



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO INGENIERÍA DE MINAS**

# **MODELAMIENTO GEOESTADÍSTICO DE LA CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE BIENIAWSKI (RMR)**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN MINERÍA**

**FABIOLA ALVARADO VALDÉS**

**PROFESOR GUÍA:  
XAVIER EMERY**

**PROFESOR CO-GUÍA:  
KIMIE SUZUKI MORALES**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
MOHAMMADALI MALEKITEHRANI**

**SANTIAGO DE CHILE  
2020**

**RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR  
AL GRADO DE:** Magister en Minería.  
**POR:** Fabiola Alvarado Valdés  
**FECHA:** Julio 2020  
**PROFESOR GUIA:** Xavier Emery

## **MODELAMIENTO GEOESTADÍSTICO DE LA CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE BIENIAWSKI (RMR)**

Al ser la geotecnia parte importante en la caracterización y el control para la toma de decisiones operativas, surge la necesidad de implementar metodologías que permitan la cuantificación de riesgos asociados a calidad de roca y así generar modelos predictivos de clasificación geomecánica, ayudando al entendimiento y comportamiento del macizo rocoso, así como permitiendo una planeación y un diseño ingenieril exitoso en el tiempo.

El presente trabajo de tesis concierne un modelo geoestadístico de calidad de roca en un yacimiento tipo skarn reconocido geotécnicamente por medio de sondajes realizados desde galerías de una mina subterránea con ubicación omitida por cuestiones de confidencialidad.

Se propone simular el puntaje correspondiente a la calidad de roca (Rock Mass Rating, RMR) mediante dos enfoques. El primero utiliza los datos proporcionados de RMR (1989), considerada como una variable continua, y realiza su simulación mediante el modelo gaussiano. En cambio, el segundo enfoque trabaja mediante la cosimulación de los puntajes subyacentes del RMR, es decir, 9 variables discretas, por medio de un modelo gaussiano truncado. La metodología de trabajo genera cien realizaciones o escenarios de la calidad de roca con cada enfoque, siendo el segundo enfoque distintivo al crear en primera instancia realizaciones en el margen de cada puntaje parcial, para después ser sumadas y componer el puntaje total del RMR.

Las realizaciones permiten determinar el comportamiento esperado del yacimiento, con un escenario promedio de RMR que varía de 50 a 63 en el primer enfoque y de 53 a 64 en el segundo enfoque, clasificándose el dominio simulado en calidad de roca "REGULAR" o "BUENA". En cada enfoque la probabilidad de visualizar una roca con "MALA" calidad es baja, indicando una zonificación de bajo riesgo para futuras operaciones.

Si bien la simulación directa (enfoque 1) produce mapas levemente más regulares a pequeña escala que la cosimulación de puntajes parciales (enfoque 2), un ejercicio de validación cruzada basado en los datos de sondajes permite concluir que ambas metodologías responden de forma adecuada en términos de su capacidad de predecir el RMR sin sesgo ni sesgo condicional, mostrando además precisiones comparables. El primer enfoque tiene la ventaja de ser de implementación más sencilla, mientras que el segundo enfoque tiene la ventaja de entregar una información detallada de cada puntaje parcial, y no solamente del RMR total, a la vez que reproduce la naturaleza discreta de estos puntajes.

## **Agradecimientos**

Sencillo no ha sido el proceso, pero sí novedoso y enriquecedor. Durante este tiempo pude disfrutar cada momento, curso, investigación y proyecto realizado en este hermoso país que ahora me deja aprendizaje y madurez.

Agradezco el haber compartido este camino con los seres más importantes en mi vida, mis padres. Gracias a ellos y la fe que tengo en Dios ahora me encuentro avanzando un escalón más en mi vida académica y profesional.

A mi Director de Tesis, el Dr. Xavier Emery, agradezco cada minuto de su tiempo al recurrir a su capacidad y experiencia, mi total admiración siempre.

Correspondo el apoyo otorgado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID) de Chile, mediante los proyectos CONICYT/FONDECYT/REGULAR/N°1170101 y CONICYT PIA AFB180004, así como por el Departamento de Ingeniería de Minas y el Advanced Mining Technology Center (AMTC) de la Universidad de Chile.

Pleno reconocimiento a la Agencia Chilena de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AGCID) por el apoyo otorgado en el desarrollo de la estancia en el País.

Por último y no por eso menos importante agradezco a todas esas personas que se cruzaron en mi camino, ayudando a que cada momento resultara más llevadero y gratificante.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>1. Motivación</b> .....	1
<b>2. Objetivos</b> .....	2
2.1. General: .....	2
2.2. Específicos: .....	2
<b>3. Resultados Esperados</b> .....	2
<b>4. Hipótesis</b> .....	2
<b>II. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS</b> .....	3
<b>1. Conceptos básicos de geoestadística</b> .....	3
1.1. Variable Regionalizada.....	3
1.2. Función aleatoria .....	4
1.3. Variografía .....	5
1.4. Simulación Geoestadística .....	9
<b>2. Sistemas de clasificación de macizo rocoso</b> .....	10
2.1. Designación de la calidad de la roca (RQD) .....	10
2.2. Rock Mass Rating (RMR) .....	11
2.2.1. Recolección de Información.....	13
2.2.2. Resistencia de la roca.....	14
2.2.3. RQD.....	14
2.2.4. Logueo sondaje.....	15
<b>III. METODOLOGÍA</b> .....	17
<b>IV. CASO DE ESTUDIO</b> .....	18
<b>1. Estudio exploratorio de datos (E.D.A)</b> .....	18
1.1. Homogeneidad espacial .....	18
1.2. Distribuciones estadísticas .....	19
<b>2. Correlación entre variables</b> .....	20
<b>3. Enfoque 1: Simulación directa de RMR (modelo gaussiano)</b> .....	26
3.1. Desagrupamiento de datos ubicados en el espacio .....	26
3.2. Anamorfosis .....	28
3.3. Análisis variográfico .....	28

3.4. Simulación y Validación.....	29
<b>4. Enfoque 2: Simulación de puntajes parciales (modelo gaussiano truncado) .....</b>	<b>31</b>
4.1. Codificación.....	32
4.2. Análisis variográfico .....	32
4.3. Simulación y Validación.....	34
<b>5. Comparación de resultados .....</b>	<b>36</b>
<b>V. CONCLUSIONES .....</b>	<b>42</b>
<b>VI. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>44</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>46</b>
• <b>ANEXO A.....</b>	<b>46</b>
<b>RQD .....</b>	<b>46</b>
<b>ESPACIAMIENTO .....</b>	<b>47</b>
<b>PERSISTENCIA.....</b>	<b>48</b>
<b>APERTURA.....</b>	<b>49</b>
<b>RUGOSIDAD.....</b>	<b>50</b>
<b>RELLENO .....</b>	<b>51</b>
<b>ALTERACIÓN .....</b>	<b>52</b>
<b>AGUA .....</b>	<b>53</b>
<b>CALIDAD ROCA (RMR).....</b>	<b>53</b>
• <b>ANEXO B.....</b>	<b>53</b>
• <b>ANEXO C.....</b>	<b>61</b>

# **I. INTRODUCCIÓN**

## **1. Motivación**

Hoy en día las faenas mineras buscan una caracterización detallada de sus yacimientos, no solo desde el punto de vista geológico, sino también geometalúrgico y geotécnico/geomecánico. Esta caracterización es esencial para una adecuada planificación de la extracción y el procesamiento del mineral, para el diseño minero y para la operación minera en sí misma.

Temas y disciplinas importantes para ayudar al entendimiento del comportamiento del yacimiento en cuestión estructural son de suma importancia, geotecnia y geoestadística son ramas que pueden conjugarse para arrojar una mejor visualización y comprensión del depósito de forma tridimensional.

Las ventajas de la geotecnia y sus diversos elementos de estudio, son oportunidades para un sector donde la roca es la materia prima, por lo tanto, surge la necesidad de metodologías de caracterización para establecer parámetros de calidad e identificación de la roca.

Estas metodologías ayudan en la planificación e implementación de estrategias futuras para un mejor aprovechamiento del recurso y así potencializar el valor económico del proyecto minero.

El presente estudio se implementa en un yacimiento de tipo skarn, modelado a partir de la información obtenida de sondajes realizados desde galerías subterráneas cuya identidad se mantiene en reserva por razones de confidencialidad, y donde las características estructurales controlan parte de las decisiones operativas, y al no tener un contexto o visualización de variables geotécnicas impiden una posible cuantificación de riesgos asociados a medidas estructurales.

Por tanto, el modelamiento geotécnico a partir de geoestadística puede y debe ser usado como un beneficio técnico y económico para el proyecto, y es de gran relevancia para evaluar y resguardar la seguridad integral de las personas y de la infraestructura minera.

## **2. Objetivos**

### 2.1. General:

- Generar un modelo predictivo de la clasificación geomecánica de Bieniawski (Rock Mass Rating, RMR) presente en el yacimiento y cuantificar la incertidumbre en este parámetro mediante simulación geoestadística.

### 2.2. Específicos:

- Simular RMR como una variable cuantitativa continua en una zona delimitada.
- Simulación de RMR como una variable discreta (puntaje) mediante la simulación conjunta de las variables subyacentes.
- Cuantificar la incertidumbre en este parámetro.
- Determinar zonas de medio y alto riesgo, según calidad de roca.
- Identificar posibles áreas de oportunidad para técnicas geoestadísticas aplicadas a problemas geotécnicos complejos.

## **3. Resultados Esperados**

El uso de herramientas geoestadísticas permitirá abordar los diferentes problemas a lo largo de la realización de la investigación:

- Simulación de parámetros geotécnicos en el espacio
- Cuantificación de la incertidumbre.

Se pretende obtener modelos que permitan visualizar las tendencias, así como la heterogeneidad espacial, del comportamiento de la roca y las limitaciones de calidad de ésta en el yacimiento.

Este trabajo se enmarca en el proyecto FONDECYT 1170101 financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANID-CONICYT) de Chile.

## **4. Hipótesis**

Los parámetros geotécnicos, como el Rock Mass Rating (RMR) y sus componentes subyacentes, son variables regionalizadas que exhiben cierta continuidad espacial. Estas variables no se conocen exhaustivamente, sino que solo en un conjunto de ubicaciones dispersas para las cuales se realizan observaciones directas (mapeo geotécnico o ensayos geomecánicos en muestras de sondajes diamantinos, para los cuales se recuperan testigos de roca).

Por tanto, el modelamiento geotécnico implementado con técnicas de predicción espacial o de simulación geoestadística puede ser usado como aprovechamiento para un beneficio técnico y económico para el proyecto, y es de gran relevancia para evaluar y resguardar la seguridad integral.

## II. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

### 1. Conceptos básicos de geoestadística

Parte de la metodología y parámetros a utilizar comprenden el uso de herramientas geoestadísticas. Se precisa a continuación descripciones variables sobre instrumentos como variables regionalizadas, variografía y simulación, así como una breve explicación de la geoestadística.

La geoestadística se define como la ciencia que estudia las variables regionalizadas en el espacio, según (Journel y Huijbregts, 1978) es la aplicación de la teoría de funciones aleatorias al reconocimiento y predicción de fenómenos naturales. Siendo esta una rama de la estadística aplicada, su uso es útil en aspectos geológicos como la cuantificación de recursos minerales y de la incertidumbre asociada a estos, así como el análisis de riesgo en una faena minera.

#### 1.1. Variable Regionalizada

Una variable regionalizada es una función que representa la variación en el espacio de una cierta magnitud asociada a un fenómeno natural, considerada como una característica en el espacio. De acuerdo con (Ovalles, 1992), no es más que una función que describe un fenómeno natural geográficamente distribuido.

Las variables regionalizadas cuentan con características propias que representan la evolución en el espacio de un fenómeno natural, en particular, su naturaleza, localización, campo, continuidad, anisotropía, soporte, aditividad y direccionalidad.

La naturaleza de una variable regionalizada se asocia a tres diferentes tipos (Chilès y Delfiner, 2012):

- Variables continuas.
- Variables discretas.
- Variables categóricas.

Las variables continuas tienen como resultado un rango continuo de valores, por lo cual se miden en una escala continua cuantitativa; un ejemplo típico es la ley de un metal de interés. Una variable discreta queda asociada a una escala cuantitativa, pero, por lo general, limitada a valores enteros; como ejemplos, citemos a variables de conteo y, lo que interesa en esta tesis, al Rock Mass Rating que consiste en un puntaje. Por último, una variable categórica es aquella que divide en clases, esto quiere decir que son aquellas cuya escala es una codificación o clasificación desorganizada.

La localización de una variable regionalizada describe la posición donde son tomados los valores de ésta. Por lo tanto, la variable presenta valores en una zona bien determinada en el espacio, denominada campo geométrico. El campo geométrico será la porción del espacio para considerar donde se encuentra la variable regionalizada, por ejemplo, la región donde se encuentra el yacimiento a estudiar.

La continuidad en el espacio, característica propia de una variable, describe el grado con la cual se representa y su persistencia en el espacio.

El término anisotropía se refiere a la existencia de direcciones preferenciales de continuidad.

El soporte es el término que se da al área o volumen donde es medida la variable, pudiendo ser este de dimensiones pequeñas (testigo de sondaje) a dimensiones considerables (bloque de producción). Los soportes voluminosos presentan una menor cantidad de valores extremos y una mayor cantidad de valores intermedios que los soportes puntuales (Matheron, 1984). Este efecto de soporte muestra que existe entre el soporte y la distribución estadística de los valores (datos).

La aditividad se refiere a la posibilidad de promediar o sumar los valores de una variable para representar un soporte más grande. La aditividad es necesaria para que el cálculo del valor promedio sobre un soporte más grande que el soporte de las mediciones, tenga un sentido físico (Carrasco et al., 2008). No siempre se presenta en variables geotécnicas como la Frecuencia de Fracturas (FF), Rock Mass Rating (RMR), Mining Rock Mass Rating (MRMR) o Geological Strength Index (GSI).

La direccionalidad se da cuando el valor de una medición depende de la dirección en la cual se toma la muestra. Un claro ejemplo de esta característica es el parámetro geotécnico RQD, el cual se entiende como la suma de la medición de los fragmentos mayores a 10 cm entre el largo del sondaje donde se encuentran estas fracturas, parámetro direccional porque depende del ángulo entre la dirección del sondaje (testigo) y la fractura (Séguret et al., 2014). Esta propiedad puede ser obviada cuando la red de fracturas es isótropa, es decir, no muestra ninguna dirección preferencial a la escala de trabajo; en caso contrario, la direccionalidad puede ser tomada en cuenta al considerar que el parámetro geotécnico está regionalizado en un espacio de cinco dimensiones (las tres dimensiones geográficas usuales, más las dos dimensiones de azimut e inclinación de la medición) (Séguret and Emery, 2019; Sánchez et al., 2019).

## 1.2. Función aleatoria

Los fenómenos regionalizados resultan ser complejos y su comprensión tan parcial que interfiere en su modelamiento determinístico, llevándolo a ser casi imposible. Por esta razón, se recurre a modelos probabilísticos, los cuales resultan operatorios pues permiten formalizar tanto el conocimiento como la incertidumbre que se tiene del fenómeno regionalizado. La geoestadística pues bien trata las variables regionalizadas en estudio como la realización de un proceso aleatorio, a través de la evaluación de la dependencia y el comportamiento espacial de los datos, entregando una representación intermedia, es decir a la vez aleatoria y funcional, al basarse en el concepto de *función aleatoria*.

Este concepto se refiere a la interpretación de un valor determinístico  $z(x)$  observado en un punto  $x$  como el resultado o “realización” de una variable aleatoria. Cuando  $x$  recorre el campo, se obtiene una colección de variables aleatorias, las que serán representadas

en su totalidad como una función aleatoria, consistente en un conjunto de variables aleatorias, cada una asociada a un punto  $x$  del espacio.

Una función aleatoria está caracterizada por sus distribuciones finito-dimensionales y a su vez el conjunto de todas sus distribuciones finito-dimensionales constituye lo que se denomina la *distribución espacial* de la función aleatoria. Por lo general, se restringe la inferencia de la distribución espacial a sus parámetros más sencillos que son la media o esperanza (momento de primer orden) o la covarianza o el variograma (momentos de segundo orden). Asimismo, se plantea una hipótesis de estacionaridad, acorde a la cual las distribuciones y sus momentos son invariantes al realizar una traslación en el espacio, lo cual corresponde a una hipótesis de homogeneidad espacial: las propiedades estadísticas y geoestadísticas de la variable regionalizada no cambian al desplazarse en el espacio.

### 1.3. Variografía

Uno de los primeros pasos para seguir en el desarrollo de un análisis geoestadístico es el llamado análisis variográfico que permite crear una representación matemática de la función aleatoria pariente de una variable regionalizada. El análisis variográfico permite obtener una descripción cuantitativa de cómo la variable cambia en el espacio. Según (Ovalles, 1992) el variograma contiene la información referente a la continuidad espacial de la variable regionalizada, siendo parte de la distribución espacial de la función aleatoria asociada.

El análisis variográfico permite verificar la clasificación de una función aleatoria en el espacio, la cual puede ser continua o discontinua, así también si es estacionaria o no dependiendo de si los variogramas se estabilizan en torno a una meseta para distancias de separación grandes (Pinheiro, 2017).

La construcción de un variograma consiste primero en calcular un variograma experimental a partir de los datos de muestreo disponibles. Luego, este se modela en base a funciones conocidas para concluir con su validación.

El variograma experimental de una variable regionalizada  $z$  para un vector de separación  $h$  dado, se define como la mitad de la diferencia cuadrada de los valores de dos puntos separados por el vector  $h$ , (Deutsch, 2002):

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{|x_i - x_j| = |h|} (z(x_i) - z(x_j))^2$$

ECUACIÓN 1 VARIOGRAMA EXPERIMENTAL

Donde  $x_i$  y  $x_j$  son puntos separados por el vector  $h$  en los cuales se conoce la variable  $z$  y  $N(h)$  es el número de pares de tales puntos.

Los parámetros para calcular un variograma experimental serán la dirección de interés, azimut e inclinación, distancia, paso, número de paso, tolerancia y ancho de banda.

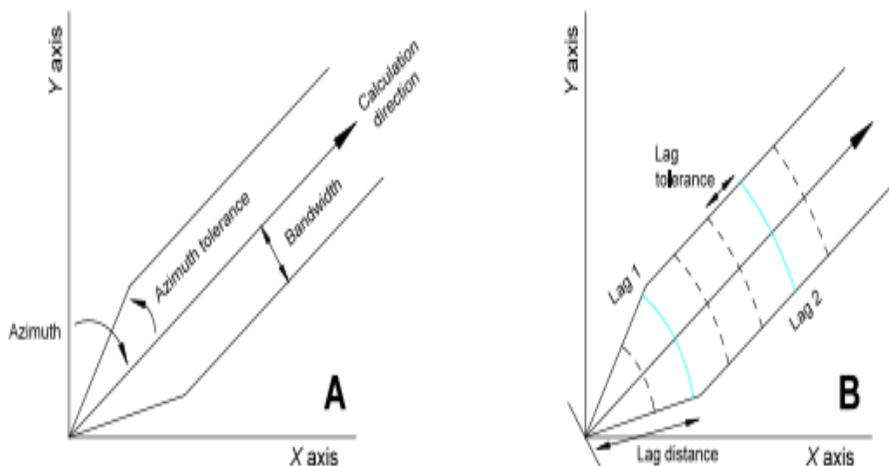


IMAGEN 1 PARÁMETROS DE UN VARIOGRAMA (PINHEIRO, 2017)

Azimut es la medida horizontal respecto al norte. Ésta será la dirección en la que se construye o calcula el variograma experimental. El lag es o son los pasos a las que se calculan los puntos del variograma experimental. La tolerancia angular y el ancho de banda son el ángulo y la separación máxima respecto a la dirección de interés, dentro de los cuales se consideran los pares de datos válidos para el cálculo del variograma, respectivamente. La tolerancia en el paso se refiere a la tolerancia en torno a la distancia de interés, de manera que los datos puedan encontrarse a una distancia mayor o menor al paso.

El número  $N(h)$  de pares de datos para la realización de un variograma experimental puede variar con  $h$ , siendo 30 el número mínimo usualmente recomendado en la industria geológica-minera (Journel, 1977), considerando que la configuración de las muestras puede variar de muestreo regular a aleatorio (Imanzadeh, 2013).

En la práctica, se determina una dirección y una distancia o lag ( $h$ ), se calcula  $\gamma^*(h)$  y se procede a graficar para las diferentes distancias y direcciones consideradas.

Al obtener el variograma experimental podemos apreciar características de la variable regionalizada, como su alcance, regularidad, anisotropía, meseta.

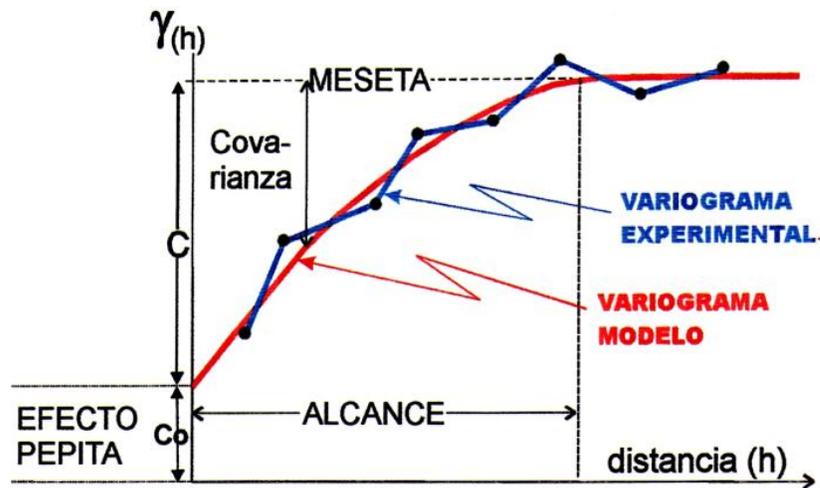


IMAGEN 2 CARACTERÍSTICAS DE UN VARIOGRAMA (FERNANDEZ-TESSONE, 2015)

El alcance, en una dirección dada, se define como la distancia a partir de la cual se estabiliza el variograma. Muestra la distancia de separación a partir de la cual los datos ya no se correlacionan.

La meseta corresponde al valor del variograma para distancias mayores que el alcance. Indica la varianza de la función aleatoria.

La regularidad será aquella que describe el comportamiento del variograma cerca del origen. Las fluctuaciones aleatorias de la variable o los errores del muestreo es lo que conocemos como efecto pepita, que corresponde a la componente discontinua del variograma en el origen (distancia  $h = 0$ ).

Cualquier variograma se puede calcular en diferentes direcciones y así poder entender alguna preferencia o anisotropía en la continuidad espacial de los datos.

El variograma teórico es un ajuste del variograma experimental por una función matemática que está definida para todas las distancias y direcciones del espacio.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[Z(x) - Z(x + h)]^2$$

ECUACIÓN 2 VARIOGRAMA TEÓRICO

Donde  $Z$  representa la función aleatoria asociada a la variable regionalizada y  $E [.]$  representa la esperanza matemática.

La clasificación general del comportamiento de un variograma en el origen (es decir, para distancias pequeñas) comprende tres variantes (Chilès & Delfiner, 2012):

- Parabólico: corresponde a una variable regionalizada muy regular en el espacio.
- Lineal: corresponde a una variable regionalizada continua, pero no tan regular.

- Discontinuo (efecto pepita): corresponde a una variable regionalizada más errática.

Entonces el modelamiento de variograma consiste en elegir un modelo teórico del variograma en torno al variograma experimental y así describir la continuidad espacial de la función aleatoria asociada a la variable en estudio, por lo cual el modelo matemático elegido debe estar lo más ajustado posible al variograma experimental de los datos.

Los modelos más utilizados están basados en las funciones matemáticas isótropas representadas a continuación. Se puede utilizar combinaciones (sumas ponderadas) de estos modelos básicos, así como introducir parámetros de anisotropía mediante rotación y escalamiento de las coordenadas.

