 20.** Correlación lineal entre el valor real del RQD y el valor predictivo también para el RQD en el mismo punto.



*Plano N° 5: Plano de estimación del RQD*



*Figura 21.* Sectorización de la zona de estudio según el análisis del RQD.

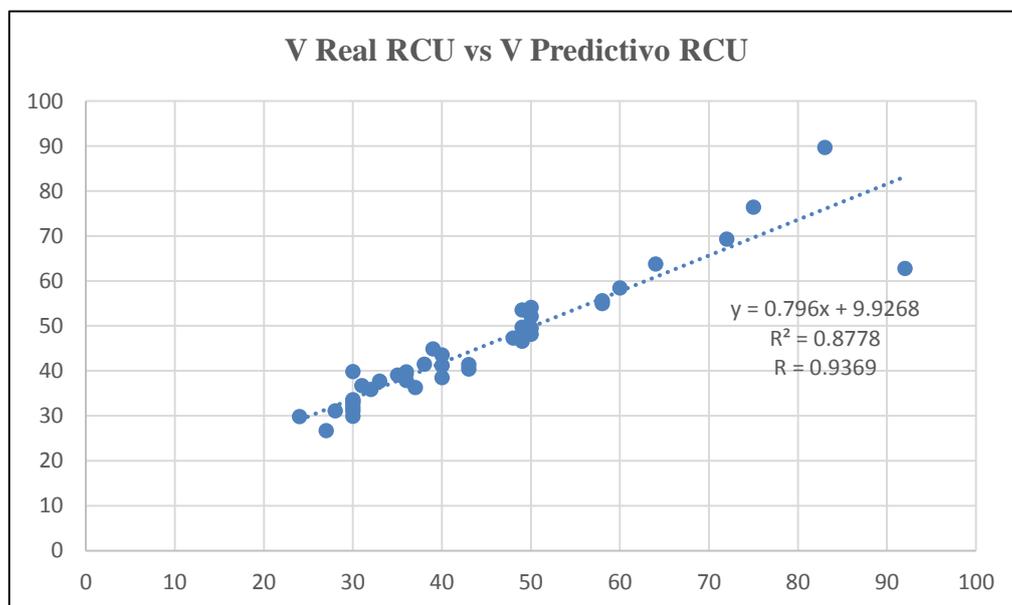
## Plano de estimación geoestadística para la resistencia a la compresión uniaxial

### INTERPRETACIÓN

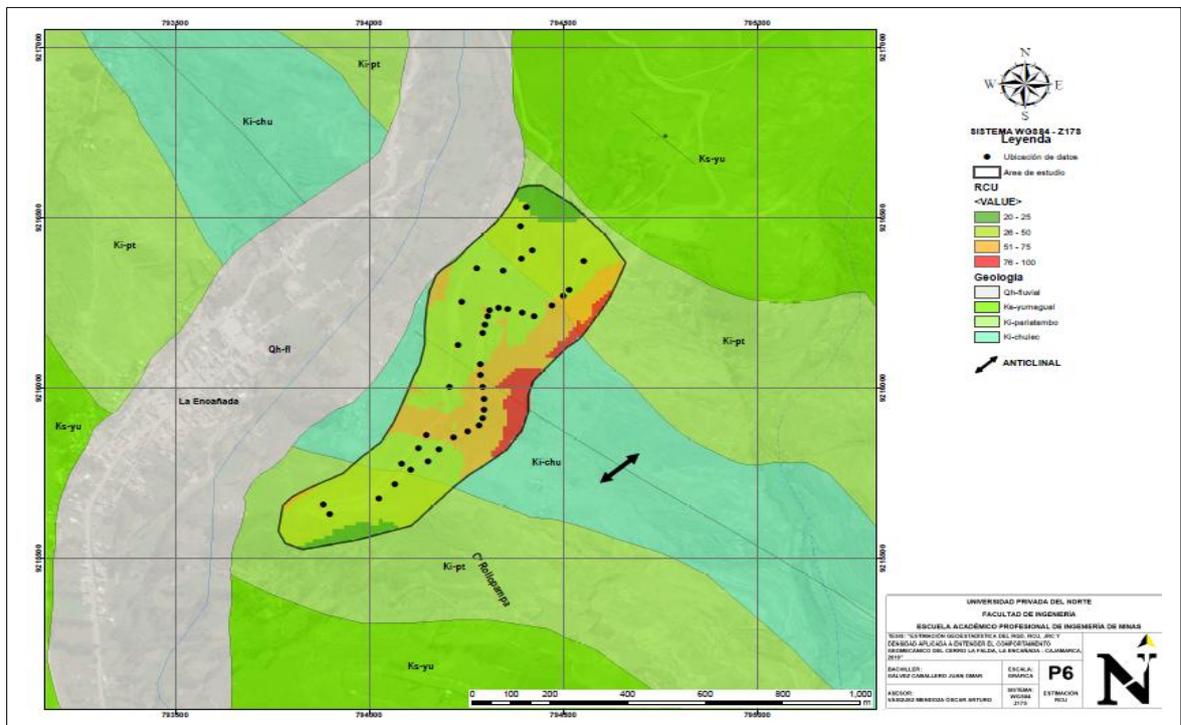
El plano de estimación RCU muestra que la mayor cantidad del área estimada geoestadísticamente muestra valores entre 25% a 50% y 50% a 75%., indicando que las rocas presentan una resistencia a romperse baja a muy baja, probablemente por tratarse de rocas calcáreas con contenidos variables de arcillas (margas) o fosilíferas, lo cual se interpreta como elementos que reducen la resistencia la compresión uniaxial.

