



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica
Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica

**Integración de tecnologías RPAS y análisis
geomorfológico para la evaluación de la precisión en el
cálculo de movimiento de tierras en carreteras de
montaña. 2024**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo

AUTOR

Pedro Guillermo BACA QUIÑONEZ

José Alberto LARA HUAPAYA

ASESOR

Mg. Renán Alberto PACHECO ABAD

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Baca, P. & Lara, J. (2026). *Integración de tecnologías RPAS y análisis geomorfológico para la evaluación de la precisión en el cálculo de movimiento de tierras en carreteras de montaña. 2024*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor 1	
Nombres y apellidos	José Alberto Lara Huapaya
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	71472411
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0000-2292-4069
Datos de autor 2	
Nombres y apellidos	Pedro Guillermo Baca Quiñonez
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	76200123
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0009-9542-903X
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Renán Alberto Pacheco Abad
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	06651432
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-6222-438X
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Rolando Yarihuamán Aguilar
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07475732
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Dante Horacio Loayza Alatrística

Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07564915
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	José Antonio Sandoval Casas
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08800785
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.3.25. Tecnología de información y aplicaciones de sistemas
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Piura Provincia: Huancabamba Distrito: Sondor Latitud: -5.315808 Longitud: -79.408964
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2024 - 2026
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería del transporte https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.05 Geociencias, Multidisciplinar https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.01



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓGRAFO

En el Salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el día 16 de enero del 2026, siendo las 10:00 a.m., en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Ing. Rolando Yarihuamán Aguilar	Presidente
Ing. Dante Horacio Loayza Alatrística	Miembro
Ing. José Antonio Sandoval Casas	Miembro

Reunidos en Acto Académico Público de Sustentación de la Tesis titulada «*Integración de tecnologías RPAS y análisis geomorfológico para la evaluación de la precisión en el cálculo de movimiento de tierras en carreteras de montaña. 2024*», presentada por los bachilleres **BACA QUIÑONEZ, PEDRO GUILLERMO** y **LARA HUAPAYA, JOSÉ ALBERTO** para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo, asesorados por el Mg. Renán Alberto Pacheco Abad.

Expuesta la Tesis; los miembros del Jurado plantearon a los bachilleres las preguntas pertinentes, que fueron absueltas a:

A satisfacción de los jurados

Concluida la Sustentación de Tesis, el Jurado procedió a evaluar y calificar la calidad y sustentación en secreto, cuyo calificativo fue:

(17) Diecisiete

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓGRAFO** a los bachilleres **BACA QUIÑONEZ, PEDRO GUILLERMO** y **LARA HUAPAYA, JOSÉ ALBERTO**.

Siendo las *11:45* horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose seis (06) Actas Originales de la Sustentación de Tesis, firmadas por el Jurado Calificador.

Lima, 16 de enero del 2026


Ing. Rolando Yarihuamán Aguilar
PRESIDENTE


Ing. Dante Horacio Loayza Alatrística
MIEMBRO


Ing. José Antonio Sandoval Casas
MIEMBRO


Mg. Renán Alberto Pacheco Abad
ASESOR



CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Renán Alberto Pacheco Abad, en mi condición de asesor acreditado con la Resolución Decanal N° **R.D. N° 000358-2024-DFIGMMG/UNMSM** del 03 de mayo de 2023, de la tesis, cuyo título preliminar fue «*Precisión altimétrica y volumétrica del levantamiento topográfico efectuado con un vehículo aéreo no tripulado (rpas), con el fin de determinar el nivel de confianza en el diseño geométrico de sectores de mejoramiento de una carretera. 2024*», título que evolucionó a **"Integración de tecnologías RPAS y análisis geomorfológico para la evaluación de la precisión en el cálculo de movimiento de tierras en carreteras de montaña. 2024"** el cual refleja de manera más precisa el trabajo realizado. La tesis ha sido presentada y desarrollada en forma **mancomunada** por los bachilleres **José Alberto Lara Huapaya y Pedro Guillermo Baca Quiñones** para optar el título de Ingeniero Geógrafo, **CERTIFICO** que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante el software de similitud textual, el documento evaluado cuenta con el **porcentaje de 11 % de similitud**, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título Ingeniero Geógrafo correspondiente.

RENÁN ALBERTO PACHECO ABAD

DNI: 06651432

ASESOR



DEDICATORIA

Dedico esta tesis, ante todo, a mis padres, Jeny y Paul, por su amor, su apoyo incondicional y su confianza en mí. Gracias por animarme a no rendirme cuando más lo necesitaba y por enseñarme que los sueños se alcanzan con esfuerzo y perseverancia.

A mis abuelos, Beny, quien desde el cielo sigue iluminando mi camino y ha sido siempre mi inspiración para culminar este logro; Sósimo, quien con su cariño y sabias palabras ha sabido alentarme en cada paso; y a mi abuela Eva, por su constante apoyo y amor brindado.

A mis familiares y seres queridos que me acompañaron en cada etapa, y a todas aquellas personas que, con su presencia, enseñanzas o palabras de aliento, han sido parte de mi formación académica y personal.

Con todo mi cariño y gratitud, a cada uno de ustedes, quienes son parte esencial de este logro.

José Alberto Lara Huapaya

DEDICATORIA

A mis padres, Esther y Pedro, por haberme preparado para la vida con
fortaleza, valores y apoyo incondicional.

A mis abuelos, Pedro y Vilma, por sus enseñanzas y consejos que me
inspiran a ser una mejor persona; y a mis abuelos Guillermo y Sofía, quienes desde
el cielo guían y cuidan mi camino, los extraño mucho.

A mis hermanos, Jean Paul, Juan Carlos, Rosemary y Niurka, por
acompañarme siempre y crecer juntos ante las adversidades.

A mis seres queridos, por su compañía y por ser parte fundamental de mi
formación personal y académica.

Con todo mi estima y gratitud.

Pedro Guillermo Baca Quiñonez

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento al Ing. Renán Alberto Pacheco Abad, profesor en nuestra etapa universitaria y ahora nuestro asesor de tesis; por su constante apoyo, orientación y compromiso a lo largo de esta investigación. Su confianza, sus recomendaciones y sus palabras de aliento en los momentos más difíciles fueron fundamentales para la culminación del proyecto.

De igual manera, agradecemos al Ing. Elver Morales León por su guía y por compartir sus amplios conocimientos y experiencia en el diseño geométrico y movimiento de tierras, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo técnico y académico de esta investigación.

Finalmente, extendemos nuestro profundo agradecimiento a nuestros familiares y a todas aquellas personas que nos brindaron su apoyo, motivación y compañía en esta etapa de titulación.

A todos, cuya presencia y apoyo hicieron posible que esta meta se convirtiera en realidad, ¡gracias!

Gracias por la confianza depositada en nosotros.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I	15
1. INTRODUCCIÓN	15
1.1. Introducción:	15
1.2. Planteamiento del problema:	16
1.2.1. Descripción de la problemática:	16
1.2.2. Formulación del problema:	18
1.2.2.1. Problema general:	18
1.2.2.2. Problemas específicos:	18
1.3. Objetivos de la investigación:	18
1.3.1. Objetivo general:	18
1.3.2. Objetivos específicos:	19
1.4. Importancia y alcance de la investigación:	19
1.5. Limitaciones de la investigación:	20
1.5.1. Etapa de pre-campo:	20
1.5.2. Etapa de campo:	21
1.5.3. Etapa de gabinete:	22
CAPÍTULO II	23
2. MARCO TEÓRICO:	23
2.1. Antecedentes de la investigación:	23
2.1.1. Antecedentes internacionales:	23
2.1.2. Antecedentes nacionales:	24
2.2. Bases teóricas:	25
2.2.1. Tecnologías RPAS y análisis geomorfológico:	25
2.2.2. Precisión en el cálculo de movimiento de tierras:	44
2.3. Definición de términos:	74
2.4. Glosario:	75
CAPÍTULO III	77
3. HIPÓTESIS Y VARIABLES:	77
3.1. Las hipótesis:	77
3.1.1. Hipótesis general:	77
3.1.2. Hipótesis específicas:	77
3.2. Las variables:	78
3.3. Operacionalización de las variables:	79
CAPÍTULO IV	80
4. MATERIALES Y MÉTODOS:	80
4.1. Área de estudio:	80

4.2. Tipo de investigación:	81
4.3. Diseño de investigación:	81
4.4. Población:	82
4.5. Muestra:	82
4.6. Instrumentos y recolección de información:	82
4.6.1. Recolección de información geodésica y topográfica:	82
4.6.2. Instrumentos y materiales:	83
4.7. Metodología:	85
4.7.1. Evaluación y selección de los sectores de mejoramiento:	86
4.7.2. Planificación del relevamiento topográfico:	89
4.7.3. Trabajo de campo:	96
4.7.4. Procesamiento de la información topográfica y fotogramétrica:	109
4.8. Análisis estadístico:	142
CAPÍTULO V	143
5. RESULTADOS:	143
5.1. Evaluación de la precisión planimétrica:	143
5.2. Evaluación de la precisión altimétrica:	147
5.3. Evaluación de la precisión volumétrica:	151
5.3.1. Evaluación de la precisión de los volúmenes de corte:	153
5.3.2. Evaluación de la precisión de los volúmenes de relleno:	161
5.4. Evaluación de la influencia de los parámetros geomorfométricos en el cálculo de movimiento de tierras:	171
5.4.1. Influencia de los parámetros geomorfométricos en el volumen de corte total:	171
5.4.2. Influencia de los parámetros geomorfométricos en el volumen de relleno total:	174
5.4.3. Influencia de la morfometría del terreno en la generación de banquetas según el método de medición por sector:	176
5.5. Evaluación costo-tiempo:	180
5.5.1. Evaluación del costo:	180
5.5.2. Evaluación del tiempo:	187
CAPÍTULO VI	193
6. DISCUSIÓN:	193
7. CONCLUSIONES:	202
8. RECOMENDACIONES:	205
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:	207
10. ANEXOS:	213

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	<i>Posicionamiento GNSS absoluto y relativo.</i>	25
Figura 2.	<i>Posicionamiento Relativo, tiempo real cinemático (RTK).</i>	26
Figura 3.	<i>Relación GSD y altura de vuelo.</i>	32
Figura 4.	<i>Estrategias de captura de imágenes en terrenos con variaciones del relieve.</i>	33
Figura 5.	<i>Recubrimiento longitudinal y transversal.</i>	34
Figura 6.	<i>Patrones de vuelo de cuadrícula simple y doble.</i>	36
Figura 7.	<i>Distribución de los PAF en la zona de vuelo.</i>	37
Figura 8.	<i>Tipos de marcas utilizadas en los PAF.</i>	38
Figura 9.	<i>Flujograma del procesamiento fotogramétrico.</i>	38
Figura 10.	<i>Parámetros del MSI.</i>	41
Figura 11.	<i>Área de figuras básicas.</i>	45
Figura 12.	<i>Área del polígono cerrado ABCD.</i>	46
Figura 13.	<i>Método del trapecio para el cálculo de área de una superficie irregular.</i>	49
Figura 14.	<i>Método de Simpson para el cálculo de área de una superficie irregular.</i>	50
Figura 15.	<i>Ecuación generalizada de Simpson, por Easa, para un número par de intervalos no iguales.</i>	51
Figura 16.	<i>Volumen de formas sólidas básicas.</i>	52
Figura 17.	<i>Diferentes configuraciones de las secciones transversales.</i>	53
Figura 18.	<i>Prismoide entre secciones transversales.</i>	54
Figura 19.	<i>Volumen entre secciones transversales del mismo tipo.</i>	55
Figura 20.	<i>Elementos y nomenclaturas de una curva circular.</i>	60
Figura 21.	<i>Curvas verticales convexas, cóncavas, simétricas y asimétricas.</i>	64
Figura 22.	<i>Sección transversal para una carretera de dos carriles en zonas rurales.</i>	65
Figura 23.	<i>Sección transversal en línea recta.</i>	69
Figura 24.	<i>Ubicación política del tramo 09: Sondor – Dv. Tabaconas.</i>	80
Figura 25.	<i>Equipos de medición topográfica.</i>	84
Figura 26.	<i>Diagrama de flujo de la metodología de la investigación.</i>	85
Figura 27.	<i>Ubicación de los sectores de mejoramiento aprobados.</i>	88
Figura 28.	<i>Ladera escarpada, ubicada en el Sector de Mejoramiento, SM-09.</i>	89
Figura 29.	<i>Áreas de vuelo fotogramétrico de la zona de estudio.</i>	91
Figura 30.	<i>Distribución de los PAF en los sectores de mejoramiento, SM-02 y SM-12.</i>	92
Figura 31.	<i>Marcas de los PAF del levantamiento fotogramétrico.</i>	93
Figura 32.	<i>Posicionamiento cinemático en tiempo real (RTK).</i>	94
Figura 33.	<i>Misiones de vuelo, longitudinal y transversal.</i>	95
Figura 34.	<i>Áreas de influencia de las estaciones base.</i>	97
Figura 35.	<i>Medición de la estación base, PA49.</i>	98

Figura 36.	<i>Verificación del sensor IMU del CHCNAV i90.</i>	102
Figura 37.	<i>Medición de los PAF para área de vuelo.</i>	103
Figura 38.	<i>Distribución de los PAF para cada área de vuelo.</i>	104
Figura 39.	<i>Vuelo fotogramétrico de los sectores de mejoramiento.</i>	107
Figura 40.	<i>Presencia de postes durante el vuelo del AV-09-10.</i>	108
Figura 41.	<i>Puntos geodésicos y poligonales de apoyo del tramo de estudio.</i>	110
Figura 42.	<i>Diagrama de flujo de la generación de la ortofoto.</i>	116
Figura 43.	<i>Diagrama de flujo de la generación del Modelo Digital del Terreno.</i>	117
Figura 44.	<i>Parámetros de la clasificación de puntos del terreno.</i>	119
Figura 45.	<i>Evaluación del MDT en función a sus curvas de nivel del AV-03.</i>	121
Figura 46.	<i>Evaluación del MDT en función a sus curvas de nivel del AV-06.</i>	122
Figura 47.	<i>Evaluación del MDT en función a sus curvas de nivel del AV-11.</i>	123
Figura 48.	<i>Vistas aéreas de las zonas de vuelo AV-03, AV-06 y AV-11.</i>	125
Figura 49.	<i>Superficie del SM-08 con estación total.</i>	126
Figura 50.	<i>Generación de la red cuadriculada de puntos del AV-08.</i>	127
Figura 51.	<i>Superficie del AV-08 con RPAS.</i>	127
Figura 52.	<i>Diagrama de flujo del diseño geométrico de los sectores de mejoramiento.</i>	128
Figura 53.	<i>Vía existente y proyectada del SM-08 con estación total y RPAS.</i>	129
Figura 54.	<i>Perfil longitudinal de la vía proyectada del SM-08 con estación total y RPAS.</i>	130
Figura 55.	<i>Sección transversal de la vía proyectada.</i>	130
Figura 56.	<i>Corredor y líneas de muestro de la vía proyectada del SM-08 con estación total y RPAS.</i>	132
Figura 57.	<i>Sección transversal de la progresiva 9+780 del SM-08 con estación total y RPAS.</i>	132
Figura 58.	<i>Sección transversal de la progresiva 9+840 del SM-08 con estación total y RPAS.</i>	133
Figura 59.	<i>Zona común del SM-08 con estación total y RPAS.</i>	138
Figura 60.	<i>Parámetros geomorfológicos de la investigación.</i>	139
Figura 61.	<i>Evaluación de la precisión planimétrica.</i>	143
Figura 62.	<i>Distribución de los RMSE planimétricos por área procesada y global.</i>	147
Figura 63.	<i>Distribución de los RMSE altimétricos por área procesada y global.</i>	150
Figura 64.	<i>Comparación de volúmenes de corte por tipo de material: Estación total vs. RPAS.</i>	153
Figura 65.	<i>Diferencia de volúmenes de corte entre estación total y RPAS por tipo de material.</i>	154
Figura 66.	<i>Error Porcentual Absoluto (APE) y precisión relativa en la estimación de volúmenes de corte mediante estación total y RPAS por sector y tipo de material.</i>	155

Figura 67.	<i>Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) y precisión global en la estimación de volúmenes de corte mediante estación total y RPAS, por tipo de material.</i>	156
Figura 68.	<i>Comparación de volúmenes de corte por tipo de material: Estación total vs. RPAS (Suma total de los 12 sectores).....</i>	157
Figura 69.	<i>Diferencia de volúmenes de corte por tipo de material: Estación total vs. RPAS (Suma total de los 12 sectores).....</i>	158
Figura 70.	<i>APE vs. Precisión total en la estimación de volúmenes de corte mediante estación total y RPAS por tipo de material (Suma total de los 12 sectores).</i>	159
Figura 71.	<i>RMSE en la estimación de volúmenes de corte mediante estación total y RPAS, por tipo de material.</i>	160
Figura 72.	<i>Coeficiente de determinación en la estimación de volúmenes de corte mediante estación total y RPAS por tipo de material.</i>	161
Figura 73.	<i>Comparación de volúmenes de relleno por tipo de procedencia: Estación total vs. RPAS.</i>	162
Figura 74.	<i>Diferencia de volúmenes de relleno entre estación total y RPAS por tipo de procedencia.</i>	163
Figura 75.	<i>APE vs. Precisión relativa en la estimación de volúmenes de relleno mediante estación total y RPAS por tipo de procedencia.</i>	164
Figura 76.	<i>MAPE vs. Precisión global en la estimación de volúmenes de relleno mediante estación total y RPAS por tipo de procedencia.</i>	165
Figura 77.	<i>Comparación de volúmenes de relleno por tipo de procedencia: Estación total vs. RPAS (Suma total de los 12 sectores).</i>	166
Figura 78.	<i>Diferencia de volúmenes de relleno entre estación total y RPAS por tipo de procedencia (Suma total de los 12 sectores).</i>	167
Figura 79.	<i>APE vs. Precisión total en la estimación de volúmenes de relleno mediante estación total y RPAS por tipo de procedencia (Suma total de los 12 sectores).</i>	168
Figura 80.	<i>RMSE en la estimación de volúmenes de relleno mediante estación total y RPAS por tipo de procedencia.</i>	169
Figura 81.	<i>Coeficiente de determinación en la estimación de volúmenes de relleno mediante estación total y RPAS por tipo de procedencia.</i>	170
Figura 82.	<i>Gráficos de R^2 de los parámetros geomorfométricos en relación con el volumen de corte total para cada método de medición.</i>	172
Figura 83.	<i>Gráficos de R^2 de los parámetros geomorfométricos en relación con el volumen de relleno total para cada método de medición.</i>	175

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	<i>Tabulación de la Ecuación 13 para el cálculo de área mediante el método de coordenadas.</i>	47
Tabla 2.	<i>Tabulación de la Ecuación 15 para el cálculo de área mediante el método de coordenadas.</i>	48
Tabla 3.	<i>Clasificación de carreteras según su orografía.</i>	56
Tabla 4.	<i>Clasificación de carreteras según su demanda.</i>	57
Tabla 5.	<i>Rangos de la velocidad de diseño de un tramo homogéneo.</i>	58
Tabla 6.	<i>Longitudes de tramos en tangente.</i>	59
Tabla 7.	<i>Radio mínimos, peraltes máximos y valores límites de fricción.</i>	61
Tabla 8.	<i>Pendientes máximas en porcentajes (%).</i>	63
Tabla 9.	<i>Anchos mínimos de la calzada para tramos rectos en metros, según la velocidad.</i>	66
Tabla 10.	<i>Ancho de bermas en metros, según la velocidad.</i>	66
Tabla 11.	<i>Valores del bombeo en porcentaje.</i>	67
Tabla 12.	<i>Valores de radios mínimos de curvas que no requieren ser peraltados.</i>	67
Tabla 13.	<i>Parámetros para establecer el peralte mínimo.</i>	68
Tabla 14.	<i>Máximos valores del peralte.</i>	68
Tabla 15.	<i>Valores de referencia para taludes en zonas de corte (Relación H:V).</i>	70
Tabla 16.	<i>Valores de referencia para taludes en zonas de relleno (Relación V:H).</i>	70
Tabla 17.	<i>Matriz de operacionalización de las variables de la investigación.</i>	79
Tabla 18.	<i>Equipos y materiales del proyecto de investigación.</i>	83
Tabla 19.	<i>Evaluación y selección de los sectores de mejoramiento.</i>	87
Tabla 20.	<i>Áreas de vuelo fotogramétrico para cada sector de mejoramiento.</i>	90
Tabla 21.	<i>Parámetros del vuelo fotogramétrico.</i>	94
Tabla 22.	<i>Estaciones base para cada área de vuelo.</i>	96
Tabla 23.	<i>Coordenadas UTM y cotas niveladas de las estaciones base.</i>	98
Tabla 24.	<i>Control de la estación base PA35, para el AV-02 y AV-03.</i>	99
Tabla 25.	<i>Control de la estación base PA46, para el AV-05.1.</i>	99
Tabla 26.	<i>Control de la estación base PA48, para el AV-06.</i>	99
Tabla 27.	<i>Control de la estación base PA49, para el AV-07.</i>	100
Tabla 28.	<i>Control de la estación base PA50, para el AV-08.</i>	100
Tabla 29.	<i>Control de la estación base GPS06, para el AV-09-10.</i>	101
Tabla 30.	<i>Control de la estación base PA53, para el AV-11, AV-12, AV-13 y AV-14.</i>	101
Tabla 31.	<i>Coordenadas UTM y cotas de los PAF para cada área de vuelo.</i>	105
Tabla 32.	<i>Número de fotografías aéreas por cada área de vuelo.</i>	108
Tabla 33.	<i>Factores combinados para cada PAF.</i>	111

Tabla 34.	<i>Transformación de coordenadas UTM a topográficas de los PAF del AV-09-10.</i>	113
Tabla 35.	<i>Coordenadas topográficas y cotas de los PAF para cada área de vuelo.</i>	114
Tabla 36.	<i>Valores de los parámetros de la clasificación de puntos del terreno.</i>	118
Tabla 37.	<i>Valores de los GSD resultantes de los procesamiento fotogramétricos.</i>	125
Tabla 38.	<i>Valores de los parámetros del diseño de la vía proyectada en planta.</i>	129
Tabla 39.	<i>Valores de los parámetros del diseño del ensamblaje.</i>	131
Tabla 40.	<i>Metrado de movimiento de tierra del SM-08 con estación total.</i>	134
Tabla 41.	<i>Metrado de movimiento de tierra del SM-08 con RPAS.</i>	135
Tabla 42.	<i>Resumen del metrado de movimiento de tierra de los sectores de mejoramiento con estación total.</i>	136
Tabla 43.	<i>Resumen del metrado de movimiento de tierra de los sectores de mejoramiento con RPAS.</i>	137
Tabla 44.	<i>Parámetros geomorfométricos de la investigación.</i>	139
Tabla 45.	<i>Valores de los parámetros geomorfométricos de los sectores de mejoramiento con estación total.</i>	140
Tabla 46.	<i>Valores de los parámetros geomorfométricos de los sectores de mejoramiento con RPAS.</i>	141
Tabla 47.	<i>Desfases planimétricos de los PAF.</i>	144
Tabla 48.	<i>RMSE planimétrico por área procesada y global.</i>	146
Tabla 49.	<i>Desfases altimétricos de los PAF.</i>	148
Tabla 50.	<i>RMSE altimétrico por área procesada y global.</i>	149
Tabla 51.	<i>Valores de R^2 de los parámetros geomorfométricos en relación con el volumen de corte total para cada método de medición.</i>	173
Tabla 52.	<i>Valores de R^2 de los parámetros geomorfométricos en relación con el volumen de relleno total para cada método de medición.</i>	174
Tabla 53.	<i>Cantidad de banquetas generadas según el método de medición por sector.</i>	177
Tabla 54.	<i>Número de secciones transversales que presentan variaciones en la generación de banquetas por sector.</i>	179
Tabla 55.	<i>Costo del trabajo de levantamiento fotogramétrico con RPAS.</i>	181
Tabla 56.	<i>Costos por hospedaje y alimentación del levantamiento fotogramétrico con RPAS.</i>	181
Tabla 57.	<i>Costos por materiales del levantamiento fotogramétrico con RPAS.</i>	182
Tabla 58.	<i>Costos por movilización y desmovilización del levantamiento fotogramétrico con RPAS.</i>	182
Tabla 59.	<i>Presupuesto total del levantamiento fotogramétrico con RPAS.</i>	183
Tabla 60.	<i>Costo del trabajo de levantamiento topográfico con estación total.</i>	183
Tabla 61.	<i>Costos por hospedaje y alimentación del levantamiento topográfico con estación total.</i>	183
Tabla 62.	<i>Costos por materiales del levantamiento topográfico con estación total.</i>	184

Tabla 63.	<i>Costos por movilización y desmovilización del levantamiento topográfico con estación total.....</i>	184
Tabla 64.	<i>Presupuesto total del levantamiento topográfico con estación total.</i>	185
Tabla 65.	<i>Comparación de los costos totales por método de medición.....</i>	185
Tabla 66.	<i>Comparación de los costos del movimiento de tierras.....</i>	186
Tabla 67.	<i>Tiempos del procesamiento fotogramétrico por área de vuelo.</i>	188
Tabla 68.	<i>Tiempo promedio del procesamiento fotogramétrico por sector.</i>	189
Tabla 69.	<i>Tiempo promedio del levantamiento fotogramétrico con RPAS por sector.</i>	190
Tabla 70.	<i>Tiempo promedio del levantamiento topográfico con estación total por sector. .</i>	191
Tabla 71.	<i>Comparación de tiempos totales entre el RPAS y la estación total por sector... </i>	191

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.	<i>Matriz de consistencia.</i>	213
Anexo 2.	<i>Transformación de coordenadas UTM a topográficas de los PAF del AV-02-03.</i>	215
Anexo 3.	<i>Transformación de coordenadas UTM a topográficas de los PAF del AV-05.1.</i>	216
Anexo 4.	<i>Transformación de coordenadas UTM a topográficas de los PAF del AV-06. ...</i>	216
Anexo 5.	<i>Transformación de coordenadas UTM a topográficas de los PAF del AV-07. ...</i>	217
Anexo 6.	<i>Transformación de coordenadas UTM a topográficas de los PAF del AV-08. ...</i>	217
Anexo 7.	<i>Transformación de coordenadas UTM a topográficas de los PAF del AV-11-12-13-14.</i>	218
Anexo 8.	<i>Metrado de movimiento de tierra del SM-02 con estación total.</i>	219
Anexo 9.	<i>Metrado de movimiento de tierra del SM-03 con estación total.</i>	220
Anexo 10.	<i>Metrado de movimiento de tierra del SM-05.1 con estación total.</i>	221
Anexo 11.	<i>Metrado de movimiento de tierra del SM-06 con estación total.</i>	222
Anexo 12.	<i>Metrado de movimiento de tierra del SM-07 con estación total.</i>	223
Anexo 13.	<i>Metrado de movimiento de tierra del SM-09 con estación total.</i>	224
Anexo 14.	<i>Metrado de movimiento de tierra del SM-10 con estación total.</i>	225
Anexo 15.	<i>Metrado de movimiento de tierra del SM-11 con estación total.</i>	226
Anexo 16.	<i>Metrado de movimiento de tierra del SM-12 con estación total.</i>	227
Anexo 17.	<i>Metrado de movimiento de tierra del SM-13 con estación total.</i>	228
Anexo 18.	<i>Metrado de movimiento de tierra del SM-14 con estación total.</i>	229
Anexo 19.	<i>Metrado de movimiento de tierra del SM-02 con RPAS.</i>	230
Anexo 20.	<i>Metrado de movimiento de tierra del SM-03 con RPAS.</i>	231
Anexo 21.	<i>Metrado de movimiento de tierra del SM-05.1 con RPAS.</i>	232
Anexo 22.	<i>Metrado de movimiento de tierra del SM-06 con RPAS.</i>	233
Anexo 23.	<i>Metrado de movimiento de tierra del SM-07 con RPAS.</i>	234
Anexo 24.	<i>Metrado de movimiento de tierra del SM-09 con RPAS.</i>	235
Anexo 25.	<i>Metrado de movimiento de tierra del SM-10 con RPAS.</i>	236
Anexo 26.	<i>Metrado de movimiento de tierra del SM-11 con RPAS.</i>	237
Anexo 27.	<i>Metrado de movimiento de tierra del SM-12 con RPAS.</i>	238
Anexo 28.	<i>Metrado de movimiento de tierra del SM-13 con RPAS.</i>	239
Anexo 29.	<i>Metrado de movimiento de tierra del SM-14 con RPAS.</i>	240
Anexo 30.	<i>Evaluación de la precisión volumétrica del corte total.</i>	241
Anexo 31.	<i>Evaluación de la precisión volumétrica del material suelto.</i>	242
Anexo 32.	<i>Evaluación de la precisión volumétrica de la roca suelta.</i>	243
Anexo 33.	<i>Evaluación de la precisión volumétrica de la roca fija.</i>	244
Anexo 34.	<i>Evaluación de la precisión volumétrica del relleno total.</i>	245

Anexo 35.	<i>Evaluación de la precisión volumétrica del relleno propio.....</i>	246
Anexo 36.	<i>Evaluación de la precisión volumétrica del relleno de préstamo.</i>	247
Anexo 37.	<i>Evaluación de la precisión volumétrica de la eliminación de material.</i>	248
Anexo 38.	<i>Generación de banquetas del SM-02.....</i>	249
Anexo 39.	<i>Generación de banquetas del SM-03.....</i>	249
Anexo 40.	<i>Generación de banquetas del SM-05.1.....</i>	250
Anexo 41.	<i>Generación de banquetas del SM-06.....</i>	250
Anexo 42.	<i>Generación de banquetas del SM-07.....</i>	251
Anexo 43.	<i>Generación de banquetas del SM-08.....</i>	251
Anexo 44.	<i>Generación de banquetas del SM-09.....</i>	252
Anexo 45.	<i>Generación de banquetas del SM-10.....</i>	252
Anexo 46.	<i>Generación de banquetas del SM-11.....</i>	253
Anexo 47.	<i>Generación de banquetas del SM-12.....</i>	253
Anexo 48.	<i>Generación de banquetas del SM-13.....</i>	254
Anexo 49.	<i>Generación de banquetas del SM-14.....</i>	255
Anexo 50.	<i>Interpretación de los valores del coeficiente de determinación (R2).</i>	255

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción:

La infraestructura vial es clave para el desarrollo económico y social de un país, y en el caso del Perú, resulta aún más relevante debido a la complejidad de su terreno, caracterizado por un relieve accidentado y una gran diversidad biológica. El mantenimiento de las redes viales es esencial para garantizar la conectividad y accesibilidad en diferentes regiones, especialmente en áreas rurales, lo que contribuye a reducir las desigualdades sociales. La construcción de carreteras no solo facilita el acceso a servicios básicos, sino que también estimula el comercio, reduciendo los costos de transporte y mejorando la calidad de vida.

El reto de construir y mantener estas infraestructuras se complica por el terreno montañoso y la vulnerabilidad de las zonas a desastres naturales como huaicos y/o deslizamientos. Por esta razón, es crucial contar con un adecuado plan de conservación que asegure la transitabilidad y la seguridad vial.

En los últimos años, el avance tecnológico ha permitido el uso de herramientas más eficientes para la topografía, como los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) y los Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia (RPAS). Estas tecnologías optimizan los levantamientos topográficos, especialmente en terrenos difíciles donde los métodos tradicionales resultan complicados.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo evaluar la precisión en el cálculo de movimiento de tierras en carreteras de montaña mediante el uso de sistemas RPAS, integrando el análisis geomorfológico como apoyo y su influencia en la estimación volumétrica.

1.2. Planteamiento del problema:

1.2.1. Descripción de la problemática:

Las carreteras son el principal medio de transporte en todo el mundo, siendo fundamentales para el desarrollo económico, social y cultural, ya que permiten el traslado de personas y mercancías incluso a zonas remotas. Según el Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe (CAF, 2023), la infraestructura vial en América Latina y el Caribe (ALC) presenta brechas significativas tanto en su extensión como en su calidad. Asimismo, el deficiente estado de las vías incide de manera directa en el incremento de la siniestralidad vial.

En el Perú, según el Centro de Operaciones de Emergencia Nacional (COEN, 2017), fenómenos naturales como El Niño provocan serios daños a la red vial, especialmente en regiones montañosas, donde deslizamientos e inundaciones afectan miles de kilómetros de carreteras. Aunque se asignan presupuestos para la reconstrucción, muchas veces estos no se ejecutan de manera eficiente. Por ejemplo, el Ministerio de Economía y Finanzas (MEF, 2019), detalló que, en el tema de infraestructura, el gobierno central usó el 94.5 % de su Presupuesto Institucional Modificado (PIM) en la red vial nacional. Sin embargo, los gobiernos regionales solo gastaron el 48.1 % en las redes viales departamentales, sin llegar a ejecutar ni la mitad del presupuesto asignado. Además, la Contraloría General de la República del Perú (2022) advirtió sobre deficiencias en la elaboración de expedientes técnicos que afectan la calidad de los proyectos. Posteriormente, en 2023, señaló que estos problemas persisten durante la ejecución de obras, generando retrasos, sobrecostos y paralizaciones.

El movimiento de tierras constituye el objetivo principal del presente trabajo de investigación, dado que su adecuada estimación resulta determinante en los proyectos de mejoramiento vial. Este proceso comprende la modificación de la topografía del terreno para su adecuación al diseño vial, mediante la excavación y traslado de materiales (Asociación Mundial de la Carretera, 2021). Para ello, el levantamiento topográfico debe representar precisamente la superficie real. Tradicionalmente, se emplea la estación total, que, aunque sea precisa, presenta limitaciones en zonas abruptas, ya que solo permite medir puntos accesibles en el terreno. Frente a ello, los métodos fotogramétricos mediante tecnologías RPAS permiten capturar puntos de difícil acceso, mejorando la precisión, reduciendo el tiempo y los costos del trabajo. Por otro lado, el estudio de la geomorfología en regiones montañosas es esencial para comprender los procesos que pueden impactar en la infraestructura vial. Ignorar estos factores puede provocar problemas como la inestabilidad de taludes, la erosión del suelo y daños en la vía, por lo que un análisis geomorfológico permitirá identificar estos riesgos con antelación y desarrollar estrategias para poder garantizar la estabilidad y funcionalidad de la infraestructura vial.

En este contexto, la presente investigación propone evaluar la precisión en el cálculo de movimiento de tierras mediante la integración de tecnologías RPAS y análisis geomorfológico con respecto al levantamiento topográfico con el uso de la estación total, así como la diferencia costo-tiempo entre ambos levantamientos, siendo el caso de estudio: Mejoramiento de la carretera SONDOR – TABACONAS – DV. SAN JOSÉ DEL ALTO – TAMBORAPA (RUTA PE-02B), tramo: Sondor – Dv. Tabaconas. Cabe resaltar que la recolección de datos de campo, mediante vuelos fotogramétricos y mediciones geodésicas, se

realizó en el periodo estacional más favorable del año 2024, lo que garantiza la validez y vigencia de las condiciones geomorfológicas analizadas para esta investigación.

1.2.2. Formulación del problema:

1.2.2.1. Problema general:

- ¿Cuál es la precisión que se puede obtener en el cálculo de movimiento de tierras en carreteras de montaña utilizando tecnologías RPAS y análisis geomorfológico?

1.2.2.2. Problemas específicos:

- ¿Cuál es la precisión actual en el cálculo de movimiento de tierras en carreteras de montaña utilizando tecnologías RPAS en comparación con los métodos tradicionales?
- ¿Cuáles son los parámetros geomorfométricos que más influyen en la precisión del cálculo de movimiento de tierras en carreteras de montaña utilizando tecnologías RPAS en comparación con los métodos tradicionales?
- ¿Cómo puede la utilización de tecnologías RPAS y análisis geomorfológico reducir el tiempo y el costo en la planificación y ejecución de los proyectos de movimiento de tierras en comparación con los métodos tradicionales en carreteras de montaña?

1.3. Objetivos de la investigación:

1.3.1. Objetivo general:

- Evaluar la precisión en el cálculo de movimiento de tierras en carreteras de montaña utilizando tecnologías RPAS y análisis geomorfológico.

1.3.2. Objetivos específicos:

- Evaluar la precisión actual en el cálculo de movimiento de tierras en carreteras de montaña utilizando tecnologías RPAS en comparación con los métodos tradicionales.
- Identificar los parámetros geomorfométricos que más influyen en la precisión del cálculo de movimiento de tierras en carreteras de montaña utilizando tecnologías RPAS en comparación con los métodos tradicionales.
- Desarrollar un modelo que integre tecnologías RPAS y análisis geomorfológico para reducir el tiempo y el costo en la planificación y ejecución de los proyectos de movimiento de tierras en comparación con los métodos tradicionales en carreteras de montaña.

1.4. Importancia y alcance de la investigación:

La presente investigación propone evaluar la precisión en el cálculo de movimiento de tierras mediante la integración de tecnologías RPAS y el análisis geomorfológico, en comparación con el uso de estación total en carreteras de montaña. Esto generaría una alternativa que busca mejorar la eficiencia, precisión y productividad en los levantamientos, con miras a estandarizar metodologías aplicables tanto en sectores de mejoramiento como en otros proyectos volumétricos similares, incorporando un enfoque más completo del terreno mediante herramientas modernas.

La elección del método de levantamiento suele depender de criterios establecidos en los términos de referencia, los cuales, en muchos de los casos, limitan al profesional a servirse de metodologías tradicionales sin considerar otras alternativas que resultan ser beneficiosas. Por ello, es fundamental determinar cuánta precisión aporta la integración de RPAS y análisis geomorfológico frente a la estación total, a fin

de sustentar técnica y objetivamente la selección del método más adecuado para cada proyecto, mejorando criterios técnicos en la planificación de obras viales.

Los resultados de esta investigación permitirán establecer parámetros técnicos para comparar levantamientos con RPAS y estación total, aportando herramientas que optimicen la ejecución de proyectos. Este conocimiento será útil para instituciones públicas y privadas que realicen labores en donde se incluya cálculos volumétricos en los sectores de mejoramiento, ya que influirá en la toma de decisiones en base a la precisión y eficiencia que se desee alcanzar. Como también, el análisis geomorfológico enriquecerá los estudios del terreno al considerar características morfométricas como la pendiente, forma y extensión de las laderas, fortaleciendo la interpretación del relieve. Todo lo anterior, motivará a futuros investigadores a desarrollar o reforzar metodologías con equipos e instrumentos de vanguardia, promoviendo la generación de conocimiento técnico especializado en levantamientos realizados en zonas montañosas.

1.5. Limitaciones de la investigación:

En la presente investigación, a pesar de los resultados positivos obtenidos en la comparación entre los métodos de levantamiento mediante RPAS y estación total, es importante señalar algunas limitaciones que podrían haber influido en la estimación de volúmenes de corte y relleno y que deben considerarse para futuras investigaciones. Estas limitaciones se dividen según las etapas generales del proyecto: Etapa de pre-campo, campo y gabinete, las cuales se detallan a continuación:

1.5.1. Etapa de pre-campo:

- **Recopilación de la información:** Los datos recopilados del levantamiento con estación total, fueron clave para la comparación en

esta investigación, ya que cumplían con los estándares de calidad requeridos para ser tomados como referencia. Si bien en esta oportunidad no representaron una limitante, en futuros estudios será fundamental garantizar la confiabilidad y calidad de los datos utilizados como referencia.

1.5.2. Etapa de campo:

- **Condiciones climáticas adversas:** Las condiciones atmosféricas cambiantes como la localidad de Sondor, influyen directamente en la recolección de datos del RPAS, ya que vientos fuertes y prolongados pudieron desestabilizar el drone y generar errores en la captura de imágenes.
- **Accesibilidad del terreno:** En los sectores con pendientes pronunciadas, con vegetación densa o suelos inestables, el acceso para la colocación de puntos de apoyo fotogramétrico (PAF) o estaciones bases se vuelven más complejos y en algunos casos imposible, como el SM-11, donde presentaba laderas escarpadas. Esto puede provocar una distribución inadecuada de puntos en los sectores, afectando la precisión en la georreferenciación y la interpolación de superficies.
- **Distribución y precisión de los PAF:** Los también llamados, puntos de fotocontrol, son fundamentales para asegurar la calidad geométrica de las superficies generadas con RPAS. Una mala distribución (por ejemplo, agrupados o en zonas planas únicamente) reduce la precisión en áreas con relieves accidentados, tales como los ubicados en el SM-11 y SM-12 y SM-13, donde los PAF fueron ubicados a lo largo de la carretera. Asimismo, errores en la medición de sus coordenadas, o falta de puntos

de fotocontrol en zonas críticas, pueden afectar significativamente los resultados volumétricos.

- **Cobertura limitada de la muestra de estudio:** El estudio se realizó en 12 sectores previamente definidos, los cuales cumplen con criterios de selección. Sin embargo, los resultados no necesariamente representan todos los escenarios posibles, especialmente en zonas urbanas, con mayor interferencia electromagnética, o en áreas rurales con obstáculos naturales complejos.
- **Restricción normativa y operativa del RPAS:** El uso de RPAS está sujeto a normativas de la aviación civil que pueden restringir vuelos en determinadas zonas o volar a alturas específicas. Si bien no fue un inconveniente en esta investigación, en otros contextos estas restricciones pueden limitar la implementación del RPAS en levantamientos topográficos, especialmente en áreas cercanas a aeropuertos, instalaciones estratégicas, etc.; según la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), en el Perú.

1.5.3. Etapa de gabinete:

- **Limitaciones tecnológicas y capacidad de procesamiento:** La generación de modelos tridimensionales: nubes de puntos, ortofotos y modelos digitales del terreno; requiere el uso de softwares especializados (como Agisoft Metashape) y equipos de cómputo con alta capacidad de procesamiento y memoria. En este estudio, el tiempo de procesamiento y la carga computacional fueron considerables, lo que puede ser una limitante en contextos donde no se disponga de un hardware adecuado o se requiera generar productos en plazos muy cortos según los objetivos de los proyectos.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO:

2.1. Antecedentes de la investigación:

2.1.1. Antecedentes internacionales:

Coco y Buccolini (2015) analizan la evolución del paisaje en cuencas hidrográficas de Italia mediante el Índice Morfométrico de Pendiente (MSI), concluyendo que la pendiente influye significativamente en la configuración del relieve y en la dinámica de las redes de drenaje, siendo las pendientes pronunciadas las que generan mayor erosión y cambios más notables, lo que servirá como base para evaluar su influencia en el cálculo de movimiento de tierras.

Por otro lado, León (2018) evalúa la precisión, costo y tiempo de ejecución de cuatro métodos topográficos en una carretera en Quito, Ecuador. El drone, aunque generó el mayor volumen neto, fue el menos preciso debido a la densidad de puntos y los ruidos del levantamiento. En cuanto al tiempo, el drone fue el más rápido (9.6 h), y la estación total, el más lento (50 h). El scanner láser fue el más preciso, pero presentó el mayor costo, mientras que el drone fue el más económico, por lo que estos resultados servirán de base para la presente investigación.

Navia (2023) estudia la influencia de la pendiente en la estabilidad de los taludes durante las etapas de excavación y construcción en zonas montañosas de La Paz, Bolivia, y determina que la pendiente tiene un impacto directo sobre la estabilidad de los taludes. La estabilidad se ve afectada tanto por la pendiente como por la altura del talud, lo que resalta la importancia de considerar la pendiente en el análisis geomorfológico y en la estimación de procesos de modelado del terreno, lo que servirá como base para la presente investigación.

2.1.2. Antecedentes nacionales:

Vásquez (2021) compara el volumen del material apilado obtenido por estación total y drone en Ayacucho, evaluando su precisión volumétrica y la relación costo-tiempo. Los resultados muestran que el drone fue más económico y rápido que la estación total. En cuanto a la precisión volumétrica, ambos métodos presentaron variaciones pequeñas, entre 0.40 % y 1.30 %, lo que servirá como base para el desarrollo de la presente investigación.

Además, Alca y Gutiérrez (2021) comparan el método de diferencia de superficies con drone y el método de prisma con estación total para el cálculo de movimiento de tierras en un tramo de carretera en Puno. Determinaron que el método con drone tuvo mayor precisión y se asemejó más al volumen real, ya que el método de prisma no consideró los intermedios de las secciones transversales. Los resultados obtenidos servirán como base para la presente investigación.

Finalmente, Cuenca (2021) realiza una comparación entre el levantamiento con drone y estación total, considerando el tipo de cobertura y pendiente del terreno, así como el cálculo de movimiento de tierras, el costo y el tiempo, en un área del centro poblado de Rancha, Ayacucho. Concluye que el método con drone fue más rápido y económico, pero menos preciso en términos volumétricos, lo que plantea la necesidad de establecer tolerancias, aspecto que se abordará en la presente investigación.

2.2. Bases teóricas:

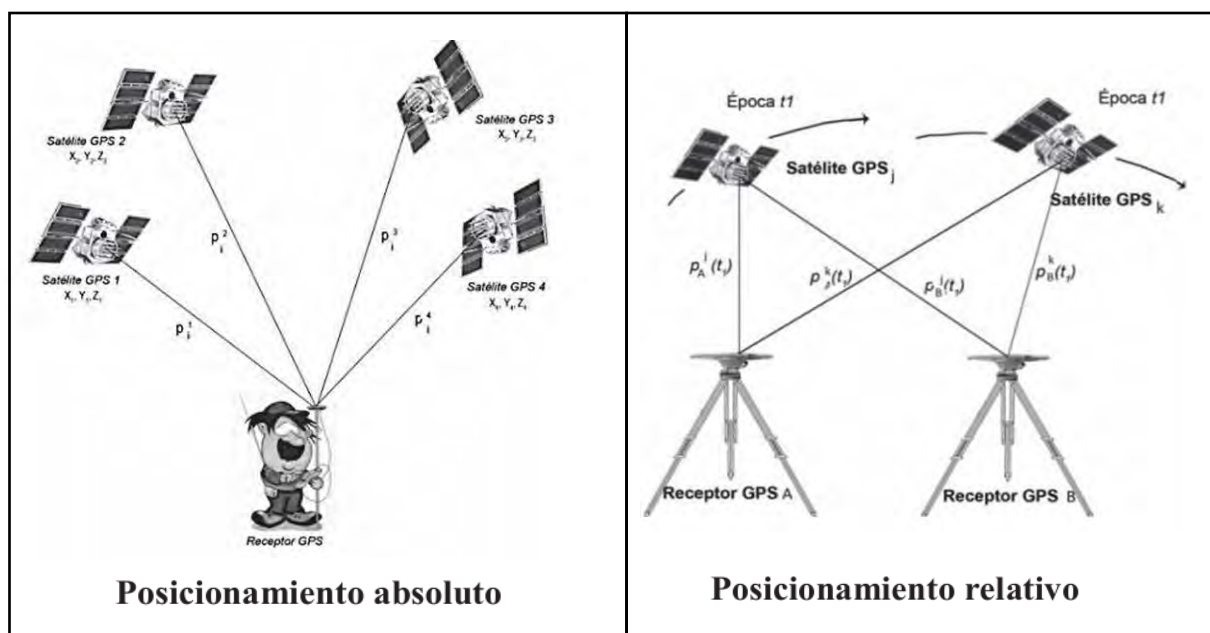
2.2.1. Tecnologías RPAS y análisis geomorfológico:

a) Levantamiento con estación total:

Posicionamiento satelital (GNSS):

Teso (2022) indica que el GNSS es un sistema global destinado a determinar la posición y tiempo mediante constelaciones de satélites artificiales, receptores y sistemas de control. Según Berné et al. (2014), el posicionamiento GNSS se clasifica en absoluto, que calcula coordenadas con un solo receptor y señales de al menos cuatro satélites, y relativo, que determina las variaciones espaciales entre dos puntos, donde uno de ellos actúa como referencia fija, aplicando técnicas como el PPK y RTK.