Modelo	Funciones matemáticas	
Efecto pepita	$\gamma(0) = 0$ $si\ h > 0, \gamma(h) = C_0$	$C_0 =$ efecto pepita
Esférico	$si\ h < a, \gamma(h) = C \left( \frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right) + C_0$ $si\ h \geq a, \gamma(h) = C + C_0$	$C + C_0 =$ meseta $a =$ alcance
Exponencial	$\gamma(h) = C \left( 1 - e^{-\frac{3h}{a}} \right) + C_0$	$C + C_0 =$ meseta $a =$ alcance práctico
Cúbico	$si\ h < a, \gamma(h) = C \left[ 7 \left( \frac{h}{a} \right)^2 - \frac{35}{4} \left( \frac{h}{a} \right)^3 + \frac{7}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^5 - \frac{3}{4} \left( \frac{h}{a} \right)^7 \right] + C_0$ $si\ h \geq a, \gamma(h) = C + C_0$	$C + C_0 =$ meseta $a =$ alcance
Gaussiano	$\gamma(h) = C \left( 1 - e^{-\left( \frac{\sqrt{3\pi}}{a} \right)^2} \right) + C_0$	$C + C_0 =$ meseta $a =$ alcance práctico
Lineal	$\gamma(h) = ph + C_0$	$p =$ pendiente
Potencia	$\gamma(h) = ph^\alpha + C_0$	$\alpha =$ exponente

IMAGEN 3 FUNCIONES MATEMÁTICAS DE AJUSTE EN VARIOGRAMA ISÓTROPO

En el caso multivariable, se generalizan las definiciones anteriores, con la introducción de variogramas *crucados* entre variables, destinados a modelar la correlación espacial existente entre estas variables, además de los variogramas propios de cada variable (denominados variogramas *directos* o *simples*). El modelamiento también se puede realizar mediante combinaciones de modelos básicos, de forma similar al caso univariable, lo que se conoce como el modelo lineal de correogionalización (Wackernagel, 2003; Chilès y Delfiner, 2012).

#### 1.4. Simulación Geoestadística

La simulación es una técnica utilizada para generar “escenarios”, esta comprende en la construcción de una variable regionalizada que se asemeje a aquella que se estudia.

Estas técnicas se apoyan en la interpretación de la variable regionalizada como una realización de una función aleatoria y el modelamiento de su distribución espacial (Emery, 2013). Consisten en construir otras realizaciones de esta misma función aleatoria por medio de interpolaciones, las cuales presentarán las mismas características, en particular, las mismas distribuciones y la misma continuidad espacial. Además, es posible condicionar las simulaciones a un conjunto de datos de muestreo, para que todos los escenarios reproduzcan los valores medidos en estos datos. Se habla en este caso de *simulación condicional*.

Existen varios modelos de simulación. Hay unos pocos que son más ampliamente conocidos y utilizados dependiendo de la naturaleza de la función aleatoria: continua, discreta o categórica.

El método de simulación gaussiana se utiliza para variables continuas y requiere la transformación de la función aleatoria a una distribución gaussiana, llamada anamorfosis (Chilès y Delfiner, 2012). Para la realización de una simulación gaussiana se requiere fundamentalmente:

- Transformación de los datos a valores gaussianos (anamorfosis)
- Análisis variográfico de la variable gaussiana
- Simulación de la función aleatoria gaussiana, para lo cual existen numerosos algoritmos, entre los cuales el método de descomposición matricial, el método secuencial, el método espectral y el método de bandas rotantes (Chilès y Delfiner, 2012; Lantuéjoul, 2002)
- Condicionamiento a los datos de muestreo, basado en un kriging (Chilès y Delfiner, 2012)
- Transformación gaussiana inversa, para volver a la variable original.

El modelo siguiente, gaussiano truncado, que será de interés en esta tesis, se utiliza para simular variables discretas y categóricas. Trabaja por medio de realizaciones mediante el truncamiento de una función aleatoria gaussiana, convirtiendo la función aleatoria continua en una función con clases discretas (dos o más clases, dependiendo de si se utiliza uno o más umbrales de truncamiento) (Armstrong et al., 2011; Chilès y Delfiner, 2012). Se obtiene una variable discreta si las clases están ordenadas o jerarquizadas entre ellas, una variable categórica (sin orden entre categorías) en caso contrario.

Este modelo se puede generalizar a la simulación conjunta de varias variables discretas (Emery y Cornejo, 2010), tales como los diferentes puntajes subyacentes en el cálculo del RMR, así como a la simulación de variables categóricas, por ejemplo, para representar unidades geológicas (tipos de roca, zonas minerales o de alteración) o unidades geotécnicas. Ambas generalizaciones se basan en el truncamiento de varias

funciones aleatorias gaussianas y una regla de truncamiento multivariable (método denominado “plurigaussiano”) (Armstrong et al., 2011).

## 2. Sistemas de clasificación de macizo rocoso

Actualmente en el ámbito minero-geológico surge la necesidad de evaluar el comportamiento de suelo y roca, la geotécnica engloba los principios y técnicas ingenieriles y geológicos para la valoración del terreno y su respuesta mecánica ante los esfuerzos in situ e inducidos, que nos permiten entender el área de trabajo y así emitir propuestas referentes a medidas de control y seguridad como una buena productividad en los procesos.

Los sistemas más utilizados para la caracterización del macizo rocoso son: Q de BARTON (Barton et al. 1974), RMR (Bieniawski 1989) y RQD (Deere et al 1964) con el fin de clasificar un macizo rocoso y comportamiento de estructuras como fracturas, diaclasas, vetilleo, etc.

A continuación, se describen algunos sistemas de clasificación antes citados:

### 2.1. Designación de la calidad de la roca (RQD)

Corresponde al porcentaje de recuperación de testigos de más de 10 cm de longitud (IMAGEN 4), planteando una relación entre el valor numérico arrojado y la calidad del macizo rocoso desde el punto de vista de la estabilidad de túneles, desarrollado y propuesto por Deere et. al (1964):

$$RQD = \frac{\Sigma \text{Fragmentos} > 10 \text{ cm}}{\text{longitud total de sondaje}}$$

ECUACIÓN 3 CALCULO PARÁMETRO RQD (DEERE 1964)

Esta variable geotécnica en su origen fue supuesta para mediciones en testigos de diámetro 54.7 mm (Tamaño NX) , siendo modificada y validada en 1974 por su autor para testigos sin distinción de diámetro y actualmente utilizada como un parámetro estándar en testigos de perforación, ha sido utilizada como complemento en innumerables técnicas que miden parámetros de calidad de roca, por ejemplo, el criterio de ruptura (Falla) de macizos rocosos propuesto por Hoek y Brown (1980) y Hoek y Bray (1981) que implementan la ruptura en cuña, que ocurre a lo largo de dos discontinuidades, las cuales hacen referencia al parámetro para cuantificar la calidad de roca ya sea en proyectos de ingeniería civil, así como proyectos mineros donde se caracteriza geotécnicamente la roca.

El éxito del RQD se debe a la facilidad de comprensión y utilización de este, sin embargo, se encuentra a una variabilidad de resultados debido a la experiencia con que es observado y medido, concretamente es subjetivo a cada ojo. Dentro de las limitaciones del RQD es que es un valor que depende de la orientación del sondaje.

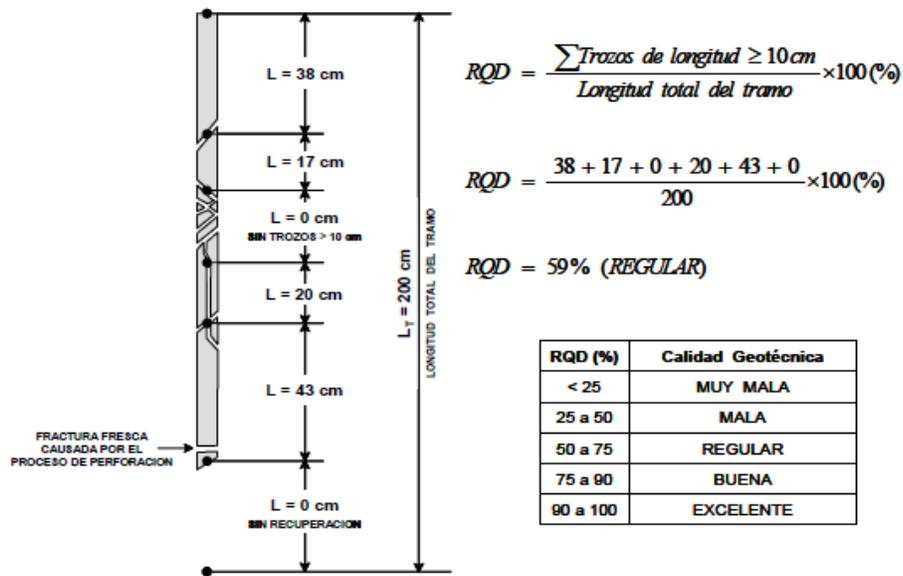


IMAGEN 4 EJEMPLO DE MEDICIÓN PARÁMETRO RQD, (DEERE AND DEERE 1988)

## 2.2. Rock Mass Rating (RMR)

Clasificación geomecánica de un macizo rocoso independiente de un factor de corrección. Fue propuesto en el año 1973 a partir de la estimación de ocho parámetros iniciales y modificada en los años posteriores 1976, 1979, 1984 y 1989. En la versión de 1989 las valoraciones no cambiaron, pero la evaluación de las discontinuidades subhorizontales fue modificada.

La versión propuesta por su autor valora la resistencia de la matriz rocosa, el índice RQD, condición de las discontinuidades y parámetros hidrogeológicos, (Bieniawski, Z.T. 1989) utilizada en este trabajo mediante la ecuación.

$$RMR = P(UCS) + P(RQD) + P(s) + P(JC) + P(WC) + P(OJ)$$

ECUACIÓN 4 DEFINICIÓN DEL RMR EN FUNCIÓN DE LA SUMA DE LOS PARÁMETROS RELEVANTES (BIENIAWSKI 1989)

Cada puntaje corresponde a los parámetros establecidos:

- P (UCS) Resistencia de la roca
- P (RQD) Rock quality designation
- P (S) Separación de discontinuidades
- P (JC) Condición de discontinuidades
- P (WC) Condiciones hidrológicas
- P (OJ) Ajuste por orientación de las juntas.

PARAMETRO		ESTIMACION Y ESCALA DE VALORES							
1	Resistencia de la roca sana	<i>Carga puntual</i> MPa $\Rightarrow$ Kg/cm <sup>2</sup> (aprox) $\Rightarrow$	> 10 100	4 - 10 40 - 100	2 - 4 20 - 40	1 - 2 10 - 20	<i>Únicamente Compresión Simple</i>		
		<i>Compr. Simple</i> MPa $\Rightarrow$ Kg/cm <sup>2</sup> (aprox) $\Rightarrow$	> 250 > 2 500	100 - 250 1 000 - 2 500	50 - 100 500 - 1 000	25 - 50 250 - 500	5-25 10-250	1-5 10-50	< 1 < 10
	Valoración	15	12	7	4	2	1	0	
2	RQD %	90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25			
	Valoración	20	17	13	8	3			
3	Separación de discontinuidades	> 2 m	0,6 - 2 m	0,2 - 0,6 m	0,06 - 0,2 m	< 0,06 m			
	Valoración	20	15	10	8	5			
4	Estado de las discontinuidades <i>(ver guía especial)</i>	Muy rugosas. Discontinuas. Sin separaciones. Borde sano y duro	Ligeramente rugosas. Abertura < 1 mm. Bordes duros.	Ligeramente rugosas. Abertura < 1 mm. Bordes blandos	Espejo de falla o con relleno < 5 mm o aberturas 1 - 5 mm. Diaclasis continuas	Relleno blando > 5 mm o aberturas > 5 mm Diaclasis Continuas			
	Valoración	30	25	20	10	0			
5	Presencia de agua	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	< 10 L/min	10 - 25 L/min	25 - 125 L/min	> 125 L/min		
		Relación entre la presión de agua y la mayor del terreno $\sigma_w / \sigma_1$	0	0 - 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
	Estado general	Seco	Ligeramente Húmedo	Húmedo	Goteando	Fluyendo			
	Valoración	15	10	7	4	0			
<b>Corrección por orientación de las discontinuidades (ver guía especial)</b>									
6	Dirección y Buzamiento		Muy favorable	Favorable	Medio o regular	Desfavorable	Muy desfavorable		
	Valoración para	Túneles	0	- 2	- 5	- 10	- 12		
		Cimentación	0	- 2	- 7	- 15	- 25		
	Taludes	0	- 5	- 25	- 50	- 60			

TABLA 1 PARÁMETROS CON PONDERACIÓN A UTILIZAR EN RMR (BIENIAWSKI, 1989).

Parte fundamental del RMR es asignar un rating a diferencia de RQD que se enfoca sólo en la medición de fracturas y no en el estado de éstas: el parámetro 4 referente al estado de las discontinuidades muestra una clasificación y ponderación según sus características, haciendo más completa esta variable.

Parámetro	Valoración				
Longitud de la discontinuidad (Persistencia)	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
	6	4	2	1	0
Abertura	Nada	< 0,1 mm	0,1 - 1,0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
	6	5	3	1	0
Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave
	6	5	3	1	0
Relleno	Ninguno	Relleno duro	Relleno duro	Relleno blando	Relleno blando
		< 5 mm	> 5 mm	< 5 mm	> 5 mm
	6	4	2	2	0
Alteración	Inalterado	Ligeramente alterado	Moderadamente alterado	Muy alterado	Descompuesto
	6	5	3	1	0

TABLA 2 COMPONENTES DE DESCRIPCIÓN DE PARÁMETRO 4 DE RMR Y SUS PUNTAJES (BIENIAWSKI, 1989)

La suma de los parámetros o puntajes arroja una clasificación respecto a la estabilidad de un túnel, la cual considera al macizo rocoso según su competencia en base a las variables cuantificadas, pudiendo ser etiquetadas en los siguientes campos según su puntaje.

En base a esta estimación, Bieniawski también entrega recomendaciones sobre el tiempo de sostenimiento y el ancho de la excavación (Tabla 3).

Valoración RMR ⇨	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Clase ⇨	I	II	III	IV	V
Calidad ⇨	Muy Buena	Buena	Media o regular	Mala	Muy mala
Tiempo de sostenimiento y longitud de claro (inicial 1979)	10 años con 15 m de claro	6 meses con 8 m de claro	1 semana con 5 m de claro	10 horas con 2,5 m de claro	30 min con 1 m de claro
Tiempo de sostenimiento y longitud de claro (Bieniawski, 1989)	20 años con 15 m de claro	1 año con 10 m de claro	igual	igual	igual
Cohesión de la roca MPa kg/cm <sup>2</sup>	>0,4 > 4	0,3 - 0,4 3 - 4	0,2 - 0,3 2 - 3	0,1 - 0,2 1 - 2	< 0,1 < 1
Ángulo de rozamiento interno	> 45°	35 - 45°	25 - 35°	15 - 25°	< 15°

TABLA 3 CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA RMR (BIENIAWSKI, 1979-1989)

Los datos de inicio fueron proporcionados por el equipo técnico de exploración de un yacimiento, el cual como se menciona anteriormente corresponde a sondajes geotécnicos de galerías subterráneas y se consideraran las variables estudiadas como valores no continuos de datos geotécnicos en muestras de sondajes para el fin de las estimaciones realizadas, siendo la naturaleza de los parámetros componentes del RMR valores continuos aplicados a descripciones en celdas geotécnicas in situ.

Los parámetros antes mencionados se describen a continuación para efectos de la continuidad de los datos proporcionados para la realización del modelo en base a metodologías utilizadas en los procedimientos de sondajes geomecánicos.

### 2.2.1. Recolección de Información

Durante la etapa de exploración de un yacimiento minero se ejecutan perforaciones diamantinas, las que, además de la información geológica, convendrán ser registradas mediante logueo geomecánico de parámetros como RQD, resistencia a la carga puntual y alteración en la roca sana y en las discontinuidades. Es útil que el logueo se realice inmediatamente después de extraer los testigos de perforación (Núcleos) ya que de hacerlo posteriormente muchos de los testigos podrían perderse, y / o alterarse.

Las técnicas que se aplican son el mapeo geomecánico de celdas, la línea de detalle y el logueo de sondajes, en el presente estudio se utiliza esta última técnica para obtener los datos geomecánicos manipulados en la realización de los modelos.

Mediante el logueo geomecánico de testigos de sondajes se identifican y cuantifican características del macizo rocoso y las principales discontinuidades, su espaciamiento, persistencia, apertura, relleno, rugosidad presente y grado de meteorización a partir de cortes o secciones sobre el sondaje.

### 2.2.2. Resistencia de la roca.

El ensayo de compresión simple determina la resistencia máxima a la compresión de una muestra cilíndrica, en el caso del presente se requirió una porción (núcleo) del sondaje, con un diámetro determinado e igual para toda muestra, la cual fue sometida a una carga axial sin ninguna carga de confinamiento aplicada de forma continua y gradualmente hasta que la muestra falle.

El parámetro resistencia es el último a ser evaluado, ya que implica la destrucción de la muestra, y distorsiona la medición exacta de los siguientes parámetros descritos al no contar con la orientación de las estructuras en su posición original.

### 2.2.3. RQD

Otro parámetro realizado para la obtención de un puntaje total de RMR es el índice de designación de calidad de roca (RQD), descrito anteriormente en la sección de “sistemas de clasificación de macizo rocoso”.

El RQD asigna un porcentaje de calificación al macizo rocoso, de 100% (el más competente) a 0% (el menos competente)

La técnica utilizada en este parámetro es tender y alinear el sondaje, a continuación, se mide la frecuencia del número de fracturas naturales presentes. Si la frecuencia de fracturas aumenta, la valoración del RQD disminuye.

Algunas consideraciones para este parámetro:

- La longitud de testigos no recuperados en la extracción del sondaje debe ser incluida en el largo total de este
- Las fracturas mecánicas creadas por el manipuleo deben ser ignoradas
- Fracturas a lo largo del eje del testigo no son consideradas como fracturas
- RQD evaluado en sondajes frescos (recién extraídos)

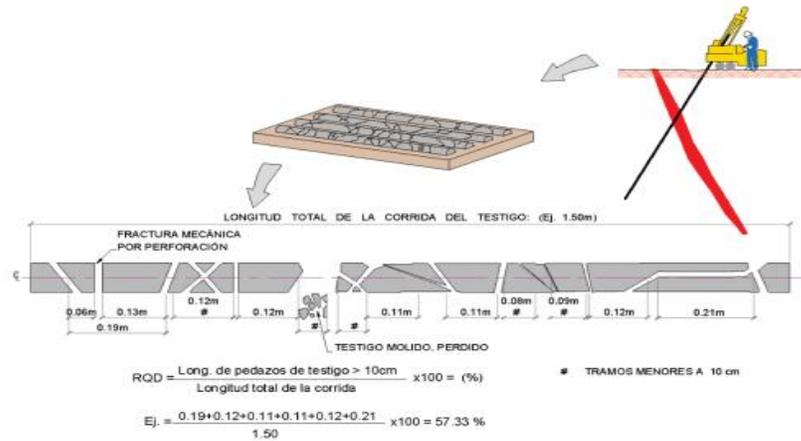


IMAGEN 5 PROCESO PARA EVALUAR RQD EN TESTIGO (ACG 2003)

## 2.2.4. Logueo sondaje

Un logueo se describe como la descripción detallada de un sondaje, en este se miden los parámetros esenciales para la evaluación de este y así realizar caracterización y modelamiento de herramientas de interés para la exploración y explotación.

La descripción geológica minuciosa se basa en determinar el tipo de roca presente en el testigo, así como las fracturas y discontinuidades, sus características primordiales (espaciamiento, abertura, rugosidad, relleno, etc.) y la presencia de agua en esa zona a caracterizar.

Esta descripción consiste en la toma de datos sistemáticos en tramos de sondajes previamente marcados por tacos de perforación, entendiéndose como tramo de sondaje la porción de sondaje considerado donde se incluye la posición de perforación(desde-hasta)

La descripción de las propiedades geotécnicas de las estructuras geológicas encontradas se definió según el espaciamiento, distancia medida entre las discontinuidades de cada familia de fracturas o diaclasas (parámetro 3 Tabla 1), la naturaleza de las discontinuidades (parámetros 4 Tabla 2) y la condición de agua (parámetro 5 Tabla 1)

Siendo la naturaleza de las discontinuidades un parámetro más complejo de descripción debido a los componentes que la forman, se clasifico conforme a lo descrito en Tabla 2.

Las técnicas descritas con anterioridad son utilizadas actualmente para la descripción y cuantificación de parámetros con variables geotécnicas, todas con el fin de visualizar y categorizar en función de técnicas estandarizadas valores que permitan tener una conciencia de la posible magnitud de riesgo latente en un macizo rocoso y así poder determinar un método especial de tratamiento.

Los objetivos que debiera cumplir un sistema de clasificación geotécnica son (Karzulovic y Karzulovic, 1982):

- Ser sencillo y de fácil empleo.
- Los términos utilizados deben ser comunes a geólogos e ingenieros, para así facilitar la comunicación entre estos profesionales.
- Incluir las propiedades más significativas de los macizos rocosos.
- Estar basados en parámetros cuantificables, los cuales pueden ser determinados en terreno de manera fácil y rápida.
- Ser funcional, es decir, a partir de los parámetros se pueda designar un soporte de roca.
- Tener algunos años de uso con buenos resultados prácticos.

La complejidad asociada a problemas geotécnicos donde se requiere información donde no la hay, requiere el uso de nuevas metodologías que son capaces de reducir, de manera considerable, las incertidumbres relacionadas a factores estructurales y geomecánicos, con el fin de minimizar los problemas que podrían surgir del subsuelo.

Varios errores asumidos no sólo en la descripción geotécnica de la porción orientada del sondaje son de vital importancia al momento de caracterizar un macizo rocoso con el fin de proponer una estabilidad en este para una cierta aplicación ingenieril, las variaciones de distancias entre pozos de perforación resultan un inconveniente al momento de la predicción, haciendo una interpolación menos confiable de la variable en estudio. Por lo tanto, el uso de métodos geoestadísticos de simulación puede llevar a una reducción significativa de los errores y costos exploratorios (Doostmohammadi et al., 2014).

Actualmente varios autores e investigadores utilizan estas técnicas con el fin de medir calidad en roca y su comportamiento estructural (fracturas, diaclasas, vetillas, etc.), conjugándolo con otras ramas científicas para precisar en resultados, por lo cual han recomendado el uso de geoestadística para modelar estos parámetros y así evaluar los riesgos asociados a zonas de cierta competitividad.

Ahora bien, la mayoría de las aplicaciones de geoestadística a geotecnia consideran parámetros tales como RQD o RMR o sus componentes (GSI o FF/m) y utilizan técnicas de kriging o simulación condicional basadas en observaciones y mediciones de los parámetros (Van de Wall y Ajalu, 1997; Yoo et al., 1998, 2003; Ayalew et al., 2002; Ozturk y Nasuf, 2002; Marinoni 2003; Ryu et al., 2003; Oh et al., 2004; Hong y Jeon, 2005; Koo et al., 2006; Stavropoulou et al., 2007; Egaña y Ortiz, 2013; Madani y Asghari, 2013; Ferrari et al., 2014; Pinheiro et al., 2016a, 2016b; Santos et al, 2018). En general, estas aplicaciones consideran las variables como continuas, haciendo omisión de la naturaleza discreta de los puntajes que definen, por ejemplo, el RMR.

La presente tesis busca aplicar técnicas de simulación discreta (modelo gaussiano truncado) para ver su potencial en mejorar la simulación condicional de variables definidas por puntajes, como RMR. Otro aporte será considerar la información de las componentes de RMR (puntajes parciales), en lugar del puntaje total, aprovechando las herramientas de geoestadística multivariable, lo cual permitirá tener una información más detallada de la calidad del macizo rocoso.

### III. METODOLOGÍA

La Imagen 6 presenta el procedimiento sintetizado a seguir para llevar a cabo el ejercicio propuesto para un caso de estudio de acuerdo con los objetivos planteados.

El caso de estudio buscar generar un modelo geoestadístico de calidad de roca en un yacimiento mediante la obtención de dos métodos de simulaciones, las cuales utilizan los datos proporcionados directos vs los datos de las variables subyacentes del dato final, y así obtener un modelo geotécnico.

