



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Obtención del parámetro JRC a
partir de nubes de puntos bajo
el método de la raíz de la media
cuadrática**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

Raymundo Ruiz Flores

DIRECTOR DE TESIS

Ing. Javier Mancera Alejandrez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado OBTENCION DEL PARAMETRO JRC A PARTIR DE NUBES DE PUNTOS BAJO EL METODO DE LA RAIZ DE LA MEDIA CUADRATICA que presenté para obtener el título de INGENIERO GEÓLOGO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

RAYMUNDO RUIZ FLORES
Número de cuenta: 420051929

AGRADECIMIENTOS

Para mis padres, quienes siempre han sido mi más fuerte apoyo a lo largo de mi vida y un ejemplo a seguir en cada momento. Para mi hermana Diana, quien ha sido una de las personas que me ha apoyado enormemente en cada aspecto de mi vida académica y personal, y a quien admiro enormemente por cada aspecto que ha logrado.

A Ricardo, Copado, Nata, Eduardo y Ángel, por darme su amistad desde la preparatoria y a quienes considero mis mejores amigos, por cada momento vivido junto a ellos y por los que están por venir.

A mis mejores amigas Lily, Cin y Jaz por ser una parte importante de mi vida universitaria y a quienes les agradezco cada anécdota y consejo que pudieron brindarme, especialmente en los momentos difíciles.

Para Miche, a quien considero uno de mis más grandes profesores y ejemplo a seguir en mi vida académica, gracias por ayudarme a formar mi pensamiento crítico como profesionista, por haberme enseñado tantas cosas durante el servicio social y por los tantos consejos transmitidos en las salidas de campo.

Al Ingeniero Javier Mancera Alejandrez, por haber sido mi director de tesis y haberme propuesto realizar este trabajo, sin su idea no habría logrado explorar más a fondo la mecánica de rocas; al Lic. Sergio Enrique Macías Medrano y al Dr. Darío Emmanuel Solano Rojas, quienes se tomaron el tiempo de guiarme durante mis primeros pasos en la fotogrametría y los consejos brindados para el correcto desarrollo de mis procesos.

Al Dr. Adrián Riquelme Guill de la Universidad de Alicante por haberme brindado la referencia principal de mi trabajo y por apoyarme en las grandes dudas que me surgían durante mis lecturas y primeros resultados de mis procesos además de expandir mi pensamiento crítico en los mismos sin su ayuda este trabajo no habría llegado a incluir la mayoría de los análisis que presenta.

Al Dr. Moisés Dávila Serrano y al Dr. Saúl Arciniega Esparza, por sus valiosos comentarios, así como las correcciones realizadas a este trabajo que ayudaron a nutrirlo y desarrollarlo de una mejor forma, además de su importante figura como profesores de asignatura en mi vida académica

Para mi familia en general, a quienes agradezco tanto por la infinidad de momentos que he vivido a su lado, y por los grandes consejos que me han podido brindar, y sobre todo por el apoyo incondicional en todo momento

Y en general a la Facultad de Ingeniería y a la UNAM, por brindarme la oportunidad de formarme como ingeniero y a todas las personas que fueron parte de mi vida universitaria, quienes, a pesar de no ser nombradas aquí, siempre estarán en mi mente y a los cuales siempre agradeceré por compartir un poco de su tiempo conmigo.

INDICE

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABLAS.....	8
1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. MARCO TEÓRICO	10
2.1. ADQUISICIÓN DE DATOS GEOLÓGICOS.....	10
2.2. NUBES DE PUNTOS PARA USO GEOLÓGICO	11
2.2.1. <i>Fotogrametría</i>	13
2.2.2. <i>Terrestrial Lasser Scanner</i>	18
2.3. DESCRIPCIÓN GEOMECÁNICA DE DISCONTINUIDADES EN MACIZOS ROCOS	21
2.4. DETERMINACIÓN DE LA RUGOSIDAD Y JRC	24
2.4.1. <i>Método de Barton y Choubey</i>	28
2.4.2. <i>Método de análisis fractal</i>	31
2.4.3. <i>Método de la raíz de la media cuadrática</i>	35
3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	40
3.1. OBJETIVOS.....	40
3.2. HIPÓTESIS.....	40
4. METODOLOGÍA.....	42
4.1. PLANEACIÓN	42
4.2. ADQUISICIÓN DE PERFILES DE RUGOSIDAD Y FOTOGRAFÍAS	44
4.3. PROCESAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO.....	48
4.4. OBTENCIÓN DE PERFILES DE RUGOSIDAD CON NUBE DE PUNTOS	53
4.5. ESTIMACIÓN DEL JRC	81
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	85
5.1. PRECISIÓN DE LA RECONSTRUCCIÓN FOTOGRAMÉTRICA	85
5.2. PRECISIÓN DEL MÉTODO DE LA RAÍZ MEDIA CUADRÁTICA	86
6. CONCLUSIONES.....	88
6.1. RECOMENDACIONES.....	89
6.2. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	90
REFERENCIAS.....	92

Resumen

La evaluación de discontinuidades en un macizo rocoso es de gran importancia para poder estimar su estabilidad. Elementos como su orientación, rugosidad, persistencia, entre otros, permiten definir con mayor exactitud las características generales de estas superficies y evaluar la probabilidad de ocurrencia de fallas en un macizo rocoso.

Uno de los grandes problemas en la extracción de estos datos se presenta cuando el acceso a los afloramientos es limitado e incluso representa un riesgo para el personal que ejecuta estas actividades, por lo que obtenerlos de forma remota puede ser vista como una de las mejores alternativas. La fotogrametría es una de las técnicas que se ha posicionado como una de las formas más rentables para la obtención de modelos tridimensionales de macizos rocosos que permiten evaluar sus características de manera remota.

Ningún trabajo en México ha evaluado su efectividad en la evaluación de rugosidad, por lo que este trabajo presenta la evaluación de la rugosidad de las discontinuidades del afloramiento La Escuelita, Ciudad Universitaria UNAM, mediante el uso de nubes de puntos a dos distintas distancias cámara-objeto, tres y seis metros respectivamente, con el objetivo de observar las diferencias de reconstrucción mediante la comparación de perfiles de rugosidad reales y los obtenidos con nubes de puntos.

Adicional a esto se llevó a cabo una estimación del Joint Roughness Coefficient (JRC) bajo el método de la raíz de la media cuadrática propuesto por Li y Zhang (2015), enfocándose en observar las diferencias de estimación al variar las frecuencias de muestreo y longitudes de los perfiles analizados.

La conclusión general muestra que una menor distancia cámara-objeto proporciona mejores reconstrucciones de la rugosidad de una superficie, sin embargo, es necesaria una futura investigación en cuanto a la cantidad de GCP's (Ground Control Points) que deben ser utilizados durante la obtención de fotografías. Por su parte, la estimación del JRC muestra que el uso de una frecuencia de muestreo mayor a 0.4 mm proporciona una sobrestimación del valor, por lo que únicamente debe ser usada la frecuencia de validación en dicho análisis, mientras que la longitud de los perfiles no parece ser un factor de sobrestimación o subestimación de los valores de JRC, al menos hasta una longitud de 24 cm.

Abstract

The evaluation of discontinuities in a rock structure is of great importance for estimating its stability. Elements such as orientation, roughness, persistence, and others allow for a more accurate definition of the general characteristics of these surfaces and the assessment of the probability of failure in a rock structure.

One of the major challenges in extracting these data arises when access to outcrops is limited and even poses a risk to personnel performing these activities. Therefore, obtaining them remotely can be seen as one of the best alternatives. Photogrammetry is one of the techniques that has positioned itself as one of the most cost-effective ways to obtain three-dimensional models of rock masses that allow for remote evaluation of their characteristics.

No work in Mexico has evaluated its effectiveness in roughness assessment, so this work presents the evaluation of the roughness of the discontinuities of the La Escuelita outcrop, Ciudad Universitaria UNAM, through the use of point clouds at two different camera-object distances, three and six meters respectively, with the objective of observing the differences in reconstruction by comparing real roughness profiles and those obtained with point clouds.

Additionally, the Joint Roughness Coefficient (JRC) was estimated using the root mean square method proposed by Li and Zhang (2015), focusing on observing the estimation differences when varying the sampling frequencies and lengths of the analyzed profiles.

The overall conclusion is that a shorter camera-object distance provides better reconstructions of surface roughness. However, future research is needed regarding the number of GCPs (Ground Control Points) that should be used when obtaining photographs. For its part, the JRC estimate shows that the use of a sampling frequency greater than 0.4 mm provides an overestimation of the value, so only the validation frequency should be used in these analysis, while the length of the profiles does not seem to be a factor of overestimation or underestimation of the JRC values, at least up to a length of 24 cm.

Lista de figuras

Figura 2.1. Estudio de cambios en la vegetación en una zona minera ubicada en Francisco I. Madero, Zacatecas (a) 2013, b) 2022. (Cano Serrano, 2023)

Figura 2.2. Clasificación de familias de discontinuidades por medio de nubes de puntos. a) Talud en El Campello, Alicante (Riquelme et al. 2015); b) pared de roca La Escuelita, Ciudad Universitaria (Villareal Rubio, 2019)

Figura 2.3. Comparación general de los diferentes métodos de obtención de datos para la caracterización de macizos rocosos, donde se observa la gran diferencia de costos entre el uso de drones (obtención fotogramétrica) y los escáneres láser. Obtenido de Villareal-Rubio (2019), modificado de Carrivick (2013)

Figura 2.4. Principios de colinealidad y triangulación usados dentro de la reconstrucción fotogramétrica. Modificado de Russo et al. (2011)

Figura 2.5. Diagrama que describe las fases que realiza el algoritmo SfM para la generación de nubes de puntos asociadas a objetos.

Figura 2.6. Diagrama general sobre el funcionamiento de los escáneres láser basados en el tiempo de vuelo (Lerma-García y Biosca Tarongers, 2008)

Figura 2.7. Representación gráfica sobre los 10 parámetros a describir en un macizo rocoso de acuerdo con las recomendaciones descritas por la ISRM. Obtenido de Hudson y Harrison (1997)

Figura 2.8. Representación gráfica de dos bloques de roca con irregularidades perpendiculares al rumbo del plano de discontinuidad. En este caso, si el movimiento se presentara en la dirección del echado, las irregularidades presentes no detendrían su desplazamiento. Obtenido de Willey & Mah (2004)

Figura 2.9. Criterio de rotura bilineal propuesto por Patton (1966), nótese el valor de σ_n en el cual se pierde la componente i de la expresión matemática y, por ende, un cambio abrupto en la pendiente de la recta. Modificado de Gonzalez de Vallejo (2002).

Figura 2.10. a) Relación de los 10 perfiles de rugosidad base, obtenidos por Barton y Choubet (1977), con sus respectivos rangos de valores de JRC obtenidos mediante ensayos con cajas de cizallas. Barton et. al (2023). b) Muestras de discontinuidades naturales de las cuales fueron obtenidos los diez perfiles de rugosidad base. Barton y Choubey (1977)

Figura 2.11. Visualización de los rangos de valores asignados a 16 perfiles de rugosidad por 14 personas especializadas en geotecnia, mostrando los diagramas de cajas y bigotes

de cada uno. Se observa directamente que hay perfiles con diferencia de valores asignados de hasta 10 unidades de JRC. García Luna (2023)

Figura 2.12. Ejemplo sobre la realización del método Compass Walking, donde la regla de dimensión r cubre 6 veces al perfil de rugosidad medido. Modificado de Li y Huang (2015)

Figura 2.13. Procedimiento para la realización del método h-L mencionado por Xie y Pariseu (1994)

Figura 2.14. Comparación de las diferentes expresiones basadas en el método D para la obtención del JRC, se puede observar la discrepancia de ellas a determinados valores de D . Tomado de Li y Huang (2015).

Figura 2.15. Comparación de las diferentes expresiones basadas en el uso de Z_2 para la obtención del JRC, observando un intervalo de consistencia entre 0.15 y 0.30 de Z_2 . Li y Zhang (2015)

Figura 4.1. Vista frontal del afloramiento de roca basáltica La Escuelita, dicha pared es usada constantemente para actividades de escala deportiva.

Figura 4.2. Obtención de perfiles de rugosidad mediante el uso de perfilómetro/peine de Barton en las zonas de validación escogidas para su uso en este trabajo.

Figura 4.3. Antena RTK REACH RS2+ durante el proceso de corrección de coordenadas dentro de las instalaciones del estadio olímpico universitario.

Figura 4.4. Diagrama que muestra las distancias entre el objeto y el dron con el cual se obtuvieron las fotografías que fueron usadas en el procesamiento fotogramétrico.

Figura 4.5. Interfaz de Agisoft Metashape, a la izquierda se pueden observar los 2 chunks destinados al procesamiento de las nubes de puntos a 3 y 6 metros de La Escuelita.

Figura 4.6. Ubicación de los puntos de control utilizados para la reconstrucción de La Escuelita

Figura 4.7. Estadísticas de reconocimiento de La Escuelita a) 3 m y b) 6m). Los colores representan los errores en Z , mientras que la forma de las elipses denota la distorsión en XY . Nótese la gran diferencia de escala y formas de las elipses

Figura 4.8. Interfaz de la herramienta Discontinuity Set Extractor (DSE), a partir de ella será posible obtener los datos de familias de discontinuidades en La Escuelita.

Figura 4.9. a) Visualización del concepto de vectores normales a una superficie. Obtenido de Yang et al. (2017), b) Conjunto de vectores normales asociadas a puntos que se diferencian entre sí por su orientación. Obtenido de Riquelme et al (2014)

Figura 4.10. a) Estereograma que muestra a las familias de discontinuidades presentes en La Escuelita
b) Visualización de familias de discontinuidades en la nube de puntos.

Figura 4.11. Zonas de validación con los marcadores que delimitan a los perfiles de rugosidad, de izquierda a derecha y de arriba abajo, Las zonas de validación en afloramiento y en recortes individuales que contienen a los PI-PIV, PV, PVI, PVII y PVIII

Figura 4.12. Zonas de validación originales y rotadas de los PI-PIV y PV con sus respectivas matrices de rotación ingresadas en Cloud Compare

Figura 4.13. Relación de espaciamiento en el plano XY de los puntos que conforman al plano que contiene al PVI. La escala observada se encuentra en metros

Figura 4.14. Representación gráfica de la forma experimental (rojo) y teórica (negro) de un semivariograma. Modificada de Córdoba (2015).

Figura 4.15. Modelos teóricos de un semivariogramas. Obtenido de Hartkamp et al. (1999).

Figura 4.16. Planos rotados de las zonas de validación, de izquierda a derecha y de arriba abajo: PI, PII, PIII, PIV, PV, PVI, PVII y PVIII

Figura 4.17. Comparación de los datos de validación con los obtenidos a partir de la nube de puntos a 6 metros de distancia del afloramiento en calidad alta.

Figura 4.18. a) Comparación de PI en sus tres calidades con el perfil obtenido con perfilómetro.

Figura 4.18. b) Comparación de PII en sus tres calidades con el perfil obtenido con perfilómetro.

Figura 4.18. c) Comparación de PIII en sus tres calidades con el perfil obtenido con perfilómetro.

Figura 4.18. d) Comparación de PIV en sus tres calidades con el perfil obtenido con perfilómetro.

Figura 4.18. e) Comparación de PV en sus tres calidades con el perfil obtenido con perfilómetro.

Figura 4.18. f) Comparación de PVI en sus tres calidades con el perfil obtenido con perfilómetro.

Figura 4.18. g) Comparación de PVII en sus tres calidades con el perfil obtenido con perfilómetro.

Figura 4.18. h) Comparación de PVIII en sus tres calidades con el perfil obtenido con perfilómetro.

Figura 4.19. Rasters del PI con separación entre puntos de 1mm y 0.8 mm respectivamente, se puede observar la escala de longitud para asegurarse de la distancia entre puntos

Figura 5.1. Comparación gráfica de los valores de JRC del PI - PVIII a distintas frecuencias de muestreo aplicadas a los perfiles

Lista de tablas

Tabla 4.1 Tiempos de procesamiento asociados a cada una de las 6 nubes de puntos obtenidas en Agisoft Metashape.

Tabla 4.2. Relación de las longitudes de las líneas de sección dibujadas dentro de las nubes de puntos en CloudCompare

Tabla 4.3. Valores de la rugosidad media obtenida entre los perfiles reales y los obtenidos por la nube de puntos a alta calidad de procesado.

Tabla 4.4. Valores de JRC del PI - PVIII a distintas longitudes analizadas y bajo diferentes longitudes de subdivisión.

Tabla 4.5. Valores de JRC del PI - PVIII a distintas frecuencias (f) de muestreo aplicadas a los perfiles

1. Introducción

La evaluación de un macizo rocoso destinado a ser parte de una obra civil es de suma importancia dentro del campo de la ingeniería (Gonzalez de Vallejo, 2002). Sin embargo, en algunas ocasiones su análisis puede estar limitado por problemas de acceso o incluso de seguridad (Riquelme et al, 2015). Afortunadamente, el desarrollo de técnicas de obtención de datos remotos ha sido de gran importancia en los últimos años debido a la eficacia y ahorro de tiempo que estos representan (Riquelme et al, 2015; Fernández et al., 2014; Garcia-Luna, 2023). Una de estas técnicas es la fotogrametría¹, la cual permite generar reconstrucciones tridimensionales, manteniendo las características y estructuras de los macizos rocoso.

Algunas estructuras importantes que requieren de un análisis exhaustivo son las superficies de discontinuidad que estén presentes en el macizo rocoso, ya que pueden influir en su comportamiento mecánico, (Gonzalez de Vallejo, 2002). Una de las principales características que deben ser analizadas en ellas es la rugosidad que puedan presentar, ya que es un componente esencial de su resistencia al corte (Barton et al, 2022).

Varios han sido los trabajos para determinar cómo la rugosidad de una discontinuidad puede influir en dicho parámetro, Barton (1973) propone el Joint Roughness Coefficient (JRC) para determinar el grado de rugosidad a partir de perfiles de rugosidad. Varios han sido los trabajos que buscan obtener esta variable sin la necesidad de llevar a cabo trabajos de laboratorio como es el caso de Barton & Choubey, (1977), bajo un método de comparación visual o el propuesto por Li & Zhang (2015), el cual busca implementar el parámetro Z_2 en su estimación.

El presente trabajo busca evaluar la eficacia de la reconstrucción tridimensional de un afloramiento para su uso en la obtención de perfiles de rugosidad de planos de discontinuidad considerando la toma de datos a distintas distancias del afloramiento, así como de los diferentes niveles de procesamiento a los que sean sometidos los datos. Adicionalmente se buscará analizar a mayor detalle el método propuesto por Li y Zhang (2015) para la obtención del JRC centrándose en determinar la desviación que puedan sufrir los datos de acuerdo con las frecuencias de muestreo y a la longitud analizada de los perfiles de rugosidad que se obtengan con el fin de determinar las limitaciones de dicho método.

¹ La fotogrametría es una técnica utilizada para realizar mediciones y observar las características geométricas de segmentos de la superficie terrestres a partir de fotografías.

2. Marco Teórico

2.1. Adquisición de datos geológicos

La caracterización de afloramientos desde el punto de vista geológico es un aspecto de suma importancia dentro de las interpretaciones que se realizan con el fin de reconocer las litologías, su extensión y estructuras predominantes que tienen las rocas presentes (López-Pulido y Rayo-Rocha, 2019). Cada interpretación que se realice con base en ellos dependerá siempre de los objetivos del proyecto que se esté desarrollando, sin embargo, los instrumentos de medición en términos generales son los mismos.

Algunas herramientas esenciales dentro de los análisis de macizos rocosos con fines geotécnicos son la brújula Brunton, la cual nos permite obtener datos de orientación de las discontinuidades presentes; el perfilómetro o peine de Barton, que nos permite obtener perfiles de rugosidad de las discontinuidades; y la faceta estructural, la cual permite obtener el plano general de las discontinuidades para evitar errores debido a la acción de las irregularidades que pudiese presentar el plano en cuestión. Sin embargo, estos instrumentos en la mayoría de las ocasiones deben ser manipulados directamente, y por ende existe siempre la posibilidad de que ciertas mediciones resulten tener errores atribuidos a la experiencia y pericia de quien realiza el trabajo, además de que las actividades de muestreo pueden llegar a consumir una gran cantidad de tiempo y trabajo. (Mancera-Alejandrez et al., 2023), lo cual representa un problema en muchas ocasiones debido a que los afloramientos en general llegan a tener dimensiones importantes, y poder caracterizarlos por completo resulta difícil e incluso peligroso para las personas que lo (Riquelme-Guill, 2023).

Debido a esto las herramientas de percepción remota han surgido como una opción viable en la recopilación de datos en zonas que sean inaccesibles (Mancera-Alejandrez et al., 2023) o bien como una manera de ahorrar tiempo y obtener datos más precisos y con mejor resolución (Jaboyedoff et al., 2012).

2.2. Nubes de puntos para uso geológico

En la actualidad existen una gran cantidad de avances tecnológicos que han impulsado en gran medida las labores científicas e ingenieriles, desde el uso de instrumentos cada vez más precisos para realizar mediciones específicas hasta los avances en materia de satélites que permiten la adquisición de datos para observar cuestiones como el cambio climático en intervalos de tiempo concretos o la detección de zonas contaminadas por acciones antropogénicas (Cano-Serrano, 2023) (Figura 2.1).

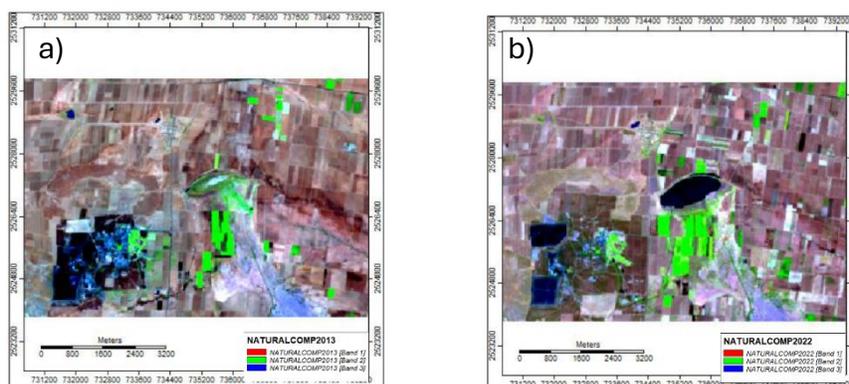


Figura 2.1. Estudio de cambios en la vegetación en una zona minera ubicada en Francisco I. Madero, Zacatecas (a) 2013, b) 2022. (Cano Serrano, 2023).

El uso de este tipo de tecnologías abre la posibilidad no solamente de adentrarnos en nuevas áreas de estudio, sino también replantear o actualizar una gran cantidad de principios o criterios publicados en años anteriores y que permiten incrementar la cantidad de información de un sitio particular. Uno de los más grandes avances que han permitido estas tecnologías es el desarrollo de una gran cantidad de técnicas que denominamos percepción remota, la cual permite el análisis de un objeto, área o fenómeno sin la necesidad de que haya un contacto físico por parte de quien lleva a cabo el trabajo. En estas técnicas, la información empleada es obtenida por medio de herramientas de medición, generalmente sensores, que son colocadas en una zona alejada del objeto de interés o bien que están instaladas sobre vehículos aéreos, que actualmente tienen una participación cada vez más notoria puesto que su facilidad de uso y funcionalidad han permitido que sean empleadas dentro de proyectos ingenieriles dirigidos a la mecánica de rocas tales como el monitoreo de terrenos inestables (Fernández et al., 2014)

Uno de los muchos productos derivados de la percepción remota que los geólogos e ingenieros han comenzado a utilizar son las nubes de puntos; las cuales son una colección de puntos, cada uno de ellos definidos en un sistema de coordenadas. Este conjunto de puntos es utilizado como referencia para reconstruir tridimensionalmente una superficie, pero en ocasiones es tan denso que se puede utilizar a sí mismo como el modelo digital (Hack, 2004)

En términos generales una nube de puntos en geología nos puede brindar una mayor cobertura visual de los afloramientos que se estén analizando como parte de un proyecto de ingeniería o científico y así poder seleccionar áreas particulares de él en las cuales debemos prestar mayor atención. En la última década han cobrado mayor relevancia en el área geotécnica debido a su empleo en la caracterización de ciertos aspectos geológicos tales como la orientación de familias de discontinuidades (Riquelme-Guill, 2015 y Villareal-Rubio, 2019) (Figura 2.2) o la obtención de los perfiles de rugosidad en discontinuidades (Garcia-Luna, 2023), aspectos que son de gran importancia dentro de la ingeniería geotécnica para poder estimar la estabilidad mecánica que puede presentar un macizo rocoso en sus condiciones actuales de estudio.

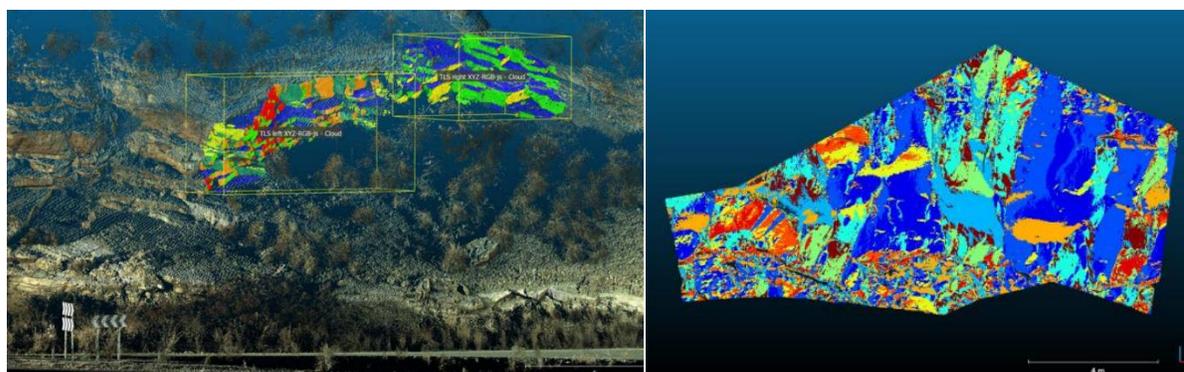


Figura 2.2. Clasificación de familias de discontinuidades por medio de nubes de puntos. a) Talud en El Campello, Alicante (Riquelme et al. 2015); b) pared de roca La Escuelita, Ciudad Universitaria (Villareal Rubio, 2019)

2.2.1. Fotogrametría

Uno de los principales objetivos de la percepción remota aplicada a la ingeniería geotécnica es observar a detalle las relaciones espaciales y estructuras geológicas que puedan estar presentes en un macizo rocoso. Por ello es necesario emplear una técnica que permita reconstruirlo tridimensionalmente manteniendo intactas su forma, volumen y posición en el espacio. La fotogrametría es una de las muchas herramientas que permite mantener estos parámetros utilizando únicamente mediciones a partir de una o varias fotografías tomadas al objeto o área de interés (Bonneval, 1972).

“La fotogrametría es la disciplina que se ocupa de los conceptos, métodos, procesos y tecnologías de obtención de fotografías o imágenes digitales aéreas, terrestres o de satélite, con el objetivo de obtener medidas geométricas precisas, exactas y fiables para la producción cartográfica o la reconstrucción de entidades espaciales. Las medidas tridimensionales calculadas de los objetos son la posición horizontal y vertical, la distancia lineal y angular, el tamaño (longitud, perímetro, área y volumen), la altura y la forma de las entidades espaciales” (Fra Paleo, 2011). A diferencia de otras técnicas, la fotogrametría únicamente toma como referencia la energía electromagnética que queda registrada en las fotografías y con ello se encarga de reconstruir el área de la cual tengamos fotografías disponibles, además resulta ser una técnica que tienes costos de varios ordenes menores si consideramos el empleo de drones para los levantamientos fotogramétricos (Figura 2.3).

Uno de los conceptos más básicos a entender sobre esta herramienta es la manera en que transforma fotografías de un objeto a un modelo tridimensional. Se debe comprender que a partir de una fotografía es posible observar bidimensionalmente, parcial o completamente, las características geométricas asociadas a cierto objeto. Si se trabaja con dos o más fotografías, sin importar la posición respecto al objeto, se pueden obtener puntos en común que permitan obtener una visión estereoscópica (García-Luna, 2023). Durante la obtención de las fotografías es necesario que sean tomadas con dispositivos especiales cuyas dimensiones y características ópticas sean ya conocidas.

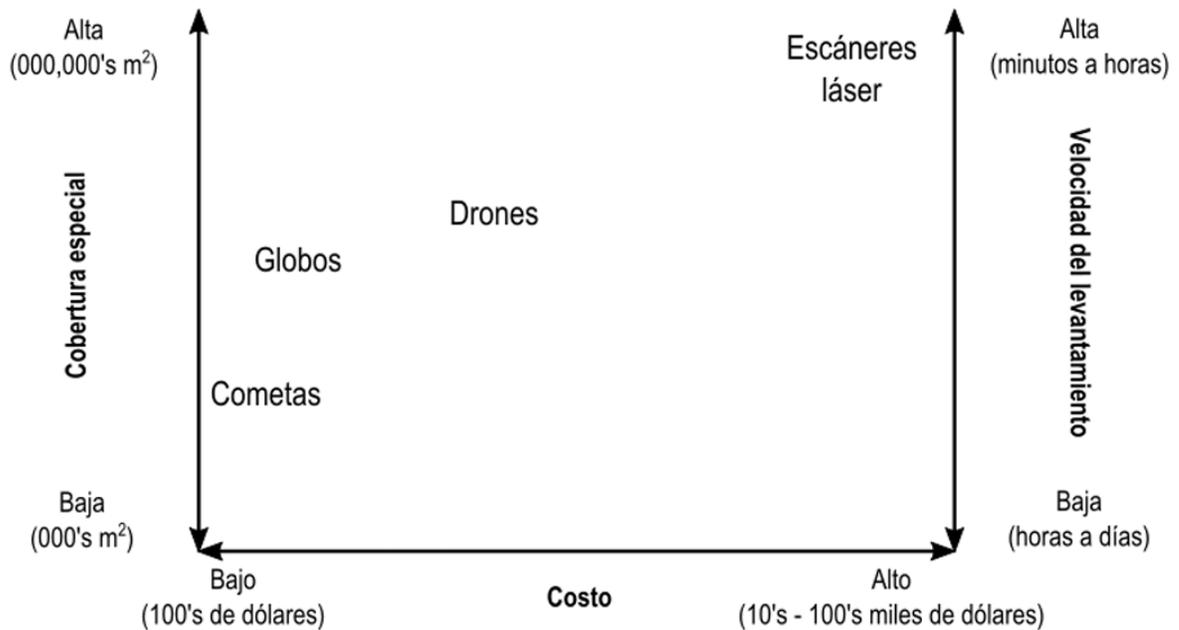


Figura 2.3. Comparación general de los diferentes métodos de obtención de datos para la caracterización de macizos rocosos, donde se observa la gran diferencia de costos entre el uso de drones (obtención fotogramétrica) y los escáneres láser. Obtenido de Villareal-Rubio (2019), modificado de Carrivick (2013)

Dentro de la fotogrametría clásica es necesaria la obtención de puntos de control (de coordenadas espaciales conocidas), o bien conocer la posición exacta de la cámara en cada una de las fotografías tomadas. Una vez que se comienza con el procesado de las fotografías, la técnica es capaz de identificar los puntos de control homólogos en cada fotografía y de esta manera determinar las coordenadas específicas de cada uno de los demás puntos que conforman al objeto que se está reconstruyendo, este proceso de transformación de datos bilineales a datos tridimensionales es a lo que se denomina restitución.