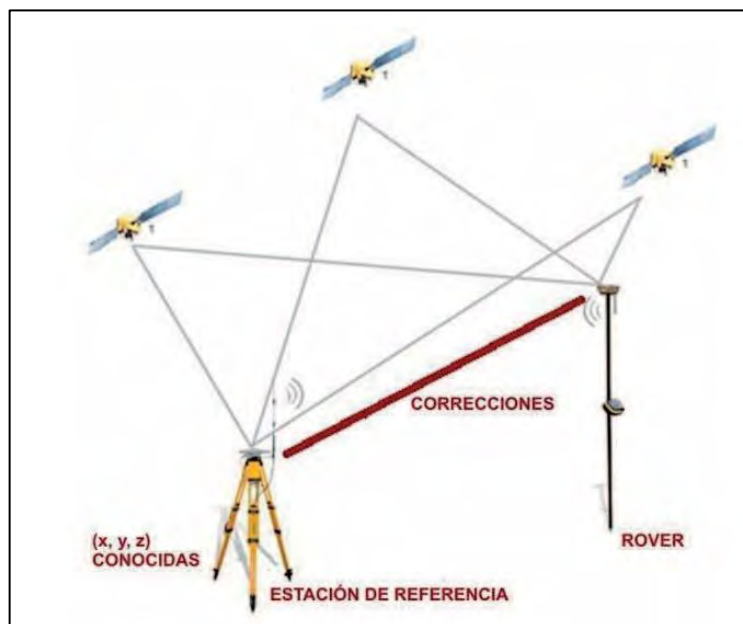
Figura 1. Posicionamiento GNSS absoluto y relativo.



Nota. Extraído de Berné et al. (2014).

Dentro del posicionamiento relativo, existen dos técnicas clave: el postproceso cinemático (PPK) y el tiempo real cinemático (RTK). El PPK determina la posición de un receptor móvil respecto a otro fijo, procesando las coordenadas tras la fase de observación. En cambio, el RTK emplea dos receptores GNSS en simultáneo, donde uno actúa como base y transmite en tiempo real las correcciones al receptor móvil (rover), alcanzando precisiones de hasta 1 o 2 cm mediante software especializado y observaciones por código o fase.

Figura 2. Posicionamiento Relativo, tiempo real cinemático (RTK).



Nota. Extraído de Berné et al. (2014).

Transformación de coordenadas UTM a topográficas:

Según Guillen y Cabello (2021), es común emplear este método en el contexto peruano, el cual implica el cálculo de ciertos factores característicos de la proyección UTM. Entre ellos se encuentran el factor de escala, el factor de elevación (que puede ser sustituido por la Reducción al nivel medio del mar), la corrección por curvatura t-T o arco-cuerda, y la convergencia de meridianos.

Posteriormente, estos factores se aplican de manera inversa con el objetivo de convertir las distancias y ángulos proyectados sobre el cilindro en valores planos. Para implementar esta transformación, es imprescindible considerar ciertas restricciones. En primer lugar, las coordenadas utilizadas no deben presentar variaciones de cota superiores a ± 300 metros. Así mismo, es necesario definir un punto base, cuyas coordenadas permanecen inalterables tras la transformación. Adicionalmente, el área de aplicación del método no debe superar un radio de 5 km desde dicho punto base.

Luego de establecer las restricciones mencionadas, se procede al cálculo de los factores de escala, elevación y el factor combinado, los cuales permiten transformar las distancias UTM en topográficas. Para ello, se emplean las siguientes las fórmulas propuestas por Mendoza (2010):

- **Factor de escala (K_{ESCALA}):** Es el valor que posibilita la proyección de la distancia calculada entre dos puntos en el elipsoide hacia el plano cartográfico. Su cálculo para un punto se expresa de la siguiente forma:

$$K_{ESCALA} = K_0 \cdot [1 + P \cdot q^2 + 0.00003 \cdot q^4] \quad (1)$$

Donde:

- $q = 0.000001 \cdot (X)$

- $X = |500000 - ESTE|$

- $P = \left[\frac{1+e'^2 \cdot \cos^2 \phi}{2 \cdot N^2 \cdot K_0^2} \right] \cdot 10^{12}$

- e'^2 : Cuadrado de la segunda excentricidad.

- N: Radio de la gran normal en "A".

- K_0 : Factor de escala en el Meridiano Central = 0.9996.

- ϕ : Latitud geodésica en "A".

- **Factor de elevación ($K_{ELEV.}$):** Este valor permite trasladar la longitud reducida al horizonte, medida entre dos puntos de la superficie, hacia su correspondiente proyección sobre el elipsoide. Su cálculo se determina de la siguiente manera:

$$K_{ELEV.} = \frac{R-M}{R+h} \quad (2)$$

Donde:

- R: Radio de curvatura del meridiano que corresponde a la latitud promedio entre los dos puntos.

- M: Flecha central.

- h: Elevación elipsoidal promedio entre los dos puntos.

- **Factor combinado (K):** Se determina aplicando la siguiente expresión:

$$K = (K_{ELEV.})(K_{ESCALA}) \quad (3)$$

Donde:

- K: Factor combinado entre dos puntos.

- $K_{ELEV.}$: Factor de elevación entre dos puntos.

- K_{ESCALA} : Factor de escala entre dos puntos.

A partir del factor combinado, es posible determinar la distancia topográfica tomando como referencia la distancia de cuadrícula UTM:

$$L_T = \frac{L_C}{K} \quad (4)$$

Donde:

- L_T : Longitud topográfica.
- L_C : Longitud de la cuadrícula.
- K : Factor combinado.

Por consiguiente, se calculan la corrección por reducción Arco-Cuerda o T-t y por convergencia de meridianos, lo cual permite transformar los ángulos proyectados en la cuadrícula UTM en ángulos topográficos.

- **Convergencia de meridianos:** Es el ángulo horizontal comprendido entre el norte geográfico y el norte de cuadrícula en un punto específico.

Se establece mediante la siguiente ecuación:

$$Tg \gamma = L \cdot t \cdot \cos \phi + L^3 \cdot t \cdot \frac{(1+t^2+3n^2+2n^4)}{3} \cdot \cos^3 \phi \quad (5)$$

Donde:

- γ : Convergencia de meridianos en un punto.
- $L = \text{Signo}(E - 500000)[|\lambda| - |\lambda_0|]$
- $t = Tg \phi$
- $n^2 = e'^2 \cdot \cos^2 \phi$
- e'^2 : Cuadrado de la segunda excentricidad.
- ϕ : Latitud geodésica en "A".
- λ : Longitud geodésica en "A".
- λ_0 : Longitud geodésica en el meridiano central de la zona UTM.

- **Reducción Arco-Cuerda:** Es la variación o diferencia angular entre el azimut plano (t) y el azimut geodésico proyectado (T). Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$(T - t)_{A \rightarrow B} = -\Delta N(2x_1 + x_2) \times P \times 6.8755 \times 10^{-8} \quad (6)$$

Donde:

- $(T - t)_{A \rightarrow B}$: Reducción Arco-Cuerda en segundos.
- $\Delta N = N_B - N_A$
- $x_1 = |500\,000 - E_1|$
- $x_2 = |500\,000 - E_2|$
- $P = \left[\frac{1 + e'^2 \cdot \cos^2 \phi}{2 \cdot N^2 \cdot K_0^2} \right] \cdot 10^{12}$
- e'^2 : Cuadrado de la segunda excentricidad.
- N: Radio de la gran normal en "A".
- K_0 : Factor de escala en el Meridiano Central = 0.9996.
- ϕ : Latitud geodésica en "A".

Mediante estos dos factores, es posible ajustar los ángulos, convirtiendo los ángulos proyectados en ángulos topográficos:

$$A_{Z_{Topo}} = A_{Z_{UTM}} + (T - t)_{A \rightarrow B} - \gamma \quad (7)$$

Donde:

- $A_{Z_{Topo}}$: Azimut topográfico.
- $A_{Z_{UTM}}$: Azimut proyectado UTM.
- $(T - t)_{A \rightarrow B}$: Reducción Arco-Cuerda en segundos.
- γ : Convergencia de meridianos en un punto.

Una vez determinadas las distancias y ángulos topográficos, se procede al cálculo de las coordenadas topográficas mediante el uso de las ecuaciones tradicionales:

$$x = D_{Topo} \cdot \text{Sen}(A_{Z_{Topo}}) \quad (8)$$

$$y = D_{Topo} \cdot \text{Cos}(A_{Z_{Topo}}) \quad (9)$$

Donde:

- x : Coordenada topográfica en el eje “este”.

- y : Coordenada topográfica en el eje “norte”.

- D_{Topo} : Distancia topográfica.

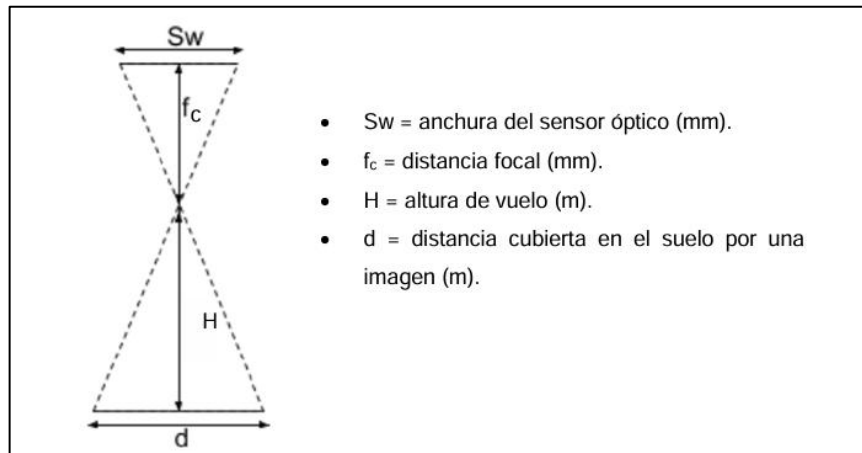
- $A_{Z_{Topo}}$: Azimut topográfico.

b) Levantamiento con RPAS:

La fotogrametría se define como una disciplina que permite obtener mapas y mediciones precisas del terreno a partir de fotografías aéreas captadas con cámaras métricas (Instituto Geográfico Nacional [IGN], 2011). En cuanto al RPAS, trata de un sistema conformado por una aeronave no tripulada, estaciones de control remoto, enlaces de mando y otros componentes necesarios para cada fase de operación (Congreso de la República del Perú, 2018).

- **Ground Sample Distance (GSD):** Para Claros et al. (2016), el GSD representa la separación entre los centros de píxeles contiguos, medida en la superficie terrestre y expresada en unidades relativas.

Figura 3. Relación GSD y altura de vuelo.



Nota. Extraído de Claros et al. (2016).

El GSD se determina mediante la siguiente expresión:

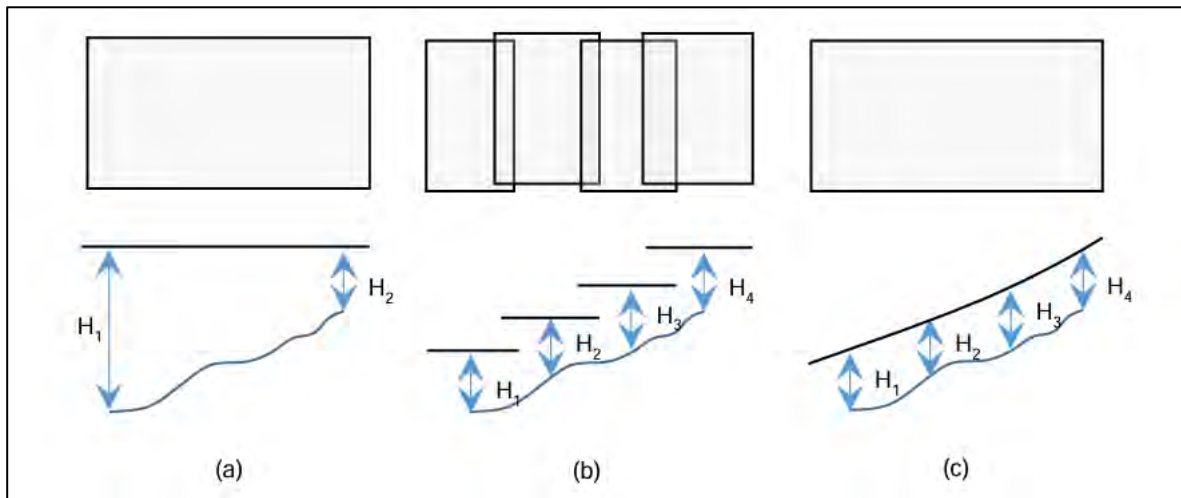
$$GSD = \frac{H \cdot S_w \cdot 100}{f_c \cdot \text{AnchoImagen}} \quad (10)$$

Dónde:

- GSD: Ground Sample Distance en cm/pixel.
- AnchoImagen = Ancho de la imagen en pixel.
- H : Altura de vuelo sobre el terreno en m.
- S_w : Anchura del sensor óptico en mm.
- f_c : Distancia focal en mm.

- **Altura de vuelo:** Según Riaño (2018), la altura de vuelo se determina en función de la escala que se busca y la distancia focal de la cámara. Para Claros et al. (2016), al diseñar un proyecto en un terreno con variaciones altimétricas, es posible estructurar el plan de vuelo mediante tres enfoques distintos, tal como se ilustra en la figura siguiente:

Figura 4. Estrategias de captura de imágenes en terrenos con variaciones del relieve.



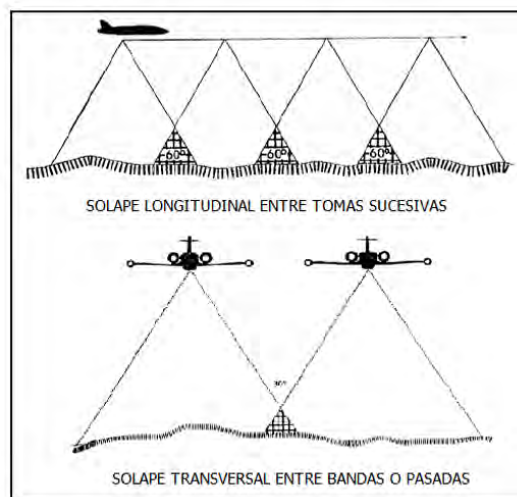
Nota. Extraído de Claros et al. (2016).

En la Figura 4a, un vuelo a altura fija genera variaciones en el GSD, ya que la distancia entre el dron y el terreno cambia a lo largo del proyecto; esto incrementa el GSD en zonas bajas y reduce el traslape en áreas altas si no se ajusta el intervalo de captura. En la Figura 4b, múltiples vuelos a diferentes altitudes permiten mantener un GSD casi constante; se recomienda orientar las líneas de vuelo perpendicular a la pendiente y asegurar un adecuado traslape entre vuelos. En la Figura 4c, un vuelo que sigue la variación de la elevación del relieve conserva una distancia uniforme entre el dron y el terreno, lo que mantiene constante el GSD y mejora la precisión de los resultados.

- **Recubrimiento:** Para Riaño (2018), existen 2 recubrimientos en la fotogrametría digital, donde menciona que, son variables debido a las distintas elevaciones del terreno:

- **Longitudinal:** Establece el porcentaje de superposición longitudinal que se pretende alcanzar entre fotografías sucesivas, es decir, que se aplica en la misma trayectoria de vuelo.
- **Transversal o Lateral:** Establece el porcentaje de superposición lateral que se busca alcanzar entre fotografías continuas, es decir, se aplica entre trayectorias de vuelo contiguas.

Figura 5. *Recubrimiento longitudinal y transversal.*



Nota. Extraído de Claros et al. (2016).

A continuación, se presentan investigaciones en donde se recomienda valores adecuados de superposición aplicadas a regiones montañosas:

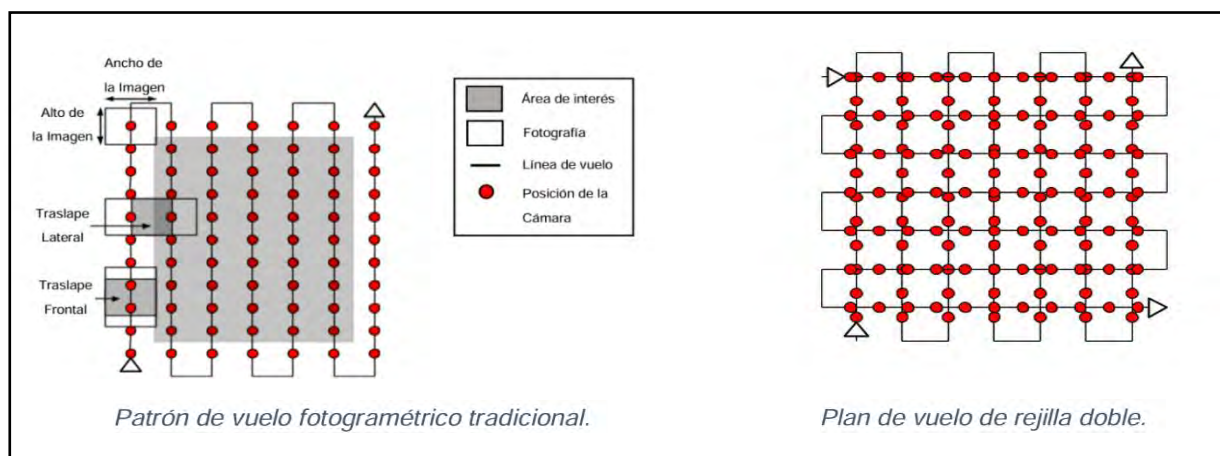
- Dandois et al. (2015), recomiendan que, en entornos mineros, la superposición debe ser del 80 %, tanto longitudinal como transversal, debido a la topografía abrupta, lo cual permite optimizar la generación de modelos precisos.
- Asimismo, según Topoprogram and Service (2019), en terrenos planos, se recomienda un solape longitudinal mínimo de 60 %, mientras que en áreas onduladas o montañosas este valor debe

incrementarse hasta el 80 %. De manera similar, el recubrimiento transversal debe oscilar entre un 30 y 40 %, aumentando hasta un 60 a 80 % cuando se emplea la metodología de visión por computadora para la restitución de elementos verticales.

- Además, Alca y Gutierrez (2021), aplicaron un traslape de 80 % tanto longitudinal como transversal para el levantamiento de una carretera de montaña ubicada en la región de Puno, un entorno caracterizado por terrenos abruptos y de fuertes pendientes.
- F, Hsieh et al. (2023), recomiendan un traslape de 80 % en áreas de laderas montañosas, lo que permite mantener una cobertura uniforme y reducir errores en la restitución de elementos verticales.

- **Patrones de vuelo:** Según Pix4D (2016), en misiones de cuadrícula se emplean dos patrones principales: la cuadrícula simple, que utiliza imágenes nadir con superposición óptima, ideal para mapas 2D en superficies planas o extensas; y la cuadrícula doble, que mejora la captura de elementos verticales y se recomienda para modelos 3D o terrenos con variaciones de altura, siendo más eficiente en áreas pequeñas y medianas, aunque demanda mayor tiempo de vuelo.

Figura 6. *Patrones de vuelo de cuadrícula simple y doble.*

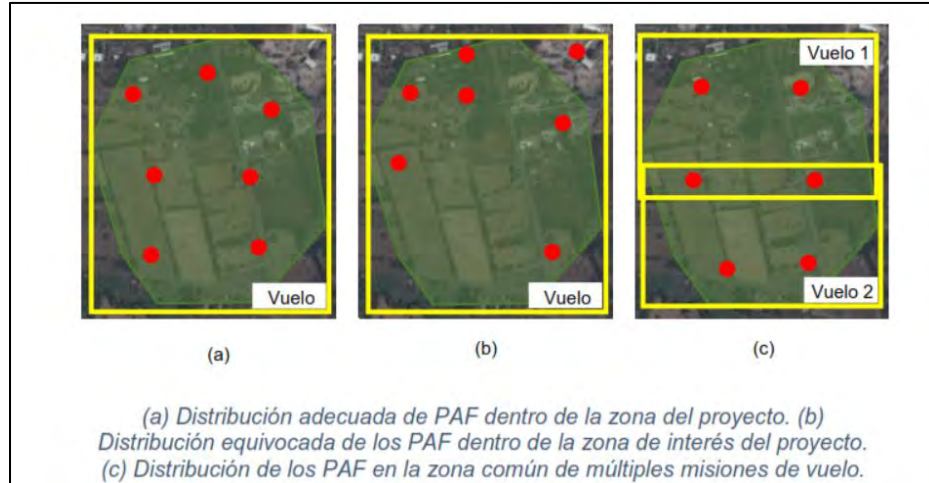


Nota. Extraído de Pix4D. (2016).

- **Puntos de apoyo fotogramétrico (PAF):** También denominado punto de fotocontrol, es un lugar físico en la superficie de la Tierra, del cual se conoce su posición en un sistema de coordenadas (USGS, 2014). Según Claros et al. (2016), se requieren al menos 3 PAF para un ajuste preciso, siendo lo mínimo para la restitución; en proyectos extensos se recomiendan entre 5 y 10, aunque añadir más no mejora significativamente la precisión. Asimismo, la selección y ubicación de los PAF debe basarse en los criterios que se presentan a continuación:
 - Los PAF deben ser identificables en las imágenes.
 - Deben distribuirse de manera homogénea en la zona de vuelo para asegurar una correcta orientación del modelo.
 - Se recomienda que sean elementos artificiales y estables.
 - Es preferible ubicarlos en zonas con poca pendiente.
 - Se debe evitar colocarlos en los vértices del proyecto, ya que su visibilidad en las imágenes sería limitada.

- Cada PAF debe ser visible en al menos 5 imágenes para minimizar posibles imprecisiones.
- En proyectos con múltiples misiones, es necesario ubicar los PAF en las zonas de superposición para asegurar la unificación del proyecto.

Figura 7. *Distribución de los PAF en la zona de vuelo.*



Nota. Extraído de Claros et al. (2016).

Asimismo, las marcas utilizadas suelen ser de forma cuadrada, permitiendo una mejor identificación en las imágenes. Sin embargo, en terrenos abruptos optan por diseños circulares o de cruces para optimizar la precisión en la ubicación del PAF dentro del procesamiento. El tamaño de las marcas varía según el GSD, siendo entre 5 a 10 veces mayor que este. Además, suelen utilizar dos colores contrastantes para facilitar la identificación precisa del centro en las imágenes.

Figura 8. *Tipos de marcas utilizadas en los PAF.*

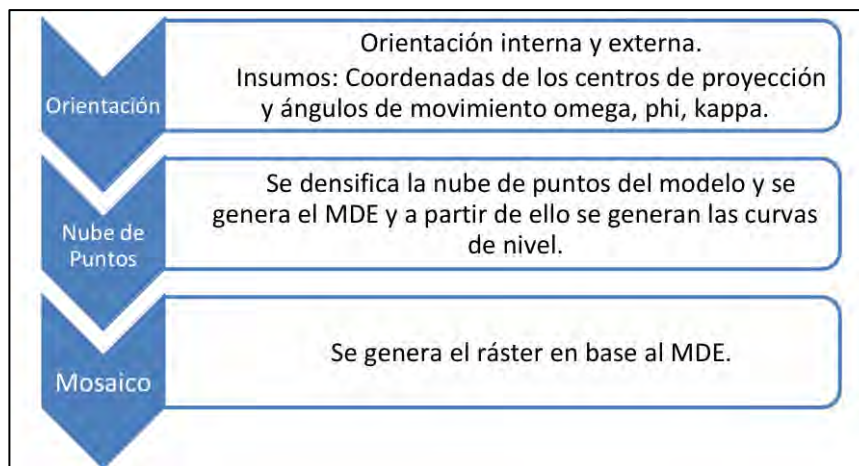


Nota. Extraído de Mettatec (2023).

Procesamiento fotogramétrico:

Según Oropeza (2023), tras la planificación del vuelo y el control terrestre, se inicia el procesamiento de los datos obtenidos, que incluyen las imágenes del RPAS y, en algunos casos, un archivo de geolocalización. A continuación, se presenta el esquema que ilustra este proceso.

Figura 9. *Flujograma del procesamiento fotogramétrico.*



Nota. Extraído de Oropeza (2023).

c) Análisis geomorfológico:

Geomorfología:

La geomorfología se encarga del análisis del relieve terrestre, abarcando el estudio de las formas y estructuras en la superficie de la Tierra a distintas escalas, desde grandes unidades como continentes hasta elementos de menor tamaño, como estrías y alveolos (Lugo, 2025).

Por otro lado, Pedraza (1996) sostiene que el análisis geomorfológico abarca tres aspectos fundamentales:

- **Morfografía:** Se centra en el análisis de la configuración del relieve a través de sus características geométricas, topológicas y fisiográficas.
- **Morfogénesis:** Se enfoca en el origen del relieve a través de los procesos exógenos y morfogenéticos unitarios, como la meteorización y los fenómenos gravitacionales.
- **Morfoevolución:** Estudia las dificultades asociadas con la determinación de sucesiones morfológicas a través del tiempo, permitiendo comprender la transformación del relieve en diferentes escalas temporales.

Morfografía:

Pedraza (1996) señala que la morfografía comprende el análisis de las características del relieve mediante diversas técnicas, métodos y procedimientos, con el propósito de determinar su configuración y comprender las interacciones espaciales que definen las formas del terreno. Esta disciplina se subdivide en los siguientes ámbitos:

- **Morfometría:** Se encarga del análisis de los parámetros espaciales del relieve desde una perspectiva geométrica.
- **Fisiografía:** Se ocupa de identificar las características configuracionales del relieve con el fin de ubicar y contextualizar las formas del terreno dentro de la región a la que pertenecen.

Morfometría:

La morfometría estudia las características geométricas del relieve mediante procedimientos matemáticos, fundamentándose en la “pendiente del terreno”. Este enfoque se basa en el principio de la complejidad de las formas, que implica descomponer progresivamente las formas del relieve en unidades más simples, hasta llegar a una superficie planar representada por una pendiente. Para identificar y delimitar estas formas, es fundamental detectar variaciones en la inclinación, utilizando técnicas topográficas que permiten obtener representaciones precisas del relieve, como mapas de pendientes y análisis detallados (Pedraza, 1996).

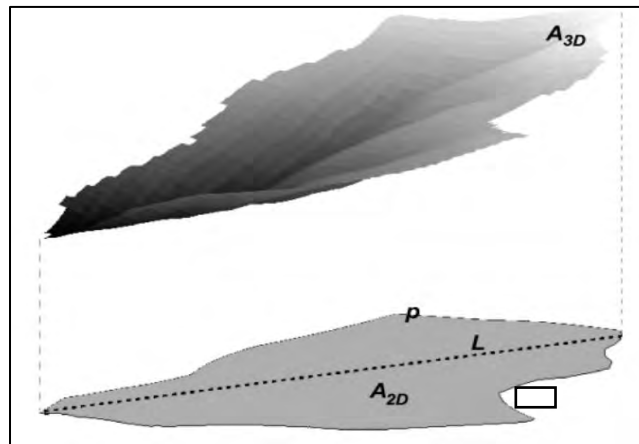
En términos generales, los análisis morfométricos se aplican con mayor frecuencia al estudio de cuencas de drenaje. En ese contexto, Coco y Buccolini (2015) indican que el Índice Morfométrico de Pendiente (MSI) es clave para caracterizar el relieve, ya que cuantifica la influencia de la pendiente en la evolución del paisaje y la organización de redes de drenaje. Además, permite identificar patrones morfodinámicos a distintas escalas espaciales, contribuyendo a la modelización geomorfológica y al análisis de procesos erosivos y formativos del terreno. Su fórmula se presenta a continuación:

$$MSI = 4\pi \cdot \frac{A_{3D}}{p^2} \cdot L \quad (11)$$

Donde:

- MSI: Índice Morfométrico de Pendiente.
- A_{3D} = Área tridimensional del talud en m^2 .
- p : Perímetro de la pendiente en m.
- L : Longitud de la pendiente en m.

Figura 10. *Parámetros del MSI.*



Nota. Extraído de Coco y Buccolini (2015).

En la figura anterior se presentan los parámetros empleados para el cálculo del MSI, los cuales son los siguientes:

- **Perímetro (p):** Representa la longitud del contorno de la superficie analizada.
- **Área 2D (A_{2D}):** Corresponde al área plana del talud, proyectada en un plano horizontal.
- **Área 3D (A_{3D}):** Se refiere al área tridimensional del talud, que considera la inclinación del terreno.

- **Longitud de la pendiente (L):** Es la distancia entre el punto más alto de la divisoria y el punto más bajo de la cuenca.

También, el ancho promedio de una cuenca hidrográfica es un parámetro clave que relaciona el área total y longitud máxima, permitiendo caracterizar su forma y comportamiento hidrológico (Cortolima, 2018).

Por otro lado, Autodesk (2023) señala que el software AutoCAD Civil 3D proporciona una serie de parámetros estadísticos que permiten caracterizar la superficie del terreno a partir de datos topográficos. Entre estos parámetros se encuentran:

- **Elevación mínima:** Representa el punto de menor altitud dentro de la superficie.
- **Elevación máxima:** Señala el punto más alto de altitud registrado dentro de la superficie.
- **Elevación media:** Se obtiene promediando los valores de elevación de todos los puntos de la superficie.
- **Pendiente mínima:** Corresponde al valor más bajo de inclinación en la superficie.
- **Pendiente máxima:** Indica el mayor grado de inclinación registrado en la superficie.
- **Pendiente media:** Es el valor promedio de todas las inclinaciones calculadas en la superficie.
- **Número de puntos:** Hace referencia a la cantidad de puntos de vértice que componen la superficie.

Geomorfometría:

Para Pike et al. (2009), la geomorfometría es una rama de la geomorfología cuantitativa que utiliza métodos matemáticos, estadísticos y de procesamiento de imágenes para medir y analizar el relieve. Su aplicación permite evaluar aspectos morfológicos, hidrológicos, ecológicos y paisajísticos. Además, los parámetros del terreno, también llamados variables del relieve, se obtienen mediante cálculos algebraicos sobre datos geoespaciales. Esta parametrización facilita la clasificación y descripción numérica de las formas topográficas.

Según Jenness (2011), los principales parámetros morfométricos del terreno son la pendiente y la orientación. A su vez, la concavidad y convexidad describen la curvatura, brindando información sobre la forma y estructura de la superficie.

El diseño vial en zonas de ladera requiere un conocimiento preciso del terreno, ya que la alineación debe establecerse desde las primeras etapas para asegurar una adecuada integración morfológica. En este contexto, la longitud total y la cuerda son parámetros fundamentales: la primera representa el recorrido real sobre el terreno, mientras que la segunda corresponde a la distancia recta entre los extremos de un tramo curvo, lo que permite evaluar su adaptación al relieve.

Un adecuado estudio geomorfométrico basado en estos parámetros no solo optimiza el diseño, sino que también mejora la visibilidad del conductor y la seguridad vial (Mark y Marek, 2009).

2.2.2. Precisión en el cálculo de movimiento de tierras:

a) Unidades de superficie bidimensional y tridimensional:

Longitud:

Según el Sistema Internacional de Unidades (SI, 2006), la unidad de la longitud es el metro (m), el cual se define como la distancia del trayecto que la luz recorre en el vacío durante un intervalo de tiempo equivalente a $1/299\,792\,458$ de segundo. (p.22).

Perímetro:

Se define como la dimensión que cuantifica la longitud total del borde de una superficie, se expresa en unidades de longitud, tales como el metro (m), centímetros (cm), entre otros (Carmona y Huircan, 2013, p.11).

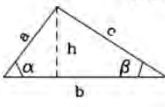
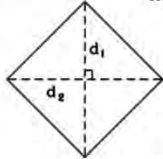
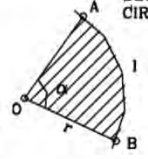
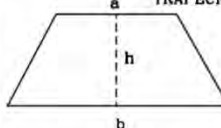
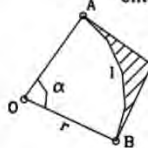
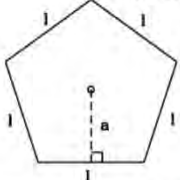
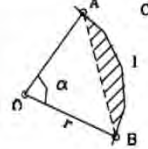
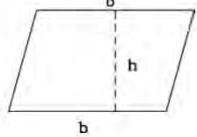
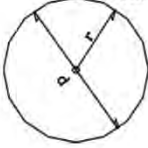
Superficie y área:

La superficie se define como una cualidad asociada a la extensión que ocupa un objeto en el espacio, mientras que el área se conceptualiza como la medida de dicha superficie representada por un número, en unidades cuadradas (Flores, 2002, p.5). Generalmente, se utiliza como patrón de medida el metro cuadrado (m^2). Casanova (2002) señala tres métodos convencionales para el cálculo de áreas:

- **Área de figuras básicas:** En el análisis de extensiones de pequeñas superficies, donde se puede llevar a cabo la medición utilizando cintas métricas, es factible dividir la superficie en formas básicas y conocidas, tales como triángulos, cuadrados, entre otros, cuyas áreas pueden ser calculadas utilizando fórmulas simples.

En la siguiente figura se presenta una recopilación de las expresiones más frecuentes utilizadas para calcular el área de figuras básicas.

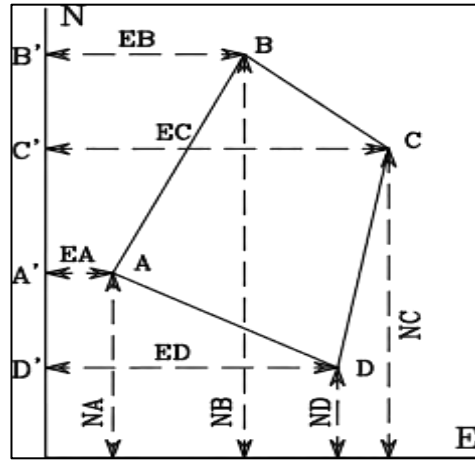
Figura 11. Área de figuras básicas.

FIGURA	AREA	FIGURA	AREA	FIGURA	AREA
TRIANGULO 	$A=b \cdot h/2$ $A=b \cdot a \cdot \text{sen } \alpha /2$ $A=\sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)}$ p=Semi perimetro	ROMBO 	$A= \frac{1}{2} d_1 \cdot d_2$	SECTOR DEI CIRCULO 	$A= \frac{l \cdot r}{2}$ $A= \alpha^{\circ} \frac{r^2}{2} = \frac{\pi r^2 \alpha^{\circ}}{360^{\circ}}$ $A= \alpha^{\circ} \frac{d^2}{4}$
CUADRADO 	$A=a \cdot a$ $A=a^2$	TRAPECIO 	$A= \frac{1}{2} h(a+b);$	EXCESO DEI CIRCULO 	$A= r^2[\tan \frac{\alpha}{2} - (\frac{\pi}{360^{\circ}}) \alpha^{\circ}]$
RECTANGULO 	$A=a \cdot b$	PENTAGONO 	$A=a \cdot p$ $p= \sum l$ p=Perimetro a=Apotema l=Lado Nota: Esta fórmula aplica para todos los poligonos regulares.	ARCO DEI CIRCULO 	$A= r^2[(\frac{\pi}{360^{\circ}}) \alpha^{\circ} - \frac{1}{2} \text{sen } \alpha]$
PARALELOGRAMO 	$A=b \cdot h$	CIRCULO 	$A= \pi \frac{d^2}{4}$ r= Radio d= Diametro Nota: Esta fórmula aplica para todos los poligonos regulares.		

Nota. Extraído de Casanova (2002).

- Área de un polígono utilizando sus coordenadas:** Para calcular el área de una poligonal cerrada se realiza utilizando el método de coordenadas, donde es necesario tener registro de las coordenadas de cada vértice del polígono para llevar a cabo este procedimiento.
- Para calcular el área de un polígono cerrado ABCD, basada en las coordenadas de sus vértices, se expresa mediante la siguiente ecuación:

Figura 12. Área del polígono cerrado ABCD.



Nota. Extraído de Casanova (2002).

$$2 \text{ Área} = N_A(E_B - E_D) + N_B(E_C - E_A) + N_C(E_D - E_B) + N_D(E_A - E_C) \quad (12)$$

La Ecuación 12 puede ser expresada de manera general de la siguiente forma:

$$\text{Área} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{i=n} N_i (E_{i+1} - E_{i-1}) \quad (13)$$

Donde:

- Para $i = 1 \rightarrow E_{i-1} = E_n$

- Para $i = n \rightarrow E_{i+1} = E_1$

Al desarrollar y reorganizar los términos de la Ecuación 12 de manera distinta, se obtiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Área} = & \frac{1}{2} (N_A E_B - E_A N_B) + (N_B E_C - E_B N_C) + (N_C E_D - E_C N_D) + \\ & (N_D E_A - E_D N_A) \end{aligned} \quad (14)$$

De manera general, la Ecuación 14 puede expresarse de la siguiente forma:

$$\text{Área} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{i=n} (N_i E_{i+1} - E_i N_{i+1}) \quad (15)$$

El cálculo asociado a la Ecuación 13 puede ser estructurado en forma de tabla, según se muestra a continuación:

Tabla 1. Tabulación de la Ecuación 13 para el cálculo de área mediante el método de coordenadas.

Punto	COORDENADAS	
	Norte	Este
D		+Ed
A	Na	+Ea
B	Nb	+Eb
C	Nc	+Ec
D	Nd	-Ed
A		-Ea

Nota. Extraído de Casonova (2002).

Se disponen en secuencia los pares de coordenadas de cada punto. Luego, se repite la coordenada “este” del último punto en la posición anterior al primer punto, y la coordenada “este” del primer punto después del último punto. Se conectan mediante flechas las coordenadas “norte” con los “estes” previos y posteriores. Por último, calculamos la suma algebraica del producto de los valores “norte” por la diferencia entre los valores “este” indicados, lo que nos proporcionará el doble del área.

De manera similar, la Ecuación 15 puede organizarse en forma tabulada, como se presenta a continuación:

Tabla 2. Tabulación de la Ecuación 15 para el cálculo de área mediante el método de coordenadas.

Punto	COORDENADAS	
	Norte	Este
A	Na ⁺	Ea ⁻
B	Nb	Eb
C	Nc	Ec
D	Nd	Ed
A	Na	Ea

Nota. Extraído de Casanova (2002).

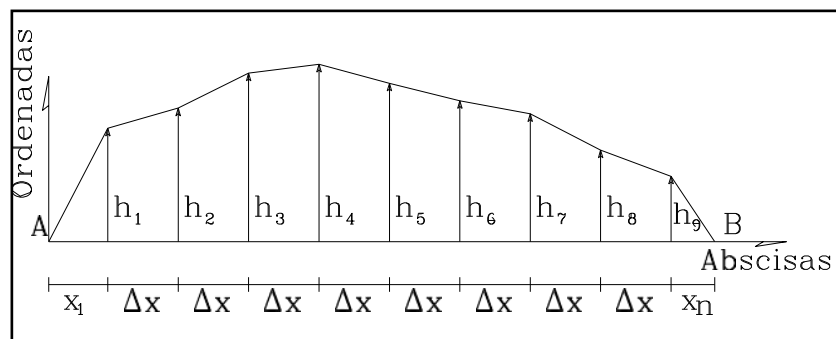
Los pares de coordenadas de cada punto se disponen de manera ordenada. Se repiten las coordenadas del primer punto después del último. Se establecen conexiones entre el “norte” de cada punto y el “este” siguiente, y viceversa. Luego, se realiza una multiplicación cruzada, considerando como positivo el producto de los valores “norte” por los valores “este”, y como negativo el producto de los valores “este” por los valores “norte”. Para calcular el área del polígono, se suma algebraicamente los productos obtenidos y se divide a la mitad el resultado.

- **Área de superficies irregulares:** Ciertos terrenos con una configuración irregular pueden ser subdivididos en una serie de trapezoides mediante la medición de líneas perpendiculares trazadas desde puntos a lo largo de una línea base previamente medida. Las condiciones pueden determinar si el espaciado entre las líneas de referencia es regular o irregular.

En el caso de que la línea de referencia se divida en intervalos iguales o regulares, se puede aplicar el método de los trapecios y el método de Simpson para calcular su área.

- **Método del trapecio:** También denominado como la fórmula de Bezout, parte del supuesto de que el contorno de la superficie se representa mediante segmentos rectos que conectan las ordenadas, dividiendo así la figura en una cantidad variable de trapecios intermedios, ya sea par o impar, junto con dos triángulos extremos. Su fórmula se presenta a continuación:

Figura 13. Método del trapecio para el cálculo de área de una superficie irregular.



Nota. Extraído de Casanova (2002).

$$A_t = \Delta x \left[\frac{(h_1 + h_n)}{2} + h_2 + h_3 + h_4 + \dots + h_{n-1} \right] \quad (16)$$

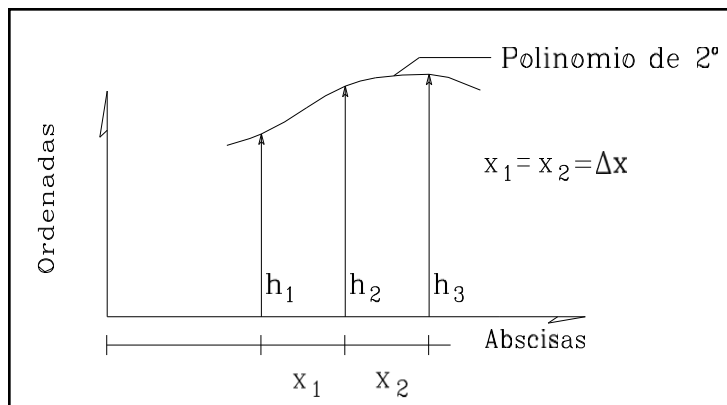
Donde:

- A_t : Representa el área total de los trapecios formados.
- Δx : Expresa la base de los trapecios. La dimensión de la base es uniforme en todos los intervalos.
- h_i : Indica la altura u ordenada de los trapecios.

El área total de la figura se calculará sumando el área total de los trapecios junto con el área de los triángulos externos.

- **Método de Simpson:** También denominado como la fórmula del 1/3, parte del supuesto de que la línea que conecta tres ordenadas sucesivas es un polinomio de segundo grado. Así mismo, está restringido al cálculo de área de una superficie que se encuentra subdividida en un número par de intervalos regulares o iguales. Su fórmula se presenta a continuación:

Figura 14. Método de Simpson para el cálculo de área de una superficie irregular.



Nota. Extraído de Casanova (2002).

$$A_s = \frac{\Delta x}{3} [h_1 + h_n + 2 \sum h_{\text{impares}} + 4 \sum h_{\text{pares}}] \quad (17)$$

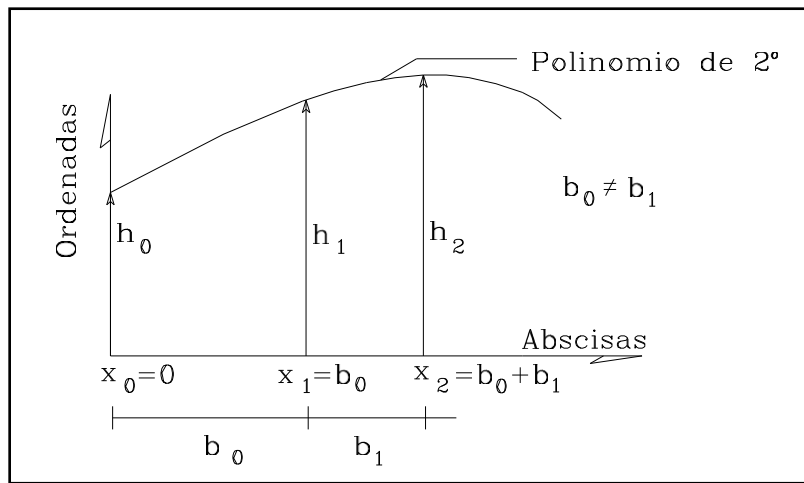
Donde:

- A_s : Representa el área conforme a la fórmula de Simpson.
- Δx : Expresa el intervalo uniforme entre las abscisas.
- h_i : Indica la altura u ordenada del polinomio.

Para calcular el área total de la figura, es necesario incorporar el área de los triángulos extremos.

En situaciones donde no sea posible dividir el área en intervalos regulares, se sugiere emplear la ecuación propuesta por Easa para el escenario de un número par de intervalos no iguales.

Figura 15. Ecuación generalizada de Simpson, por Easa, para un número par de intervalos no iguales.



Nota. Extraído de Casanova (2002).

$$A_s = \sum_{\substack{i=0 \\ i=\text{par}}}^{n-2} \frac{(b_i + b_{i+1})}{6} \left[\frac{(2b_i - b_{i+1})}{b_i} h_i + \frac{(b_i + b_{i+1})^2}{b_i b_{i+1}} h_{i+1} + \frac{(2b_{i+1} - b_i)}{b_{i+1}} h_{i+2} \right] \quad (18)$$

Donde:

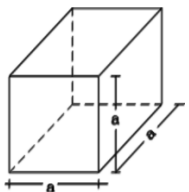
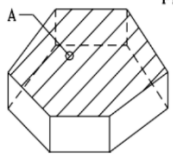
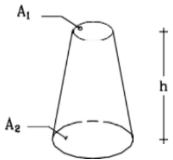
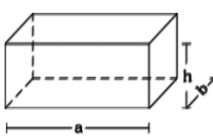
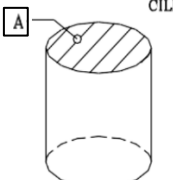
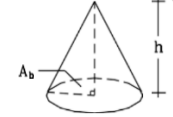
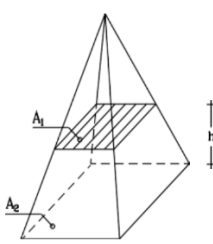
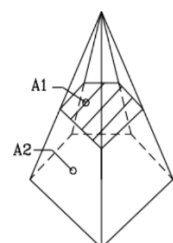
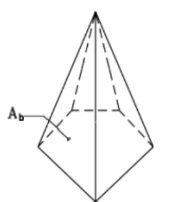
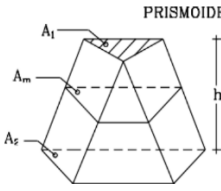
- A_s : Representa el área conforme a la fórmula de Easa.
- i : Expresa el número par de intervalos.
- b_i : Representa la amplitud del intervalo i .
- h_i : Indica la ordenada i .
- x_i : Expresa la abscisa del punto i .

Volumen:

El volumen, según la RAE (2022), es la magnitud física que expresa la extensión de un cuerpo en tres dimensiones: largo, ancho y alto, y cuya unidad en el sistema internacional es el metro cúbico (m³). Casanova (2002) menciona dos metodologías para el cálculo de volúmenes:

- **Volumen de formas sólidas básicas:** Las formas básicas pueden incluir cubos, prismas, pirámides, entre otras. Sin embargo, su aplicación es limitada debido a la dificultad de encontrar aquellas que se ajusten con precisión al objeto a medir. En la siguiente figura se presentan algunas fórmulas utilizadas para calcular su volumen.