Los pasos se detallan a continuación:

- Revisión de literatura y un estudio crítico de las herramientas y algoritmos a utilizar.
- Análisis preparatorio y exploratorio de datos.
- Análisis de correlación espacial de componentes de variable.
- Enfoque 1: consiste en una simulación directa, considerando el puntaje de RMR como una variable cuantitativa continua y aplicando la simulación tradicional (modelo gaussiano) antes descrita en el apartado de antecedentes bibliograficos.
- Enfoque 2: consiste en una simulación conjunta (cosimulación), considerando el puntaje de RMR como la suma de los diferentes puntajes que lo conforman, por lo que tiene más sentido simular estos puntajes mediante el modelo gaussiano truncado o plurigaussiano, considerando posibles correlaciones entre los puntajes, se aplicará una generalización multivariable del modelo gaussiano truncado, variante del modelo plurigaussiano, propuesta por Emery y Cornejo (2010).
- Validación y comparación de las simulaciones. Se determina el aporte de la simulación al considerarse las variables subyacentes vs la simulación directa de RMR.

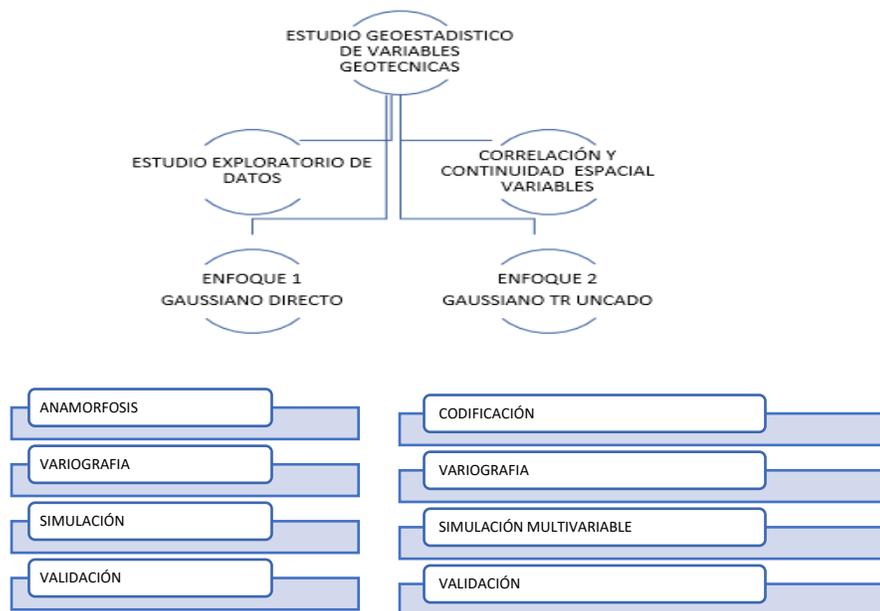


IMAGEN 6 ESQUEMA METODOLOGÍA UTILIZADA

## IV. CASO DE ESTUDIO

### 1. Estudio exploratorio de datos (E.D.A)

El análisis exploratorio de datos (E.D.A.: Exploratory data analysis) es una herramienta para analizar variables por medio de estadísticas y gráficos, técnica definida por John W. Tukey.

Para el desarrollo de la tesis, se cuenta con una base de datos de un yacimiento de tipo skarn cuya identidad y coordenadas exactas se mantendrán confidenciales, divididos a lo largo de 17 columnas correspondientes a 3864 datos con la siguiente información:

- Este-Norte-Cota-Azimut-Dip-Largo: coordenadas geográficas locales, orientación y largo de las muestras;
- Resistencia-RQD-Espaciamiento-Persistencia-Apertura-Rugosidad-Relleno-Alteración-Agua: puntajes parciales subyacentes al cálculo de RMR;
- RMR: Variable puntaje total.

COORDENADAS							VARIABLES SUBYACENTES (RATINGS)									TOTAL
Este	Norte	Cota	Azimut	Dip	Largo	RQD %	Resistencia	RQD	Espaciamiento	Persistencia	Apertura	Rugosidad	Relleno	Alteración	Agua	RMR
5	40	420	345	-55	74.5	5	4	20	10	6	3	1	4	5	15	45
245	50	10	345	-55	8.5	55	12	13	5	2	6	5	2	1	7	83

TABLA 4 EJEMPLO VARIABLES DISPONIBLES (EXTRACTO DE LA BASE DE DATOS)

En un análisis de primera instancia no se observaron datos duplicados. Sin embargo, se identificaron datos con valores no correspondientes a los rangos de cada parámetro, se procedió por lo tanto a borrar aquellos que contenían en sus filas números negativos (-1, -99), teniendo un total de 3752 datos restantes.

#### 1.1. Homogeneidad espacial

Al observar el valor de interés RMR vs Eje de coordenada (Este, Norte) no se observan cambios o quiebres en el comportamiento espacial de RMR, lo que hace viable una hipótesis de estacionaridad sobre la cual basar los modelos geoestadísticos (Imágenes 7-8)

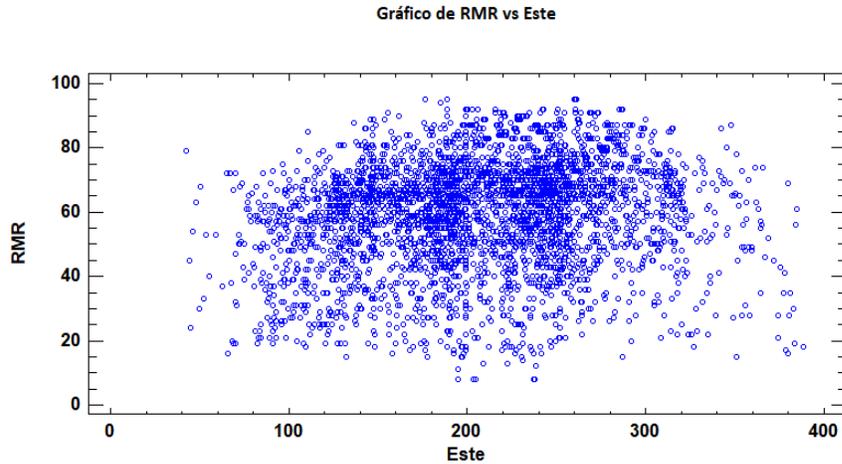


IMAGEN 7 MAPA DE DATOS DE VARIABLE RMR EN EJE X (ESTE)

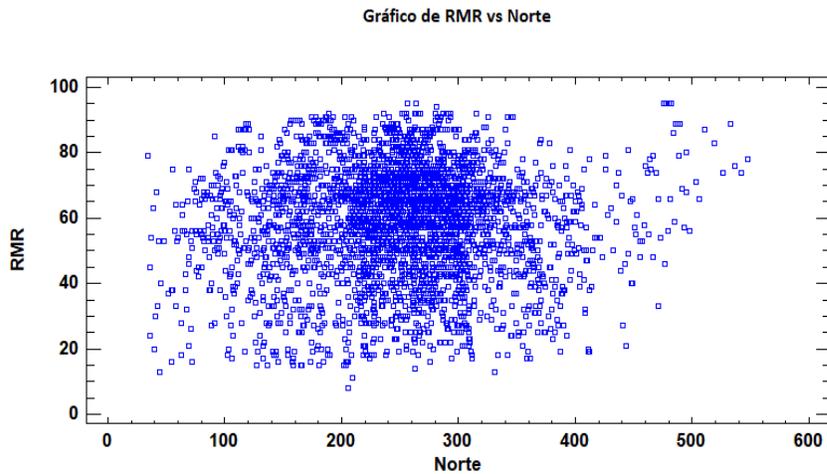


IMAGEN 8 MAPA DE DATOS DE VARIABLE RMR EN EJE Y (NORTE)

## 1.2. Distribuciones estadísticas

El siguiente grafico permite observar las frecuencias de los valores observados de RMR; en este caso se observa que la media corresponde a un puntaje de 59 referente a RMR, el cual clasifica el macizo rocoso en el rating “Regular” próximo al límite del rating “Bueno” Dicho eso, los datos se encuentran en el rango de 8 RMR calidad “Mala”, dato máximo 95 RMR correspondiente a “Muy Bueno” ; un cuartil inferior o primer cuartil del orden de 50 y cuartil superior de 71.

Se pueden observar algunos datos atípicos más no erróneos por debajo de RMR 20.

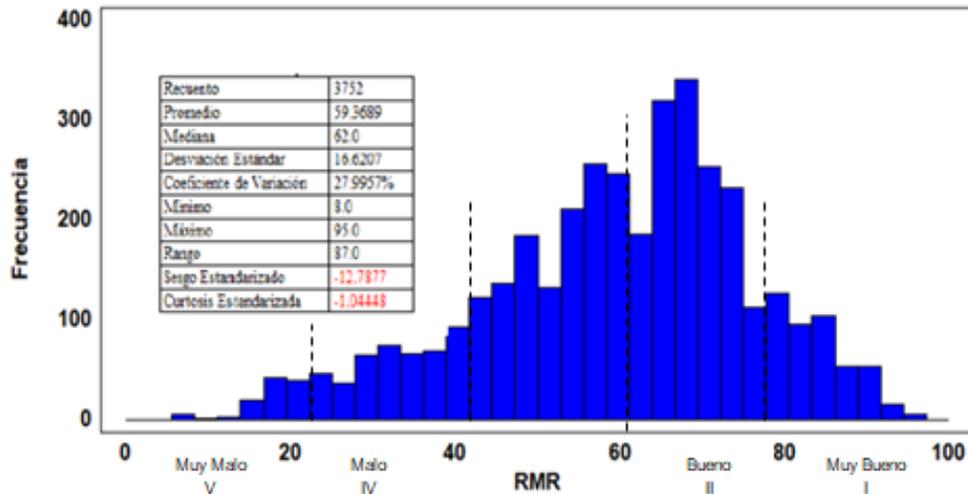


GRÁFICO 1 HISTOGRAMA VARIABLE RMR

El histograma presenta una forma acampanada con poca tendencia asimétrica derecha, lo cual hace referencia a la estadística descriptiva presente, donde la moda equivale al dato más frecuente en los sondeos; RMR 67, y un rango de variación entre datos de 87 así como una distribución de intervalos con mayor predominancia entre los valores 60-75, mostrando una tendencia en calidad de roca clasificada como regular y buena. (Grafico 1).

## 2. Correlación entre variables

En este apartado se visualizan las variables que componen el puntaje total de RMR y estudiamos las correlaciones entre éstas. Se cuenta con 9 variables, que dan el total de un puntaje y calidad de roca. En la Imagen 9 se puede observar la calidad de la roca según Bieniawski (1989) del yacimiento en general.

Las 9 variables (puntajes parciales) que componen el puntaje total de RMR son:

- 1) Resistencia
- 2) RQD
- 3) Espaciamiento
- 4) Persistencia
- 5) Apertura
- 6) Rugosidad
- 7) Relleno
- 8) Alteración
- 9) Agua



RMR

Se observa que la calidad de roca oscila mayormente entre los puntajes “3” y “4”, lo cual corresponde a una calidad regular-buena (Imagen 9).

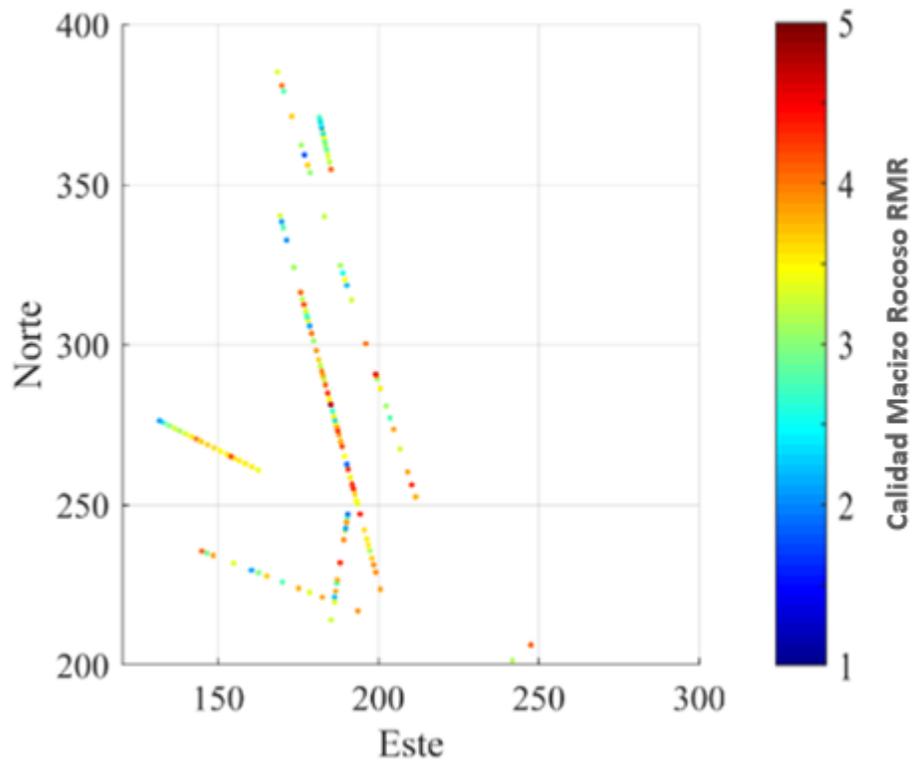


IMAGEN 9 SECCIÓN 2D MAPEO CALIDAD DE ROCA EN EL YACIMIENTO, COTA 75  
 Por razones de confidencialidad se muestra solo una zona restringida de la región con datos

La zona de más baja calidad se encuentra en la zona perteneciente al norte de la grilla de los sondajes tomados, con cotas más someras (cota 10 a cota 100), lo cual es relativo ya que más cercano a superficie se encontrarán suelos, aluvi3n, sedimentos, etc.; materiales m1s disueltos y menos compactados.

Al hacer un an1lisis completo de los sondajes presentes en el yacimiento, se obtuvo que, siendo la variable agua uno de los medios que m1s afecta una roca, se analiz3 el comportamiento de 3sta encontrada en los sondajes, considerando el puntaje "15" como nula presencia de agua y "0" agua fluyendo. Se determin3 que en general los sondajes medidos no se observ3 presencia de agua, mientras que en las pocas zonas donde la variaci3n de agua es h1meda o goteando corresponde a las zonas donde la calidad de roca pertenece a regular o mala (Imagen 10).

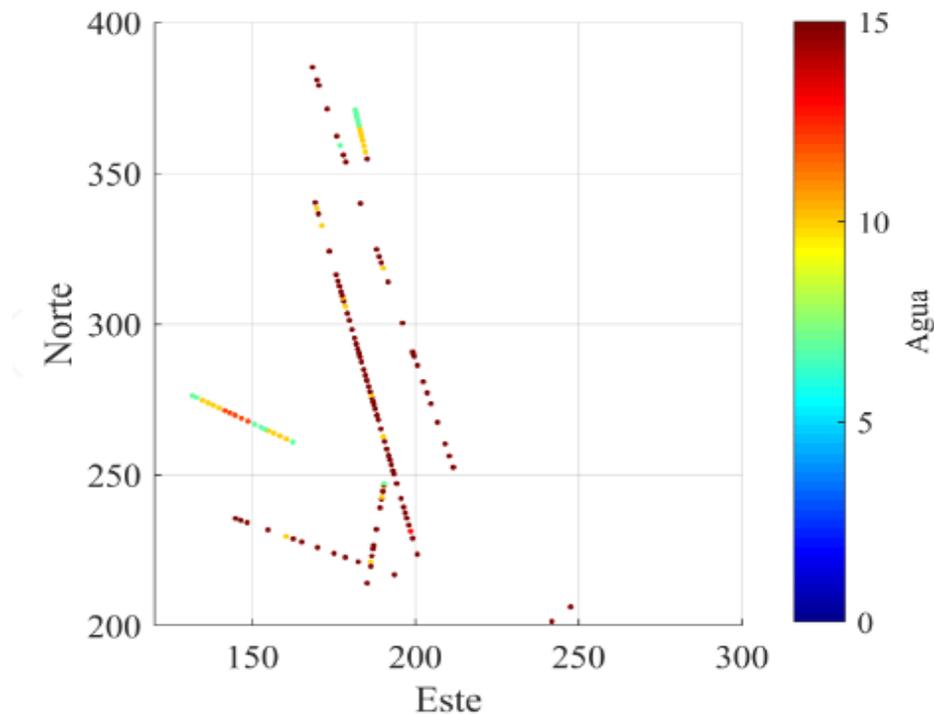


IMAGEN 10 SECCION 2D MAPEO VARIABLE AGUA EN EL YACIMIENTO, COTA 75

Al ajustarse un modelo de regresión lineal para describir la relación entre la variable agua y la calidad de la roca (rating RMR), se obtuvo la siguiente ecuación.

$$\text{Agua} = 4.96369 + 2.14874 * \text{Calidad}$$

ECUACIÓN 5 REGRESIÓN SIMPLE AGUA VS CALIDAD ROCA

Variable dependiente: Agua

Variable independiente: Calidad (rating RMR)

Ambos coeficientes de la regresión son estadísticamente significativos (diferentes de 0) (Tabla 5). En detalle, puesto que el valor-P en la tabla es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre Agua y Calidad roca con un nivel de confianza del 95.0%.

Parametro	Minimos Cuadrados	Estandar	Estadistico	Valor -P
	Estimado	Error	T	
Intercepto	4.963	0.16	30.854	0.0
Pendiente	2.148	0.045	47.566	0.0

TABLA 5 RESULTADOS PARÁMETROS REGRESIÓN LINEAL AGUA VS CALIDAD ROCA RMR

El estadístico R-Cuadrado (coeficiente de determinación) indica que el modelo de regresión explica 37.6% de la variabilidad en Agua. El coeficiente de correlación es igual a 0.61, indicando una relación moderadamente fuerte entre ambas variables.

La siguiente variable considerada para alguna posible correlación será la resistencia a la compresión simple, ya que esta variable es de suma importancia para determinar el esfuerzo al que puede ser sometido un material por medio de la aplicación de una carga axial con control por carga.

Existe a modo general una relación entre resistencia y tipo de roca, según la meteorización a la que ha sido expuesta ésta. Por ejemplo, una roca de composición mafica puede tener una mejor resistencia que una roca de composición arcillosa, la cual al ser expuesta a la meteorización tendrá un mayor desgaste y resistencia.

En el presente estudio se encontró que la variable resistencia maneja los puntajes “0” a “15” siendo clasificados de menor resistencia a mayor resistencia respectivamente.

El yacimiento presente muestra que materiales más superficiales o someros tendrán una calidad o puntaje menor en cuanto a resistencia de este, esto se debe a que las zonas de rompimiento de un sondaje suelen partir de materiales clasificados como suelo, arcillas y/o aluviones. En la imagen 11, se muestra el mapeo de la variable resistencia en el estudio, en cotas someras.

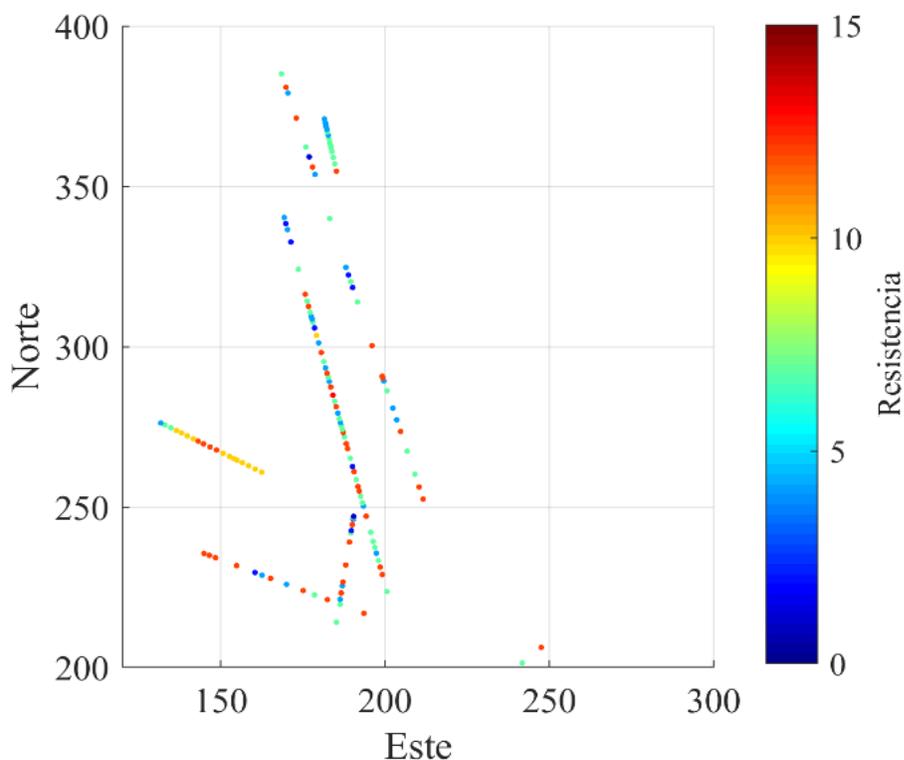


IMAGEN 11 SECCIÓN 2D MAPEO VARIABLE RESISTENCIA EN EL YACIMIENTO, COTA 75

Se puede observar en el gráfico 2 la dispersión de los valores referentes a la variable resistencia en los sondajes del yacimiento en estudio, al ser comparadas las variables resistencia y calidad de roca se observa que los valores más bajos de resistencia están presentes en la zona de calidad regular- mala de la roca.

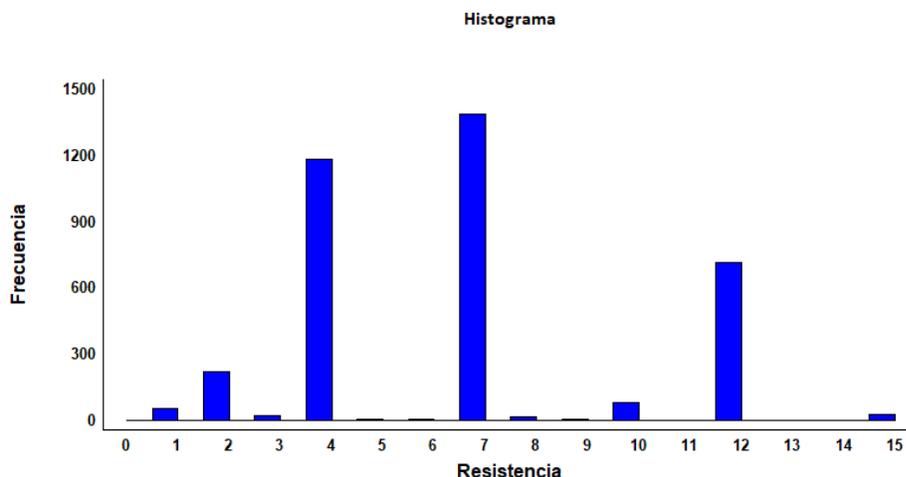


GRÁFICO 2 HISTOGRAMA VARIABLE RESISTENCIA

El valor con mayor frecuencia de datos se encuentra entre 100-50 Mpa de compresión simple, según histograma mostrado en gráfico 2. Se puede asociar la calidad regular - buena presente en el yacimiento con la media de las resistencias de los sondajes, esto sin asociar algún tipo de roca o geología presente, sólo datos geotécnicos del logueo.

Otra de las variables con más posible relación comparativa o interferencia al momento de caracterizar geológicamente la calidad de roca, es el RQD, que mide las fracturas presentes en un determinado largo de una muestra, en este caso en cada tramo tomado de la descripción del sondaje.

El porcentaje de frecuencia con que se repite cada intervalo en los que se divide el RQD se muestra en la siguiente tabla 6, en la cual se observa los parámetros de división entre cada calidad descrita para ese parámetro (muy mala, mala, regular, buena, muy buena).

RQD %		Calidad	Frecuencia	%
0	25	Muy Mala	462	12.313
25.01	50	Mala	494	13.166
50.01	75	Regular	1007	26.839
75.01	90	Buena	841	22.415
90.01	100	Muy Buena	948	25.267

TABLA 6 FRECUENCIA DE INTERVALOS PARÁMETRO RQD EN EL YACIMIENTO

Los intervalos con mayor frecuencia y que representan un más alto porcentaje son los correspondientes a las calidades de roca regular-buena, lo que nos indica una relación entre menor número de fracturas, la calidad de roca seguirá siendo de mejor calidad, lo que geológicamente es más viable, mientras más fracturamiento menor calidad en roca.

Las variables espaciamiento, rugosidad, relleno, alteración se encuentran ligadas a la composición de la roca. Claramente se puede inferir que estas variables proporcionan no solo información geológica en el yacimiento, si no que sirven como guía para la caracterización de la calidad de roca en un contexto no solo minero.

Las imágenes adjuntas en el [anexo A](#) muestran los mapas de cada variable (despliegue de datos en una planta), observándose los sondajes en sus coordenadas y la variación de éstas según la medición tomada. También se adjuntan los histogramas con el fin de observar la frecuencia de cada intervalo y así asociarlo al resultado de calidad de roca.