### Validación de datos

Se observa claramente una buena correlación ( $R^2 = 0.877$ ) entre los valores reales del RCU tomados en campo a partir del muestreo del macizo rocoso con los valores predictivos obtenidos en la plataforma del software del software ArcGIS 10.5 para el mismo punto (ver Figura 21)



**Figura 22.** Correlación lineal entre el valor real del RCU y el valor predictivo también para el RCU en el mismo punto.



Plano N° 6: Plano de estimación del RCU



*Figura 23.* Sectorización de la zona de estudio según el análisis del RCU.

## Plano de estimación geoestadística para el JRC

### INTERPRETACIÓN

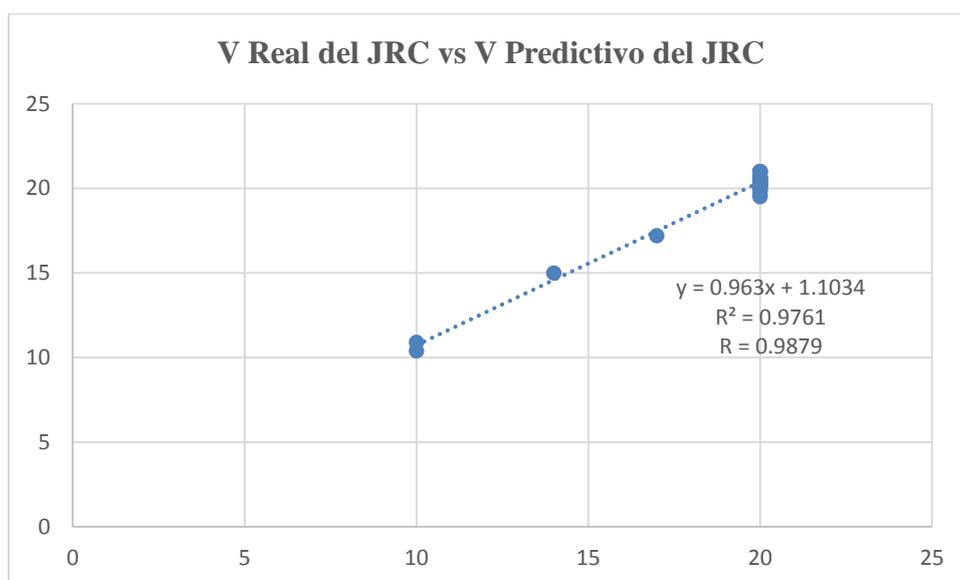
En la mayoría de las 40 muestras analizadas en la zona de estudio las discontinuidades del macizo rocoso presentan un JRC mayor a 20, es decir presenta irregularidades muy rugosas.

En cambio, en los puntos de muestreo 27, 31 y 32 las muestras analizadas presentan un valor de JRC de 8, 14 y 10 respectivamente, estas discontinuidades presentan irregularidades ligeramente rugosas a rugosas.

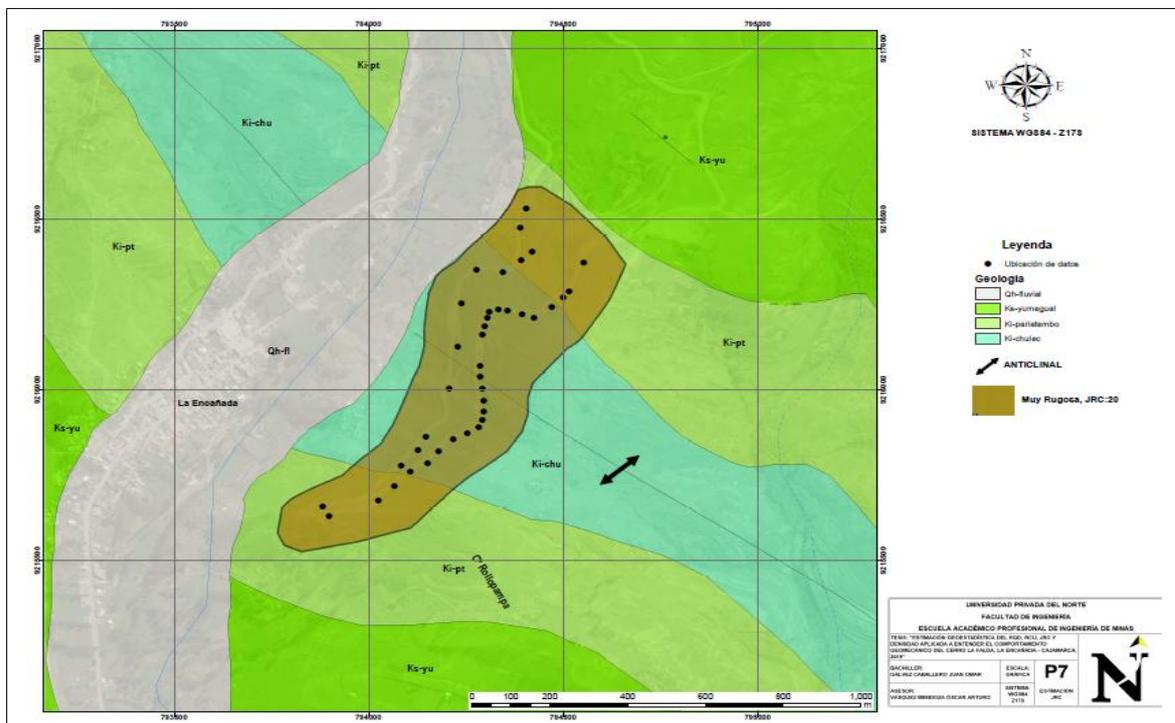
En general la zona de estudio se caracteriza por presentar afloramientos muy rugosos, por tal motivo no se ha realizado la interpolación de dichos datos, ya que los valores tienen tendencia constante (Muy rugoso).