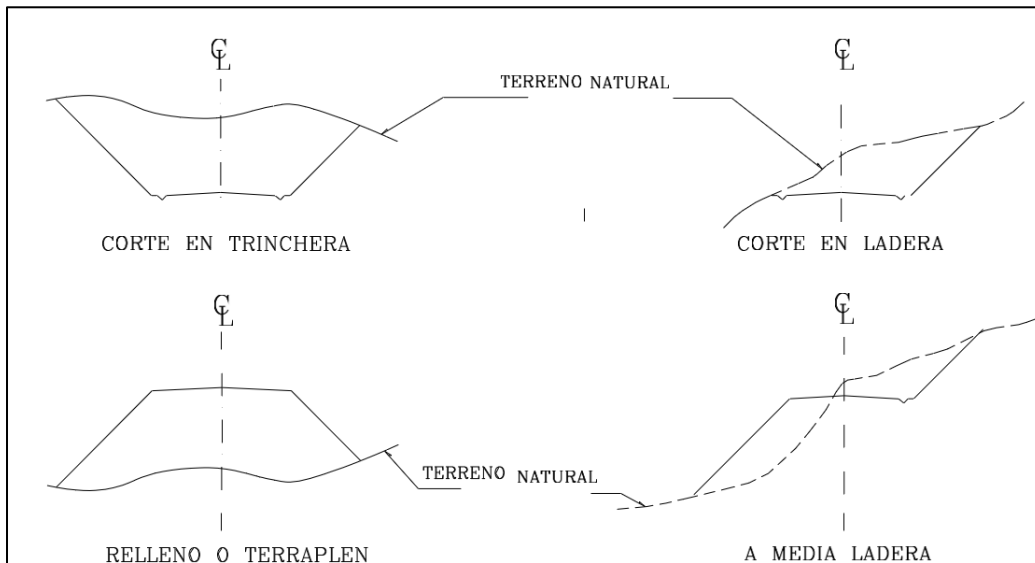
Figura 16. Volumen de formas sólidas básicas.

SOLIDO	VOLUMEN	SOLIDO	VOLUMEN	SOLIDO	VOLUMEN
CUBO 	$V = a^3$	PRISMA 	$V = A \cdot h$ $A =$ Área de las caras paralelas.	CONO TRUNCADO 	$V = \frac{h}{3} (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 \cdot A_2})$
PARALELEPIPEDO 	$V = a \cdot b \cdot h$	CILINDRO 	$V = A \cdot h$ $A =$ Área de las caras paralelas.	CONO 	$V = \frac{1}{3} A_b h$ $A_b =$ Área de la base
PRISMA TRUNCADO 	$V = \frac{h}{3} (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 \cdot A_2})$	PIRAMIDE TRUNCADA 	$V = \frac{h}{3} (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 \cdot A_2})$	PIRAMIDE 	$V = \frac{1}{3} A_b h$ $A_b =$ Área de la base
				PRISMOIDE 	$V = \frac{h}{6} (A_1 + A_2 + 4A_m)$ $A_1; A_2 =$ Área de las caras paralelas extremas. $A_m =$ Área de la sección a $h/2$. $h =$ Altura del prismoide

Nota. Extraído de Casanova (2002).

- **Volumen a través de secciones transversales:** En general, la determinación de volúmenes se lleva a cabo mediante la obtención de secciones transversales perpendiculares al eje central. Estas secciones pueden tener diversas configuraciones en el terreno:

Figura 17. *Diferentes configuraciones de las secciones transversales.*

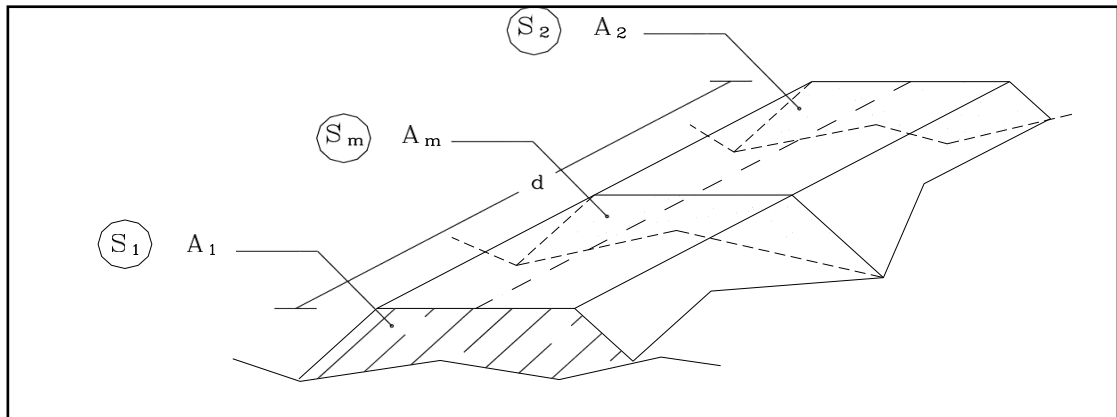


Nota. Extraído de Casanova (2002).

La distancia entre dos secciones adyacentes varía según la topografía del terreno. Los métodos más comunes para calcular volúmenes relacionados con el movimiento de tierra son el método del prismoide y el método de las áreas medias, los cuales se detallan a continuación:

- **Método del prismoide:** Un prismoide (prismatoide) es una figura tridimensional caracterizada por tener bases paralelas y superficies laterales planas o curvas. Un caso típico se presenta a continuación:

Figura 18. *Prismoide entre secciones transversales.*



Nota. Extraído de Casanova (2002).

La fórmula para calcular el volumen de un prismoide triangular es la siguiente:

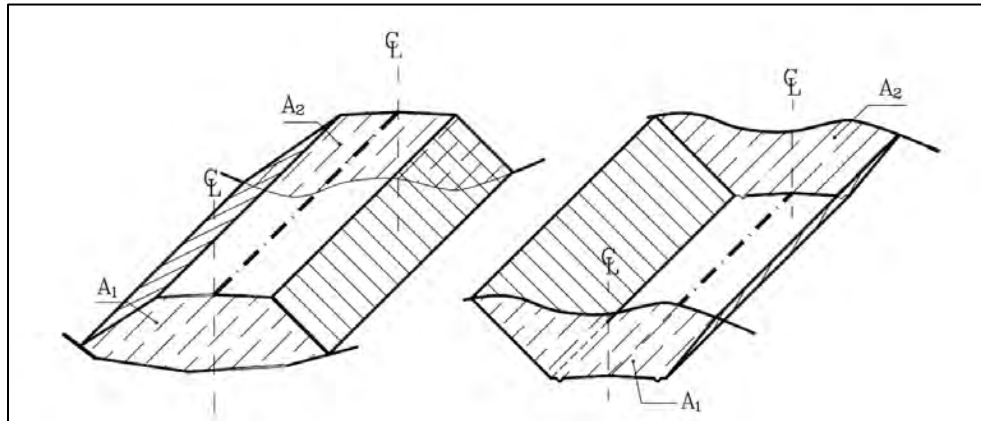
$$V = \frac{d}{6} (A_1 + A_2 + 4A_m) \quad (19)$$

Donde:

- A_1, A_2 : Expresa el área de S_1 y S_2 respectivamente, en m^2 .
- A_m : Representa el área de la sección transversal localizada en el punto medio entre las secciones S_1 y S_2 , en m^2 .
- d : Indica la distancia entre S_1 y S_2 , en m.
- **Método de las áreas medias:** Las variaciones en el relieve, la complejidad para definir con precisión las secciones transversales a lo largo de la vía y las discrepancias inevitables entre el diseño inicial y las secciones finalizadas, justifican el uso del método de las áreas medias.

Cuando el volumen entre dos secciones sucesivas es del mismo tipo (homogéneas), ya sea corte o relleno, se determina mediante la siguiente fórmula:

Figura 19. *Volumen entre secciones transversales del mismo tipo.*



Nota. Extraído de Casanova (2002).

$$V = \frac{1}{2} (A_1 + A_2) * d \quad (20)$$

Donde:

- V : Representa el volumen entre ambas secciones, en m^3 .
- A_1, A_2 : Expresa el área de S_1 y S_2 respectivamente, en m^2 .
- d : Indica la distancia entre S_1 y S_2 , en m.

Por otro lado, en el caso de que una de las secciones tienda a 0, el cálculo del volumen se realizará de la siguiente manera:

$$V = \frac{1}{4} d * S \quad (21)$$

Donde:

- S : Representa el área de la sección transversal distinta de 0, en m^2 .
- d : Expresa la distancia entre las secciones, en m.
- V : Indica el volumen entre ambas secciones, en m^3 .

b) Diseño geométrico de los sectores de mejoramiento:

El mejoramiento de carreteras implica optimizar y ampliar sus características geométricas y técnicas mediante ajustes en el eje transversal o vertical, ensanchamiento de curvas y modificación de la

superficie de rodadura, con el fin de garantizar un tránsito vehicular seguro. A su vez, el diseño geométrico se centra en el análisis de la geometría vial considerando el volumen de tráfico, la alineación del trayecto y diversos parámetros técnicos y de seguridad, integrando una gestión inteligente en su planificación y diseño (Reglamento Nacional de Gestión de Infraestructura Vial, 2006, p. 3).

Según el Manual de Carreteras - Diseño Geométrico, publicado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2018), los principales parámetros para diseñar y modelar una carretera son los siguientes:

- **Orografía:** La categorización de las carreteras, según la orografía que involucra, se muestra a continuación:

Tabla 3. *Clasificación de carreteras según su orografía.*

CARRETERA	PENDIENTE LONGITUDINAL	PENDIENTE TRANSVERSAL	TERRENO
TIPO 1	< 3%	0 - 10%	PLANO
TIPO 2	3 - 6%	11 - 50%	ONDULADO
TIPO 3	6 - 8%	51 - 100%	ACCIDENTADO
TIPO 4	> 8%	> 100%	ESCARPADO

Nota. Extraído de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018).

- **Índice medio diario anual (IMDA):** Refleja la media aritmética de los volúmenes diarios de tránsito a lo largo de todo el año, en una porción designada de vía. Sus valores de acuerdo al tipo de carretera, se muestran a continuación:

Tabla 4. Clasificación de carreteras según su demanda.

TIPO		IMDA	CARRILES	ANCHO MÍNIMO DEL CARRIL
Autopista	Primera clase	> 6000 veh/día	2 o más	3.60 m
	Segunda clase	6000 - 4001 veh/día		
Carretera	Primera clase	4000 - 2001 veh/día	2	3.60 m
	Segunda clase	2000 - 400 veh/día	2	3.30 m
	Tercera clase	< 400 veh/día	2	3.00 m (2.50 m excepción)
Trocha carrozable		< 200 veh/día	1	4.00 m

Nota. Extraído de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018).

- **Vehículo de diseño:** Se tiene que tomar en cuenta los tipos de vehículos, pesos, dimensiones, entre otros aspectos establecidos en el Reglamento Nacional de Vehículos. Según dicha normativa, los vehículos se clasifican en ligeros y pesados. En cuanto a los vehículos ligeros, comprenden las siguientes categorías:

- **L:** Vehículos con menos de 4 ruedas.
- **M1:** Vehículos de 4 ruedas diseñados para transportar hasta 8 pasajeros, excluyendo el asiento del conductor.

Y para los vehículos pesados, se incluyen las siguientes categorías:

- **M:** Vehículos de 4 ruedas destinados al transporte de pasajeros, excluyendo aquellos clasificados como M1.
- **N:** Vehículos de 4 ruedas o más, fabricados específicamente para transportar mercancías.
- **O:** Se encuentran los remolques y semirremolques.
- **S:** Es la combinación de las categorías M, N y O.

- **Velocidad de diseño:** Representa el valor máximo establecido para el diseño de una carretera, con el objetivo de asegurar un tránsito seguro. Su determinación depende de la clasificación funcional de la vía,

considerando la orografía y la demanda esperada. Este valor puede variar entre tramos homogéneos, dentro de los rangos normativos establecidos en la siguiente tabla:

Tabla 5. Rangos de la velocidad de diseño de un tramo homogéneo.

CLASIFICACIÓN	OROGRAFÍA	VELOCIDAD DE DISEÑO DE UN TRAMO HOMOGÉNEO VTR (km/h)											
		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	
Autopista de primera clase	Plano												
	Ondulado												
	Accidentado												
	Escarpado												
Autopista de segunda clase	Plano												
	Ondulado												
	Accidentado												
	Escarpado												
Carretera de primera clase	Plano												
	Ondulado												
	Accidentado												
	Escarpado												
Carretera de segunda clase	Plano												
	Ondulado												
	Accidentado												
	Escarpado												
Carretera de tercera clase	Plano												
	Ondulado												
	Accidentado												
	Escarpado												

Nota. Extraído de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018).

- **Diseño geométrico en planta:** También llamado alineamiento horizontal, está compuesto por tramos rectos, curvas circulares y transiciones de curvatura que permiten un cambio gradual entre segmentos rectos y curvos o entre curvas con diferentes radios, buscando mantener una velocidad constante en la mayor longitud posible. Para la definición del diseño geométrico en planta, se tomarán en cuenta los siguientes parámetros:

- **Tramos en tangente:** Dependiendo de la velocidad de diseño establecida para un tramo de carretera en línea recta (tangente), se establecen las siguientes longitudes mínimas y máximas:

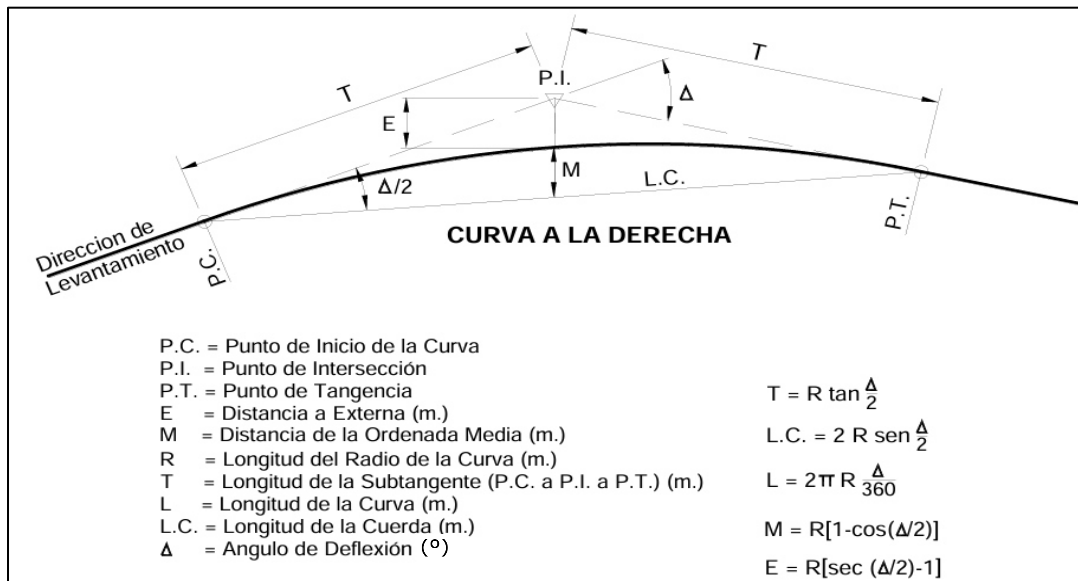
Tabla 6. *Longitudes de tramos en tangente.*

V (km/h)	L mín.s (m)	L mín.o (m)	L máx (m)
30	42	84	500
40	56	111	668
50	69	139	835
60	83	167	1002
70	97	194	1169
80	111	222	1336
90	125	250	1503
100	139	278	1670
110	153	306	1837
120	167	333	2004
130	180	362	2171

Nota. Extraído de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018).

- **Curvas horizontales circulares:** Son arcos de circunferencia con un único radio que enlazan de forma continua dos tramos tangentes. Cada curva circular incluye elementos fundamentales que se detallan a continuación:

Figura 20. Elementos y nomenclaturas de una curva circular.



Nota. Extraído de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018).

En todo proyecto de carretera, se deben considerar los radios mínimos de una curva horizontal, que son los menores radios que se pueden recorrer a la velocidad de diseño y con la máxima inclinación permitida (peralte), como se detalla a continuación:

Tabla 7. Radios mínimos, peraltes máximos y valores límites de fricción.

Ubicación de la vía	Velocidad de diseño	P máx. (%)	f máx.	Radio calculado (m)	Radio redondeado (m)
Área urbana	30	4.00	0.17	33.7	35
	40	4.00	0.17	60.0	60
	50	4.00	0.16	98.4	100
	60	4.00	0.15	149.2	150
	70	4.00	0.14	214.3	215
	80	4.00	0.14	280.0	280
	90	4.00	0.13	375.2	375
	100	4.00	0.12	492.10	495
	110	4.00	0.11	635.2	635
	120	4.00	0.09	872.2	875
	130	4.00	0.08	1,108.9	1,110
Área rural (con peligro de hielo)	30	6.00	0.17	30.8	30
	40	6.00	0.17	54.8	55
	50	6.00	0.16	89.5	90
	60	6.00	0.15	135.0	135
	70	6.00	0.14	192.9	195
	80	6.00	0.14	252.9	255
	90	6.00	0.13	335.9	335
	100	6.00	0.12	437.4	440
	110	6.00	0.11	560.4	560
	120	6.00	0.09	755.9	755
	130	6.00	0.08	950.5	950
Área rural (plano u ondulada)	30	8.00	0.17	28.3	30
	40	8.00	0.17	50.4	50
	50	8.00	0.16	82.0	85
	60	8.00	0.15	123.2	125
	70	8.00	0.14	175.4	175
	80	8.00	0.14	229.1	230
	90	8.00	0.13	303.7	305
	100	8.00	0.12	393.7	395
	110	8.00	0.11	501.5	500
	120	8.00	0.09	667.0	670
	130	8.00	0.08	831.7	835
Área rural (accidentada o escarpada)	30	12.00	0.17	24.4	25
	40	12.00	0.17	43.4	45
	50	12.00	0.16	70.3	70
	60	12.00	0.15	105.0	105
	70	12.00	0.14	148.4	150
	80	12.00	0.14	193.8	195
	90	12.00	0.13	255.1	255
	100	12.00	0.12	328.1	330
	110	12.00	0.11	414.2	415
	120	12.00	0.09	539.9	540
	130	12.00	0.08	665.4	665

Nota. Extraído de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018).

- **Sobreechanco:** Se refiere al ensanchamiento adicional de la calzada en tramos curvos, necesario para compensar el espacio requerido por los vehículos durante su desplazamiento. Su valor depende del tipo de vehículo, el radio de curvatura y la velocidad de diseño del tramo, y se determina mediante la siguiente fórmula:

$$Sa = n \left(R - \sqrt{R^2 - L^2} \right) + \frac{V}{10\sqrt{R}} \quad (22)$$

Donde:

- Sa: Representa el sobreechanco en metros.

- n: Representa el número de carriles.
 - R: Representa el radio de curvatura en metros.
 - L: Distancia desde el eje trasero hasta el frontal, en metros.
 - V: Velocidad de diseño en km/h.
- **Diseño geométrico en perfil:** También denominado alineamiento vertical, o rasante, es la proyección del eje real de la carretera sobre una superficie vertical paralela. Se compone de segmentos rectos unidos por curvas verticales parabólicas, donde la orientación de las pendientes se define según las progresivas, con pendientes positivas indicando aumento de elevación y negativas, indicando disminución.
 - **Pendiente:** Las tangentes verticales se definen por su longitud y pendiente, delimitadas por dos curvas consecutivas. Las pendientes mínimas en un perfil longitudinal deben garantizar el drenaje del agua de lluvia hacia las cunetas y a lo largo de la calzada, por lo que se recomienda una pendiente mínima del 0.5 %. No obstante, pueden existir casos específicos:
 - ✓ En el caso que la carretera tenga un bombeo de 2 % y carezca de bermas o cunetas, se podría considerar la posibilidad de permitir tramos con pendientes de hasta 0.2 %
 - ✓ En situaciones donde el bombeo es del 2.5 %, se podría considerar la posibilidad de utilizar pendientes nulas.
 - ✓ Si hay bermas presentes, se recomienda que la pendiente mínima sea del 0.5 %, mientras que la pendiente mínima excepcional sería del 0.35 %.

- ✓ En áreas de transición del peralte donde la pendiente transversal se neutraliza, la pendiente mínima requerida será del 0.5%.

Las pendientes máximas están directamente relacionadas con la velocidad de diseño, como se indica en la tabla siguiente:

Tabla 8. *Pendientes máximas en porcentajes (%).*

Demanda	Autopistas								Carretera				Carretera				Carretera			
Vehículos/día	> 6.000				6.000 - 4001				4.000-2.001				2.000-400				< 400			
Características	Primera clase				Segunda clase				Primera clase				Segunda clase				Tercera clase			
Tipo de orografía	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Velocidad de diseño: 30 km/h																			10.00	10.00
40 km/h															9.00	8.00	9.00	10.00		
50 km/h											7.00	7.00			8.00	9.00	8.00	8.00	8.00	
60 km/h					6.00	6.00	7.00	7.00	6.00	6.00	7.00	7.00	6.00	7.00	8.00	9.00	8.00	8.00		
70 km/h			5.00	5.00	6.00	6.00	6.00	7.00	6.00	6.00	7.00	7.00	6.00	6.00	7.00		7.00	7.00		
80 km/h	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00		6.00	6.00			7.00	7.00		
90 km/h	4.50	4.50	5.00		5.00	5.00	6.00		5.00	5.00			6.00				6.00	6.00		
100 km/h	4.50	4.50	4.50		5.00	5.00	6.00		5.00				6.00							
110 km/h	4.00	4.00			4.00															
120 km/h	4.00	4.00			4.00															
130 km/h	3.50																			

Nota. Extraído de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018).

- **Curvas verticales:** Los segmentos rectos o tangentes consecutivos en la alineación vertical se conectarán mediante curvas verticales si la diferencia entre sus pendientes es superior al 1% en carreteras pavimentadas y al 2% en otras vías. Las curvas verticales se caracterizan por su parámetro de curvatura (K), el cual representa la longitud de la curva en el plano horizontal, expresada en metros, por cada variación del 1% en la pendiente.

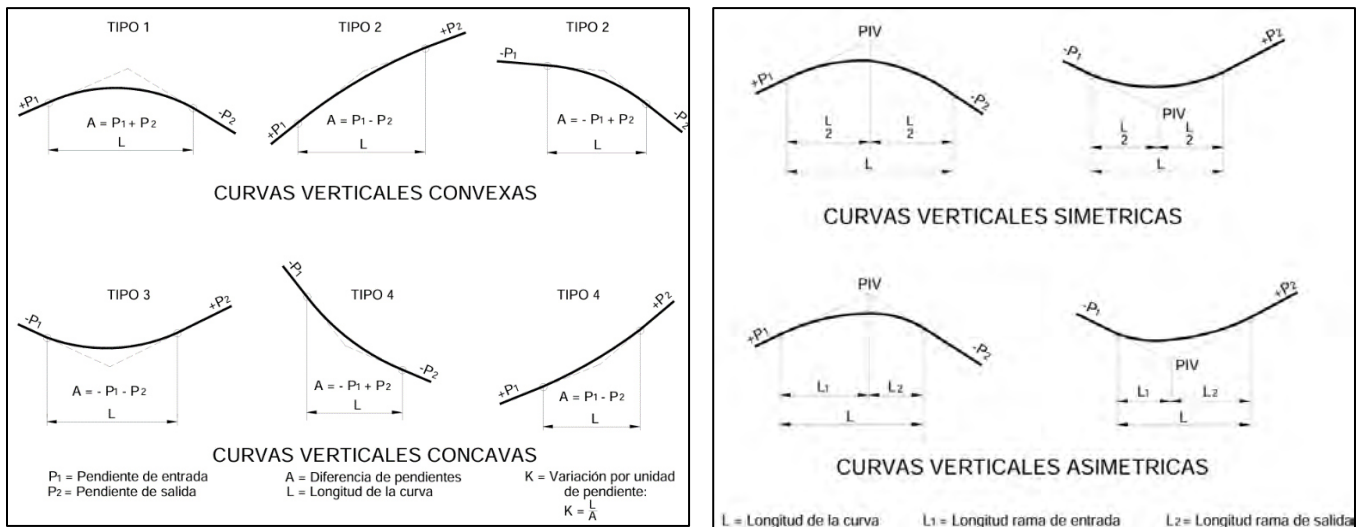
$$K = \frac{L}{A} \quad (23)$$

Donde:

- K: Representa el parámetro de curvatura.
- A: Valor absoluto de la resta algebraica entre las pendientes.
- L: Representa la longitud de la curva vertical.

Por otro lado, pueden ser categorizadas según su forma como convexas y cóncavas, y conforme a la relación entre las ramas que las componen, como simétricas y asimétricas.

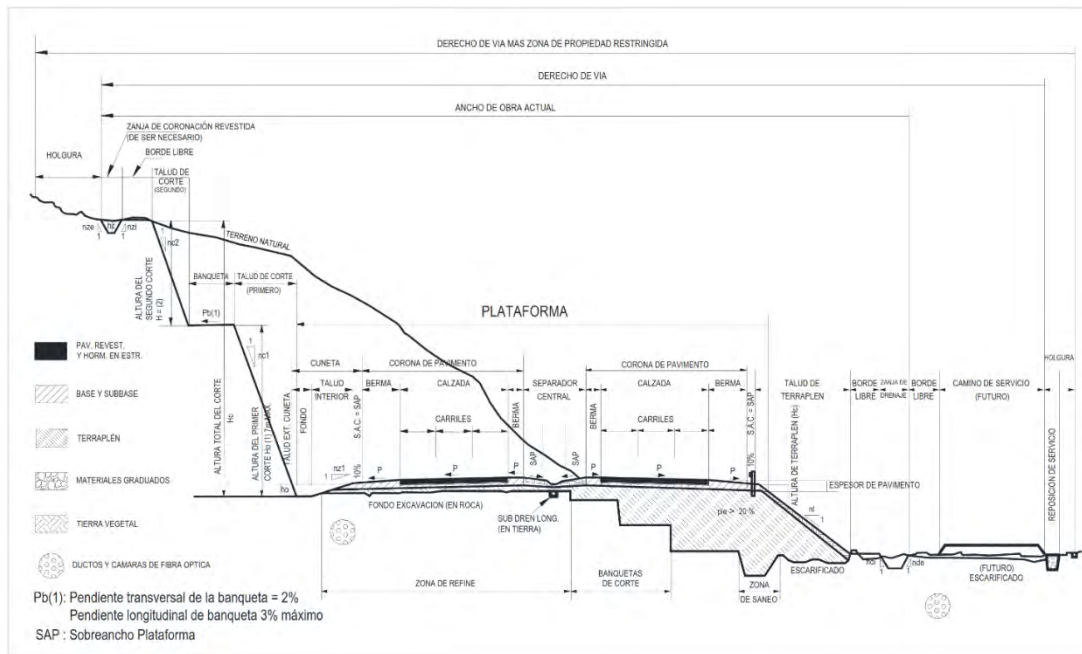
Figura 21. *Curvas verticales convexas, cóncavas, simétricas y asimétricas.*



Nota. Extraído de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018).

- **Diseño geométrico en sección transversal:** Consiste en representar, mediante un corte vertical perpendicular al eje de la carretera, la distribución y dimensiones de sus componentes en relación con el terreno. Esta sección incluye carriles, calzada, bermas, taludes, cunetas y demás elementos ubicados dentro del derecho de vía. A continuación, se muestra la sección típica para una carretera de dos carriles:

Figura 22. *Sección transversal para una carretera de dos carriles en zonas rurales.*



Nota. Extraído de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018).

Superficie de rodadura o calzada: Es la parte de la vía destinada al tránsito vehicular, conformada por uno o más carriles, excluyendo la berma. Cada carril permite la circulación de vehículos en una misma dirección. El ancho de la calzada en tramos rectos varía según la velocidad de diseño, mientras que el ancho de la calzada en tramos curvos se obtiene sumando el sobreancho al ancho mínimo de calzada en tramos rectos.

Tabla 9. Anchos mínimos de la calzada para tramos rectos en metros, según la velocidad.

Clasificación	Autopista								Carretera				Carretera				Carretera			
Tráfico vehículos/día	> 6,000				6,000 – 4,001				4,000-2.001				2,000-400				< 400			
Tipo	Primera Clase				Segunda Clase				Primera Clase				Segunda Clase				Tercera Clase			
Orografía	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Velocidad de diseño: 30km/h																			5.00	6.00
40 km/h															6.60	6.60	6.60	6.60		
50 km/h										7.20	7.20			6.60	6.60	6.60	6.60	6.60		
60 km/h					7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	6.60	6.60	6.60	6.60		
70 km/h			7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	6.60		6.60	6.60		
80 km/h	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20	7.20			6.60	6.60		
90 km/h	7.20	7.20	7.20		7.20	7.20	7.20		7.20	7.20			7.20	7.20			6.60	6.60		
100 km/h	7.20	7.20	7.20		7.20	7.20	7.20		7.20				7.20							
110 km/h	7.20	7.20			7.20															
120 km/h	7.20	7.20			7.20															
130 km/h	7.20																			

Nota. Extraído de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018).

- **Bermas:** Es el área contigua a la calzada que delimita la capa de rodadura y permite el estacionamiento en emergencias; su ancho varía según la clasificación vial, velocidad de diseño y orografía.

Tabla 10. Ancho de bermas en metros, según la velocidad.

Clasificación	Autopista								Carretera				Carretera				Carretera			
Tráfico vehículos/día	> 6.000				6.000 - 4001				4.000-2.001				2.000-400				< 400			
Características	Primera clase				Segunda clase				Primera clase				Segunda clase				Tercera Clase			
Tipo de orografía	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Velocidad de diseño: 30 km/h																			0.50	0.50
40 km/h																1.20	1.20	0.90	0.50	
50 km/h												2.60	2.60			1.20	1.20	1.20	0.90	0.90
60 km/h					3.00	3.00	2.60	2.60	3.00	3.00	2.60	2.60	2.00	2.00	1.20	1.20	1.20	1.20		
70 km/h			3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	2.00	2.00	1.20		1.20	1.20		
80 km/h	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00		2.00	2.00			1.20	1.20		
90 km/h	3.00	3.00	3.00		3.00	3.00	3.00		3.00	3.00			2.00				1.20	1.20		
100 km/h	3.00	3.00	3.00		3.00	3.00	3.00		3.00				2.00							
110 km/h	3.00	3.00			3.00															
120 km/h	3.00	3.00			3.00															
130 km/h	3.00																			

Nota. Extraído de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018).

- **Bombeo:** En tramos rectos o en curvas con contraperalte, la calzada debe tener una ligera inclinación transversal, denominada bombeo, que facilita el drenaje; su porcentaje depende del tipo de superficie y de los niveles de lluvia en la región.

Tabla 11. Valores del bombeo en porcentaje.

Tipo de Superficie	Bombeo (%)	
	Precipitación <500 mm/año	Precipitación >500 mm/año
Pavimento asfáltico y/o concreto Portland	2.0	2.5
Tratamiento superficial	2.5	2.5-3.0
Afirmado	3.0-3.5	3.0-4.0

Nota. Extraído de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018).

- **Peralte:** Es la inclinación transversal de la calzada en curvas, expresada en porcentaje, y se emplea para contrarrestar la fuerza centrífuga de los vehículos. Su aplicación es obligatoria en curvas, salvo excepciones definidas en la siguiente tabla:

Tabla 12. Valores de radios mínimos de curvas que no requieren ser peraltados.

Velocidad (km/h)	40	60	80	≥100
Radio (m)	3,500	3,500	3,500	7,500

Nota. Extraído de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018).

El mínimo porcentaje del peralte será del 2%, según los radios y velocidades de diseño especificados en la siguiente tabla:

Tabla 13. *Parámetros para establecer el peralte mínimo.*

Velocidad de diseño km/h	Radios de curvatura
$V \geq 100$	$5,000 \leq R < 7,500$
$40 \leq V < 100$	$2,500 \leq R < 3,500$

Nota. Extraído de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018).

Por otro lado, la tabla adjunta define los máximos valores del peralte para las condiciones mencionadas.

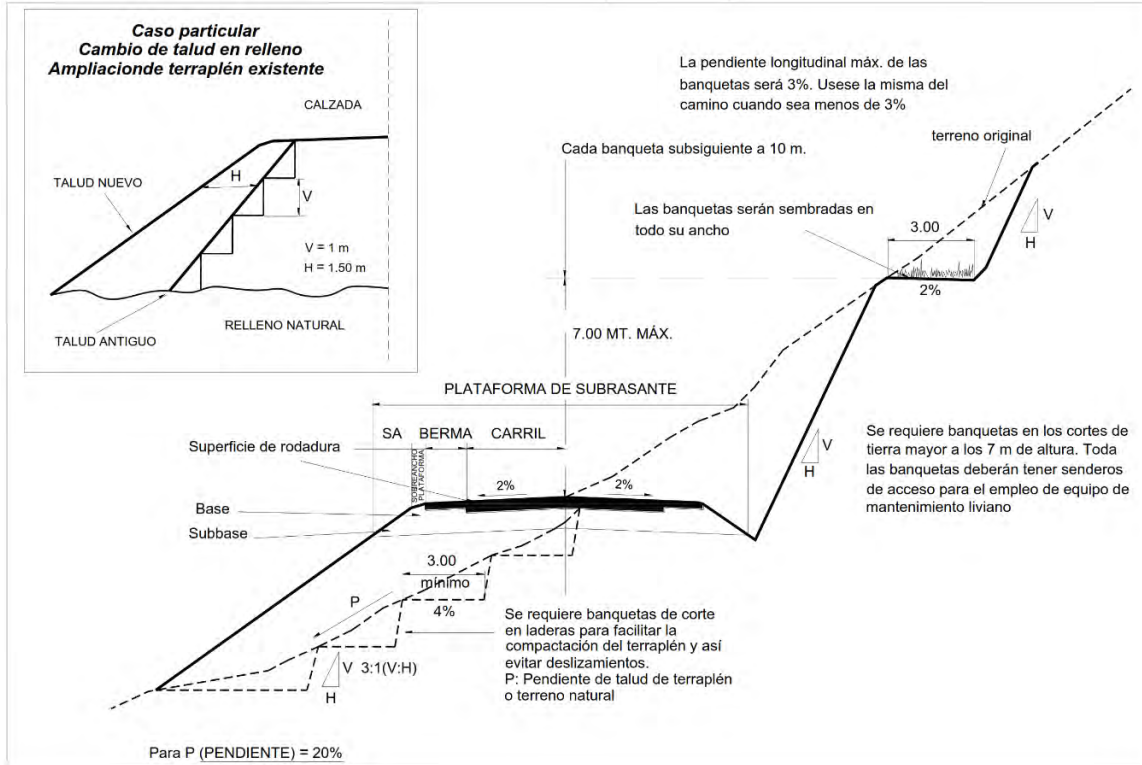
Tabla 14. *Máximos valores del peralte.*

Pueblo o ciudad	Peralte Máximo (p)	
	Absoluto	Normal
Atravesamiento de zonas urbanas	6.0%	4.0%
Zona rural (T. Plano, Ondulado o Accidentado)	8.0%	6.0%
Zona rural (T. Accidentado o Escarpado)	12.0	8.0%
Zona rural con peligro de hielo	8.0	6.0%

Nota. Extraído de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018).

- **Taludes:** Son planos laterales que delimitan el área de explanación, cuya inclinación corresponde a la pendiente aplicada al terreno en cortes o rellenos. Esta pendiente se define como la tangente del ángulo entre el terreno y una línea horizontal proyectada. La figura siguiente ilustra una sección transversal típica en media ladera, con talud de corte a la derecha y de relleno a la izquierda.

Figura 23. Sección transversal en línea recta.



Nota. Extraído de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018).

Los taludes en las zonas de corte variarán según las características geomecánicas del relieve. Su altura, pendiente y otros aspectos se determinarán a partir de estudios geotécnicos y geológicos, así como de las condiciones de drenaje, con el fin de garantizar su estabilidad. La siguiente tabla presenta los valores de referencia para taludes en áreas de corte.

Tabla 15. Valores de referencia para taludes en zonas de corte (Relación H:V).

Clasificación de materiales de corte		Roca fija	Roca suelta	Material		
				Grava	Limo arcilloso o arcilla	Arenas
Altura de corte	<5 m	1:10	1:6-1:4	1:1 - 1:3	1:1	2:1
	5-10 m	1:10	1:4-1:2	1:1	1:1	*
	>10 m	1:8	1:2	*	*	*

(*) Requerimiento de banquetas y/o estudio de estabilidad.

Nota. Extraído de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018).

Los taludes en relleno dependen de las propiedades del material utilizado. La tabla siguiente muestra los valores de referencia:

Tabla 16. Valores de referencia para taludes en zonas de relleno (Relación V:H).

Materiales	Talud (V:H)		
	Altura (m)		
	<5	5-10	>10
Gravas, limo arenoso y arcilla	1:1.5	1:1.75	1:2
Arena	1:2	1:2.25	1:2.5
Enrocado	1:1	1:1.25	1:1.5

Nota. Extraído de Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2018).

Movimiento de tierras:

El movimiento de tierras engloba todas las acciones que se aplican sobre el relieve para alterar la topografía o suministrar materiales en proyectos públicos, mineros o industriales (Tiktin, 1997, p.11).

Según Orta (2013) el movimiento de tierra puede clasificarse en:

- **Conformaciones:** En estas no se efectúa una alteración significativa del relieve, típicamente se procuran evitar alteraciones abruptas, como la presencia de cavidades, acantilados o barrancos, que puedan representar un riesgo para la seguridad de las personas.
- **Explanaciones:** Implican cambios importantes en la topografía, con la manipulación de grandes volúmenes de suelo a través de cortes y rellenos, utilizando el suelo como recurso principal para la construcción. Las explanaciones pueden clasificarse de dos formas:
 - **Por su diseño:** Se dividen en explanaciones compensadas y no compensadas.
 - ✓ En una explanación compensada, el volumen de excavación se iguala al de relleno ($V_{exc} = V_{rell}$), lo que representa el escenario óptimo, ya que permite realizar los trabajos con suelo natural, maximizando la eficiencia económica.
 - ✓ En una explanación no compensada, donde el volumen de excavación es mayor al de relleno ($V_{exc} > V_{rell}$), implica que el excedente de suelo debe ser depositado en un vertedero.
 - ✓ En una explanación no compensada, en donde el volumen de relleno es mayor al de excavación ($V_{rell} > V_{exc}$), implica que será necesario transportar material de relleno desde una fuente distante.
 - **Por su forma y dimensiones:** Se categorizan en terrazas y terraplenes.
 - ✓ Las terrazas, también denominadas plataformas o explanadas, es donde la superficie es más destacada que la elevación.

- ✓ En los terraplenes, la longitud es más predominante que el ancho y la altura.

Por otro lado, el suelo presenta los siguientes estados:

- **Estado natural:** Este tipo de suelo se mantiene en su estado original antes de cualquier excavación o remoción. El volumen de este suelo, conocido como volumen de sobredesmonte o natural, se utiliza para calcular y remunerar el movimiento de tierra, determinándose mediante secciones transversales y longitudinales a intervalos regulares. Se expresa en m^3 naturales.
- **Estado esponjado:** Se refiere al suelo que, tras la excavación, ha sufrido disgregación, lo que aumenta su volumen debido a los espacios entre las partículas. Este volumen se denomina volumen esponjado y se expresa en m^3 esponjados.
- **Estado compactado:** Se refiere al suelo que ha sido compactado, lo que aumenta su peso específico. Este tipo de suelo se llama suelo compactado y se mide en m^3 compactados.

También existen términos frecuentemente utilizados en la ingeniería de movimiento de tierras, entre los cuales destacan los siguientes:

- **Material “a caballero”:** Cuando el volumen de excavación excede al de relleno ($V_{exc} > V_{rell}$), el material sobrante se deposita en zonas cercanas, denominándose “material a caballero” y se mide en m^3 esponjados.
- **Material compensado o relleno propio:** Es el suelo excavado en la misma obra y reutilizado como relleno, donde será compactado hasta su máxima densidad. Este volumen se cuantifica en m^3 compactados.

- **Material de préstamo o relleno de préstamo:** Cuando no es posible realizar una compensación de volúmenes debido a la falta de material natural adecuado ($V_{rell} > V_{exc}$), se hace necesario adquirir el material de relleno de un área distante. Este material se conoce como “material de préstamo o relleno de préstamo”, y la zona de la cual se extrae se denomina “zona o cantera de préstamo”.

Por otra parte, dentro de las Especificaciones Técnicas Generales para Construcción, elaborado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC, 2015), menciona los tipos de excavaciones para las explanaciones, los cuales se mencionan a continuación:

- **Excavación sin clasificar:** Se trata de las labores de excavación de cualquier tipo de material, sin importar sus características naturales.
- **Excavación clasificada:** Se categorizan en:
 - **Excavación en roca fija:** Este tipo de trabajo implica la excavación de masas de rocas que están moderada o fuertemente consolidadas, lo cual exige el uso sistemático de explosivos.
 - **Excavación en roca suelta o fracturada:** Implica la excavación de masas de rocas fracturadas, cuyo nivel de cementación requiere el empleo de maquinaria especializada, y en algunos casos, la utilización de explosivos de pequeña escala si es necesario.
 - **Excavación en material suelto:** Abarca la remoción de materiales que no entran en las categorías descritas anteriormente (roca fija y suelta). Para este caso, la remoción del material solo requiere el uso de maquinaria y/o mano de obra, sin necesidad de explosivos y otros métodos especiales.

2.3. Definición de términos:

- **Restitución fotogramétrica:** Es el método por el cual se obtienen datos de altitud y ubicación a partir de fotografías aéreas, con el objetivo de generar mapas.
- **Reducción al nivel medio del mar:** Es un factor que ajusta una distancia medida sobre el elipsoide, proyectándola a la referencia del nivel medio del mar.
- **Norte geográfico:** También llamado norte verdadero, es la dirección que apunta hacia el Polo Norte terrestre, definida por el eje de rotación de la Tierra.
- **Norte de cuadrícula:** También denominado norte cartográfico, UTM o Lambert, es la dirección vertical en un sistema de coordenadas proyectadas, el cual se define por las líneas rectas de los meridianos en el mapa.
- **Azimut plano:** Es el ángulo formado entre el norte de cuadrícula y la dirección de una línea que conecta dos puntos, medido en sentido horario.
- **Azimut geodésico proyectado:** Es el ángulo medido entre el norte de cuadrícula y la tangente a una curva cóncava dirigida al meridiano central, en sentido horario.
- **Bench Mark (B.M.):** Es aquel punto permanente que se establece sobre el terreno, en donde se conocen sus coordenadas geográficas y su elevación respecto al nivel medio del mar, obtenidas con gran precisión.
- **Alineamiento:** Es la configuración geométrica que establece la trayectoria de una infraestructura lineal, como una carretera, ferrocarril o canal, considerando su desarrollo tanto en planta como en perfil.
- **Derecho de vía:** Es la franja de terreno que incluye la carretera, sus elementos complementarios, áreas para ampliaciones futuras y zonas de seguridad.
- **Curvas en contraperalte:** Son aquellas curvas en las que la pendiente de la calzada se inclina en dirección opuesta a la fuerza centrífuga que actúa sobre los vehículos al girar.

2.4. Glosario:

- **SM:** Sector de mejoramiento, son aquellos tramos o áreas específicas de una carretera que requiere la ejecución de obras de ingeniería orientadas a mejorar sus condiciones geométricas, estructurales y funcionales, con el fin de garantizar la seguridad y continuidad del tránsito vehicular.
- **AV:** Área de vuelo, son aquellas áreas destinadas para el levantamiento fotogramétrico mediante RPAS, las cuales fueron seleccionadas según los límites de cada sector de mejoramiento teniendo en cuenta los criterios de accesibilidad, cobertura vegetal, pendiente, entre otros.
- **PAF:** Puntos de apoyo fotogramétrico, referidos a los marcadores físicos materializados en el terreno, utilizados para el control geométrico del levantamiento fotogramétrico mediante RPAS. En la presente investigación, se emplearon marcas de yeso distribuidas estratégicamente en las áreas de vuelo, con el propósito de asegurar la precisión planimétrica y altimétrica de los productos generados.
- **PA:** Poligonales de apoyo, son hitos o monumentos que presentan coordenadas topográficas o UTM obtenidas del servicio de mejoramiento del corredor vial, utilizadas como referencia geométrica y empleadas como PAF cuando se encuentran ubicadas dentro de las áreas de vuelo.
- **GPS:** Puntos Geodésicos, son hitos o monumentos que presentan coordenadas topográficas o UTM recopiladas del servicio de mejoramiento del corredor vial, las cuales servirán como PAF cuando se encuentran ubicados dentro de las áreas de vuelo.
- **RMSE:** Error Cuadrático Medio, es la métrica estadística que evalúa la precisión y la dispersión de las mediciones topográficas.

- **APE:** Error Porcentual Absoluto, es el porcentaje que representa el error absoluto entre el volumen calculado por el RPAS y el volumen real obtenido con la estación total.
- **MAPE:** Error Porcentual Absoluto Medio, es el porcentaje del error absoluto promedio entre los volúmenes calculados con RPAS y los reales obtenidos con estación total, evaluados a nivel global.
- **MDT:** Modelo Digital del Terreno, es la representación digital de la superficie terrestre excluyendo elementos sobre el suelo como construcciones y vegetación. Ha sido generada a partir de la nube de puntos clasificada mediante el software Agisoft Metashape.
- **MDS:** Modelo Digital de Superficie, es la representación digital que incluye todos los elementos visibles sobre el terreno, como árboles, construcciones, etc. Ha sido generada a partir de la nube de puntos total mediante el software Agisoft Metashape.
- **RJ 053-2021:** Resolución Jefatural N° 053-2021/IGN/DIG/SDNGC, referida a las Especificaciones Técnicas para la Generación de Ortoimágenes, las cuales deben ser de cumplimiento por los organismos generadores y usuarios de información geoespacial.
- **RPAS:** Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia, utilizados para el levantamiento fotogramétrico. En la presente investigación, se empleó el dron DJI Mavic 3 Enterprise, el cual resultó especialmente relevante para la adquisición de información en sectores de mejoramiento con pendientes pronunciadas.

CAPÍTULO III

3. HIPÓTESIS Y VARIABLES:

3.1. Las hipótesis:

3.1.1. Hipótesis general:

- La precisión en el cálculo de movimiento de tierras en carreteras de montaña mejora significativamente mediante la integración de tecnologías RPAS y análisis geomorfológico.

3.1.2. Hipótesis específicas:

- La precisión en el cálculo de movimiento de tierras en carreteras de montaña utilizando tecnologías RPAS es significativamente mayor que la precisión obtenida con métodos tradicionales, con una diferencia que no supera el 20 %.
- La integración de parámetros geomorfométricos, como la pendiente, la longitud y el área, influye notablemente en la precisión del cálculo de movimiento de tierras en carreteras de montaña, siendo más significativos en los resultados obtenidos con tecnologías RPAS que con los métodos tradicionales.
- La utilización de tecnologías RPAS y análisis geomorfológico reduce el tiempo y el costo en la planificación y ejecución de los proyectos de movimiento de tierras en al menos un 20 %, en comparación con los métodos tradicionales en carreteras de montaña.

3.2. Las variables:

- **Variable independiente:**

Tecnologías RPAS y análisis geomorfológico:

Se refiere al uso de drones (RPAS) y técnicas de análisis geomorfológico para captar y procesar la información del terreno, con la finalidad de obtener modelos digitales del terreno y evaluar las características del relieve, los cuales contribuyen al cálculo del movimiento de tierras en carreteras de montaña.