Tal como menciona García-Luna (2023), los principios de la fotogrametría están basados en la colinealidad y la triangulación fotogramétrica (Figura 2.4)

La colinealidad establece que el centro de proyección de la cámara, un punto real en el objeto y el mismo punto en la fotografía se encuentran perfectamente alineados y que permiten posteriormente cumplir con el criterio de triangulación, el cual se basa en que las coordenadas reales de un mismo punto, pero observado desde zonas distintas, pueden ser

calculadas perfectamente conociendo su posición relativa respecto a los puntos conocidos en ambas fotografías.

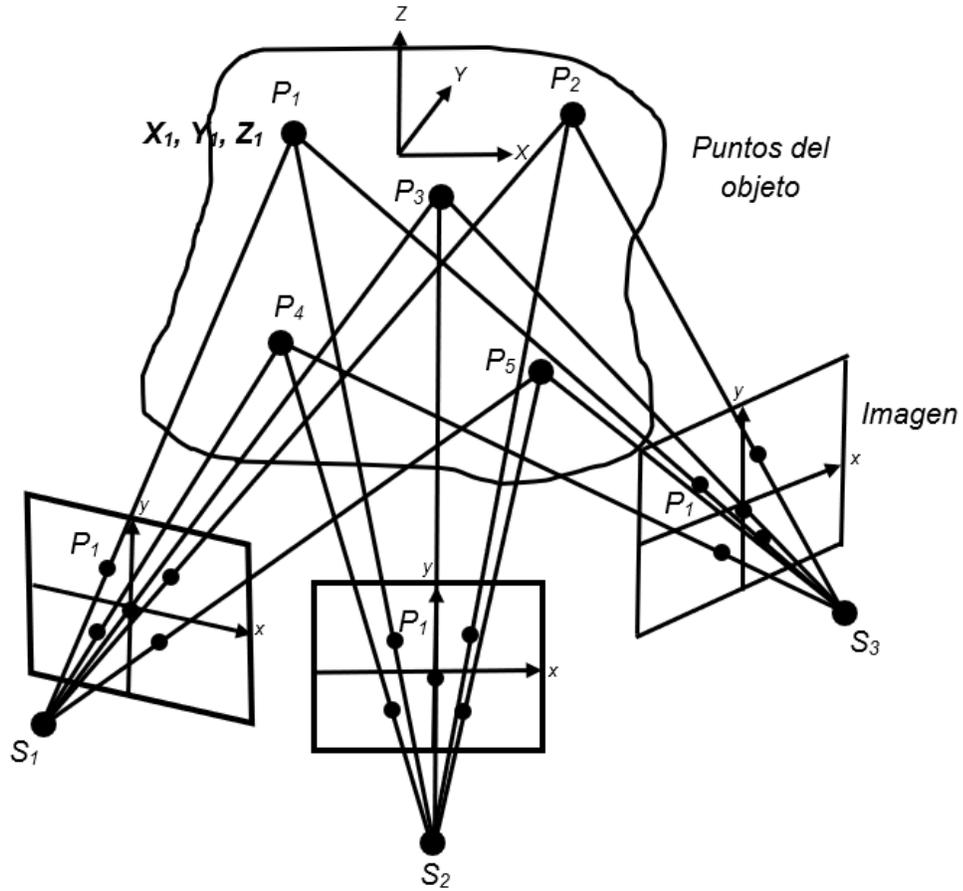


Figura 2.4 Principios de colinealidad y triangulación usados dentro de la reconstrucción fotogramétrica. Modificado de Russo et al. (2011)

La fotogrametría ha sido ampliamente reconocida como una técnica que permita realizar análisis de macizos rocosos en situaciones en que la misma zona pueda llegar a ser inaccesible para un análisis directo. La IRSM (1978) estructura una serie de pasos para realizar un buen levantamiento fotográfico para generar modelos fotogramétricos que sean usados durante los análisis de orientación de discontinuidades. Así como muchas otras metodologías, la fotogrametría ha ido evolucionando durante los últimos años y algunos procesos han sido favorecidos por el desarrollo de ciertos algoritmos, como el algoritmo *Structure-from-Motion (SfM)*.

Este algoritmo, que en los últimos años ha demostrado su capacidad de realizar reconstrucciones topográficas y modelos tridimensionales de muy alta calidad, funciona con los mismos principios que la fotogrametría clásica, basándose en la sobreposición de fotografías para obtener nubes de puntos. Su gran ventaja radica en que es capaz de realizar el proceso de restitución sin la necesidad de conocer de antemano la orientación y posición de la cámara en cada una de las fotografías tomadas, ya que el propio algoritmo se encarga de extraer esta información a partir del análisis del conjunto de datos proporcionado puesto que utiliza un procedimiento de ajuste iterativo y altamente redundante basado en una serie de características extraídas a partir de las fotografías que se traslapan además de apoyarse de puntos de control terrestre (GCP's) (Westoby et al., 2012 y Garcia-Luna, 2023).

El funcionamiento del algoritmo SfM, ha sido descrito en una gran cantidad de estudios, incluyendo el hecho por Villareal-Rubio (2019), quien lo resume en cuatro etapas las cuales se muestran en la Figura 2.5.

Una vez realizados estos pasos, es posible generar nuevos productos a partir de nuestra nube de puntos densa, como modelos digitales de superficie u ortofotografías según sean los objetivos del estudio o simplemente trabajar con la nube de puntos densa que sirva como el modelo tridimensional. Debido a que el presente trabajo realiza su análisis en un afloramiento ya trabajado por Villareal-Rubio (2019), y por el propio enfoque que tiene, no será necesario el diseño de un plan de vuelo de dron.

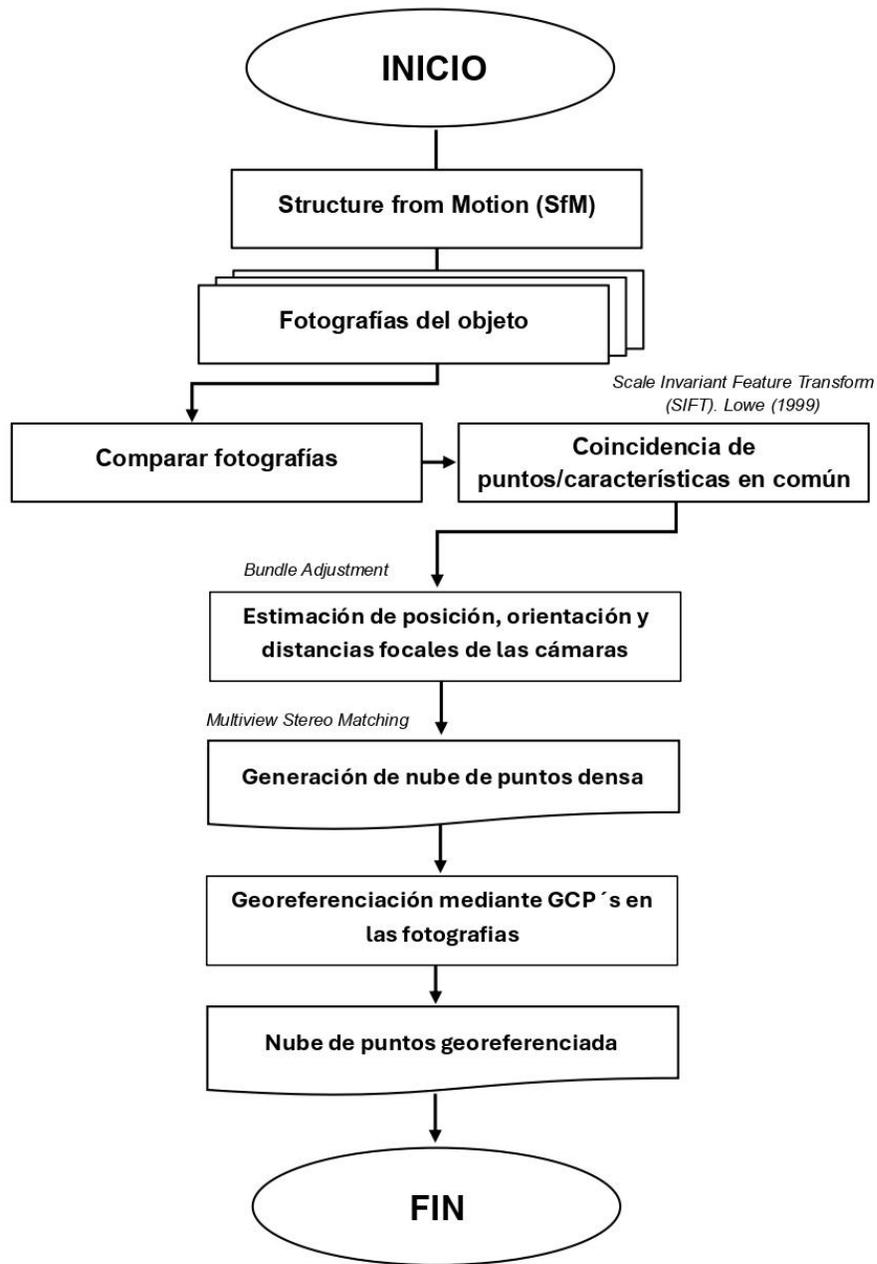


Figura 2.5. Diagrama que describe las fases que realiza el algoritmo SfM para la generación de nubes de puntos asociadas a objetos.

2.2.2. Terrestrial Lasser Scanner

Como se mencionó en el capítulo anterior, la intención de reconstruir objetos por medio de percepción remota y su resolución dependerá directamente de los objetivos y presupuesto del proyecto. Tal y como describe Villareal-Rubio (2019), los Terrestrial Lasser Scanner (TLS) representan una de las tecnologías más costosas para la realización de estos trabajos, sin embargo, la resolución que pueden obtenerse es del orden de milímetros, lo cual los hace elevadamente precisos.

Una de las cuestiones más importantes para comprender el funcionamiento de estos instrumentos recae directamente en la teoría de los láseres. Un láser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) es cualquier instrumento capaz de generar ondas de luz haciendo uso de una pequeña porción de del espectro electromagnético, es decir, que la luz se emite en una longitud de onda bien definida, y que tiene una divergencia mínima de este valor, además tienen la completa capacidad de amplificar la luz que emiten según sean los requerimientos de quien lo manipule (Lerma-García y Biosca Tarongers, 2008).

En general los láseres cuentan con propiedades bien definidas que los diferencian de otras fuentes de luz:

- La luz de un láser se propaga en una dirección bien definida en el espacio, como consecuencia de su polarización lineal, debido a su coherencia espacial, es decir que su señal eléctrica guarda una relación de fase constante en diferentes puntos de haz que está siendo transmitido
- Cuenta con una alta coherencia temporal, lo que implica una gran relación de fase en intervalos de tiempo amplios, lo que facilita su propagación a lo largo de grandes distancias.

En la actualidad este tipo de instrumentos tienen una gran cantidad de aplicaciones cotidianas como también industriales y científicas: permiten la lectura de dispositivos de almacenamiento óptico y de códigos de barras, así como en aplicaciones de corte de materiales y el escaneo tridimensional de objetos.

Los TLS representan a una gran variedad de instrumentos que utilizan la tecnología láser para escanear una superficie, permitiendo su reconstrucción tridimensional por medio de

la toma de datos sobre su forma y apariencia como su color, generando una nube de puntos a la par de las mediciones que realiza el instrumento en tiempo real, lo cual hace de esta tecnología una manera rápida y precisa de obtener datos.

Existen una gran cantidad de estos instrumentos que se diferencian en la manera que se recibe o analiza el haz de luz reflejado por la superficie que este analizando el instrumento en cuestión, es importante mencionar que no existe un TLS perfecto para cualquier situación y que se deberá seleccionar el adecuado según los objetivos del proyecto, algunos de ellos serán más adecuados para escaneos dentro de estructuras como edificios con rangos de medición medios (hasta 100 metros) y algunos otros serán mejores cuando se deban realizar mediciones en afloramientos y con rangos de cientos de metros (Fröhlich y Mettenleiter, 2004). Algunos de los TLS más usados dentro del escaneo de superficies y estructuras son los que basan su funcionamiento en el principio de tiempo de vuelo (Figura 2.6).

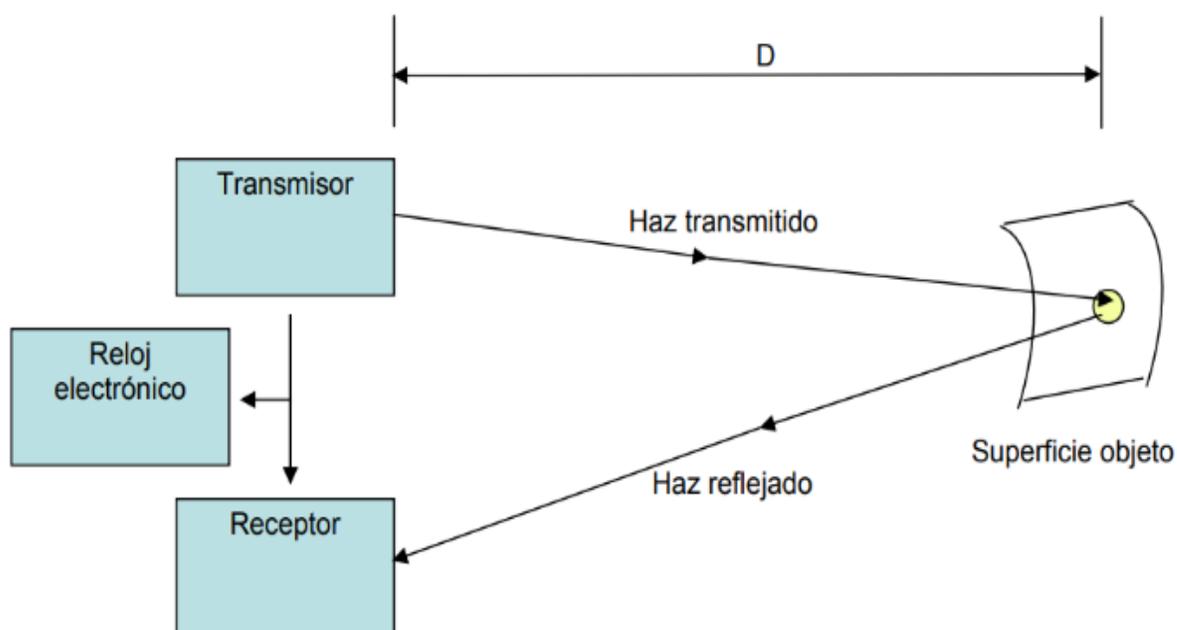


Figura 2.6. Diagrama general sobre el funcionamiento de los escáneres láser basados en el tiempo de vuelo (Lerma-García y Biosca Tarongers, 2008)

Dicha premisa del tiempo de vuelo se basa en la siguiente expresión:

$$t_L = 2 \frac{R}{c}$$

Donde: R = distancia entre emisor y superficie

c = velocidad de la luz en el vacío

t_L = tiempo de salida y regreso del haz de luz

En general, este tipo de TLS tendrán la capacidad de registrar mediciones con rangos de entre 100 y 1000 metros y una precisión de medición de entre 10 y 20 mm (Fröhlich y Mettenleiter, 2004), características necesarias para realizar escaneos en superficies grandes como las estudiadas por la mecánica de rocas. En general el modo de escaneo de una superficie por medio de estos instrumentos se logra debido a la integración de un espejo de deflexión, que permite reflejar el haz de luz en diferentes direcciones para que finalmente el haz reflejado por la superficie sea detectado e integrando sus datos de distancia dentro las mediciones que realiza el sistema, lo que permite cubrir a toda la superficie que se está estudiando, o al menos una gran extensión de ella permitiendo generar una nube de puntos en un tiempo muy corto, TLS como el BLK 360, manufacturado por Leica Geosystems, permite la adquisición de 360,000 puntos por segundo.

Al igual que las nubes de puntos obtenidas por fotogrametría, estas requieren de puntos de control en las superficies medidas para poder generar la georeferenciación de la nube, dado el caso en que los objetivos del proyecto lo requieran

En conclusión, los TLS representan una herramienta bastante novedosa dentro de la captura de datos geoespaciales gracias a su capacidad para registrar mediciones bastante precisas (Fröhlich y Mettenleiter, 2004). Estos aparatos han mostrado tener una gran eficiencia y calidad en levantamientos topográficos y reconstrucciones de objetos, permitiendo su utilidad dentro de softwares de modelado. Sin embargo, su precio representa una de las desventajas de su uso (Carrivik, 2013), aspecto que podría verse mitigado a medida que los avances en su manufactura y tecnología de uso avancen en los próximos años.

2.3. Descripción geomecánica de discontinuidades en macizos rocosos

La correcta caracterización de los macizos rocosos representa una de las partes más importantes dentro de los estudios geotécnicos con el fin de proporcionar análisis de estabilidad precisos para así evitar problemas futuros en las obras civiles.

Existen diferentes parámetros dentro de la caracterización de macizos rocosos que deben ser observados y medidos tanto en campo como en laboratorio. Por ejemplo, las discontinuidades que puedan estar presentes dentro de las diferentes unidades geotécnicas que se vean involucradas en el área que se esté estudiando en ese momento; Una discontinuidad es un plano de origen mecánico o sedimentario que independiza o separa los bloques de matriz rocosa en un macizo rocoso (Gonzalez de Vallejo, 2002)

Las discontinuidades condicionan de forma definitiva las propiedades y el comportamiento resistente, deformacional e hidráulico de los macizos rocosos. La resistencia al corte de las discontinuidades es el aspecto más importante en la determinación de la resistencia de los macizos rocosos duros fracturados y para su estimación es necesario definir las características y propiedades de los planos de discontinuidad (González-Vallejo, 2002). Por ello su correcto análisis y entendimiento es de suma importancia para poder comprender de qué manera un macizo rocoso puede llegar a fallar por medio de ellas en sus condiciones actuales y así poder realizar los diseños pertinentes que permitan su estabilización.

Son diversos los métodos de clasificación geomecánica de macizos rocosos que se han propuesto desde el siglo pasado que emplean algunas de los parámetros presentados más adelante; tal es el caso del método que propone Z. T. Beniaowski (1973) el cual se basa en una pregunta fundamental para el estudio de macizos rocosos: ¿Qué parámetros deben ser utilizados para una clasificación de macizos rocosos fracturados en el diseño de obras de ingeniería?, uno de los puntos que destaca para poder encontrar los parámetros de clasificación geomecánica es estudiando los patrones de discontinuidades que existen en el área de estudio tales como su orientación, echado, espaciado, etc. Uno de los más claros ejemplos sobre la importancia de la clasificación de discontinuidades en macizos rocosos

es el análisis mediante estereogramas que nos puede ayudar a definir el o los tipos de falla que se pueden presentar en obras civiles como taludes o túneles.

De acuerdo con el método descriptivo propuesto por la ISRM (1978) las discontinuidades deben ser evaluadas a partir de diez parámetros (Figura 2.7), los cuales se describen a continuación:

- Orientación: Se caracteriza de acuerdo con la posición en el espacio de su plano representativo y se define mediante sus datos de buzamiento y dirección del buzamiento (dip, dip direction)
- Espaciado: Definido como la distancia que existe entre dos discontinuidades de una misma familia, esta distancia debe ser medida perpendicularmente a los planos de las discontinuidades.
- Persistencia/Continuidad: Referido a la extensión superficial de los planos de discontinuidad, medida de acuerdo con los datos de orientación de la discontinuidad que desee ser medida
- Rugosidad: Se define como las ondulaciones e irregularidades que estén presentes en los planos de discontinuidad que se estén evaluando. Este parámetro es de vital importancia para la evaluación de la resistencia al corte de los planos
- Resistencia de la discontinuidad: Referida a la resistencia a la compresión equivalente medida en las paredes adyacentes a la discontinuidad. Este valor puede llegar a ser menor que el de roca intacta debido a los procesos de meteorización ocurridos
- Apertura: Es la distancia perpendicular que existe entre las paredes de la discontinuidad siempre y cuando no existe un relleno dentro de ella.
- Relleno: Las discontinuidades pueden aparecer rellenas de materiales de naturaleza diferente al de la roca en cuestión, por ello se debe describir su naturaleza, espesor, resistencia al corte y su permeabilidad.
- Filtración/Presencia de agua: El flujo de agua que se puede observar directamente en las discontinuidades, aunque en ciertas rocas permeables las filtraciones a través de su matriz son también de importancia.

- Número de familias: El número de familias de discontinuidades que se presentan en el macizo rocoso y que pueden intersectarse entre sí. El comportamiento mecánico del macizo rocoso, su modelo de deformación y sus mecanismos de rotura están condicionados por el número de familias de discontinuidades.
- Tamaño de bloque: La dimensión y la forma de los bloques contenidos en el macizo rocoso están definidos y delimitados por el número de familias de discontinuidades que intersecan entre sí y que se encuentra definidos por la orientación, espaciado y persistencia de estas.

Tal como se mencionó, existen diversos métodos de clasificación geomecánica de macizos rocosos, en los cuales pueden aparecer o no algunos de los parámetros antes descritos; criterios como el presentado por Bieniawski (1973) por ejemplo contemplan el uso de la rugosidad de las discontinuidades como parte de los parámetros de clasificación que presenta, y la cual es uno de los puntos principales a tratar en este trabajo. Por ello los siguientes capítulos estarán enfocados directamente en explicar la importancia de la rugosidad en la estimación de parámetros como la resistencia al corte de las discontinuidades.

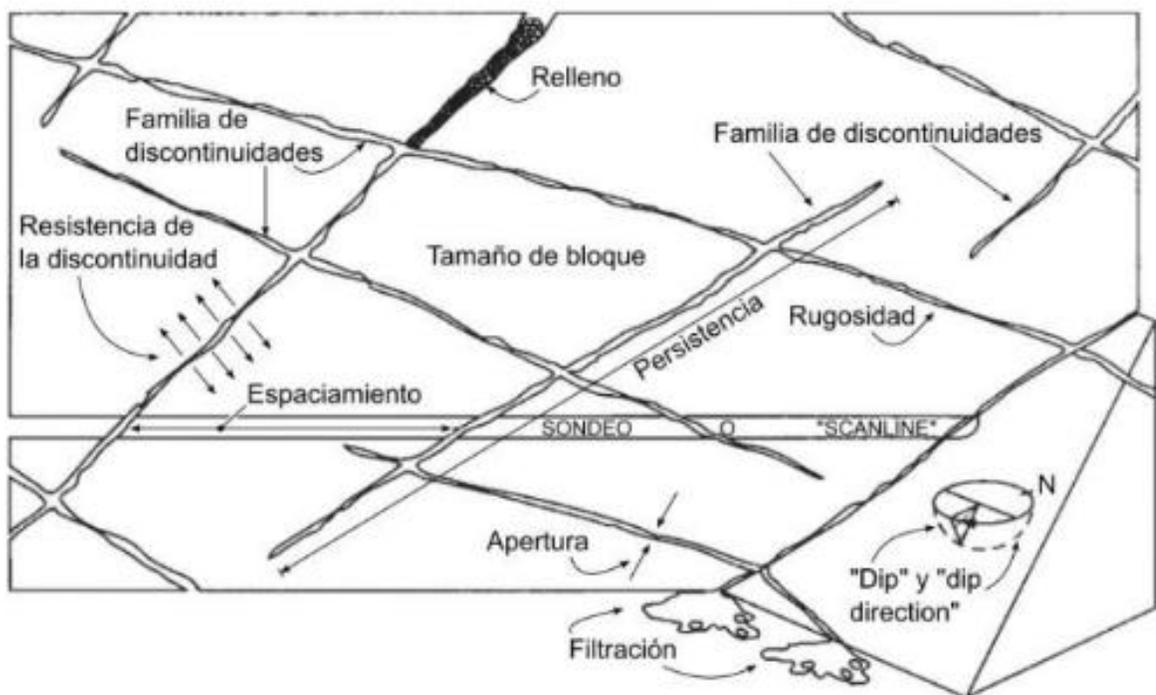


Figura 2.7. Representación gráfica sobre los 10 parámetros a describir en un macizo rocoso de acuerdo con las recomendaciones descritas por la ISRM. Obtenido de Hudson y Harrison (1997)

2.4. Determinación de la rugosidad y JRC

La rugosidad es uno de los factores que más influye en la resistencia al corte de una discontinuidad, siendo las discontinuidades sometidas a bajos esfuerzos normales las que más dependen de las irregularidades que estén presentes en los planos de discontinuidad. Cuando un esfuerzo tangencial afecta a una discontinuidad, los bloques de roca que son separados por ella tenderán a desplazarse uno respecto al otro; Este movimiento de bloques puede llegar a ser frenado por las irregularidades geométricas que se encuentren contenidas en los planos de discontinuidad, sirviendo como bloqueos u obstáculos siempre y cuando la dirección del movimiento y las irregularidades presentes sean perpendiculares/cuasi perpendiculares entre sí ya que de otro modo la rugosidad no tendrá ningún efecto sobre la resistencia al corte de la discontinuidad (Figura 2.8).

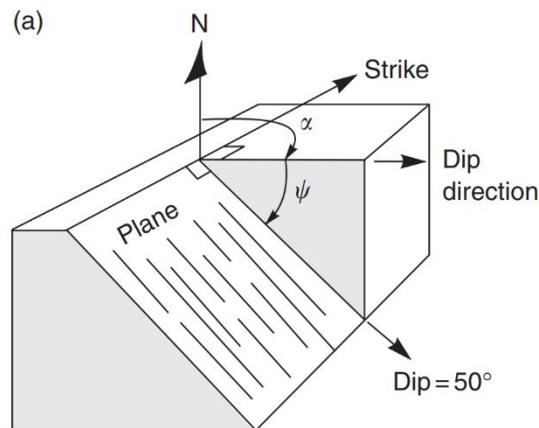


Figura 2.8. Representación gráfica de dos bloques de roca con irregularidades perpendiculares al rumbo del plano de discontinuidad. En este caso, si el movimiento se presentara en la dirección del echado, las irregularidades presentes no detendrían su desplazamiento. Obtenido de Willey & Mah (2004)

A partir de estas premisas Patton (1966) propone un criterio para estudiar la influencia de la rugosidad en la estabilidad de las discontinuidades partiendo de la premisa que contempla al ángulo promedio que se forma entre las irregularidades que puedan estar presentes y los planos promedio que describen la posición de las discontinuidades, de esta manera el ángulo formado pasa a convertirse en una de las variables independientes de la

expresión matemática que caracteriza a este criterio, siendo expresada de la siguiente manera:

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan(\phi + i)$$

Donde: $\tau =$ *esfuerzo cortante resultante*

$\sigma_n =$ *esfuerzo normal ejercido*

$\phi =$ *ángulo básico de fricción*

$i =$ *ángulo promedio de rugosidad*

Este criterio marca que, considerando que la discontinuidad no presenta cohesión alguna, la presencia o aplicación de un esfuerzo tangencial sobre una discontinuidad, donde el esfuerzo normal aplicado es bajo, generará una apertura o separación de las paredes que la conforman ya que para que exista un movimiento primero se debe superar el ángulo promedio de rugosidad i que generan las irregularidades, es decir superar los obstáculos que impiden el movimiento. Este criterio de igual manera toma en cuenta que existirá cierto σ_n que impedirá que las paredes se separen entre si y para lo cual el movimiento solo podrá darse en el momento en que las irregularidades presentes sean rotas y así se elimine cualquier obstáculo; dado que las irregularidades desaparecen, el ángulo de rugosidad i lo hace también, generando una nueva expresión representada de la siguiente manera:

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan(\phi_r)$$

Donde: $\tau =$ *esfuerzo cortante resultante*

$\sigma_n =$ *esfuerzo normal ejercido*

$\phi =$ *ángulo de fricción residual*

De esta manera el criterio de Patton queda establecido como un primer acercamiento para establecer a la rugosidad como parte vital para el entendimiento de la resistencia al corte en discontinuidades, gráficamente puede observarse como un criterio bilineal donde el punto de inflexión observado corresponde precisamente al σ_n donde el movimiento en las

discontinuidades deja de depender de la superación del ángulo de rugosidad y pasa a depender de la rotura de las irregularidades (Figura 2.9)

El trabajo de Patton sirvió de punto de partida para una serie de trabajos enfocados en estimar cada vez con mayor exactitud la resistencia al corte de las discontinuidades. Uno de estos trabajos es el hecho por Barton (1973), el cuál menciona que la variable i del criterio bilineal resultaba casi imposible de estimar si no se llevan a cabo ensayos de corte, de esta manera dicha variable es sustituida por una nueva expresión que involucra dos nuevas variables: JRC y JCS. Estas dos variables buscan caracterizar la rugosidad y la resistencia a la compresión de las paredes de las discontinuidades y caracterizan cuantitativamente, junto a Φ_b , el ángulo máximo de fricción que se pueda tener en ellas; Por efectos del presente trabajo no se ahondará demasiado en explicar la variable JCS.

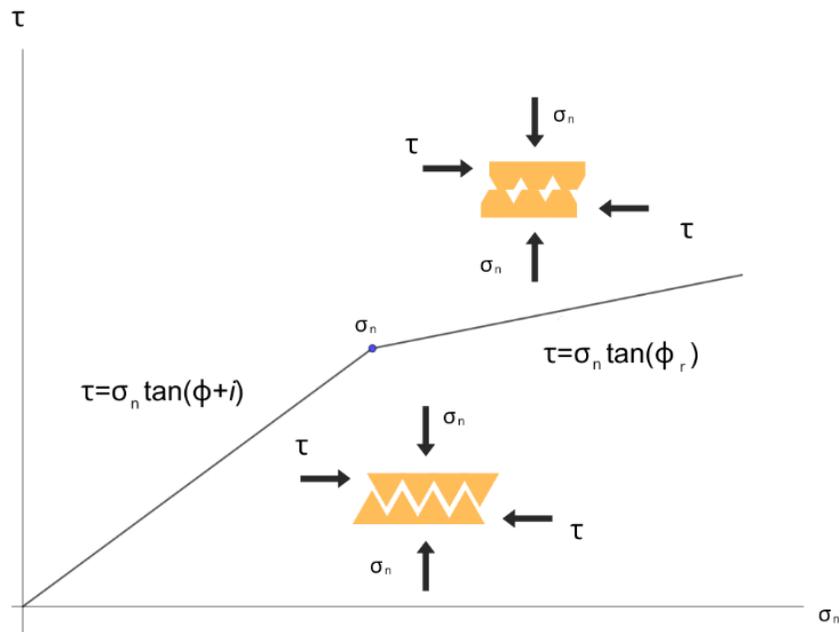


Figura 2.9. Criterio de rotura bilineal propuesto por Patton (1966), nótese el valor de σ_n en el cual se pierde la componente i de la expresión matemática y, por ende, un cambio abrupto en la pendiente de la recta. Modificado de Gonzalez de Vallejo (2002).