### Validación de datos

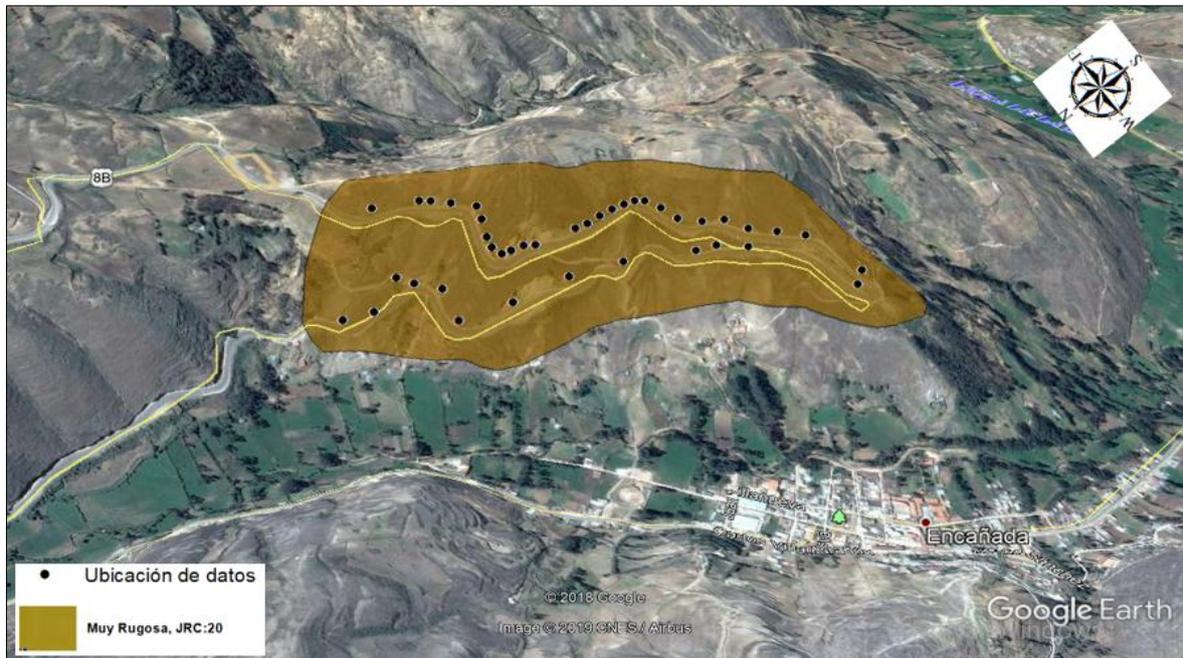
Se observa claramente una buena correlación ( $R^2 = 0.976$ ) entre los valores reales del JRC tomados en campo a partir del muestreo del macizo rocoso con los valores predictivos obtenidos en la plataforma del software ArcGIS 10.5 para el mismo punto (ver figura 23).



**Figura 24.** Correlación lineal entre el valor real del JRC y el valor predictivo también para el JRC en el mismo punto.