En el yacimiento en estudio la variable alteración está ligada a la variable agua. Un ejemplo claro, en las zonas con un nivel de alteración de ligero a moderado se hace presente la variable agua con intervalos pertenecientes a goteando a húmedo, las cuales ambas pertenecen a la zona con clasificación de calidad baja de roca en el yacimiento.

Cuando la alteración se encuentra totalmente descompuesta, la variable agua se hace presente con el valor “agua fluyendo”, y la cota va aumentando de profundidad, mientras que, si los valores se invierten siendo esta roca inalterada o ligeramente alterada, la presencia de agua es “nula” o “ligeramente húmeda”, presentándose en profundidades someras, lo cual lo podemos observar en la siguiente tabla.

Cota	Alteración	Estado	Agua	Estado
649.92	0	Descompuesta	7	Humedo
534.89	0	Descompuesta	4	Goteado
121.19	5	Ligeramente alterada	10	Ligeramente Humedo
65.2	5	Ligeramente alterada	15	seco
17.55	6	Inalterada	15	Seco

TABLA 7 RELACIÓN VARIABLES AGUA Y ALTERACIÓN

Al hacer una comparativa de las variables relleno, RQD y calidad de roca, teniendo en cuenta que los parámetros que abarcan el puntaje de relleno comprenden los valores “0” a “6”, siendo el último sin relleno, se observó que la roca presenta una mejor calidad, así como una menor presencia de fracturas en el largo muestreado con valores iguales a “6” (sin relleno).

Mientras el valor RQD comprende los puntajes “3” a “20”, dividiéndolos en segmentos con diferentes calidades y, por lo tanto, cantidades de fracturas, se observó en el yacimiento que sea cualquiera su valor en RQD no comprenden alguna relación en la presencia de rellenos blandos y duros con diferentes espesores, sin interferir la profundidad a la que se encuentran. La variable RQD no está ligada al tipo de relleno

presente, pero si a la calidad de roca en el parámetro RMR, como lo muestra la tabla 8 a continuación.

Cota	Parametro RQD	Estado	Parametro Relleno	Estado	Parametro RMR	Estado
587.03	0	Muy Mala	6	Ninguno	3	Regular
398.11	3	Mala	4	Duro	3	Regular
587.03	0	Muy Mala	6	Ninguno	3	Regular
481.83	3	Mala	6	Ninguno	3	Mala
148.70	20	Muy Buena	4	Duro	3	Excelente
399.89	17	Buena	6	Ninguno	3	Excelente

TABLA 8 RELACIÓN VARIABLES RQD, RELLENO Y RMR.

### 3. Enfoque 1: Simulación directa de RMR (modelo gaussiano)

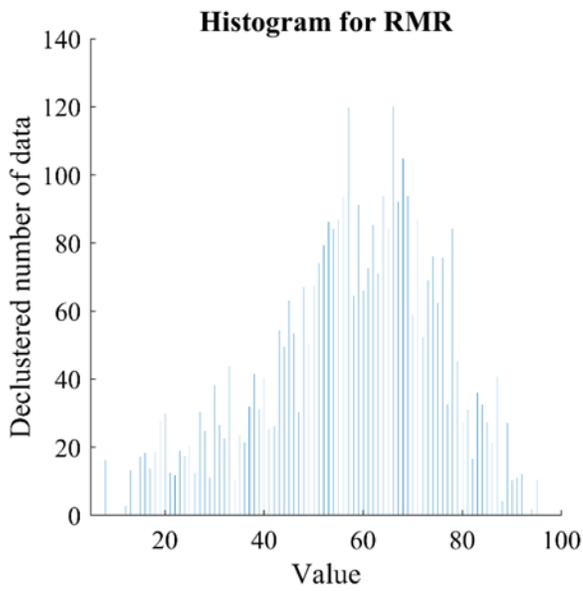
A partir de la obtención de las estadísticas básicas, correlaciones entre variables y un estudio exploratorio de datos se procede a realizar una simulación directa en base al puntaje total de RMR contemplando las actividades mencionadas en el apartado de metodología.

#### 3.1. Desagrupamiento de datos ubicados en el espacio

Para desagrupar datos conforme a la ubicación en el espacio de los sondajes, ya que no se cuenta con una malla regular, se procede a utilizar la herramienta de desagrupamiento por celdas para obtener una distribución representativa del yacimiento. Se elige un tamaño de celda de 40\*40\*40 m<sup>3</sup> compatible con la malla promedio de muestreo.

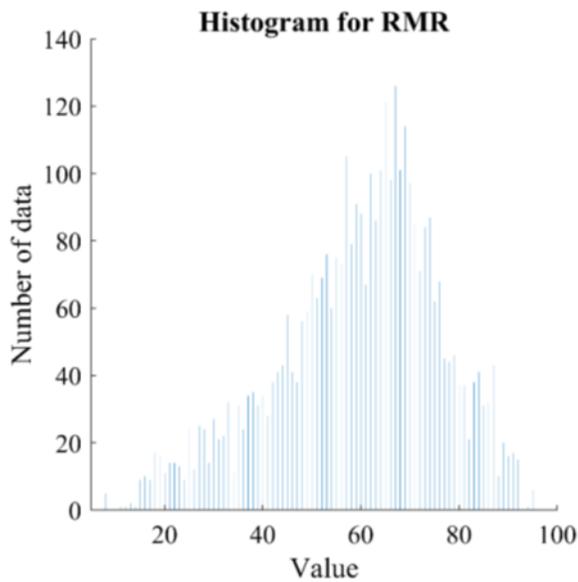
El desagrupamiento corrige la distribución de los datos con cambios leves en las estadísticas, la media baja y la varianza sube, pero ambos parámetros se mantienen cercanos a los valores originales, por lo cual el efecto de desagrupamiento en la distribución de RMR es marginal.

Los gráficos mostrados a continuación muestran las estadísticas de datos desagrupados vs los datos agrupados, se entiende que las medias de ambas mallas se encuentran en la misma categoría, puntaje 59 y 57 respectivamente, representan rocas de calidad regular en promedio, valores muy cercanos a una roca del tipo buena calidad, concluyendo que un desagrupamiento no tiene efecto significativo en la definición de la clasificación del macizo rocoso.



UNIVARIATE STATISTICS( nscore s/declus)	
Statistics for RMR:	
number of data	3752
mean value:	59.369
variance:	276.175
minimum:	8
lower quartile:	50
median:	62
upper quartile:	71
maximum:	95

GRÁFICO 3 ESTADISTICAS DATOS SIN DESAGRUPAMIENTO



DECLUSTERED UNIVARIATE STATISTICS( nscore c/declus)	
Statistics for RMR:	
number of data	37.52
mean value:	57.379
variance:	311.408
minimum:	8
lower quartile:	47
median:	59
upper quartile:	70
maximum:	95

GRÁFICO 4 ESTADISTICAS DATOS CON DESAGRUPAMIENTO

### 3.2. Anamorfosis

La anamorfosis consiste en transformar los datos de la variable en estudio a datos de distribución normal con media 0 y varianza 1. Esto permitirá utilizar el modelo de función aleatoria gaussiana para la simulación del RMR.

Se modela la anamorfosis por una función lineal por parte, en el rango de los datos observados de RMR, y por funciones exponenciales en los extremos (colas) llegando a 0 y 100, respectivamente (Imagen 12).

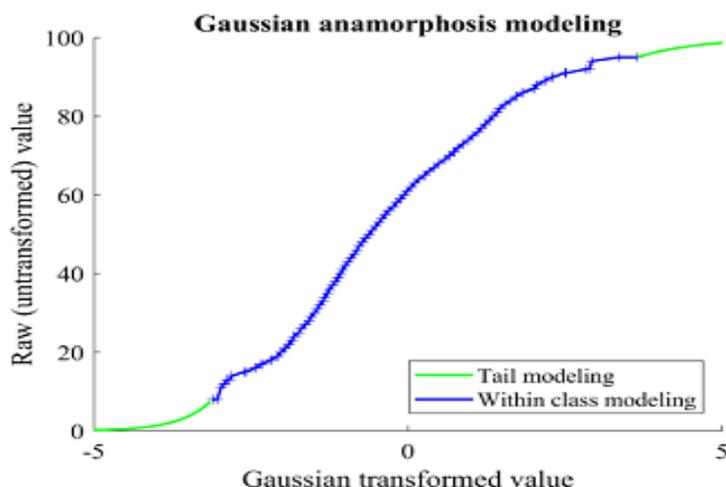


IMAGEN 12 MODELADO DE ANAMORFOSIS GAUSSIANA DE RMR

### 3.3. Análisis variográfico

Se calculó el variograma experimental de los datos gaussianos en las direcciones horizontales y verticales en base a los siguientes parámetros:

DIRECCION	AZIMUT	TOL AZIMUT	DIP	TOL DIP	LAG	# LAG	TOL LAG
1	0	90	0	20	15	18	7.5
2	0	90	90	20	17	15	8.5

TABLA 9 PARÁMETROS VARIOGRAMA EXPERIMENTAL SIMULACIÓN DIRECTA

El variograma se ajustó por medio de un modelo teórico, se realizó con tres estructuras anidadas, siendo el tipo de estructura esférica. Se consideró además un efecto pepita y se ajustó el variograma con los siguientes parámetros.

TIPO	ALCANCE			MESETA
PEPITA	0	0	0	0.437
ESFERICO	30	30	10	0.215
ESFERICO	30	30	150	0.087
ESFERICO	200	200	150	0.338

TABLA 10 PARÁMETROS DE AJUSTE VARIOGRAMA MODELADO SIMULACIÓN DIRECTA

Se llega al ajuste mostrado en la siguiente figura.

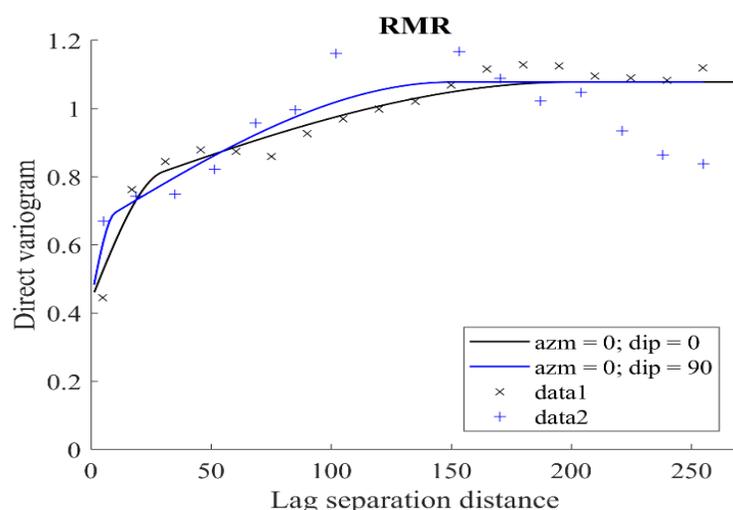


GRÁFICO 5 VARIOGRAMA MODELADO SIMULACIÓN DIRECTA ENFOQUE 1

### 3.4. Simulación y Validación

Para proceder a la simulación se define las dimensiones de la grilla regular (objeto de estudio) y los nodos que se contemplarán para el estudio. Se eligen las coordenadas de inicio 151, 151, 70 (X-Y-Z), con nodos espaciados 1\*1\*1 metros y una grilla de 300\*300\*1 nodo (planta horizontal).

Al tener la grilla, variograma y datos previamente transformados se procedió a realizar una simulación directa por el algoritmo de bandas rotantes (Lantuéjoul, 2002), la cual dio como resultado 100 realizaciones en base a los parámetros antes establecidos. Las simulaciones se condicionaron a los datos gaussianos mediante kriging simple, para lo cual se utilizó una vecindad móvil, con radios de búsqueda en cada dirección de 200\*200\*200 metros con un número óptimo de 30 datos cercanos al blanco.

Antes de simular la grilla, se realizó una validación cruzada, la cual consiste en simular sucesivamente cada dato contemplando solo los datos restantes.

Al obtener en base a esta validación cruzada la nube de correlación entre valores RMR reales y predichos (promedio de los 100 valores simulados en cada dato) se obtiene una regresión cercana a la diagonal, la cual indica una ausencia de sesgo condicional y

una baja dispersión de la nube de puntos (Gráfico 6). En otras palabras, las simulaciones permiten predecir sin sesgo (global o condicional) los valores de RMR en sitios no medidos.

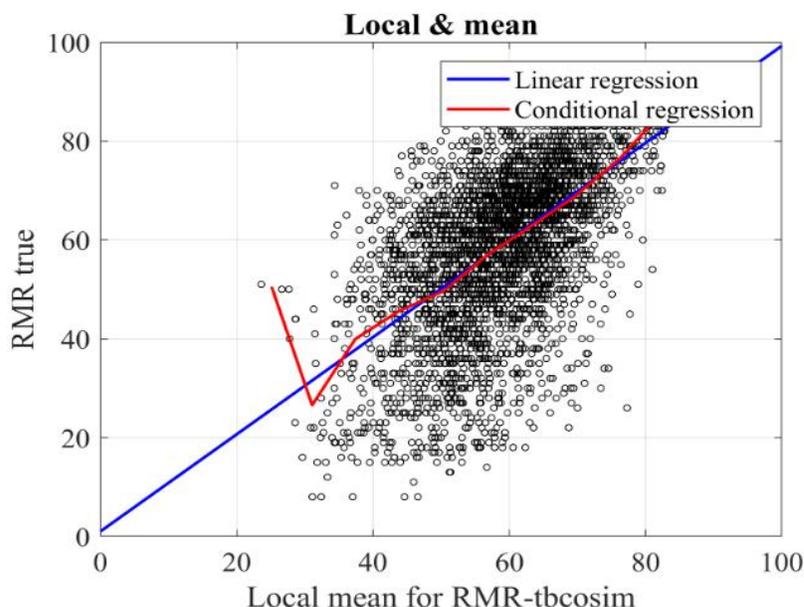


GRÁFICO 6 DISPERSIÓN DE VALORES REALES VS VALORES DE PREDICCIÓN RMR SIMULACIÓN DIRECTA

De acuerdo con las simulaciones efectuadas, la media de las realizaciones en el enfoque 1 se mantienen en el orden de macizo rocoso clasificado en calidad RMR “Regular” y “Buena”, no variando demasiado los porcentajes en las diferentes realizaciones, como lo indica la tabla 11.

RATING	REALIZACIÓN																	
	1	%	5	%	11	%	18	%	24	%	35	%	57	%	67	%	79	%
MUY MALA	78	2.08	78	2.08	79	2.11	72	1.92	79	2.11	78	2.08	76	2.03	75	2.00	79	2.11
MALA	413	11.01	481	12.82	456	12.15	446	11.89	462	12.31	432	11.51	461	12.29	461	12.29	463	12.34
REGULAR	1331	35.47	1247	33.24	1258	33.53	1324	35.29	1273	33.93	1333	35.53	1292	34.43	1281	34.14	1263	33.66
BUENA	1619	43.15	1617	43.10	1627	43.36	1542	41.10	1582	42.16	1545	41.18	1582	42.16	1612	42.96	1611	42.94
MUY BUENA	311	8.29	329	8.77	332	8.85	368	9.81	356	9.49	364	9.70	341	9.09	323	8.61	336	8.96
TOTAL	3752	100.00	3752	100.00	3752	100.00	3752	100.00	3752	100.00	3752	100.00	3752	100.00	3752	100.00	3752	100.00

TABLA 11 PORCENTAJE Y CONTEO DE RATING SEGUN REALIZACIÓN ENFOQUE 1

Respecto a las 100 simulaciones realizadas sobre la grilla de interés, la media en toda la grilla de cada una de ellas se sigue manteniendo según las realizaciones obtenidas vs los datos iniciales registrados, no habiendo gran variación de la media global como se muestra en el siguiente grafico 7 (media en las realizaciones).

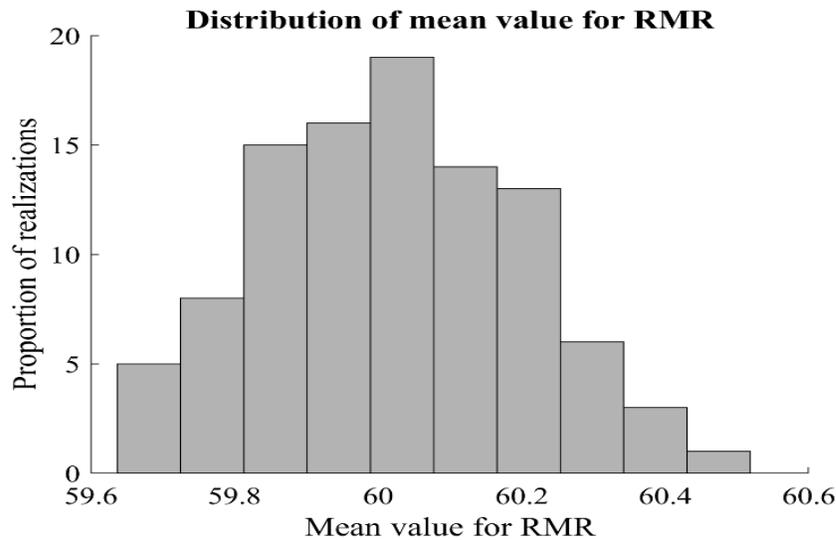


GRÁFICO 7 DISTRIBUCIÓN DE LA MEDIA EN REALIZACIONES RMR ENFOQUE 1

El siguiente grafico muestra que los valores simulados tienen una distribución similar a aquella de los datos medidos, siendo el promedio de las 100 distribuciones de los valores simulados cercano a la distribución experimental de los datos.

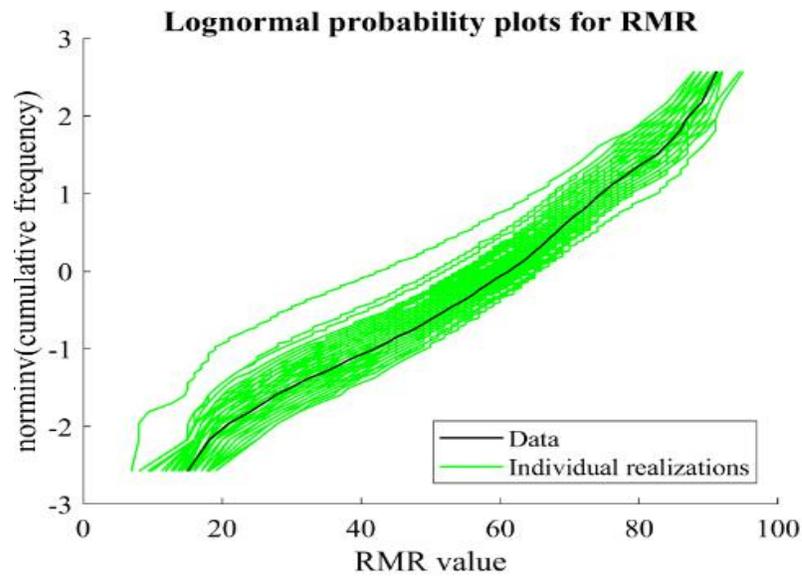


GRÁFICO 8 GRÁFICO DE PROBABILIDAD DE VALORES MEDIDOS (CURVA NEGRA) Y VALORES DE 100 SIMULACIONES DIRECTAS ENFOQUE 1 (CURVAS VERDES)

#### 4. Enfoque 2: Simulación de puntajes parciales (modelo gaussiano truncado)

La siguiente etapa del estudio comprende una cosimulación gaussiana truncada a partir de los valores subyacentes para el puntaje total de RMR.

Las variables en estudio serán aquellas mencionadas en el apartado de metodología, las cuales consisten en las mismas coordenadas de cada punto, pero diferentes ratings según la variable geotécnica. Éstas se considerarán como variables discretas y correlacionadas entre sí.

#### 4.1. Codificación

Partiendo del estudio exploratorio de datos previamente hecho se procede a codificar cada variable subyacente en una variable entera, por lo cual se le asignan valores en escala entera según ratings establecidos para el puntaje total de RMR.

Resistencia	RQD	Espaciamiento	Persistencia	Apertura	Rugosidad	Relleno	Alteración	Agua
Codificación								
15	20	20	6	6	6	6	6	16
12	17	15	4	5	5	4	5	10
7	13	10	2	3	3	2	3	7
4	8	8	1	1	1	2	1	4
	3	5	0	0	0	0	0	0

IMAGEN 13 CODIFICACIÓN DE VARIABLES SUBYACENTES

#### 4.2. Análisis variográfico

Se calcularon los variogramas directos y cruzados de las variables enteras para proceder a ajustar un modelo teórico de correogionalización. Se calcularon los variogramas experimentales en forma omnidireccional, no siendo perceptible ninguna anisotropía en la continuidad espacial de los datos, en base a los siguientes parámetros:

DIRECCION	AZIMUT	TOLAZIMUT	DIP	LAG	#LAG	TOLLAG
1	90	0	90	15	20	7.5

TABLA 12 PARÁMETROS VARIOGRAMAS EXPERIMENTALES, SIMULACIÓN RESULTANTE

El ajuste del modelo teórico se realizó con tres estructuras anidadas descritas en tabla 13, siendo el tipo de estructura utilizado-esférica. Este modelo corresponde a las funciones aleatorias gaussianas, a partir de las cuales se obtienen (por truncamiento) los puntajes discretos cuyos variogramas experimentales han sido calculados, es decir, el ajuste se hace en forma indirecta. Para ello, se utilizan las relaciones matemáticas que relacionan los variogramas de las variables gaussianas con aquellos de las variables truncadas (Emery y Cornejo, 2010).

Se consideró en este modelo un efecto pepita y se ajustó en base a una matriz de 9\*9 variogramas directos y cruzados, obteniendo la variografía mostrada en [anexo B](#)

A continuación, se muestra una ejemplificación de algunos de los variogramas.

TIPO	ALCANCE			MESETA
PEPITA	0	0	0	0.586
ESFERICO	25	25	25	0.044
ESFERICO	50	50	50	0.044
ESFERICO	150	150	150	0.044

TABLA 13 PARÁMETROS DE AJUSTE VARIOGRAMA MODELADO SIMULACIÓN RESULTANTE

Llegando al ajuste mostrado en las siguientes figuras.