De esta manera, Barton propone su propio criterio para la caracterización de la resistencia al corte de las discontinuidades modificando la expresión del criterio bilineal de Patton:

$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan \left[(JRC) \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \Phi_b \right]$$

Donde:

- τ = Esfuerzo cortante resultante
- σ_n = Esfuerzo normal efectivo
- JRC = Coeficiente de rugosidad de la discontinuidad
- JCS = Resistencia efectiva a la compresión en la pared de la discontinuidad
- Φ_b = Ángulo promedio de fricción básico

El JRC no es más que una variable que busca caracterizar a la rugosidad. Barton lo define como un grupo de valores que buscan representar qué tantas irregularidades pueden estar presentes en las paredes de las discontinuidades, siendo 20 el valor máximo para este coeficiente y que representa a una pared que cuenta con gran cantidad de irregularidades y siendo 0 el valor mínimo, que representa a una pared prácticamente sin irregularidades: una discontinuidad completamente plana.

En su trabajo, Barton únicamente menciona que para su obtención se requiere conocer los valores de τ , σ_n , JCS y Φ_b , estos valores medidos a partir de pruebas in situ deben ser sustituidos dentro de la expresión que despeja al JRC como variable desconocida. Es preciso explicar en este punto que el valor de JCS es reportado como una cuarta parte del valor de la resistencia a la compresión de discontinuidades sin alteración, cuestión que es analizada con mayor detalle por Barton y Choubey (1977) en donde se introduce el uso de la prueba con el martillo de Schmidt para su obtención más precisa.

Hasta este punto el JRC era un valor que únicamente podía ser obtenido posterior a la realización de pruebas en las discontinuidades, debido a esto algunos trabajos posteriores se han encargado de brindar algunos métodos que permitan su estimación directa y con cierta precisión sin tener que depender directamente de otras variables antes descritas

2.4.1. Método de Barton y Choubey

La obtención del valor del JRC tuvo una actualización presentada por Barton y Choubey (1977). Para esto, los autores se encargaron de realizar pruebas con ayuda de cajas de cizalla en muestras de 136 discontinuidades naturales para así poder obtener los valores de las variables dependientes de la ecuación y obtener los JRC correspondientes a dichas discontinuidades; previo a la realización de las pruebas se obtuvieron, con ayuda del peine de Barton, perfiles que mostraran las irregularidades presentes en las discontinuidades y así poder realizar una correlación con los valores de JRC obtenidos con las pruebas.

Una vez obtenidos los valores, estos fueron separados en rangos de 2 unidades comenzando con los valores de 0-2 hasta llegar a los valores de 18-20, adicionalmente se obtuvieron los perfiles más característicos de cada uno de estos rangos.

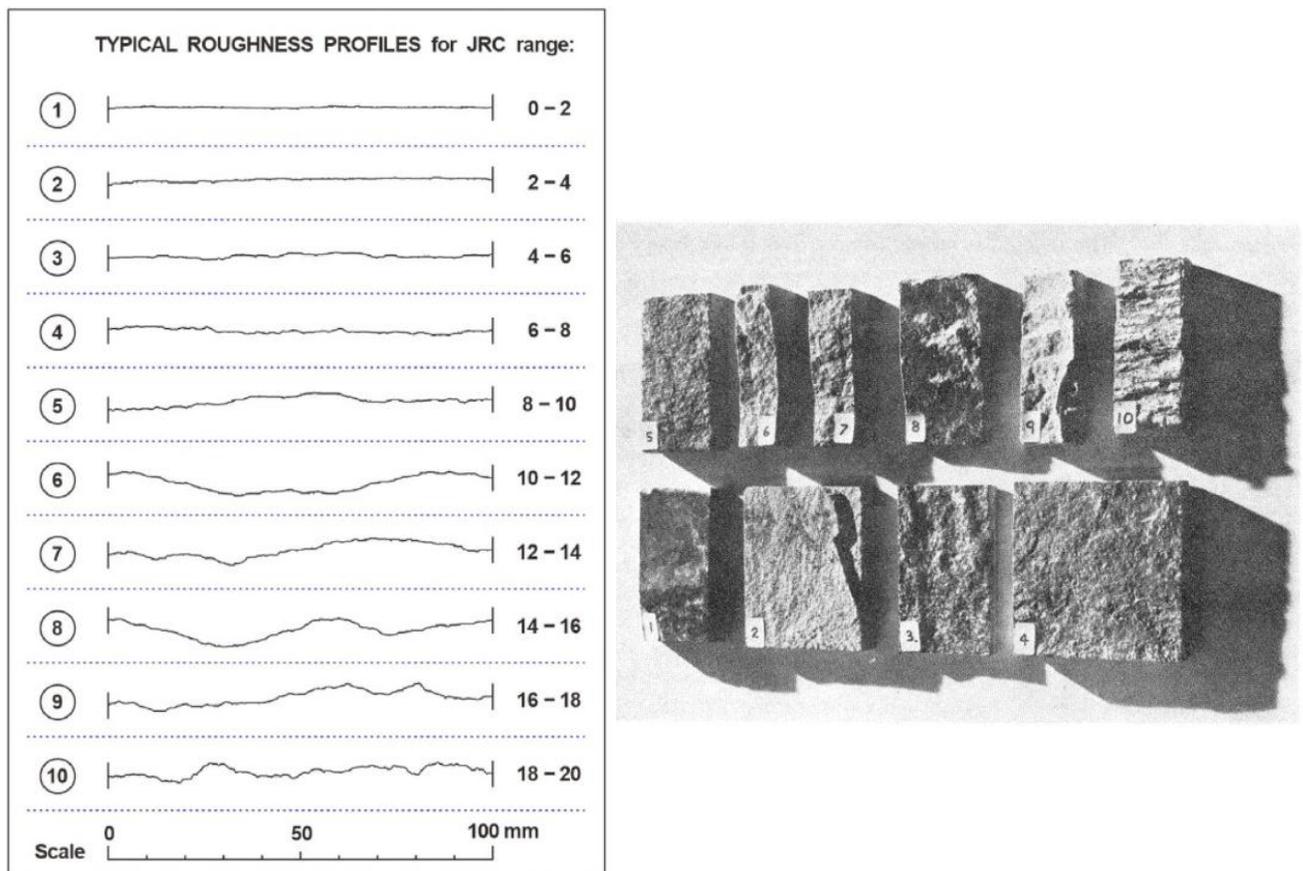


Figura 2.10. a) Relación de los 10 perfiles de rugosidad base, obtenidos por Barton y Choubet (1977), con sus respectivos rangos de valores de JRC obtenidos mediante ensayos con cajas de cizallas. Barton et. al (2023)

b) Muestras de discontinuidades naturales de las cuales fueron obtenidos los diez perfiles de rugosidad base. Barton y Choubey (1977)

Como resultado se obtuvieron 10 perfiles característicos de entre 390 perfiles totales que podían ser utilizados para asignar valores de JRC a discontinuidades naturales de cualquier macizo rocoso de los cuales se tuvieran los perfiles de las irregularidades presentes, también llamados perfiles de rugosidad, mediante simple correlación visual (Figura 2.10). Si bien, gracias a este trabajo la variable JRC pudo comenzar a ser estimada sin la necesidad de depender de otras variables de la ecuación del criterio de Barton, surgía un nuevo problema con este método de obtención puesto que la correlación visual de perfiles de rugosidad puede ser subjetiva dependiendo de la experiencia de cada analista, además del claro problema de observar perfiles de rugosidad que no tengan una notable similitud con los perfiles base de este método o, en dado caso, que tengan una cierta similitud con alguno de los 10 perfiles base pero la rugosidad presente fuese muy diferente, lo cual conlleva a que se presenten situaciones en las cuales un mismo perfil de rugosidad pueda ser asignado a diferentes valores de JRC (Figura 2.11) (Beer et al., 2002; Alameda-Hernández et al., 2014); Garcia-Luna, 2023). Tse y Cruden (1979) describen perfectamente las implicaciones que pueden presentarse si existe diferentes valores de JRC asignados a un mismo perfil de rugosidad, los autores establecen que en general los valores de $\log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right)$, bajo el interés ingenieril, tienden a valer 3, por lo cual con una incertidumbre de solo una unidad de JRC conlleva directamente a tener diferencias de más del 10% en la estimación de la resistencia al corte con un JRC tan bajo como 10. Si en cambio tenemos incertidumbres más grandes, como por ejemplo asignar un valor de JRC de 11 cuando en realidad debería ser de 8, nos llevaría a sobrestimar la resistencia al corte en un 42%. Debido a esto, son varios los trabajos que se centran en obtener el JRC de una manera más precisa y objetiva para evitar todos los posibles errores por causa de alguno los puntos anteriores, centrando sus objetivos en una mejor caracterización de la rugosidad de los perfiles estudiados independientemente de su similitud con los perfiles propuestos por Barton y Choubey (1977) y aplicando nuevas metodologías que permitan un análisis más robusto y completo de las irregularidades de las discontinuidades sin importar su tamaño.

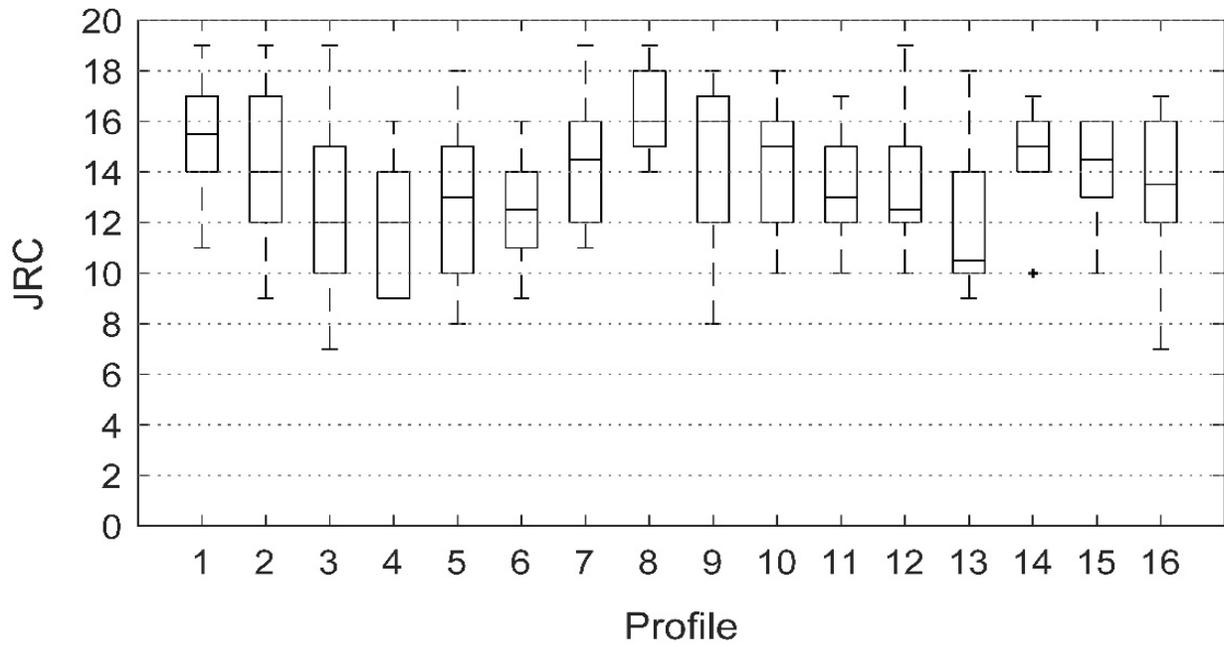


Figura 2.11. Visualización de los rangos de valores asignados a 16 perfiles de rugosidad por 14 personas especializadas en geotecnia, mostrando los diagramas de cajas y bigotes de cada uno. Se observa directamente que hay perfiles con diferencia de valores asignados de hasta 10 unidades de JRC. García Luna (2023)

2.4.2. Método de análisis fractal

Como se ha mencionado con anterioridad, las irregularidades presentes en las discontinuidades, que son plasmadas en los perfiles de rugosidad, son conceptualmente variaciones o alteraciones geométricas que se encuentran distribuidas a lo largo y ancho de las paredes que las delimitan.

Estas alteraciones son aquellas que hacen que las superficies de las paredes tengan un grado de variación respecto a los planos promedio que caracterizan la orientación de las discontinuidades. Es precisamente bajo este concepto que el análisis fractal de rugosidad entra en juego puesto que dentro de su desglose se recurre a la obtención de la dimensión fractal (D), la cual es conceptualmente la variación que tiene una curva, superficie, o volumen de asimilarse a una recta, plano o cubo (Li y Huang, 2015).

Li & Huang, (2015) realizaron un estudio en el cual comparan distintos métodos para poder obtener la Dimensión fractal; tales como el método Compass-walking, el cual se concentra en colocar una regla con una medida constante (r) que necesariamente toque, tanto al principio como al final, dos puntos contenidos en el perfil de rugosidad sin importar que exista contacto con puntos intermedios en la longitud total de la regla; a la par, se debe contar la cantidad total de veces (N) que se utilizó la regla para poder cubrir todo el perfil de rugosidad (Figura 2.12).

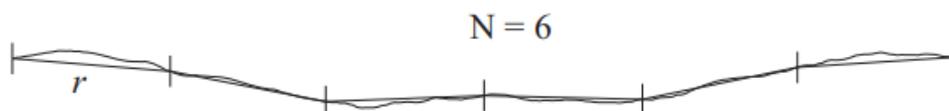


Figura 2.12. Ejemplo sobre la realización del método Compass Walking, donde la regla de dimensión r cubre 6 veces al perfil de rugosidad medido. Modificado de Li y Huang (2015)

Este procedimiento se debe repetir más veces, con una medida de regla cada vez menor, con el propósito de obtener puntos que puedan ser ploteados en un gráfico que grafique el $\log N$ vs $\log r$. Dado que existe una relación inversamente proporcional entre N y r , la

pendiente de la recta que caracterice a estos puntos debe ser negativa y denotada como $-D$:

$$-D = \frac{\Delta \log N}{\Delta \log r}$$

Algunas variaciones de esta expresión agregan nuevas variables o constantes tales como f , que es la distancia sobrante del perfil de rugosidad que no cuenta que la dimensión constante de la regla, o como que evalúa la ecuación de acuerdo con 1-D

Otro enfoque para obtener la dimensión fractal se obtiene basándose en el método h-L propuesto por Xie and Pariseau (1994) (Figura 2.13), el cual se centra en la utilización de las irregularidades de orden mayor, es decir, enfocándose directamente en aquellas irregularidades que se observen como las de mayor influencia o presencia dentro del perfil de rugosidad. De acuerdo con esto, la expresión para poder obtener la dimensión fractal del perfil se basa en dos variables: h y L , las cuales se centran en obtener los valores promedio de las amplitudes y las longitudes de las irregularidades de primer orden

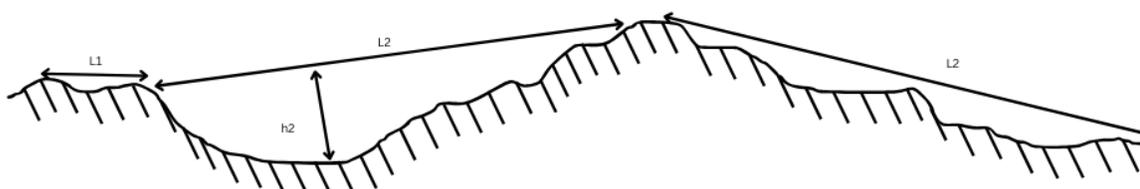


Figura 2.13. Procedimiento para la realización del método h-L mencionado por Xie y Pariseu (1994)

Este último enfoque resulta tener un problema muy similar al visto en el método de obtención de Barton-Choubey puesto que cada analista puede tener una visión diferente sobre las irregularidades que pueda determinar como de primer orden, por ello (Li & Huang, 2015) proponen colocar una recta horizontal en el perfil analizado como se muestra en la figura para poder evaluar las irregularidades que tienen un mayor grado de presencia

Diversos autores, a partir de estos enfoques proponen sus propias expresiones matemáticas en función de D para poder obtener un valor de JRC adecuado para los perfiles que se estén analizando. A pesar de utilizar un parámetro que caracteriza con mayor precisión la rugosidad de una discontinuidad, los trabajos comparados muestran ciertas inconsistencias entre sí, aun cuando algunos de estos autores utilicen un mismo enfoque, como por ejemplo que las rectas obtenidas por sus expresiones propuestas se desfasen entre sí y que, por supuesto, para un mismo valor de D , su valor de JRC sea distinto (Figura 2.14)

Uno de los problemas observados y quizá de los que más influyen en esta discrepancia de acuerdo a Li y Huang (2015) es que no todos los autores utilizan los mismos perfiles de rugosidad para analizar ni los mismos métodos de obtención de JRC para poder generar una correlación matemática. Algunos autores siguen realizando una comparación visual de sus perfiles para poder correlacionarlos con la dimensión fractal de estos y algunos otros utilizan métodos estadísticos, lo cual lleva por supuesto la posible subestimación o sobreestimación del parámetro JRC.

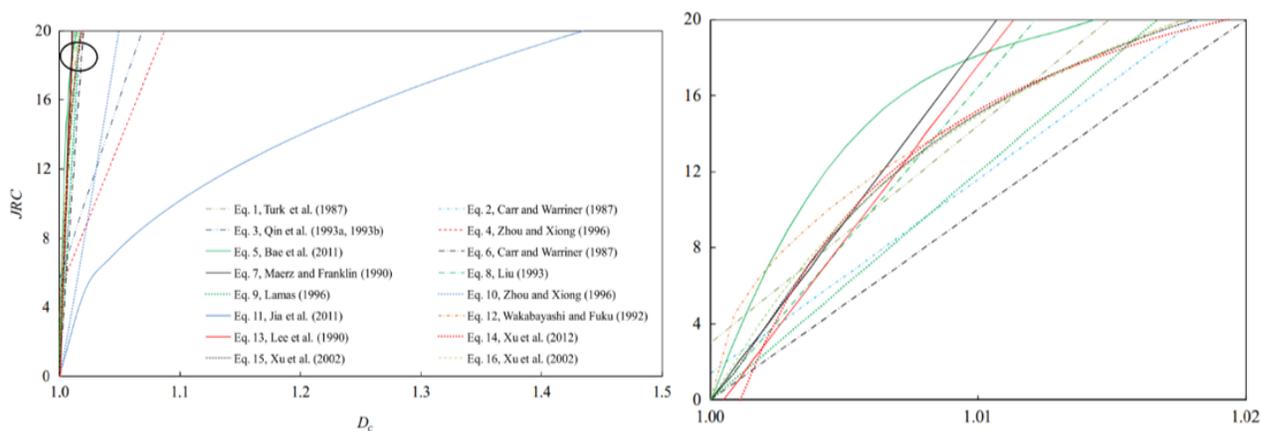


Figura 2.14. Comparación de las diferentes expresiones basadas en el método D para la obtención del JRC, se puede observar la discrepancia de ellas a determinados valores de D , la gráfica del lado derecho corresponde a la zona delimitada en negro de la gráfica del lado izquierdo. Tomado de Li y Huang (2015).

Debido a estas inconsistencias Li y Huang (2015) proponen sus propias ecuaciones para obtener el JRC con D como su variable independiente y muestran una cierta consistencia

con algunos trabajos anteriores como los propuestos por Maerz and Franklin (1990), (Liu, n.d.) y Lee et al. (1990) observadas en la Figura 2.14

Una de las ventajas de estas nuevas ecuaciones es la cantidad de perfiles de rugosidad utilizados para obtener sus dimensiones fractales puesto que de esta manera tiene un mayor rango de datos que beneficia por supuesto a obtener un modelo matemático más robusto. Los valores de JRC únicamente son obtenidos de la literatura de cada uno de los perfiles de rugosidad; es necesario por ende observar si la obtención de los valores de JRC por distintos métodos, previo al análisis fractal, puede influir en la firmeza de este modelo matemático.

2.4.3. Método de la raíz de la media cuadrática

Una de las grandes deficiencias del método de análisis fractal recae en su incapacidad de analizar con detalle la caracterización de las pequeñas irregularidades que están presentes en las discontinuidades. De acuerdo con la IRSM (1978) la rugosidad se divide en dos grupos importantes: La rugosidad primaria u ondulación la cual define la geometría general de la discontinuidad que se está analizando, y la rugosidad secundaria o microrugosidad que se refiere a la distribución de pequeñas irregularidades geométricas superpuestas en la rugosidad primaria. El problema con esta definición recae en la misma situación general del criterio de Barton-Bandis, ya que la diferencia entre rugosidad primaria y secundaria depende del criterio de cada observador y por ende no hay un criterio matemático que permita realizar ese análisis con el rigor necesario.

Un método, sustentado directamente por una relación matemática, es el análisis mediante la raíz cuadrada media. Dicho método propone que todo perfil de rugosidad analizado contiene una línea central horizontal que corta al perfil en dos partes, superior e inferior, las cuales, al momento de obtener áreas contenidas entre la línea central y los respectivos límites del perfil, contienen valores de área iguales. La raíz cuadrada media de un perfil de rugosidad es posible obtenerlo, de acuerdo con (Myers, 1962), con la siguiente expresión:

$$RMS = \left[\frac{1}{M} \int_0^M y^2 dx \right]^{\frac{1}{2}}$$

Donde: M es el número de mediciones a lo largo del perfil
 y es la amplitud del perfil medido desde la línea central
 dx es la distancia horizontal constante entre mediciones

El valor RMS es de acuerdo con Tse & Cruden (1979) es una manera muy práctica de caracterizar la rugosidad ya que mide la desviación media que tenga un perfil de rugosidad a partir de la línea central horizontal que lo atraviesa; Sin embargo, plantea directamente que muchos perfiles de rugosidad pueden llegar a tener el mismo valor de RMS aun cuando estos tengan características geométricas diferentes. Por ende, propone tres formas

adicionales de obtener el RMS, obtenidas a partir de la primera y segunda derivada del perfil de rugosidad (Z_2, Z_3) y una adicional que relaciona las longitudes de los segmentos positivos y negativos del perfil (Z_4), las expresiones para cada una de ellas se muestran a continuación:

$$Z_2 = \left[\frac{1}{L} \int_0^L \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 dx \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Z_3 = \left[\frac{1}{L} \int_0^L \left(\frac{d^2y}{dx^2} \right)^2 dx \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$Z_4 = \frac{\sum(\Delta x_i)_p - \sum(\Delta x_i)_n}{L}$$

A partir de esto, cada forma específica de obtener el RMS puede ser empleada para observar una característica particular de los perfiles; Tse & Cruden (1979) realizaron una serie de observaciones relacionadas directamente con los RMS propuestos por Myers (1962) y las posibles correlaciones que pudieran tener con la obtención del JRC de los perfiles de rugosidad; dichos autores realizan su análisis tomando en cuenta únicamente los 10 perfiles estándar que presentan Barton & Choubey (1977), a partir de los resultados de cada una de las variables medidas en los perfiles, se realizaron una serie de regresiones lineales para observar el grado de correlación que pudiese observarse, de esta manera concluyen que una de las mejores maneras de obtener el JRC es realizando con el parámetro Z_2 puesto que su coeficiente correlación es muy cercano a la unidad.

A partir de este trabajo, muchos otros investigadores se dieron a la tarea de observar las correlaciones que Z_2 pudiese tener con la obtención del JRC; una de las grandes deficiencias del trabajo de Tse & Cruden (1979) es la limitada cantidad de datos que se utilizaron durante sus observaciones, además de la obtención de puntos a lo largo de los perfiles de rugosidad ya que eligieron alargar los perfiles 2.5 veces a lo largo y ancho, lo cual genera una errónea caracterización puesto que se podría sobrestimar la rugosidad de los perfiles analizados de acuerdo a lo observado por Yu y Vayssade (1991).

Dicha sobreestimación puede observarse de la siguiente manera, si la expresión utilizada para obtener el parámetro Z_2 se observara como una sumatoria sería posible observarla de la siguiente manera

$$Z_2 = \left[\frac{1}{L} \sum_{l=1}^{N-1} \frac{(y_{i+1}-y_i)^2}{(x_{i+1}-x_i)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Dado que la longitud de los perfiles estándar fue ampliada 2.5 veces, esta ahora tendría un valor de 25 cm. Aunado a lo anterior, Tse & Cruden (1979) mencionan que la separación horizontal entre los puntos analizados fue de 1.27 mm, es decir 0.508 mm de separación en sus dimensiones reales. Si observamos dichas diferencias en la expresión matemática observaríamos lo siguiente. Yu y Vayssade (1991) de igual manera hacen énfasis en que la frecuencia en el muestro de los perfiles afectaría directamente en la obtención de Z_2 , y por ende llevaría a la sobreestimación de los valores de JRC.

En este caso, el desarrollo de las expresiones para obtener Z_2 , son de suma importancia para establecer los posibles errores que pudiese conllevar usar lo definido por Tse & Cruden (1979). Para ello se muestra los análisis de un perfil hipotético de 100 mm de largo y expandido a 250 mm con un mismo intervalo de separación entre puntos.

$$\begin{aligned} Z_2 &= \left[\frac{1}{100mm} \sum_{l=1}^{N-1} \frac{(y_{i+1}-y_i)^2}{1.27 mm} \right]^{\frac{1}{2}} & Z_2 &= \left[\frac{1}{250mm} \sum_{l=1}^{N-1} \frac{(2.5 (y_{i+1}-y_i))^2}{1.27 mm} \right]^{\frac{1}{2}} \\ Z_2 &= \left[\frac{1}{100mm \cdot (1.27 mm)} \sum_{l=1}^{N-1} (y_{i+1} - y_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} & Z_2 &= \left[\frac{2.5^2}{250mm \cdot (1.27 mm)} \sum_{l=1}^{N-1} (y_{i+1} - y_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ Z_2 &= \left[\frac{1}{127 mm^2} \sum_{l=1}^{N-1} (y_{i+1} - y_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} & Z_2 &= \left[\frac{2.5}{127 mm^2} \sum_{l=1}^{N-1} (y_{i+1} - y_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ Z_2 &= [0.0078mm^2 \sum_{l=1}^{N-1} (y_{i+1} - y_i)^2]^{\frac{1}{2}} & Z_2 &= [0.019 mm^2 \sum_{l=1}^{N-1} (y_{i+1} - y_i)^2]^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

Una de las observaciones más claras de acuerdo con los resultados de las expresiones anteriores es que el intervalo de medición, así como la manipulación en las dimensiones reales de los perfiles, influyen ampliamente en los valores Z_2 que se obtienen de un mismo

perfil. Por ello es necesario contemplar en todo momento las restricciones que cada autor emplea durante sus observaciones para evitar errores durante los procesos de medición. Li y Zhang (2015) realizan una revisión de diversas ecuaciones que intentan correlacionar Z_2 con la obtención del JRC (Figura 2.15), entre ellas se puede observar que únicamente durante cierto intervalo de valores (0.15 – 0.30), las ecuaciones tienden a tener consistencia entre ellas.

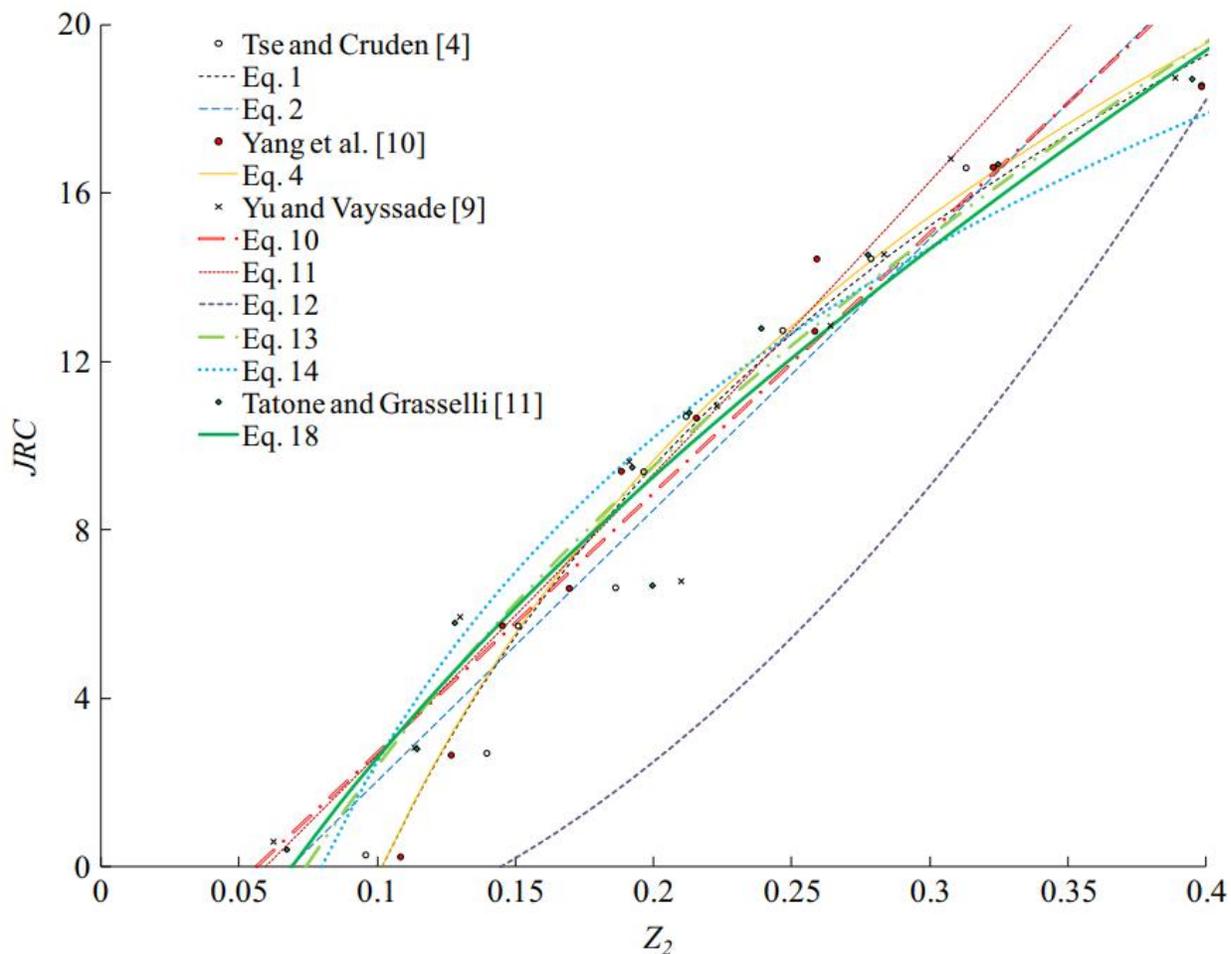


Figura 2.15. Comparación de las diferentes expresiones basadas en el uso de Z_2 para la obtención del JRC, observando un intervalo de consistencia entre 0.15 y 0.30 de Z_2 . Li y Zhang (2015).