*Plano N° 7: Plano de estimación del JRC*



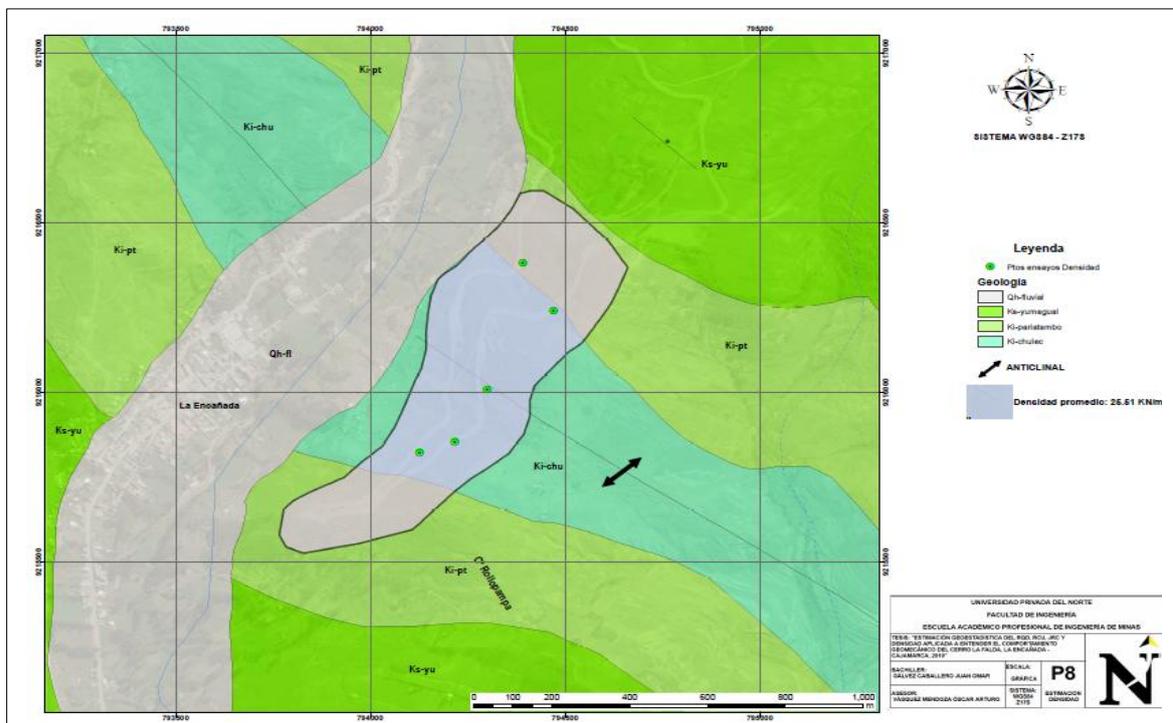
*Figura 25.* Sectorización de la zona de estudio según el análisis del JRC.

## **Plano de estimación geoestadística para la Densidad**

### **INTERPRETACIÓN**

Cada una de las muestras obtenidas de los puntos 4, 11 20, 29 y 38 han sido analizadas en el laboratorio y se ha obtenido un valor promedio de densidad igual a  $2.65g/cm^3 \approx 26.5 kN/m^3$ , dicho valor representa a las características litológicas propias de la zona.

La estimación del área de análisis para la densidad se ha considerado constante, ha sido dividido en una sola zona. A continuación, se muestra el plano de estimación y la sectorización de la zona de estudio.



*Plano N° 8: Plano de estimación de la densidad*



**Figura 26.** Sectorización de la zona de estudio según el análisis de densidad.

## **CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

### **4.1. Discusión**

#### **CACTERIZACIÓN DE PARÁMETROS GEOMECÁNICOS**

##### **Designación de la calidad de la roca (RQD)**

Mediante la investigación se verificó que la calidad del macizo rocoso que se encuentran en los taludes del tramo comprendido entre el km. 29+062 y km. 31+082 de la Carretera que une el distrito de La Encañada y Celendín está condicionada por los factores geológicos de calizas, margas. Las cuales se encuentran en gran parte fracturadas; y por sus factores geomecánicos en parte del sector predomina los materiales frágiles sobre los dúctiles dando como resultado taludes inestables. (Rodrigo, 2017)

La sectorización obtenida mediante la interpolación geoestadística de datos muestra las zonas las zonas 2 y 4, las cuales evidencian un RQD menor al 50%, mientras que las zonas 1 y 3 muestran un RQD mayor al 50%, es decir la zona de estudio según el RQD presenta características malas a regulares. Históricamente esas zonas están expuestas a deslizamientos como el ocurrido hace algunos años, por lo que se deben tener los cuidados técnicos adecuados.

### Resistencia a la compresión Uniaxial (RCU)

La zona de estudio se encuentra delimitada por tres formaciones: Chulec, Pariatambo y Yumagual. Según (Heras, 2019) dichas formaciones, presentan una resistencia a la compresión Uniaxial con valores que van desde una zona moderadamente dura a dura, dichos valores son 35.13, 47.08 y 74.63 Mpa. Con el análisis realizado mediante técnicas de estimación geoestadística podemos corroborar dichos valores obtenidos, mediante esta técnica el plano de estimación RCU indica que los puntos de muestreo tomados en las zonas E, SE no se encuentran muy fracturados ya que su valor promedio de RCU varía entre 51 a 100 Mpa, es decir los macizos rocosos presentan una regular resistencia a la compresión uniaxial. Pero también presenta algunos puntos de muestreo (Zona SO, N, NO) donde se ve que el macizo rocoso se encuentra medianamente fracturado porque presenta valores promedios, que son menores de 51 Mpa. Por lo tanto, podemos afirmar que los valores obtenidos aplicando técnicas de estimación geoestadística nos proporcionan resultados de caracterización confiables, los cuales pueden ser aplicados para realizar trabajos de diseño geomecánico y prevenir riesgos geológicos que se puedan producir durante el desarrollo de dichas labores.