Variable	Parametro
V1	RQD
V2	Resistencia
V3	Espaciamiento
V4	Persistencia
V5	Apertura
V6	Rugosidad
V7	Relleno
V8	Alteracion
V9	Agua

TABLA 14 CÓDIGO NOMBRE DE VARIABLES

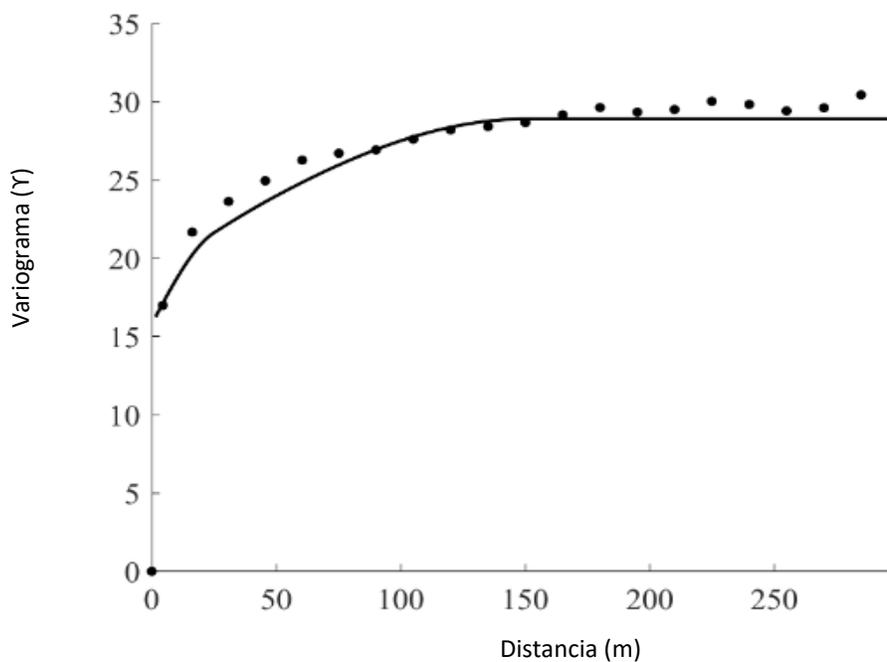


GRÁFICO 9 VARIOGRAMA MODELADO DIRECTO VARIABLE 1 SIMULACIÓN RESULTANTE ENFOQUE 2

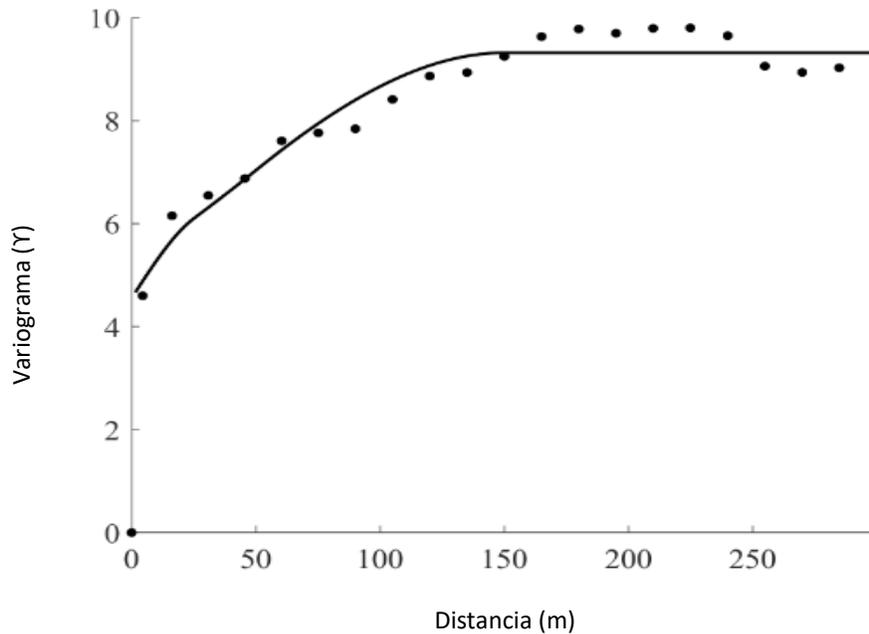


GRÁFICO 10 VARIOGRAMA MODELADO CRUZADO VARIABLE 1 – VARIABLE 2 SIMULACIÓN RESULTANTE ENFOQUE 2

#### 4.3. Simulación y Validación

En esta segunda etapa de la metodología realizada se simuló conjuntamente los puntajes parciales (simulación gaussiana truncada multivariable o plurigaussiana), la cual formula los resultados en base a variables discretas. Las funciones gaussianas se simularon por el algoritmo de bandas rotantes, mientras que el condicionamiento a los datos (discretos) se realizó mediante un algoritmo iterativo conocido como muestreador de Gibbs (Armstrong et al., 2011; Lantuéjoul, 2002).

Antes de simular la grilla, se realizó una validación cruzada y se graficó la nube de correlación entre valores RMR reales y predichos (promedio de los 100 valores simulados en cada dato), obteniendo aquí también una regresión cercana a la diagonal con una baja dispersión de la nube de puntos (Gráfico 11). Esto refleja la ausencia de sesgo global o condicional de las simulaciones, así como la precisión que logra el predictor construido al calcular la media de las simulaciones.

Se utilizó la grilla previamente creada en Enfoque 1, partiendo con las coordenadas de inicio 151, 151, 70 (X, Y, Z) y nodos espaciados 1\*1\*1 metros. Se construyeron 100 realizaciones, condicionadas a los datos originales mediante cookriging simple usando la misma vecindad que en el enfoque 1 (radios de búsqueda de 200\*200\*200 metros y número de datos óptimo de 30).

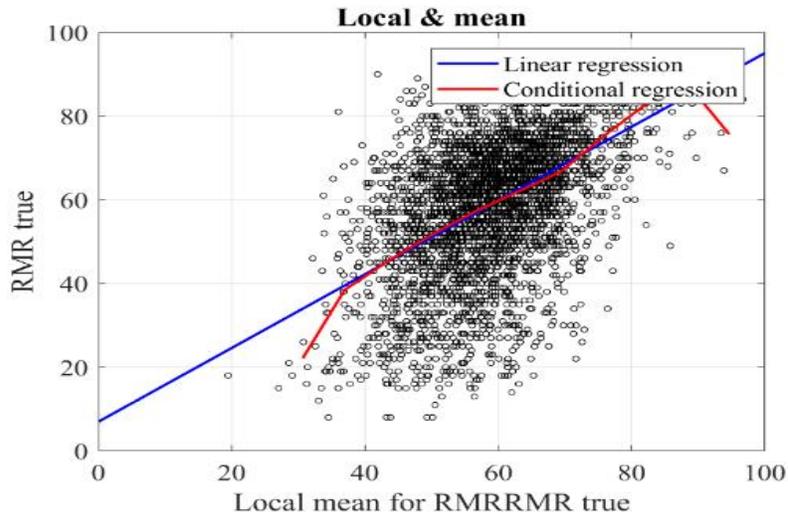


GRÁFICO 11 NUBE DE DISPERSIÓN SIMULACIÓN RESULTANTE (ENFOQUE 2) VS VALORES REALES

Los resultados muestran una buena coincidencia entre la distribución de los valores obtenidos en la simulación resultante vs los datos originales (Gráfico 12), con menos fluctuaciones que en el caso de la simulación directa, en un análisis de la media de las realizaciones se obtuvo que los datos conservan una notable predominancia en los rating pertenecientes a calidad regular y buena de la clasificación del macizo rocoso RMR, el conteo muestra un total de 3290 datos en el límite superior del rating regular y 462 datos en rating bueno.

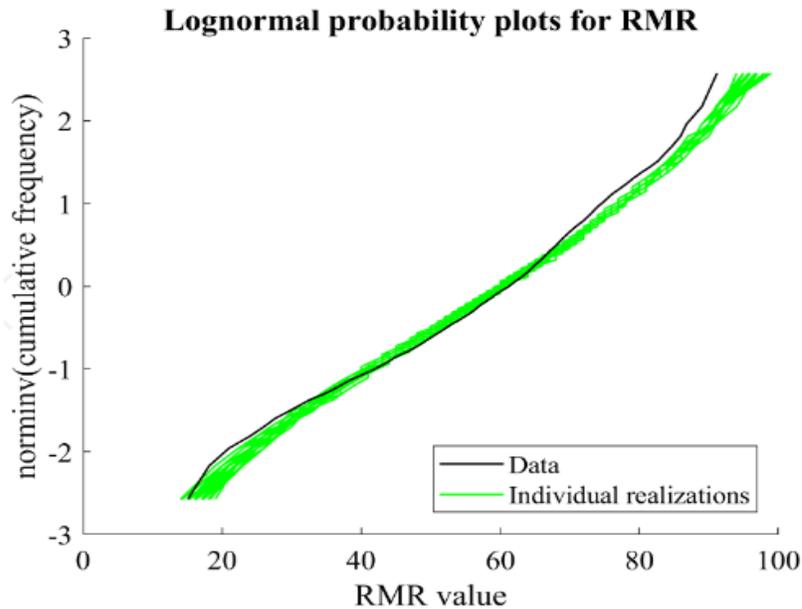


GRÁFICO 12 GRÁFICO DE PROBABILIDAD DE VALORES MEDIDOS (CURVA NEGRA) Y VALORES DE 100 SIMULACIONES RESULTANTES ENFOQUE 2 (CURVAS VERDES)

Respecto a las 100 simulaciones realizadas se obtuvo una media con poca variación en cada realización vs los datos originales, mostrándose en el siguiente grafico

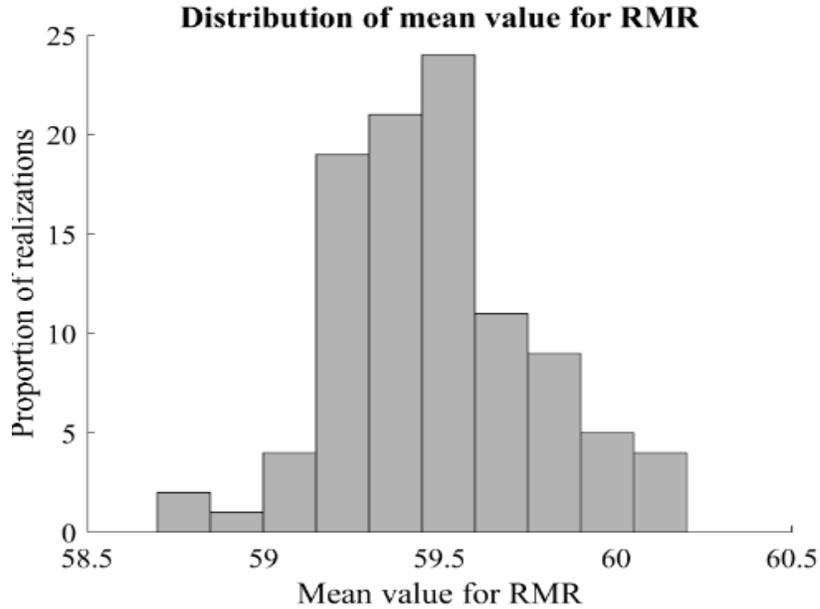


GRÁFICO 13 DISTRIBUCIÓN DE LA MEDIA EN REALIZACIONES RMR SIMULACIÓN RESULTANTE ENFOQUE 2

## 5. Comparación de resultados

Al concluir los enfoques mencionados en la metodología y llegar a simulaciones validadas se procedió a mapear las realizaciones obtenidas en cada etapa y determinar las distribuciones de valores simulados, mostrando las de mayor interés según la variabilidad del mapeo real con el enfoque descrito, detallando cada realización con su correspondiente abreviatura (Realización 1 = RMR-1, Realización 2 = RMR -2, Realización n = RMR- n) logrando lo siguiente.

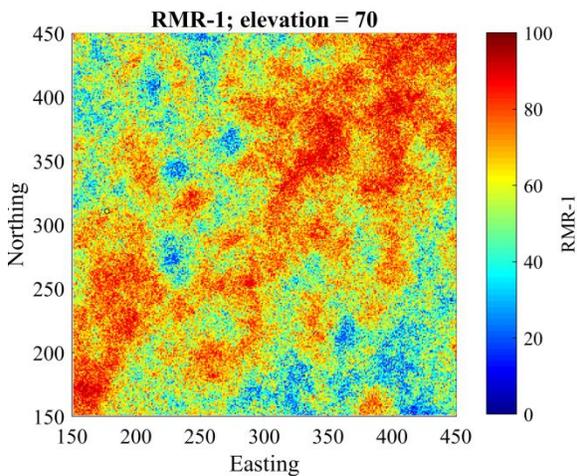


IMAGEN 14 REALIZACION RMR-1 ENFOQUE 1

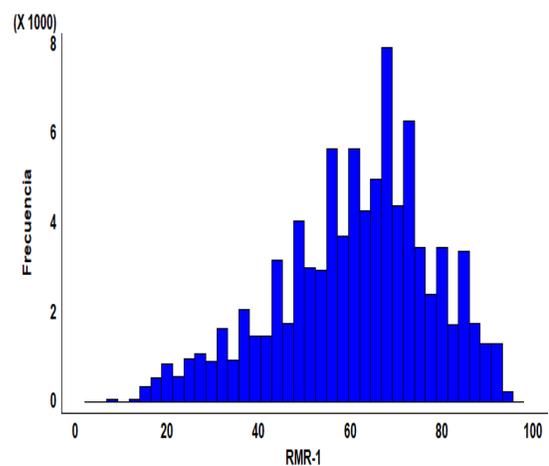


GRÁFICO 14 HISTOGRAMA REALIZACIÓN RMR-1 ENFOQUE 1

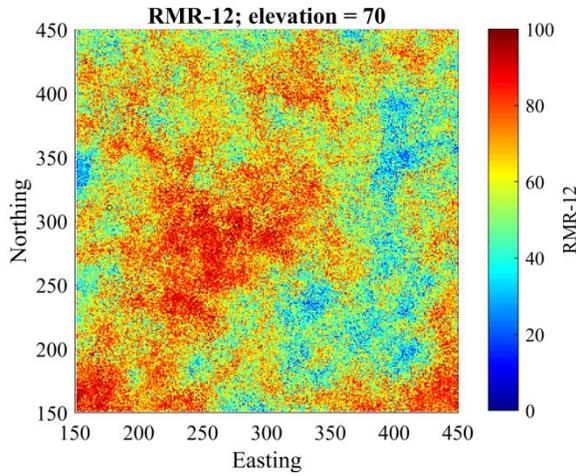


IMAGEN 15 REALIZACIÓN RMR-12 ENFOQUE 2

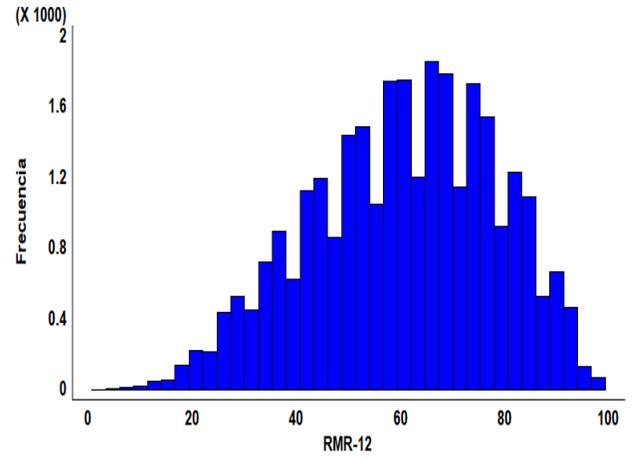


GRÁFICO 15 HISTOGRAMA REALIZACIÓN RMR-12 ENFOQUE 2

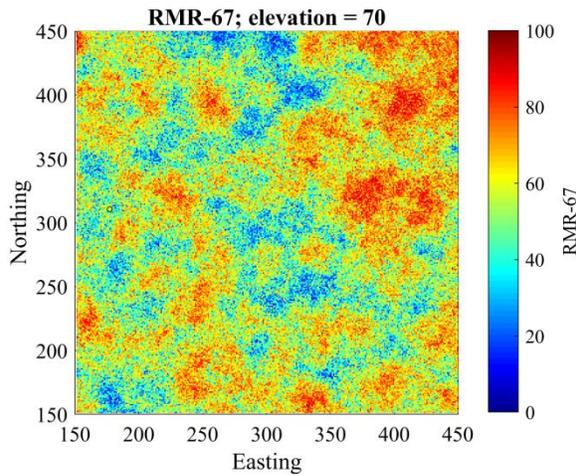


IMAGEN 16 REALIZACIÓN RMR-67 ENFOQUE 1

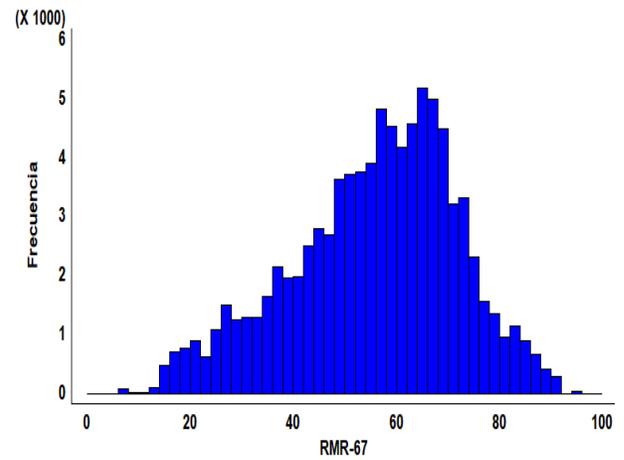


GRÁFICO 16 HISTOGRAMA REALIZACIÓN RMR-67 ENFOQUE 1

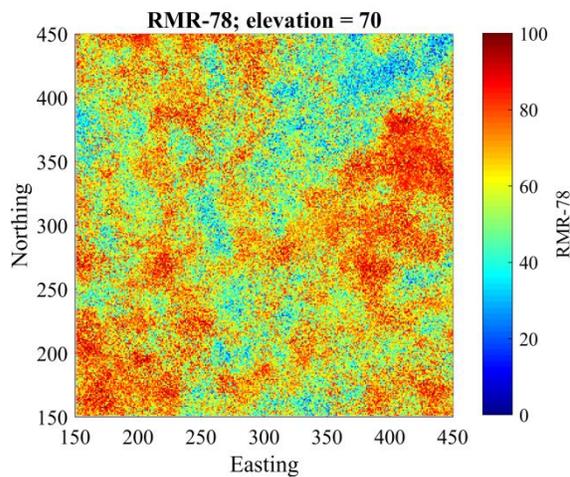


IMAGEN 17 REALIZACIÓN RMR-100 ENFOQUE 2

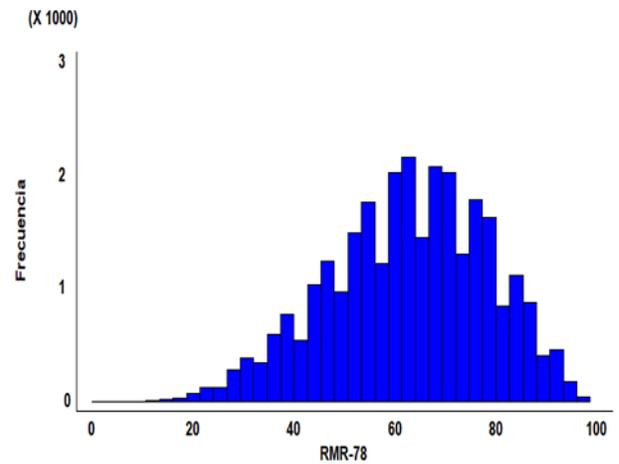


GRÁFICO 17 HISTOGRAMA REALIZACIÓN RMR-100 ENFOQUE 2

En las imágenes 14-15-16-17 se observan semejanzas en las tonalidades que abarcan los puntajes de calidad de roca, siendo el tono amarillo-rojizo los de predominancia en los mapas realizados tanto en el enfoque 1 que comprende la simulación directa del valor de RMR como también en enfoque 2 perteneciente a la simulación resultante de la suma de los valores de las variables que comprenden el puntaje total de RMR.

Las realizaciones obtenidas en cada enfoque comparten una media similar: mientras que en la simulación directa (enfoque 1) el gráfico 14 se muestra un valor promedio de 61.14, en la simulación resultante (enfoque 2) del gráfico 15, el valor obtenido es de 60.68, lo cual no muestra una gran diferencia y en el sentido estricto de clasificar las realizaciones en las ponderaciones establecidas por el sistema de Bieniawski RMR, ambos se encasillan en calidad buena.

Los histogramas de ambas simulaciones muestran una forma de campana, en enfoque 1 con una leve preferencia hacia la derecha, donde se encuentran los valores de calidad regular-buena, mientras que enfoque 2 establece una mayor variabilidad de los valores a lo largo de todo el rango posible de calidad de roca.

En las siguientes imágenes seleccionadas ([anexo C](#)) se puede observar lo antes mencionado, en las simulaciones directas(enfoque 1) se observa una preferencia de calidad de roca o tonalidades marcadas en niveles buenos y en las simulaciones resultantes (enfoque 2) se observa una tonalidades o calidades de roca levemente menores, siendo las de mayor denotación los tonos naranja-rojizos los cuales corresponden a las medias globales de cada realización, como lo muestra gráfico 18.

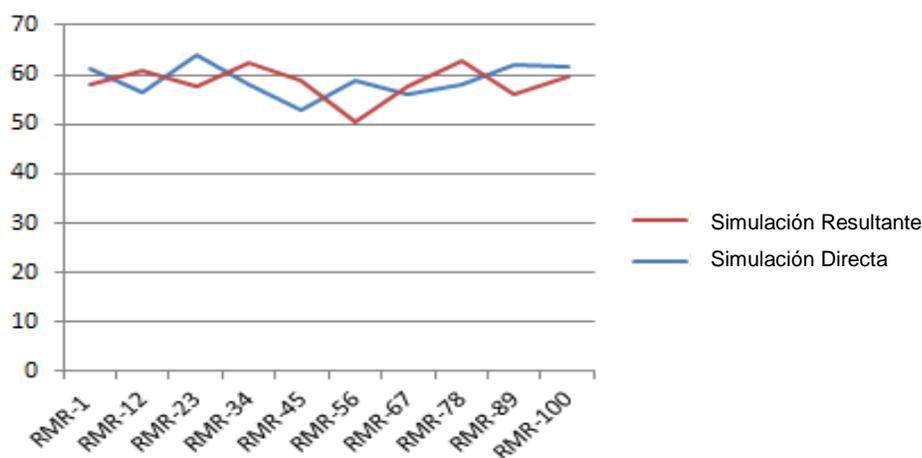


GRÁFICO 18 MEDIA DE SIMULACIONES

Al comparar las medias de las simulaciones en cada enfoque se encuentran sus mínimos en el rango de calidad regular (50 - 53) y sus máximos comparten el rango de calidad de roca buena (63 - 64). A continuación, se muestran los mapas resultantes de la media de las realizaciones de cada enfoque.

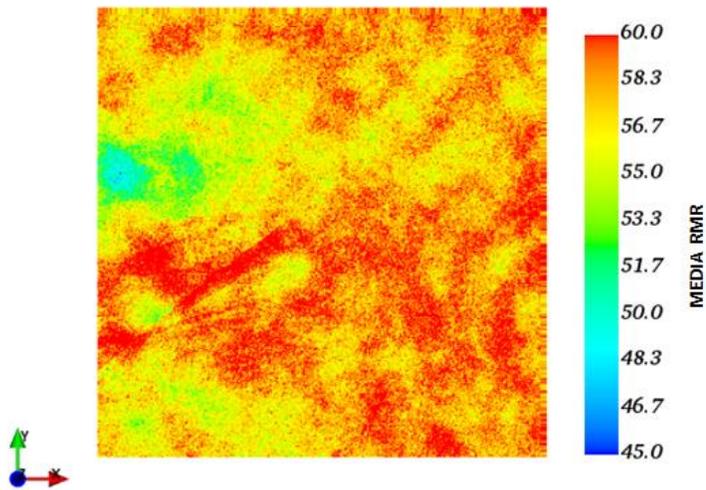


IMAGEN 18 MEDIA DE REALIZACIONES - ENFOQUE 1

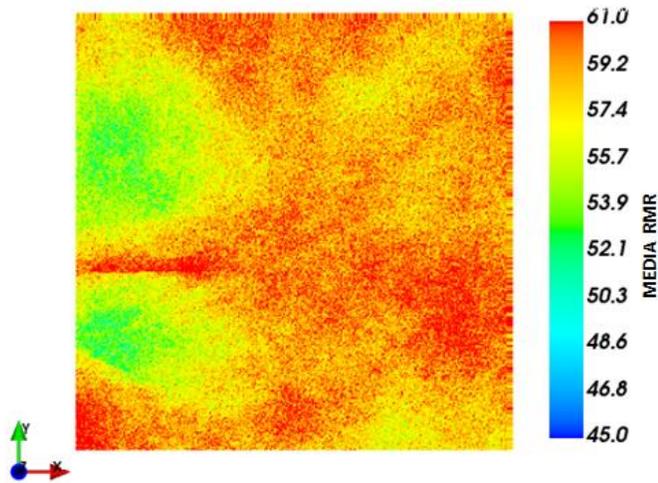


IMAGEN 19 MEDIA DE REALIZACIONES - ENFOQUE 2

Al observar ambos mapas (Imagen 18-19) se obtiene correspondencia entre ellos. Los métodos utilizados indican que la media de las realizaciones se puede usar como predictor de la variable RMR, lo que se corroboró con los ejercicios de validación cruzada descritos en las secciones 3.4 y 4.3.

Teniendo los mapas de las simulaciones se puede calcular la probabilidad de encontrar la variable RMR en alguna clasificación de interés en cualquier punto en el yacimiento. La imagen 20 muestra la probabilidad de que, a la luz de los resultados del enfoque directo (enfoque 1), se cuente con roca de calidad “mala” (RMR puntaje menor a 40) se observa en el sector noroeste la zona donde alberga la roca con menor calidad en parámetros de Bieniawski.

En cambio, la Imagen 21 indica el efecto contrario, zonas donde visualizaremos calidad de roca buena-muy buena (RMR puntaje mayor a 60), presentando un mapa acorde a lo ilustrado en los enfoques 1 y 2 con la media de las realizaciones, no por la escala de colores, sino por la calidad de roca presente en el yacimiento.