Sin embargo, un nuevo problema surge de las ecuaciones de la Figura 2.15, ya que todas ellas emplean únicamente para su análisis los diez perfiles estándar propuestos por (Barton & Choubey, 1977). En este caso Li y Zhang (2015) consideran que el número de datos empleados son insuficientes para proponer correlaciones confiables. Planteando esta

problemática, los autores decidieron tomar en cuenta 112 perfiles de rugosidad que cuentan con datos de JRC obtenidos directamente de pruebas de corte directo en discontinuidades y un rango de longitudes de entre 72 a 119.6 mm. Ningún cambio en las dimensiones originales de los datos empleados fue realizada

De entre los varios parámetros empleados para caracterizar la rugosidad de los perfiles, Z_2 continuó siendo una de las mejores maneras de estimar el JRC, puesto que, de acuerdo con los autores, el coeficiente de correlación de las ecuaciones que lo emplearon tuvo valores de 0.8843 y 0.8760, siendo la ecuación lineal la que obtuvo mejores resultados. Dichas ecuaciones, con sus respectivos rangos de valores de Z_2 posibles se muestran a continuación:

$$JRC = 55.7376 Z_2 - 4.1166$$

$$JRC = 99.718 Z_2^{1.6833}$$

$$Z_2 = 0.074 - 0.433$$

$$Z_2 = 0.00 - 0.387$$

Li & Zhang (2015) además puntualizan que únicamente la segunda ecuación es capaz de brindar un JRC igual a cero, el cual describe a un perfil de discontinuidad planar o cuasi planar, por lo cual el uso de esta ecuación es mayormente recomendado para estas situaciones.

Los autores enfatizan directamente que sus análisis fueron realizados generando un muestro con puntos de medición separados cada 0.4 mm; por ello, los autores concluyen que una investigación más ardua sobre las frecuencias de muestreo y su efecto en la estimación del JRC, además de la influencia de las longitudes de los perfiles, debe ser realizado.

La finalidad de este trabajo, por ende, será la observación de los rangos de JRC que pueda tener un mismo perfil de rugosidad variando su frecuencia de muestreo de entre 0.4 mm hasta 1 mm. Además, se observará de igual manera la influencia que pueda tener la longitud de los perfiles de rugosidad en la obtención de este mismo valor.

3. Objetivos e hipótesis

3.1. Objetivos

El presente trabajo tiene como los siguientes objetivos:

- Reconocer la viabilidad del uso de drones dentro de la reconstrucción fotogramétrica de superficies con el fin de obtener perfiles de rugosidad de superficies de discontinuidad en macizos rocosos y comparar su semejanza con aquellos obtenidos mediante el uso del peine de Barton, para posteriormente.
- Obtener restituciones fotogrametricas a dos distintas distancias cámara-objeto, tres y seis metros respectivamente, con el fin de observar su influencia en la calidad de las restituciones fotogramétricas.
- Obtener el Joint Roughness Coefficient (JRC) por medio de la raíz de la media cuadrática de los perfiles de rugosidad, mediante la expresión propuesta por Li & Zhang (2015) y analizar los cambios que puedan observarse en los resultados como consecuencia del uso de distintas frecuencias de muestreo y longitudes en los perfiles.

Es importante mencionar que la metodología de extracción de perfiles presentados en este trabajo solo serán validos en discontinuidades en las cuales su superficie se encuentre al descubierto, ya que solo de esta manera es posible obtener los perfiles de rugosidad de validación con ayuda del peine; además las estimaciones del JRC serán realizadas en superficies aleatorias del afloramiento, sin llegar a estudiar específicamente el valor promedio de esta variable de una o varias familias de discontinuidades específicas.

3.2. Hipótesis

El uso de la fotogrametría digital con dron acompañada de un sistema de posicionamiento RTK permite la obtención de modelos fotogramétricos a gran detalle, sin embargo, la precisión en la reconstrucción de superficies puede variar en función de la distancia cámara-objeto a la que se obtengan las fotografías destinadas a este proceso, tendiendo a sobre-subestimar ciertas áreas de la superficie, y por ende tener influencia en el siguiente punto:

- La estructura general de los perfiles de rugosidad obtenidos con nubes de puntos

generadas a distintas distancias cámara-objeto será muy similar, sin embargo, se podrá observar cierta variación entre ellos. Es probable que los perfiles extraídos de modelos 3D más alejados del afloramiento presenten una mayor diferencia con los perfiles obtenidos con peine de Barton.

Además, variar la frecuencia de muestreo y las longitudes de análisis en el método propuesto por Li y Zhang (2015) tenderá a tener repercusiones en la estimación del JRC, es probable que, a mayores valores de frecuencia, se obtenga una estimación errónea de dicho valor. Esta misma situación puede ocurrir al momento de variar las longitudes de los perfiles a analizar.

4. Metodología.

4.1. Planeación

Para la realización del presente trabajo se llevó a cabo la caracterización de un afloramiento de roca basáltica ubicado en las cercanías del estadio olímpico universitario dentro de Ciudad Universitaria, UNAM (Figura 4.1). Este afloramiento, conocido coloquialmente como La Escuelita, es una pared de roca que cuenta con planos de discontinuidad muy variables, dicho afloramiento fue utilizado anteriormente por Villareal-Rubio (2019) para la evaluación de la orientación de discontinuidades, por lo cual se busca que sirva como referente para este trabajo con el fin de evaluar la rugosidad de las discontinuidades ya evaluadas.

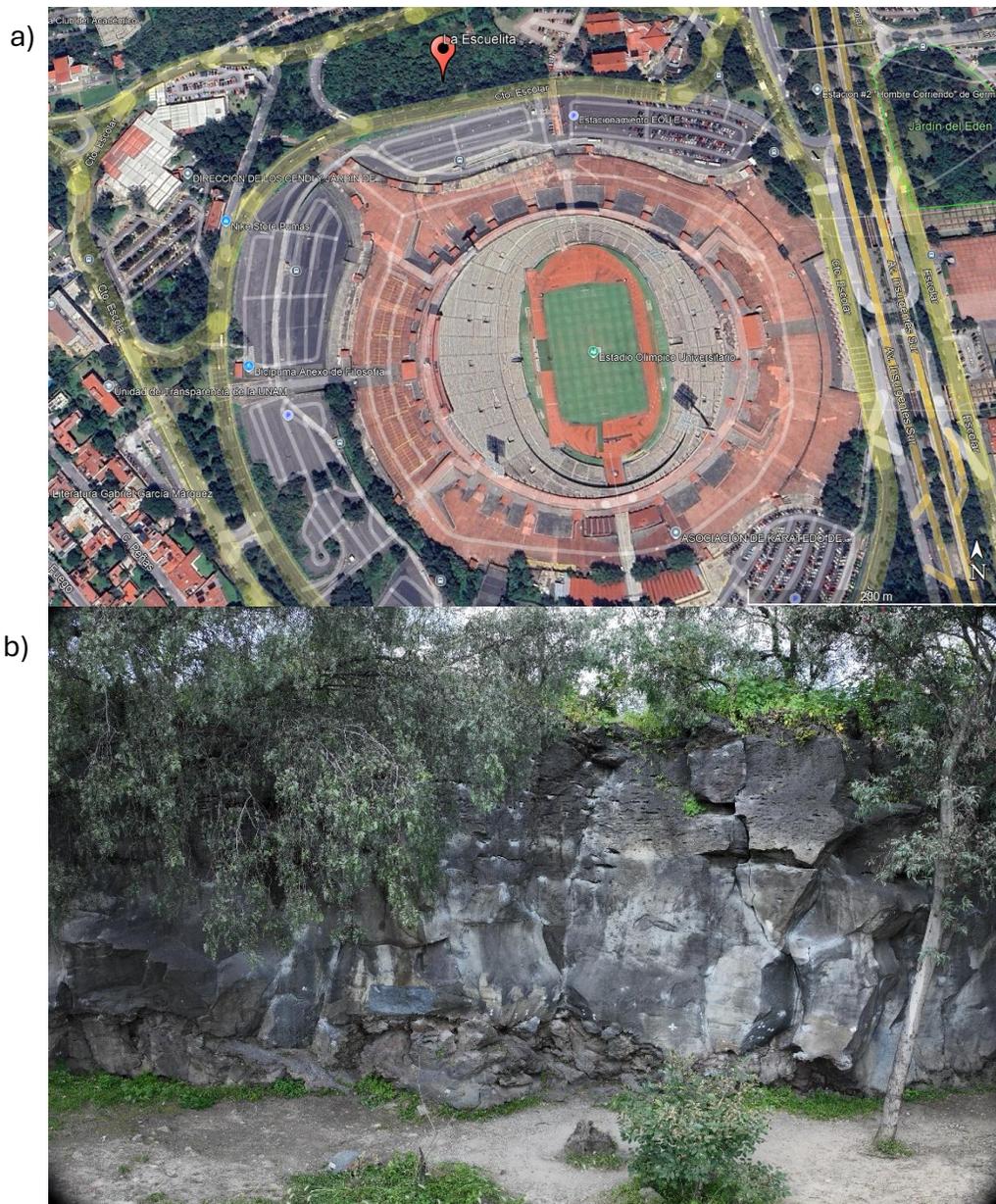


Figura 4.1. a) Ubicación de La Escuelita, b) Vista frontal del afloramiento de roca basáltica La Escuelita, dicha pared es usada constantemente para actividades de escala deportiva.

Este autor, dentro de su trabajo, enlista una serie de pasos para la obtención de fotografías destinadas a ser usadas en procesos fotogramétricos y ciertas metodologías para un desarrollo y reconstrucción tridimensional optima de un afloramiento, las cuales sirven como referencias importantes para este trabajo.

Para el caso de la medición de rugosidad es recomendable caracterizarla a lo largo y ancho de nuestro afloramiento puesto que es necesario observar la pericia de las nubes de puntos en la reconstrucción superficial. En este caso no es necesaria la elección de una dirección preferente para nuestras mediciones y por ende los lugares y direcciones de medición fueron escogidos durante la campaña de caracterización de afloramiento. Las zonas y la caracterización de la rugosidad son explicadas a mayor detalle más adelante.

4.2. Adquisición de perfiles de rugosidad y fotografías

Como se mencionó en capítulos anteriores, la manera más convencional de evaluar la rugosidad de una discontinuidad, y basándonos directamente en lo propuesto por Barton & Choubey (1977) es obtener perfiles de rugosidad de las discontinuidades que se estén evaluando con ayuda del peine de Barton (Figura 4.2), para ello basta con colocar el peine de Barton directamente en la pared de la discontinuidad y generar presión para que la herramienta tome la forma de la rugosidad de la zona evaluada. Para fines de este trabajo se marcaron seis pares de marcadores en diferentes zonas del afloramiento La Escuelita que sirven como delimitadores para obtener perfiles rugosidad que funcionen como datos de validación para ser comparados con perfiles obtenidos con nubes de puntos de las mismas zonas delimitadas. El proceso de colocación de marcadores se realizó previo a la obtención de fotografías debido a que los mismos deben aparecer en la nube de puntos para reconocer los lugares en los cuales fue realizada la medición, además también sirven como referencias longitudinales ya que cuentan con una longitud específica que permite detectar la existencia de deformaciones de área en nuestro modelo tridimensional.



Figura 4.2. Obtención de perfiles de rugosidad mediante el uso del peine de Barton en las zonas de validación escogidas para su uso en este trabajo.

Una vez realizada la obtención de perfiles de rugosidad en afloramiento, se procedió a realizar la obtención de fotografías de la pared de roca. Con el objetivo de poder observar diferencias de acuerdo con la distancia desde donde se obtengan las fotografías del

afloramiento, se decidió trabajar con fotografías obtenidas a tres y seis metros de distancia de la pared de roca.

Previamente al despliegue del dron, se realizó una corrección de posicionamiento global para minimizar el error de coordenadas que pudiese generar el GPS integrado de nuestro equipo, para ello se utilizó una antena RTK REACH RS2+ (Figura 4.3). La antena RTK (Real Time Kinetic) tiene una serie de pasos a seguir para poder realizar en mayor medida correcciones de posicionamiento para obtener fotografías con coordenadas conocidas y precisas, esto con el fin de reconstruir tridimensionalmente nuestro afloramiento con la mayor fidelidad posible. Los pasos se enlistan a continuación:

- La antena RTK debe ser posicionada sobre un soporte rígido, en nuestro caso un trípode para evitar que sufra movimientos bruscos durante su funcionamiento. Además, debe colocarse en un lugar con el cielo despejado casi en su totalidad para evitar interferencias en las señales satelitales que captura la antena.
- Una vez colocada en un soporte rígido, se debe asegurar que la antena esté nivelada, esto se puede realizar perfectamente con los niveles de burbuja que los trípodes tienen integrados. Además, debe registrarse la altura que existe entre el suelo y la antena para mejorar la precisión de sus correcciones.

Posteriormente, se puede optar por escoger dos maneras distintas de comenzar a obtener correcciones de coordenadas. La primera es haber colocado la estación sobre un punto con coordenadas ya conocidas que sirvan como punto de partida para las correcciones.

- Si no existiese un punto conocido previamente, la estación puede determinar su posición inicial promediando las señales satelitales que recibe, este proceso puede llegar a tardar algunos minutos.
- Para comenzar con este paso es necesario tener en un dispositivo móvil la aplicación EMID FLOW para poder enlazarse, por medio de señal Wi-Fi, con la antena y así poder registrar las correcciones de posicionamiento que realice.



Figura 4.3. Antena RTK REACH RS2+ durante el proceso de corrección de coordenadas dentro de las instalaciones del estadio olímpico universitario.

Una vez realizada la corrección de posicionamiento, es posible comenzar con el proceso de corrección de coordenadas global para así poder tener datos con un posicionamiento de mayor precisión. La aplicación permite escoger el tiempo en el cual la antena puede trabajar en la corrección de posición mediante las señales satelitales que pueda recibir en el sitio donde hay sido colocada. Para este caso de estudio se le permitió trabajar a la antena durante 20 minutos.

Una vez realizado este proceso, es necesario conectar el control del dron a la señal emitida por nuestra antena mediante Wi-Fi, lo cual permitirá enlazar las correcciones hechas con anterioridad y que sean usadas durante la toma de fotografías para que estas contengan una georeferenciación propia y sirvan durante el procesado de las nubes de puntos.

Una vez medidas las distancias ya mencionadas con ayuda de un flexómetro, se comenzó con el despliegue del Dron DJI MAVI 3 , Villareal Rubio (2019) menciona el uso de planes de vuelo para drones con el fin de realizar una obtención de fotografías automático y preciso, sin embargo es posible realizar la toma de fotografías de manera manual siempre

y cuando el operador cuente ya con experiencia en vuelos de drones para de esta manera obtener un número considerable de fotografías que permitan una reconstrucción precisa del afloramiento.

Para la reconstrucción tridimensional del afloramiento se obtuvieron un total de 260 y 236 fotografías para la obtención de las nubes de puntos a tres y seis metros del objeto, respectivamente (Figura 4.4). A partir de estas fotografías fue necesaria la elección de solo algunas de ellas para ser usadas, por lo que únicamente se empleó una línea de fotografías puesto que el objetivo de este trabajo, a pesar de buscar caracterizar la rugosidad en discontinuidades, no busca analizar por completo cada una de las discontinuidades presentes, sino únicamente algunas de ellas; esta línea de fotografías pertenece a la zona más baja del afloramiento en el cual era posible obtener datos de campo sin ningún riesgo.

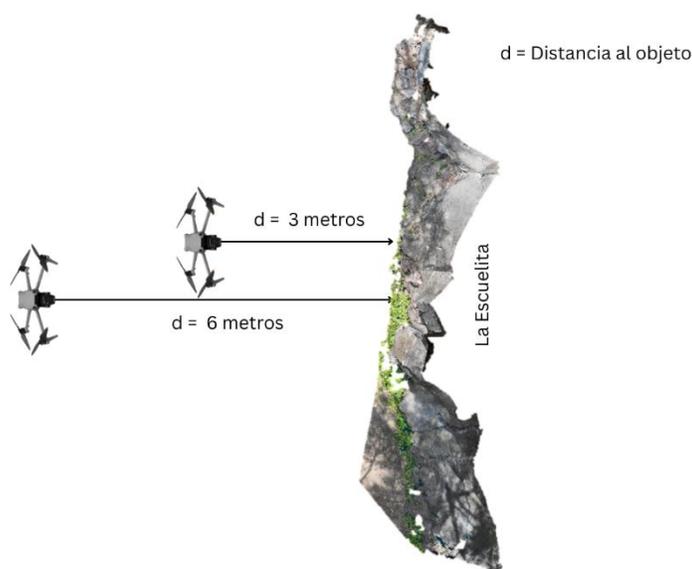


Figura 4.4. Diagrama que muestra las distancias entre el objeto y el dron con el cual se obtuvieron las fotografías que fueron usadas en el procesamiento fotogramétrico.

4.3. Procesamiento fotogramétrico.

Una vez concluida la caracterización del afloramiento La Escuelita y con la obtención de fotografías finalizadas, fue necesario evaluar la cantidad de fotografías que serían empleadas para la reconstrucción fotogramétrica; los criterios principales para la elección se basaron principalmente en que contuvieran los marcadores usados para la delimitación de los perfiles de rugosidad además de pertenecer a la primera línea de fotografías obtenidas durante el vuelo de dron. En total se seleccionaron 120 fotografías para las nubes de puntos a tres y seis metros

Una vez seleccionadas las fotografías se procedió a emplear el software *Agisoft Metashape* (Figura 4.4), el cual incluye al algoritmo SfM para la reconstrucción tridimensional y obtención de nubes de puntos. Dicho software trabaja mediante un proceso específico que permite analizar las fotografías elegidas como parte de un *chunk*, es decir, una unidad de procesamiento específica dentro de un proyecto, el cual permite separar los datos de entrada, procesos y resultados de un procesamiento fotogramétrico específico. Esto es de gran ayuda si se presenta el caso de requerir procesar grupos de fotografías de diferentes sitios o que tengan diferencias en la distancia a la cual fueron tomadas, como es el caso de este trabajo.

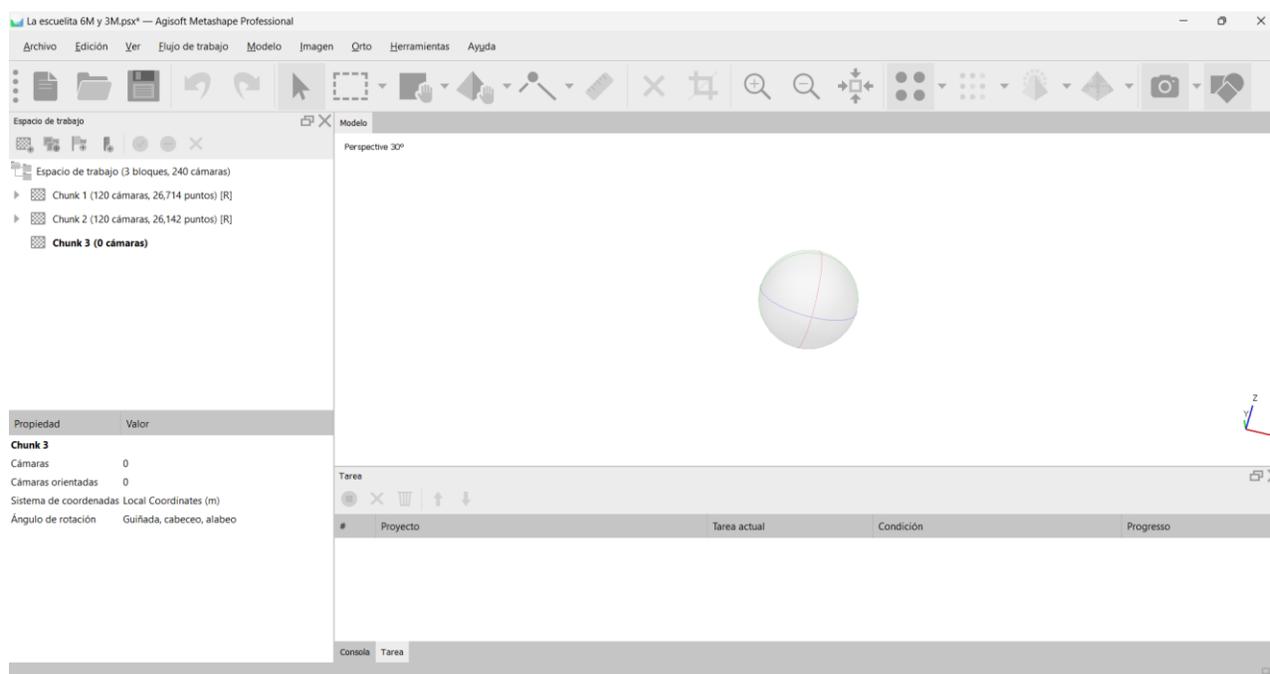


Figura 4.4. Interfaz de Agisoft Metashape, a la izquierda se pueden observar los dos *chunks* destinados al procesamiento de las nubes de puntos a tres y seis metros de La Escuelita.

De esta manera, las fotografías seleccionadas fueron agregadas a un chunk. Una vez realizado este proceso es necesario establecer la georeferenciación de las fotografías con el fin de poder obtener productos que cuenten con un sistema de coordenadas global específico. Debido a que las fotografías ya cuentan con datos de georeferenciación gracias a la antena RTK que fungió como apoyo para su obtención, es posible realizar una georeferenciación directa haciendo uso del sistema de referencia utilizado durante el trabajo de obtención y trasladarlo a un sistema de coordenadas de nuestra preferencia en caso de requerirlo. El sistema de coordenadas México ITRF2008 fungió como el sistema de referencia base del dron, pero para fines prácticos este fue proyectado hacia el sistema México ITRF2008/UTM zona 14N para fungir como el sistema de coordenadas de las nubes de puntos finales.

Inmediatamente después de realizados estos ajustes a los chunks pertenecientes a las fotografías tomadas a tres y seis metros de distancia del objeto, se procedió a realizar el alineamiento de fotografías, proceso que se encarga de reconocer coincidencias en ellas y determinar su posición relativa en el espacio, esto con el fin de generar una reconstrucción fiel y a escala real del afloramiento. Con el fin de mantener una calidad estándar en este paso, se decidió trabajar con una calidad de alineación alta.

Una vez terminado el proceso de alineación, se generará una nube de puntos de nuestro afloramiento con una densidad de puntos baja que nos permitirá no solamente observar la forma general del afloramiento y detectar posibles anomalías o errores de reconstrucción, sino también eliminar puntos pertenecientes a objetos que, si bien aparecen en las fotografías procesadas, no representan una parte fundamental de la zona de interés y que por lo tanto se puede prescindir de ellos.

Previo a la generación de los productos finales del procesamiento, es necesario contemplar que la reconstrucción de un afloramiento puede llegar a sufrir distorsiones en sus dimensiones reales si únicamente se utilizan las fotografías, y sus coordenadas, para la obtención de una nube de puntos. Un paso fundamental para evitar estos problemas es añadiendo una serie de puntos de control con coordenadas específicas que permitan ajustar las dimensiones de las nubes de puntos finales. Dado que La Escuelita ya fue analizado en su momento por Villareal-Rubio (2019), este autor muestra una serie de diez

puntos de control distribuidos en toda la extensión del afloramiento. Y de los cuales únicamente se utilizaron cinco de ellos (cuatro en la nube de puntos más cercana) debido a que la zona de estudio solo contempla una fracción de la extensión analizado por el mismo autor. Los puntos de control y su ubicación pueden observarse la Figura 4.5.

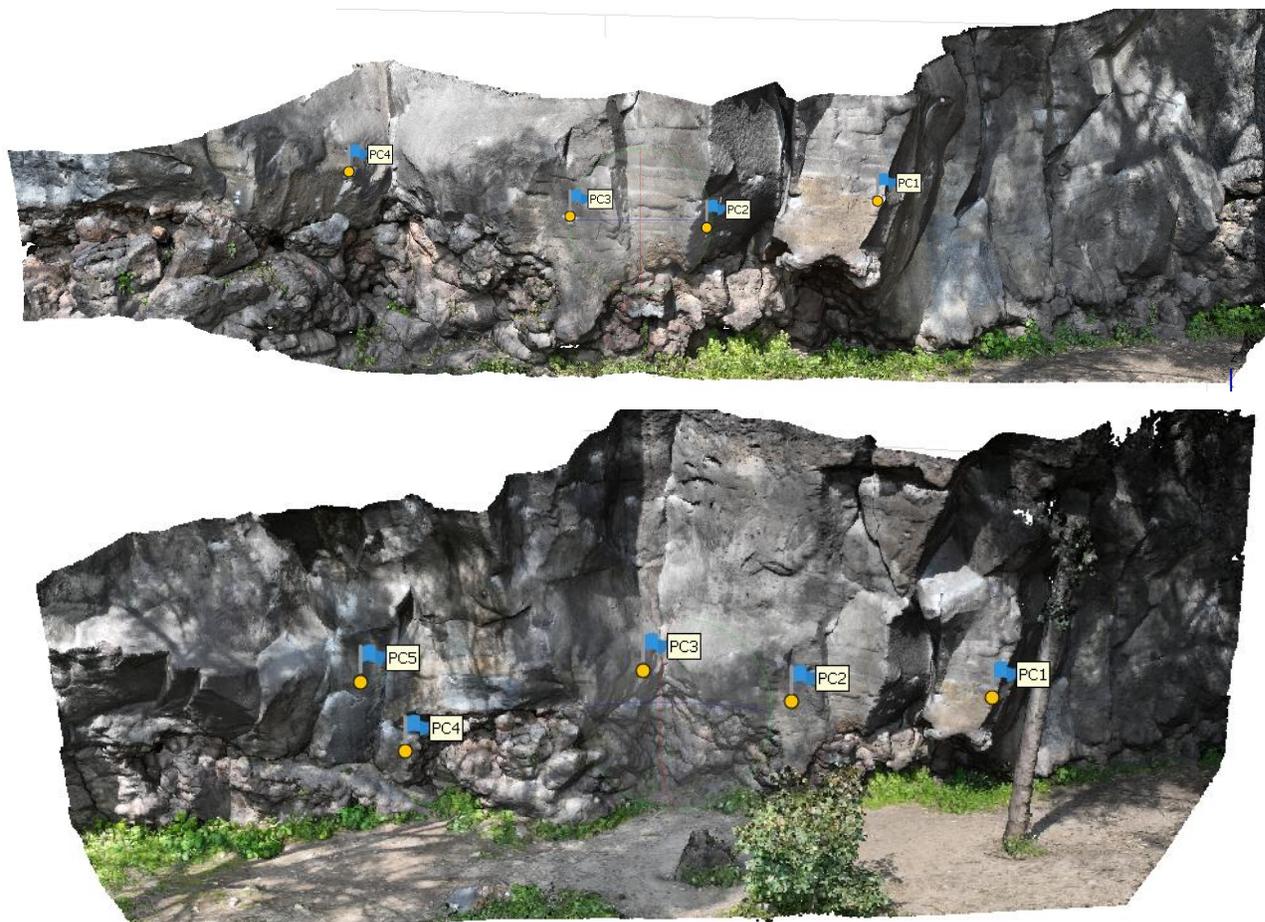


Figura 4.5. Ubicación de los puntos de control utilizados para la reconstrucción de La Escuelita

Una vez obtenida la nube de puntos base de cada una de las distancias, es posible generar una nube de puntos densa que permita realizar una reconstrucción fiel y precisa, sin embargo, es necesario seleccionar la calidad de procesamiento con la cual se generará. De forma general las diferencias que puedan observarse entre modelos obtenidos a distintas calidades son mínimas. Una manera de observar a distorsiones en la reconstrucción de las nubes de puntos es observar las estadísticas de reconocimiento (Figura 4.6), en ellas podemos observar que la reconstrucción hecha con fotografías más alejadas del afloramiento sufre una distorsión considerablemente mayor en sus

dimensiones que su contraparte más cercana, esto podría acarrear problemas tanto en la reconstrucción de las superficies como en la longitud de los perfiles de validación.