**Tabla N° 11:** Clase de roca a partir de la resistencia a la compresión simple.

Formación geológica	Resistencia a compresión uniaxial (MPa)	Clase	Descripción
Formación Chúlec	35.13	R3	Roca moderadamente dura
Fomración Pariatambo	47.88	R3	Roca moderadamente dura
Formación Yumagual	74.63	R4	Roca dura

Fuente: Heras (2019)



**Figura 27.** Sectorización de la zona de estudio según el análisis geoestadístico del RCU.

### **Plano de rugosidad de las Juntas (JRC)**

De acuerdo a criterios de clasificación geomecánica, la rugosidad está directamente relacionada con la calidad de la roca, los valores obtenidos en la zona de estudio nos muestran a un macizo regularmente competente en muchos sectores ( $JRC \geq 20$ ), en otras zonas la zona presenta afloramientos con características rugosas a ligeramente rugosas.

### **Densidad**

Las Propiedades Geotécnicas de las rocas encontradas en la región Cajamarca según el ambiente de origen sedimentario, muestran una densidad que fluctúa entre 2.2 a 2.65g/cm<sup>3</sup> (Cruzado, 2009). Según los análisis realizados en el sector la Falda se ha obtenido una densidad promedio de 2.65g/cm<sup>3</sup>.

## 4.2. Conclusiones

Se realizó una estimación geoestadística del RQD, RCU, JRC, la cual nos permitió entender el comportamiento geomecánico del cerro la Falda, La Encañada – Cajamarca. Dicha estimación nos proporcionó los siguientes datos para el macizo rocoso:

Se analizó el RQD mediante el interpolador Kriging (técnica geoestadística) en función a los puntos espaciales de las 40 muestras que se tomaron en campo, las zonas 2 y 4 evidencian un  $RQD < 50\%$ , mientras que las zonas 1 y 3 muestran un RQD mayor al 50%. Dichos valores representan a un macizo rocoso con un RQD que varía entre malo y regular.

Se analizaron los valores del martillo de Schmidt en un plano de estimación con el promedio general para cada punto de muestreo realizado. La zona E y SE presenta valores de RCU que varían entre 51 a 100 Mpa, mientras que la zona S, N, NO evidencia valores promedios menores a 51 Mpa, partir de dicho análisis se puede afirmar que el lugar de estudio presenta una resistencia a la compresión uniaxial regular a medianamente fuerte, esto guarda relación directa con las formaciones geológicas que presenta el sector.

Se evaluaron los valores de peine de Barton y densidad en sus respectivos planos de estimación, los valores obtenidos indican que la zona de estudio presenta afloramientos muy rugosos ( $JRC \geq 20$ ). Con una densidad promedio de  $2.65g/cm^3$ .

## **Recomendaciones**

En los tramos de la carretera con RQD bajo (<50%), se deben tener los cuidados técnicos adecuados, como la geometría del talud y el ingreso de agua debido al intenso fracturamiento. Históricamente esas zonas muestran constantes deslizamientos como el ocurrido en el año 2016.

Se deben realizar más estudios a través de la aplicación de técnicas geoestadísticas, estas técnicas son de fácil aplicación y permiten predecir la naturaleza geomecánica de los macizos rocosos siguiendo un patrón de muestreo ordenado, con mínimos porcentajes de error.

Desarrollar un estudio geomecánico detallado considerando la interacción roca - soporte y proponer técnicas de sostenimiento que ayuden a mejorar la estabilidad de la zona de forma permanente.

Realizar en la zona de estudio una simulación de elementos finitos (MEF) mediante softwares geomecánicos de tal manera que nos permita saber cómo influyen los esfuerzos del macizo rocoso en la estabilidad de dicho sector.

Se recomienda hacer un estudio hidrogeológico, y de precipitación espacio-temporal de tal manera que permitan determinar los peligros y se pueda tomar las acciones preventivas necesarias.