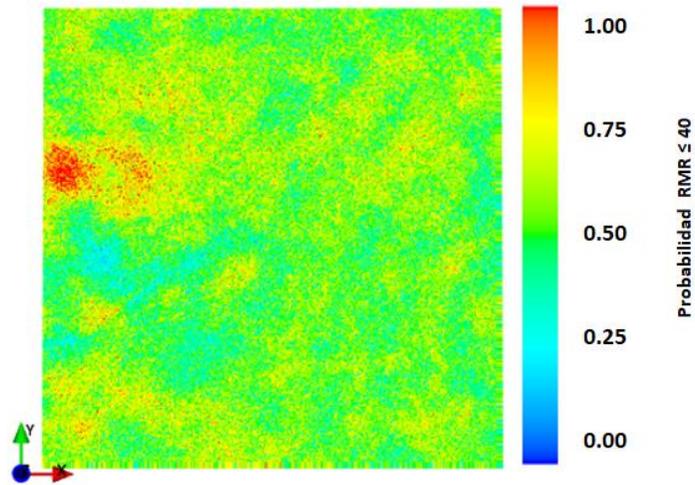


IMAGEN 20 MAPA PROBABILIDAD RMR  $\leq$  40 ENFOQUE 1

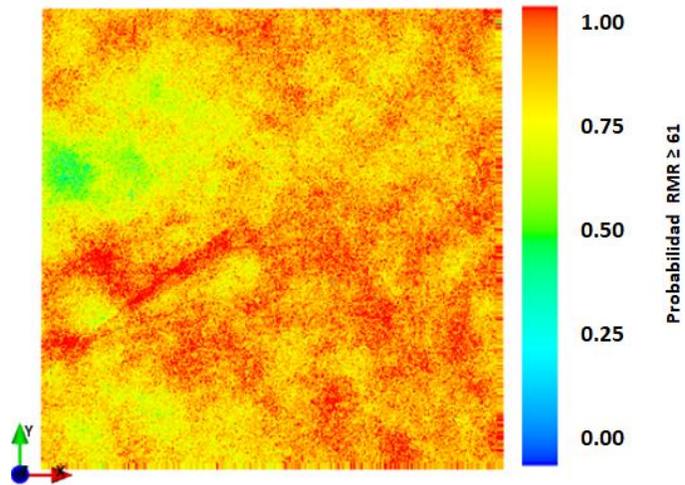


IMAGEN 21 MAPA PROBABILIDAD RMR  $\geq$  61 ENFOQUE 1

Los mapas obtenidos del enfoque 2 difieren poco de los realizados en el enfoque 1. Se pueden observar las mismas zonas con semejanza de los valores de probabilidad.

En particular, el mapa de la imagen 23 indica la probabilidad de reconocer roca de buena calidad, teniendo delimitadas las zonas "Este" con probabilidades altas de puntajes mayores de 61 en RMR.

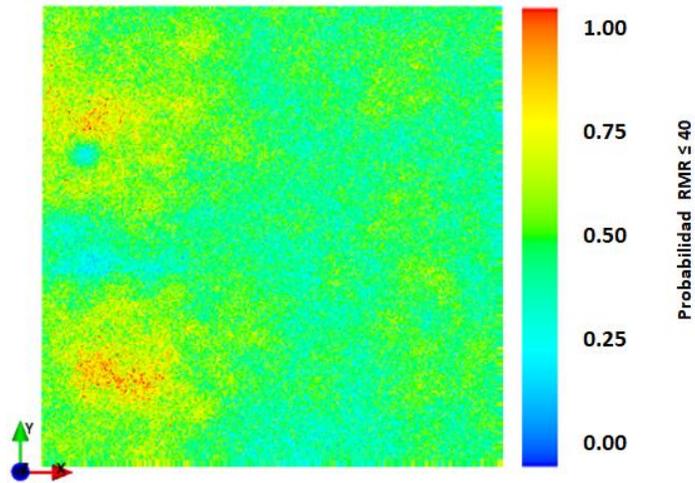


IMAGEN 22 MAPA PROBABILIDAD RMR ≤ 40 ENFOQUE 2

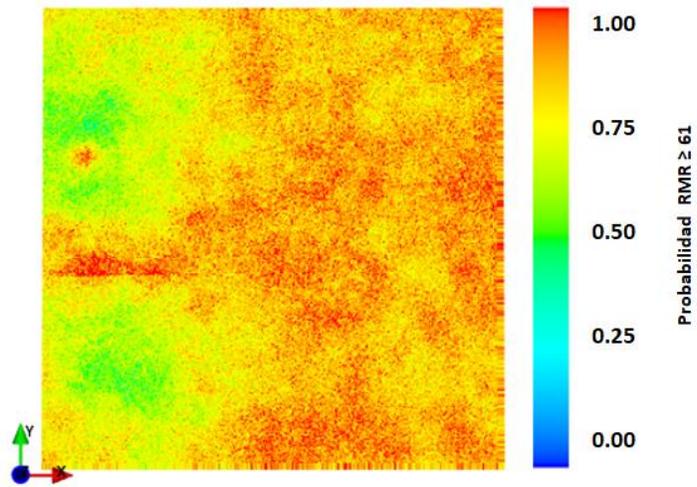


IMAGEN 23 MAPA PROBABILIDAD RMR ≥ 61 ENFOQUE 2

En conclusión, de estos análisis ambos enfoques concuerdan en que el yacimiento presenta mayormente una clasificación entre los puntajes 3 – 4 y 5 (regular, bueno o muy bueno) referentes al sistema calidad de roca (Bieniawski 1989), mostrando una baja probabilidad de roca mala a muy mala ( $< 0.5$ ) en prácticamente todo el dominio simulado.

## V. CONCLUSIONES

La presente tesis generó un modelo predictivo de la clasificación geomecánica de Bieniawski (Rock Mass Rating, RMR 1989) en un macizo rocoso y cuantificó la incertidumbre de esta clasificación mediante simulación geoestadística. Para esto se realizaron mapas con dos enfoques.

Al comparar los mapas de las realizaciones, se observan algunas diferencias entre ambos enfoques. La simulación directa (enfoque 1) entrega distribuciones levemente menos dispersas y con una mayor continuidad a corta escala con respecto a la simulación resultante. Sin embargo, considerando el rango (de 0 a 100) y la dispersión de la variable RMR a modelar, las estadísticas de los errores de validación cruzada son muy similares (tabla 16), no permitiendo establecer la superioridad de uno u otro enfoque en términos de la capacidad de predecir el RMR en sitios no muestreados.

Tomando en cuenta la incertidumbre como el grado de certeza o desconocimiento de una condición, se observó en ambos enfoques errores no significativos que cuantifican las oscilaciones de la media de los datos estimados vs los datos de entrada (originales), en la tabla 16 se presenta un error promedio muy bajo, esto nos indica que, si la media general del enfoque 1 es 58, se interpretara que el resultado estimado  $58 \pm 0.016$  en margen de error.

El error promedio es, entonces, el rango de valores que se encuentran dentro de una desviación estándar se entiende que hay un 95% de probabilidad de que el valor original esté dentro del rango estimado.

Mientras que la raíz del error cuadrático promedio (RMSE) nos indica la diferencia cuadrática entre dos conjuntos de datos comparados, si el resultado sea menor o más pequeño nos muestra que los valores estimados son cercanos a los valores originales, la diferencia en los enfoques realizados nos indica una variación menor a 1 entre ambas estimaciones.

Los errores descritos son formas de cuantificar la distancia o variación entre un valor estimado y el parámetro original, en el presente estudio se muestra una baja oscilación de los valores entre los enfoques utilizados,

ENFOQUE	ERROR PROMEDIO	ERROR ABSOLUTO (MAE)	RAIZ CUADRADA DEL ERROR CUADRATICO PROMEDIO (RMSE)
GAUSIANO	0.016	10.4	13.3
GAUSIANO TRUNCADO	0.119	11.12	14.22

TABLA 15 ESTADÍSTICA DE ERRORES EN SIMULACIONES VS DATOS REALES

Ahora bien, mientras un enfoque utiliza directamente los datos de RMR y sólo entrega resultados del puntaje total, la segunda metodología muestra la información desglosada para cada variable (puntaje parcial) subyacente de la variable RMR. Asimismo, este

segundo enfoque da un resultado como puntaje, no como variable continua, respetando así la naturaleza discreta de las variables estudiadas.

A la vista de los histogramas mostrados en anexo A, se aprecia que la aproximación de los puntajes como variables continuas es poco acertada, lo que podría generar una continuidad artificial en los valores simulados y explicar en parte porqué el enfoque 1 produce mapas levemente más regulares que el enfoque 2. Se puede entonces concluir que el enfoque basado en el modelo gaussiano discreto es más informativo y realista que el enfoque directo, pero requiere un esfuerzo de modelamiento mucho mayor que no se traduce necesariamente en una mejora de la capacidad predictiva del modelo.

## VI. BIBLIOGRAFÍA

- Barton, N Lien, R. y Lunden, J. (1974), Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. Rock Mechanics, Springer Verlag, vol, 6 pp 189 – 236.
- Bieniawski, Z.T. (1989). Engineering Rock Mass Clasifications. John Wiley and sons, Inc.
- Chilès, J.P., Wackernagel, H., Beucher, H., Lantuéjoul, C., Elion, P. (2008). Estimating fracture density from a linear or areal survey. In: Ortiz, J.M., Emery, X. (Eds.), Proceedings of the Eighth International Geostatistics Congress. Gecamin Ltda, Santiago, pp. 535–544.
- Chilès, J.P, Delfiner, P., 2012. Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty, 2<sup>nd</sup> edition. Wiley, New York.
- Deere, D.U. y Deere, D.W. 1988. “The rock quality designation (RQD) index in practice. In Rock classification systems for engineering purposes”, (ed. L. Kirkaldie), ASTM Special Publication 984, 91-101. Philadelphia: Am. Soc. Test. Mat.
- Deere, Don U. 1963, “Technical Description of Rock Core for Technical Purposes”
- Dershowitz, W.S., Herda, H.H., 1992. Interpretation of fracture spacing and intensity. In: Tillerson, J.R., Wawersik, W.R. (eds.), Rock Mechanics. A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 757-766.
- Doostmohammadi, M & Jafari, Ahmad & Asghari, Omid. (2014). Geostatistical modeling of uniaxial compressive strength along the axis of the Behesht-Abad tunnel in Central Iran. Bulletin of Engineering Geology and the Environment.
- Egaña, M. and Ortiz, J., 2013. Assessment of RMR and its uncertainty by using geostatistical simulation in a mining project. Journal of GeoEngineering 8 (3): 83-90.
- Emery & Cornejo 2010 Truncated Gaussian simulation of discrete-valued, ordinal coregionalized variables
- Ferrari, F., Apuani, T. and Giani, G. P., 2014. Rock Mass Rating spatial estimation by geostatistical analysis. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 70: 162-176.
- Hekmatnejad, A., Emery, X., Brzovic, A., Schachter, P., Vallejos, J., 2017. Spatial modeling of discontinuity intensity from borehole observations at El Teniente mine, Chile. Engineering Geology 228: 97-106.
- IGME (1987). Manual de Ingeniería de Taludes. Capítulo 5: Caracterización Geotécnica de materiales, pp 117- 152.
- Karzulovic J. y Karzulovic A. 1982. Algunos comentarios sobre la clasificación geotécnica de rocas. Memorias Primer Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica. Vol. I. Santiago.
- Lantuéjoul, C., 2002. Geostatistical Simulation: Models and Algorithms. Springer, Berlin.
- Madani, N. and Asghari, O., 2013. Fault detection in 3D by sequential Gaussian simulation of Rock Quality Designation (RQD). Arabian Journal of Geosciences 12 (10): 3737-3747.

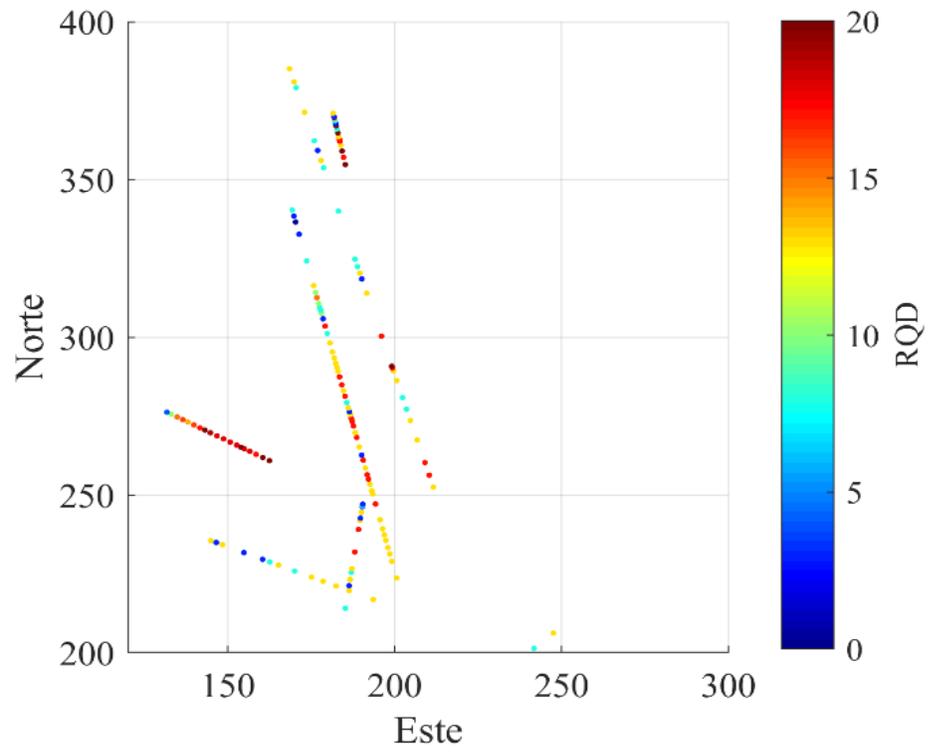
- Oh, S., Chung, H. and Kee Lee, D., 2004. Geostatistical integration of MT and boreholes data for RMR evaluation. *Environmental Geology* 46: 1070-1078.
- Ozturk and Nasuf, 2002; Ryu et al., 2003; Oh et al., 2004; Stavropoulou et al., 2007; Egaña and Ortiz, 2013; Madani and Asghari, 2013; Ferrari et al., 2014; Pinheiro et al., 2016a, b; Santos et al., 2018
- Ozturk, C. A. and Nasuf, E., 2002. Geostatistical assessment of rock zones for tunneling. *Tunneling and Underground Space Technology* 17: 275-285.
- Pinheiro, M., Emery, X., Miranda, T. and Vallejos, J., 2016a. Truncated Gaussian Simulation to Map the Spatial Heterogeneity of Rock Mass Rating. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 49(8): 1-6. doi: 10.1007/s00603-016-0928-x.
- Pinheiro, M., Vallejos, J., Miranda, T. and Emery, X., 2016b. Geostatistical simulation to map the spatial heterogeneity of geomechanical parameters: A case study with rock mass rating. *Engineering Geology* 205: 93-103. doi: 10.1016/j.enggeo.2016.03.003.
- Ryu, D. W., Kim, T. K. and Heo, J. S., 2003. A study on geostatistical simulation technique for the uncertainty modelling of RMR. *Tunnel and Underground* 13: 87–99.
- Sánchez, L.K., Emery, X., Séguret, S.A., 2019. 5D geostatistics for directional variables: application in geotechnics to the simulation of the linear discontinuity frequency. *Computers & Geosciences* 133, artículo 104325
- Santos, V., Da Silva, P.F., Brito, M.G., 2018. Estimating RMR values for underground excavations in a rock mass. *Minerals* 8(3): 78.
- Séguret, S.A., 2016. Fracturing, crushing and directional concentration. *Mathematical Geosciences* 48(6): 663-685.
- Séguret, S.A., Emery, X., 2019. Géostatistique de Gisements de Cuivre Chiliens : 35 Années de Recherche Appliquée. Presses des Mnes, Paris.
- Séguret, S.A., Guajardo, C., 2015. Geostatistical evaluation of rock quality designation & its link with linear fracture. In: Schaeben, H., Tolosana Delgado, R., van den Boogaart, K.G., van den Boogaart, R. (eds.) *Proceedings of IAMG 2015 - 17th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geosciences*. Curran Associates, Red Hook, NY, pp. 1043-1051.
- Séguret, S.A., Guajardo, C., Freire, R., 2014. Geostatistical evaluation of fracture frequency and crushing. In: Castro, R. (ed.) *Proceedings of the 3rd International Symposium on Block and Sublevel Caving*. Universidad de Chile, Chile, pp. 280-288.
- Stavropoulou, M., Exadaktylos, G. and Saratsis, G., 2007. A combined three-dimensional geological-geostatistical numerical model of underground excavations in rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 40 (3): 213-243.
- Wackernagel, H., 2003. *Multivariate Geostatistics: an Introduction with Applications*. Springer, Berlin.

## ANEXOS

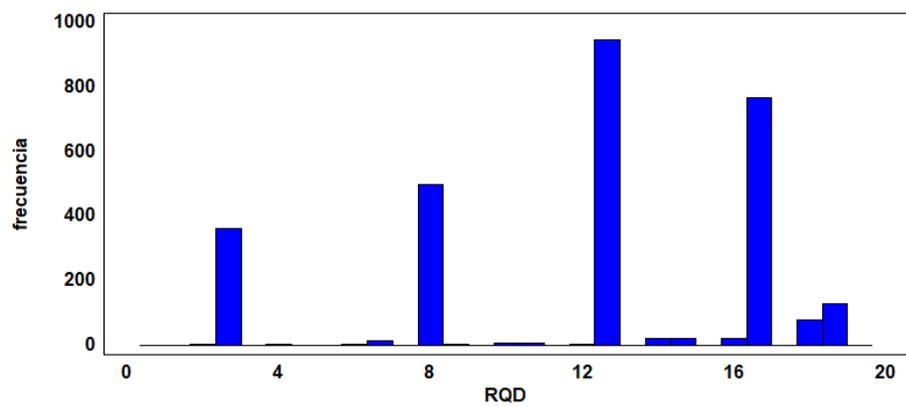
- ANEXO A

Despliegue de datos de variables (vista 2D).

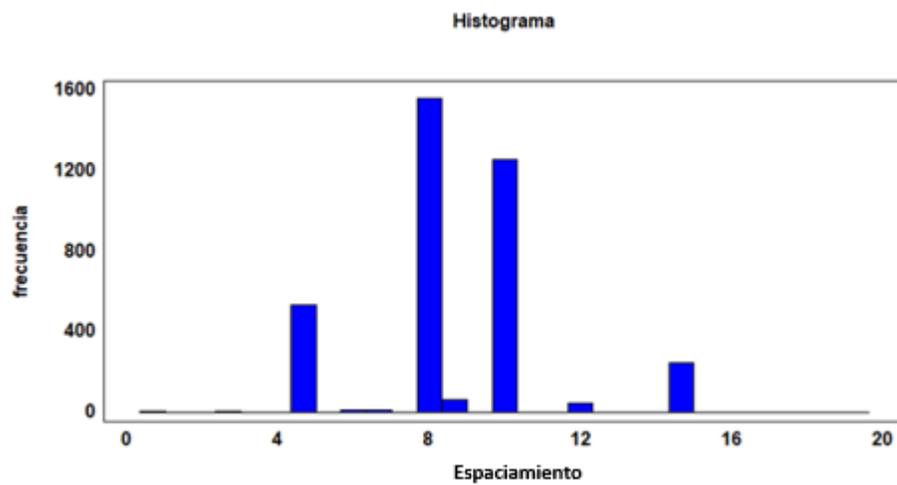
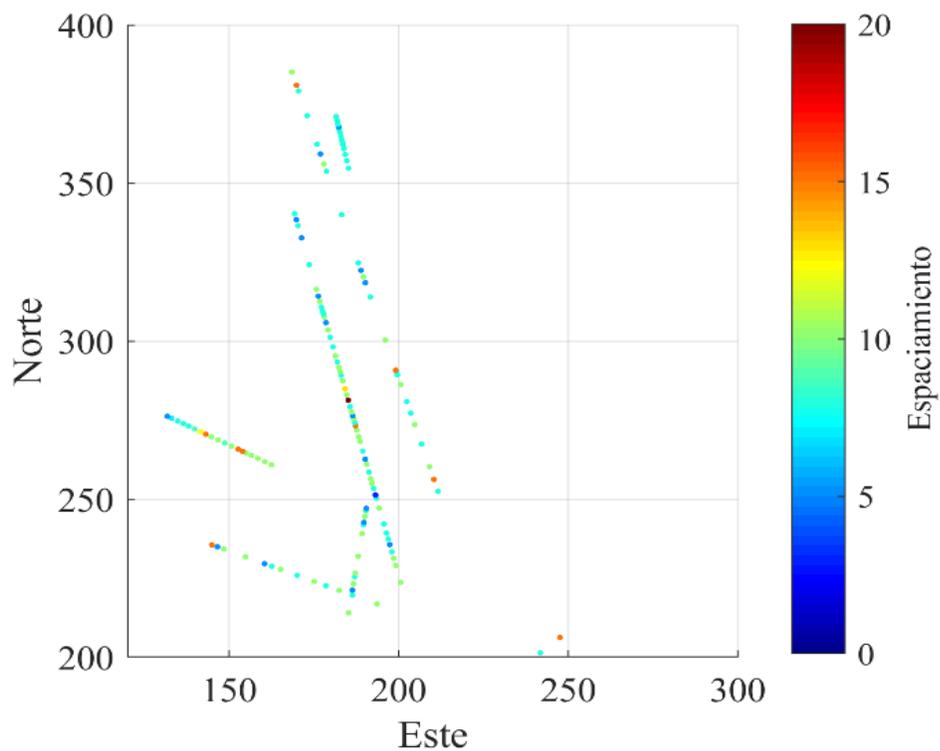
### RQD