- **Variable dependiente:**

Precisión en el cálculo de movimientos de tierras:

Se entiende como la proximidad y coherencia de las mediciones en la determinación de los volúmenes de corte y relleno en trabajos de movimiento de tierras, los cuales están vinculados a la calidad de información topográfica recopilada y a los métodos empleados para generar los modelos digitales del terreno a partir de las superficies obtenidas con RPAS y estación total, con el objetivo de evaluar las diferencias en la estimación de volúmenes de tierra.

3.3. Operacionalización de las variables:

Tabla 17. Matriz de operacionalización de las variables de la investigación.

VARIABLE (Independiente)	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Tecnologías RPAS y análisis geomorfológico	Consiste en el uso de drones para captar datos topográficos, generando representaciones tridimensionales detalladas del terreno, permitiendo extraer métricas derivadas de su morfología que influyen en los cálculos de volumen a mover	Levantamiento con estación total	Posicionamiento satelital (GNSS)
		Levantamiento con RPAS	Transformación de coordenadas UTM a topográficas
			GSD
			Altura de vuelo
			Recubrimiento longitudinal y transversal
			Puntos de apoyo fotogramétrico
		Análisis geomorfológico	Procesamiento fotogramétrico
			Longitud
			Perímetro
			Área 2D y 3D
			Ancho promedio
			Longitud de la pendiente
			Pendiente
			Elevación
VARIABLE (Dependiente)	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Precisión en el cálculo de movimiento de tierras	Se refiere a la consistencia y proximidad de las estimaciones de volúmenes de corte y relleno que deben ser removidos, a partir de las superficies generadas mediante RPAS y estación total	Unidades de superficie bidimensional y tridimensional	Longitud
			Perímetro
			Superficie y área
			Volumen
		Diseño geométrico de los sectores de mejoramiento	Orografía
			Índice medio diario anual
			Vehículo de diseño
			Velocidad de diseño
			Diseño geométrico en planta
			Diseño geométrico en perfil
			Diseño geométrico en sección transversal
			Movimiento de tierras

Nota. Elaboración propia.

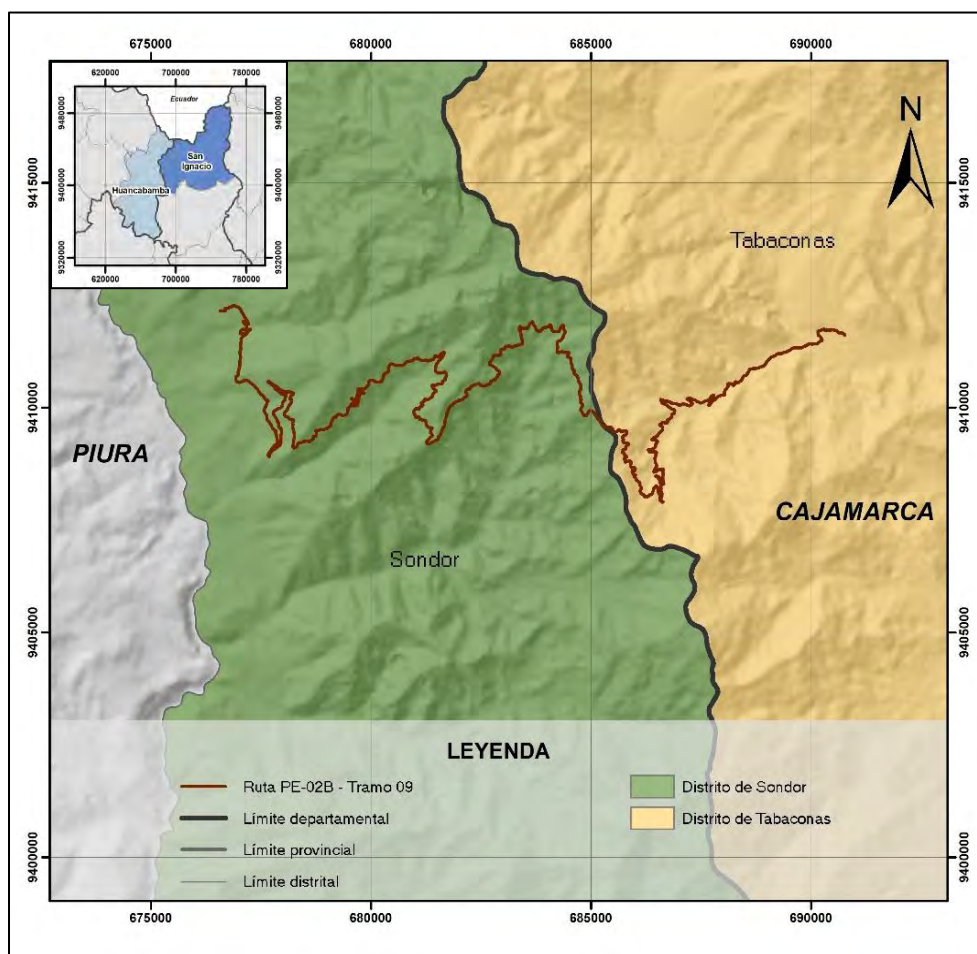
CAPÍTULO IV

4. MATERIALES Y MÉTODOS:

4.1. Área de estudio:

El área de estudio se ubica en la región de la Sierra del Perú, entre los departamentos de Piura y Cajamarca, en las provincias de Huancabamba y San Ignacio, en los distritos de Sondor y Tabaconas, respectivamente; correspondiente al tramo 09: Sondor – Dv. Tabaconas, de la Red Vial Nacional PE-02B.

Figura 24. *Ubicación política del tramo 09: Sondor – Dv. Tabaconas.*



Nota. Elaboración propia.

4.2. Tipo de investigación:

El presente trabajo de investigación es de tipo básica porque tiene como propósito expandir y profundizar los conocimientos topográficos en relación a las metodologías, instrumentos y nuevas tecnologías, con la finalidad de evaluar la precisión en el cálculo de movimiento de tierras mediante la integración de tecnologías RPAS y análisis geomorfológico en carreteras de montaña, en comparación al levantamiento topográfico realizado con una estación total.

4.3. Diseño de investigación:

En cuanto al diseño de investigación es no experimental, porque durante el proceso del estudio, las variables de investigación no sufrirán algún cambio, por el contrario, éstas serán medidas y generadas por medio del levantamiento con estación total como por el RPAS, con el objetivo de analizar y evaluar la precisión en el cálculo de movimiento de tierras. Además, pertenece a un nivel de investigación correlacional, ya que la precisión en el cálculo de movimiento de tierras dependerá de la integración de tecnologías RPAS y análisis geomorfológico, comparándola con la precisión del levantamiento realizado con estación total, tomada como referencia. Asimismo, pertenece a un diseño transversal debido a que se realizará la presente investigación a un proyecto de mejoramiento de la carretera efectuada en una fecha específica. Finalmente, el estudio adopta un enfoque mixto. Por un lado, es cuantitativo, porque se basa en el uso del análisis estadístico con el objetivo de obtener conclusiones generales de una población mediante la selección y el análisis de muestras significativas. Y, por otro lado, incorpora un enfoque cualitativo, ya que requiere la interpretación técnica de las características geomorfológicas del terreno y de los tipos de material, como complemento al análisis cuantitativo.

4.4. Población:

La población de la presente investigación es el proyecto de mejoramiento de la carretera SONDOR – TABACONAS – DV. SAN JOSÉ DEL ALTO – TAMBORAPA (RUTA PE-02B), que inicia en el km 0+000 y termina en la progresiva 128+382, el cual se presenta en la región Sierra y Selva, entre alturas de 500 a 2700 m.s.n.m., donde las condiciones de pendientes de la carretera son entre 0.2 a 12 %, con tramos accidentados de un carril. Además, presenta un ancho promedio de carretera de 4.210 m, con espacios secos durante el invierno y constantes lluvias durante el verano. Asimismo, cuenta con 130 sectores de mejoramiento aprobados en todo el trayecto, los cuáles presentan pendientes pronunciadas y accidentadas.

4.5. Muestra:

La muestra de la presente investigación es el tramo 09: Sondor – Dv. Tabaconas, que inicia en la progresiva 0+000 y termina en el km 42+405, el cual presenta un ancho promedio de carretera de 3.875 m. En el caso de los sectores de mejoramiento, por temas de costo y accesibilidad, se elegirán 12 sectores como muestra para la presente investigación, debido a que se tiene acceso a la información de la red geodésica primaria y poligonal de apoyo.

4.6. Instrumentos y recolección de información:

4.6.1. Recolección de información geodésica y topográfica:

La información del levantamiento de la red geodésica primaria, secundaria y poligonales de apoyo fueron obtenidos del servicio de mejoramiento del corredor vial SONDOR – TABACONAS – DV. SAN JOSÉ DEL ALTO – TAMBORAPA, tramo 09: Sondor – Dv. Tabaconas, perteneciente a la ruta PE-02B, con la finalidad de obtener las coordenadas UTM y topográficas de los puntos geodésicos (GPS) y poligonales de apoyo (PA), con sus respectivas cotas niveladas (Nivelación geométrica), así como sus estados actuales en las

que se encuentran en el terreno. Por otro lado, se obtuvo información del levantamiento topográfico con estación total de los sectores de mejoramiento, los cuales servirán para obtener la superficie topográfica de comparación.

4.6.2. Instrumentos y materiales:

Los equipos y materiales utilizados en el levantamiento de información topográfica fueron los siguientes:

Tabla 18. *Equipos y materiales del proyecto de investigación.*

Ítem	Descripción
1.0.	Equipos geodésicos
1.1.	GNSS Diferencial CHCNAV i90 (Base y rover)
1.2.	Trípode de madera
1.3.	Bastón topográfico
1.4.	Bípode
1.5.	Batería externa
2.0.	Equipos fotogramétricos
2.1.	Drone DJI Mavic 3 Enterprise
2.2.	Baterías
3.0.	Equipos de protección
3.1.	Casco de seguridad
3.2.	Chaleco
3.3.	Botas de seguridad
3.4.	Lentes de seguridad
4.0.	Equipos de comunicación
4.1.	Celular / GPS Navegador
4.2.	Radios
5.0.	Materiales
5.1.	Varillas de fierro de 1/2"
5.2.	Comba
5.3.	Yeso
5.4.	Agua
5.5.	Libreta
5.6.	Cinta métrica

Nota. Elaboración propia.

Figura 25. Equipos de medición topográfica.

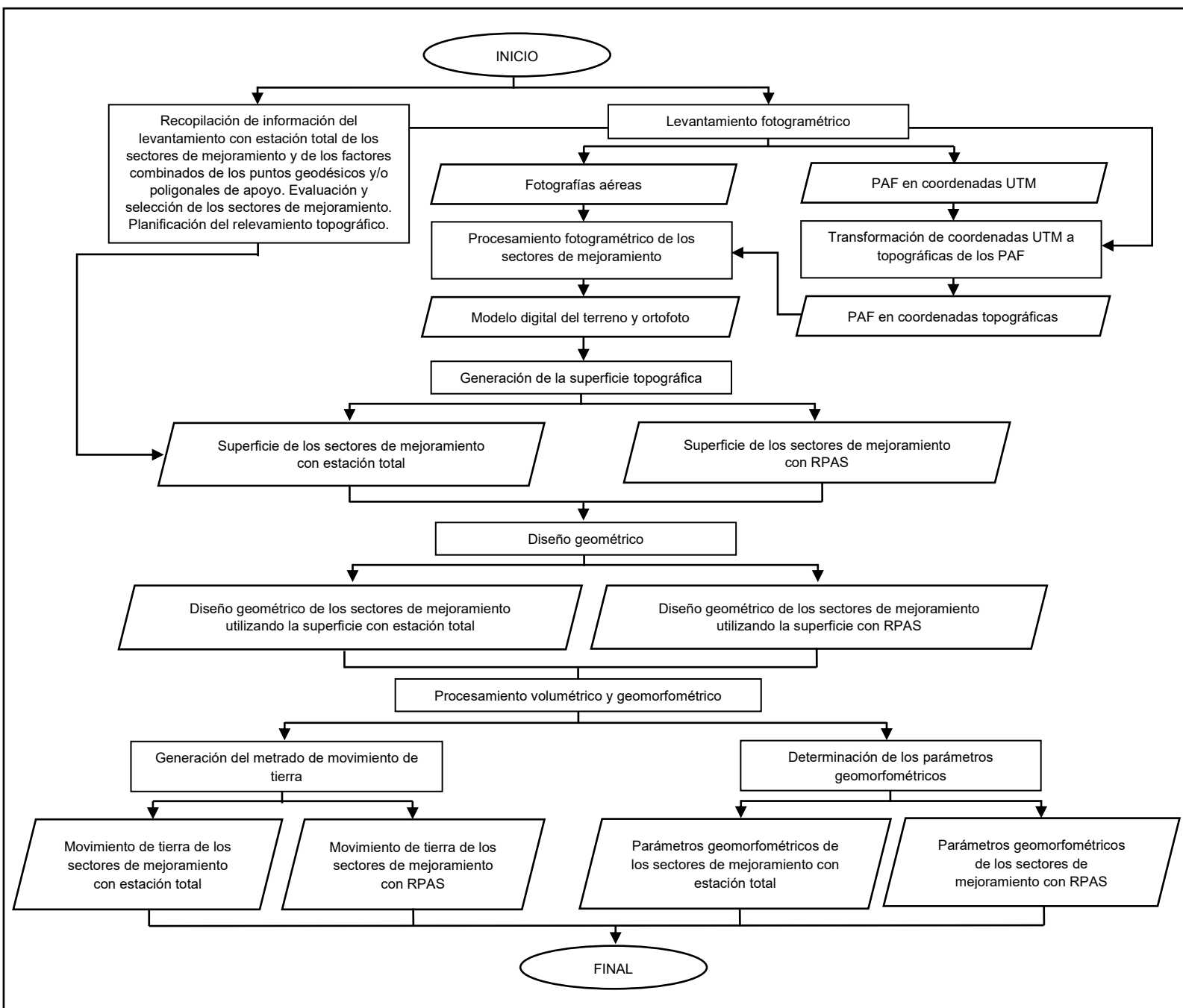


Nota. Elaboración propia.

4.7. Metodología:

La metodología general de la presente investigación se organizó en etapas secuenciales, representadas en el siguiente diagrama de flujo:

Figura 26. Diagrama de flujo de la metodología de la investigación.



Nota. Elaboración propia.

4.7.1. Evaluación y selección de los sectores de mejoramiento:

Dado que el tramo de estudio presenta 54 sectores de mejoramiento, se seleccionaron aquellos que cumplan con ciertos criterios, alineados con los objetivos de la investigación, los cuales se detallan a continuación:

- **Criterio 01: Estado actual de los puntos geodésicos y poligonales de apoyo:**

Se consideró aquellos sectores que presenten puntos cercanos, identificados como “encontrados en campo” durante la recopilación de información. Estos puntos no han sido destruidos, tapados y/o removidos con el paso del tiempo, es decir, siguen vigentes.

- **Criterio 02: Priorización de los sectores de mejoramiento iniciales:**

Se priorizaron los sectores más cercanos a la localidad de Sondor, punto de inicio del tramo y lugar de alojamiento del equipo de campo, a fin de optimizar el tiempo de desplazamiento hacia el sector de trabajo.

- **Criterio 03: Distancia entre el sector de mejoramiento y los puntos geodésicos y/o poligonales de apoyo:**

Debido al método seleccionado para posicionar los puntos de apoyo fotogramétrico (RTK), se consideró aquellos sectores más cercanos a los puntos encontrados en campo en donde se posicionará la base, no mayor a 1 km de distancia base-rover.

- **Criterio 04: Cercanía entre sectores de mejoramiento:**

Se consideraron aquellos sectores que se encuentren cercanos y/o continuos entre sí, lo que permitirá reducir el número de misiones de vuelos fotogramétricos, ahorrando recursos y optimizando el tiempo.

- **Criterio 05: Longitud del sector de mejoramiento:**

Dado que la longitud de los sectores del tramo de estudio varía entre los 50 a 250 metros, se consideraron aquellos que se encuentren en dicho rango, a fin de apreciar su variación en la cantidad de movimiento de tierra.

- **Criterio 06: Cantidad de movimiento de tierra:**

Con el propósito de observar la variación en la cantidad de movimiento de tierra, se consideraron los sectores que presentan diferentes cantidades de volúmenes de corte, ya sea bajo (100 a 1000 m³), moderado (1000 a 2000 m³) o alto (> 2000 m³), teniendo en cuenta el perfil de inversión del proyecto.

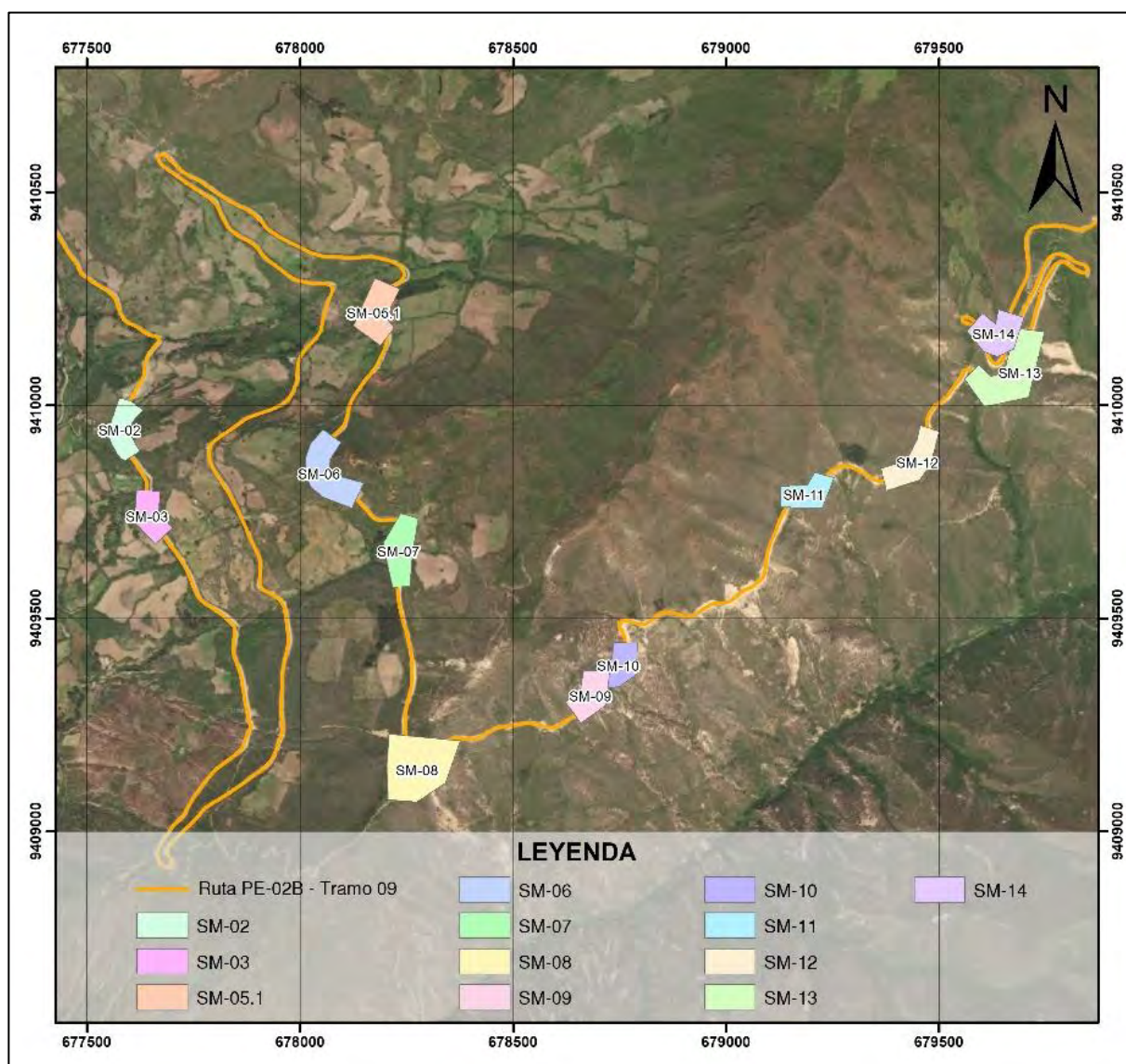
Tabla 19. *Evaluación y selección de los sectores de mejoramiento.*

Sector de mejoramiento	Criterio 01	Criterio 02	Criterio 03	Criterio 04	Criterio 05	Criterio 06	Situación
SM-01	✓	✓	✓	✗	✓	✓	Desaprobado
SM-02	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Aprobado
SM-03	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Aprobado
SM-04	✓	✓	✓	✗	✓	✗	Desaprobado
SM-05.1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Aprobado
SM-06	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Aprobado
SM-07	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Aprobado
SM-08	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Aprobado
SM-09	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Aprobado
SM-10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Aprobado
SM-11	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Aprobado
SM-12	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Aprobado
SM-13	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Aprobado
SM-14	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Aprobado
SM-15	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Reserva
SM-16	✓	✓	✓	✓	✓	✗	Desaprobado
SM-17	✓	✓	✓	✓	✓	✗	Desaprobado
SM-18	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Reserva
SM-19	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Reserva
SM-20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Reserva
SM-21 al SM-54	Sectores distantes a la localidad de Sondor						Desaprobado

Nota. Elaboración propia.

En la tabla anterior, se ve reflejado la selección de una muestra de 12 sectores, en función de los criterios, previamente, definidos. Adicionalmente, se identificaron 4 sectores de reserva que podrían ser utilizados en caso de que, por razones logísticas o de accesibilidad, no sea posible realizar el trabajo de campo en algún sector inicialmente seleccionado.

Figura 27. *Ubicación de los sectores de mejoramiento aprobados.*



Nota. Elaboración propia.

4.7.2. Planificación del relevamiento topográfico:

La planificación se desarrolló en dos etapas: la caracterización de los sectores de mejoramiento y la planificación del vuelo fotogramétrico.

- **Caracterización de los sectores de mejoramiento:** Los sectores se ubican entre los 2100 y 2600 m.s.n.m. El clima es templado, con temperaturas entre los 10 y 21 °C, con temporadas de lluvia de octubre a mayo, y precipitaciones mayores a 70 mm mensuales, lo que incrementa los procesos de erosión y deslizamientos. La época más despejada se presenta entre abril y octubre. Las zonas se caracterizan de laderas montañosas escarpadas, con pendientes mayores a 70°, con roca y suelo expuestos, vegetación baja en la parte superior, y cobertura arbustiva en zonas inferiores; destinadas al pastoreo o agricultura de subsistencia.

Figura 28. *Ladera escarpada, ubicada en el Sector de Mejoramiento, SM-09.*



Nota. Elaboración propia.

- **Planificación del vuelo fotogramétrico:** Se definió a partir de la información topográfica y geodésica recolectada, así como de la evaluación y selección de los sectores aprobados, considerando las condiciones morfológicas y climáticas del tramo de estudio.

- **Determinación de las áreas de vuelo fotogramétrico:**

Las áreas de vuelo (AV) se definieron según los límites de cada sector, considerando un mínimo de 20 metros a cada lado del eje vial, conforme a los términos de referencia. Adicionalmente, se incorporaron 10 metros a cada extremo longitudinal para asegurar una cobertura completa durante el vuelo. En sectores continuos, se estableció una única área de vuelo. Las áreas resultantes de vuelo para cada sector se presentan a continuación:

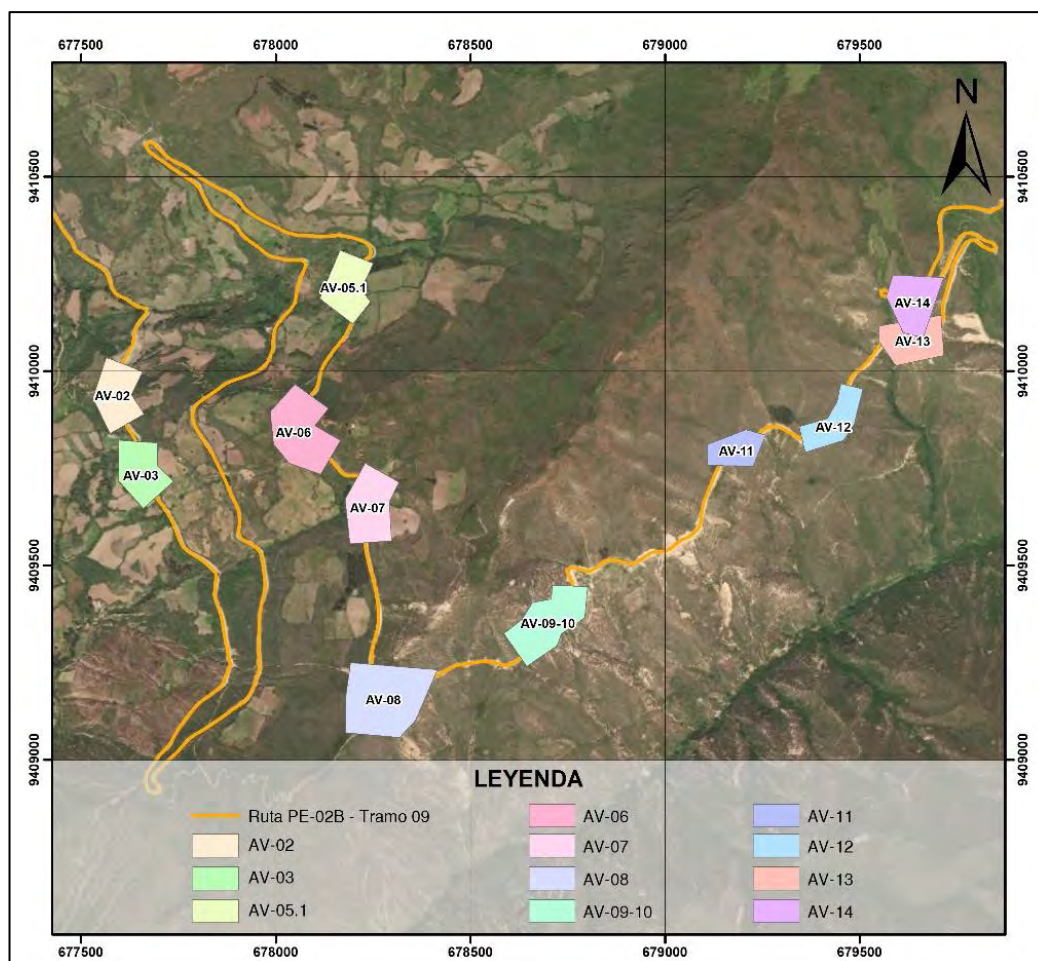
Tabla 20. *Áreas de vuelo fotogramétrico para cada sector de mejoramiento.*

Nº	Área de vuelo	Sector	Área (Ha)
1	AV-02	SM-02	1.598
2	AV-03	SM-03	1.584
3	AV-05.1	SM-05.1	1.526
4	AV-06	SM-06	2.500
5	AV-07	SM-07	2.004
6	AV-08	SM-08	3.477
7	AV-09-10	SM-09/SM-10	2.333
8	AV-11	SM-11	1.036
9	AV-12	SM-12	1.326
10	AV-13	SM-13	1.605
11	AV-14	SM-14	1.585

Nota. Elaboración propia.

Se determinó 11 áreas de vuelo, los cuáles abarcan la totalidad de los sectores de mejoramiento seleccionados en la presente investigación.

Figura 29. Áreas de vuelo fotogramétrico de la zona de estudio.



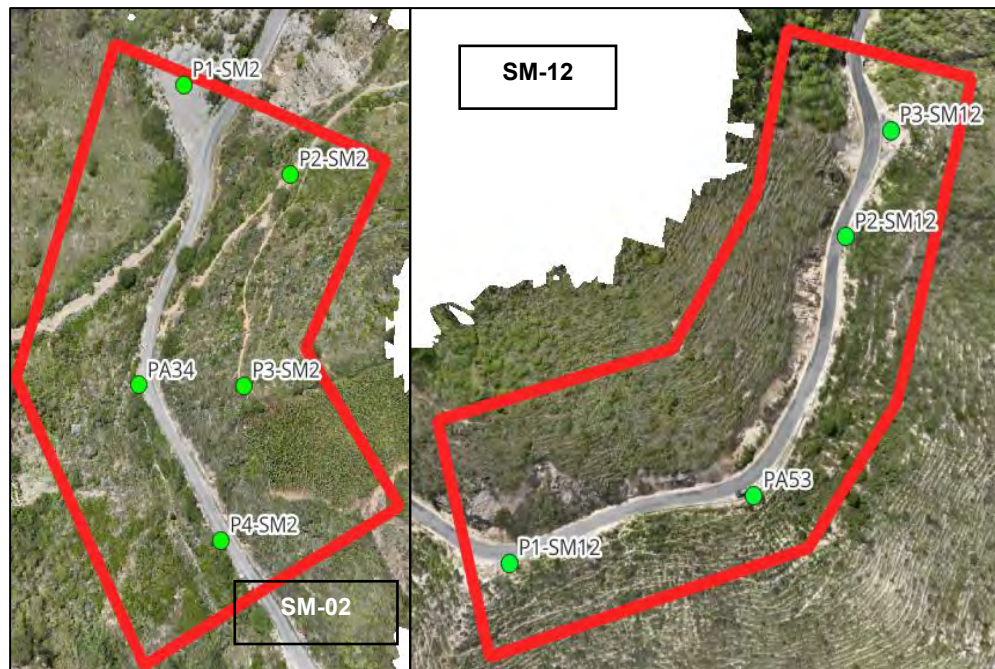
Nota. Elaboración propia.

- **Puntos de apoyo fotogramétrico (PAF):**

De acuerdo a las características morfológicas de la zona y al tamaño de las áreas de cada vuelo, se determinó colocar como mínimo 4 PAF para cada sector de mejoramiento, los cuales se distribuyeron en los límites y en el centro del área de vuelo, de esta manera se aseguró un control en la precisión planimétrica y altimétrica. También, se utilizaron los puntos geodésicos y/o poligonales de apoyo como PAF, siempre y cuando, se encuentren dentro del área de vuelo. Debido a que estas áreas presentan laderas empinadas y escarpadas, se colocaron

algunos PAF en las zonas más elevadas del terreno para asegurar un control en la precisión vertical, siempre que sean accesibles, caso contrario, se ubicarán a lo largo de la carretera.

Figura 30. Distribución de los PAF en los sectores de mejoramiento, SM-02 y SM-12.



Nota. Elaboración propia.

Para la señalización de los PAF en campo, se emplearon marcas en forma de aspa de aproximadamente 1 metro, con una varilla de fierro de 1/2" en el centro, rodeada por un círculo delimitado con material sedimentario de la zona para facilitar su visibilidad. Las aspás se trazaron con yeso para garantizar su detección en el procesamiento fotogramétrico. También se marcaron con aspás los puntos geodésicos o poligonales utilizados como PAF en cada área de vuelo.

Figura 31. *Marcas de los PAF del levantamiento fotogramétrico.*

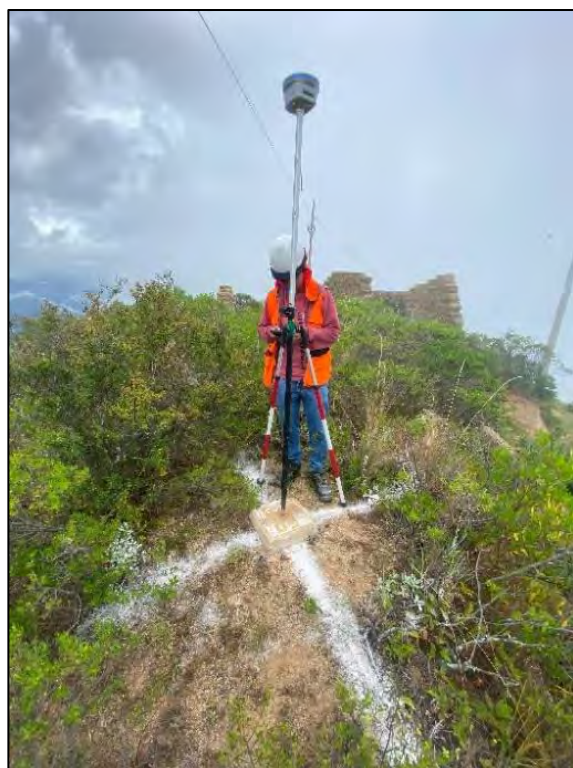


Nota. Elaboración propia.

- **Método de posicionamiento de los PAF:**

Se utilizó el método RTK para posicionar los PAF, ya que se cuenta con la información de los puntos geodésicos y/o poligonales de apoyo en coordenadas UTM, lo que permitió medir los PAF con esas mismas coordenadas, optimizando tiempo y recursos. La distancia entre la estación base y el rover se mantuvo dentro del rango de 1 km, lo que permitió evitar la pérdida de señal entre los receptores.

Figura 32. *Posicionamiento cinemático en tiempo real (RTK).*



Nota. Elaboración propia.

- **Parámetros de vuelo:**

Debido a que el tramo de estudio se ubica en una zona de topografía montañosa, los parámetros de vuelo fueron ajustados a estas condiciones. A continuación, se presentan los parámetros aplicados:

Tabla 21. *Parámetros del vuelo fotogramétrico.*

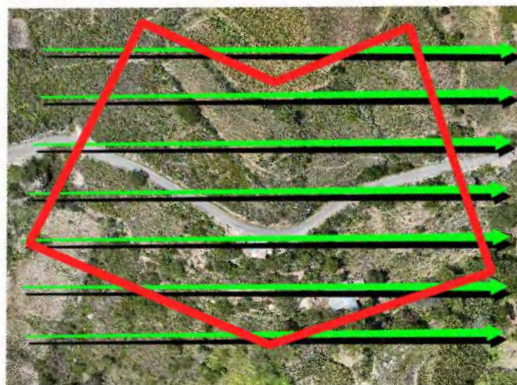
N°	Parámetros de vuelo	Valor
1	GSD	1.88 cm/pixel
2	Altura de vuelo	70 m
3	Recubrimiento longitudinal	80 %
4	Recubrimiento transversal	80 %
5	Velocidad	9 m/s
6	Dirección de las líneas de vuelo	Longitudinal y transversal
7	Patrón de vuelo	Doble grillado
8	Reconocimiento del terreno	Activado

Nota. Elaboración propia.

Se estableció una altura de vuelo de 70 metros con traslapes longitudinales y transversales del 80 %, garantizando un solapamiento adecuado para terrenos montañosos y un GSD promedio de 1.88 cm/píxel. Para mantener una resolución uniforme, se activó la función de reconocimiento del terreno, permitiendo al dron seguir los cambios de elevación para obtener un GSD uniforme, de esta manera, se garantizó el solapamiento deseado, ya que estos tienden a disminuir cuando el terreno es accidentado. Asimismo, se aplicó un patrón de vuelo en doble grillado, con el fin de mejorar la cobertura en laderas con pendientes pronunciadas y asegurar un modelado 3D de alta calidad. Esto conllevó a realizar dos misiones por cada área de vuelo:

- ✓ **Misión longitudinal:** La dirección de las líneas de vuelo es paralelo al eje de la carretera.
- ✓ **Misión transversal:** Las líneas de vuelo están orientadas de manera perpendicular al eje de la carretera.

Figura 33. Misiones de vuelo, longitudinal y transversal.



Misión longitudinal



Misión transversal

Nota. Elaboración propia.

4.7.3. Trabajo de campo:

El trabajo de campo se llevó a cabo los días 30 de abril y 01 de mayo del 2024, periodo que resultó suficiente debido a la delimitación previa de los sectores evaluados y al uso de sistemas RPAS, los cuales permiten una cobertura eficiente incluso en zonas de topografía irregular. Las actividades se realizaron bajo condiciones climáticas favorables; no obstante, en escenarios adversos, como la ocurrencia de lluvias u otras limitaciones operativas, el tiempo de ejecución podría haberse extendido.

- **Levantamiento fotogramétrico:** El levantamiento de los sectores de mejoramiento se inició con el posicionamiento de la base de los PAF. El equipo geodésico utilizado para la medición de los PAF fue el GNSS Diferencial CHCNAV i90 (Base y rover).

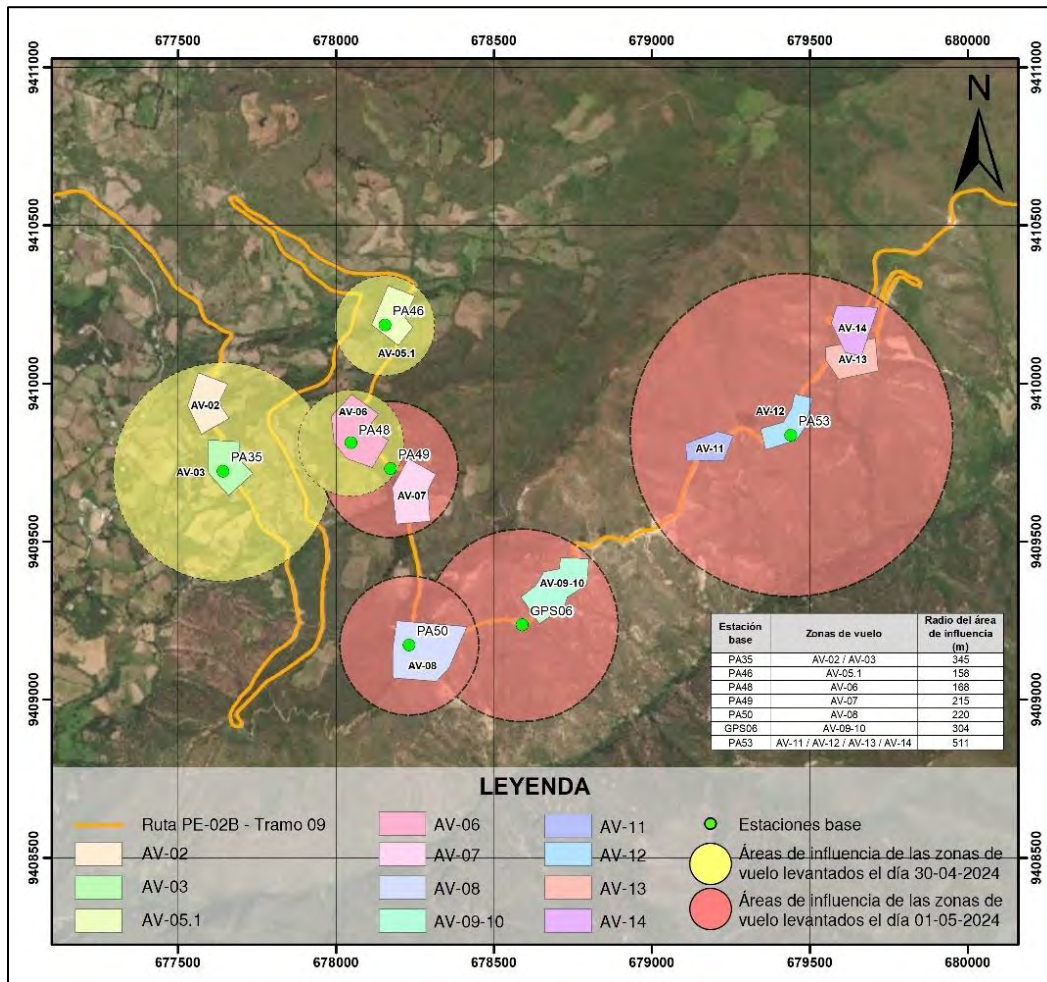
En cada área de vuelo se estacionó la base en el punto geodésico y/o poligonal de apoyo que se encuentre más cercano o dentro de la misma zona, tomando en cuenta que la distancia entre la base y rover no sea mayor a 1 km. A continuación, se muestran las estaciones bases para cada área de vuelo:

Tabla 22. Estaciones base para cada área de vuelo.

N°	Área de vuelo	Estación base
1	AV-02	PA35
2	AV-03	
3	AV-05.1	PA46
4	AV-06	PA48
5	AV-07	PA49
6	AV-08	PA50
7	AV-09-10	GPS06
8	AV-11	PA53
9	AV-12	
10	AV-13	
11	AV-14	

Nota. Elaboración propia.

Figura 34. Áreas de influencia de las estaciones base.



Nota. Elaboración propia.

En la Figura 34 se puede observar las áreas de influencia de cada estación base con sus respectivas zonas de vuelo, en los cuales sus radios no superan el 1 km de distancia, por lo que todos los PAF medidos para cada área se encuentran dentro del rango de distancia establecido.

Las coordenadas UTM de las estaciones base con sus respectivas cotas niveladas se presentan a continuación:

Tabla 23. *Coordenadas UTM y cotas niveladas de las estaciones base.*

N°	Estación base	Coordenadas UTM		Cota nivelada	Áreas de vuelo (AV)
		Norte	Este		
1	PA35	9409722.896	677642.739	2139.084	AV-02 / AV-03
2	PA46	9410185.050	678155.095	2350.983	AV-05.1
3	PA48	9409812.729	678047.633	2364.074	AV-06
4	PA49	9409731.293	678172.693	2374.189	AV-07
5	PA50	9409172.699	678231.122	2402.772	AV-08
6	GPS06	9409236.499	678590.036	2427.148	AV-09-10
7	PA53	9409837.191	679439.906	2484.556	AV-11 / AV-12 / AV-13 / AV-14

Nota. Elaboración propia.

Figura 35. *Medición de la estación base, PA49.*



Nota. Elaboración propia.

Posteriormente, para controlar la precisión en la medición de los PAF, se realizó la comprobación de lecturas del RTK con puntos geodésicos y/o poligonales de apoyo cercanos a la posición de la estación base, los cuales presentan coordenadas conocidas, de esta manera se pudo controlar que

las medidas se encuentren dentro de una tolerancia permisible. Los resultados del control de la precisión se muestran a continuación:

Tabla 24. Control de la estación base PA35, para el AV-02 y AV-03.

Punto de control	Método de posicionamiento	Coordenadas UTM		Cota nivelada	Descripción
		Norte	Este		
PA34	Punto geodésico/poligonal	9409928.591	677572.280	2123.592	Control de la precisión
	RTK	9409928.610	677572.291	2123.607	
Diferencia		-0.019	-0.011	-0.015	

Nota. Elaboración propia.

Tabla 25. Control de la estación base PA46, para el AV-05.1.

Punto de control	Método de posicionamiento	Coordenadas UTM		Cota nivelada	Descripción
		Norte	Este		
PA47	Punto geodésico/poligonal	9409871.350	678033.971	2361.190	Control de la precisión
	RTK	9409871.333	678033.949	2361.211	
Diferencia		0.017	0.022	-0.021	

Nota. Elaboración propia.

Tabla 26. Control de la estación base PA48, para el AV-06.

Punto de control	Método de posicionamiento	Coordenadas UTM		Cota nivelada	Descripción
		Norte	Este		
PA47	Punto geodésico/poligonal	9409871.350	678033.971	2361.190	Control de la precisión
	RTK	9409871.345	678033.952	2361.202	
Diferencia		0.005	0.019	-0.012	

Nota. Elaboración propia.

Tabla 27. Control de la estación base PA49, para el AV-07.

Punto de control	Método de posicionamiento	Coordenadas UTM		Cota nivelada	Descripción
		Norte	Este		
PA48	Punto geodésico/poligonal	9409812.729	678047.633	2364.074	Control de la precisión
	RTK	9409812.741	678047.648	2364.087	
Diferencia		-0.012	-0.015	-0.013	
Punto de control	Método de posicionamiento	Coordenadas UTM		Cota nivelada	Descripción
		Norte	Este		
PA49	Punto geodésico/poligonal	9409731.293	678172.693	2374.189	Verificación del sensor IMU
	RTK	9409731.295	678172.679	2374.188	
Diferencia		-0.002	0.014	0.001	

Nota. Elaboración propia.

Tabla 28. Control de la estación base PA50, para el AV-08.

Punto de control	Método de posicionamiento	Coordenadas UTM		Cota nivelada	Descripción
		Norte	Este		
PA50	Punto geodésico/poligonal	9409172.699	678231.122	2402.772	Verificación del sensor IMU
	RTK	9409172.691	678231.113	2402.771	
Diferencia		0.008	0.009	0.001	
Punto de control	Método de posicionamiento	Coordenadas UTM		Cota nivelada	Descripción
		Norte	Este		
GPS05	Punto geodésico/poligonal	9409094.038	678238.377	2411.711	Control de la precisión
	RTK	9409094.028	678238.402	2411.725	
Diferencia		0.010	-0.025	-0.014	

Nota. Elaboración propia.

Tabla 29. Control de la estación base GPS06, para el AV-09-10.

Punto de control	Método de posicionamiento	Coordenadas UTM		Cota nivelada	Descripción
		Norte	Este		
GPS06	Punto geodésico/poligonal	9409236.499	678590.036	2427.148	Verificación del sensor IMU
	RTK	9409236.486	678590.046	2427.161	
Diferencia		0.013	-0.010	-0.013	
Punto de control	Método de posicionamiento	Coordenadas UTM		Cota nivelada	Descripción
		Norte	Este		
GPS05	Punto geodésico/poligonal	9409094.038	678238.377	2411.711	Control de la precisión
	RTK	9409094.049	678238.398	2411.729	
Diferencia		-0.011	-0.021	-0.018	

Nota. Elaboración propia.

Tabla 30. Control de la estación base PA53, para el AV-11, AV-12, AV-13 y AV-14.

Punto de control	Método de posicionamiento	Coordenadas UTM		Cota nivelada	Descripción
		Norte	Este		
PA53	Punto geodésico/poligonal	9409837.191	679439.906	2484.556	Verificación del sensor IMU
	RTK	9409837.206	679439.897	2484.547	
Diferencia		-0.015	0.009	0.009	
Punto de control	Método de posicionamiento	Coordenadas UTM		Cota nivelada	Descripción
		Norte	Este		
PA54	Punto geodésico/poligonal	9410045.494	679713.483	2512.223	Control de la precisión
	RTK	9410045.500	679713.468	2512.241	
Diferencia		-0.006	0.015	-0.018	
Punto de control	Método de posicionamiento	Coordenadas UTM		Cota nivelada	Descripción
		Norte	Este		
PA55	Punto geodésico/poligonal	9410090.515	679639.852	2546.883	Control de la precisión
	RTK	9410090.505	679639.842	2546.904	
Diferencia		0.010	0.010	-0.021	

Nota. Elaboración propia.

Las precisiones en el control de la medición RTK fueron milimétricas y centimétricas, alrededor de 2 mm a 2.5 cm en horizontal y 1 mm a 2.1 cm en vertical. Así mismo, algunas mediciones de control se realizaron para verificar el sensor IMU del equipo CHCNAV i90, el cual se midió el mismo punto en donde se estacionó la base con una inclinación del bastón no

mayor a 30°, de esta manera se observó que el sensor IMU del equipo se encontrara funcionando.

Figura 36. *Verificación del sensor IMU del CHCNAV i90.*



Nota. Elaboración propia.

Tras llevar a cabo el proceso de control de la precisión, se realizó la medición de los PAF para cada área de vuelo, tomando en cuenta la cantidad, distribución y forma de las marcas mencionadas en la etapa de planificación. En primer lugar, se procedió a marcar los PAF con yeso en lugares que se encuentren libres de vegetación alta y visibles ante el paso del dron. Después de completar el marcado, se realizó la lectura de cada punto, asegurándonos que la precisión de las mediciones estuviera dentro de la tolerancia permitida al momento de cada lectura. Estas se tomaron con un intervalo de 5 segundos utilizando un bípode para garantizar la estabilidad de las mediciones y de esta manera, pueda captar una mayor señal.