## REFERENCIAS

- Barton, N., & Choubey, V. (1977). *The shear strength of rock joints in theory and practice*. Rock Mech.
- Benavides. (1956). *Geología de Cajamarca: sociedad geológica del Perú*. Lima- Perú.
- Benavides. (1956). *Cretaceous System in Northern Peru*. Bull. Amer. Mus. Nat. Hist (vol. 108). New York.
- Boletín informativo, Bambamarca al día. (12 de mayo de 2019). Google. Obtenido de Google:<http://www-bambamarcaaldia.blogspot.com/2016/12/colapsa-carretera-cajamarca-celendin.html>.
- Cartaya, M. (2006). *Caracterización Geomecánica de macizos rocosos en obras subterráneas de la región oriental del país*. Resumen de tesis Doctoral/2001. Realizada en el Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
- Cruzado, G. (2009). *Estudio de Geología, Técnico, Gobierno Regional de Cajamarca– Gerencia Regional de planeamiento, presupuesto y acondicionamiento territorial, Cajamarca*. Recuperado el 10 de Abril de 2019, de <http://zeeot.regioncajamarca.gob.pe/sites/default/files/DocumentoZEEfinal.pdf>
- Caruanambo, M. (2017). “*Evaluación geomecánica de los taludes de la carretera encañada – Celendín en el tramo km. 32+000 - km. 46+000*”, realizada en la Universidad Nacional de Cajamarca - Facultad de Ingeniería Geológica. Cajamarca-Perú.
- Deere, D. (1989). *Rock quality designation (rqd) aftwer twenty years*. Gainesville, Florida: Department of commerce National Technical Information Service.

- Egaña, M. (2008). *Geoestadística aplicada a parámetros geotécnicos*, realizada en la Universidad de Chile, facultad de ciencias físicas y matemáticas, departamento de Ingeniería de Minas. Santiago- Chile.
- Esri. (2010). *Geoestatistical Analyst Tutorial*.
- Hoek E (1994) *Strength of rock and rock masses*. ISRM News J 2: 4–16
- Hoek, E. (2007). Practical Rock Engineering. Página consultada el 10 de mayo de 2019. en: [http://www.rocscience.com/hoek/pdf/Practical\\_Rock\\_Engineering.pdf](http://www.rocscience.com/hoek/pdf/Practical_Rock_Engineering.pdf)
- Lagos A, Quispe, Z. (2007). *Aportes al análisis de cuencas sedimentarias en los alrededores de las localidades de los Baños del Inca, Cruz Blanca, Otuzco, Distrito de Cajamarca*. Cajamarca – Perú.
- López Jimeno, C., Bustillo Revuelta, M. (1997). *Manual de evaluación y diseño de explotaciones mineras*. MADRID: Gráficas Arias Montano
- Londoño, A. & Valdés, C. (2012). *Geoestadística Aplicada*. Alemania: Academia Española.
- Marin, A. (2004) *Estimación de recursos de cobre, plomo, zinc y plata del Proyecto Toromocho*, fuente Biblioteca de Dataroom de Centromín Perú.
- Matheron, G. (1969). *Curso de geostatística*. Propiedad del Centro de Geoestadística de la Escuela de Minas de Paris: Los Cuadernos del Centro de Morfología Matemática.
- Miller, R. (1966). *Engineering of shear failure in rock*. Ph. D. Thesis Universidad de Illinois. EEUU.

- Nuñez, A. (2001). *Caracterización geomecánica de macizos rocosos en obras subterráneas de la región oriental de país*. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Holguin- Cuba.
- Partington, G. 2010. *Developing models using GIS to assess geological and economic risk: An example from VMS copper gold mineral exploration in Oman*. Ore Geology Reviews, 38 (3), pp. 197-207.
- Pérez, E. (2010). *Metodología de modelamiento de variogramas como tema de aplicación de la geoestadística a la ingeniería geológica*. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica. Lima – Perú.
- Ramírez, P., & Alejano, L. (2004). *Mecánica de rocas I*. Madrid.
- Ramírez, Oyangurén P., DE LA CUADRA, Irizar I., LÍAN, Huerta R. (1991) *Mecánica de rocas aplicada a la minería metálica subterránea*. Instituto Tecnológico Geominera de España ITGE, Madrid - España.
- Reyes L. (1980). Boletín N° 31, Cuadrángulo de Cajamarca - San Marcos – Cajabamba.
- Vera, J. (2017). “*Estratigrafía del volcánico huambos entre los caseríos yerba buena chica y maraypata, centro poblado combayo – la encañada – cajamarca*”, realizada en la Universidad Nacional de Cajamarca - Facultad de Ingeniería Geológica. Cajamarca-Perú.
- Zavala, B., & Rosado, M. (2011). *Riesgo Geológico en la Región Cajamarca*. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Lima-Perú.

## ANEXOS

### *Anexo N° 1:* Criterios para la estimación de la Resistencia

<b>Grado</b>	<b>Descripción</b>	<b>Identificación de terreno</b>	<b>Rango aproximado de resistencia a la compresión Uniaxial (Mpa)</b>
R6	Roca extremadamente fuerte	La muestra solo puede ser astillada con el martillo geológico.	>250
R5	Roca muy fuerte	La muestra requiere de muchos golpes del martillo geológico para ser fracturada.	100 - 250
R4	Roca fuerte	La muestra requiere más de un golpe del martillo geológico para ser fracturada.	50 - 100
R3	Roca Medianamente fuerte	No puede ser escarbada o disgregada por una cortapluma, la muestra se fractura con un solo golpe del martillo geológico.	25 - 50
R2	Roca débil	Puede ser escarbada por la cortapluma con dificultad, se deforma o disgrega con un fuerte golpe de la punta del martillo.	5.0 - 25
R1	Roca muy débil	Se disgrega con un golpe fuerte de la punta del martillo geológico, puede ser escarbada por la cortapluma.	1.0 - 5.0
R0	Roca extremadamente débil	Marcada por la uña	0.25 - 1.0