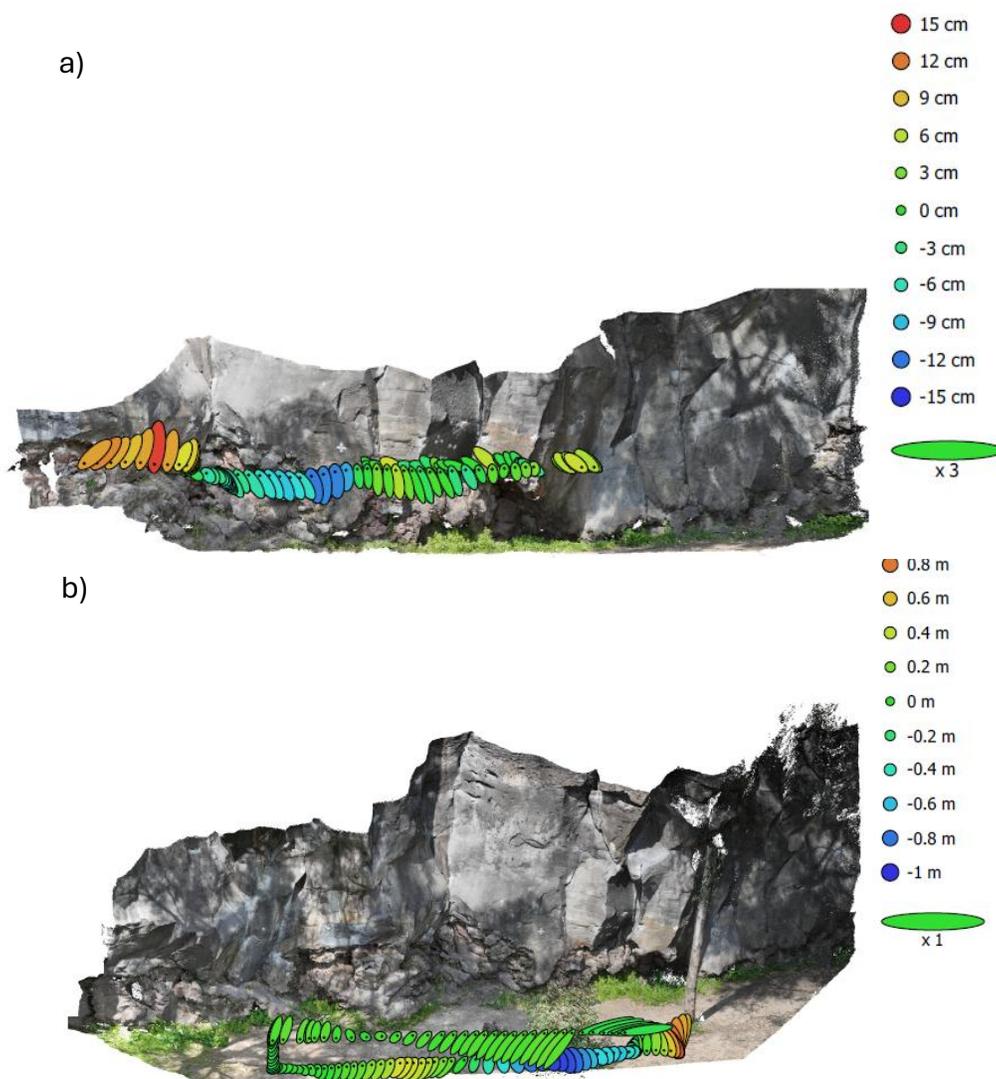


Figura 4.6. Estadísticas de reconocimiento de La Escuelita, a) 3 m y b) 6m. Los colores representan los errores en Z, mientras que la forma de las elipses denota la distorsión en XY. Nótese la gran diferencia de escala y formas de las elipses

Este trabajo se centra directamente en observar las diferencias a escalas centimétricas-milimétricas, y para observar el nivel de distorsión que pudiera observarse en la reconstrucción se decidió obtener un total de seis nubes de puntos densas, divididas evidentemente en dos grupos asociados a las distancias de obtención de las fotografías, pero que pertenezcan a tres tipos de procesado diferente: Media, Alta y Ultra-alta definición.

Los tiempos de procesado se muestran en la Tabla 4.3.1

Tabla 4.1 Tiempos de procesamiento asociados a cada una de las seis nubes de puntos obtenidas en Agisoft Metashape.

Distancia/Calidad	Media	Alta	Muy alta
3 metros	15 minutos	30 minutos	45 minutos
6 metros	8 minutos	26 minutos	35 minutos

Es importante mencionar que los tiempos de procesado pueden ser menores o mayores dependiendo directamente de la capacidad de procesado y características de la computadora con la que se esté llevando a cabo el procesado. En el caso de este trabajo la computadora utilizada cuenta con un procesador Intel Core i9-13900KF, una GPU NVIDIA RTX 3060 con 12 GB de VRAM y memoria RAM de 64 GB. Una computadora con características inferiores a la utilizada en este trabajo tendrá por ende tiempos de procesado mayores. Es debido a esto que la configuración recomendada por el propio software denota la importancia del uso de equipos con procesadores Intel i7 o Ryzen 7 en adelante, además de GPU's que cuenten con una VRAM de más de 4 GB y memoria RAM de 32 GB.

Posterior a la obtención de las seis nubes puntos es necesario exportarlas a un archivo de texto (.txt) que permita guardar los datos de coordenadas y valores RGB de cada uno de los puntos generados, con la intención de poder manipular las nubes puntos en otros softwares y herramientas afines a los propósitos de este trabajo

4.4. Obtención de perfiles de rugosidad con nube de puntos

En este punto es necesario describir dos procesos que son necesarios para la caracterización de la rugosidad. El primero involucra utilizar una de las seis nubes de puntos generadas para ser procesada en la herramienta DSE (*Discontinuity Set Extractor*) (Figura 4.7), presentada por Riquelme-Guil (2016), la cual nos permitirá obtener la orientación de las familias de discontinuidades que puedan estar presentes en nuestro afloramiento, esto con la finalidad de reconocer los planos en los cuales se concentran los perfiles de validación obtenidos durante el trabajo de campo.

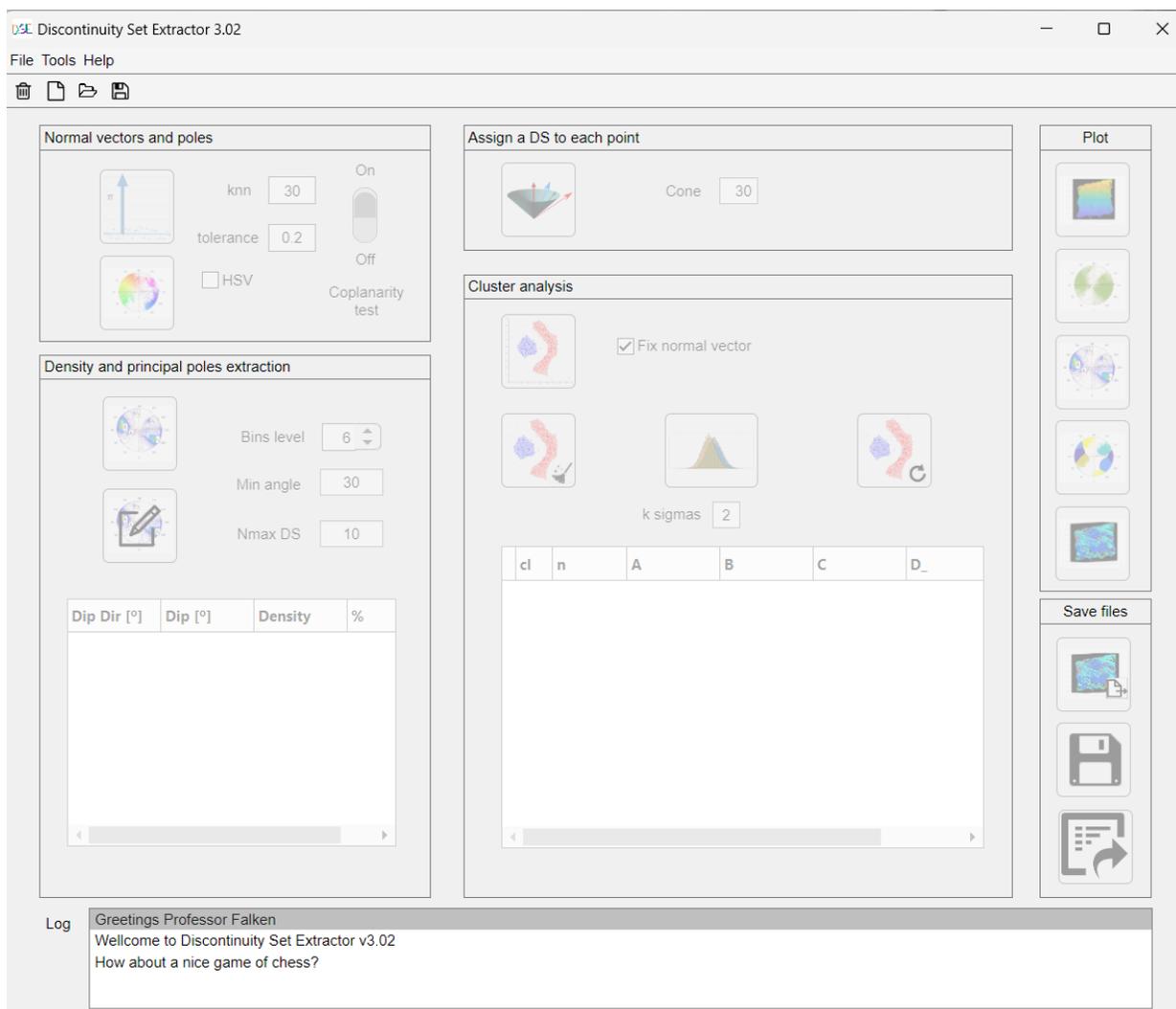


Figura 4.7. Interfaz de la herramienta *Discontinuity Set Extractor* (DSE), a partir de ella será posible obtener los datos de familias de discontinuidades en La Escuelita.

DSE es una herramienta programada dentro del entorno de MATLAB que basa su funcionamiento en un criterio de normales asociadas a puntos (Figura 4.8) para caracterizar las familias de discontinuidades, el cual parte de la definición de que cualquier plano de discontinuidad está integrado, en el caso de nubes de puntos, por puntos que tienen asociadas a ellos normales con una orientación igual o muy similar, por ende es necesario calcular las normales a todos los puntos de nuestra nube de puntos y agruparlos según sean las características de sus vectores normales.

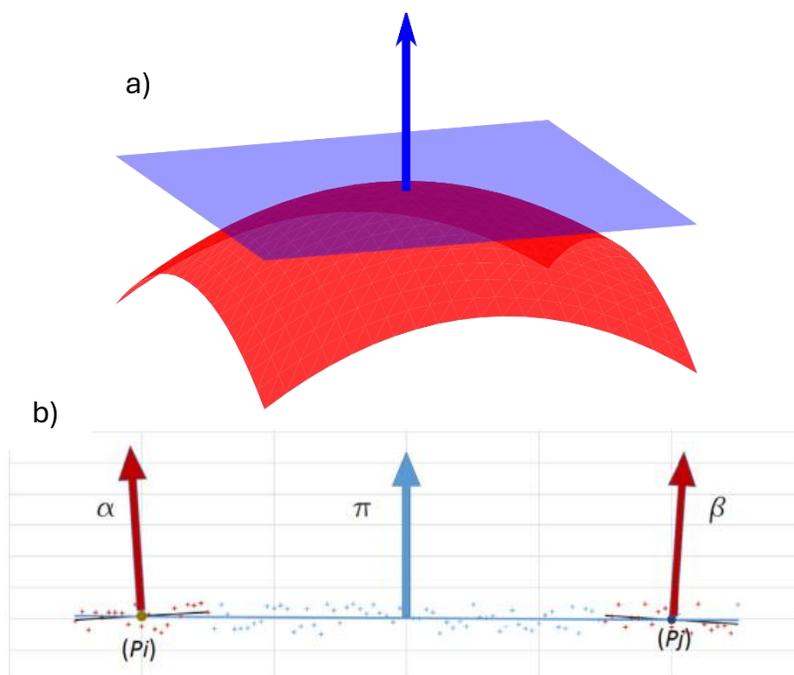
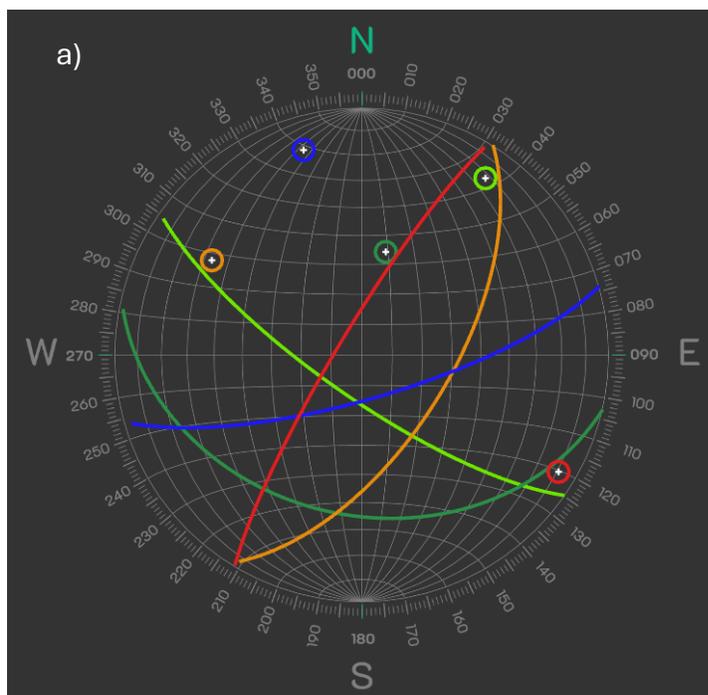


Figura 4.8. a) Visualización del concepto de vectores normales a una superficie. Obtenido de Yang et al. (2017), b) Conjunto de vectores normales asociadas a puntos que se diferencian entre sí por su orientación. Obtenido de Riquelme et al (2014)

Es importante mencionar que el criterio de normales, aplicado a un plano cualquiera que no cuente con irregularidades geométricas en el área que ocupa, contará con normales asociadas a sus puntos con una orientación perfectamente igual; sin embargo, para el caso de planos de discontinuidad de origen geológico es común observar que las superficies que las forman no son completamente superficies planas y en cambio cuentan con una gran cantidad de irregularidades geométricas que al momento de ser reconstruidas por fotogrametría, tendrán puntos dentro de ellas que no necesariamente tendrán normales con una misma orientación pero que sin embargo, es similar. Debido a lo anterior la propia herramienta permite determinar diez familias de discontinuidades con un rango de

diferencia de orientación de normales de 30° como base, sin embargo, tanto el número de familias como el rango de diferencia de orientación de normales pueden ser modificados de acuerdo con las necesidades de quien realiza el análisis.

El análisis hecho a La Escuelita mantuvo la cantidad de familias como también el rango de diferencia base que presenta DSE, sin embargo, se eliminaron algunas de ellas manualmente debido a su baja densidad de polos. Como resultado se obtuvieron las familias de discontinuidades que se muestran en la Figura 4.9.



Familia	Color	Dip Direction	Dip
1	Blue	164°	75°
2	Green	193°	35°
3	Red	215°	76°
4	Yellow	122°	61°
5	Orange	301	82°

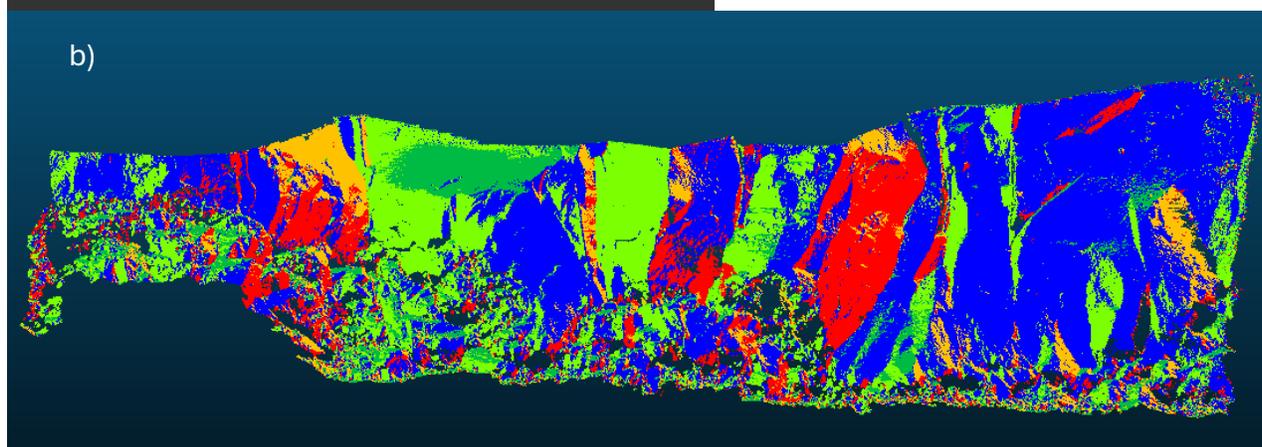


Tabla 4.9. a) Estereograma que muestra a las familias de discontinuidades presentes en La Escuelita
 b) Visualización de familias de discontinuidades en la nube de puntos.

Dado que el afloramiento presenta una nula vegetación, no se requirió una limpieza previa de la nube de puntos. Uno de los objetivos de analizar la orientación de las discontinuidades presentes en el afloramiento es reconocer la orientación de los planos que contienen a nuestros datos de validación para que de esta manera podamos obtener correctamente los perfiles de rugosidad de dichas zonas.

Posteriormente a la obtención de la orientación de las familias de discontinuidades, se realizó una serie de recortes, llevados a cabo en el software *CloudCompare*, a cada una de las seis nubes de puntos que se realizaron, los cuales corresponden a los planos en los cuales se llevaron a cabo las mediciones de perfiles de rugosidad con el peine de Barton, dichas zonas se muestran en la Figura 4.10; Para este punto del trabajo es pertinente mencionar el uso de códigos elaborados en la interfaz de MATLAB como parte de nuestro análisis de rugosidad. Como ya se ha mencionado, un perfil de rugosidad registra las irregularidades geométricas que puedan estar presentes en un plano de discontinuidad, sin embargo, estas irregularidades pueden definirse también como cambios de elevación dentro de una zona de estudio, tal y como se observa en perfiles topográficos obtenidos para la evaluación de los cambios de relieve en un terreno específico de estudio.

Si observamos detenidamente, estos registros de elevación a escala centimétrica-milimétrica requieren por ende que los planos de discontinuidades, o al menos los planos generales que las caracterizan, no tengan ninguna inclinación preferente; es decir que se debe buscar una manera en la cual los planos inclinados puedan ser modificados, sin comprometer sus dimensiones, para que puedan observarse como planos completamente o cuasi-horizontales, modificando automáticamente las coordenadas de los puntos debido a su rotación en el espacio.

Una de las ventajas de la utilización de *CloudCompare* en la manipulación de nubes de puntos no solo recae en su capacidad de generar nubes de puntos menos densas a las originales o en la realización de segmentos específicos de las mismas como se ha mencionado con anterioridad, sino que también permite realizar la rotación y traslación de nubes de puntos empleando métodos matemáticos en las cuales se manipula a los planos de discontinuidad haciendo uso de los valores de rumbo y echado.

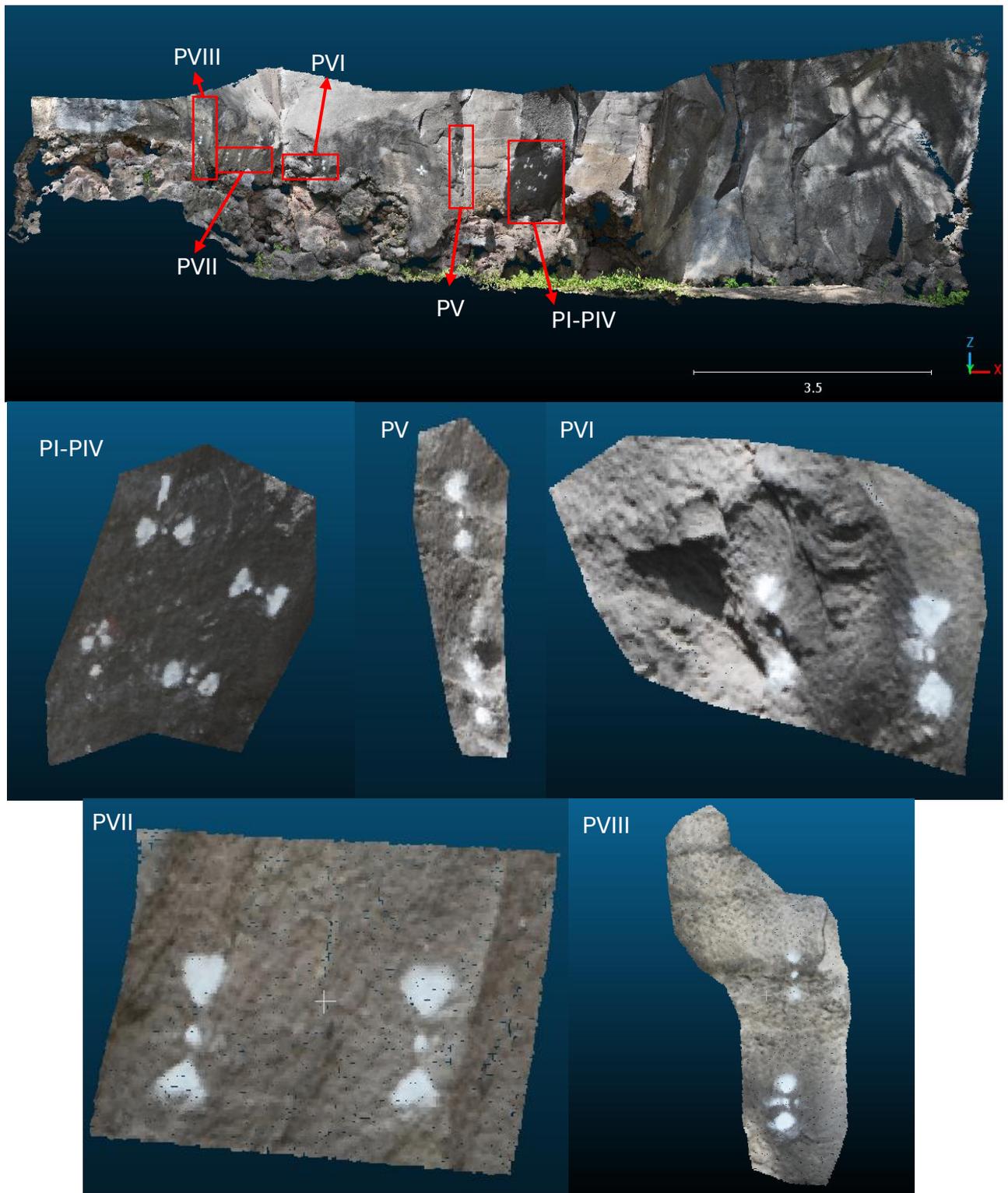


Tabla 4.10. Zonas de validación con los marcadores que delimitan a los perfiles de rugosidad, de izquierda a derecha y de arriba abajo, Las zonas de validación en afloramiento y en recortes individuales que contienen a los PI-PIV, PV, PVI, PVII y PVIII

Por efectos de la caracterización de la rugosidad nuestros planos de discontinuidad no requieren de alguna traslación en el espacio, y por ende los datos de dip y dip direction serán aquellos que brinden la información necesaria para la rotación de nuestros planos, dichos datos pueden ser manipulados de dos distintas maneras; La primera recae en realizar la rotación mediante el uso de los ejes x,y,z para realizar mediante pasos la rotación de nuestro plano, generando una rotación en primer lugar respecto al eje z tantos grados como tenga el rumbo respecto al E, lo cual permita alinear la dirección del echado con el eje x, y posteriormente realizar una rotación respecto a y los grados que tenga nuestro plano analizado, dichas rotaciones pueden observarse en la Figura; La segunda forma de manipular nuestros planos de discontinuidad es mediante el uso de matrices de rotación, las cuales permiten realizar la rotación automática sin el uso de rotaciones individuales por cada eje, por ende, es necesario definir a las matrices de rotación.

De acuerdo con Lengyel (2012), una matriz de rotación es una transformación lineal que rota vectores alrededor de un punto de referencia específico, conservando la longitud de estos y los ángulos que se forman entre ellos; estas características, por lo tanto, evitan que nuestros planos se deformen al momento de llevarse a cabo este procedimiento, y por lo tanto no comprometen la veracidad de las longitudes registradas en los perfiles de rugosidad o en cualquier otra medición en ellos que sea dependiente de ellas.

Una matriz de rotación es una matriz del tipo 3x3 que, además, tiene las características de tener un determinante igual a 1.0, lo cual determina una rotación pura, y la propiedad $R^T \cdot R = I$, la cual determina la preservación de los objetos que sufren la rotación.

Cada eje coordenado tiene una matriz de rotación específica que cumple con la característica de generar una rotación de nuestro objeto alrededor de él, tantos grados como sean requeridos; estas matrices son denotadas de la siguiente manera:

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Estas matrices de rotación generan un movimiento angular antihorario de los objetos con los cuales se están trabajando siempre y cuando el valor angular registrado en las operaciones de la matriz sea positivo, de lo contrario se registrará una rotación en sentido horario. Estas características de la rotación de objetos es una parte fundamental dentro de este trabajo puesto que, con el fin de obtener direcciones de medición de perfiles de rugosidad fáciles de obtener, se procederá a generar dos rotaciones en torno a los ejes y y z. Esto con el fin de que la dirección del echado de nuestro plano sea directamente paralela al eje x, lo anterior únicamente por convención de este trabajo.

Para poder realizar dicha rotación de nuestro plano es necesario considerar el uso de las matrices de rotación $R_z(\theta)$ y $R_y(\theta)$, ambas matrices pueden ser aplicadas individualmente a nuestros planos de discontinuidad, siempre y cuando la matriz de rotación en torno a z sea aplicada en primera instancia, puesto que ella se encargará de alinear el rumbo de nuestros planos con el eje y, lo cual permitirá tener una rotación fiel en torno a este mismo eje que de como resultado la perfecta posición horizontal final de los planos para poder analizar los perfiles de rugosidad.

Sin embargo, es posible agrupar ambas matrices en una sola, lo cual aligere el proceso de rotación y realizarlo en un único paso. La matriz de rotación en torno a y y z se expresa de la siguiente manera:

$$R_y(\theta_y) * R_z(\theta_z) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_y) * \cos(\theta_z) & -\cos(\theta_y) * \sin(\theta_z) & \sin(\theta_y) \\ \sin(\theta_z) & \cos(\theta_z) & 0 \\ -\sin(\theta_y) * \cos(\theta_z) & \sin(\theta_y) * \sin(\theta_z) & \cos(\theta_y) \end{bmatrix}$$

Cabe recalcar que en este caso el orden de la multiplicación de ambas matrices importará demasiado puesto que esta operación con matrices no cuenta con la propiedad de

conmutación, por lo cual para asegurarnos de que la primera rotación sea en torno a z , su matriz debe multiplicar a la matriz de $R_y(\theta)$ y no viceversa. Es pertinente mencionar que la matriz en la cual deben sustituirse nuestros valores dentro de la interfaz de *CloudCompare* es del tipo 4×4 , sin embargo, esto se debe a que la cuarta columna y fila representan a los vectores de traslación y a un elemento que permita preservar las propiedades de la transformación en coordenadas homogéneas. Sin embargo, debido a que no se hace uso de la traslación, en este caso dicha columna quedará representada únicamente con ceros.

Una forma rápida y factible de calcular los elementos de nuestra matriz de rotación 3×3 , es realizando las operaciones mediante un código escrito dentro de la interfaz de MATLAB que permita introducir los valores angulares necesarios para obtener la rotación que requerimos, la cual tiene como objetivo que la dirección original del echado quede paralela al eje x ; por ello es necesario contemplar ciertos puntos al momento de ejecutar dicho código, los cuales se enlistan a continuación:

- Todas las rotaciones contemplan el uso de $z = 1$ y $y = 1$ como sus ejes de rotación
- Se debe contemplar cuántos grados de diferencia hay entre 90° y el dip direction de nuestro plano, la diferencia que exista es el valor angular que se debe contemplar en la matriz de rotación para el caso de z .
- Si existiera el caso de que nuestro plano tuviera un valor de dip direction entre 0° y 90° , lo que se debe realizar es contemplar la diferencia entre 90° y nuestro dip direction, tal y como se menciona en el punto anterior pero el valor angular necesita ser introducido como un valor negativo.
- Esto considerando que de esa manera el giro será horario, y por ende su dip direction será 90°
- Posteriormente, se debe contemplar el valor angular que permita a nuestro plano convertirse en un plano horizontal, en este caso la rotación en torno a y . Si se requiere observar la cara superior de nuestro plano, el valor para realizar las operaciones de la matriz debe ser negativo y será igual al valor del echado
- Si por el contrario nuestro fin es observar la cara inferior de nuestro plano, el valor angular corresponderá a la diferencia de grados entre 180° y nuestro valor de echado, y siendo positivo.

Una vez determinados los valores angulares que serán empleados en nuestra matriz de rotación, el código brinda la facilidad de pedir al usuario los valores de rotación en z y y para posteriormente entregar la matriz de rotación que deberá ser empleada. Dichos valores únicamente deben ser escritos dentro de la interfaz de CloudCompare que permitirá llevar a cabo el proceso.

La rotación del primer y segundo plano de análisis, así como su matriz de rotación pueden observarse en la Figura 4.11.

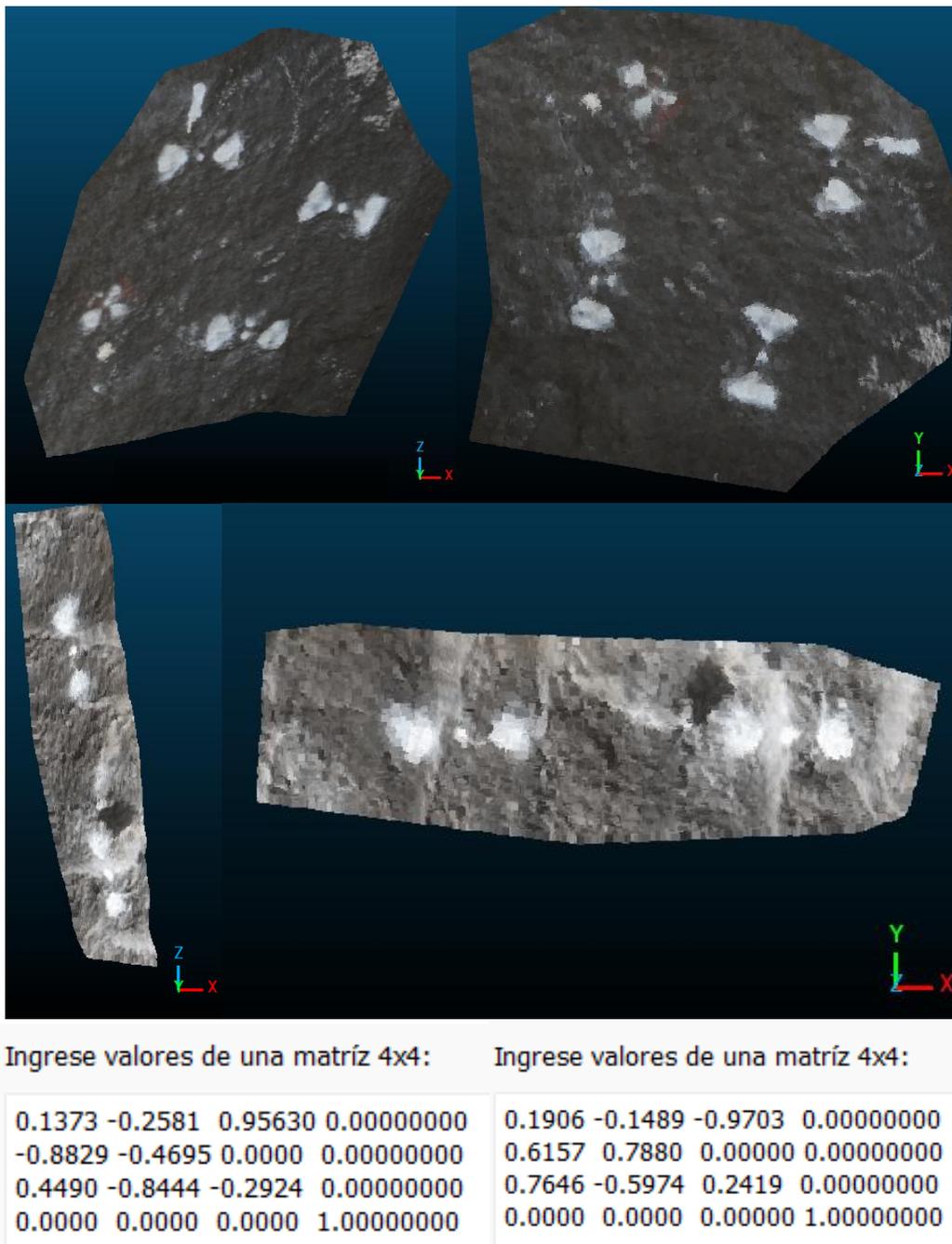


Figura 4.11. Zonas de validación originales y rotadas de los PI-PIV y PV con sus respectivas matrices de rotación ingresadas en *Cloud Compare*

Una vez echas las rotaciones a los 30 planos con datos de validación, estos cortes deben ser exportados a formatos de texto (.txt) que puedan ser utilizados en la extracción de perfiles de rugosidad. El uso de códigos elaborados dentro de la interfaz de MATLAB es una opción viable para la obtención de perfiles de rugosidad tal y como es mencionado por Garcia-Luna (2023), sin embargo, es preciso mencionar una restricción muy importante para su uso, los perfiles de rugosidad que deben ser obtenidos para su posterior análisis mediante la raíz media cuadrática requieren del uso de datos con un espaciamiento horizontal entre ellos constante. Tal y como se observa en la Figura 4.12, los espaciamientos entre puntos en nuestros planos de discontinuidad no tienen un distanciamiento horizontal uniforme entre ellos, por lo cual debe contemplarse directamente el empleo de una interpolación entre los puntos de la nube de puntos que permita obtener de perfiles de rugosidad con datos espaciados por una distancia horizontal constante. Debido a esto es de suma importancia considerar el método de interpolación a emplearse, haciendo un estricto énfasis en el sustento que científico que tenga el método seleccionado o bien que sea parte de algún software especializado en la obtención de perfiles de elevación (e.g. *MATLAB*, *CloudCompare*). Para este trabajo, la opción de utilizar una herramienta ya establecida en algún software resulta ser la opción más viable; *Cloud Compare* cuenta de igual manera con una herramienta que permite dibujar líneas sobre nuestras nubes de puntos y obtener perfiles de elevación mediante su uso.