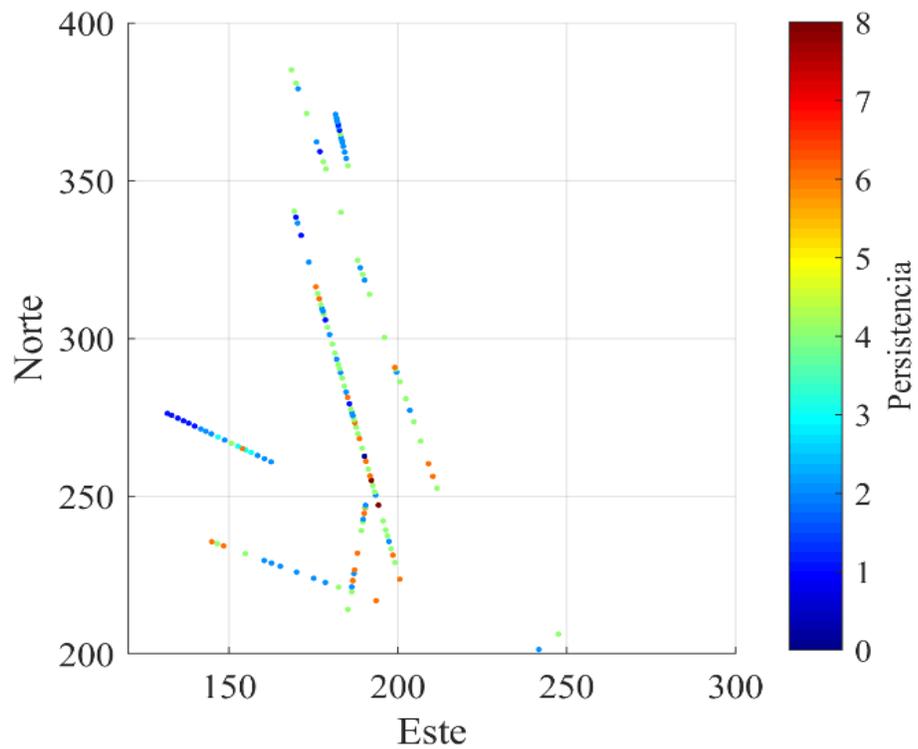
Histograma



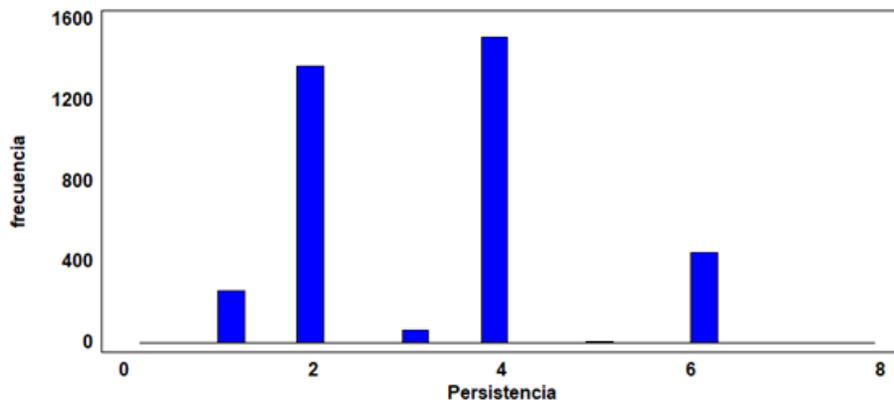
# ESPACIAMIENTO



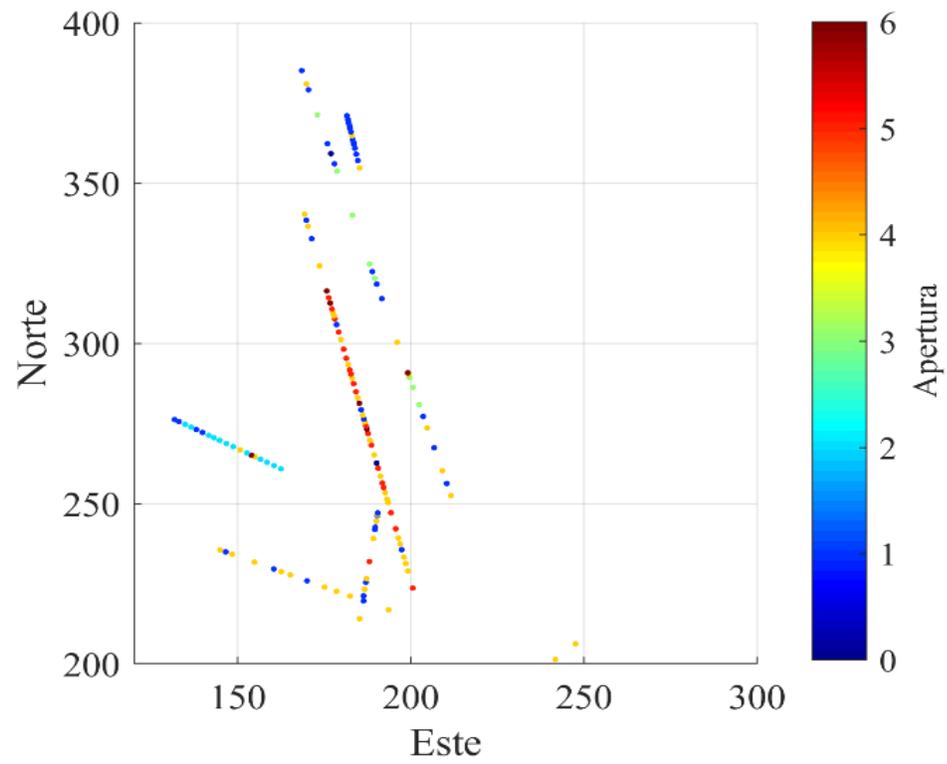
# PERSISTENCIA



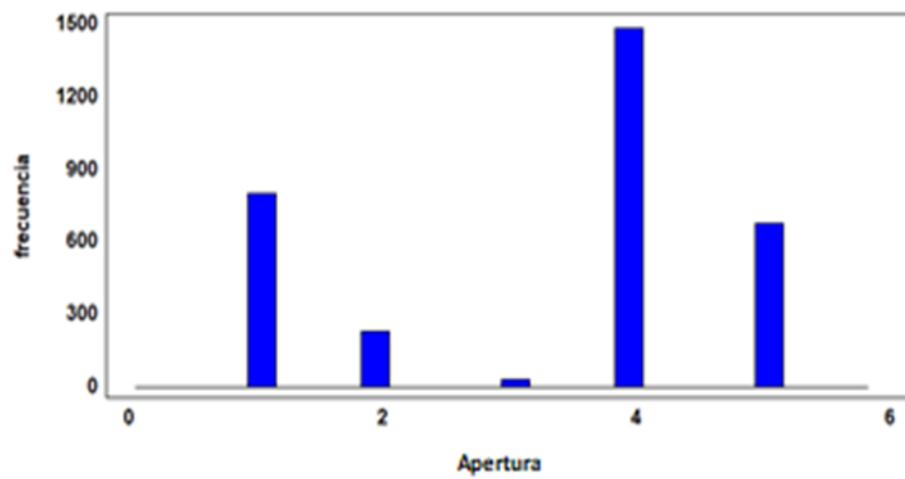
Histograma



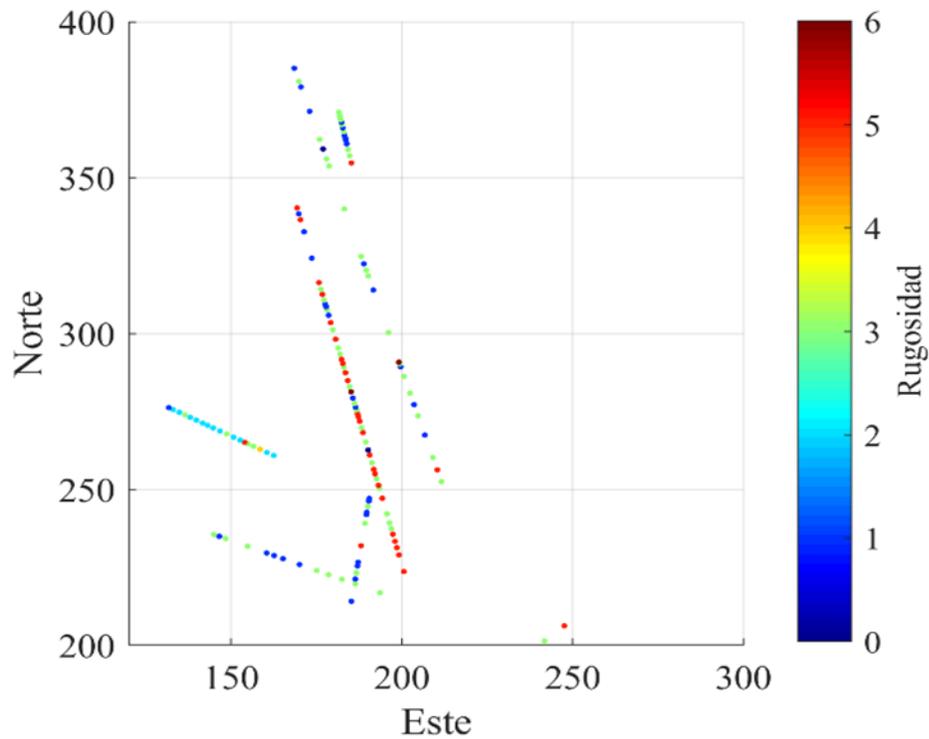
# APERTURA



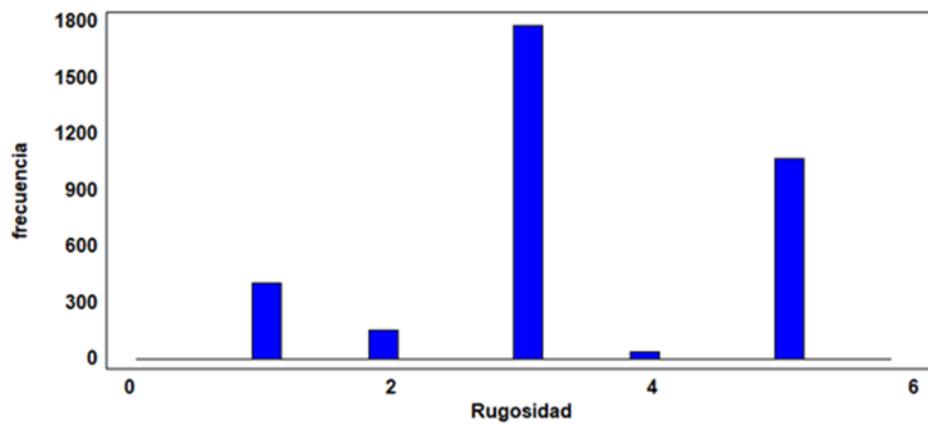
Histograma



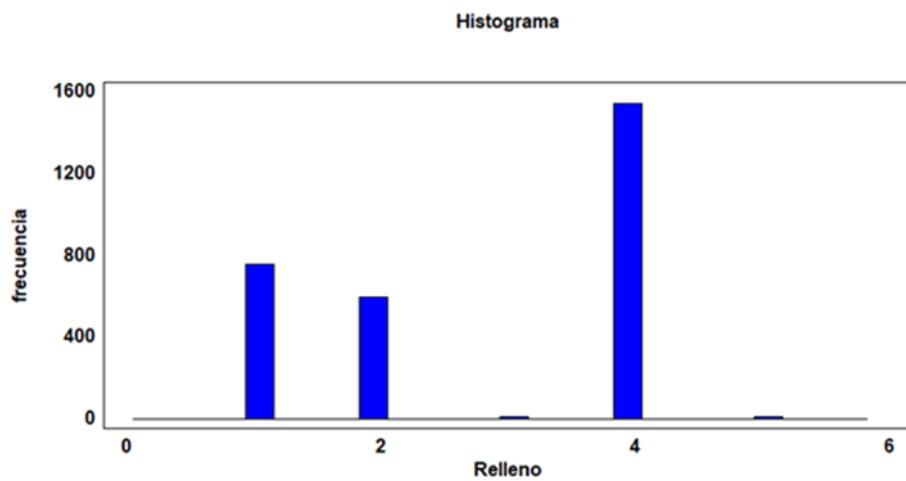
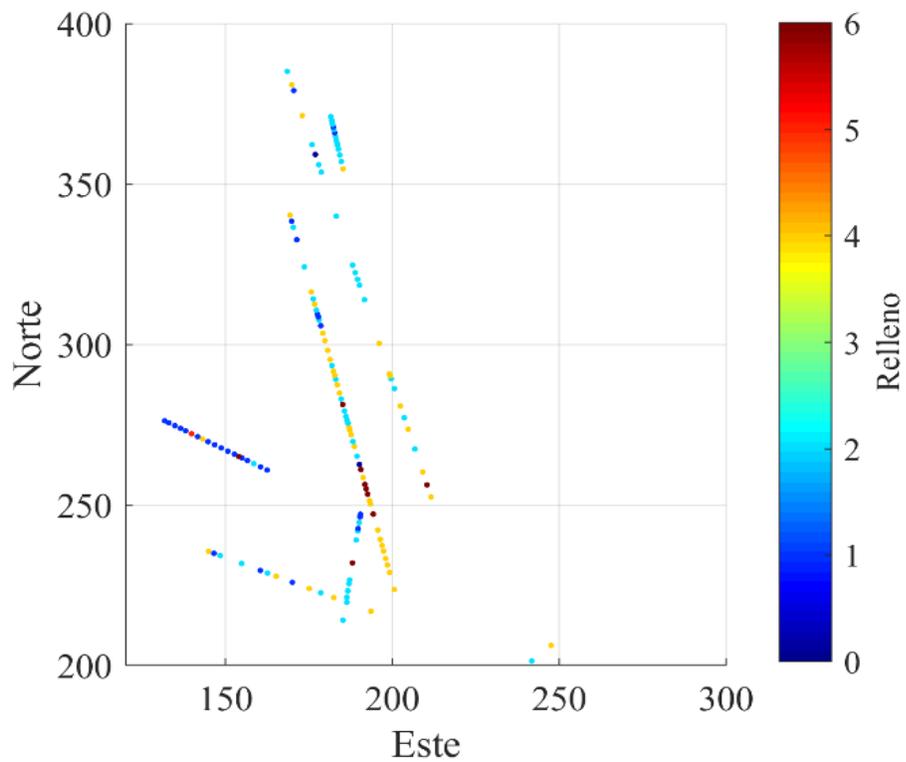
# RUGOSIDAD



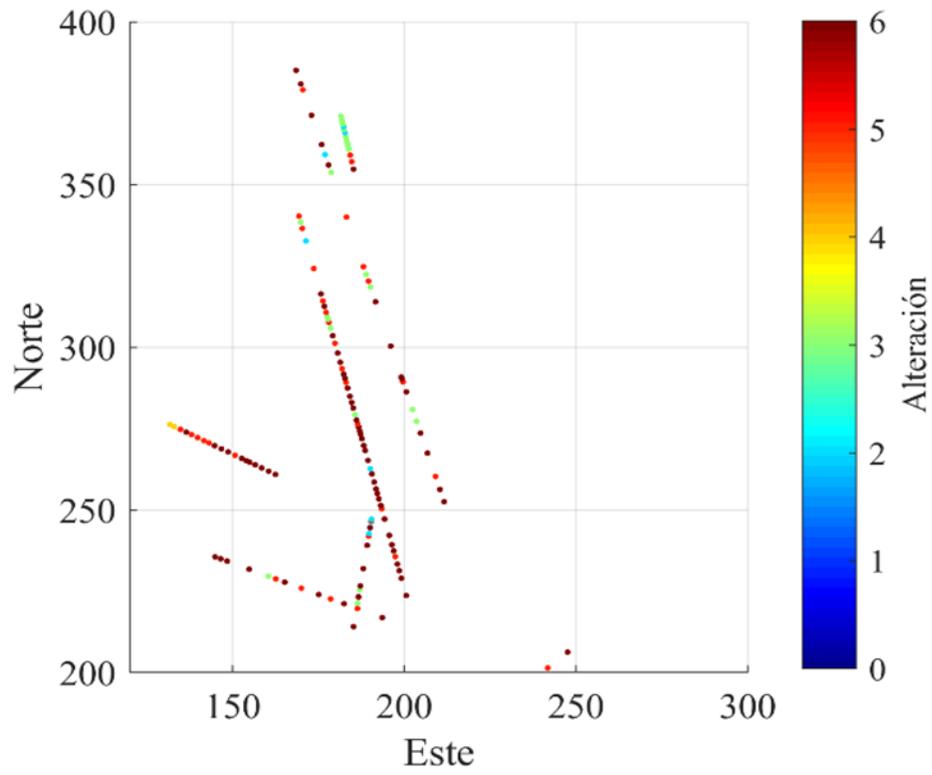
Histograma



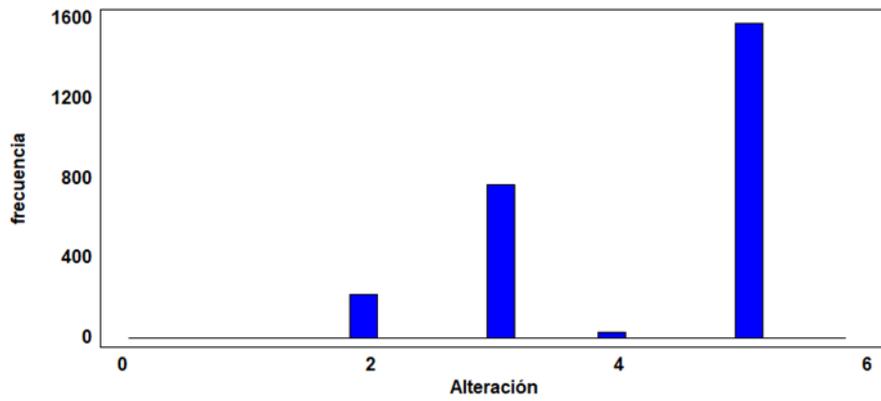
# RELLENO



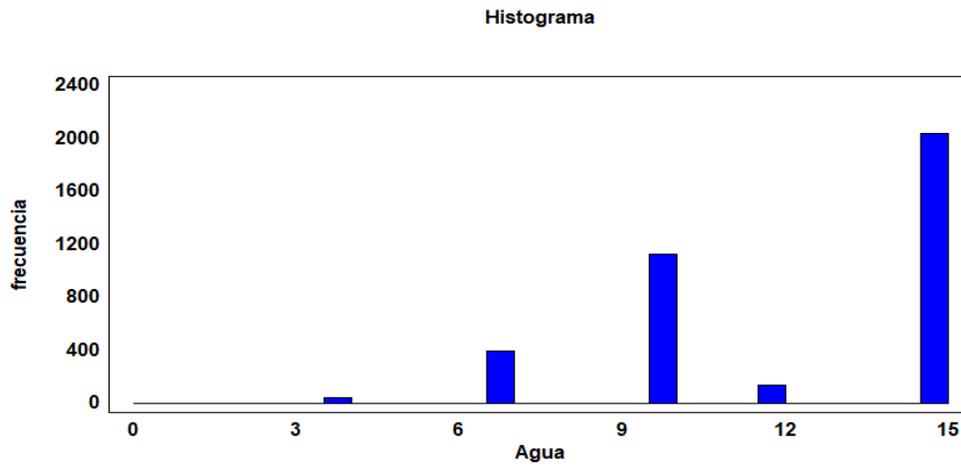
# ALTERACIÓN



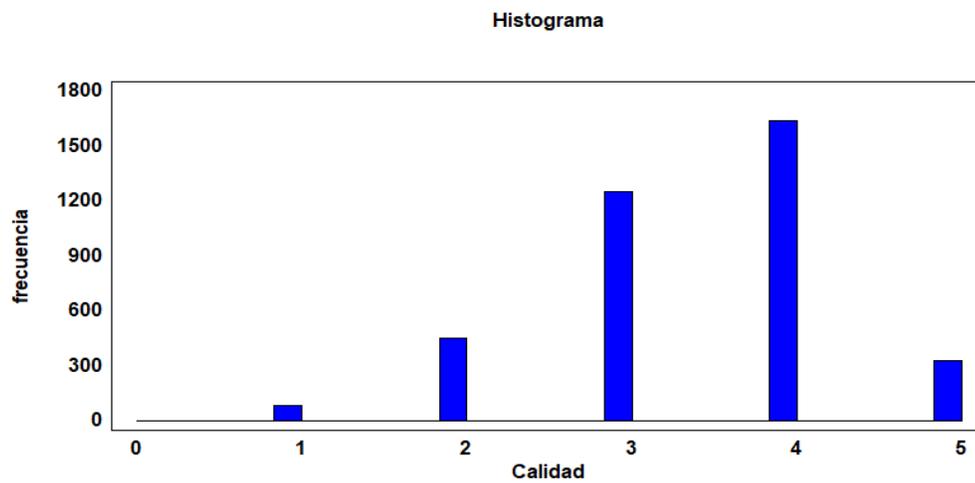
Histograma



## AGUA



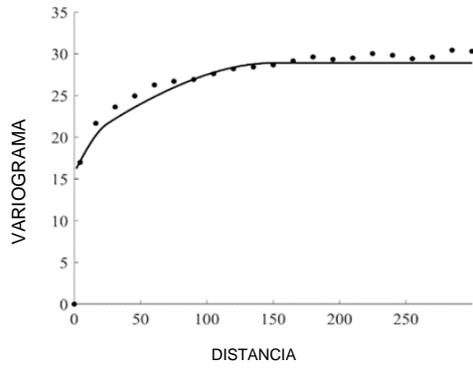
## CALIDAD ROCA (RMR)



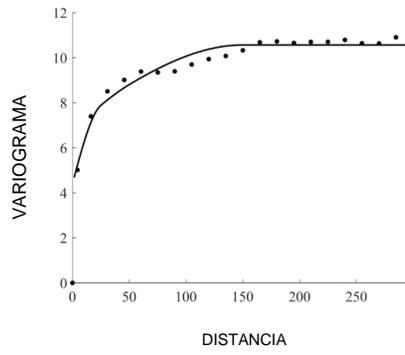
- ANEXO B

Variogramas directos y cruzados enfoque 2: Simulación de puntajes parciales (modelo gaussiano truncado)

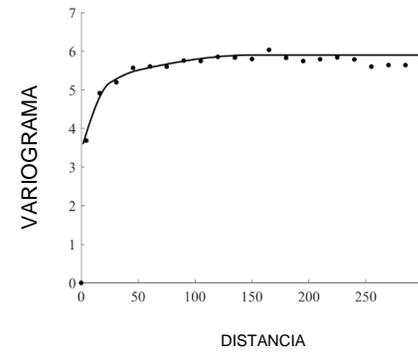
Variable	Parametro
V1	RQD
V2	Resistencia
V3	Espaciamiento
V4	Persistencia
V5	Apertura
V6	Rugosidad
V7	Relleno
V8	Alteracion
V9	Agua