Fuente: Modificado de Wathman, 1994

*Anexo N° 2: Valorización de los parámetros Q*

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	VALOR	OBSERVACIONES
<b>RQD</b>	A. Muy mal	0 a 25	Cuando el RQD
	B. Mala	25 a 50	reportado es
	C. Regular	50 a 75	medido como menor a
	D. Buena	75 a 90	10,
	E. Excelente	90 a 100	se le otorga un valor nominal de 10

Fuente: Barton, Lien y Lunden

### Anexo N° 3: Valor real vs. Valor predictivo RQD

FID	Shape	Measured	Predicted	Error	StdError	Stdd_Error	NormValue	Source_ID	Included
1	Point ZM	55.78254	50.415847	-5.366693	15.559129	-0.344922	-0.560703	1	Yes
2	Point ZM	52.493095	48.723535	-3.76956	17.500965	-0.215392	-0.351784	2	Yes
3	Point ZM	40.600585	56.40322	15.802635	16.249021	0.972528	1.09162	3	Yes
4	Point ZM	55.78254	57.568089	1.785549	15.402235	0.115928	0.157311	4	Yes
5	Point ZM	66.262727	54.128058	-12.134669	15.708679	-0.772482	-0.714367	5	Yes
6	Point ZM	77.248235	48.737321	-28.510915	16.366173	-1.742064	-2.241403	6	Yes
7	Point ZM	43.3749	53.074415	9.699515	16.313903	0.594555	0.714367	7	Yes
8	Point ZM	40.600585	50.332843	9.732258	16.112267	0.604028	0.797777	8	Yes
9	Point ZM	46.283689	47.774901	1.491212	16.431392	0.090754	0.094137	9	Yes
10	Point ZM	46.283689	42.173858	-4.109831	17.320992	-0.237275	-0.419296	10	Yes
11	Point ZM	40.600585	46.538743	5.938158	14.963312	0.396848	0.488776	11	Yes
12	Point ZM	28.72975	43.285323	14.555574	15.251888	0.954346	0.984235	12	Yes
13	Point ZM	40.600585	41.350058	0.749473	16.610999	0.045119	-0.031338	13	Yes
14	Point ZM	40.600585	41.287948	0.687363	16.563694	0.041498	-0.094137	14	Yes
15	Point ZM	37.961493	39.379456	1.417964	16.531733	0.085772	0.031338	15	Yes
16	Point ZM	33.085418	41.743475	8.658057	15.055696	0.575069	0.635657	16	Yes
17	Point ZM	43.3749	43.356135	-0.018764	15.080652	-0.001244	-0.157311	17	Yes
18	Point ZM	46.283689	52.466015	6.182326	14.981131	0.412674	0.560703	18	Yes
19	Point ZM	66.262727	47.356128	-18.906598	15.419113	-1.226179	-1.21334	19	Yes
20	Point ZM	55.78254	57.639516	1.856976	15.181142	0.122321	0.221119	20	Yes
21	Point ZM	73.575888	56.553341	-17.022547	15.062716	-1.130111	-1.09162	21	Yes
22	Point ZM	59.183271	58.961051	-0.22222	14.811176	-0.015004	-0.221119	22	Yes
23	Point ZM	46.283689	61.880734	15.597045	14.678831	1.062554	1.21334	23	Yes
24	Point ZM	73.575888	54.048038	-19.52785	14.749788	-1.323941	-1.356312	24	Yes
25	Point ZM	66.262727	49.977666	-16.285061	14.85002	-1.096636	-0.984235	25	Yes
26	Point ZM	46.283689	36.480119	-9.80357	15.687302	-0.624937	-0.635657	26	Yes
27	Point ZM	55.78254	40.264702	-15.517838	14.967261	-1.036785	-0.887147	27	Yes
28	Point ZM	28.72975	49.466838	20.737089	15.275901	1.357503	1.534121	28	Yes
29	Point ZM	23.107824	54.054891	30.947068	14.892039	2.078095	2.241403	29	Yes
30	Point ZM	66.262727	41.075885	-25.186842	15.053386	-1.673168	-1.780464	30	Yes
31	Point ZM	46.283689	50.661766	4.378077	14.723315	0.297357	0.351784	31	Yes
32	Point ZM	62.682312	42.382228	-20.300084	14.424002	-1.407382	-1.534121	32	Yes
33	Point ZM	30.844104	47.046171	16.202067	14.500558	1.117341	1.356312	33	Yes
34	Point ZM	23.107824	45.230361	22.122538	14.649543	1.510118	1.780464	34	Yes
35	Point ZM	49.324551	34.945523	-14.379028	14.743545	-0.975276	-0.797777	35	Yes
36	Point ZM	28.72975	38.612157	9.882407	15.008065	0.658473	0.887147	36	Yes
37	Point ZM	35.457011	34.107505	-1.349506	15.316001	-0.088111	-0.285841	37	Yes
38	Point ZM	33.085418	36.101311	3.015893	15.345929	0.196527	0.285841	38	Yes
39	Point ZM	40.600585	36.929332	-3.671253	15.170842	-0.241994	-0.488776	39	Yes
40	Point ZM	35.457011	40.820878	5.363867	15.387397	0.348588	0.419296	40	Yes