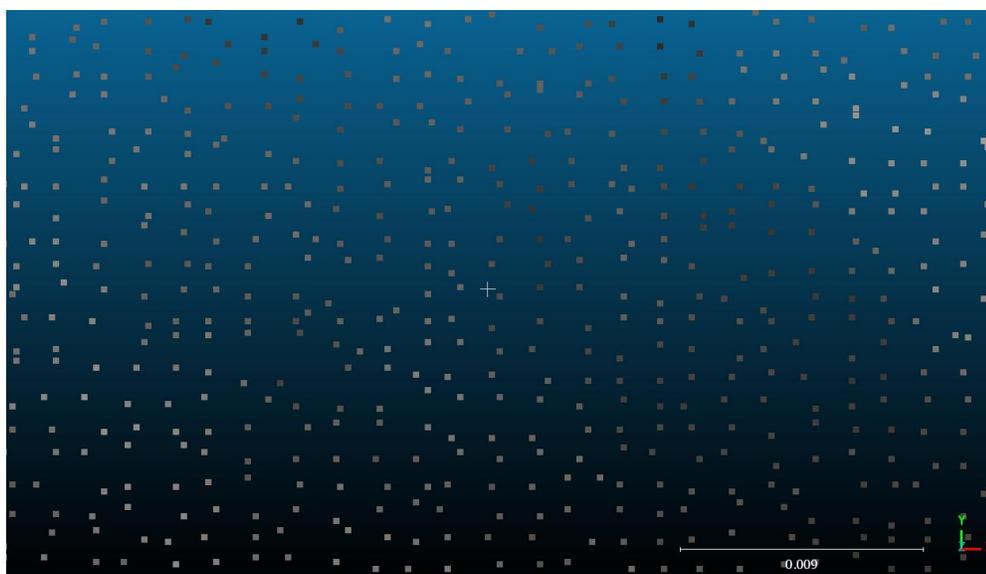


Figura 4.12. Relación de espaciamiento en el plano XY de los puntos que conforman al plano que contiene al PVI. La escala observada se encuentra en metros

Para obtener secciones, *CloudCompare* permite dibujar líneas de sección de las zonas donde las requerimos, estas líneas nos muestran la longitud que tengan en los puntos seleccionados, por ende, nos pueden servir también como indicadores de distorsión en las dimensiones del modelo tridimensional si se cuenta con datos de distancias reales. Debido a que conocemos las longitudes reales de nuestros perfiles, es posible realizar estas observaciones. Las longitudes de los perfiles se muestran en la Tabla 4.4.1

Tabla 4.2. Relación de las longitudes de las líneas de sección dibujadas dentro de las nubes de puntos en *CloudCompare*.

Perfil	Longitud real de sección	Distancia del afloramiento		Diferencia	
		3 metros	6 metros	3 metros	6 metros
I	27 cm	27.1 cm	27.2 cm	0.1 cm	0.2 cm
II	27.5 cm	27.4 cm	27.4 cm	0.0 cm	0.0 cm
III	25.5 cm	25.5 cm	25.6 cm	0 cm	0.1 cm
IV	29 cm	28.8 cm	29.2 cm	0.2 cm	0.2 cm
V	27 cm	27.2 cm	27.2 cm	0 cm	0 cm
VI	27 cm	26.9 cm	27.1 cm	0.1 cm	0.1 cm
VII	28 cm	27.9 cm	28.2 cm	0.1 cm	0.2 cm
VIII	28 cm	28.1 cm	28 cm	0.1 cm	0 cm

Mediante estas observaciones es posible determinar una cuestión muy importante, las nubes de puntos generadas a diferentes distancias del afloramiento muestran longitudes muy similares en cuanto a las longitudes de los datos de validación, por lo cual es posible realizar una comparación de la calidad de reconstrucción de superficie que cada una de ellas tenga.

El último paso es obtener los perfiles de rugosidad de las zonas de validación, para de esta manera poder determinar las diferencias que puedan existir entre los perfiles reales. *CloudCompare* resulta ser un software bastante versátil puesto que cuenta con una gran cantidad de herramientas como ha sido mencionado anteriormente; en este caso dicho software permite la rasterización de una nube de puntos con la herramienta Rasterize, la

cual permite la obtención de nuevas nubes de puntos rasterizadas que, a diferencia de las originales, tienen un espaciado constante entre puntos y por ende nos permite obtener datos certeros para su empleo en nuestro análisis.

Además, la herramienta Rasterize tiene la capacidad de manipular no solo la distancia entre puntos en nuestro raster, sino también de las dimensiones que tendrá, así como el método de interpolación que será utilizado. A partir de este punto resulta importante hacer una observación: ya que nuestras nubes de puntos son generadas a partir de coincidencias en nuestras fotografías, habrá zonas que por contrastes en la luz durante la obtención de fotografías o la poca información que estas tengan, tenderá a tener vacíos en algunos casos, lo cual es un problema considerable en el dado caso que una gran zona presente este problema; por ende esta herramienta, como muchas otras, debe manejarse con cautela y teniendo en cuenta las zonas en las cuales nuestra obtención de datos puedan llegar a tener fallos y por ende arrojar resultados erróneos o poco fiables. En el dado caso que nuestras nubes puntos arrojen zonas con falta de datos, pero no involucren una zona considerable de ellas, la herramienta de rasterización permite hacer uso de una interpolación por el método de Kriging ordinario, dicha interpolación se encargará de colocar datos en las zonas faltantes.

El método de Kriging es un procedimiento de interpolación de datos ampliamente usada en la geoestadística, dicho método basado en las investigaciones de Matheron (1965, 1971) se encarga de analizar un conjunto de valores dados, para nuestro caso de posicionamiento geográfico, para poder asignar valores nuevos en las zonas que carezcan de información, pero de las cuales requerimos tener conocimiento. Es preciso mencionar que para obtener datos con una mayor veracidad es necesario contar con una cantidad de datos considerable para realizar la interpolación, de lo contrario el error de medición será mayor.

Dicho método se basa en lo siguiente, Kriging teoriza que se cuenta con una cantidad N de valores reales $Z(x_1), \dots, Z(x_N)$ con los cuales deseamos estimar un nuevo valor $Z(x)$. Este nuevo valor es posible obtenerlo mediante la expresión:

$$Z_V = \int_V Z(x)$$

La variable V puede representar un grupo de valores o incluso un único punto, sin embargo, dicha expresión es posible observarla como una sumatoria que involucra una nueva variable: λ_i , la cual representa los pesos que los puntos vecinos a la zona del nuevo punto tengan dentro de la interpolación, dicha expresión se observa de la siguiente manera:

$$Z_v^* = \sum_{i=1}^N \lambda_i * z(x_i)$$

Una vez calculado el valor interpolado, la teoría del método menciona que si el proceso resultara en una perfecta estimación del valor Z_v^* , se debería tener una esperanza matemática $E[Z_v^* - Z_v] = 0$ así como un mínimo valor de $Var[Z_v^* - Z_v]$, en donde Z_v es el valor real del punto estimado.

Sin embargo, para poder realizar dicha interpolación es necesario que tengamos un método matemático que nos permita obtener los valores de λ_i dando una cierta condición a los mismos y es que en la teoría, para que la interpolación tenga validez dentro de nuestra zona de estudio, teóricamente $\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$, por lo que una manera de comprender como varían los valores de cierta variable en un espacio es haciendo uso de los variogramas.

Los variogramas son una representación gráfica de cómo una variable varía respecto a ciertas distancias que separan a los puntos que contienen información de la misma, estos se construyen haciendo uso de la semivariancia de los puntos ya conocidos, esto se expresa de la siguiente manera:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2$$

Donde: $\gamma(h)$ = semivarianza

$N(h)$ = Número de pares analizados

$z(x_i)$ = Punto cualquiera con información conocida

h = Distancia constante que separa a los puntos analizados.

Dada esta expresión es posible observar hasta qué valor de h se observa una estabilización de la semivarianza, lo que nos mostraría que la variable que buscamos interpolar ya no sufre grandes variaciones entre sí. Este paso es de los más importantes dentro del método Kriging, porque es gracias a esta expresión que podemos resolver un sistema de ecuaciones que nos permita obtener los valores de λ_i para nuestra interpolación.

Una vez que hemos evaluado nuestra semivarianza a diferentes valores de h , se procede a la construcción del semivariograma, el cual es una representación gráfica para la que se plotean los valores de la semivarianza respecto al valor de h con el que fue obtenida, de esta manera se obtiene el semivariograma experimental (Figura 4.13).

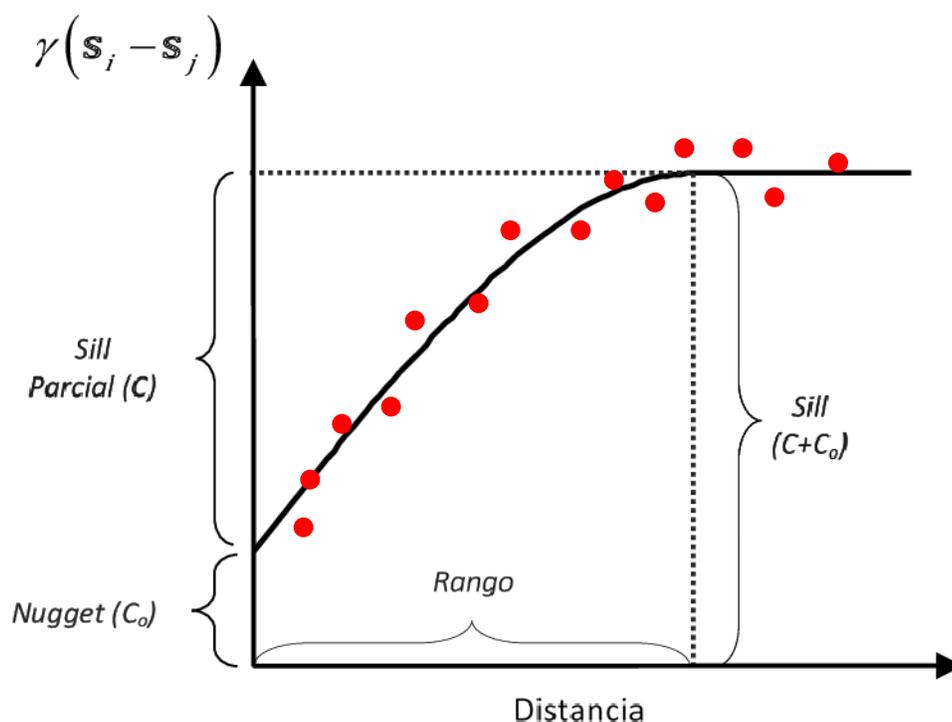


Figura 4.13. Representación gráfica de la forma experimental (rojo) y teórica (negro) de un semivariograma. Modificada de Córdoba (2015).

Una vez obtenido, es necesario visualizar que los puntos de nuestro semivariograma pueden no estar alineados perfectamente a una curva, pero que sin embargo parecen ajustarse a una, esta curva ajustada a los valores experimentales del semivariograma se le conoce como semivariograma teórico (Figura 4.14). Esta curva teórica debe ser elegida

de acuerdo con su similitud con modelos teóricos ya establecidos para ser usados con Kriging y deberán ser elegidos de acuerdo con el que tenga una mayor similitud con los valores experimentales, dichos modelos se presentan en la Figura 4.15

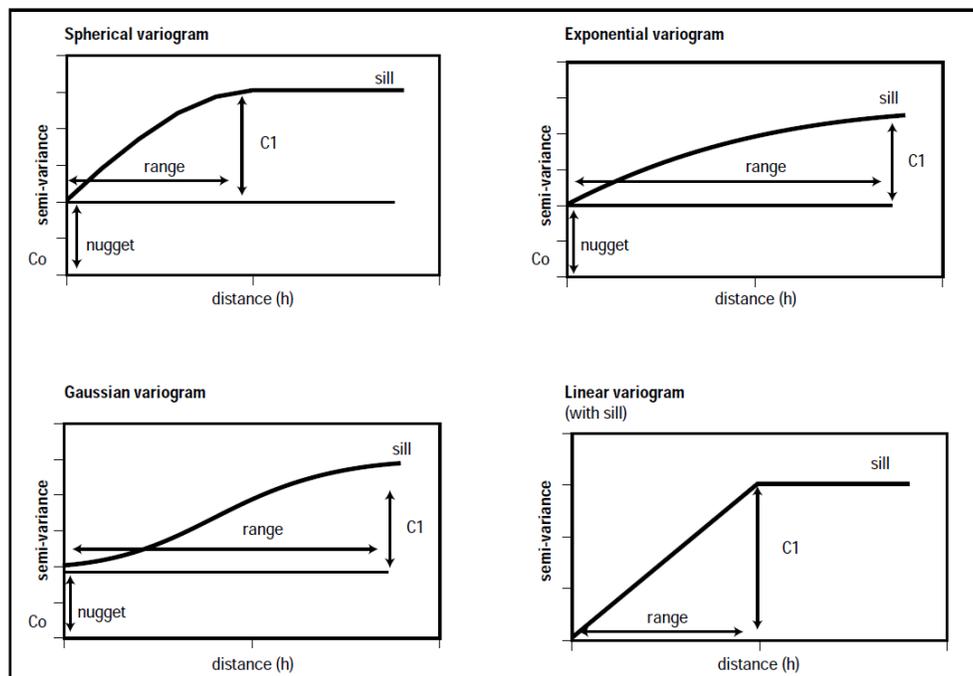


Figura 4.15. Modelos teóricos de un semivariogramas. Obtenido de Hartkamp et al. (1999).

El semivariograma teórico nos permite obtener las $\gamma(h)$ de los puntos que sean requeridos para nuestra interpolación, de esta manera el sistema de ecuaciones a resolver para kriging ordinario se presenta de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \gamma(x_1, x_1) & \gamma(x_1, x_2) & \gamma(x_1, x_3) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma(x_i, x_1) & \dots & \gamma(x_i, x_j) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_i \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(x_i, x_v) \\ \vdots \\ \gamma(x_1, x_v) \\ 1 \end{bmatrix}$$

Esta expresión por ende permite finalizar la interpolación de los nuevos valores y por ende llenar las celdas vacías de nuestra interpolación dentro de *CloudCompare*. Adicionalmente es importante notar que la matriz tiene valores i , los cuales tendrán un valor igual al número de puntos que como usuarios deseemos emplear durante el proceso de interpolación. La interfaz de *CloudCompare* nos permite escoger entre tres diferentes modelos de semivariogramas teóricos, así como el número de pares de puntos con los que se quiera

trabajar para la interpolación. Algunos pasos relacionados a la justificación y desglose de ecuaciones del método Kriging fueron omitidas, para ello se recomienda consultar a Armstrong (1998) y Fisher & Getis (2010) para más información.

Una vez determinada la interpolación para las celdas vacías, los planos de discontinuidad donde se encuentran los datos de validación pueden ser empleados. Sin embargo, existe una restricción muy importante previa a la obtención de planos de discontinuidad; el raster que se obtiene de una nube de puntos tendrá los puntos alineados perpendicularmente a los ejes x y y , por lo cual una línea de sección que no sea perpendicular a uno de estos ejes tendrá una separación entre puntos distinta. Por ende, una nueva rotación debe ser realizada a los cortes, únicamente es necesario medir la diferencia angular que tenga la línea de sección de nuestros perfiles respecto al eje x , para poder cumplir con el criterio de ortogonalidad con el eje y . Los planos rotados de cada una de las zonas de medición se muestran en la Figura 4.16.

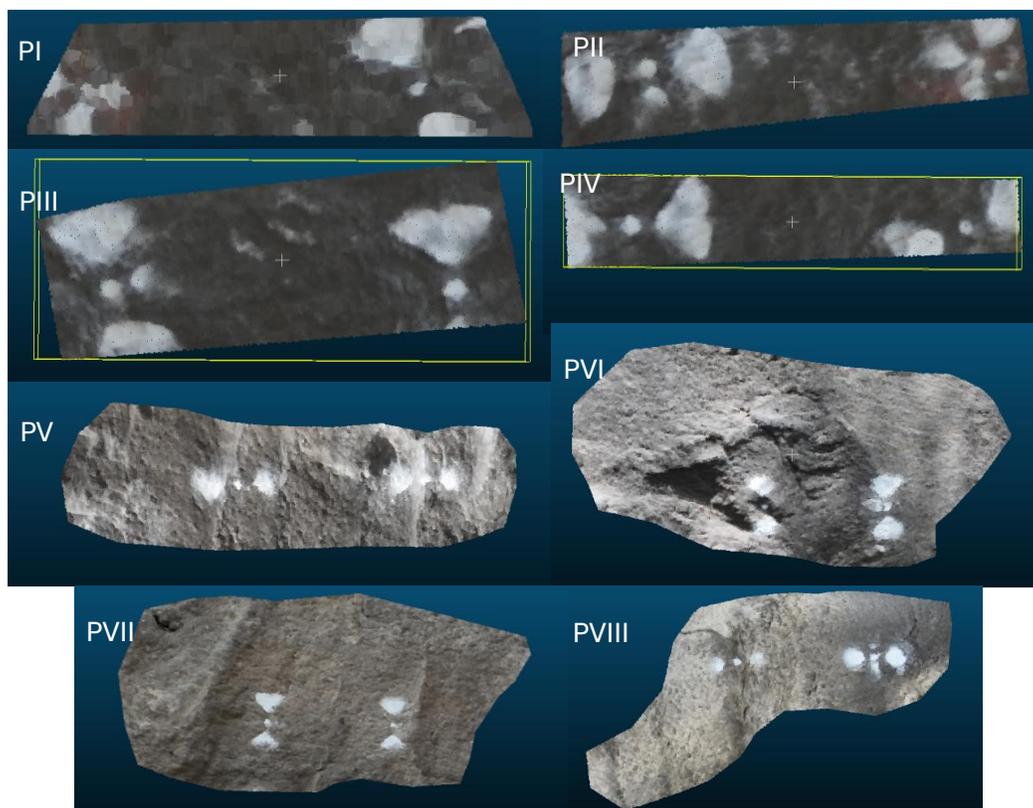


Figura 4.16. Planos rotados de las zonas de validación, de izquierda a derecha y de arriba abajo: PI, PII, PIII, PIV, PV, PVI, PVII y PVIII

Una vez realizado lo anterior, es necesario hacer una comparación entre los perfiles de rugosidad obtenidos con las nubes de puntos a tres y seis metros del afloramiento, esto con el fin de observar la calidad de reconstrucción y descartar el uso de aquellos productos que no tengan una similitud con los datos reales de validación y evitar su empleo en los análisis de rugosidad.

Como es posible observar en la Figura 4.17, los perfiles obtenidos con ayuda de la nube de puntos de calidad alta a seis metros no se asemejan en gran parte a los perfiles reales en comparación con los perfiles obtenidos con la nube de puntos de alta calidad a tres metros; es posible observar que, a pesar de reconstruir la forma general de los perfiles, no cuenta con una gran reconstrucción en cuanto a las pequeñas variaciones geométricas que los perfiles reales muestran a lo largo de ellos. Esta situación es posible observarla en las tres nubes de puntos asociadas a dicha distancia y por lo cual es necesario prescindir de ellas puesto que su análisis no brindaría resultados validos dentro de la caracterización de la rugosidad de discontinuidades.

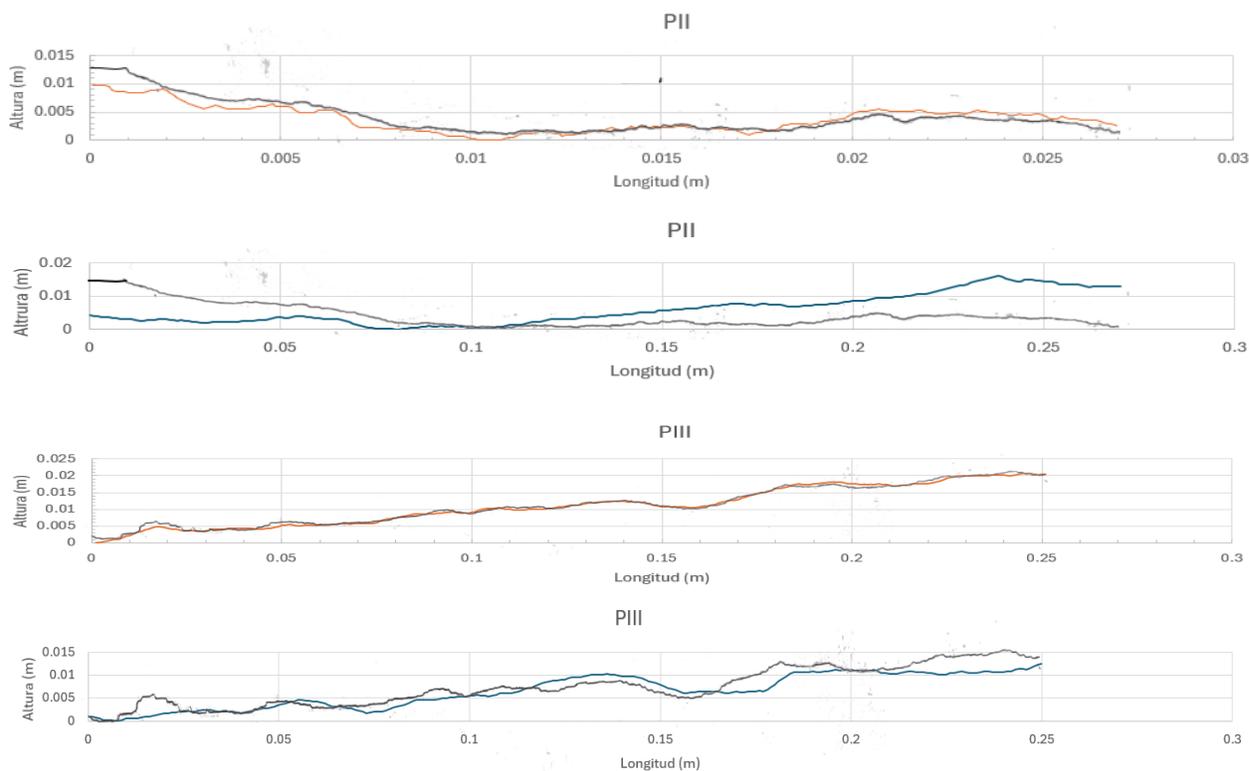


Figura 4.17. Comparación de los datos de validación con los obtenidos a partir de las nubes de puntos a tres y seis metros de distancia del afloramiento en calidad alta. En naranja los perfiles obtenidos con la nube de puntos a tres metros y en azul los perfiles obtenidos con la nube de puntos a 6 metros

Con los productos seleccionados para el análisis de rugosidad, es prudente mencionar una vez que uno de los principales enfoques de este trabajo es observar directamente como los intervalos de medición de nuestros perfiles de rugosidad podrían afectar a los valores de JRC que se obtienen a partir de ellos con la expresión propuesta por Li & Zhang (2015) basado en la obtención del valor Z_2 ; dichas observaciones se realizarán con intervalos de medición que van de 1 mm hasta 0.4 mm, por ende para cada nube de puntos asociada a un perfil de rugosidad, deberán ser obtenidos seis rasters asociados a cada una de los intervalos de medición para así obtener los perfiles de rugosidad. De esta manera es preciso realizar una comparación entre datos reales y datos obtenidos con las nubes de puntos para de esta manera escoger la nube de puntos en función de la calidad del procesado que mejor se ajuste a los datos de validación obtenidos con el perfilómetro.

Para ello, las 24 nubes de puntos de las zonas de validación deberán ser rasterizadas a una distancia de 1 mm entre puntos para así poder compararlos y determinar qué calidad de procesamiento será utilizada para obtener los perfiles con mayor similitud a los datos reales

Una vez obtenidos los perfiles de rugosidad de cada uno de los rasters, es necesario exportar dichos valores a un archivo csv; Sin embargo, previo a dicha acción, es prudente realizar una validación de los perfiles de rugosidad obtenidos a partir de los rasters. *CloudCompare* dibuja los perfiles de elevación como polilíneas y a partir de sus características es posible observar cuantos vértices contiene esa polilínea, por ende, si nosotros estamos obteniendo un perfil de rugosidad con una longitud de 27 cm a partir de una nube de puntos rasterizada con una distancia entre puntos de 1 mm, se esperaría observar a una polilínea de 271 vértices; de 301 vértices para un raster con distancia entre puntos de 0.9 mm, y así sucesivamente con los demás rasters y longitudes de nuestros perfiles. De observar errores, el perfil de rugosidad debe obtenerse de nuevo modificando los parámetros de obtención tales como el espesor de las secciones o largo máximo de lado que estas puedan tener.

Una vez comprobado el número de vértices para cada uno de los 24 perfiles, es necesario realizar un último cambio ya que *Cloud Compare* exporta los datos en función de la longitud de los segmentos de las polilíneas, sin embargo, al tener conocimiento de las distancias

constantes que separan a los vértices de las polilíneas es posible cambiar las distancias en x de manera constante para así obtener el perfil de rugosidad sin alguna distorsión. De igual manera, y por convención, se realizó un cambio en las alturas de los puntos, restando a cada una de ellas el valor mínimo registrado entre ellas para así tener una visualización más sencilla de los perfiles de rugosidad.

Las comparaciones entre perfiles de rugosidad reales y obtenidos por las nubes de puntos se desglosan en la Figura 4.18.

A partir de estas visualizaciones es posible observar dos cuestiones muy importantes, los perfiles de rugosidad obtenidos a partir de la nube de puntos de muy alta calidad parecen desviarse más de la forma real de los perfiles de validación que sus contrapartes de alta y media calidad, mientras que la calidad alta parece tener un mejor relación con los datos de validación, sin embargo es preciso obtener un estimado de la desviación que tengan los datos de validación con los datos de nubes de puntos, para lo cual se tendrá que realizar una medición de la rugosidad media para escoger la mejor calidad con la que se obtendrán los datos de JRC.

La rugosidad media es posible obtenerla, de acuerdo con lo mencionado por García-Luna (2023), con la siguiente expresión:

$$R_a = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^N |z_i| \cdot \Delta l$$

Donde:	L	Longitud del perfil
	N	Número de puntos muestreados
	z_i	Amplitud del perfil en cada punto muestreado
	Δl	Distancia horizontal constante de separación entre puntos

Esta expresión implica la obtención de las diferencias de amplitud entre dos datos semejantes, en este caso de un perfil de rugosidad real y uno obtenido por nubes de puntos. La rugosidad media entonces analiza un perfil de diferencia que se obtiene de la resta de los perfiles reales y de nubes de puntos para estimar la diferencia promedio que puedan

tener ambos perfiles en toda su extensión. La rugosidad media de los perfiles de alta calidad se muestra en la Tabla 4.4.2.

Tabla 4.3. Valores de la rugosidad media obtenida entre los perfiles reales y los obtenidos por la nube de puntos a alta calidad de procesado.

Perfil	Rugosidad media (cm)
I	0.0819
II	0.0888
III	0.0540
IV	0.1042
V	0.0857
VI	0.0715
VII	0.1073
VIII	0.0757

Las diferencias observadas gracias al cálculo de la rugosidad media muestran una diferencia entre los perfiles reales y los tomados por nubes de puntos muy similar, revelando que la mayoría de las zonas de validación cuentan con errores de reconstrucción similares.