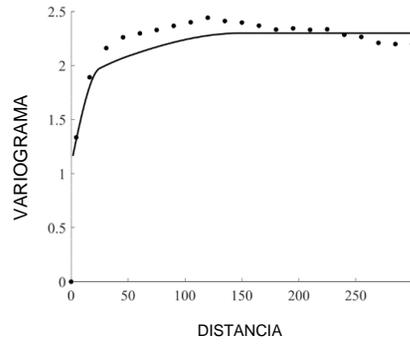
**Variograma Directo V1-V1**



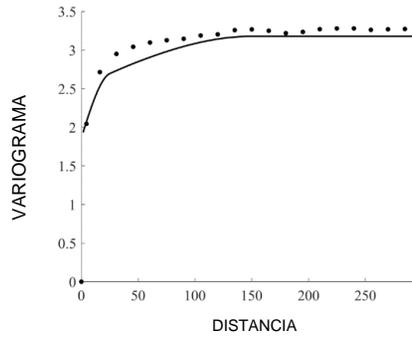
**Variograma Directo V2-V2**



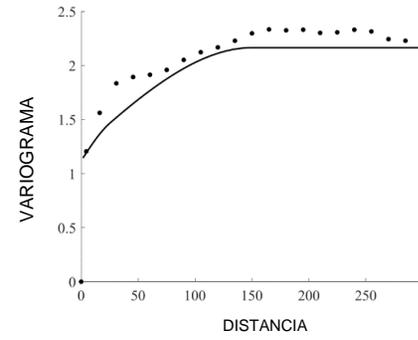
**Variograma Directo V3-V3**



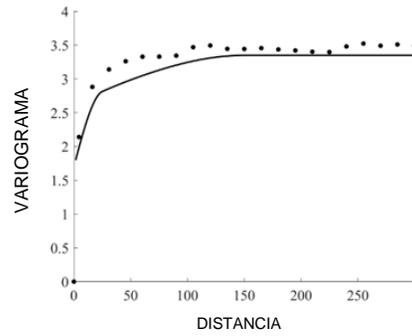
**Variograma Directo V4-V4**



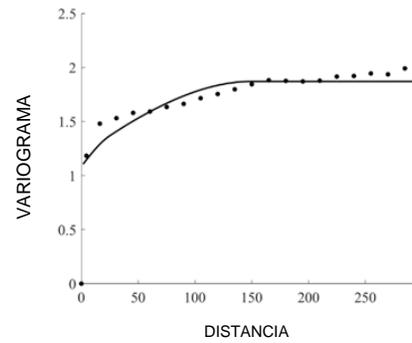
**Variograma Directo V5-V5**



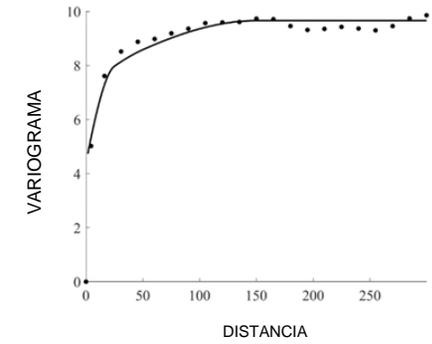
**Variograma Directo V6-V6**



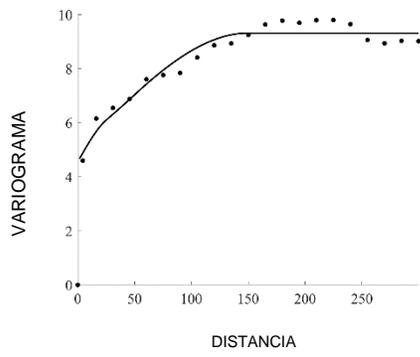
**Variograma Directo V7-V7**



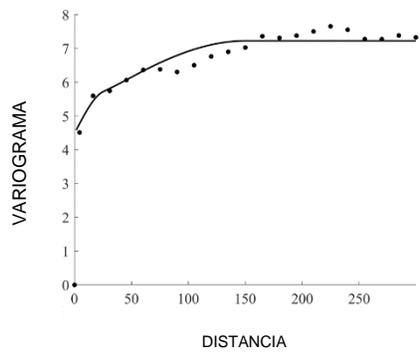
**Variograma Directo V8-V8**



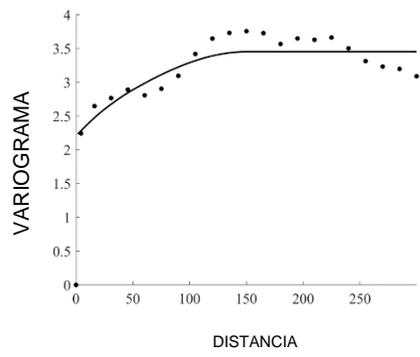
**Variograma Directo V9-V9**



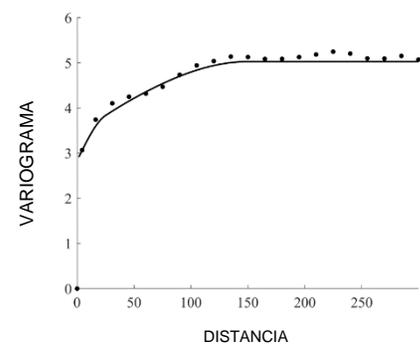
**Variograma Cruzado V1-V2**



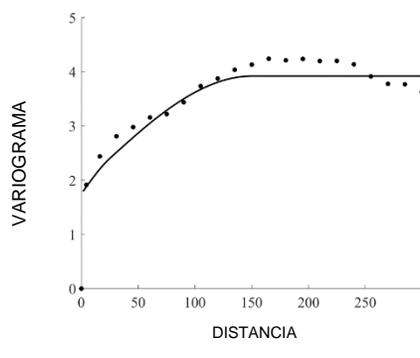
**Variograma Cruzado V1-V3**



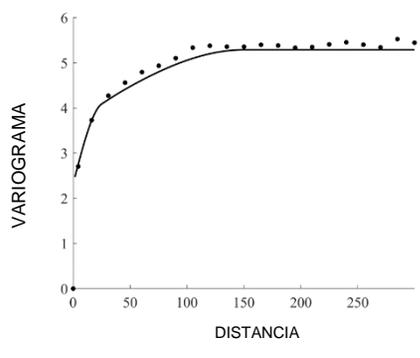
**Variograma Cruzado V1-V4**



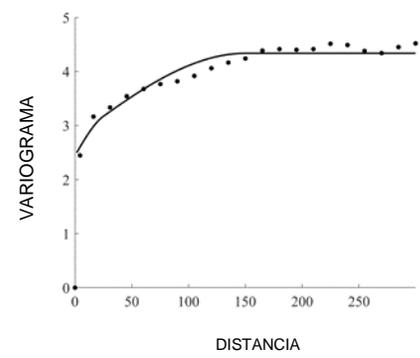
**Variograma Directo V1-V5**



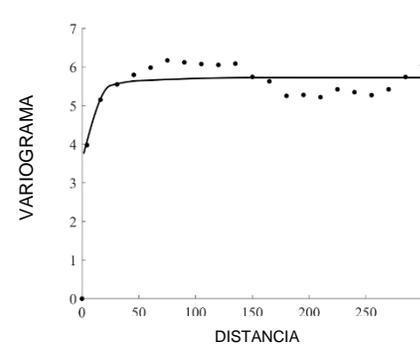
**Variograma Directo V1-V6**



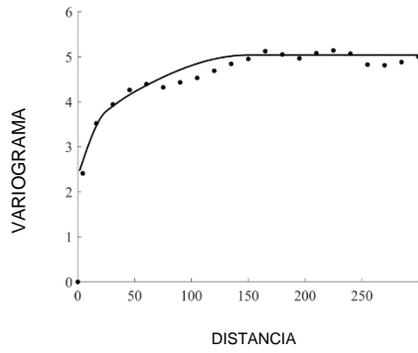
**Variograma Directo V1-V7**



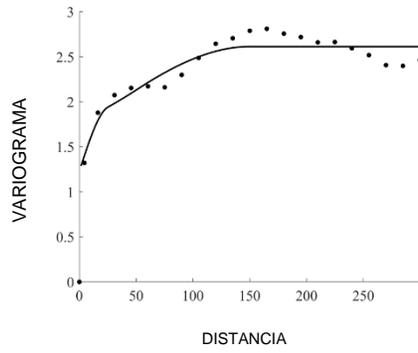
**Variograma Directo V1-V8**



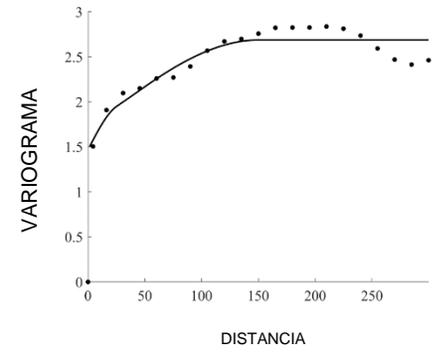
**Variograma Directo V1-V9**



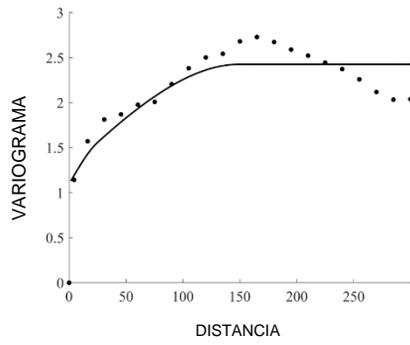
**Variograma Cruzado V2-V3**



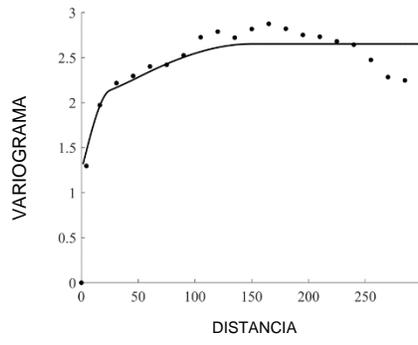
**Variograma Cruzado V2-V4**



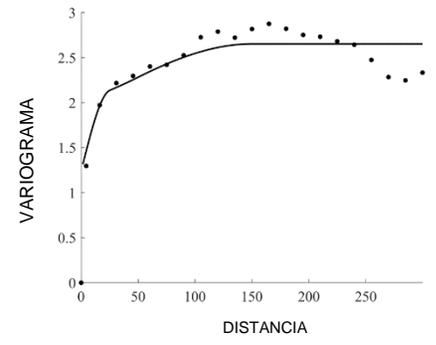
**Variograma Cruzado V2-V5**



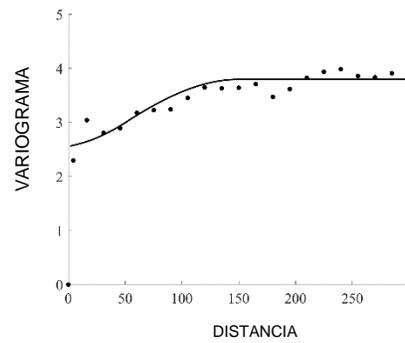
**Variograma Directo V2-V6**



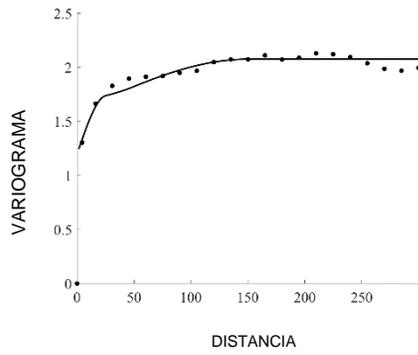
**Variograma Directo V2-V7**



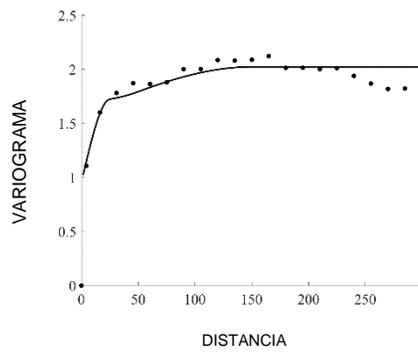
**Variograma Directo V2-V8**



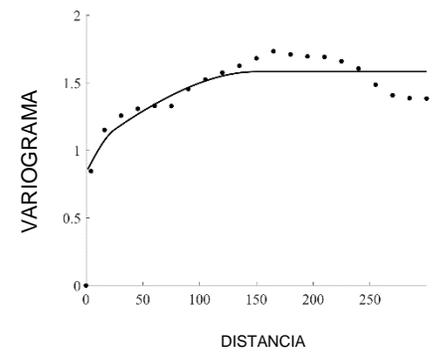
**Variograma Directo V2-V9**



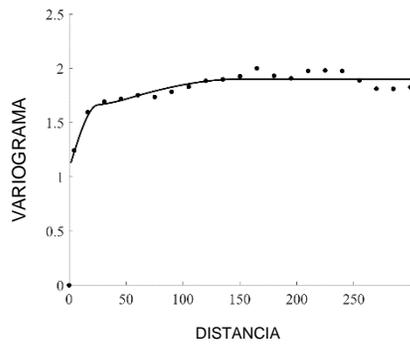
**Variograma Cruzado V3-V4**



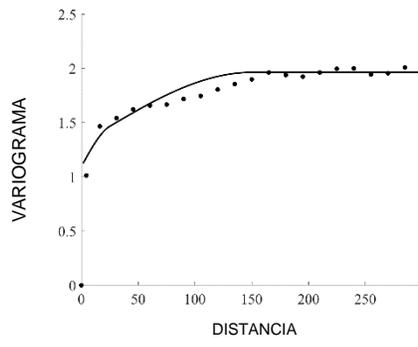
**Variograma Cruzado V3-V5**



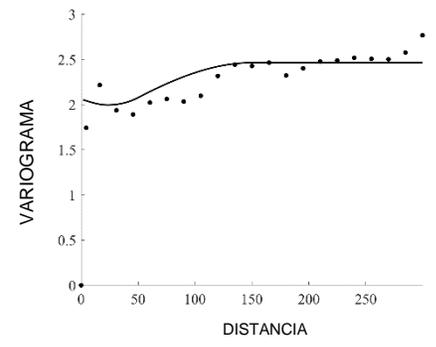
**Variograma Cruzado V3-V6**



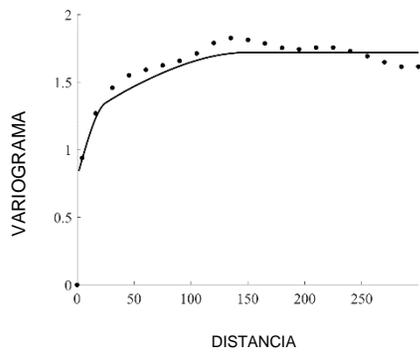
**Variograma Directo V3-V7**



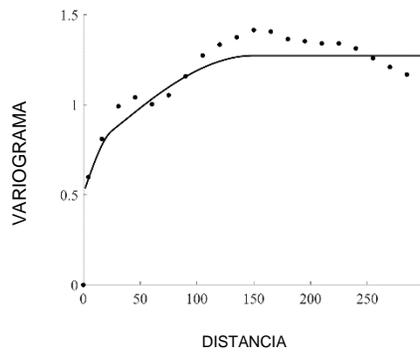
**Variograma Directo V3-V8**



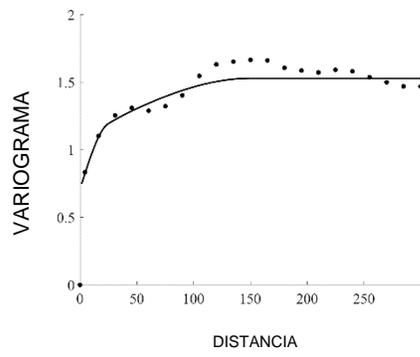
**Variograma Directo V3-V9**



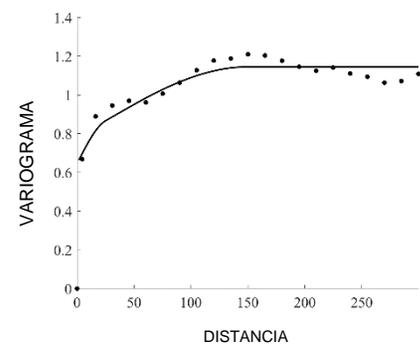
**Variograma Cruzado V4-V5**



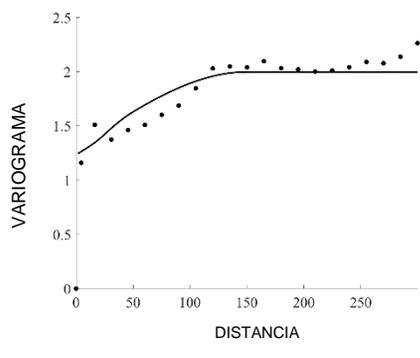
**Variograma Cruzado V4-V6**



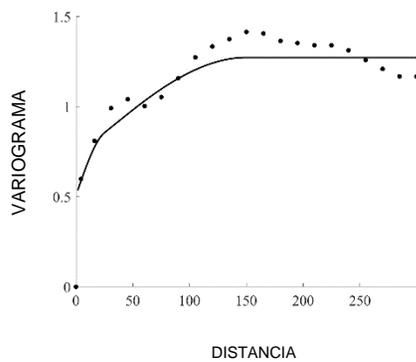
**Variograma Cruzado V4-V7**



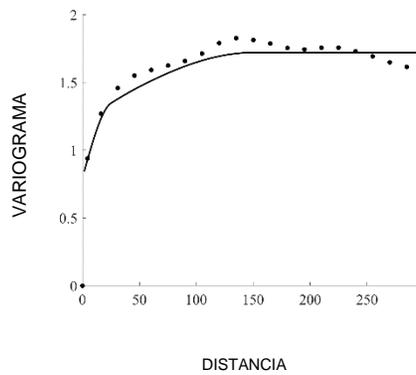
**Variograma Directo V4-V8**



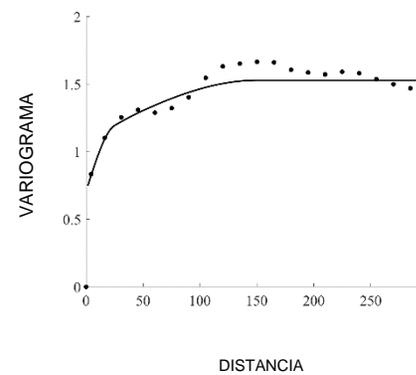
**Variograma Directo V4-V9**



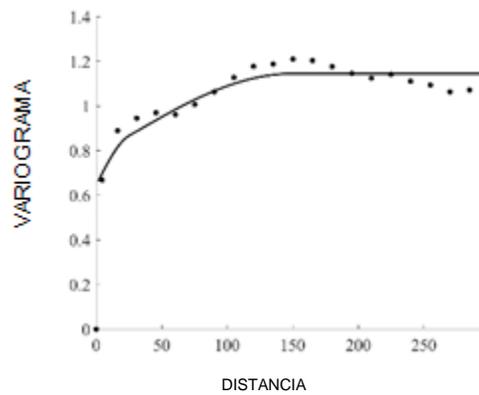
**Variograma Cruzado V5-V6**



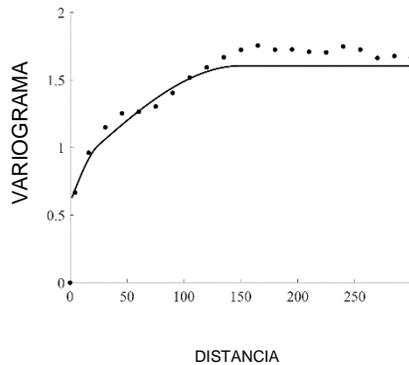
**Variograma Cruzado V5-V7**



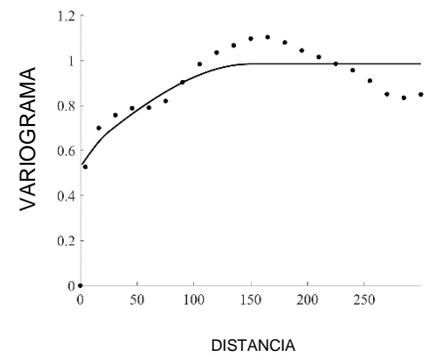
**Variograma Cruzado V5-V8**



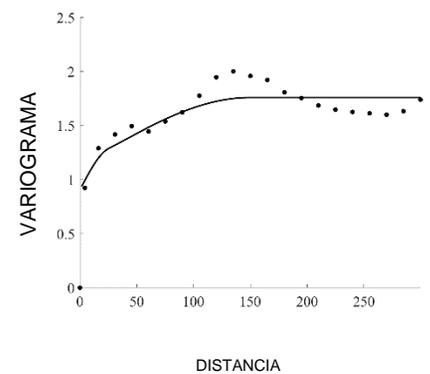
**Variograma Directo V5-V9**



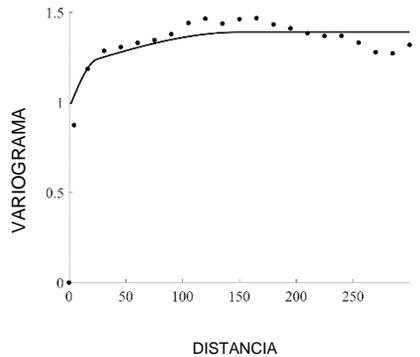
**Variograma Cruzado V6-V7**



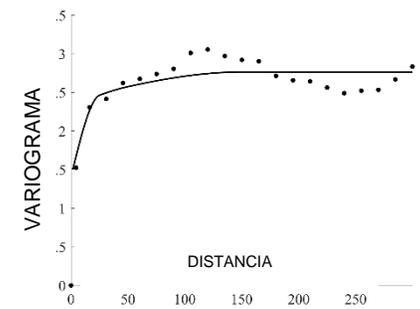
**Variograma Cruzado V6-V8**



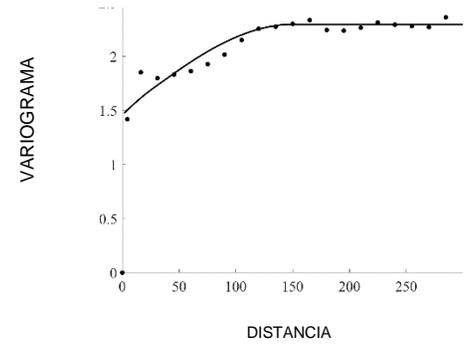
**Variograma Cruzado V6-V9**



**Variograma Directo V7-V8**



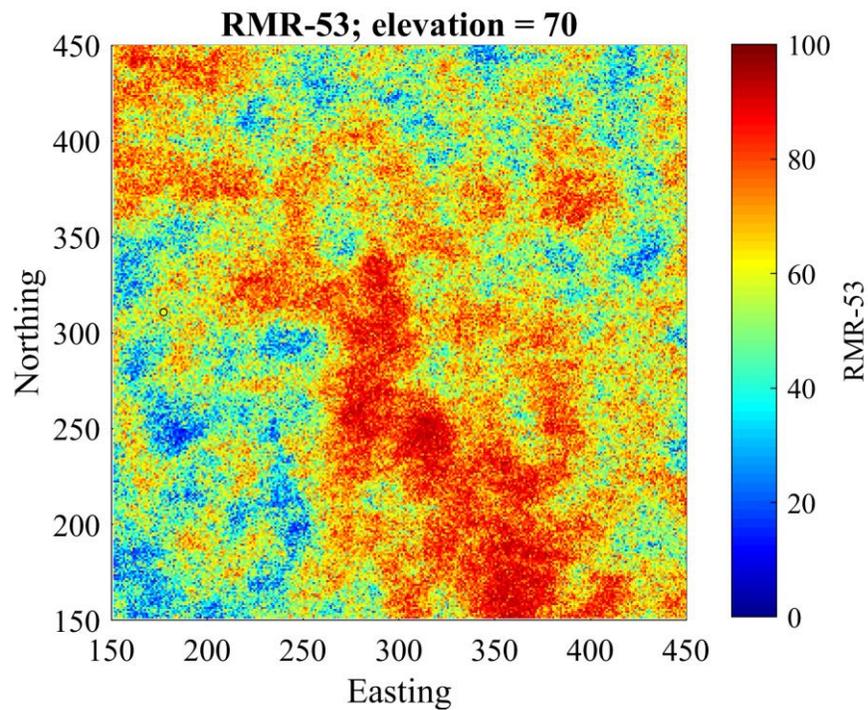
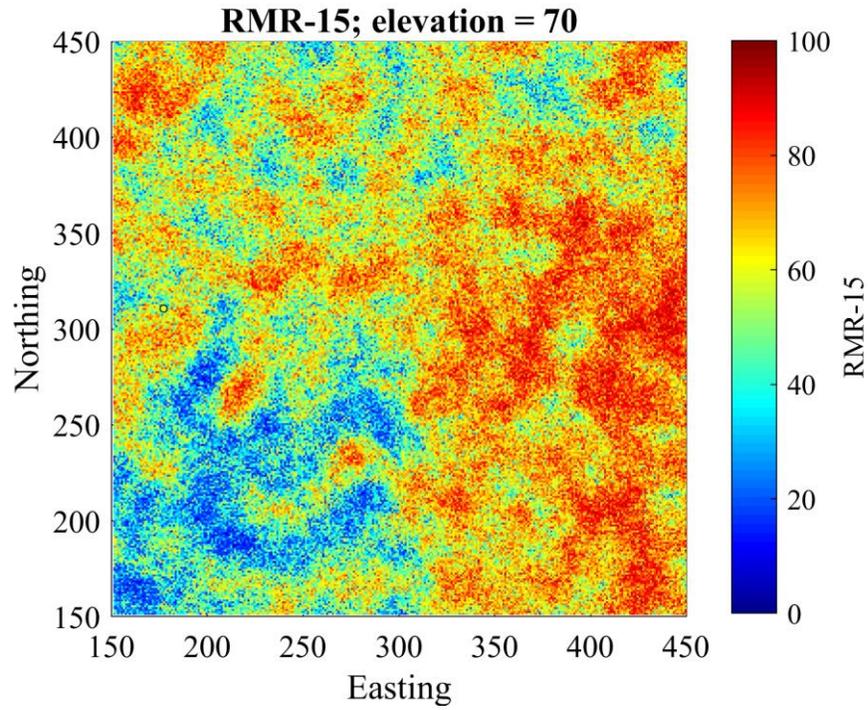
**Variograma Directo V7-V9**

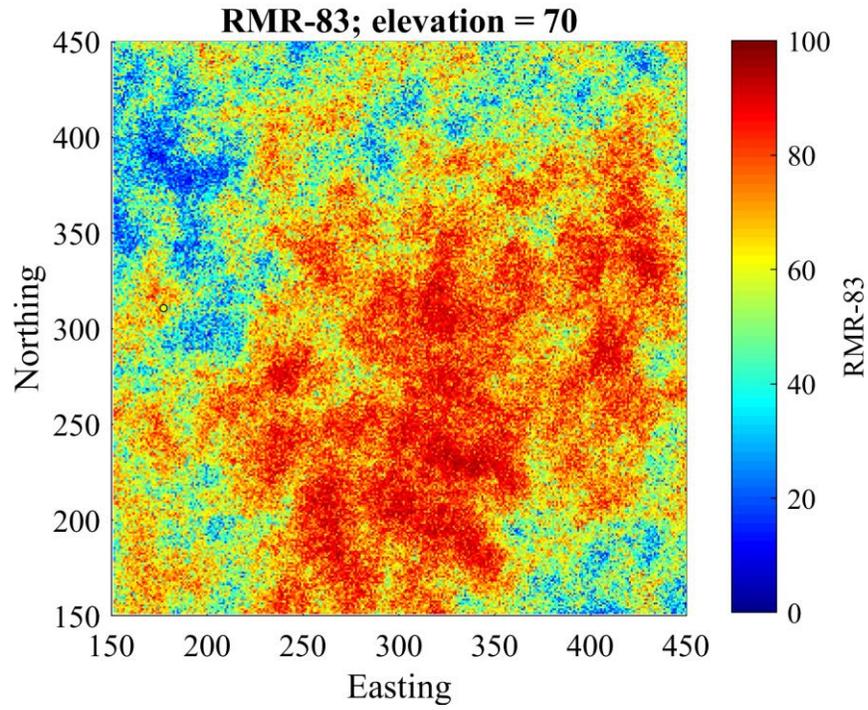


**Variograma Directo V8-V9**

- ANEXO C

Imágenes Realización 15, RMR-15, Realización 53, RMR-53 y Realización 83, RMR-83 enfoque 1.





Imágenes Realización 20, RMR-20, Realización 32, RMR-32 y Realización RMR-81 enfoque 2.