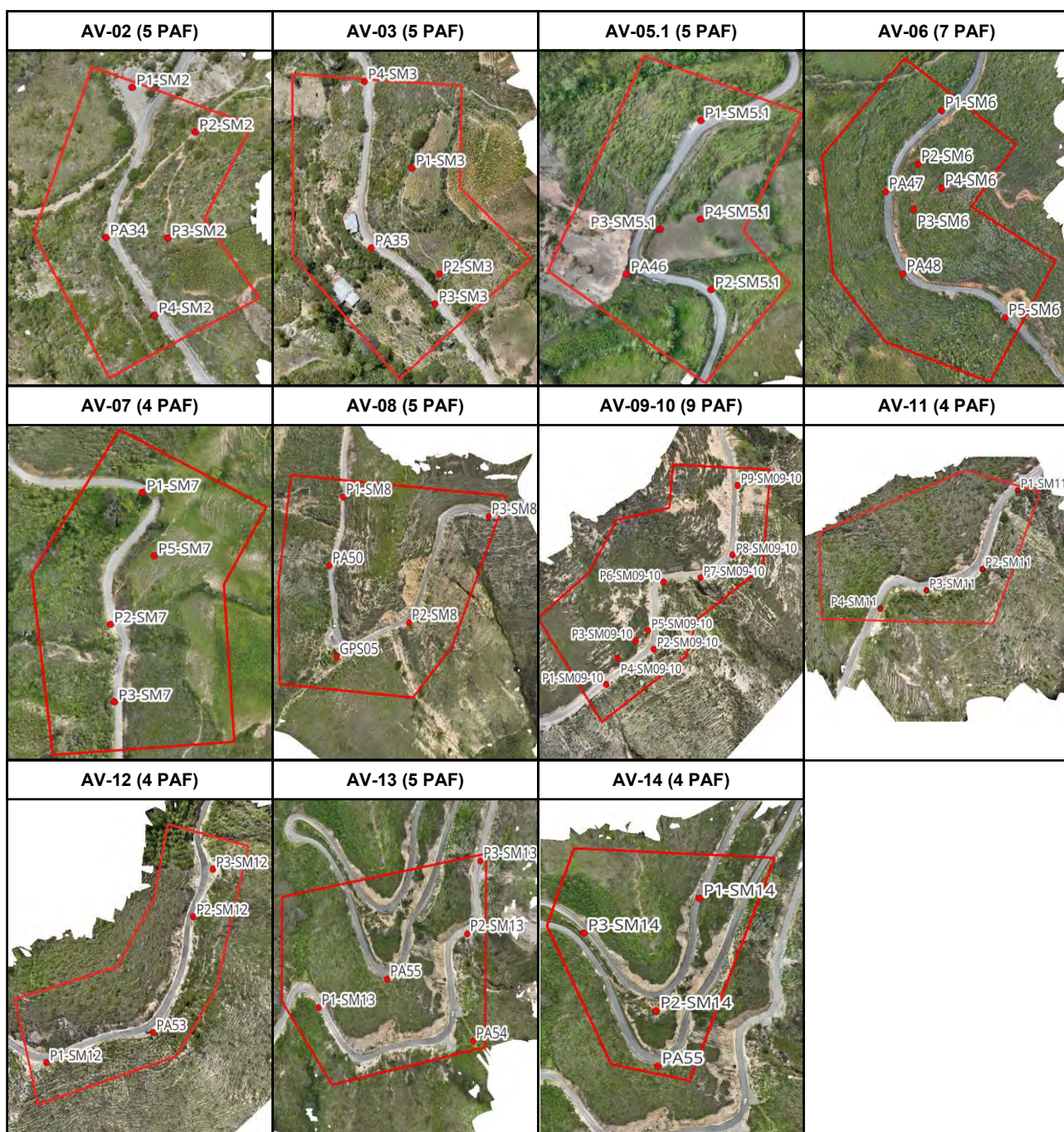
Figura 37. *Medición de los PAF para área de vuelo.*



Nota. Elaboración propia.

La distribución de los PAF para cada área de vuelo se presenta en la siguiente figura:

Figura 38. Distribución de los PAF para cada área de vuelo.



Nota. Elaboración propia.

A continuación, se presentan las coordenadas UTM de los PAF medidos en campo con sus respectivas cotas para cada área de vuelo:

Tabla 31. *Coordenadas UTM y cotas de los PAF para cada área de vuelo.*

Estación base	Puntos de apoyo fotogramétrico	Coordenadas UTM		Cota	Área de vuelo
		Norte	Este		
PA35	PA34	9409928.591	677572.280	2123.592	AV-02
	P1-SM2	9410023.111	677587.653	2116.408	
	P2-SM2	9409994.997	677624.216	2134.334	
	P3-SM2	9409928.332	677608.147	2151.632	
	P4-SM2	9409879.672	677600.510	2128.301	
	PA35	9409722.896	677642.739	2139.084	AV-03
	P1-SM3	9409768.894	677666.763	2162.567	
	P2-SM3	9409707.965	677682.982	2148.973	
	P3-SM3	9409690.636	677680.363	2141.407	
	P4-SM3	9409818.650	677638.744	2134.763	
PA46	PA46	9410185.050	678155.095	2350.983	AV-05.1
	P1-SM5.1	9410273.921	678195.095	2340.747	
	P2-SM5.1	9410175.857	678200.636	2349.359	
	P3-SM5.1	9410210.735	678173.229	2357.451	
	P4-SM5.1	9410216.559	678194.870	2366.476	
PA48	PA48	9409812.729	678047.633	2364.074	AV-06
	PA47	9409871.350	678033.971	2361.190	
	P1-SM6	9409929.065	678077.228	2356.739	
	P2-SM6	9409890.793	678058.964	2368.832	
	P3-SM6	9409858.657	678055.738	2377.253	
	P4-SM6	9409873.656	678077.070	2385.532	
	P5-SM6	9409781.169	678126.208	2370.588	
PA49	P1-SM7	9409723.899	678243.007	2378.778	AV-07
	P2-SM7	9409639.808	678223.842	2379.799	
	P3-SM7	9409590.289	678226.395	2380.816	
	P5-SM7	9409683.707	678249.859	2392.564	
PA50	PA50	9409172.699	678231.122	2402.772	AV-08
	P1-SM8	9409231.736	678245.074	2398.758	
	GPS05	9409094.038	678238.377	2411.711	
	P2-SM8	9409123.482	678313.263	2410.520	
	P3-SM8	9409214.929	678395.921	2418.306	

Estación base	Puntos de apoyo fotogramétrico	Coordenadas UTM		Cota	Área de vuelo
		Norte	Este		
GPS06	P1-SM09-10	9409272.019	678647.742	2428.901	AV-09-10
	P2-SM09-10	9409300.860	678692.114	2431.826	
	P3-SM09-10	9409307.523	678675.128	2441.297	
	P4-SM09-10	9409293.196	678658.451	2439.418	
	P5-SM09-10	9409315.887	678686.851	2437.311	
	P6-SM09-10	9409355.029	678701.079	2436.384	
	P7-SM09-10	9409358.565	678735.388	2438.898	
	P8-SM09-10	9409377.173	678765.144	2440.659	
	P9-SM09-10	9409433.666	678769.701	2444.550	
PA53	P1-SM11	9409837.436	679241.836	2474.329	AV-11
	P2-SM11	9409789.256	679217.734	2471.020	
	P3-SM11	9409776.176	679179.813	2469.610	
	P4-SM11	9409765.091	679148.532	2467.289	
	PA53	9409837.191	679439.906	2484.556	AV-12
	P1-SM12	9409818.125	679365.026	2481.648	
	P2-SM12	9409909.937	679468.053	2486.468	
	P3-SM12	9409939.762	679481.873	2488.014	
	P1-SM13	9410069.628	679581.054	2498.403	AV-13
	PA54	9410045.494	679713.483	2512.223	
	P2-SM13	9410123.274	679708.332	2513.385	
	P3-SM13	9410176.157	679719.784	2515.257	
	PA55	9410090.515	679639.852	2546.883	
	PA55	9410090.515	679639.852	2546.883	AV-14
	P1-SM14	9410211.241	679666.699	2565.446	
	P2-SM14	9410130.448	679638.809	2564.050	
	P3-SM14	9410186.328	679592.205	2558.600	

Nota. Elaboración propia.

Finalizada la medición de los PAF, se ejecutó el vuelo fotogramétrico en las áreas correspondientes, utilizando el drone DJI Mavic 3 Enterprise y aplicando los parámetros y misiones de vuelo previamente definidos en gabinete.

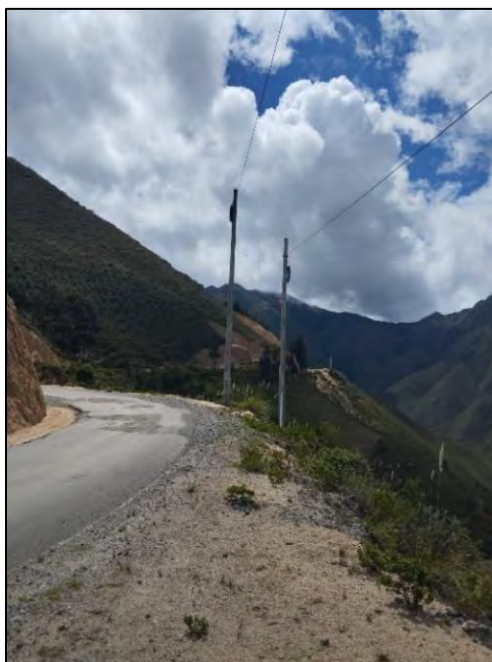
Figura 39. Vuelo fotogramétrico de los sectores de mejoramiento.



Nota. Elaboración propia.

Cabe resaltar que, solo para el AV-09-10, se voló a una altura de 120 m (GSD de 3.22 cm/pixel), ya que la zona presentaba postes de luz, lo cual podría haber generado el riesgo de colisión del drone si se hubiera volado a 70 m de altura, tal como se había planificado inicialmente. Los demás parámetros no variaron en las áreas restantes.

Figura 40. Presencia de postes durante el vuelo del AV-09-10.



Nota. Elaboración propia.

A continuación, se muestra el número de fotografías aéreas obtenidas en cada misión de vuelo:

Tabla 32. Número de fotografías aéreas por cada área de vuelo.

N°	Área de vuelo	Número de fotografías aéreas		
		Misión longitudinal	Misión transversal	Total por área
1	AV-02	83	105	188
2	AV-03	64	81	145
3	AV-05.1	58	66	124
4	AV-06	124	127	251
5	AV-07	74	93	167
6	AV-08	113	177	290
7	AV-09-10	17	25	42
8	AV-11	45	71	116
9	AV-12	70	83	153
10	AV-13	77	85	162
11	AV-14	86	87	173
Total por misión		811	1000	1811

Nota. Elaboración propia.

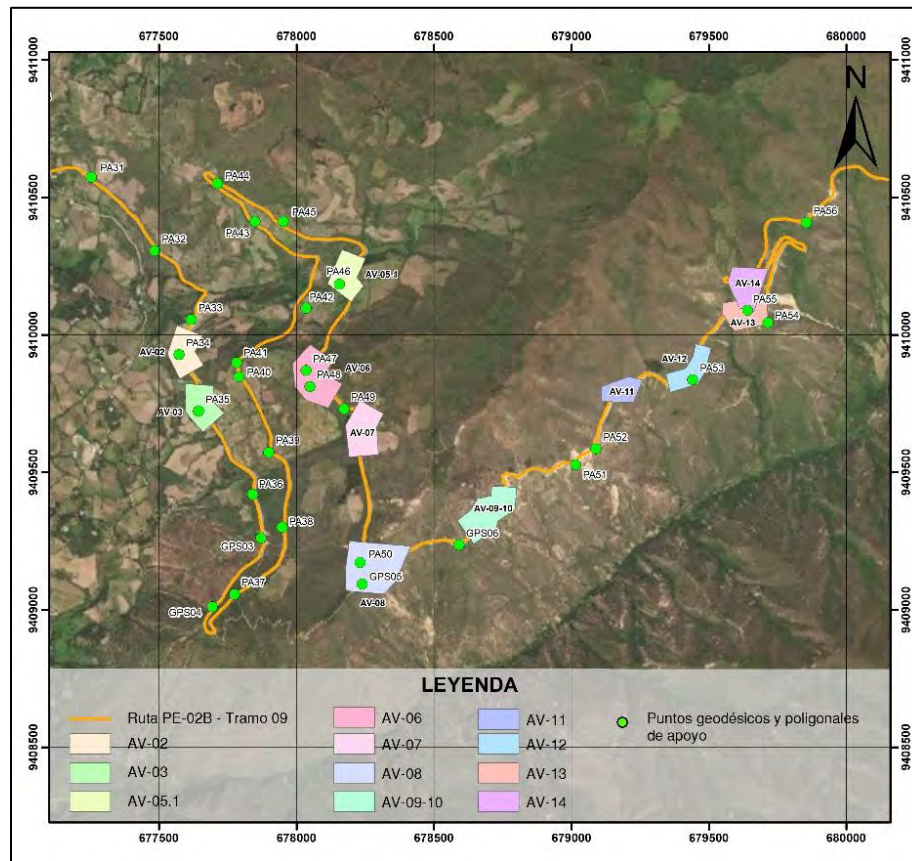
4.7.4. Procesamiento de la información topográfica y fotogramétrica:

La información obtenida del servicio de mejoramiento y del trabajo de campo fue procesada en varias etapas, detalladas a continuación:

- **Transformación de coordenadas UTM a topográficas de los PAF:**

Dado que los trabajos de movimiento de tierras se realizarán en el tramo de estudio, se emplearon coordenadas topográficas por su mayor precisión en áreas reducidas, evitando las distorsiones asociadas a proyecciones UTM. En el proyecto de mejoramiento se establecieron puntos geodésicos cada 5 km en pares a lo largo del eje vial, y entre ellos se definieron poligonales de apoyo con distancias menores a 500 m. Los factores combinados de los puntos geodésicos se procesaron en el Trimble Business Center (TBC) a partir de mediciones GNSS diferenciales, mientras que los de las poligonales se calcularon promediando los factores de los puntos geodésicos más cercanos, ya que fueron levantadas con estación total.

Figura 41. *Puntos geodésicos y poligonales de apoyo del tramo de estudio.*



Nota. Elaboración propia.

Para llevar a cabo la transformación, es importante definir un punto de referencia o base que posea coordenadas topográficas. En la investigación, en cada área de vuelo se estacionó una base en un punto geodésico o poligonal. Desde estas bases, se midieron los PAF en coordenadas UTM, por lo que, para transformarlos a coordenadas planas, se usaron estas mismas estaciones base en coordenadas topográficas que se obtuvieron de la recopilación de información. El factor combinado de cada PAF se calculó promediando los factores de los puntos más cercanos: ya sea entre dos geodésicos, dos poligonales o uno de cada tipo, según correspondiera. Este procedimiento se aplicó en todo el tramo de estudio. A continuación, se presenta los factores combinados para cada PAF:

Tabla 33. Factores combinados para cada PAF.

Área de vuelo	Línea base	Punto geodésico o poligonal	Factor combinado	PAF distribuidos por cada línea base	Factor combinado promedio para cada PAF
AV-02-03	PA33-PA34	PA33	0.99965892525	P1-SM2 / P2-SM2	0.99965892525
		PA34	0.99965892525		
	PA34-PA35	PA34	0.99965892525	P3-SM2 / P4-SM2 / P1-SM3 / P4-SM3	0.99965892525
		PA35	0.99965892525		
	PA35-PA36	PA35	0.99965892525	P2-SM3 / P3-SM3	0.99965892525
		PA36	0.99965892525		
AV-05.1	PA45-PA46	PA45	0.99962750555	P1-SM5.1 / P3-SM5.1 / P4-SM5.1	0.99962750555
		PA46	0.99962750555		
	PA46-PA47	PA46	0.99962750555	P2-SM5.1	0.99962750555
		PA47	0.99962750555		
AV-06	PA46-PA47	PA46	0.99962750555	P1-SM6 / P2-SM6	0.99962750555
		PA47	0.99962750555		
	PA47-PA48	PA47	0.99962750555	P3-SM6 / P4-SM6	0.99962750555
		PA48	0.99962750555		
	PA48-PA49	PA48	0.99962750555	P5-SM6	0.99962750555
		PA49	0.99962750555		
AV-07	PA49-PA50	PA49	0.99962750555	P1-SM7 / P2-SM7 / P3-SM7 / P5-SM7	0.99962750555
		PA50	0.99962750555		
AV-08	PA49-PA50	PA49	0.99962750555	P1-SM8	0.99962750555
		PA50	0.99962750555		
	GPS05-GPS06	GPS05	0.99961092330	P2-SM8 / P3-SM8	0.99961048535
		GPS06	0.99961004740		
AV-09-10	GPS06-PA51	GPS06	0.99961004740	P1-SM09-10 / P2-SM09-10 / P3-SM09-10 / P4-SM09-10 / P5-SM09-10 / P6-SM09-10 / P7-SM09-10 / P8-SM09-10 / P9-SM09-10	0.99960358483
		PA51	0.99959712225		
AV-11-12-13-14	PA52-PA53	PA52	0.99959712225	P1-SM11 / P2-SM11 / P3-SM11 / P4-SM11 / P1-SM12	0.99959712225
		PA53	0.99959712225		
	PA53-PA54	PA53	0.99959712225	P2-SM12 / P3-SM12 / P1-SM13	0.99959712225
		PA54	0.99959712225		
	PA54-PA55	PA54	0.99959712225	P2-SM13 / P3-SM13	0.99959712225
		PA55	0.99959712225		
	PA55-PA56	PA55	0.99959712225	P1-SM14 / P2-SM14 / P3-SM14	0.99959712225
		PA56	0.99959712225		

Nota. Elaboración propia.

Con los factores combinados de cada PAF, se realizó la conversión, utilizando la Ecuación 4 para calcular la distancia topográfica, y de esta manera, mediante el azimut calculado se puedan obtener las coordenadas topográficas (Ecuación 8 y 9).

No se aplicaron correcciones al azimut, como la convergencia de meridianos ni la reducción arco-cuerda, ya que su impacto en distancias cortas es mínimo. Según Wolf y Ghilani (2016), la corrección arco-cuerda es despreciable en longitudes menores a 8 km, ya que su efecto es menor que el error asociado a la medición de ángulos o acimuts, y Soler y Fury (2000) indican que la convergencia de meridianos solo es significativa a partir de 1 km. Como los PAF se ubicaron a menos de 1 km de su estación base, se descartaron dichas correcciones sin afectar la precisión.

En la siguiente tabla se presenta el cuadro de transformación de UTM a topográficas de los PAF para el AV-09-10.

Tabla 34. Transformación de coordenadas UTM a topográficas de los PAF del AV-09-10.

N°	PUNTO	COORDENADAS UTM		Δ N (m)	Δ E (m)	ANGULO (rad)	AZIMUT (rad)	DISTANCIA UTM (m)	FACTOR COMBINADO	DISTANCIA TOPOGRÁFICA (m)	Δ ESTE (m)	Δ NORTE (m)	COORDENADAS TOPOGRÁFICAS	
		NORTE	ESTE										NORTE	ESTE
1	GPS06	9,409,236.499	678,590.036										9,409,235.506	678,590.749
2	P1-SM09-10	9,409,272.019	678,647.742	35.520	57.706	0.552	1.019	67.762	0.99960358483	67.789	57.729	35.534	9,409,271.040	678,648.478
3	P2-SM09-10	9,409,300.860	678,692.114	28.841	44.372	0.576	0.994	52.921	0.99960358483	52.942	44.390	28.852	9,409,299.892	678,692.867
4	P3-SM09-10	9,409,307.523	678,675.128	6.663	-16.986	-0.374	5.086	18.246	0.99960358483	18.253	-16.993	6.666	9,409,306.558	678,675.875
5	P4-SM09-10	9,409,293.196	678,658.451	-14.327	-16.677	0.710	4.003	21.986	0.99960358483	21.995	-16.684	-14.333	9,409,292.225	678,659.191
6	P5-SM09-10	9,409,315.887	678,686.851	22.691	28.400	0.674	0.897	36.352	0.99960358483	36.366	28.411	22.700	9,409,314.925	678,687.602
7	P6-SM09-10	9,409,355.029	678,701.079	39.142	14.228	1.222	0.349	41.648	0.99960358483	41.664	14.234	39.158	9,409,354.083	678,701.836
8	P7-SM09-10	9,409,358.565	678,735.388	3.536	34.309	0.103	1.468	34.491	0.99960358483	34.504	34.323	3.537	9,409,357.620	678,736.159
9	P8-SM09-10	9,409,377.173	678,765.144	18.608	29.756	0.559	1.012	35.095	0.99960358483	35.109	29.768	18.615	9,409,376.235	678,765.926
10	P9-SM09-10	9,409,433.666	678,769.701	56.493	4.557	1.490	0.080	56.676	0.99960358483	56.699	4.559	56.515	9,409,432.751	678,770.485

Nota. Elaboración propia.

Cabe resaltar que, en el cuadro de transformación, se muestran las coordenadas UTM y topográficas de la estación base como punto de partida de la conversión para cada área de vuelo. Las transformaciones de los PAF restantes se presentan en los anexos.

A continuación, se presentan las coordenadas topográficas de los PAF con sus respectivas cotas para cada área de vuelo:

Tabla 35. *Coordenadas topográficas y cotas de los PAF para cada área de vuelo.*

Estación base	Puntos de apoyo fotogramétrico	Coordenadas topográficas		Cota	Área de vuelo
		Norte	Este		
PA35	PA34	9409927.832	677572.613	2123.592	AV-02
	P1-SM2	9410022.384	677587.992	2116.408	
	P2-SM2	9409994.260	677624.567	2134.334	
	P3-SM2	9409927.573	677608.493	2151.632	
	P4-SM2	9409878.896	677600.853	2128.301	
	PA35	9409722.066	677643.097	2139.084	AV-03
	P1-SM3	9409768.080	677667.129	2162.567	
	P2-SM3	9409707.130	677683.353	2148.973	
	P3-SM3	9409689.795	677680.734	2141.407	
	P4-SM3	9409817.853	677639.100	2134.763	
PA46	PA46	9410184.409	678155.639	2350.983	AV-05.1
	P1-SM5.1	9410273.314	678195.654	2340.747	
	P2-SM5.1	9410175.213	678201.197	2349.359	
	P3-SM5.1	9410210.104	678173.780	2357.451	
	P4-SM5.1	9410215.930	678195.429	2366.476	
PA48	PA48	9409811.949	678048.137	2364.074	AV-06
	PA47	9409870.593	678034.470	2361.190	
	P1-SM6	9409928.329	678077.743	2356.739	
	P2-SM6	9409890.043	678059.472	2368.832	
	P3-SM6	9409857.895	678056.245	2377.253	
	P4-SM6	9409872.899	678077.585	2385.532	
	P5-SM6	9409780.378	678126.742	2370.588	
PA49	P1-SM7	9409723.087	678243.584	2378.778	AV-07
	P2-SM7	9409638.964	678224.411	2379.799	
	P3-SM7	9409589.427	678226.965	2380.816	
	P5-SM7	9409682.880	678250.438	2392.564	
PA50	PA50	9409171.681	678231.695	2402.772	AV-08
	P1-SM8	9409230.740	678245.652	2398.758	
	GPS05	9409092.988	678238.952	2411.711	
	P2-SM8	9409122.444	678313.868	2410.520	
	P3-SM8	9409213.926	678396.558	2418.306	
GPS06	P1-SM09-10	9409271.040	678648.478	2428.901	AV-09-10
	P2-SM09-10	9409299.892	678692.867	2431.826	
	P3-SM09-10	9409306.558	678675.875	2441.297	
	P4-SM09-10	9409292.225	678659.191	2439.418	

	P5-SM09-10	9409314.925	678687.602	2437.311	
	P6-SM09-10	9409354.083	678701.836	2436.384	
	P7-SM09-10	9409357.620	678736.159	2438.898	
	P8-SM09-10	9409376.235	678765.926	2440.659	
	P9-SM09-10	9409432.751	678770.485	2444.550	
PA53	P1-SM11	9409836.685	679242.812	2474.329	AV-11
	P2-SM11	9409788.486	679218.700	2471.020	
	P3-SM11	9409775.400	679180.764	2469.610	
	P4-SM11	9409764.311	679149.470	2467.289	
	PA53	9409836.440	679440.961	2484.556	AV-12
	P1-SM12	9409817.366	679366.051	2481.648	
	P2-SM12	9409909.215	679469.120	2486.468	
	P3-SM12	9409939.052	679482.945	2488.014	
	P1-SM13	9410068.971	679582.166	2498.403	AV-13
	PA54	9410044.827	679714.649	2512.223	
	P2-SM13	9410122.638	679709.496	2513.385	
	P3-SM13	9410175.543	679720.952	2515.257	
	PA55	9410089.866	679640.987	2546.883	AV-14
	PA55	9410089.866	679640.987	2546.883	
	P1-SM14	9410210.641	679667.846	2565.446	
	P2-SM14	9410129.815	679639.945	2564.050	
	P3-SM14	9410185.718	679593.322	2558.600	

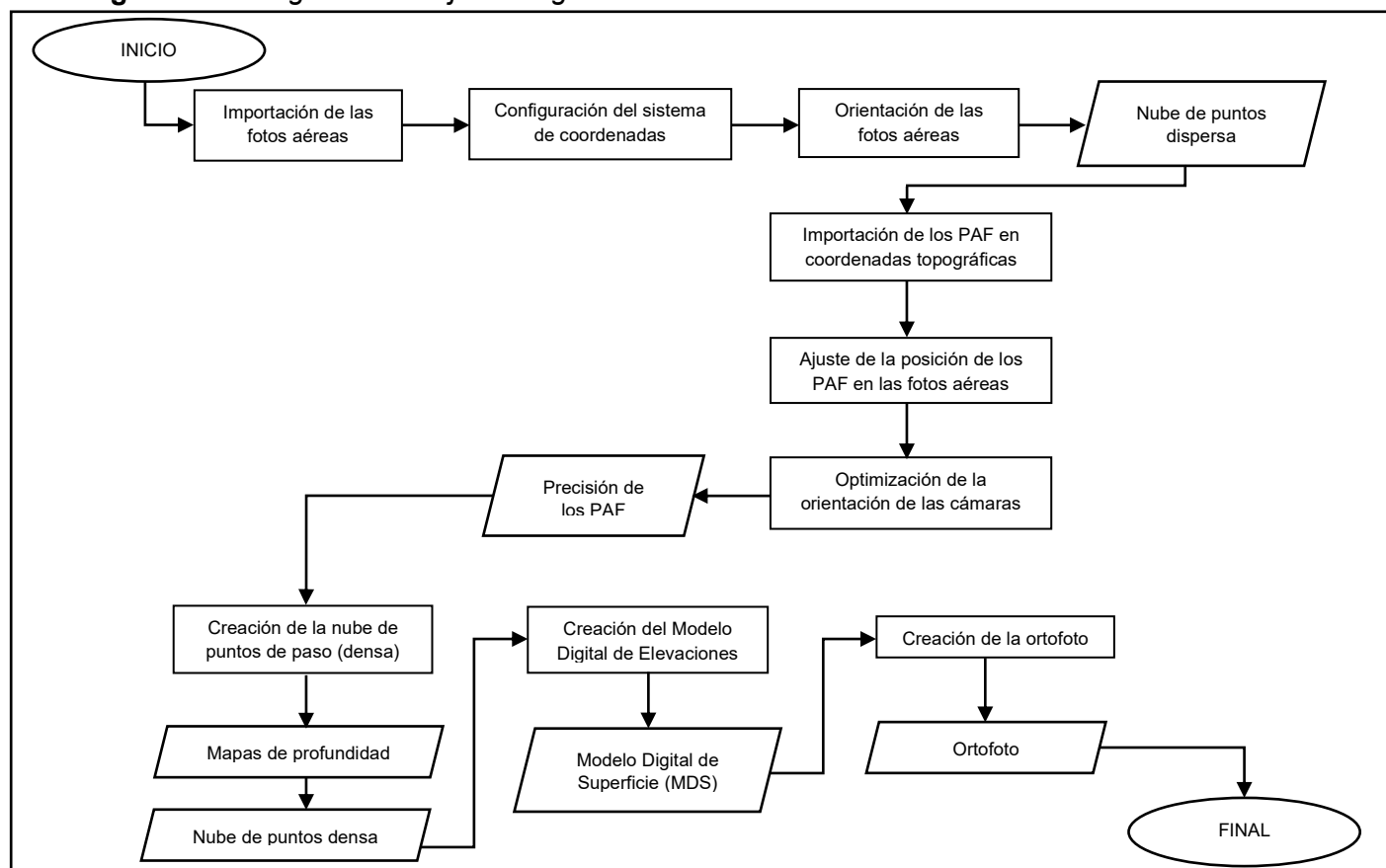
Nota. Elaboración propia.

- **Procesamiento fotogramétrico:** El procesamiento de la información levantada con drone se realizó en el software Agisoft Metashape 2.1.1, el cual se desarrolló en dos etapas:

- **Generación de la ortofoto para la evaluación de la precisión planimétrica:**

Esta etapa abarcó desde la importación de las fotos aéreas hasta la generación de la ortofoto, con la finalidad de determinar la precisión planimétrica del levantamiento, mediante una secuencia de procesos que se muestran a continuación:

Figura 42. Diagrama de flujo de la generación de la ortofoto.



Nota. Elaboración propia.

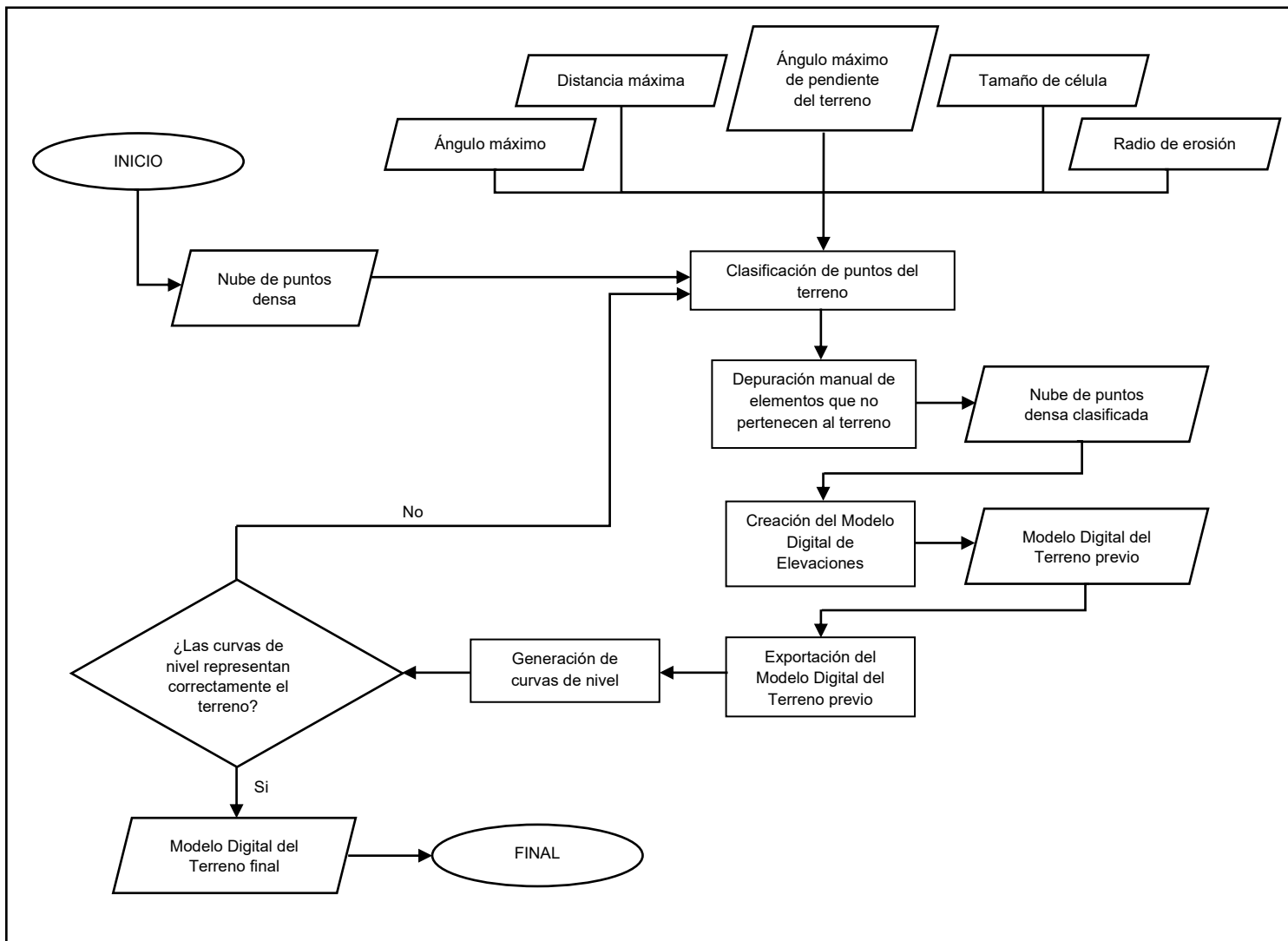
El procesamiento se inició con la importación de las imágenes aéreas y la configuración del sistema de coordenadas. Luego, se orientaron las fotografías en la máxima precisión para generar una nube de puntos dispersa. Posteriormente, se importaron y ajustaron los PAF en coordenadas topográficas y se optimizó la orientación de las cámaras para evaluar la precisión de los PAF, lo que permitió obtener una nube de puntos densa en calidad “Extra alta”, el MDS y la ortofoto, utilizada para evaluar la precisión planimétrica. Cada área de vuelo fue procesada por separado, salvo el AV-13 y AV-14, que se unificaron por compartir el PAF PA55 como zona de traslape, resultando en un total de 10 procesamientos.

- **Generación del Modelo Digital del Terreno (MDT) para la evaluación de la precisión altimétrica:**

Tras la obtención de la ortofoto, el siguiente paso fue generar el MDT, con el objetivo de determinar la precisión altimétrica del levantamiento.

A continuación, se detalla la secuencia de trabajo seguida para generar el MDT a partir de la nube de puntos densa:

Figura 43. Diagrama de flujo de la generación del Modelo Digital del Terreno.



Nota. Elaboración propia.

Con la obtención de la nube de puntos densa, se realizó la determinación del MDT para cada área de vuelo. Para ello, se utilizó la herramienta “Clasificar puntos del terreno” del Agisoft Metashape, que permite clasificar la nube de puntos densa generada, empleando un conjunto de parámetros para identificar y separar los puntos que corresponden a la superficie del terreno, diferenciándolos de otros elementos como edificaciones, vegetación, etc. Los valores de los parámetros utilizados en la presente investigación se muestran a continuación:

Tabla 36. *Valores de los parámetros de la clasificación de puntos del terreno.*

Áreas de procesamiento	Parámetros				
	Ángulo máximo (°)	Distancia máxima (m)	Ángulo máximo de pendiente del terreno (°)	Tamaño de célula (m)	Radio de erosión (m)
AV-02	45	0.10	90	50	0.75
AV-03	45	0.10	90	50	1.00
AV-05.1	45	0.10	90	50	1.00
AV-06	45	0.10	90	50	0.75
AV-07	45	0.10	90	50	1.00
AV-08	45	0.10	90	50	1.00
AV-09-10	45	0.10	90	50	1.00
AV-11	45	0.10	90	50	0.50
AV-12	45	0.10	90	50	0.50
AV-13-14	45	0.10	90	50	0.50

Nota. Elaboración propia.

A continuación, se explican los valores de los parámetros usados en el presente estudio:

Figura 44. *Parámetros de la clasificación de puntos del terreno.*

1. Ángulo máximo: Este parámetro se puede definir como la pendiente promedio del área de estudio. Dado que los sectores de mejoramiento presentan superficies accidentadas, propias de laderas de montaña con alta pendiente, se estableció un valor máximo de 45°.

2. Distancia máxima: Define el límite máximo de distancia aceptable entre un punto y el modelo digital del terreno, lo que permite evaluar si dicho punto pertenece al terreno. Para ello, es importante establecer una distancia máxima que sea lo suficientemente grande como para incluir puntos del terreno, pero lo suficientemente pequeña como para excluir puntos de vegetación y otros elementos. En este caso, se ha establecido un valor de 0.1 m, considerando la presencia abundante de vegetación arbustiva de baja altura, por lo que se podrá distinguir si un punto corresponde al terreno o a otro objeto.

Clasificar nube de puntos

Clases

Desde: Cualquier clase

A: Terreno + Puntos bajos

☐ Conservar puntos de terreno existentes

Parámetros

Ángulo máximo (deg): 45.0

Distancia máxima (m): 0.1

Ángulo máximo de pendiente del terreno (deg): 90.0

Tamaño de célula (m): 50

Número de retorno: Cualquier retorno

Radio de erosión (m): 0.75

Aceptar Cancelar

3. Ángulo máximo de pendiente de terreno: Este parámetro permite identificar si el terreno es plano o accidentado. Para terrenos montañosos se estableció un valor máximo de 90°.

4. Tamaño de célula: Determina el tamaño de la cuadrícula para dividir la nube de puntos como un paso preparatorio. Debe basarse en las dimensiones del área más extensa que no contengan puntos del suelo. Para la presente investigación, se ha determinado un tamaño de 50 m, lo que permitirá eliminar algunas casas rurales y árboles de gran tamaño presentes en la zona de estudio.

5. Radio de erosión: Establece un buffer de puntos no clasificados, creando un área adicional alrededor del objeto, con la finalidad de clasificarlos en puntos que "NO" pertenecen al terreno. Para el presente estudio, se establecieron valores de 0.5 m, 0.75 m y 1 m.

Nota. Elaboración propia.

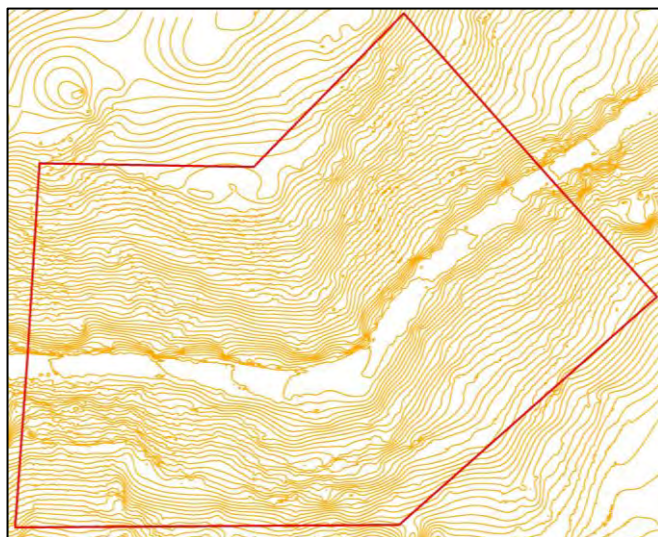
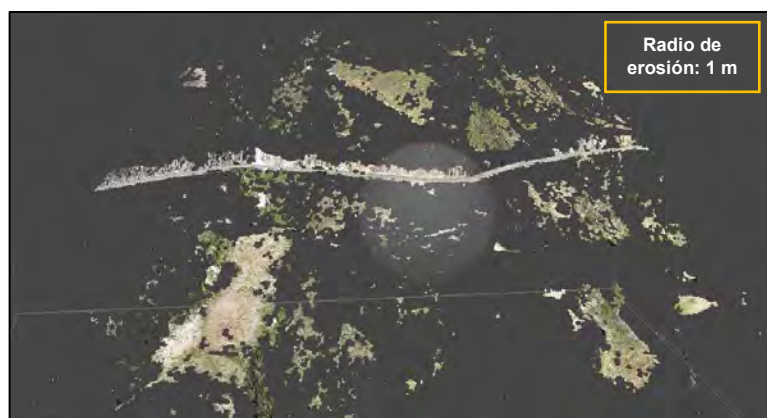
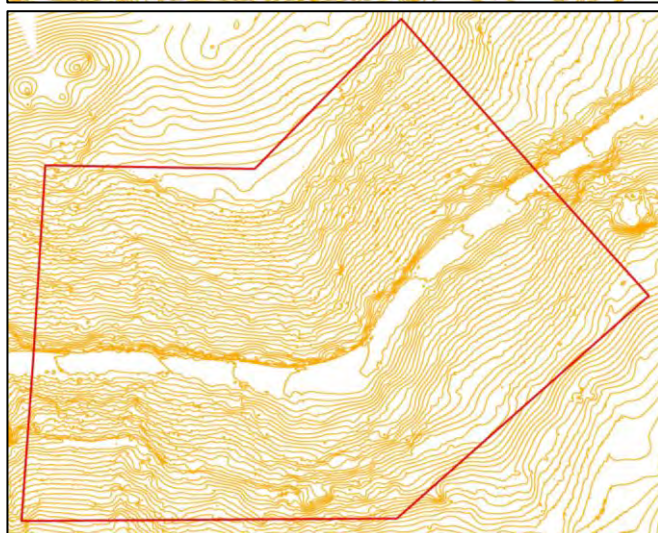
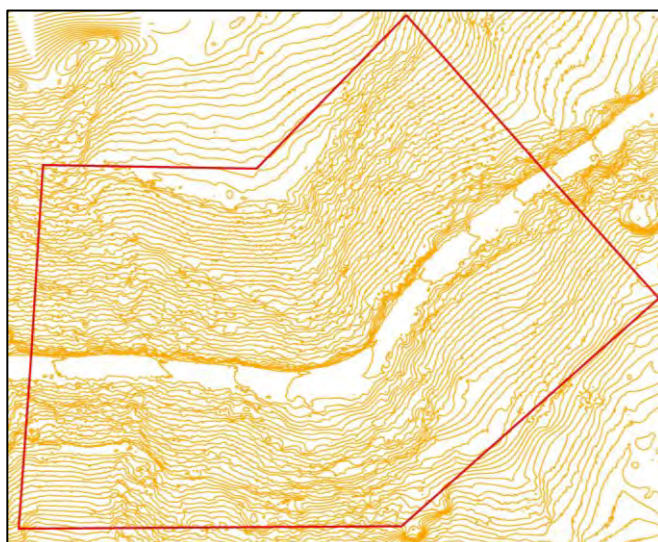
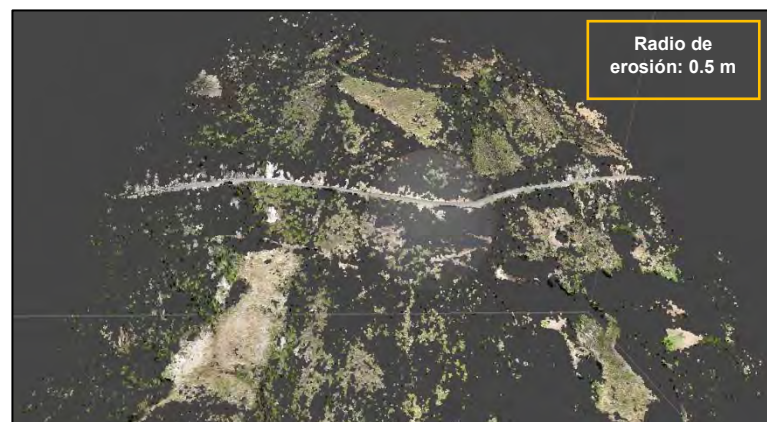
Los 4 primeros parámetros empleados se mantuvieron constantes en todos los procesamientos, ya que presentaron valores característicos de zonas montañosas con pendientes escarpadas, vegetación arbustiva y viviendas rurales. En cuanto al radio de erosión, se realizaron procesamientos preliminares con valores entre 0 m y 1 m para identificar el valor más adecuado, ya que este parámetro permite generar superficies que representen únicamente el terreno. En esta investigación se probaron radios de 0.5 m, 0.75 m y 1 m, con el objetivo de evaluar su efectividad en la

clasificación de puntos en áreas con diferentes niveles de vegetación. El procedimiento se llevó cabo de la siguiente manera:

- Primero, se procesaron los datos aplicando cada uno de los radios de erosión (0.5 m, 0.75 m y 1 m), manteniendo constantes los demás parámetros. Tras la clasificación preliminar, se realizó una depuración manual para eliminar los puntos que, aunque fueron clasificados como “Terreno”, correspondían a elementos ajenos como viviendas o postes. Esta depuración se basó en una revisión visual detallada para asegurar una correcta identificación de la superficie del terreno.
- Posteriormente, con esta depuración se obtuvo la nube de puntos densa clasificada, en la cual aquellos puntos marcados como “Terreno” fueron utilizados para generar el Modelo Digital de Elevaciones, obteniendo un MDT preliminar. Este modelo fue exportado al software QGIS, donde se generaron las curvas de nivel cada 1 m de separación.
- En lo que sigue, se evaluó si dichas curvas representaban correctamente las características del terreno montañoso, verificando su coherencia y continuidad. Si las curvas de nivel presentaban coherencia con la morfología del terreno real, se consideraba que el radio de erosión empleado era el adecuado. Caso contrario, se repetía el proceso con un radio mayor (0.75 m o 1 m), hasta obtener una superficie que reflejara correctamente solo el relieve y no otras estructuras ajenas al terreno.