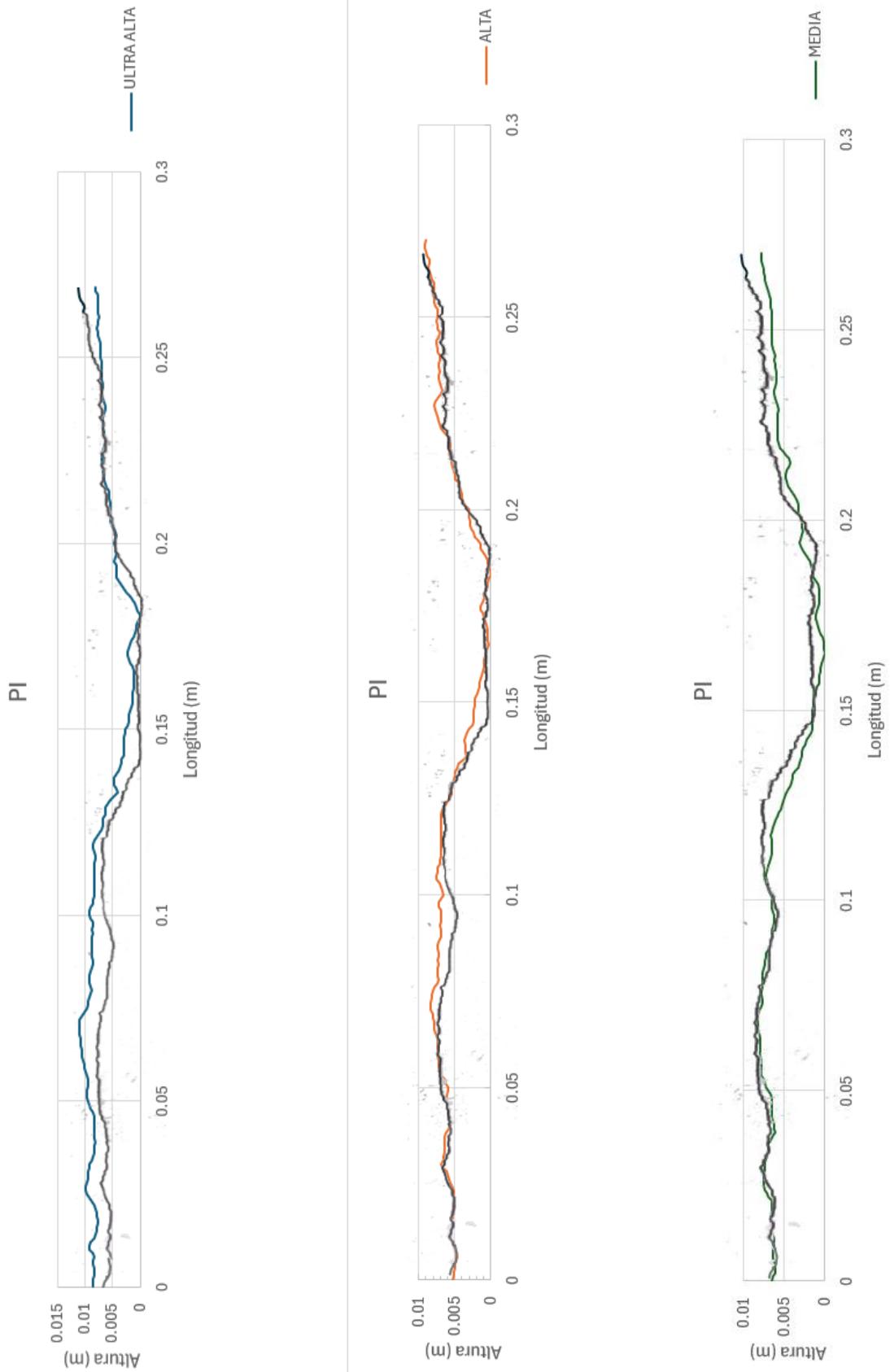


Figura 4.18. a) Comparación de PI en sus tres calidades con el perfil obtenido con perfilómetro.

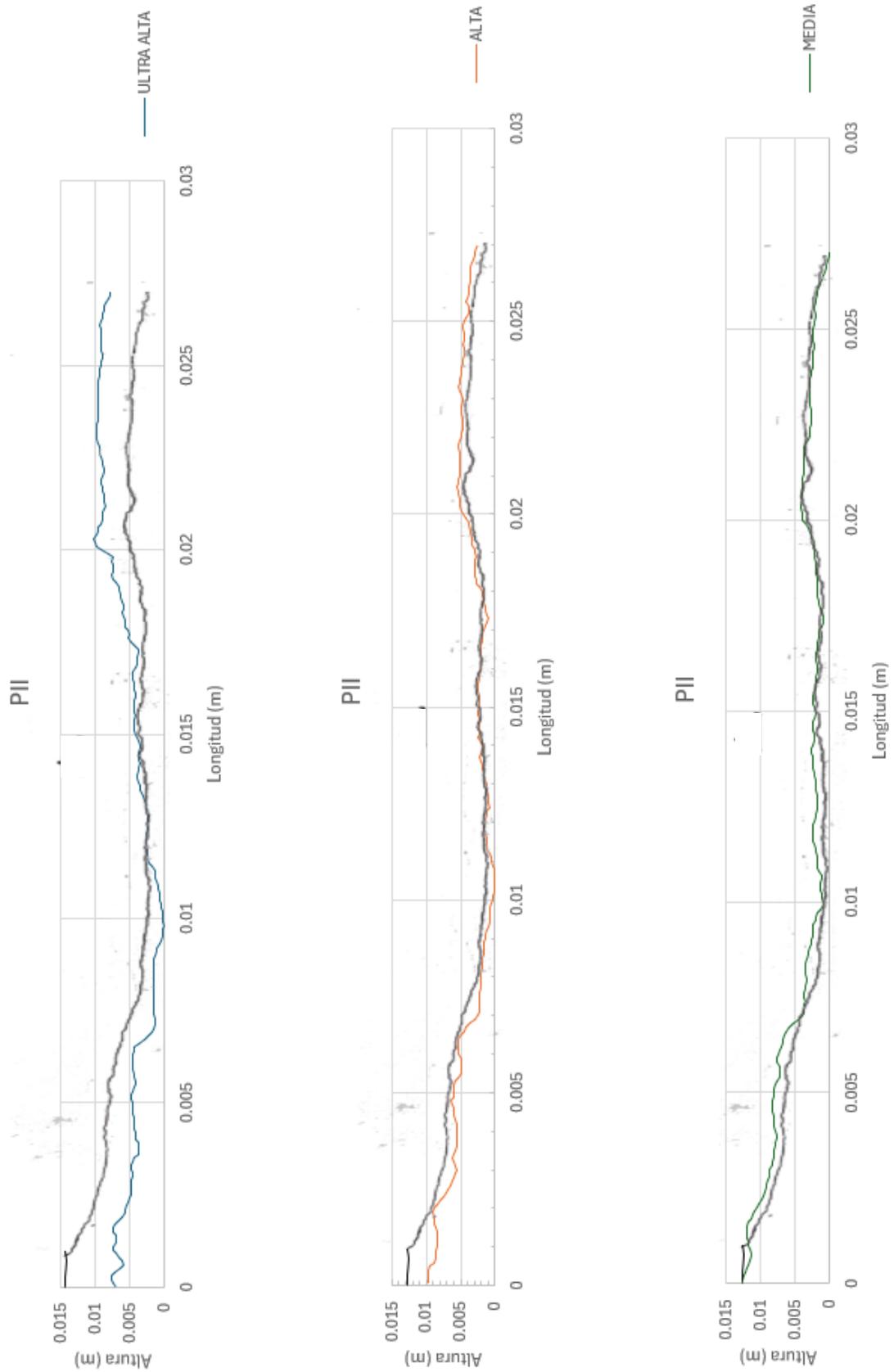


Figura 4.18. b) Comparación de PII en sus tres calidades con el perfil obtenido con perfilómetro.

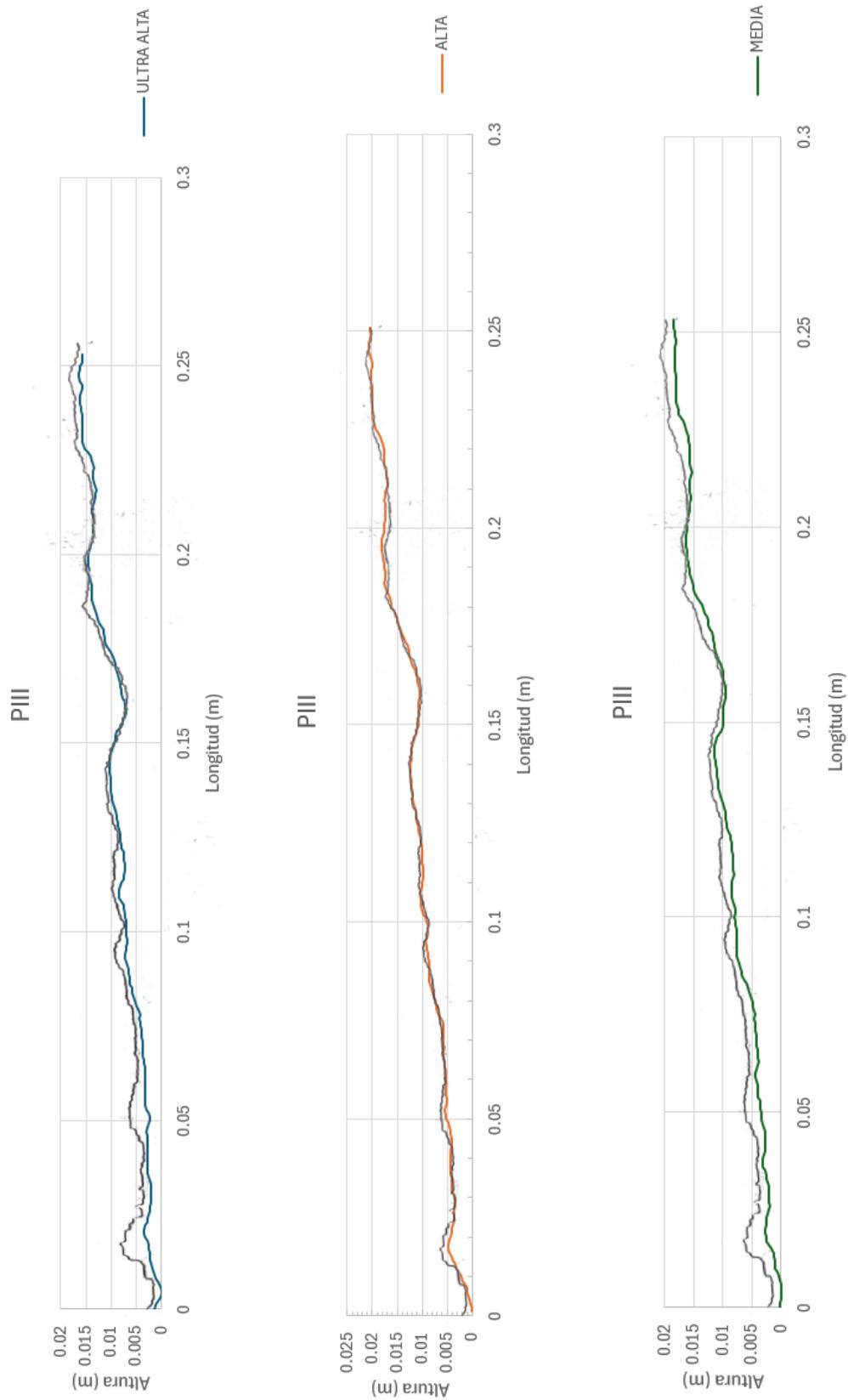


Figura 4.18. c) Comparación de PIII en sus tres calidades con el perfil obtenido con perfilómetro.

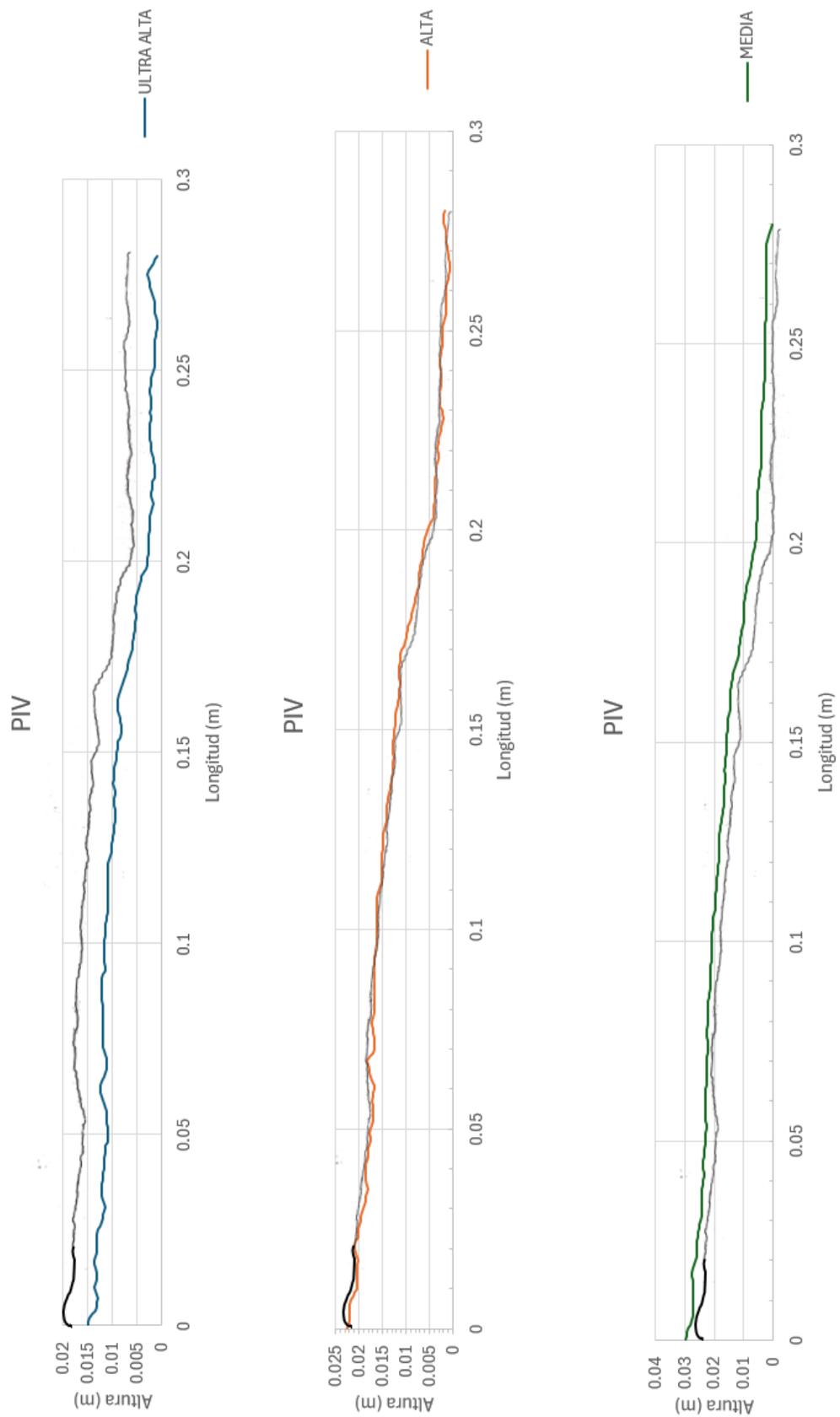


Figura 4.18. d) Comparación de PIV en sus tres calidades con el perfil obtenido con perfilómetro.

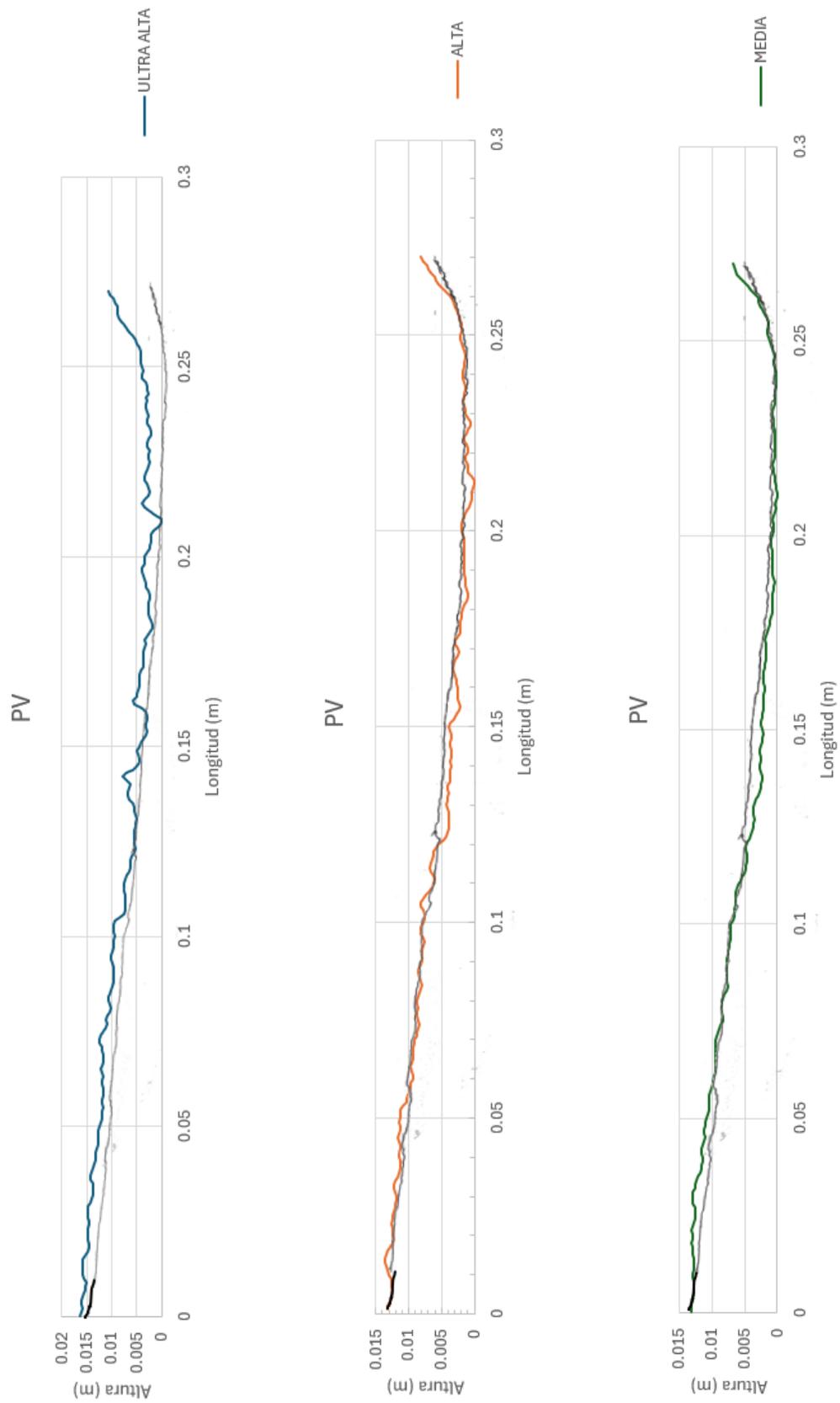


Figura 4.18. e) Comparación de PV en sus tres calidades con el perfil obtenido con perfilómetro.

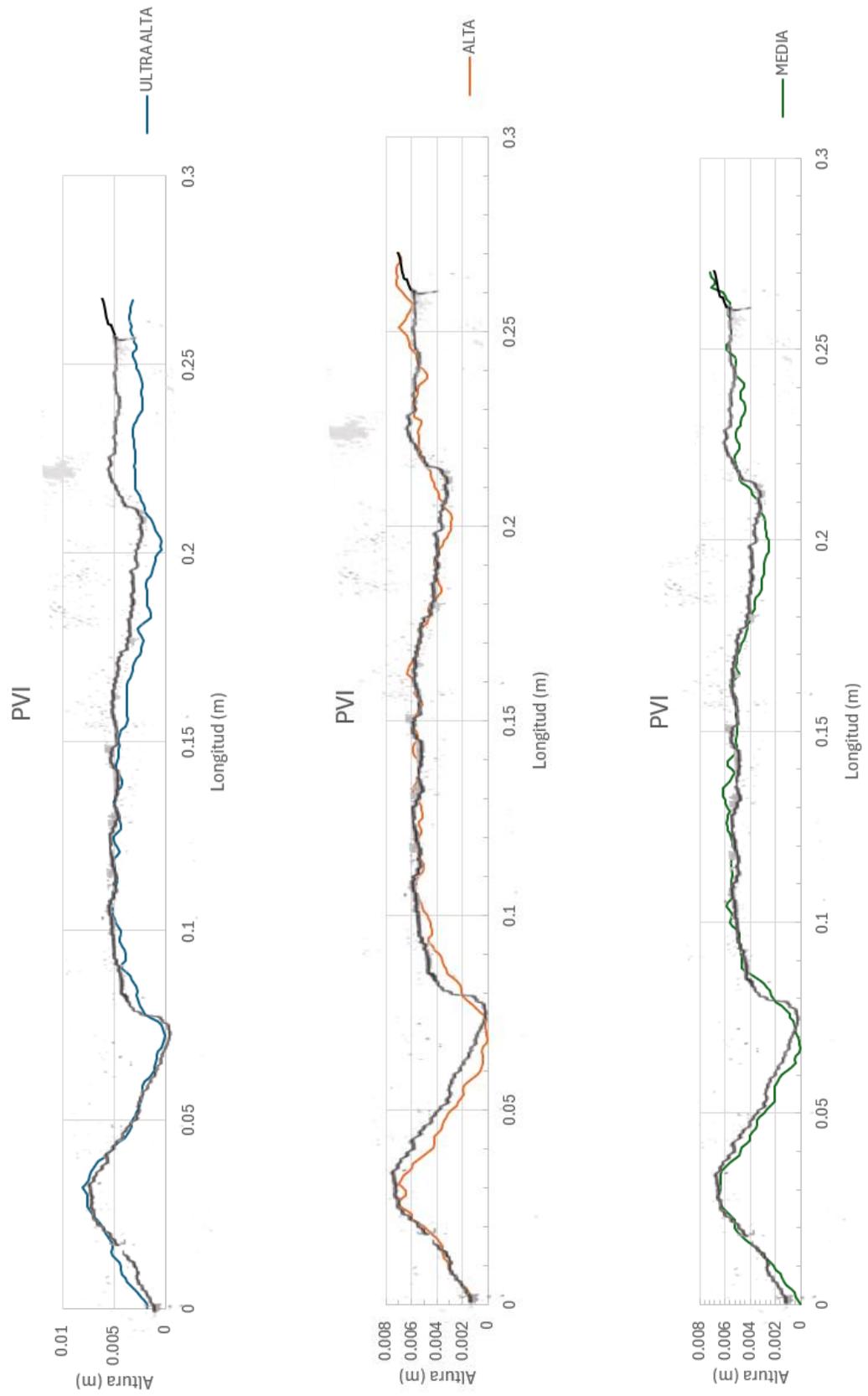


Figura 4.18. f) Comparación de PVI en sus tres calidades con el perfil obtenido con perfilómetro.

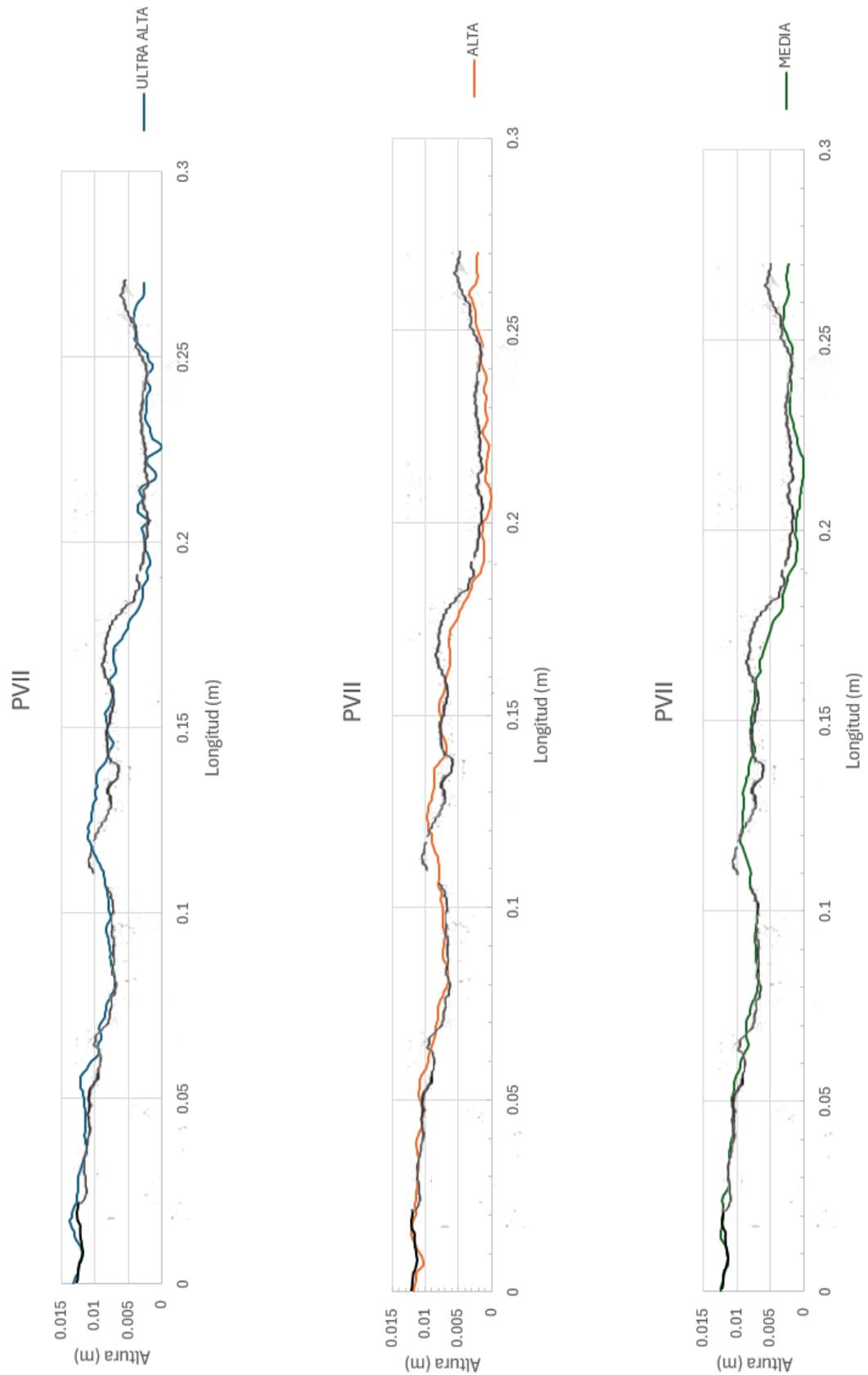


Figura 4.18. g) Comparación de PVII en sus tres calidades con el perfil obtenido con perfilómetro.

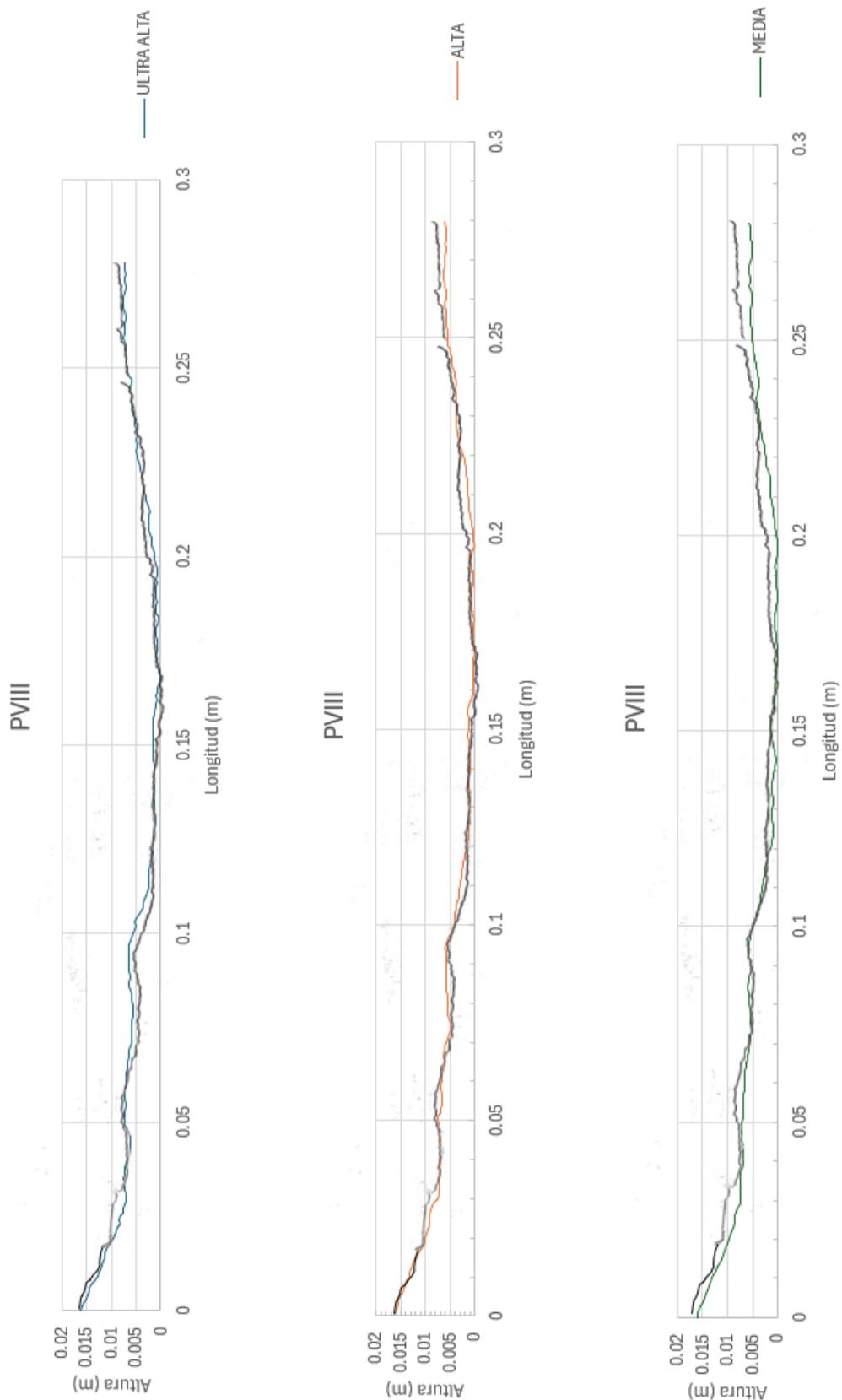


Figura 4.4.18. h) Comparación de PVIII en sus tres calidades con el perfil obtenido con perfilómetro.

4.5. Estimación del JRC

Como se observó anteriormente, los perfiles de validación obtenidos de la nube de puntos procesada a una calidad alta tienen una diferencia con los perfiles obtenidos con perfilómetros de 0.86 mm en promedio, un valor de diferencia relativamente bajo en primera instancia, sin embargo, el objetivo de observar la fidelidad del modelo tridimensional respecto a datos reales no recae determinar únicamente las diferencias en las dimensiones de los perfiles de validación y los obtenidos con las nubes de puntos sino también determinar que tanto puede afectar esa diferencia en el cálculo de variables como el JRC, variable que contempla en su mayoría dimensiones centimétricas-milimétricas.

Dado que se determinó trabajar con la nube de puntos obtenida a calidad alta, por ser aquella que tiene más fidelidad con los datos reales, se obtuvieron los perfiles rugosidad con rasters con separaciones entre puntos de entre 0.4 mm y 1 mm, por lo cual para cada uno de nuestros ocho perfiles se obtuvieron siete perfiles rugosidad, dándonos un total de 56 perfiles de rugosidad; Estos datos son aquellos que fueron empleados durante nuestros análisis de JRC. Los rasters de 1 mm y 0.8 mm del PI se observan en la Figura 4.19.