**Anexo N° 4:** Valor real vs. Valor predictivo RCU

FID	Shape	Measured	Predicted	Error	StdError	Stdd_Error	NormValue	Source_ID	Included
1	Point ZM	30	31.84407	1.84407	9.285292	0.198601	0.031338	1	Yes
2	Point ZM	27	21.642778	-5.357222	7.798932	-0.686917	-0.714367	2	Yes
3	Point ZM	24	29.8241	5.8241	9.324944	0.624572	0.560703	3	Yes
4	Point ZM	37	31.268247	-5.731753	8.789624	-0.652104	-0.635657	4	Yes
5	Point ZM	30	39.829904	9.829904	11.920251	0.824639	0.797777	5	Yes
6	Point ZM	43	38.342813	-4.657187	12.726585	-0.365942	-0.419296	6	Yes
7	Point ZM	40	53.496614	13.496614	19.100542	0.706609	0.635657	7	Yes
8	Point ZM	30	49.859231	19.859231	16.468552	1.205888	1.356312	8	Yes
9	Point ZM	30	63.529979	33.529979	22.324063	1.501966	1.534121	9	Yes
10	Point ZM	36	39.718786	3.718786	14.583027	0.255008	0.094137	10	Yes
11	Point ZM	33	47.696285	14.696285	12.809976	1.147253	1.21334	11	Yes
12	Point ZM	36	37.798588	1.798588	10.484128	0.171553	-0.031338	12	Yes
13	Point ZM	43	31.36091	-11.63909	9.973182	-1.167039	-1.356312	13	Yes
14	Point ZM	30	34.807567	4.807567	10.954267	0.438876	0.351784	14	Yes
15	Point ZM	28	31.044027	3.044027	10.347962	0.294167	0.157311	15	Yes
16	Point ZM	40	33.435489	-6.564511	8.948763	-0.733566	-0.984235	16	Yes
17	Point ZM	32	39.808254	7.808254	10.946615	0.713303	0.714367	17	Yes
18	Point ZM	35	48.989421	13.989421	13.199175	1.059871	1.09162	18	Yes
19	Point ZM	83	39.637393	-43.362607	11.52642	-3.762019	-2.241403	19	Yes
20	Point ZM	58	51.934441	-6.065559	14.341008	-0.422952	-0.488776	20	Yes
21	Point ZM	60	50.380193	-9.619807	13.573621	-0.708713	-0.887147	21	Yes
22	Point ZM	49	53.484023	4.484023	13.749217	0.326129	0.221119	22	Yes
23	Point ZM	30	71.041751	41.041751	17.870152	2.296665	2.241403	23	Yes
24	Point ZM	92	52.765321	-39.234679	13.51032	-2.904053	-1.780464	24	Yes
25	Point ZM	75	66.379509	-8.620491	17.469854	-0.49345	-0.560703	25	Yes
26	Point ZM	30	33.274486	3.274486	9.826643	0.333225	0.285841	26	Yes
27	Point ZM	50	57.094399	7.094399	15.087571	0.470215	0.419296	27	Yes
28	Point ZM	50	47.447734	-2.552266	13.295178	-0.191969	-0.157311	28	Yes
29	Point ZM	72	60.302421	-11.697579	15.873203	-0.736939	-1.09162	29	Yes
30	Point ZM	39	44.818888	5.818888	12.321764	0.472245	0.488776	30	Yes
31	Point ZM	49	46.539362	-2.460638	11.847395	-0.207694	-0.221119	31	Yes
32	Point ZM	49	49.647129	0.647129	12.200599	0.053041	-0.094137	32	Yes
33	Point ZM	58	45.594608	-12.405392	11.43643	-1.084726	-1.21334	33	Yes
34	Point ZM	40	51.178452	11.178452	12.864412	0.868944	0.887147	34	Yes
35	Point ZM	48	44.225159	-3.774841	11.390162	-0.331412	-0.351784	35	Yes
36	Point ZM	50	42.088737	-7.911263	11.200845	-0.706309	-0.797777	36	Yes
37	Point ZM	31	56.678917	25.678917	15.817459	1.623454	1.780464	37	Yes
38	Point ZM	64	43.722522	-20.277478	12.323039	-1.645493	-1.534121	38	Yes
39	Point ZM	50	47.132137	-2.867863	12.532193	-0.22884	-0.285841	39	Yes
40	Point ZM	38	51.470143	13.470143	14.426903	0.933682	0.984235	40	Yes

**Anexo N° 5:** Procedimiento de laboratorio para determinar la densidad del macizo rocoso.