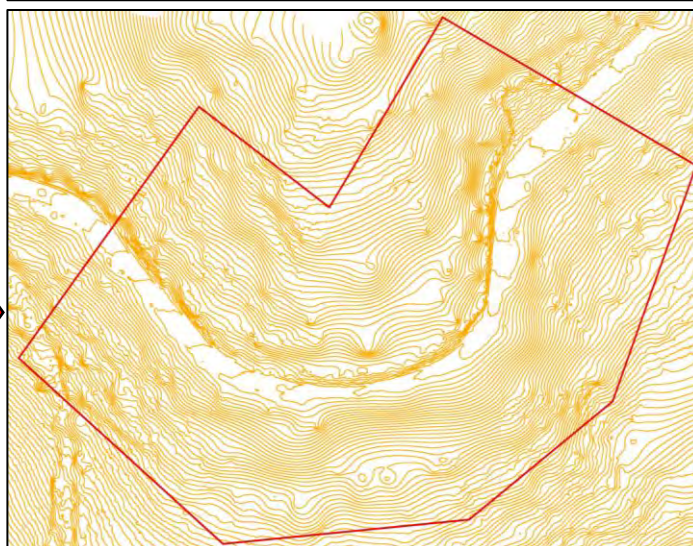
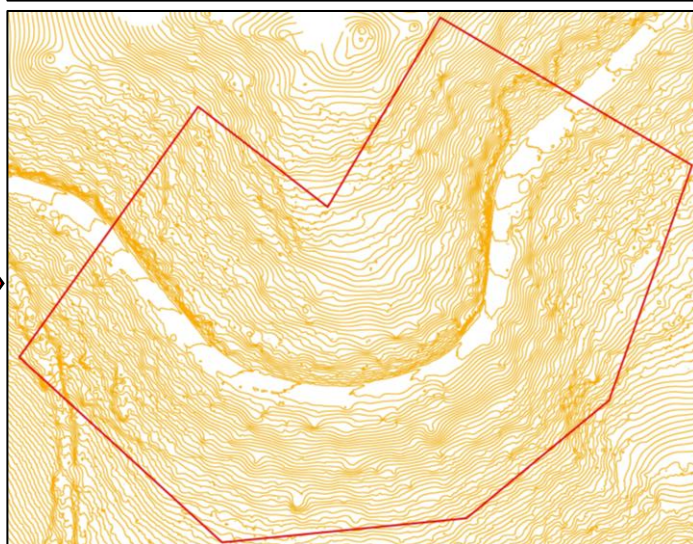
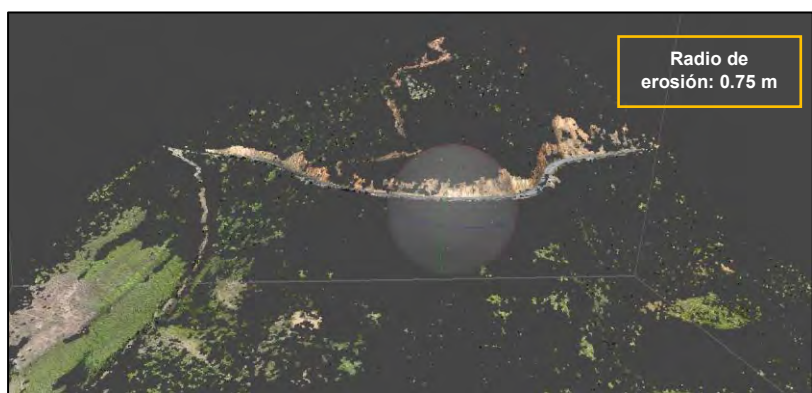
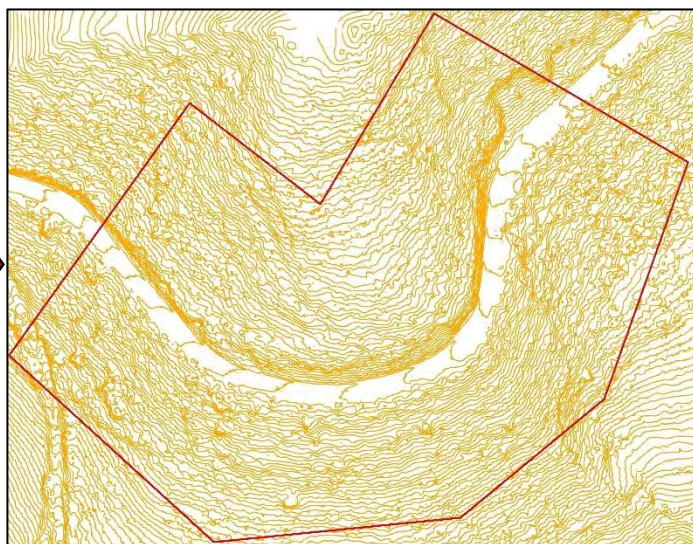
A continuación, se presenta la evaluación de 3 áreas de vuelo, las cuales sirven como casos representativos para analizar los radios de erosión de 0.5 m, 0.75 m y 1 m:

Figura 45. Evaluación del MDT en función a sus curvas de nivel del AV-03.



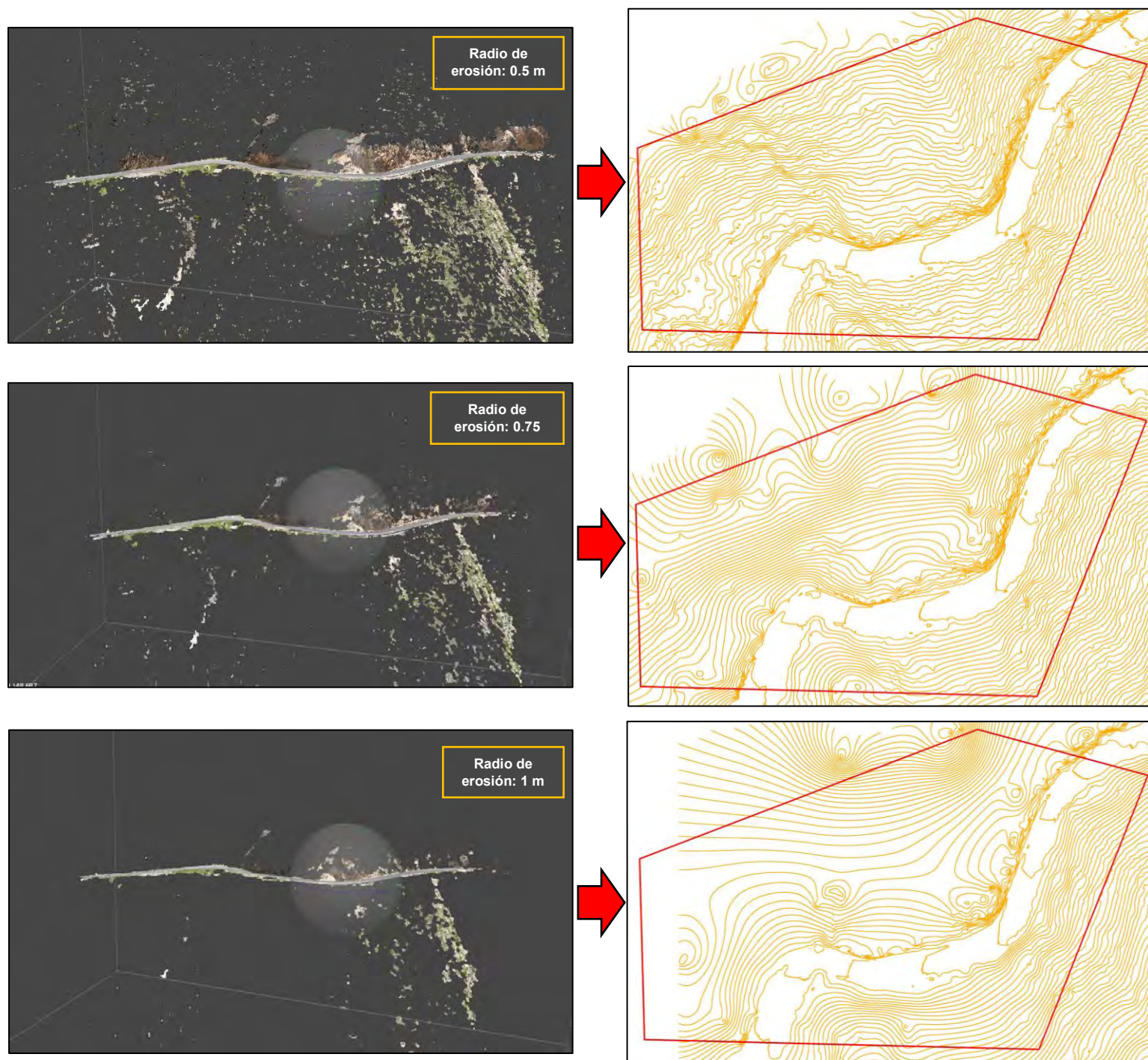
Nota. Elaboración propia.

Figura 46. Evaluación del MDT en función a sus curvas de nivel del AV-06.



Nota. Elaboración propia.

Figura 47. Evaluación del MDT en función a sus curvas de nivel del AV-11.

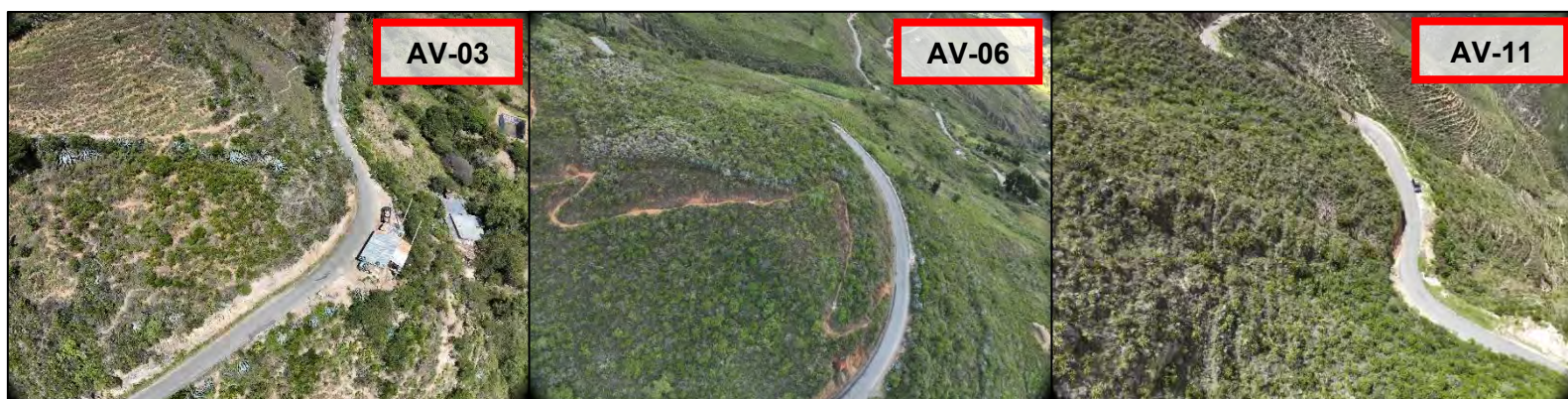


Nota. Elaboración propia.

- En el AV-03 (Figura 45), el uso de un radio de erosión de 0.5 m permitió obtener una alta densidad de puntos, aunque las curvas de nivel presentaron irregularidades debido a la permanencia de elementos no pertenecientes al terreno. Al incrementar el radio a 0.75 m, se logró un mejor suavizado de las curvas. Finalmente, con un radio de 1 m, la representación se optimizó aún más, en donde se obtuvo una superficie más continua y depurada, sin pérdida significativa de puntos del terreno.
- En el AV-06 (Figura 46), el radio de 0.5 m resultó insuficiente para eliminar todos los elementos ajenos al terreno, generando fluctuaciones en las curvas. Con 0.75 m, se mejoró la representación topográfica, logrando una superficie más suavizada. No obstante, al aumentar a 1 m, se eliminaron puntos del terreno en ciertas zonas, provocando una generalización excesiva y pérdida de precisión en las curvas de nivel.
- En el AV-11 (Figura 47), el radio de 0.5 m conservó adecuadamente la morfología del terreno, reflejada en curvas de nivel precisas. Sin embargo, radios mayores (0.75 m y 1 m) eliminaron demasiados puntos representativos, generando una superficie excesivamente generalizada.

En conclusión, los resultados indicaron que, en zonas con vegetación densa, como áreas con árboles altos o vegetación agrupada, el radio de 1 m eliminaba excesivos puntos del terreno, reduciendo la precisión del modelo, por lo que el valor óptimo fue de 0.5 m. En áreas con vegetación de densidad media, el radio de 0.75 m ofreció mejores resultados. Finalmente, en zonas con vegetación dispersa y suelo visible, el radio de 1 m resultó ser el más adecuado, permitiendo una clasificación más precisa del terreno.

Figura 48. *Vistas aéreas de las zonas de vuelo AV-03, AV-06 y AV-11.*



Nota. Elaboración propia.

Tras obtener la ortofoto y el MDT de cada área de vuelo, se generó su respectivo informe de procesamiento. Estos informes detallan los resultados obtenidos de cada proceso, los cuales incluyen las precisiones obtenidas de los PAF, los GSD resultantes, los parámetros aplicados en cada proceso, entre otros.

Tabla 37. *Valores de los GSD resultantes de los procesamientos fotogramétricos.*

N°	Áreas de procesamiento	GSD (cm/pix)
1	AV-02	1.73
2	AV-03	2.12
3	AV-5.1	1.80
4	AV-06	2.00
5	AV-07	2.22
6	AV-08	1.63
7	AV-09-10	2.95
8	AV-11	1.13
9	AV-12	1.16
10	AV-13-14	1.30

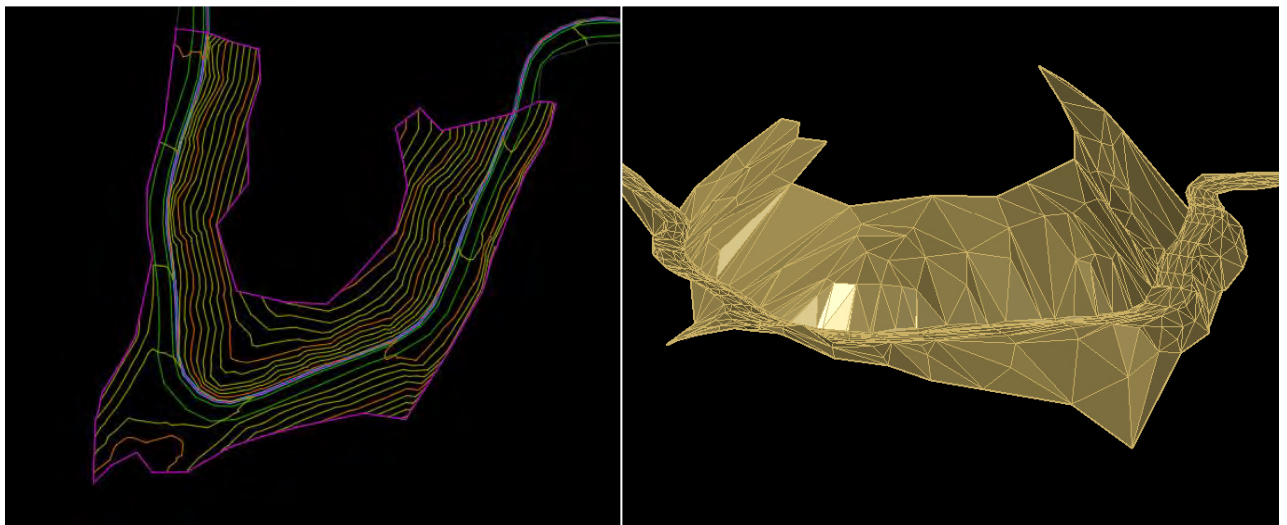
Nota. Elaboración propia.

- **Generación de la superficie topográfica:** Tras el procesamiento fotogramétrico, se generaron las superficies de cada sector empleando los datos obtenidos con estación total y con RPAS.

- **Generación de superficies medidas con estación total:**

Durante la recolección de información, se obtuvieron los puntos levantados con estación total en coordenadas topográficas. Estos fueron importados al Civil 3D, donde se generaron y triangularon las superficies de cada sector, logrando una representación precisa de las variaciones y características topográficas del terreno.

Figura 49. Superficie del SM-08 con estación total.

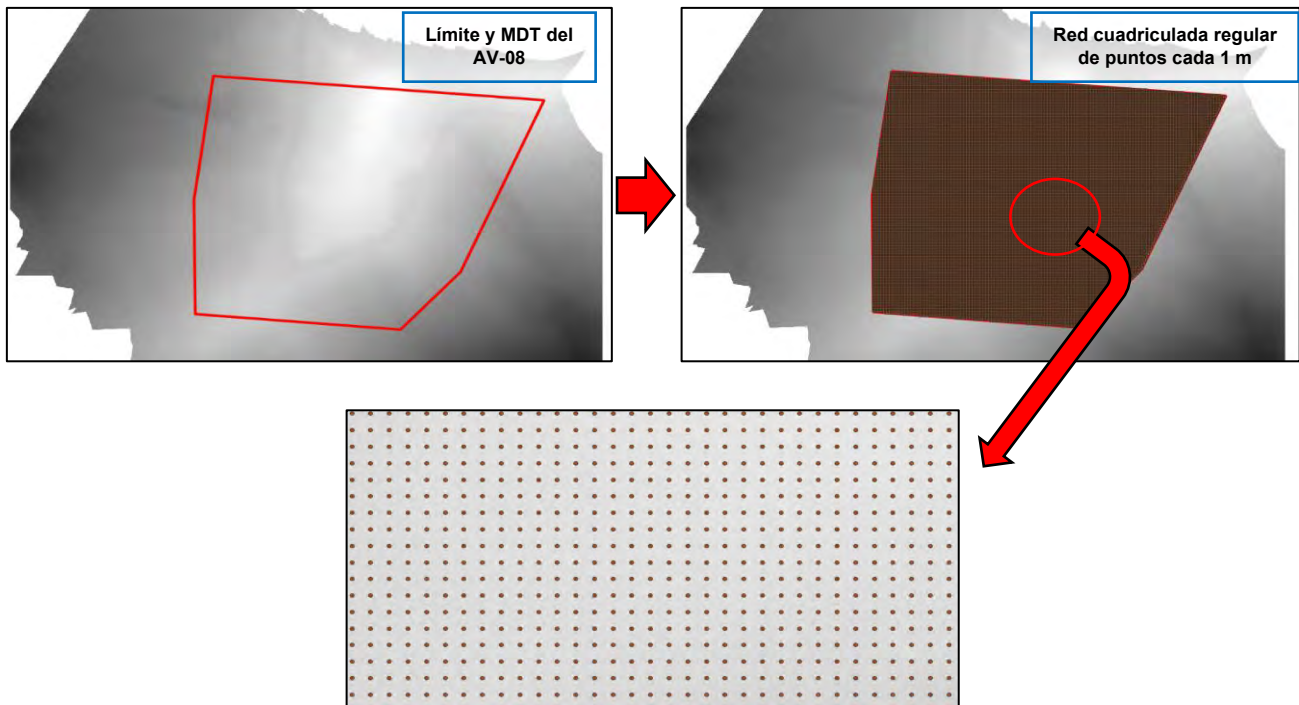


Nota. Elaboración propia.

- **Generación de superficies medidos con RPAS:**

Para corregir posibles irregularidades en el MDT, se exportaron los modelos de elevación digital al QGIS y se generó una red cuadriculada regular de puntos separados cada 1 m dentro de cada área de vuelo. Esta malla mejoró la representación topográfica y redujo la alta densidad de puntos del dron, optimizando así la precisión en el cálculo de volúmenes.

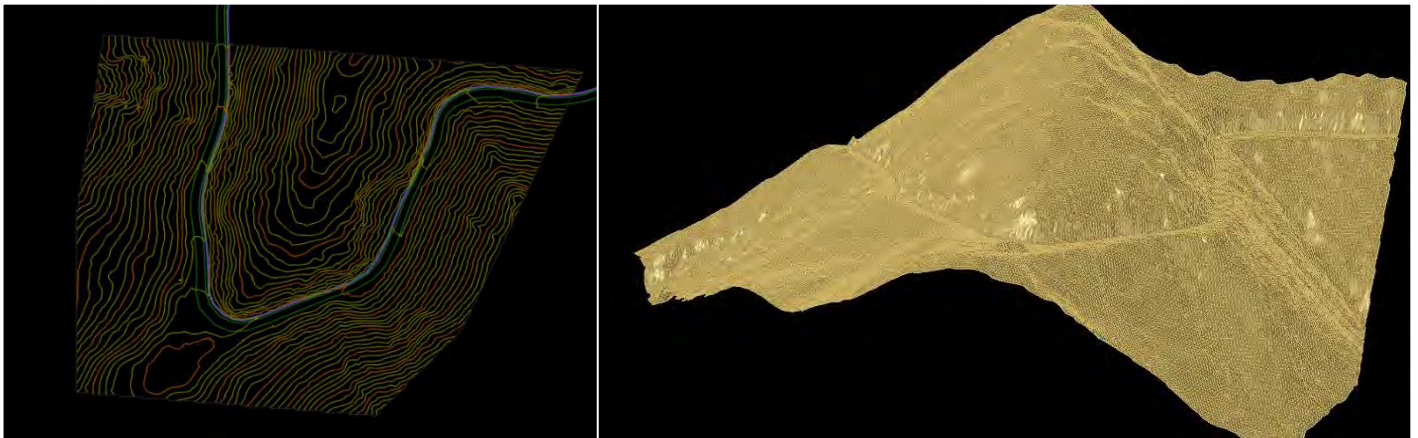
Figura 50. Generación de la red cuadriculada de puntos del AV-08.



Nota. Elaboración propia.

Posteriormente, se extrajo la cota del MDT para cada punto de la cuadrícula, calculando sus coordenadas este y norte. Estos datos se exportaron al Civil 3D para generar la superficie por área de vuelo, todas en el sistema de coordenadas topográficas.

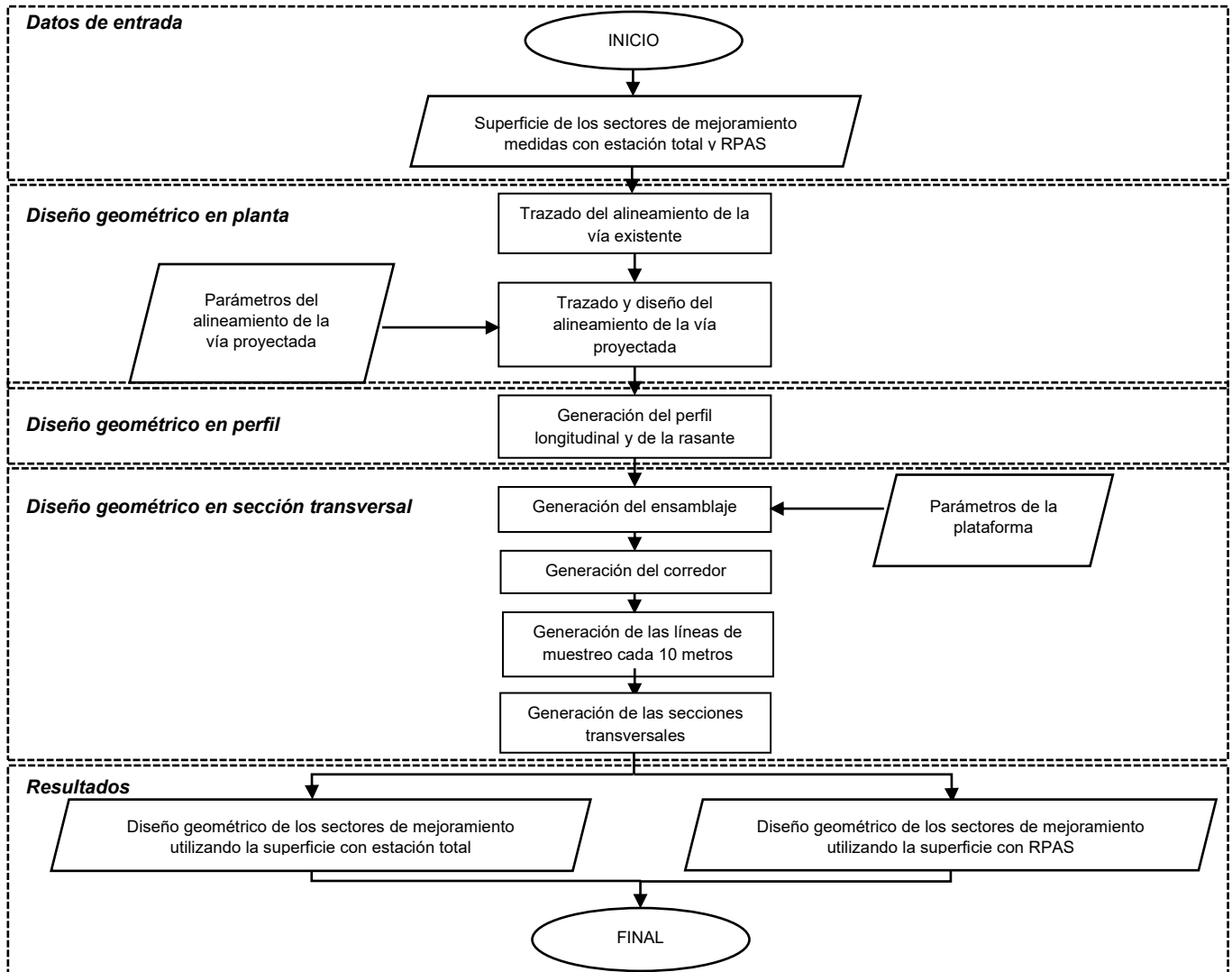
Figura 51. Superficie del AV-08 con RPAS.



Nota. Elaboración propia.

- **Diseño geométrico de los sectores de mejoramiento:** Con las superficies obtenidas mediante la estación total y el RPAS, se desarrolló el diseño geométrico de cada sector, según el diagrama de flujo siguiente:

Figura 52. Diagrama de flujo del diseño geométrico de los sectores de mejoramiento.



Nota. Elaboración propia.

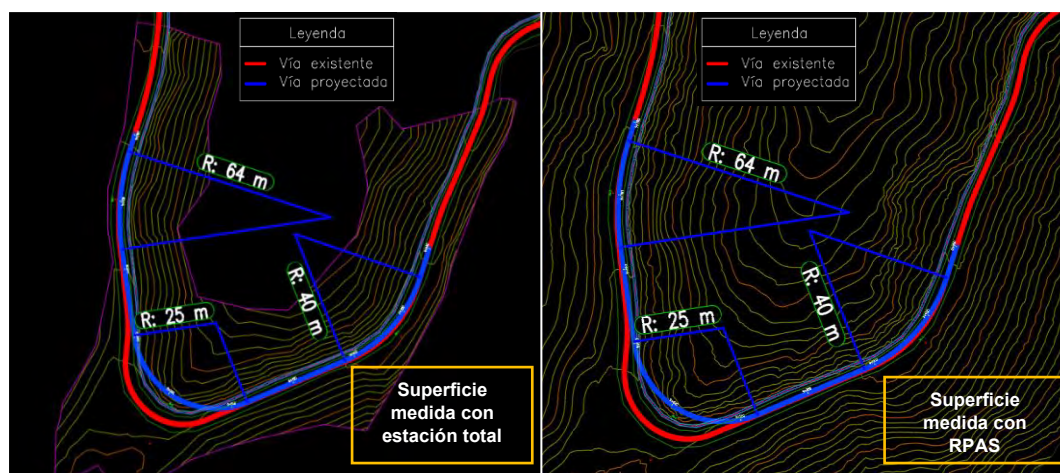
Como datos de entrada, se utilizaron las superficies medidas con estación total y RPAS. Para cada sector de mejoramiento, se desarrolló un diseño específico, iniciando con el diseño en planta. Primero se trazó el alineamiento de la vía existente y, posteriormente, el de la vía proyectada, en función a una serie de parámetros que se indican a continuación:

Tabla 38. Valores de los parámetros del diseño de la vía proyectada en planta.

Sector	Parámetros de diseño	Cantidad de curvas del alineamiento proyectado				
		Curva 01	Curva 02	Curva 03	Curva 04	Curva 05
SM-02	Radio de curva (m)	40.79	45.00	-	-	-
	Peralte (%)	5.17	-5.00	-	-	-
	Sobreebanco (m)	0.00	0.70	-	-	-
SM-03	Radio de curva (m)	35.00	-	-	-	-
	Peralte (%)	-5.45	-	-	-	-
	Sobreebanco (m)	0.80	-	-	-	-
SM-05.1	Radio de curva (m)	49.62	25.00	-	-	-
	Peralte (%)	-4.82	-5.89	-	-	-
	Sobreebanco (m)	0.50	0.80	-	-	-
SM-06	Radio de curva (m)	75.00	45.00	29.64	-	-
	Peralte (%)	-4.14	-5.00	5.72	-	-
	Sobreebanco (m)	0.50	0.80	0.00	-	-
SM-07	Radio de curva (m)	35.00	-	-	-	-
	Peralte (%)	-5.45	-	-	-	-
	Sobreebanco (m)	0.80	-	-	-	-
SM-08	Radio de curva (m)	64.00	25.00	40.00	-	-
	Peralte (%)	-3.00	-3.93	-3.54	-	-
	Sobreebanco (m)	0.60	1.20	0.70	-	-
SM-09	Radio de curva (m)	35.00	-	-	-	-
	Peralte (%)	-5.45	-	-	-	-
	Sobreebanco (m)	0.80	-	-	-	-
SM-10	Radio de curva (m)	30.00	-	-	-	-
	Peralte (%)	-5.20	-	-	-	-
	Sobreebanco (m)	1.00	-	-	-	-
SM-11	Radio de curva (m)	40.00	34.27	-	-	-
	Peralte (%)	-5.20	5.49	-	-	-
	Sobreebanco (m)	0.70	0.00	-	-	-
SM-12	Radio de curva (m)	60.00	55.00	60.00	-	-
	Peralte (%)	5.09	-5.00	5.13	-	-
	Sobreebanco (m)	0.00	0.70	0.00	-	-
SM-13	Radio de curva (m)	30.00	70.00	30.00	20.00	25.00
	Peralte (%)	-5.97	4.33	-5.86	5.81	-6.00
	Sobreebanco (m)	1.00	0.00	1.00	0.50	1.00
SM-14	Radio de curva (m)	20.00	50.00	-	-	-
	Peralte (%)	-6.00	-5.43	-	-	-
	Sobreebanco (m)	1.40	0.60	-	-	-

Nota. Elaboración propia.

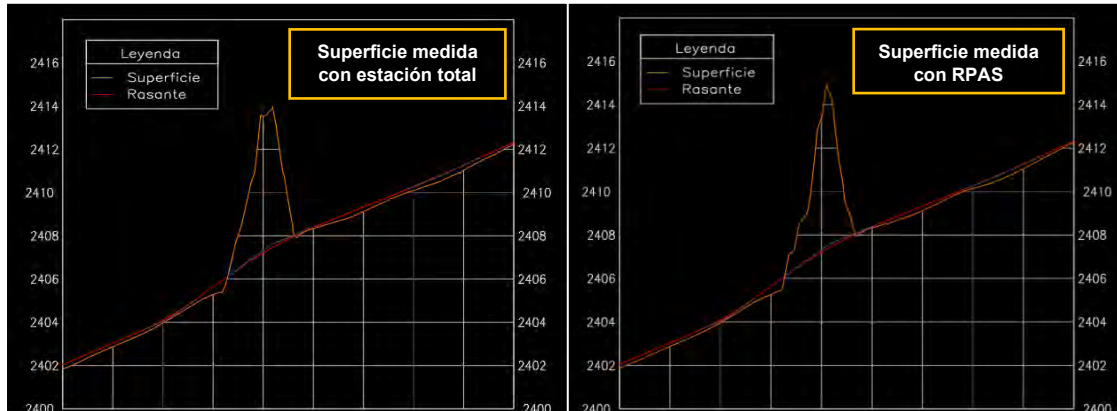
Figura 53. Vía existente y proyectada del SM-08 con estación total y RPAS.



Nota. Elaboración propia.

Seguidamente, se generó el perfil longitudinal de cada alineamiento proyectado (diseño en perfil), con el objetivo de trazar la rasante por donde se va a proyectar la ampliación de la vía.

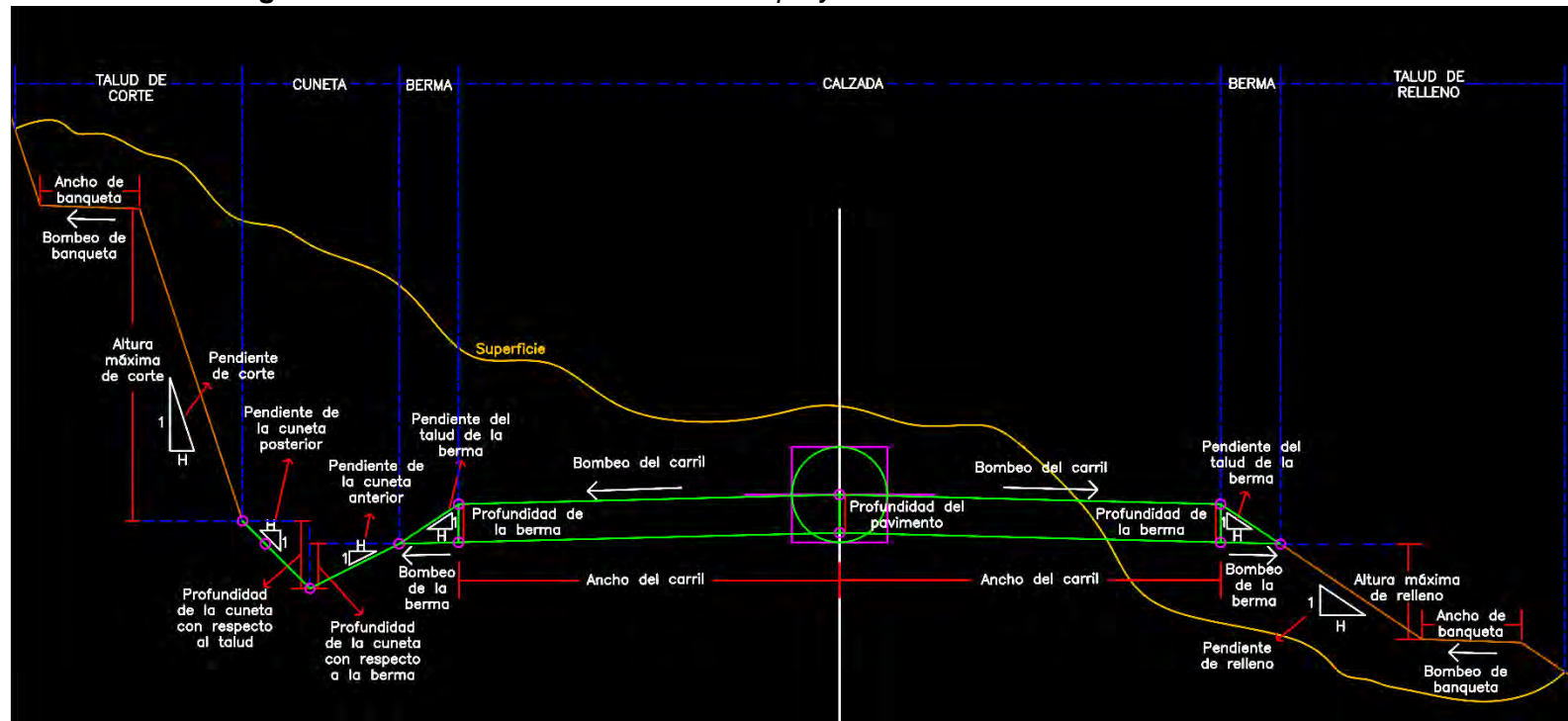
Figura 54. Perfil longitudinal de la vía proyectada del SM-08 con estación total y RPAS.



Nota. Elaboración propia.

Luego, se diseñó el ensamblaje de la plataforma (sección transversal), utilizando los parámetros indicados en la imagen siguiente:

Figura 55. Sección transversal de la vía proyectada.



Nota. Elaboración propia.

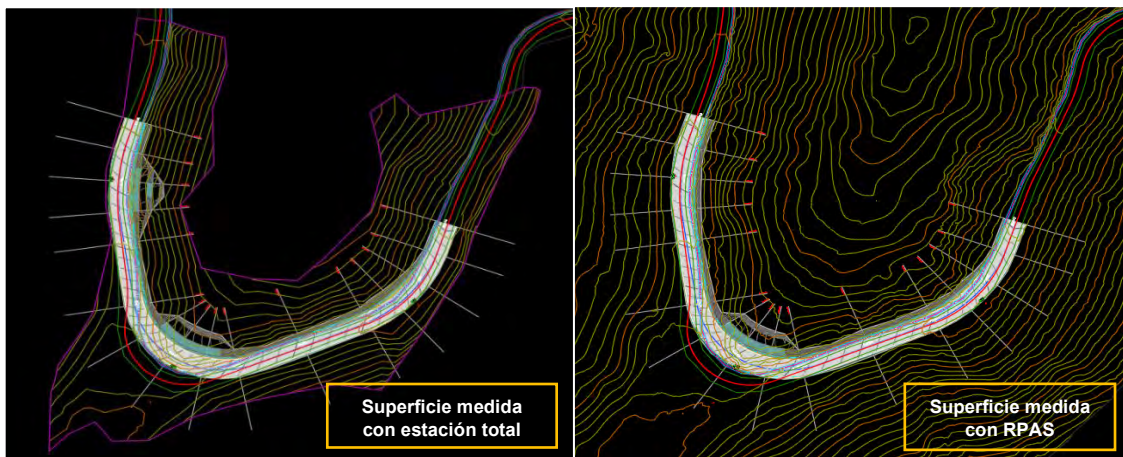
Tabla 39. Valores de los parámetros del diseño del ensamblaje.

Sector	Progresiva		Carril derecho e izquierdo			Berma derecha e izquierda				Cuneta derecha e izquierda				Talud					
	Inicio	Fin	Ancho del carril (m)	Profundidad del pavimento (m)	Bombeo del carril (%)	Ancho de la berma (m)	Profundidad de la berma (m)	Bombeo de la berma (%)	Pendiente del talud de la berma (H:V)	Pendiente de la cuneta anterior (H:V)	Pendiente de la cuneta posterior (H:V)	Profundidad de la cuneta con respecto a la berma (m)	Profundidad de la cuneta con respecto al talud (m)	Máxima altura de corte (m)	Máxima altura de relleno (m)	Pendiente de corte (H:V)	Pendiente de relleno (H:V)	Ancho de banqueteta (m)	Bombeo de banqueteta (%)
SM-02	4+190	4+290	2.000	0.200	-2.500	0.000	0.200	-2.500	1.50:1	2.00:1	1.00:1	0.234	0.354	7.000	3.000	0.33:1	1.50:1	2.000	3.000
SM-03	4+430	4+535	2.000	0.200	-2.500	0.000	0.200	-2.500	1.50:1	2.00:1	1.00:1	0.234	0.354	5.000	3.000	0.33:1	1.50:1	2.000	3.000
SM-05.1	8+450	8+560	2.000	0.200	-2.500	0.000	0.200	-2.500	1.50:1	2.00:1	1.00:1	0.234	0.354	8.500	3.000	0.33:1	1.50:1	3.000	3.000
SM-06	8+910	9+030	2.000	0.200	-2.500	0.000	0.200	-2.500	1.50:1	2.00:1	1.00:1	0.234	0.354	8.000	3.000	0.33:1	1.50:1	2.000	3.000
SM-07	9+220	9+303	2.000	0.200	-2.500	0.000	0.200	-2.500	1.50:1	2.00:1	1.00:1	0.129	0.339	-	-	0.33:1	1.50:1	-	-
SM-08	9+760	9+820	2.000	0.200	-2.500	0.000	0.200	-2.500	1.50:1	2.00:1	1.00:1	0.234	0.354	5.000	3.000	0.33:1	1.50:1	2.000	3.000
	9+820	9+940	2.000	0.200	-2.500	0.000	0.200	-2.500	1.50:1	2.00:1	0.50:1	0.234	0.634	7.000	3.000	0.33:1	1.50:1	3.000	3.000
SM-09	10+340	10+410	2.000	0.200	-2.500	0.000	0.200	-2.500	1.50:1	2.00:1	1.00:1	0.129	0.339	-	-	0.25:1	1.50:1	-	-
SM-10	10+440	10+530	2.000	0.200	-2.500	0.000	0.200	-2.500	1.50:1	2.00:1	1.00:1	0.234	0.354	8.000	3.000	0.25:1	1.50:1	3.000	3.000
SM-11	11+195	11+280	2.000	0.200	-2.500	0.000	0.200	-2.500	1.50:1	2.00:1	1.00:1	0.234	0.354	7.000	3.000	0.33:1	1.50:1	3.000	3.000
SM-12	11+470	11+485	2.000	0.200	-2.500	0.000	0.200	-2.500	1.50:1	2.00:1	1.00:1	0.234	0.354	7.000	3.000	0.33:1	1.50:1	2.000	3.000
	11+485	11+555	2.000	0.200	-2.500	0.000	0.200	-2.500	1.50:1	2.00:1	0.50:1	0.234	0.634	7.000	3.000	0.33:1	1.50:1	2.000	3.000
	11+555	11+600	2.000	0.200	-2.500	0.000	0.200	-2.500	1.50:1	2.00:1	1.00:1	0.234	0.354	7.000	3.000	0.33:1	1.50:1	2.000	3.000
SM-13	11+860	12+070	2.000	0.200	-2.500	0.000	0.200	-2.500	1.50:1	2.00:1	1.00:1	0.234	0.354	8.000	3.000	0.33:1	1.50:1	3.000	3.000
SM-14	12+990	13+005	2.000	0.200	-2.500	0.000	0.200	-2.500	1.50:1	2.00:1	1.00:1	0.234	0.354	8.500	3.000	0.33:1	1.50:1	2.000	3.000
	13+005	13+065	2.000	0.200	-2.500	0.000	0.200	-2.500	1.50:1	2.00:1	1.00:1	0.234	0.354	8.500	3.000	0.33:1	1.50:1	3.000	3.000
	13+065	13+100	2.000	0.200	-2.500	0.000	0.200	-2.500	1.50:1	2.00:1	1.00:1	0.234	0.354	8.500	3.000	0.33:1	1.50:1	2.000	3.000

Nota. Elaboración propia.

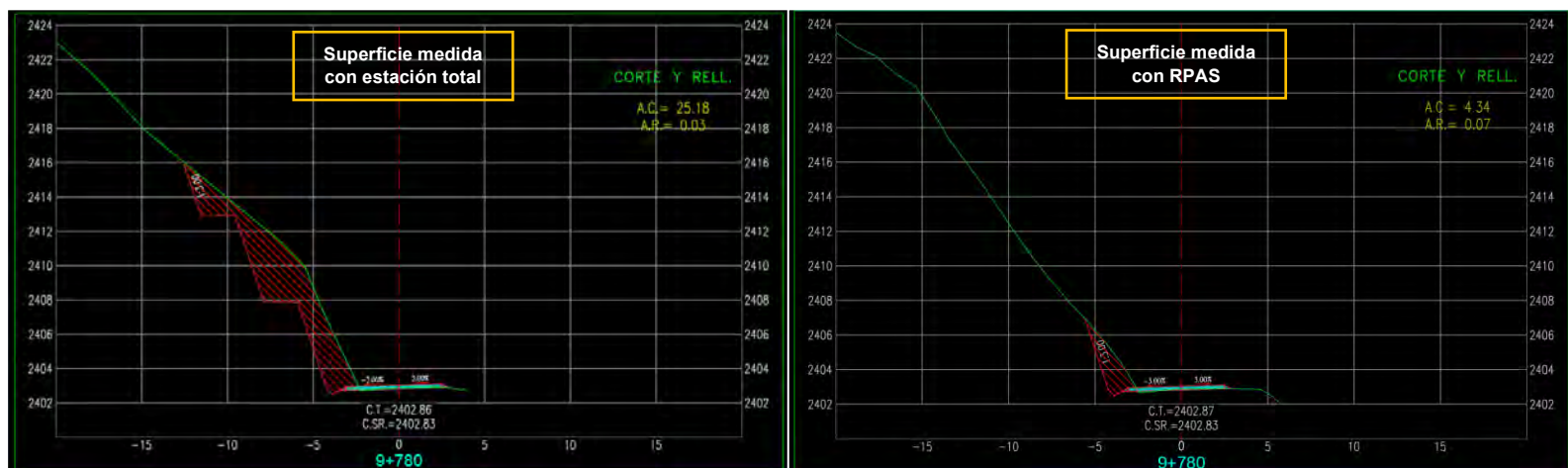
La Tabla 39 presenta los valores de los parámetros del diseño del ensamblaje aplicados en cada sector, definidos según las especificaciones del perfil de inversión. Finalmente, se generó el corredor vial proyectado para obtener la superficie de diseño, con líneas de muestreo cada 10 m para generar las secciones transversales y calcular los volúmenes de movimiento de tierra por sector. El diseño consideró una velocidad de 30 km/h y un ancho mínimo de 4 m, clasificado como trocha carrozable.

Figura 56. Corredor y líneas de muestro de la vía proyectada del SM-08 con estación total y RPAS.



Nota. Elaboración propia.

Figura 57. Sección transversal de la progresiva 9+780 del SM-08 con estación total y RPAS.



Nota. Elaboración propia.

Figura 58. Sección transversal de la progresiva 9+840 del SM-08 con estación total y RPAS.



Nota. Elaboración propia.

En la Figura 57 se observa una discrepancia entre la superficie medida con estación total y RPAS, lo que resulta en la generación de banquetas solo en la primera superficie. En cambio, en la Figura 58, ambas superficies muestran similitudes en la creación de banquetas.

- **Generación del metrado de movimiento de tierra:** Finalizado el diseño geométrico, se exportó el reporte de volúmenes para cada sector, considerando tanto la superficie obtenida con estación total como con el RPAS. Este reporte presentó información de las áreas de corte y relleno por sección transversal, las cuales se integraron en un metrado para calcular los volúmenes mediante el método de áreas medias (Ecuación 20) cuando ambas áreas eran mayores a 0, y mediante la Ecuación 21 cuando una de ellas tendía a 0.

Los volúmenes de corte se clasificaron en material suelto, roca suelta y roca fija, con porcentajes de cada material obtenidos del perfil de inversión del proyecto de mejoramiento. Por otro lado, los volúmenes de relleno se dividieron en relleno propio y de préstamo, permitiendo así determinar la cantidad de material excedente a eliminar.

A continuación, se muestra el metrado de movimiento de tierra del SM-08 con la superficie medida con estación total y

RPAS:

Tabla 40. *Metrado de movimiento de tierra del SM-08 con estación total.*

Progresiva	Áreas (m ²)		Distancia (m)	VOLUMEN DE CORTE (m ³)				% de Explanaciones			VOLUMEN DE RELLENO (m ³)			
	Corte	Relleno		Corte total	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Relleno total	Relleno propio	Relleno préstamo	Eliminación de material
9+760	2.80	0.04						50%	30%	20%				
9+770	2.36	0.07	10.00	25.80	12.90	7.74	5.16	50%	30%	20%	0.55	0.55		25.25
9+780	25.18	0.03	10.00	137.70	68.85	41.31	27.54	50%	30%	20%	0.50	0.50		137.20
9+790	13.35	0.16	10.00	192.65	96.33	57.80	38.53	50%	30%	20%	0.95	0.95		191.70
9+800	1.25	0.06	10.00	73.00	29.20	29.20	14.60	40%	40%	20%	1.10	1.10		71.90
9+820	4.72	0.44	20.00	59.70	23.88	23.88	11.94	40%	40%	20%	5.00	5.00		54.70
9+830	30.25	0.49	10.00	174.85	69.94	69.94	34.97	40%	40%	20%	4.65	4.65		170.20
9+840	88.21		10.00	592.30	236.92	236.92	118.46	40%	40%	20%	1.23	1.23		591.08
9+850	57.00		10.00	726.05	290.42	290.42	145.21	40%	40%	20%				726.05
9+860	8.56		10.00	327.80	131.12	131.12	65.56	40%	40%	20%				327.80
9+880	1.45	0.24	20.00	100.10	40.04	40.04	20.02	40%	40%	20%	1.20	1.20		98.90
9+900	3.98	0.07	20.00	54.30	21.72	21.72	10.86	40%	40%	20%	3.10	3.10		51.20
9+910	6.73	0.23	10.00	53.55	26.78	16.07	10.71	50%	30%	20%	1.50	1.50		52.05
9+920	3.27	0.12	10.00	50.00	25.00	15.00	10.00	50%	30%	20%	1.75	1.75		48.25
9+930	0.88		10.00	20.75	10.38	6.23	4.15	50%	30%	20%	0.30	0.30		20.45
9+940	1.00		10.00	9.40	4.70	2.82	1.88	50%	30%	20%				9.40

Nota. Elaboración propia.

Tabla 41. Metrado de movimiento de tierra del SM-08 con RPAS.