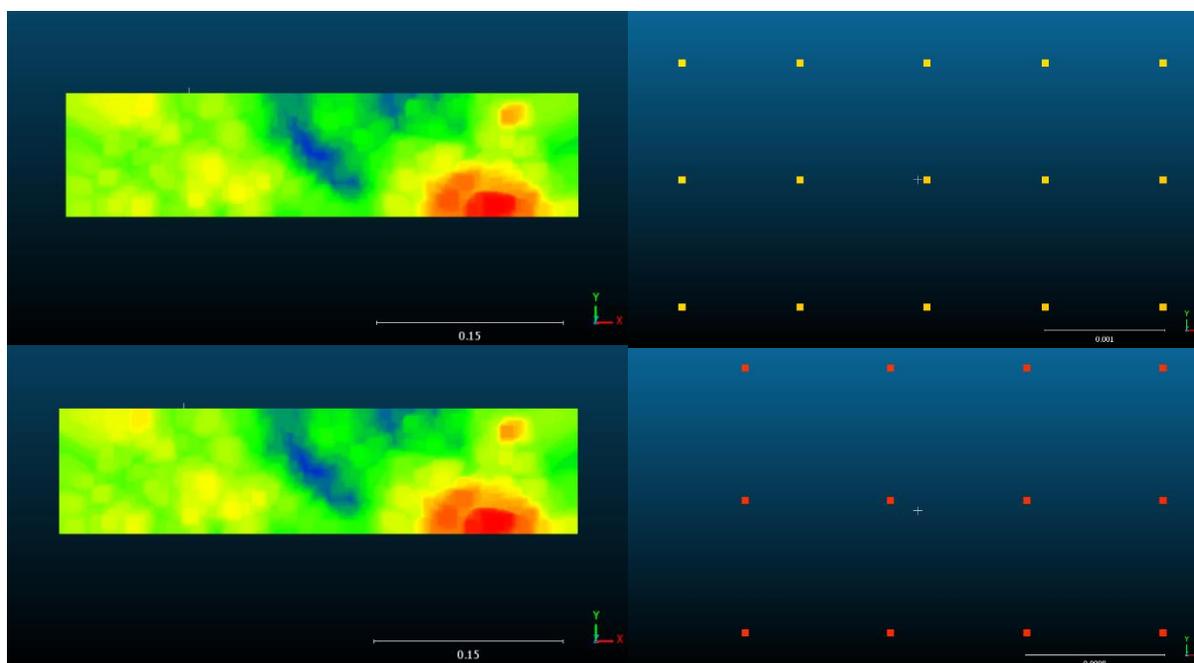


Figura 4.19. Rasters del PI con separación entre puntos de 1mm y 0.8 mm respectivamente, se puede observar la escala de longitud para asegurarse de la distancia entre puntos

Como se mencionó en el apartado del marco teórico, lo propuesto por Li & Zhang (2015) podría sufrir cambios en los resultados de JRC en función de la longitud de los perfiles que se analicen, así como también por las frecuencias de muestreo que se apliquen. De acuerdo con el rango de valores (72 mm - 119.6 mm) utilizado por Li y Zhang (2015), es que la expresión matemática para el cálculo de JRC es propuesta y recomendada para ser utilizada; sin embargo, bajo lo presentado en su trabajo, se infiere que este rango de valores, así como sus correspondientes valores de JRC, fueron utilizados en conjunto para el análisis y obtención de expresiones matemáticas. Esta condición permite plantear un análisis, y es que si nosotros analizáramos un perfil cualquiera de 24 cm, el cual fuera subdividido en partes iguales de 7, 8, 9, 10 y 11 cm, lo lógico es que se obtuvieran valores promedio de JRC para el perfil completo muy similares puesto que caen directamente en el rango de validación del método y por ende nos permitiría analizar una nueva premisa, ya que subdividir un perfil en longitudes iguales en algunas ocasiones puede ser tedioso, por lo que analizar un perfil con su longitud original resultaría ser más sencillo y rápido.

Por ende, el primer análisis en realizarse se centró en observar los posibles cambios que pueda tener el JRC en función de las longitudes que se analizan, similar al hecho por García-Luna (2023), quien subdivide los perfiles en tramos de 100 mm, pero añadiendo las longitudes de submuestreo de 70, 80, 90 y 110 mm. Dado que el perfil de 24 cm no siempre podrá ser subdividido en partes iguales, los análisis se dividirán en función de la longitud real que las subdivisiones pudieron analizar y el análisis con la longitud completa; en algunas ocasiones un mismo valor de subdivisión podrá analizar dos longitudes reales diferentes lo cual puede nutrir aún más este análisis.

Estos análisis se realizaron bajo una frecuencia de muestreo de 0.4 mm, idéntica a la frecuencia utilizada por Li & Zhang (2015). Los resultados se muestran en la Tabla 4.4.3.

Una vez terminado el análisis enfocado a calcular los valores de JRC en función de la longitud de los perfiles, se realizó el análisis de valores en función de la frecuencia de muestreo. Para este análisis se usaron los primeros 20 cm de cada uno de los 56 perfiles obtenidos de los rasters de las ocho zonas de validación, dividiéndolo en dos partes de 10 cm para mantener una longitud dentro del rango de validación y obteniendo posteriormente el JRC promedio. Los resultados de dicho análisis observan en la Tabla 4.4.4.

Tabla 4.4. Valores de JRC del PI - PVIII a distintas longitudes analizadas y bajo diferentes longitudes de subdivisión.

Longitud real	18 cm			20 cm			21 cm			22 cm			24 cm		
	6 cm	9cm	18 cm	10 cm	20 cm	20 cm	7 cm	21 cm	11 cm	22 cm	6 cm	8 cm	24 cm		
Longitud de subdivisión	6 cm	9cm	18 cm	10 cm	20 cm	20 cm	7 cm	21 cm	11 cm	22 cm	6 cm	8 cm	24 cm		
Perfil	JRC promedio														
I	8.658	8.659	8.66	8.828	8.83	8.83	9.021	9.03	9.034	9.039	9.023	9.024	9.04		
II	8.93	8.86	9.01	8.88	8.99	8.99	8.56	8.82	8.63	8.73	8.38	8.26	8.47		
III	9.70	9.75	9.77	9.69	9.70	9.70	9.55	9.59	9.56	9.56	9.55	9.50	9.61		
IV	7.99	7.95	8.04	8.03	8.07	8.07	8.12	8.23	8.06	8.08	7.99	7.88	8.03		
V	9.54	9.51	9.55	9.27	9.32	9.32	9.29	9.30	9.75	9.75	9.71	9.68	9.72		
VI	10.07	10.04	10.18	9.92	10.03	10.03	9.94	10.00	9.80	9.89	10.04	10.05	10.13		
VII	7.79	7.83	7.83	8.04	8.05	8.05	8.18	8.21	8.23	8.27	8.13	8.14	8.17		
VIII	7.04	7.24	7.38	6.72	7.04	7.04	6.61	6.91	6.52	6.8	6.20	6.24	6.57		

Tabla 4.5. Valores de JRC del PI - PVIII a distintas frecuencias (f) de muestreo aplicadas a los perfiles

Perfil	JRC promedio						
	f=1 mm	f=0.9 mm	f=0.8 mm	f=0.7 mm	f=0.6 mm	f=0.5 mm	f=0.4 mm
I	6.20	6.17	6.54	6.94	7.47	8.18	8.82
II	6.43	6.46	6.84	7.23	7.52	7.99	8.88
III	7.08	7.27	7.70	8.06	8.26	8.79	9.69
IV	5.56	5.78	6.17	6.55	7.30	7.51	8.03
V	6.95	7.02	7.97	8.51	8.53	9.20	9.27
VI	6.83	6.27	7.35	8.04	8.26	8.91	9.92
VII	6.31	6.66	6.80	7.14	7.65	7.79	8.04
VIII	6.06	6.15	6.18	6.52	6.52	6.79	6.72

5. Análisis de resultados y discusión

5.1. Precisión de la reconstrucción fotogramétrica

El uso de dron con antena RTK conectada a una base GNSS permitió la obtención de fotografías georreferenciadas con una gran precisión, lo cual permitió la obtención de nubes de puntos con una mayor fidelidad en la reconstrucción. Y aunque la reconstrucción del afloramiento La Escuelita fue muy fiel, en su mayoría, a las características reales que este tiene, aún se pueden observar una serie de diferencias en la reconstrucción de las superficies.

Las comparaciones entre los perfiles de rugosidad reales y los obtenidos con modelos a seis metros del afloramiento muestran una clara diferencia en la reconstrucción de las superficies de las zonas de validación sin importar la calidad de procesamiento a la cual se hayan sometido las nubes de puntos.

En el caso de las nubes de puntos a tres metros, la nube de calidad muy alta en general presenta también varios errores en la reconstrucción de la superficie puesto que, en perfiles que cuentan con zonas bajas/altas o pendientes, específicamente en los perfiles PI, PII y PIV, los cuales muestran grandes diferencias respecto a los perfiles de validación en sus zonas laterales; si realizáramos el análisis de JRC en ellas, estaríamos llevando a cabo un error muy grande ya que no se cuenta con un dato válido para realizar afirmaciones sobre el JRC y por ende la resistencia al corte de la discontinuidad de ser calculada.

Estas variaciones en la reconstrucción de La Escuelita es probable que se deban especialmente en mayor medida a la calidad de las fotografías tomadas en la zona, ya que la restitución fotogramétrica en calidades muy altas hace uso de la resolución completa de las imágenes lo que conlleva a una mayor sensibilidad del algoritmo a errores como variaciones de sombras o incluso a imperfecciones ópticas en las cámaras con las que son tomadas las fotografías, que a calidades menores pueden pasar desapercibidas, además el número y distribución de puntos de control a lo largo del afloramiento podría ser de igual manera un punto clave al ser factores que permiten un mejor dimensionamiento y posición en el espacio de los productos fotogramétricos. Garcia-Luna (2023) obtiene puntos de control asociados a los puntos de inicio y final de cada uno de los perfiles de validación que utiliza dentro de sus análisis además de cinco puntos de control adicionales que ayudan a evitar deformaciones en los planos de discontinuidad, además del uso de teleobjetivos en

la cámara fotográfica utilizada para la obtención de fotografías; En conjunto los valores de cada GCP's y el uso de mejores objetivos para las cámaras fotográficas permiten tener un mejor control de las irregularidades geométricas en zonas más pequeñas, contrario a lo realizado en La Escuelita donde a pesar del uso de puntos de control, se tiene mayor distancia entre ellos y donde solo se usó la cámara integrada al dron para la obtención de fotografías, lo cual abre la posibilidad a que este tipo de errores en la reconstrucción ocurran.

Lo anterior no implica que los GCP's ni el tipo de dron utilizados en la reconstrucción de nuestro afloramiento carezcan de validez, puesto que el análisis realizado con DSE para medir la orientación de las discontinuidades muestra los mismos resultados observados por Villareal-Rubio (2019).

Resaltar la importancia de los puntos de control y características de las cámaras fotográficas dentro de los procesos fotogramétricos, así como del uso de antenas RTK para la obtención de datos es de suma importancia, puesto que permiten realizar mejores reconstrucciones de afloramientos en los cuales deba ser analizada su estabilidad mecánica.

5.2. Precisión del método de la raíz media cuadrática

La variable Z_2 al ser definida como una medida de la desviación de una curva respecto a una línea horizontal tiende a ser una variable muy dependiente de las amplitudes de los perfiles, por ende, si un mismo perfil presenta diferencias de acuerdo con sus calidades de procesamiento, los valores de JRC obtenidos a partir de ellos tendrán también diferencias. Es por ello que realizar análisis de rugosidad solo debe ser hecho en los perfiles que se asemejen más a los datos reales

Durante el análisis centrado en obtener el JRC dependiendo de las frecuencias de muestreo que se apliquen (Figura 5.1), se observa que las diferencias en los resultados de frecuencias de 0.4 y 1 mm de frecuencia tienden a tener una diferencia de 2.23 unidades en promedio, lo cual representaría una diferencia de poco más del 30% en las estimaciones de resistencia al corte de acuerdo con Tse y Cruden (1979).

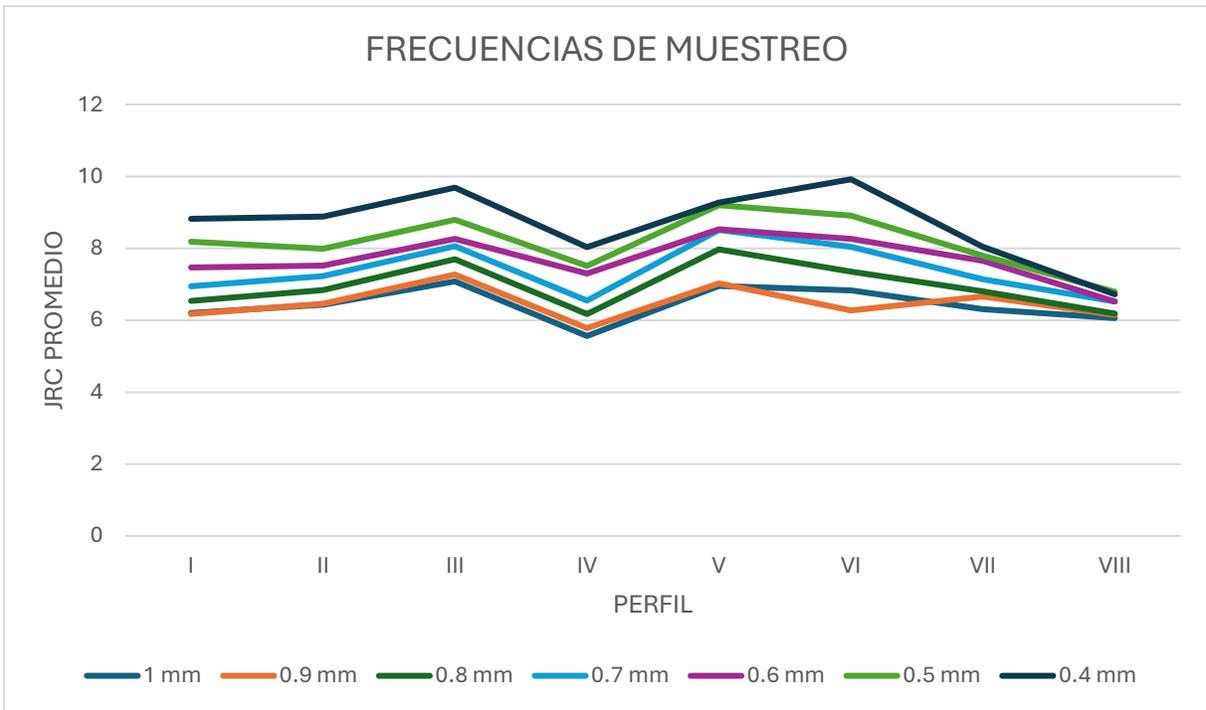


Figura 5.1. Comparación gráfica de los valores de JRC del PI - PVIII a distintas frecuencias de muestreo aplicadas a los perfiles

Por último, el análisis enfocado a observar diferencias en los resultados de JRC asociados a la longitud de los perfiles de rugosidad analizados muestra una diferencia de resultados mínima, tomando en cuenta que la máxima diferencia de JRC observada en este análisis fue de 0.37 en la comparación entre los primeros 24 cm del PVIII y el mismo perfil dividido en secciones de 6 cm.

De acuerdo con estos resultados es posible puntualizar dos cuestiones:

- El cambio en las frecuencias de muestreo de los perfiles implica una diferencia considerable en los valores de JRC. Para este caso es necesario puntualizar que la frecuencia de muestreo válida es la de 0.4 mm, por lo que incrementar el valor de la frecuencia de muestreo implicaría sobrestimar la rugosidad de los perfiles analizados.
- En los análisis basados en las longitudes de los perfiles analizados, las diferencias observadas entre los valores de JRC de los perfiles completos y los promedios de los subperfiles permiten observar que puede ser viable analizar los perfiles de rugosidad en su longitud original sin la necesidad de subdividirlos en las longitudes de validación que Li y Zhang (2015) muestran en su trabajo.

6. Conclusiones

En esta investigación se analizó la viabilidad del uso de nubes de puntos a dos diferentes distancias del afloramiento La Escuelita para la obtención de perfiles de rugosidad, comparando los datos obtenidos a partir de ellos con datos de validación; así como la obtención del JRC basado en el método propuesto por Li y Zhang (2015), enfocándose en como los cambios en la frecuencia de muestreo, así como las longitudes de los perfiles, podrían afectar en la estimación de dicho valor.

- Los resultados obtenidos de esta investigación muestran que una menor distancia entre la cámara del dorn y el afloramiento genera una mejor reconstrucción tridimensional y por ende una mayor fidelidad en el análisis de la rugosidad de discontinuidades. Para este caso, la calidad de procesamiento alta resulta ser la que mayor fidelidad tiene respecto a los datos reales, ya que la diferencia entre los perfiles de validación y los obtenidos con nubes de puntos son de menos de 1 mm.
- Para el caso de los análisis de rugosidad mediante el método de la raíz de la media cuadrática, los resultados muestran que el análisis de los perfiles de 24 cm resulta viable sin la necesidad de submuestrear, siempre y cuando la frecuencia de muestreo sea de 0.4 mm.
- Por otra parte, la variación en las frecuencias muestreo para la obtención del JRC muestra una clara diferencia en los rangos de 0.4 mm – 1 mm. Tomando en cuenta que 0.4 mm es la frecuencia de validación de Li y Zhang (2015), utilizar una frecuencia de muestreo distinta implicaría una estimación errónea.

Por lo tanto, se concluye que, el uso de nubes de puntos en los análisis de rugosidad mediante el método propuesto por Li y Zhang (2015) es viable bajo los parámetros mostrados anteriormente; sin embargo, es necesario hacer énfasis en el mejoramiento de los procesos de toma y análisis de datos, con el fin de obtener resultados que nos ayuden a interpretar con mayor fidelidad la rugosidad de una superficie de discontinuidad.

6.1. Recomendaciones

Recomendaciones técnicas

Respecto a la obtención de datos para la reconstrucción tridimensional de afloramientos, el uso de antenas RTK como herramientas de apoyo para la georeferenciación de fotografías debe ser vista cada vez más como una acción obligatoria para la obtención de productos con un mayor fidelidad en su posicionamiento global; además es ampliamente necesario plantear que una mejora en la fidelidad de la reconstrucción podría observarse con la obtención de una mayor cantidad de GCP's a lo largo de los afloramientos, lo cual podría evitar una sobrestimación o subestimación de la rugosidad en las superficies de discontinuidad además de poder incrementar la distancia entre el dron y el objeto a la cual se toman las fotografías.

Adicional a lo anterior, el empleo de cámaras con mejores características, como aquellas con teleobjetivos como lo muestra García-Luna (2023), permitan obtener productos con una mayor fidelidad a las características reales de los afloramientos

Por ende, prescindir en alguno de las herramientas o características anteriores podría afectar en los procesos de restitución fotogramétrica.

En cuanto al tratamiento de los datos de las nubes de puntos, es de suma importancia considerar que las interpolaciones para la obtención de datos con un espaciado constante no deben ser realizadas en zonas que contengan pocos datos, puesto que arrojaría resultados sin validez y por ende su uso sería completamente erróneo.

Aplicaciones prácticas

Dado que la aplicación del JRC en el mundo de la ingeniería geotécnica es amplio, es necesario resaltar que el análisis de datos de rugosidad con una mayor rapidez y validez podría representar un gran avance en los análisis de estabilidad de macizos rocosos.

El hecho de tener a nuestra disposición modelos tridimensionales de un afloramiento completo abre la posibilidad de evaluar una mayor cantidad de datos de rugosidad en superficies de discontinuidad, lo que conlleva a una mejor estimación de su comportamiento mecánico y así poder generar análisis de estabilidad cada vez más precisos. Por supuesto esto se podrá ver reflejado en una disminución en el tiempo de trabajo.

6.2 Líneas futuras de investigación

Dados los diferentes parámetros que influyen en la restitución fotogramétrica, es necesario realizar una investigación más profunda, centrada directamente en los parámetros que deben ser controlados antes, durante y después de la toma de fotografías en afloramiento, para establecer procesos más estandarizadas que permitan obtener reconstrucciones del relieve fieles destinadas al análisis de rugosidad en discontinuidades; así como analizar las distancias máximas de separación entre los puntos de control (GCP's), y entre el afloramiento y las fotografías en las cuales la reconstrucción de los afloramientos sea lo más fiel posible a lo observado en la realidad.

Uno de los mayores beneficios que podría traer el análisis de rugosidad mediante nubes de puntos, una vez que se hayan tratado los puntos anteriores, es la obtención de valores de JRC característicos para varios planos de discontinuidad. Sin embargo, una de las grandes incógnitas durante el análisis de JRC es reconocer la cantidad óptima de perfiles de rugosidad que deben ser analizados para obtener un estimado de la rugosidad de una discontinuidad, así como el método de análisis estadístico que mejor represente a la rugosidad de alguna superficie de discontinuidad.

Con esto en mente, es posible plantear una investigación que se centre en la determinación estadística del número de perfiles de rugosidad que deban ser medidos para realizar una óptima caracterización de la rugosidad, además de la creación de algoritmos que permitan el procesamiento de datos de perfiles de rugosidad con una mayor rapidez y la obtención de resultados fiables que optimicen el cálculo de variables de interés ingenieril. El cálculo de variables como el JRC no es por supuesto la única variable que pueda ser obtenida a partir del relieve de las superficies que se analizan, ya que la rugosidad también juega un papel muy importante en la determinación del flujo de fluidos a lo largo de una discontinuidad como lo estudia Chae et al. (2012). Esto de igual forma abre una posibilidad con las nuevas perspectivas de obtención de energía geotérmica, las cuales pudieran requerir del análisis del flujo de agua en las discontinuidades por las cuales fluye en el agua de la cual se depende para su obtención y por ende optimizar la eficiencia de los sistemas involucrados.

Trabajos como los hechos por Li & Huang (2015) y Li & Zhang (2015) pueden servir como una base no solo para investigar las limitaciones de los modelos propuestos, como es el caso de este trabajo, sino también para realizar una comparación crítica de las demás variables que pueden caracterizar a la rugosidad.

Es por supuesto lógico que las tecnologías y algoritmos para el procesamiento de datos tenderán a evolucionar con el pasar de los años, por lo tanto, es importante realizar análisis de las facilidades que diferentes modelos de vehículos aéreos no tripulados puedan traer consigo en la obtención de datos destinados a la fotogrametría.

Si bien las recomendaciones anteriores son un gran reto para el futuro desarrollo de estos métodos, las bases teóricas resultan ser un gran apoyo para su desarrollo ya que a pesar de haber comenzado a ser publicadas hace más 60 años, siguen siendo funcionales. Como se mencionó durante el marco teórico, las técnicas de percepción remota de algún modo nos permiten modificar ciertos puntos de métodos publicados con anterioridad, además de facilitar la cuantificación de la confiabilidad de estos y sobre las ventajas que conlleva su uso y aplicación en el mundo de la ingeniería.

Este trabajo, aunque introductorio en muchos sentidos, busca dar una pequeña perspectiva sobre las limitaciones en los métodos empleados que futuras investigaciones deben tomar en cuenta para una mejor caracterización de la rugosidad, aunque no exclusiva, en discontinuidades de un macizo rocoso.

REFERENCIAS

- Alameda-Hernández, P., Jiménez-Perálvarez, J., Palenzuela, J. A., El Hamdouni, R., Irigaray, C., Cabrerizo, M. A., & Chacón, J. (2014). Improvement of the JRC Calculation Using Different Parameters Obtained Through a New Survey Method Applied to Rock Discontinuities. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 47(6), 2047–2060. <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0532-2>.
- Agisoft. (2024). Agisoft Metashape (Version 2.2.0) [Software]. <https://www.agisoft.com/>
- Armstrong, M. (1998). Basic linear geostatistics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Barton, N. (1973). Reviews REVIEW OF A NEW SHEAR-STRENGTH CRITERION FOR ROCK JOINTS. In *Engineering Geology* (Vol. 7).
- Barton, N., & Choubey, V. (1977). The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice. In *Rock Mechanics* (Vol. 10).
- Beer, A. J., Stead, D., C Coggan, J. S. (2002). Estimation of the Joint Roughness Coefficient (JRC) by Visual Comparison. In *Rock Mech. Rock Engng* (Issue 1). www.ex.ac.uk/~ajbeer/geomechanics/jrctest.htm
- Bieniawski, Z.T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. *Transaction of the South African Institution of Civil Engineers*, 15, 335-344.
- Bonneval, H. (1972) *Photogrammétrie générale*. París: s.n.
- Cano Serrano, A. N. (2023). Detección de cambios en la vegetación mediante percepción remota en la zona minera contaminada de Francisco I. Madero, Zacatecas: Fitorremediación como solución. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México
- Chae, B. G., Choi, J. H., Ichikawa, Y., & Seo, Y. S. (2012). Analysis of the permeability characteristics along rough-walled fractures using a homogenization method. *Nuclear Engineering and Technology*, 44(5), 43–52. <https://doi.org/10.5516/NET.06.2011.034>
- CloudCompare. (2024). *CloudCompare* (Versión 2.13) [Software]. <https://www.cloudcompare.org/>
- Córdoba, M. (2015). Geoestadística. En M. Balzarini, J. Di Rienzo, M. Tablada, L. González, C. Bruno, W. Robledo, & F. Casanoves (Eds.), *Estadística y biometría: ilustraciones del uso de InfoStat en problemas de agronomía* (pp. 335-350). Editorial Brujas.

- Fernández, T., Luis Pérez, J., López, A., Miguel Gómez, J., Cardenal, J., & Delgado, J. (n.d.). *80_Fernandez et al_Monitorización de laderas inestables mediante técnicas fotogramétricas a partir de vuelos UAV e históricos.*
- Fischer. M. M., Getis A. (2010). *Handbook of Applied Spatial Analysis: Software Tools, Methods and Applications.* Springer Heidelberg Dordrecht
- Fra Paleo, U. (2011). *Diccionari Terminològic de Fotogrametria.* Institut Cartogràfic de Catalunya - ICC.
- Fröhlich, C., Mettenleiter, M. (2004) Terrestrial laser scanning—new perspectives in 3D surveying. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci* 36(8).
- Garcia Luna. R. (2023). *Estudio y aplicación de la técnica fotogramétrica structure from motion para la resolución de problemas geotécnicos.* Tesis doctoral. Universidad Politecnica de Madrid.
- González de Vallejo, L. (2002). *Ingeniería geológica.* Prentice Hall.Hack, R. (2004). *Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe.*
- Hack, R. (2004). *Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe.* <https://doi.org/10.1007/b93922>
- Hartkamp, A.D., K. De Beurs, A. Stein, and J.W. White. 1999. *Interpolation Techniques for Climate Variables.* NRG-GIS Series 99-01. Mexico, D.F.: CIMMYT.
- ISRM. (1978). International society for rock mechanics commission on standardization of laboratory and field tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences C Geomechanics Abstracts*, 15(6), 319–368.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M.-H., Loya, A., Metzger, R., et al. (2012). Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Nat. Hazards* 61, 5–28. doi:10.1007/s11069-010-9634-2
- Lee, Y.-H., Carr, J. R., Barr, D. J., C Haas, C. J. (1990). The Fractal Dimension as a Measure of the Roughness of Rock Discontinuity Profiles. In *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr* (Vol. 27, Issue 6).
- Lengyel, E. (2012). *Mathematics for 3D Game Programming and Computer Graphics* (3rd ed.). Delmar Cengage Learning.
- Lerma García, J.L. C Biosca Tarongers, J.M., (2008). *3D RiskMapping : teoría y práctica del escaneado láser terrestre, [València: Universitat Politècnica de València].*

- Li, Y., & Huang, R. (2015). Relationship between joint roughness coefficient and fractal dimension of rock fracture surfaces. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 75, 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.01.007>
- Li, Y., & Zhang, Y. (2015). Quantitative estimation of joint roughness coefficient using statistical parameters. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 77, 27–35. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.03.016>
- Liu, by X. (1993). *Some improvement on digital fringe-multiplication methods*.
- López Pulido, A., y Rayo Rocha, L. (2019). Caracterización estructural de afloramientos rocosos mediante herramientas de percepción remota. *UD y la Geomática*, (14). <https://doi.org/10.14483/23448407.15249>
- Lowe, D. G. (1999). Object Recognition from Local Scale-Invariant Features. En Proc. of the International Conference on Computer Vision, Corfu (pp. 35–40).
- Maerz NH, Franklin JA, Bennett CP. (1990) Joint roughness measurement using shadow profilometry. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*;27: 329–43.
- Matheron G (1963) Principles of geostatistics. *Econ Geol* 58(8):1246-1266
- Matheron, G. (1971). The theory of regionalized variables (English translation) Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique, Fasc 5. Paris ENSMP 212pp.
- MathWorks. 2024. *MATLAB*. Versión R2024a. <https://www.mathworks.com/>.
- Myers, N. O. (1962). *Characterization of surface roughness*. *Wear*, 5, 182-189
- Patton F. D. (1966). Multiple modes of shear failure in rock. Proc. 1st Congr. Int. Soc. Rock Mech., Lisbon, 1966, Vol. 1, 509-513.
- Riquelme, A. J. (2015). Uso de nubes de puntos 3D para identificación y caracterización de familias de discontinuidades planas en afloramientos rocosos y evaluación de la calidad geomecánica. Tesis doctoral. Universidad de Alicante
- Slob, S., van Knapen, B., Hack, R., Turner, K., and Kemeny, J. (2005). *Method for Automated Discontinuity Analysis of Rock Slopes with Three-Dimensional Laser Scanning*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 1913, no. -1, p. 187-194.
- Tse, R., & Cruden, D. M. (1979). Estimating Joint Roughness Coefficients. In *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr* (Vol. 16). Pergamon Press Ltd.

- Villareal Rubio, E. (2019). Metodología para la extracción de familias de discontinuidades a partir de nubes de puntos obtenidas con dron. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). "Structure-from-Motion" photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Wyllie, D. C., & Mah, C. W. (2005). *Rock Slope Engineering: Civil and Mining* (4th ed.). Taylor & Francis Group.
- Xie HP, Pariseau WG. (1994). Fractal estimation of rock joint roughness coefficient. *Sci China*; 24(5):524–30.
- Yang, X., Zhan, Z., Jiang, N., Yang, J. et al., "A Similarity Evaluation Metric for Mesh Based CAE Model Simplification and Its Application on Vehicle," SAE Technical Paper 2017-01-1332, 2017, doi:10.4271/2017-01-1332.
- Yu XB, Vayssade B. (1991). Joint profiles and their roughness parameters. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*;28:333–6.