Progresiva	Áreas (m ²)		Distancia (m)	VOLUMEN DE CORTE (m ³)				% de Explanaciones			VOLUMEN DE RELLENO (m ³)			
	Corte	Relleno		Corte total	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Relleno total	Relleno propio	Relleno préstamo	Eliminación de material
9+760	4.54	0.09						50%	30%	20%				
9+770	3.45	0.09	10.00	39.95	19.98	11.99	7.99	50%	30%	20%	0.90	0.90		39.05
9+780	4.34	0.07	10.00	38.95	19.48	11.69	7.79	50%	30%	20%	0.80	0.80		38.15
9+790	4.53	0.03	10.00	44.35	22.18	13.31	8.87	50%	30%	20%	0.50	0.50		43.85
9+800	1.54	0.04	10.00	30.35	12.14	12.14	6.07	40%	40%	20%	0.35	0.35		30.00
9+820	5.75	0.48	20.00	72.90	29.16	29.16	14.58	40%	40%	20%	5.20	5.20		67.70
9+830	34.90	0.40	10.00	203.25	81.30	81.30	40.65	40%	40%	20%	4.40	4.40		198.85
9+840	90.16		10.00	625.30	250.12	250.12	125.06	40%	40%	20%	1.00	1.00		624.30
9+850	54.76		10.00	724.60	289.84	289.84	144.92	40%	40%	20%				724.60
9+860	7.71	0.01	10.00	312.35	124.94	124.94	62.47	40%	40%	20%	0.03	0.03		312.33
9+880	6.36	0.24	20.00	140.70	56.28	56.28	28.14	40%	40%	20%	2.50	2.50		138.20
9+900	4.28		20.00	106.40	42.56	42.56	21.28	40%	40%	20%	1.20	1.20		105.20
9+910	4.53	0.09	10.00	44.05	22.03	13.22	8.81	50%	30%	20%	0.23	0.23		43.83
9+920	2.30	0.20	10.00	34.15	17.08	10.25	6.83	50%	30%	20%	1.45	1.45		32.70
9+930	0.58		10.00	14.40	7.20	4.32	2.88	50%	30%	20%	0.50	0.50		13.90
9+940	1.13		10.00	8.55	4.28	2.57	1.71	50%	30%	20%				8.55

Nota. Elaboración propia.

Los metrados de los sectores restantes se presentan en los anexos de la investigación.

A continuación, se presenta el resumen del metrado de movimiento de tierra de los sectores de mejoramiento con estación total y RPAS:

Tabla 42. Resumen del metrado de movimiento de tierra de los sectores de mejoramiento con estación total.

Número	Tramo de estudio	Sector de mejoramiento	Progresiva inicial	Progresiva final	Longitud (m)	VOLUMEN DE CORTE (m ³)				VOLUMEN DE RELLENO (m ³)			
						Corte total	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Relleno total	Relleno propio	Relleno préstamo	Eliminación de material
1	Tramo 9	2	4+190	4+290	100.00	1274.35	509.74	382.31	382.31	13.80	13.80	-	1260.55
2	Tramo 9	3	4+430	4+535	105.00	2954.83	1181.93	886.45	886.45	9.25	9.25	-	2945.58
3	Tramo 9	5.1	8+450	8+560	110.00	1662.35	997.41	332.47	332.47	13.05	13.05	-	1649.30
4	Tramo 9	6	8+910	9+030	120.00	793.20	475.92	237.96	79.32	6.73	6.73	-	786.48
5	Tramo 9	7	9+220	9+303	83.00	222.05	133.23	66.61	22.20	3.26	3.26	-	218.78
6	Tramo 9	8	9+760	9+940	180.00	2597.95	1088.17	990.20	519.59	21.83	21.83	-	2576.13
7	Tramo 9	9	10+340	10+410	70.00	433.70	216.85	173.48	43.37	8.95	7.28	1.68	424.75
8	Tramo 9	10	10+440	10+530	90.00	1508.80	754.40	603.52	150.88	15.05	14.95	0.10	1493.75
9	Tramo 9	11	11+195	11+280	85.00	978.15	489.08	391.26	97.82	30.88	30.88	-	947.28
10	Tramo 9	12	11+470	11+600	130.00	936.30	374.52	280.89	280.89	14.08	12.18	1.90	922.23
11	Tramo 9	13	11+860	12+070	210.00	3345.50	1672.75	1338.20	334.55	42.50	42.50	-	3303.00
12	Tramo 9	14	12+990	13+100	110.00	2965.45	889.64	889.64	1186.18	13.73	13.73	-	2951.73
				Total	1,393.00	19,672.62	8,783.62	6,572.98	4,316.02	193.09	189.41	3.68	19,479.53

Nota. Elaboración propia.

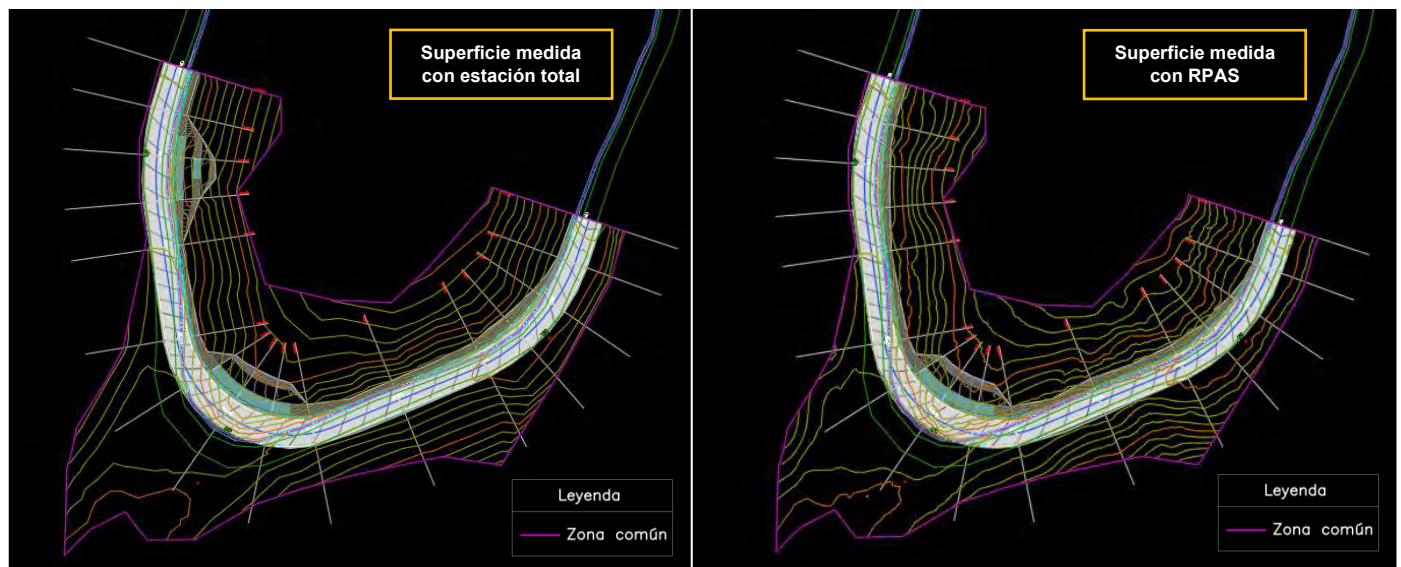
Tabla 43. Resumen del metrado de movimiento de tierra de los sectores de mejoramiento con RPAS.

Número	Tramo de estudio	Sector de mejoramiento	Progresiva inicial	Progresiva final	Longitud (m)	VOLUMEN DE CORTE (m³)				VOLUMEN DE RELLENO (m³)			
						Corte total	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Relleno total	Relleno propio	Relleno préstamo	Eliminación de material
1	Tramo 9	2	4+190	4+290	100.00	896.05	358.42	268.82	268.82	6.33	5.59	0.74	889.73
2	Tramo 9	3	4+430	4+535	105.00	2743.88	1097.55	823.16	823.16	7.70	7.70	-	2736.18
3	Tramo 9	5.1	8+450	8+560	110.00	1758.60	1055.16	351.72	351.72	7.33	7.33	-	1751.28
4	Tramo 9	6	8+910	9+030	120.00	936.05	561.63	280.82	93.61	6.50	6.50	-	929.55
5	Tramo 9	7	9+220	9+303	83.00	235.87	141.52	70.76	23.59	4.01	3.96	0.05	231.87
6	Tramo 9	8	9+760	9+940	180.00	2440.25	998.54	953.66	488.05	19.05	19.05	-	2421.20
7	Tramo 9	9	10+340	10+410	70.00	399.20	199.60	159.68	39.92	9.23	8.08	1.15	389.98
8	Tramo 9	10	10+440	10+530	90.00	1514.10	757.05	605.64	151.41	11.25	11.25	-	1502.85
9	Tramo 9	11	11+195	11+280	85.00	922.35	461.18	368.94	92.24	33.33	32.43	0.90	889.03
10	Tramo 9	12	11+470	11+600	130.00	821.85	328.74	246.56	246.56	17.23	15.70	1.53	804.63
11	Tramo 9	13	11+860	12+070	210.00	2882.05	1441.03	1152.82	288.21	28.83	28.83	-	2853.23
12	Tramo 9	14	12+990	13+100	110.00	3430.50	1029.15	1029.15	1372.20	8.53	8.53	-	3421.98
				Total	1,393.00	18,980.75	8,429.56	6,311.72	4,239.46	159.28	154.91	4.37	18,821.47

Nota. Elaboración propia.

- **Determinación de los parámetros geomorfométricos:** Para calcular los parámetros espaciales con características geométricas en cada sector de mejoramiento, se definió una zona común tanto para la superficie obtenida con la estación total como con el RPAS, cuyo ancho abarca todo el diseño geométrico, tomando como inicio y final los extremos de cada alineamiento proyectado.

Figura 59. Zona común del SM-08 con estación total y RPAS.

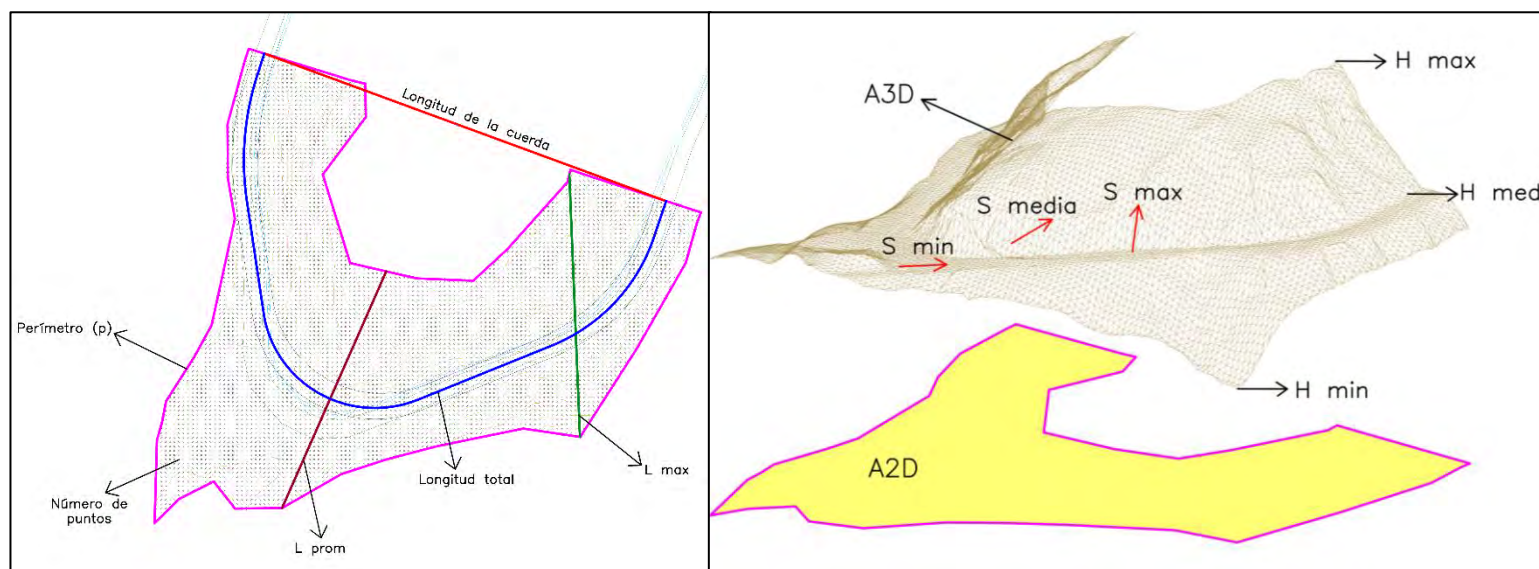


Nota. Elaboración propia.

Una vez definida el área común, se procedió a determinar los parámetros geomorfométricos de cada sector para cada una de las superficies medidas con ambos métodos de levantamiento.

Estos parámetros se presentan a continuación:

Figura 60. Parámetros geomorfométricos de la investigación.



Nota. Elaboración propia.

Tabla 44. Parámetros geomorfométricos de la investigación.

Parámetros geomorfométricos	Definición
Longitud total (m)	Es la longitud total del alineamiento proyectado
Longitud de la cuerda (m)	Es la longitud de la cuerda de la curva que genera el alineamiento proyectado
A3D (m ²)	Área de la superficie 3D
A2D (m ²)	Área de la superficie 2D
p (m)	Perímetro de la superficie
L prom (m)	Representa el ancho promedio de la zona de ladera de montaña
L max (m)	Longitud de la pendiente, el cual se midió desde el punto con cota más baja hasta el punto con cota más alta de la zona de ladera
Número de puntos	Número de puntos de la triangulación
S min (%)	Pendiente mínima en porcentaje
S max (%)	Pendiente máxima en porcentaje
S media (%)	Pendiente media en porcentaje
H min (m.s.n.m)	Elevación mínima
H max (m.s.n.m)	Elevación máxima
H med (m.s.n.m)	Elevación media

Nota. Elaboración propia.

A continuación, se presentan los valores de los parámetros geomorfométricos por cada sector tanto para la superficie medida con estación total como con el RPAS:

Tabla 45. Valores de los parámetros geomorfométricos de los sectores de mejoramiento con estación total.

SECTOR	PARÁMETROS GEOMORFOMÉTRICOS													
	Longitud total (m)	Longitud de la cuerda (m)	A3D (m2)	A2D (m2)	p (m)	L prom (m)	L max (m)	Número de puntos	S min (%)	S max (%)	S media (%)	H min (m.s.n.m)	H max (m.s.n.m)	H med (m.s.n.m)
SM-02	100	93.769	2828.66	2105.07	253.494	22.933	61.320	117	2.17	400.28	99.58	2115.724	2139.032	2125.197
SM-03	105	97.577	3630.01	2729.23	255.437	30.966	54.486	139	2.24	1181.89	117.91	2133.534	2158.548	2144.069
SM-05.1	110	84.865	6122.22	4309.66	296.199	47.886	56.185	269	2.33	3867.49	130.35	2319.832	2364.901	2346.584
SM-06	120	99.865	3625.81	2822.31	260.097	31.200	59.508	210	2.28	2488.81	89.16	2360.414	2383.832	2371.217
SM-07	83	75.886	2654.46	2048.32	192.983	33.201	34.301	132	0.40	4865.82	83.71	2378.938	2400.456	2387.186
SM-08	180	95.224	8082.15	6164.98	436.606	58.207	59.287	326	0.87	680.27	86.34	2391.137	2432.697	2412.211
SM-09	70	64.448	1557.28	1167.84	163.824	24.635	62.136	116	2.07	708.20	118.09	2429.731	2446.593	2435.777
SM-10	90	75.452	2391.63	1628.40	213.985	20.875	67.716	134	0.83	463.07	125.50	2437.136	2465.652	2445.779
SM-11	85	74.758	2154.06	1584.18	197.482	25.959	58.780	146	3.17	404.74	106.07	2468.534	2488.360	2475.067
SM-12	130	117.932	3497.61	2684.19	293.585	27.857	64.695	185	0.57	256.95	85.52	2481.540	2501.075	2489.758
SM-13	210	158.321	10088.30	7289.09	454.706	49.971	92.677	426	0.23	920.16	110.80	2494.361	2537.158	2512.906
SM-14	110	67.254	3520.83	2407.64	255.918	21.400	69.921	218	1.03	371.69	122.64	2550.517	2583.270	2567.035

Nota. Elaboración propia.

Tabla 46. Valores de los parámetros geomorfométricos de los sectores de mejoramiento con RPAS.

SECTOR	PARÁMETROS GEOMORFOMÉTRICOS													
	Longitud total (m)	Longitud de la cuerda (m)	A3D (m2)	A2D (m2)	p (m)	L prom (m)	L max (m)	Número de puntos	S min (%)	S max (%)	S media (%)	H min (m.s.n.m)	H max (m.s.n.m)	H med (m.s.n.m)
SM-02	100	93.769	2794.89	2105.07	253.494	22.933	61.320	2661	0.09	440.14	93.58	2115.452	2138.978	2124.873
SM-03	105	97.577	3684.12	2729.23	255.437	30.966	54.486	3336	0.84	484.81	96.59	2132.868	2159.178	2144.181
SM-05.1	110	84.865	6181.07	4309.66	296.199	47.886	56.185	4985	0.33	1009.87	125.90	2320.050	2364.696	2346.658
SM-06	120	99.865	3811.02	2822.31	260.097	31.200	59.508	3450	0.80	395.68	97.27	2360.439	2385.873	2372.007
SM-07	83	75.886	2676.09	2048.32	192.983	33.201	34.301	2484	0.10	327.13	86.96	2378.918	2401.335	2387.127
SM-08	180	95.224	8145.46	6164.98	436.606	58.207	59.287	7102	0.40	445.72	89.56	2390.486	2432.646	2412.172
SM-09	70	64.448	1586.64	1167.84	163.824	24.635	62.136	1538	1.35	592.69	109.66	2429.538	2446.671	2435.678
SM-10	90	75.452	2516.49	1628.40	213.985	20.875	67.716	2119	0.88	606.74	143.38	2437.160	2466.064	2445.745
SM-11	85	74.758	2185.68	1584.18	197.482	25.959	58.780	2041	0.68	628.02	111.64	2468.281	2488.721	2475.061
SM-12	130	117.932	3629.20	2684.19	293.585	27.857	64.695	3339	0.42	432.55	96.15	2480.274	2501.729	2489.635
SM-13	210	158.321	10497.94	7289.09	454.706	49.971	92.677	8287	0.00	946.83	118.92	2492.423	2537.393	2512.516
SM-14	110	67.254	3695.71	2407.64	255.918	21.400	69.921	2991	0.55	1008.67	143.03	2548.912	2583.291	2567.549

Nota. Elaboración propia.

Los parámetros geomorfométricos fueron obtenidos a partir de la superficie generada en AutoCAD Civil 3D, donde se calcularon sus valores específicos para cada superficie analizada.

4.8. Análisis estadístico:

El análisis estadístico se desarrolló con la finalidad de evaluar la precisión planimétrica y altimétrica del levantamiento fotogramétrico con RPAS, así como la precisión de los volúmenes de corte y relleno obtenida mediante la comparación entre los métodos RPAS y estación total. Asimismo, se analizó la influencia de los parámetros geomorfométricos del terreno en el cálculo del movimiento de tierras, la generación de banquetas y la evaluación costo-tiempo. Para ello, se emplearon indicadores estadísticos como el Error Cuadrático Medio (RMSE), el Error Porcentual Absoluto (APE), el Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE), la precisión relativa, la precisión global y el coeficiente de determinación (R^2), los cuales permitieron cuantificar el nivel de error, la precisión y el grado de concordancia entre ambos métodos. Asimismo, se realizaron operaciones básicas de comparación entre los resultados, tales como diferencias absolutas y relativas de volúmenes mediante operaciones aritméticas simples, lo que facilitó la identificación de discrepancias y tendencias. Las expresiones matemáticas y el procedimiento de aplicación de cada indicador estadístico se presentan y explican en el capítulo de resultados, de acuerdo con el tipo de evaluación realizada.

CAPÍTULO V

5. RESULTADOS:

5.1. Evaluación de la precisión planimétrica:

Para evaluar la precisión planimétrica, se empleó la ortofoto. En campo, se marcó un aspa con yeso y un círculo con material sedimentario de la zona alrededor de la varilla donde se midieron los puntos. El centro del círculo representaba la ubicación de los PAF y poligonales de apoyo. En la ortofoto, este punto se identificó mediante una región de píxeles, cuyo centroide se tomó como referencia para extraer las coordenadas y comparar con las medidas en campo.

Figura 61. Evaluación de la precisión planimétrica.



Nota. Elaboración propia.

Al obtener las coordenadas de los PAF a partir de la ortofoto, estas se compararon con las obtenidas en la transformación de coordenadas UTM a topográficas, lo que permitió evaluar los desfases planimétricos en los ejes “norte” y “este”. A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 47. Desfases planimétricos de los PAF.

PAF	COORDENADAS TOPOGRÁFICAS (POLIGONAL)		COORDENADAS TOPOGRÁFICAS (ORTOFOTO)		DESFASE PLANIMÉTRICO		ÁREA PROCESADA
	NORTE (m)	ESTE (m)	NORTE (m)	ESTE (m)	Δ NORTE (m)	Δ ESTE (m)	
PA34	9409927.832	677572.613	9409927.837	677572.622	0.005	0.009	AV-02
P1-SM2	9410022.384	677587.992	9410022.385	677587.992	0.001	0.000	
P2-SM2	9409994.260	677624.567	9409994.252	677624.565	-0.008	-0.003	
P3-SM2	9409927.573	677608.493	9409927.578	677608.488	0.005	-0.005	
P4-SM2	9409878.896	677600.853	9409878.898	677600.850	0.002	-0.003	
PA35	9409722.066	677643.097	9409722.062	677643.088	-0.004	-0.009	AV-03
P1-SM3	9409768.080	677667.129	9409768.072	677667.122	-0.008	-0.007	
P2-SM3	9409707.130	677683.353	9409707.138	677683.360	0.008	0.007	
P3-SM3	9409689.795	677680.734	9409689.797	677680.730	0.002	-0.004	
P4-SM3	9409817.853	677639.100	9409817.859	677639.100	0.006	-0.001	
PA46	9410184.409	678155.639	9410184.409	678155.636	0.000	-0.003	AV-5.1
P1-SM5.1	9410273.314	678195.654	9410273.302	678195.659	-0.012	0.005	
P2-SM5.1	9410175.213	678201.197	9410175.201	678201.209	-0.012	0.012	
P3-SM5.1	9410210.104	678173.780	9410210.106	678173.764	0.002	-0.015	
P4-SM5.1	9410215.930	678195.429	9410215.935	678195.433	0.005	0.005	
PA48	9409811.949	678048.137	9409811.963	678048.124	0.014	-0.013	AV-06
PA47	9409870.593	678034.470	9409870.605	678034.455	0.012	-0.016	
P1-SM6	9409928.329	678077.743	9409928.327	678077.746	-0.002	0.002	
P2-SM6	9409890.043	678059.472	9409890.043	678059.470	0.000	-0.003	
P3-SM6	9409857.895	678056.245	9409857.887	678056.255	-0.008	0.010	
P4-SM6	9409872.899	678077.585	9409872.889	678077.585	-0.010	0.000	
P5-SM6	9409780.378	678126.742	9409780.378	678126.755	0.000	0.013	
P1-SM7	9409723.087	678243.584	9409723.109	678243.581	0.022	-0.003	AV-07
P2-SM7	9409638.964	678224.411	9409638.971	678224.411	0.007	-0.001	
P3-SM7	9409589.427	678226.965	9409589.421	678226.964	-0.006	-0.002	
P5-SM7	9409682.880	678250.438	9409682.861	678250.429	-0.019	-0.009	
PA50	9409171.681	678231.695	9409171.697	678231.690	0.016	-0.005	AV-08
P1-SM8	9409230.740	678245.652	9409230.744	678245.661	0.004	0.009	
GPS05	9409092.988	678238.952	9409092.968	678238.963	-0.020	0.011	
P2-SM8	9409122.444	678313.868	9409122.439	678313.878	-0.005	0.010	
P3-SM8	9409213.926	678396.558	9409213.928	678396.547	0.002	-0.011	
P1-SM09-10	9409271.040	678648.478	9409271.053	678648.465	0.013	-0.013	AV-09-10
P2-SM09-10	9409299.892	678692.867	9409299.902	678692.875	0.010	0.008	
P3-SM09-10	9409306.558	678675.875	9409306.554	678675.884	-0.004	0.010	
P4-SM09-10	9409292.225	678659.191	9409292.233	678659.188	0.008	-0.003	
P5-SM09-10	9409314.925	678687.602	9409314.917	678687.610	-0.008	0.007	
P6-SM09-10	9409354.083	678701.836	9409354.091	678701.843	0.008	0.007	
P7-SM09-10	9409357.620	678736.159	9409357.616	678736.150	-0.004	-0.009	
P8-SM09-10	9409376.235	678765.926	9409376.230	678765.914	-0.005	-0.013	
P9-SM09-10	9409432.751	678770.485	9409432.749	678770.486	-0.002	0.001	

P1-SM11	9409836.685	679242.812	9409836.686	679242.818	0.001	0.006	AV-11
P2-SM11	9409788.486	679218.700	9409788.487	679218.704	0.001	0.005	
P3-SM11	9409775.400	679180.764	9409775.403	679180.759	0.003	-0.005	
P4-SM11	9409764.311	679149.470	9409764.295	679149.465	-0.016	-0.005	
PA53	9409836.440	679440.961	9409836.437	679440.960	-0.003	-0.001	AV-12
P1-SM12	9409817.366	679366.051	9409817.369	679366.048	0.003	-0.003	
P2-SM12	9409909.215	679469.120	9409909.208	679469.109	-0.007	-0.011	
P3-SM12	9409939.052	679482.945	9409939.061	679482.942	0.009	-0.003	
P1-SM13	9410068.971	679582.166	9410068.960	679582.156	-0.011	-0.010	AV-13-14
PA54	9410044.827	679714.649	9410044.830	679714.654	0.003	0.005	
P2-SM13	9410122.638	679709.496	9410122.644	679709.498	0.006	0.002	
P3-SM13	9410175.543	679720.952	9410175.540	679720.942	-0.003	-0.010	
PA55	9410089.866	679640.987	9410089.872	679640.983	0.006	-0.005	
P1-SM14	9410210.641	679667.846	9410210.640	679667.844	-0.001	-0.002	
P2-SM14	9410129.815	679639.945	9410129.816	679639.936	0.001	-0.009	
P3-SM14	9410185.718	679593.322	9410185.717	679593.320	-0.001	-0.001	

Nota. Elaboración propia.

Según los valores presentados en la tabla anterior, los desfases planimétricos en el eje “norte” se encuentran dentro de un rango de -0.020 m a 0.022 m, mientras que en el eje “este” oscilan entre -0.016 m a 0.013 m. Para realizar un análisis más detallado, se calculó el error cuadrático medio (RMSE) de los desfases planimétricos por cada área procesada para la dimensión “norte” y “este”, así como de manera total.

El RMSE para una dimensión se determinó de la siguiente forma:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{z}_i - z_i)^2} \quad (24)$$

Donde:

- *RMSE* : Representa el error cuadrático medio.
- $\hat{z}_i$: Son los valores medidos o predichos.
- z_i : Indican los valores reales.
- *n*: Es el número total de observaciones.

El RMSE para dos dimensiones y de manera total se calculó de la siguiente manera:

$$RMSE_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2} \quad (25)$$

$$RMSE_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (26)$$

$$RMSE_r = \sqrt{(RMSE_x)^2 + (RMSE_y)^2} \quad (27)$$

Donde:

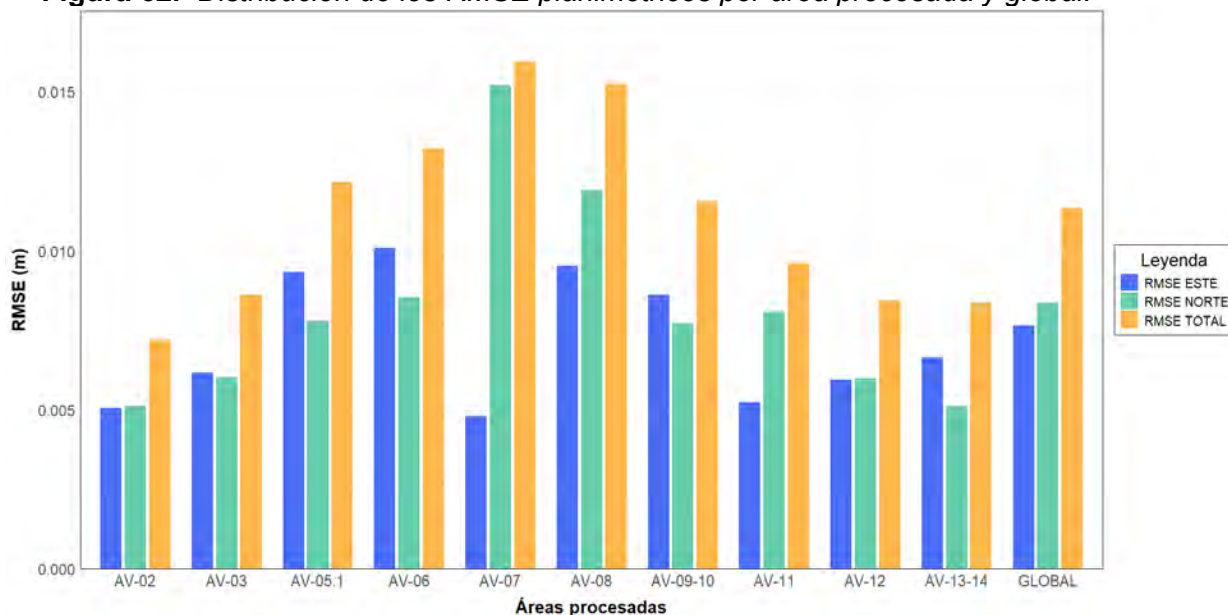
- $RMSE_r$: Representa el error cuadrático medio total
- $RMSE_x, RMSE_y$: Representan los errores cuadráticos medios en el eje “este” y “norte” respectivamente.
- $\hat{x}_i, \hat{y}_i$: Son las observaciones medidas en el eje “este” y “norte” respectivamente.
- x_i, y_i : Indican las observaciones reales en el eje “este” y “norte” respectivamente.
- n : Es el número total de observaciones.

Tabla 48. *RMSE planimétrico por área procesada y global.*

ÁREA PROCESADA	RMSE NORTE (m)	RMSE ESTE (m)	RMSE TOTAL (m)
AV-02	0.0051	0.0051	0.0072
AV-03	0.0060	0.0062	0.0086
AV-05.1	0.0078	0.0093	0.0122
AV-06	0.0085	0.0101	0.0132
AV-07	0.0152	0.0048	0.0160
AV-08	0.0119	0.0095	0.0153
AV-09-10	0.0077	0.0086	0.0116
AV-11	0.0081	0.0052	0.0096
AV-12	0.0060	0.0059	0.0084
AV-13-14	0.0051	0.0066	0.0084
GLOBAL	0.0084	0.0077	0.0113

Nota. Elaboración propia.

Figura 62. Distribución de los RMSE planimétricos por área procesada y global.



Nota. Elaboración propia.

Como muestran la tabla y figura anteriores, los desfases en el eje “norte” varían desde 0.005 m a 0.015 m, siendo el AV-07 el de mayor variación. En el eje “este”, los desfases van de 0.005 m a 0.010 m, siendo el AV-06 el de mayor diferencia. Al evaluar el RMSE en ambos ejes, se observa que el valor más bajo corresponde al AV-02 (0.007 m), y el más alto al AV-07 (0.016 m). Las áreas con precisiones milimétricas en ambos ejes fueron el AV-02, AV-03, AV-11, AV-12 y AV-13-14, mientras que los que obtuvieron precisiones centimétricas menores a 1.60 cm fueron el AV-5.1, AV-06, AV-07, AV-08 y AV-09-10. El RMSE para todas las áreas en el eje “norte” y “este” es de 0.008 m, con una precisión global de 0.011 m en ambos ejes. Este valor indica que, en promedio, las ubicaciones de los PAF obtenidos a partir de la ortofoto difieren en 1.13 cm respecto a sus posiciones reales en el terreno.

5.2. Evaluación de la precisión altimétrica:

La evaluación de la precisión altimétrica se llevó a cabo mediante la extracción de las cotas de los PAF a partir de los MDT de cada área procesada, las cuales fueron

comparadas con las cotas obtenidas en el levantamiento en campo, con el propósito de obtener los desfases altimétricos. Estos se presentan a continuación:

Tabla 49. Desfases altimétricos de los PAF.

PAF	COTA NIVELADA (m)	COTA MDT (m)	DESFASE ALTIMÉTRICO (m)	ÁREA PROCESADA
PA34	2123.592	2123.599	0.007	AV-02
P1-SM2	2116.408	2116.409	0.001	
P2-SM2	2134.334	2134.332	-0.002	
P3-SM2	2151.632	2151.641	0.009	
P4-SM2	2128.301	2128.301	0.000	
PA35	2139.084	2139.074	-0.010	AV-03
P1-SM3	2162.567	2162.570	0.003	
P2-SM3	2148.973	2148.982	0.009	
P3-SM3	2141.407	2141.419	0.012	
P4-SM3	2134.763	2134.755	-0.008	
PA46	2350.983	2350.958	-0.025	AV-05.1
P1-SM5.1	2340.747	2340.768	0.021	
P2-SM5.1	2349.359	2349.354	-0.005	
P3-SM5.1	2357.451	2357.454	0.003	
P4-SM5.1	2366.476	2366.494	0.018	
PA48	2364.074	2364.054	-0.020	AV-06
PA47	2361.190	2361.176	-0.014	
P1-SM6	2356.739	2356.742	0.003	
P2-SM6	2368.832	2368.839	0.007	
P3-SM6	2377.253	2377.255	0.002	
P4-SM6	2385.532	2385.540	0.008	
P5-SM6	2370.588	2370.593	0.005	
P1-SM7	2378.778	2378.760	-0.018	AV-07
P2-SM7	2379.799	2379.813	0.014	
P3-SM7	2380.816	2380.815	-0.001	
P5-SM7	2392.564	2392.577	0.013	
PA50	2402.772	2402.753	-0.019	AV-08
P1-SM8	2398.758	2398.772	0.014	
GPS05	2411.711	2411.717	0.006	
P2-SM8	2410.520	2410.543	0.023	
P3-SM8	2418.306	2418.305	-0.001	AV-09-10
P1-SM09-10	2428.901	2428.885	-0.016	
P2-SM09-10	2431.826	2431.819	-0.007	
P3-SM09-10	2441.297	2441.313	0.016	
P4-SM09-10	2439.418	2439.426	0.008	
P5-SM09-10	2437.311	2437.331	0.020	
P6-SM09-10	2436.384	2436.385	0.001	
P7-SM09-10	2438.898	2438.898	0.000	
P8-SM09-10	2440.659	2440.659	0.000	
P9-SM09-10	2444.550	2444.541	-0.009	

P1-SM11	2474.329	2474.350	0.021	AV-11
P2-SM11	2471.020	2471.028	0.008	
P3-SM11	2469.610	2469.590	-0.020	
P4-SM11	2467.289	2467.303	0.014	
PA53	2484.556	2484.560	0.004	AV-12
P1-SM12	2481.648	2481.646	-0.002	
P2-SM12	2486.468	2486.481	0.013	
P3-SM12	2488.014	2488.039	0.025	
P1-SM13	2498.403	2498.393	-0.010	AV-13-14
PA54	2512.223	2512.225	0.002	
P2-SM13	2513.385	2513.372	-0.013	
P3-SM13	2515.257	2515.263	0.006	
PA55	2546.883	2546.886	0.003	
P1-SM14	2565.446	2565.447	0.001	
P2-SM14	2564.050	2564.067	0.017	
P3-SM14	2558.600	2558.609	0.009	

Nota. Elaboración propia.

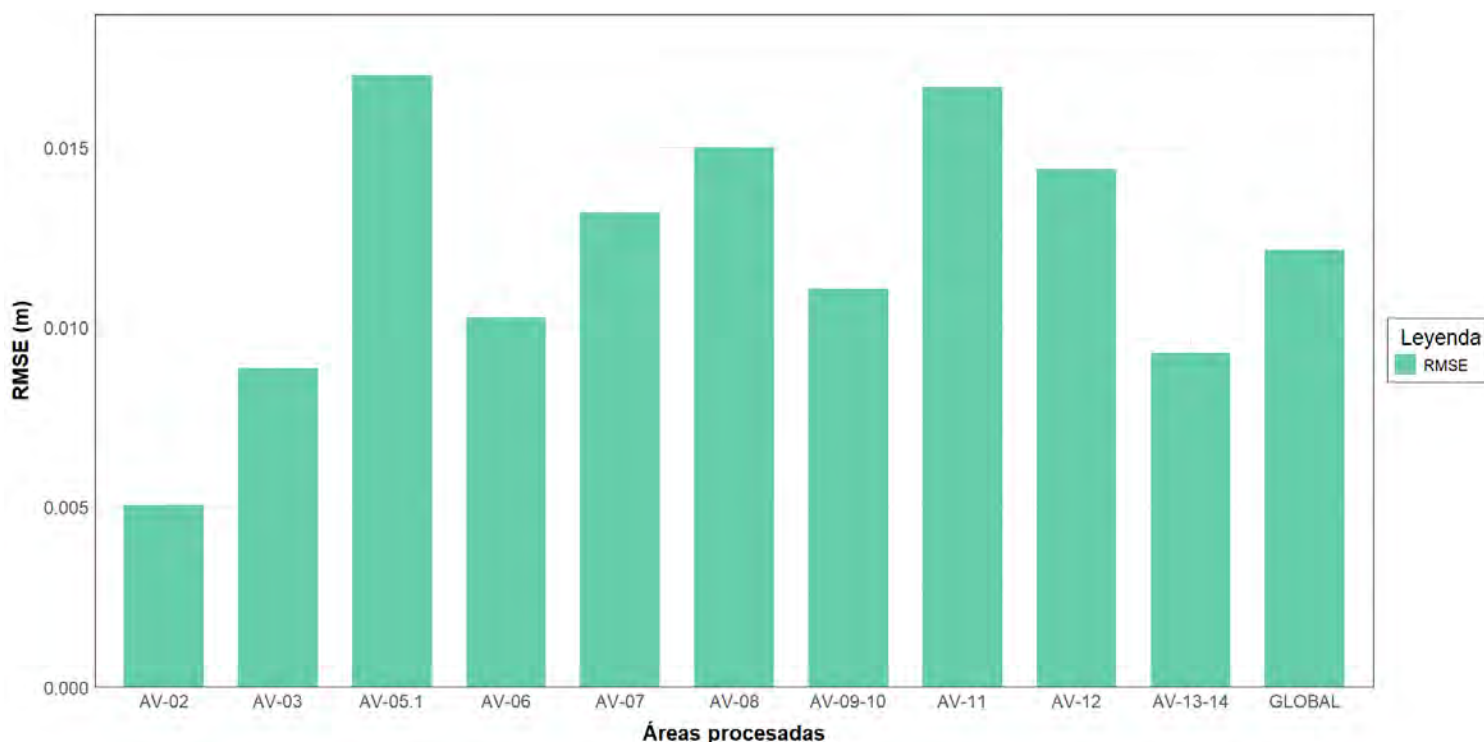
Según la tabla presentada, los desfases altimétricos en todas las áreas procesadas varían entre -0.025 m a 0.025 m, lo cual indica una precisión centimétrica en general. Estos resultados se analizaron en detalle mediante el cálculo del RMSE por área procesada para la dimensión “altimétrica”, así como de manera global para evaluar su variación.

Tabla 50. *RMSE altimétrico por área procesada y global.*

ÁREA PROCESADA	RMSE (m)
AV-02	0.0050
AV-03	0.0089
AV-05.1	0.0170
AV-06	0.0103
AV-07	0.0132
AV-08	0.0150
AV-09-10	0.0111
AV-11	0.0167
AV-12	0.0144
AV-13-14	0.0093
GLOBAL	0.0121

Nota. Elaboración propia.

Figura 63. Distribución de los RMSE altimétricos por área procesada y global.



Nota. Elaboración propia.

En la tabla y figura presentadas anteriormente, se observa que los desfases altimétricos registrados oscilan entre 0.005 m y 0.017 m. El área de vuelo AV-02 destaca por tener el menor desfase altimétrico, mientras que el AV-05.1 presenta la mayor diferencia. Es importante notar que las áreas AV-02, AV-03 y AV-13-14 alcanzaron precisiones milimétricas, evidenciando un alto grado de precisión en estas zonas. Por otro lado, los sectores AV-05.1, AV-06, AV-07, AV-08, AV-09-10, AV-11 y AV-12 mostraron precisiones centimétricas, manteniéndose todas por debajo de los 1.70 cm. El análisis global revela una precisión promedio de 0.012 m, lo que indica que, en términos generales, las alturas derivadas del MDT difieren en 1.21 cm de las cotas reales medidas en el terreno, presentando una precisión centimétrica tolerable.

5.3. Evaluación de la precisión volumétrica:

Con base en los metrados de ambas superficies, se evaluó la precisión de los volúmenes de corte y relleno generados por el RPAS, comparándolos con los valores de referencia obtenidos con estación total, tanto por sector como a nivel global.

Para determinar la precisión en cada sector, se calculó el error porcentual absoluto (APE) utilizando la siguiente fórmula:

$$APE (\%) = \left(\frac{|V_{Real} - V_{Estimado}|}{V_{Real}} \right) * 100\% \quad (28)$$

Donde:

- $APE(\%)$: Es el porcentaje que representa el error absoluto entre el volumen calculado por el RPAS y el volumen real obtenido con la estación total.
- V_{Real} : Indica el volumen real calculado por la estación total (corte o relleno).
- $V_{Estimado}$: Refleja el volumen estimado obtenido por el RPAS (corte o relleno).

Un APE bajo indica que el volumen calculado con RPAS se aproxima al real, reflejando mayor precisión; en cambio, un APE alto señala mayor discrepancia, indicando una menor precisión. Por ello, la precisión volumétrica por sector se estimó como el complemento del APE, según la siguiente fórmula:

$$Precisión\ relativa (\%) = \left(1 - \frac{APE}{100} \right) * 100\% \quad (29)$$

Donde:

- $Precisión\ relativa (\%)$: Mide la precisión entre los volúmenes de corte o relleno estimados por el RPAS frente a los valores reales de la estación total, por sector.
- APE : Es el error porcentual absoluto.

Por otro lado, para determinar la precisión global, se calculó el error porcentual absoluto medio (MAPE) empleando la siguiente ecuación:

$$MAPE (\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{V_{Real}^{(i)} - V_{Estimado}^{(i)}}{V_{Real}^{(i)}} \right| * 100\% \quad (30)$$

Donde:

- *MAPE (%)* : Es el porcentaje del error absoluto promedio entre los volúmenes calculados con RPAS y los reales obtenidos con estación total, evaluado a nivel global.
- $V_{Real}^{(i)}$: Volumen real medido por la estación total en la i-ésima muestra (corte o relleno).
- $V_{Estimado}^{(i)}$: Volumen estimado dado por el RPAS en la i-ésima muestra (corte o relleno)
- *n*: Es el número total de muestras.

Valores bajos de MAPE reflejan mayor precisión en los volúmenes calculados con RPAS, mientras que valores altos indican menor precisión. Por ello, la precisión volumétrica global se calculó como el complemento del MAPE:

$$Precisión\ global\ (\%) = \left(1 - \frac{MAPE}{100} \right) * 100\% \quad (31)$$

Donde:

- *Precisión global (%)* : Es el valor promedio de las precisiones individuales de todas las muestras, evaluando la concordancia entre los volúmenes de corte o relleno estimados por el RPAS y los valores reales con la estación total.
- *MAPE*: Es el error porcentual absoluto medio.

Por otro lado, se calculó el coeficiente de determinación (R^2) para medir qué porcentaje de la variación en los volúmenes reales puede ser explicado por las estimaciones obtenidas con RPAS, el cual se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (32)$$

Donde:

- R^2 : Representa el coeficiente de determinación.

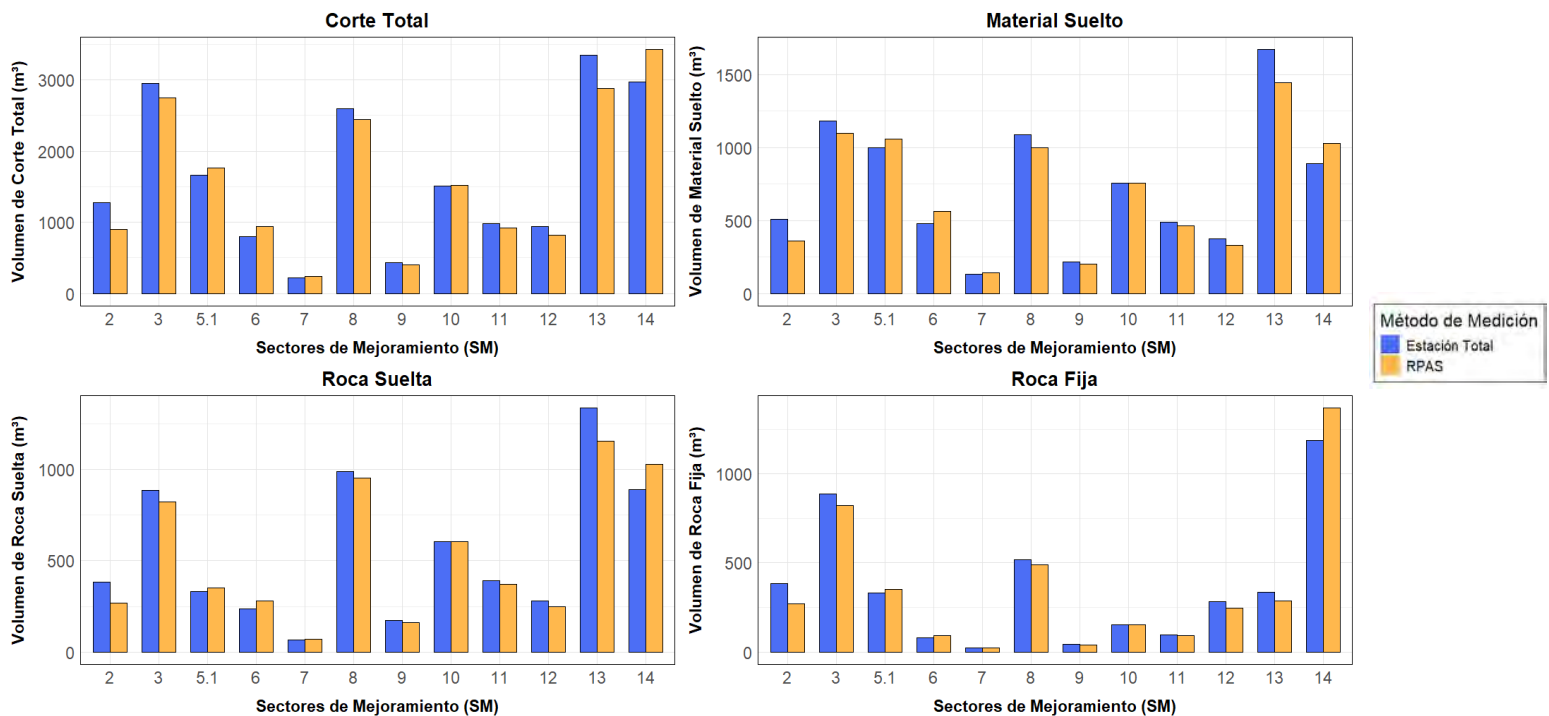
- Y_i : Son los volúmenes reales determinados por la estación total (corte o relleno).
- $\hat{Y}_i$: Son los volúmenes estimados obtenidos mediante RPAS (corte o relleno).
- $\bar{Y}_i$: Es la media de los volúmenes reales.

El valor de R^2 oscila entre 0 y 1: un valor de 1 indica coincidencia total con los valores reales, mientras que 0 refleja ausencia de relación. Su interpretación detallada se presenta en el anexo, con los niveles de relación y su significado.

5.3.1. Evaluación de la precisión de los volúmenes de corte:

Para analizar la precisión de los volúmenes de corte, se compararon los valores calculados con estación total y RPAS. La Figura 64, muestra esta comparación según el tipo de material para ambas tecnologías.

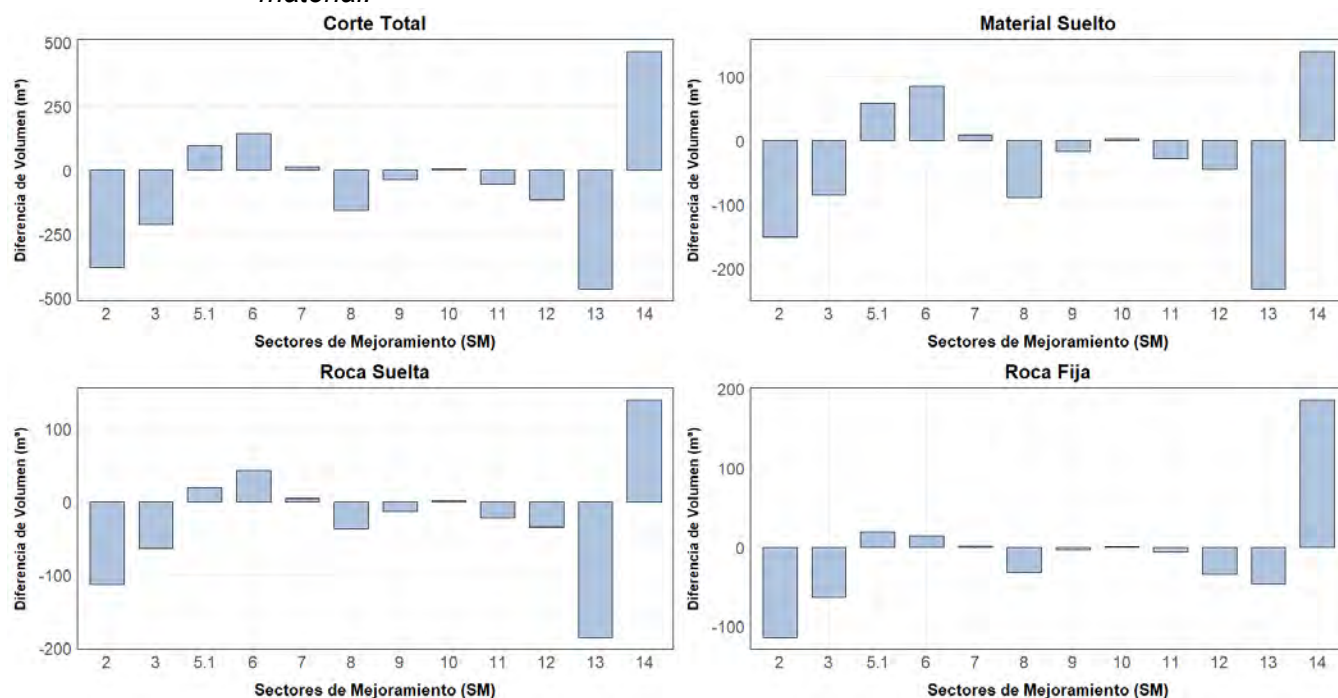
Figura 64. Comparación de volúmenes de corte por tipo de material: Estación total vs. RPAS.



Nota. Elaboración propia.

El gráfico evidencia que, en la mayoría de los sectores, los volúmenes de corte obtenidos mediante estación total y RPAS son comparables por categoría, aunque los valores de la estación total tienden a ser ligeramente superiores. Respecto a la magnitud del corte total, los SM-07 y SM-09 presentan los menores volúmenes (menos de 500 m³), mientras que los sectores SM-03, SM-08, SM-13 y SM-14 superan los 2000 m³. La distribución por tipo de material mantiene una tendencia similar al corte total, con excepción del SM-13, donde el volumen de roca fija es notablemente inferior en comparación con los demás.

Figura 65. *Diferencia de volúmenes de corte entre estación total y RPAS por tipo de material.*

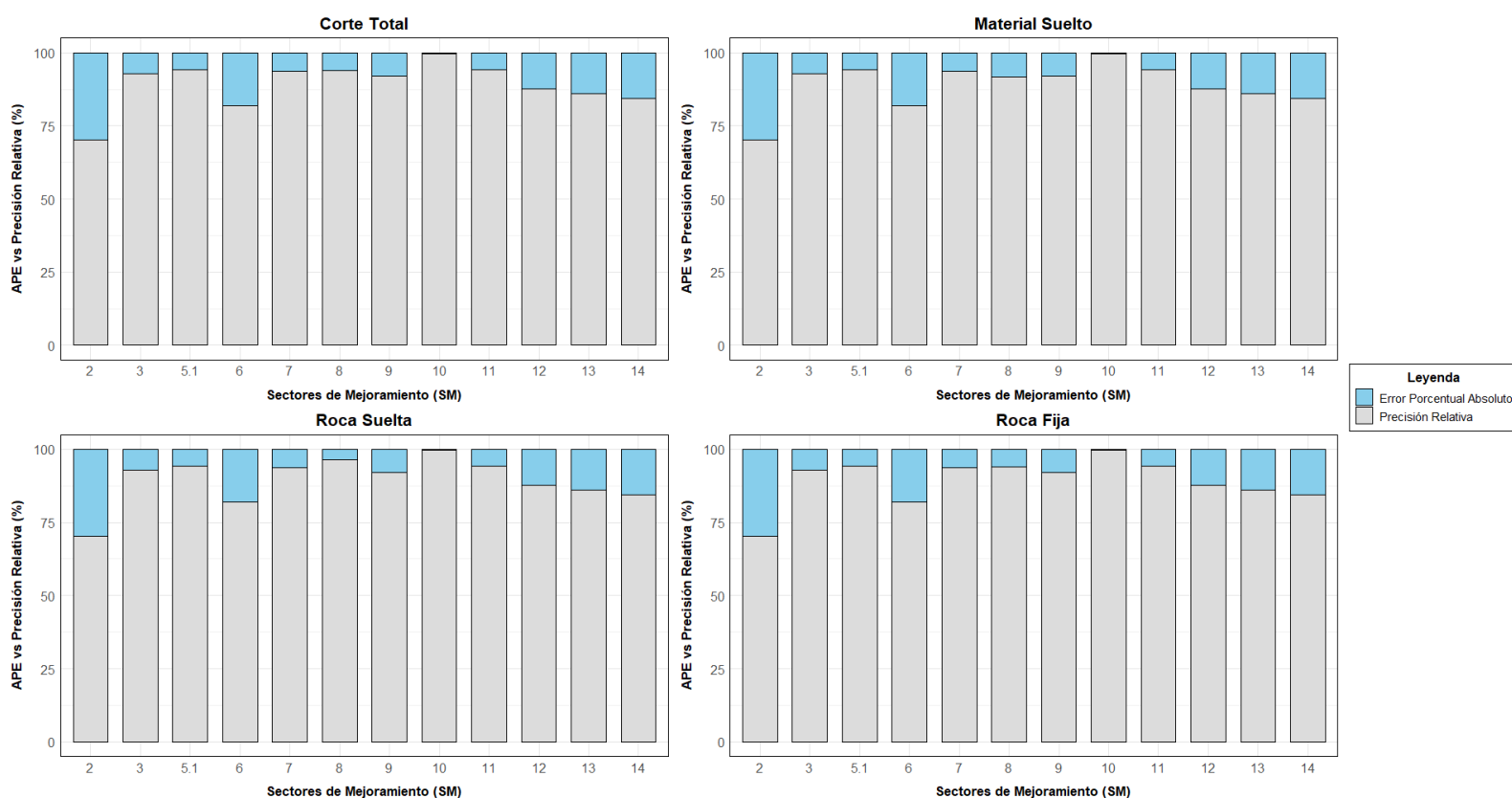


Nota. Elaboración propia.

La Figura 65 muestra la diferencia entre los volúmenes de corte obtenidos con RPAS frente a los de la estación total, según el tipo de material. Los valores positivos indican que el RPAS estimó un volumen mayor, mientras que los negativos reflejan que la estación total registró volúmenes superiores. En la mayoría de los sectores se observan diferencias negativas, lo que sugiere una

tendencia de la estación total a reportar volúmenes de corte ligeramente mayores. Las discrepancias más significativas se presentan en los sectores SM-13 y SM-14, con diferencias de -463.45 m^3 y $+465.05 \text{ m}^3$ respectivamente, indicando que en el primero la estación total estimó un mayor volumen, y en el segundo, el RPAS. En los sectores SM-05.1, SM-07, SM-09, SM-10 y SM-11, los resultados entre ambos métodos son similares, con variaciones menores a 100 m^3 , destacando el SM-10 con apenas 5.30 m^3 de diferencia. Con respecto al tipo de material, la tendencia es similar al corte total, salvo en el caso del SM-13 para roca fija, donde la diferencia es considerablemente menor.

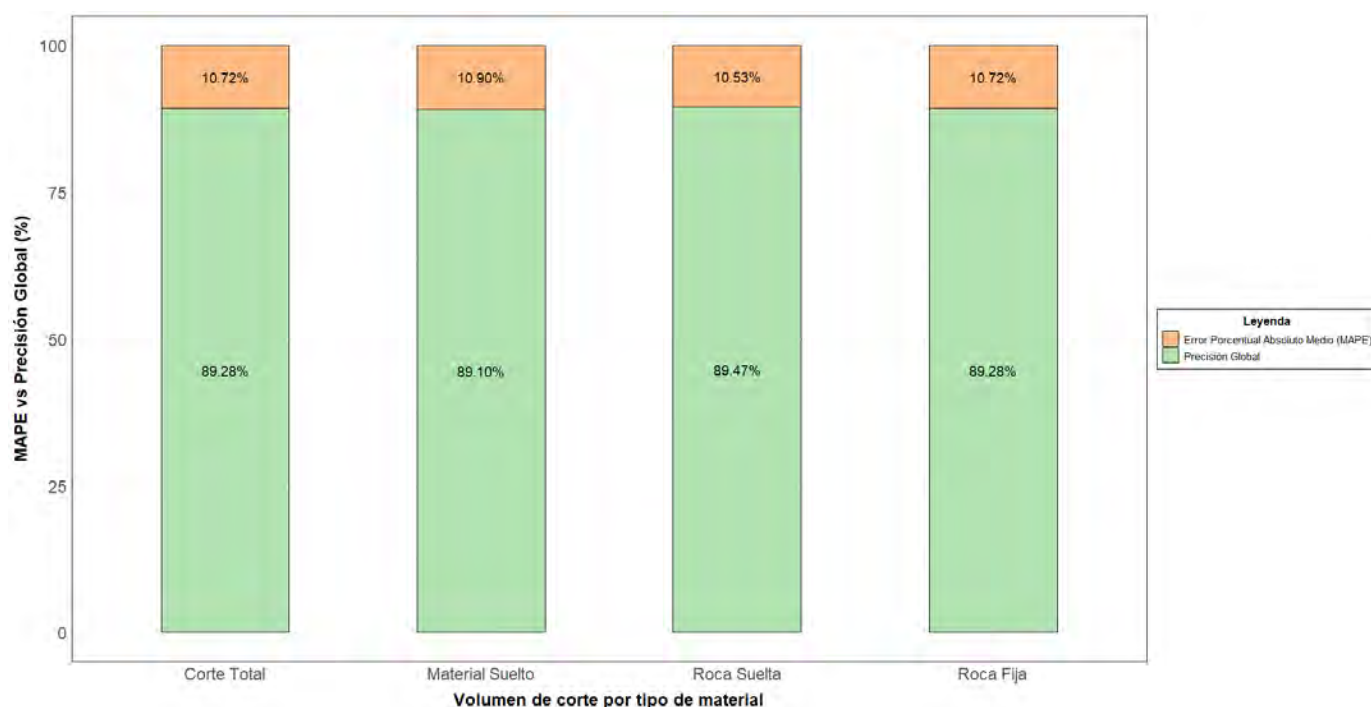
Figura 66. Error Porcentual Absoluto (APE) y precisión relativa en la estimación de volúmenes de corte mediante estación total y RPAS por sector y tipo de material.



Nota. Elaboración propia.

La Figura 66 presenta el APE y la precisión relativa en la estimación de volúmenes de corte, diferenciados por sector y tipo de material. Los valores muestran variabilidad entre sectores, sin embargo, en todos los casos el APE se mantiene por debajo del 30 %, lo que implica una precisión relativa superior al 70 %. El SM-02 registra el mayor APE (29.69 %) y, por tanto, la menor precisión (70.31 %) en todas las categorías, mientras que el SM-10 presente el APE más bajo (0.35 %) y la mayor precisión (99.65 %), reflejando una alta concordancia entre ambos métodos. En general, la tendencia es consistente entre materiales dentro de cada sector, excepto en el SM-08, donde se observa una variación atribuida a una distribución no uniforme del porcentaje de explanación por tipo de material. En sectores restantes, la distribución más homogénea permite obtener resultados similares entre materiales.

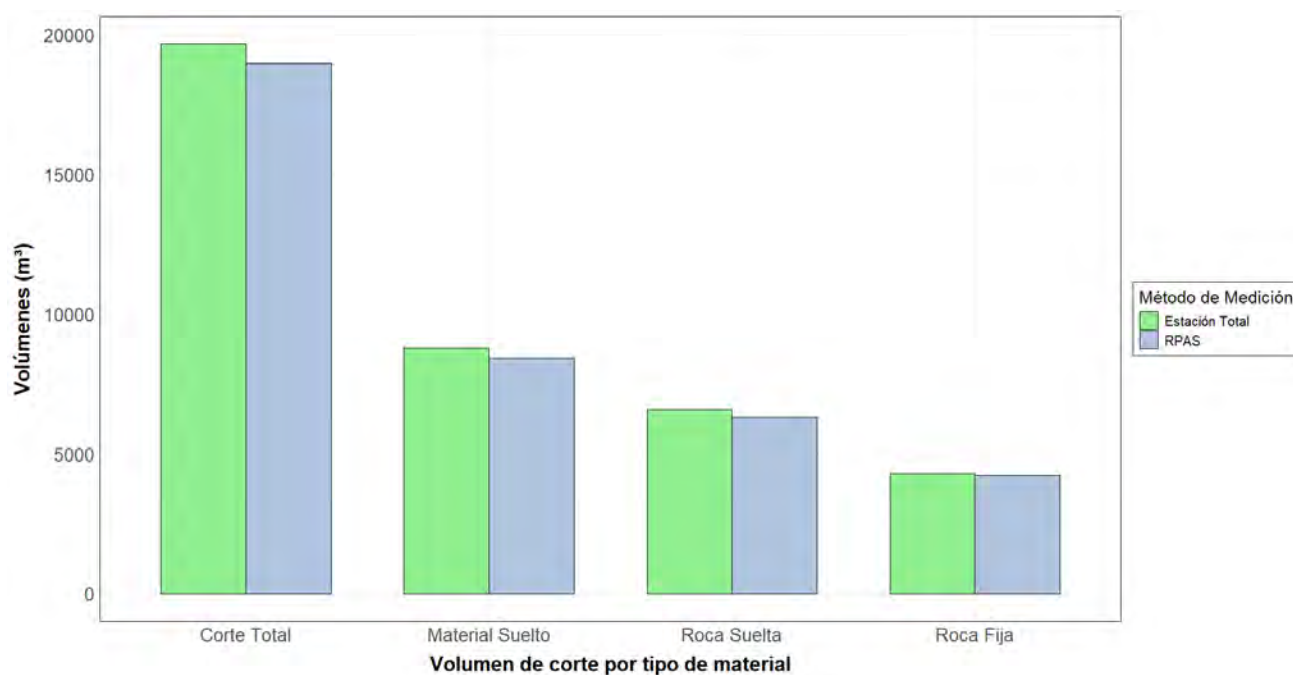
Figura 67. *Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) y precisión global en la estimación de volúmenes de corte mediante estación total y RPAS, por tipo de material.*



Nota. Elaboración propia.

La Figura 67 presenta el Error Porcentual Absoluto Medio (MAPE) y la precisión global en la estimación de volúmenes de corte por tipo de material, comparando los resultados obtenidos mediante RPAS y estación total. Los valores registran una tendencia homogénea entre los distintos materiales evaluados. El corte total y la roca fija registran un MAPE de 10.72 %, equivalente a una precisión del 89.28 %, situándose en un nivel intermedio de concordancia. El mayor error se observa en el material suelto, con un MAPE de 10.90 % (precisión del 89.10 %), lo que indica mayor dificultad en su estimación. Por el contrario, la roca suelta presenta el menor MAPE (10.53 %) y la mayor precisión (89.47 %), reflejando una mejor relación entre los valores estimados y reales. En conjunto, los resultados confirman la capacidad del RPAS para estimar volúmenes de corte con una precisión global superior al 89 % en todos los tipos de material.

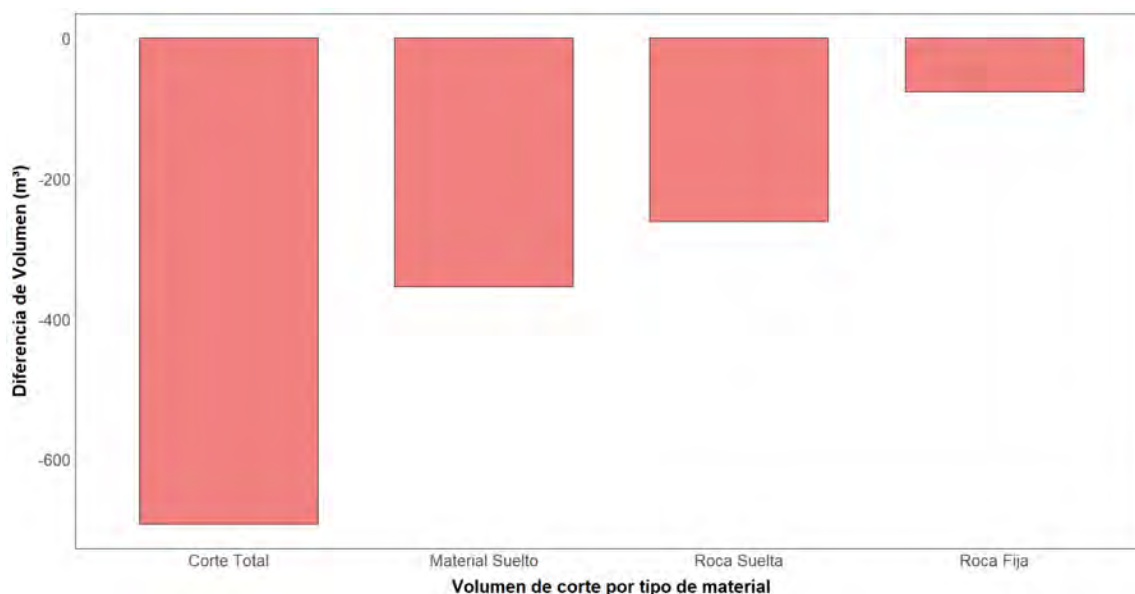
Figura 68. Comparación de volúmenes de corte por tipo de material: Estación total vs. RPAS (Suma total de los 12 sectores).



Nota. Elaboración propia.

La Figura 68 compara los volúmenes de corte obtenidos con estación total y RPAS, considerando la suma total de los 12 sectores analizados. En todos los casos, la estación total reportó volúmenes ligeramente mayores, con un corte total de 19672.62 m³, frente a 18980.75 m³ del RPAS. Para el material suelto, se obtuvo un valor de 8783.62 m³ con estación total, frente a 8429.56 m³ con RPAS, evidenciando valores inferiores de este último. En el caso de roca suelta y roca fija, las diferencias fueron menores: 6572.98 m³ y 4316.02 m³ con estación total, frente a 6311.72 m³ y 4239.46 m³ con RPAS, respectivamente. Estas discrepancias pueden explicarse por diferencias en la interpolación de superficies y en la densidad de puntos capturados por cada tecnología.

Figura 69. *Diferencia de volúmenes de corte por tipo de material: Estación total vs. RPAS (Suma total de los 12 sectores).*

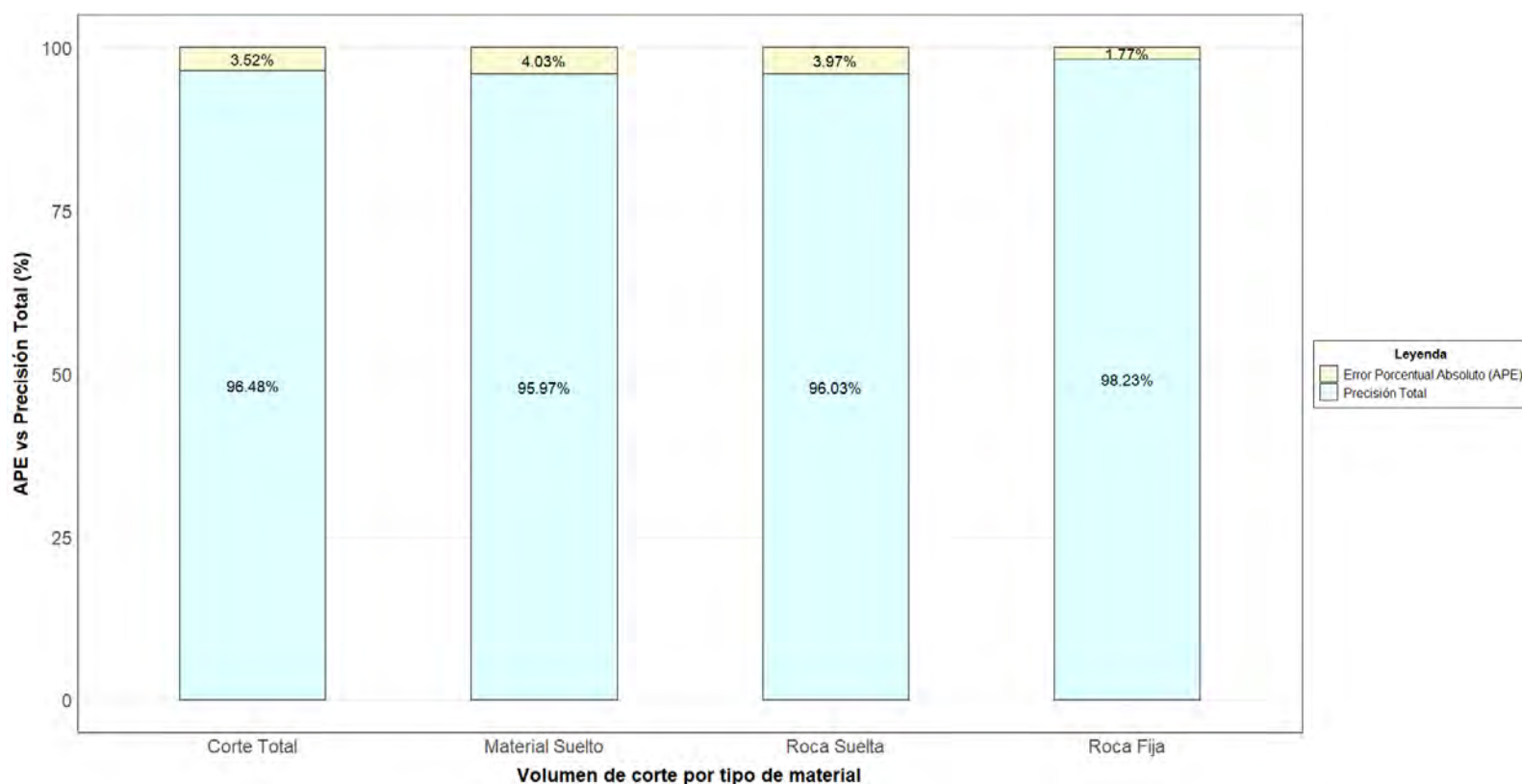


Nota. Elaboración propia.

La Figura 69 presenta las diferencias en los volúmenes de corte entre RPAS y estación total, considerando la suma total de los 12 sectores por tipo de material. En todos los casos, las diferencias son negativas, lo que confirma la tendencia del RPAS a registrar valores inferiores respecto a la estación total.

La mayor discrepancia se observa en el corte total, con -691.87 m^3 , seguido del material suelto (-354.06 m^3) y la roca suelta (-261.26 m^3). La menor diferencia corresponde a la roca fija (-76.56 m^3), lo que sugiere una mayor precisión del RPAS en la estimación de este tipo de material.

Figura 70. APE vs. Precisión total en la estimación de volúmenes de corte mediante estación total y RPAS por tipo de material (Suma total de los 12 sectores).

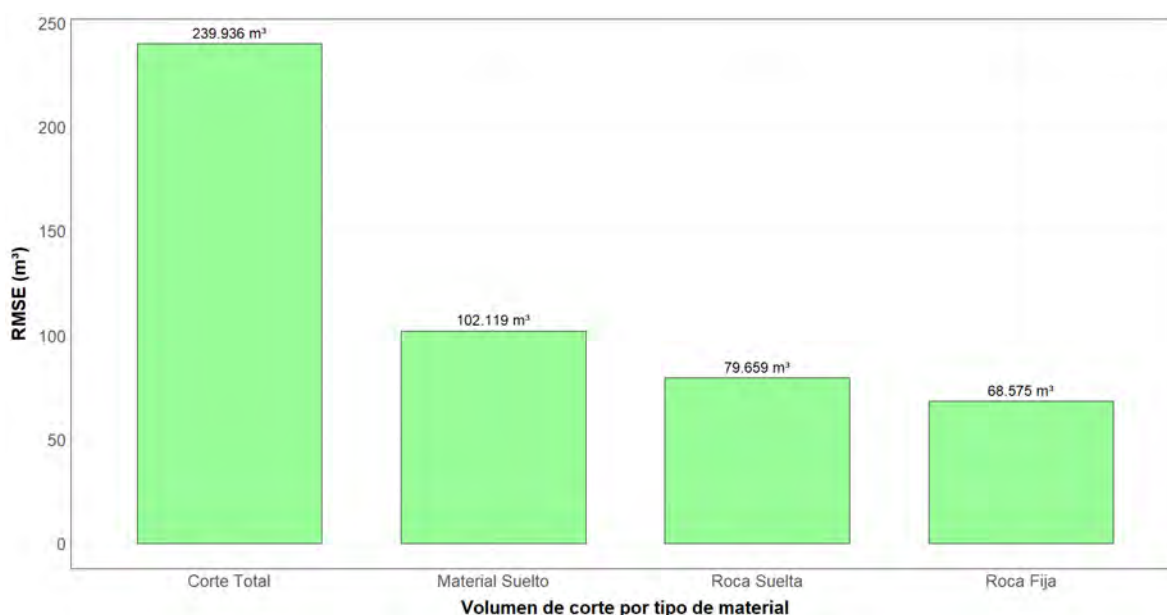


Nota. Elaboración propia.

La Figura 70 presenta el APE y la precisión total en la estimación de volúmenes de corte entre RPAS y estación total, considerando la suma total de los 12 sectores tipo de material. Los resultados evidencian una alta confiabilidad del método RPAS, con una precisión de 96.48 % para el corte total (APE = 3.52 %). La mayor precisión con 98.23 % se obtiene en la roca fija (APE = 1.77%), seguida por la roca suelta con una precisión del 96.03 % (APE = 3.97 %). El

material suelto registra el menor nivel de concordancia con una precisión del 95.97 % (APE = 4.03%). Estos resultados confirman la capacidad del RPAS para estimar volúmenes de corte con una precisión global superior al 95 % en distintos tipos de material.

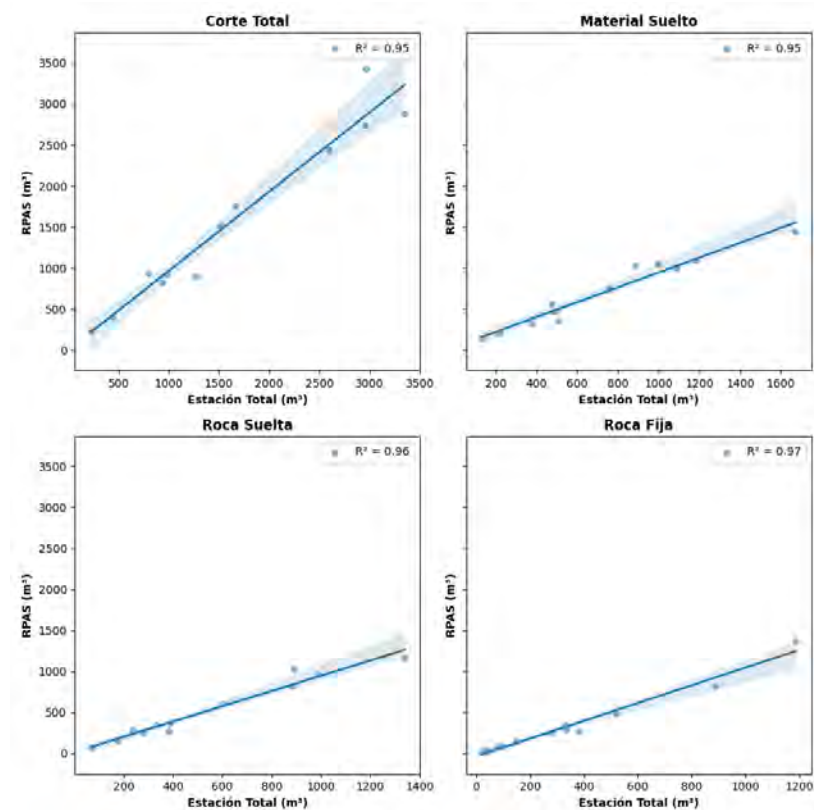
Figura 71. *RMSE en la estimación de volúmenes de corte mediante estación total y RPAS, por tipo de material.*



Nota. Elaboración propia.

La Figura 71 muestra el RMSE en la estimación de volúmenes de corte por tipo de material entre el RPAS y la estación total. Para el corte total, el RMSE fue de 239.936 m³, indicando una desviación promedio de 240 m³ respecto a los valores obtenidos con estación total, tomada como referencia. Por tipo de material, el mayor error correspondió para el material suelto (102.119 m³), seguido de la roca suelta (79.659 m³) y la roca fija (68.575 m³), esta última con la menor dispersión y mayor precisión.

Figura 72. Coeficiente de determinación en la estimación de volúmenes de corte mediante estación total y RPAS por tipo de material.



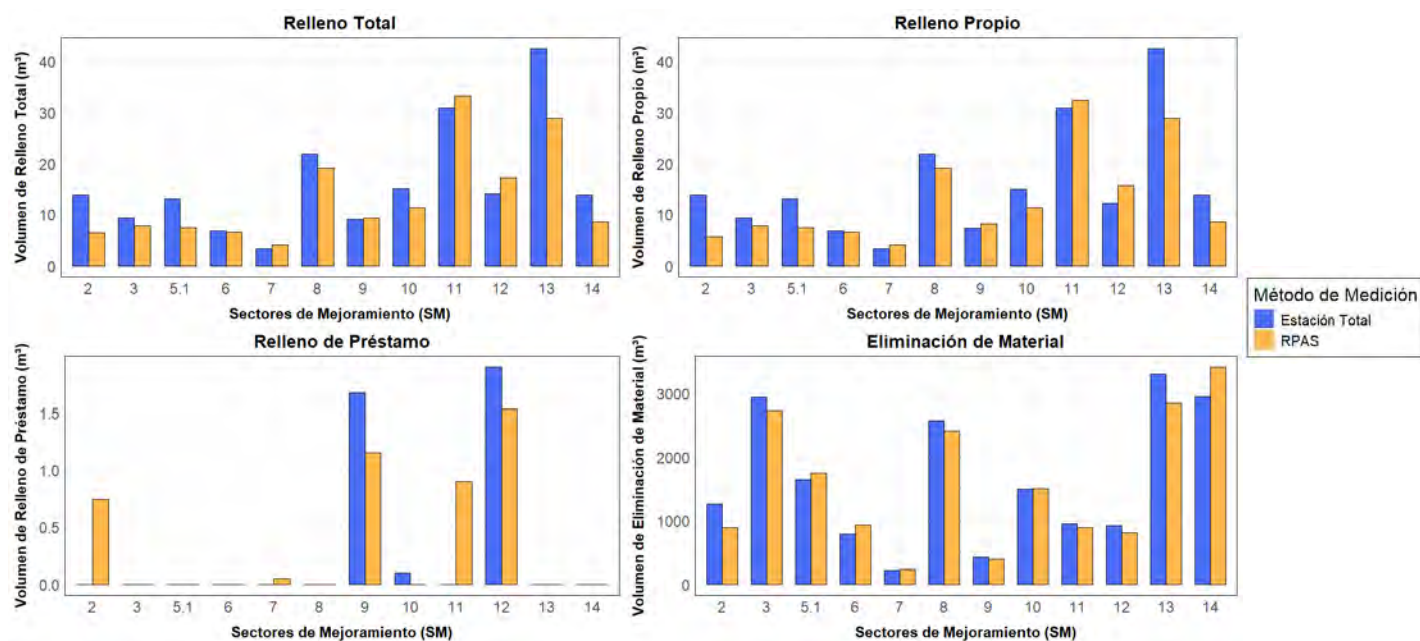
Nota. Elaboración propia.

La Figura 72 muestra valores elevados de R^2 en todos los materiales evaluados, lo que evidencia una relación perfecta entre los volúmenes estimados por RPAS y estación total. El corte total y el material suelto presentan un R^2 de 0.95, la roca suelta alcanza un 0.96 y la roca fija registra el valor más alto con 0.97, reflejando la menor variabilidad en su estimación volumétrica.

5.3.2. Evaluación de la precisión de los volúmenes de relleno:

Con el objetivo de analizar la precisión de los volúmenes de relleno, se compararon los valores obtenidos con RPAS y estación total, diferenciando los volúmenes de relleno según su procedencia por cada método, como se muestra en la Figura 73.

Figura 73. Comparación de volúmenes de relleno por tipo de procedencia: Estación total vs. RPAS.

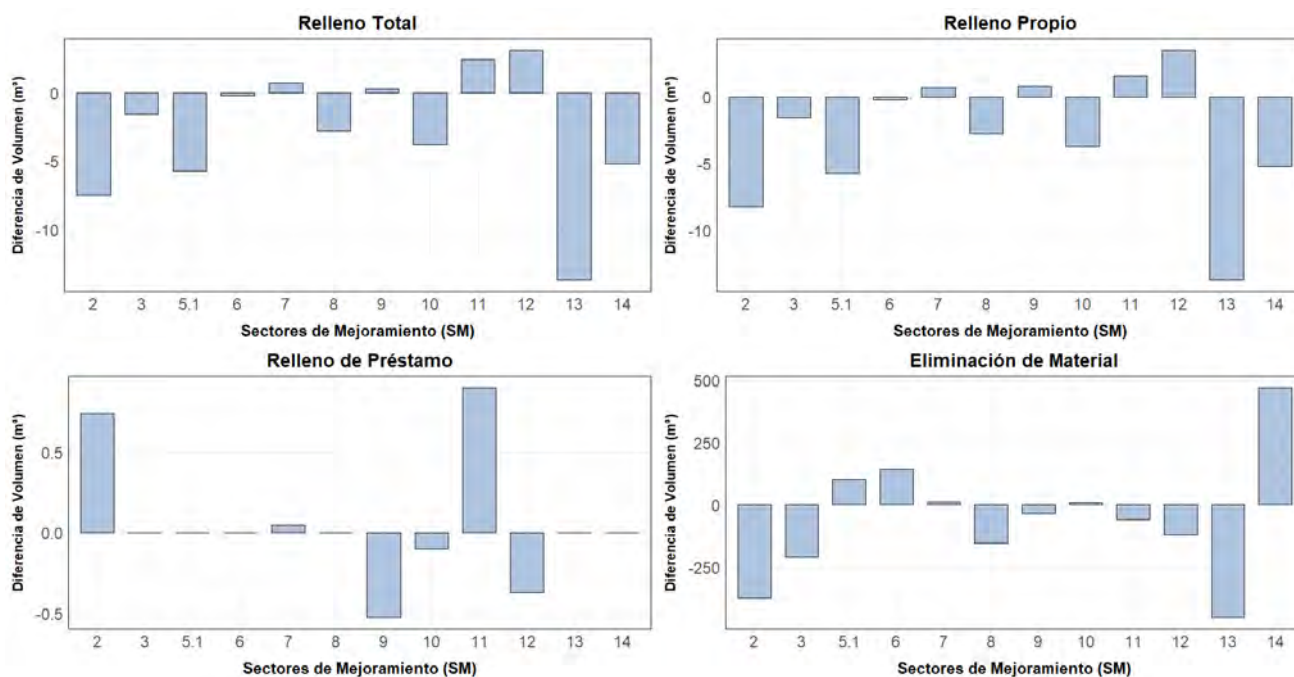


Nota. Elaboración propia.

El análisis de los volúmenes de relleno muestra que las categorías de relleno total y relleno propio presentan tendencias similares en la mayoría de sectores. En el relleno total, el sector 07 registra los volúmenes más bajos ($< 5 \text{ m}^3$) y los sectores 11 y 13 los más altos ($> 28 \text{ m}^3$). El relleno propio mantiene una distribución proporcional al relleno total en todos los sectores; sin embargo, al analizar caso por caso, se evidencian pequeñas diferencias entre ambos, asociadas a la presencia de relleno de préstamo, utilizado cuando el volumen propio no cubre el total requerido. En los sectores 02, 07 y 11, solo el RPAS registra este tipo de relleno, mientras que en el sector 10 únicamente lo reporta la estación total. En los sectores 09 y 12, ambos métodos detectan relleno de préstamo, aunque los valores son mayores en la estación total. En los demás sectores, ninguno de los métodos identifica este tipo de relleno, lo que refleja una estimación precisa. Respecto a la eliminación de material, los sectores 03, 08, 13 y 14 superan los 2000 m^3 , mientras que los sectores 07 y 09 reportan

menos de 500 m³. En general, los volúmenes medidos con estación total tienden a ser ligeramente mayores que los estimados con RPAS.

Figura 74. *Diferencia de volúmenes de relleno entre estación total y RPAS por tipo de procedencia.*

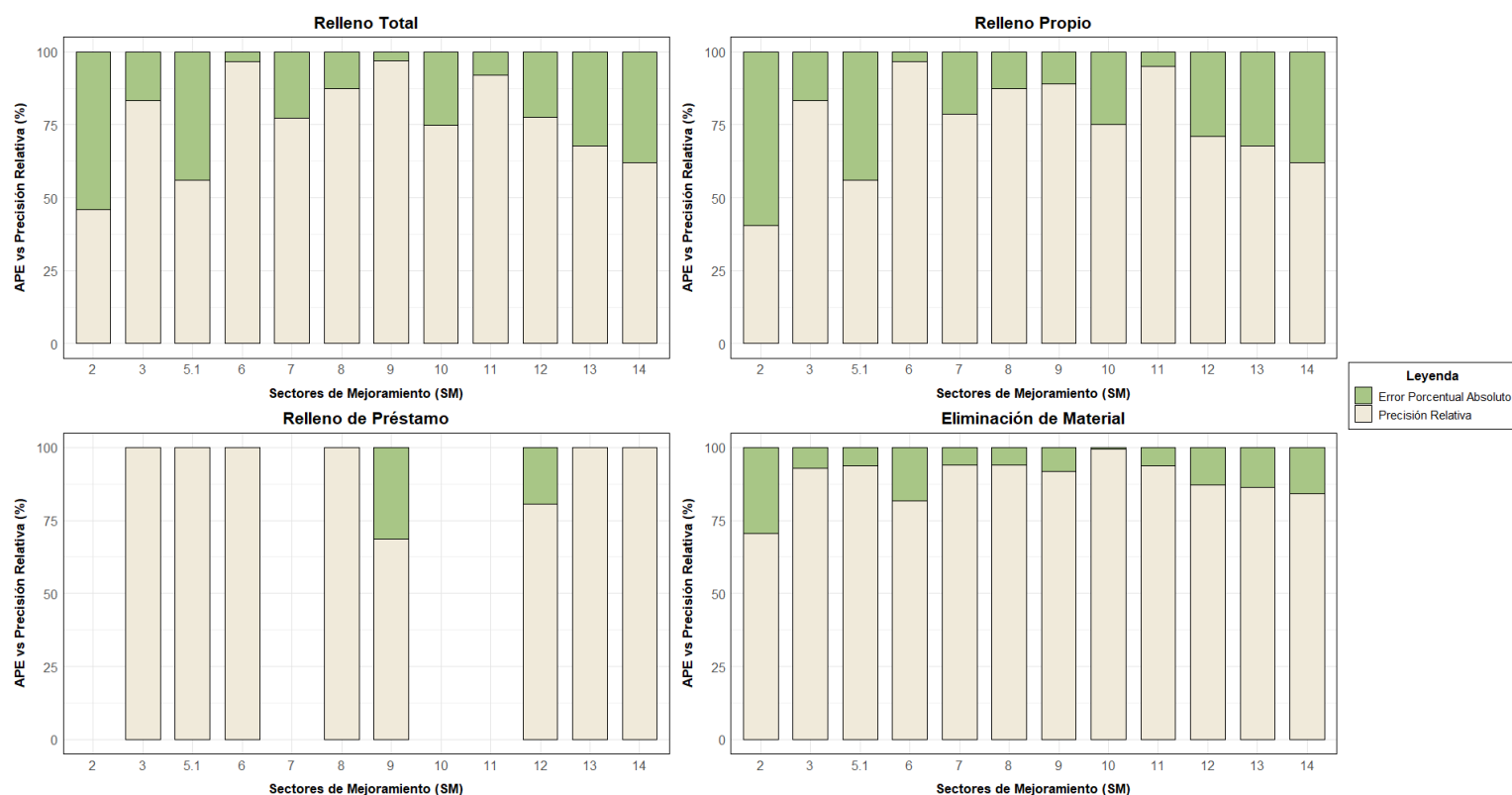


Nota. Elaboración propia.

La Figura 74 muestra las diferencias en los volúmenes de relleno estimados con RPAS respecto a los obtenidos con estación total, según su procedencia. Valores positivos indican un mayor volumen estimado por el RPAS; mientras que valores negativos señalan lo contrario. En general, predominan las diferencias negativas, especialmente en el relleno total y propio, lo que sugiere que la estación total tiende a reportar volúmenes mayores. En el relleno total, el SM-13 presenta la mayor discrepancia (-13.68 m³), mientras que los sectores SM-06, SM-07 y SM-09 muestran variaciones menores a ± 1 m³. En cuanto al relleno propio, se observa un comportamiento similar al del relleno total. Para el relleno de préstamo, el RPAS registró valores ligeramente superiores, destacando el SM-11 con 0.90 m³. En varios sectores (SM-03, SM-05.1, SM-

06, SM-08, SM-13 y SM-14), ambos métodos coincidieron exactamente. En la eliminación de material, se evidencian discrepancias relevantes en el SM-14 (470.25 m³) y SM-13 (-449.78 m³), mientras que los menores errores se dan en el SM-10 y SM-07, con diferencias inferiores a 14 m³.

Figura 75. APE vs. Precisión relativa en la estimación de volúmenes de relleno mediante estación total y RPAS por tipo de procedencia.

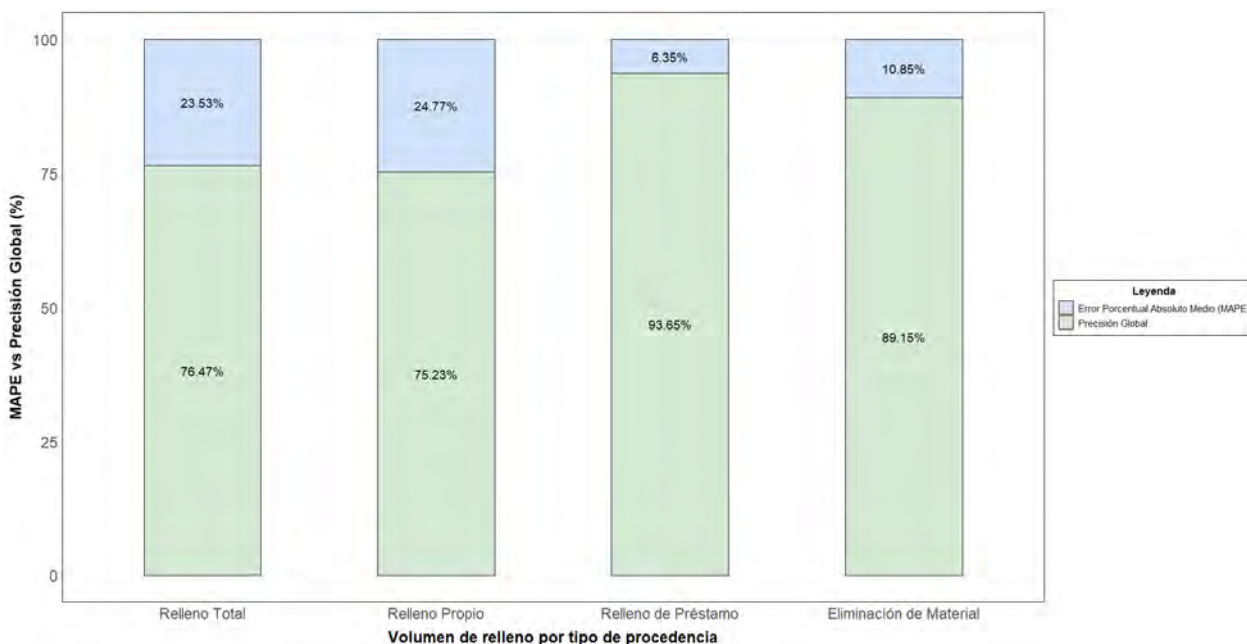


Nota. Elaboración propia.

La Figura 75 muestra el APE y su precisión relativa en la estimación de volúmenes de relleno por sector y tipo de procedencia. Se evidencian variaciones marcadas entre sectores, aunque en la mayoría de los casos las estimaciones resultan aceptables. En el relleno total, el sector 09 presenta el menor APE (3.07%) y mayor precisión (96.93%), mientras que el sector 02 muestra la mayor discrepancia (APE de 54.17% y precisión de 45.83%). Para el relleno propio, el SM-06 destaca con un APE de 3.35% y precisión de

96.65%, frente al SM-02, que nuevamente registra el mayor APE (59.53%) y la menor precisión (40.47%). En cuanto al relleno de préstamo, sectores como el SM-03, SM-05.1, SM-06, SM-08, SM-13 y SM-14 alcanzan una precisión del 100%, debido a la coincidencia exacta entre ambos métodos. En cambio, el SM-09 y SM-12 presentan las mayores diferencias, con APE de 31.34% y 19.47%, y precisiones de 68.66% y 80.53%, respectivamente. En los sectores SM-02, SM-07, SM-10 y SM-11 no se pudo calcular el APE debido a que los volúmenes registrados por la estación total fueron nulos, generando una división por cero. Así mismo, cuando el volumen registrado por el RPAS también es cero, se obtuvo un APE del 100%, que no representa un error real, sino una distorsión matemática por la cercanía a valores nulos. Finalmente, en la eliminación de material, el SM-10 alcanza la mayor precisión (99.39%) con un APE mínimo (0.61%), mientras que el SM-02 muestra la mayor discrepancia, con un APE de 29.42% y precisión de 70.58%.

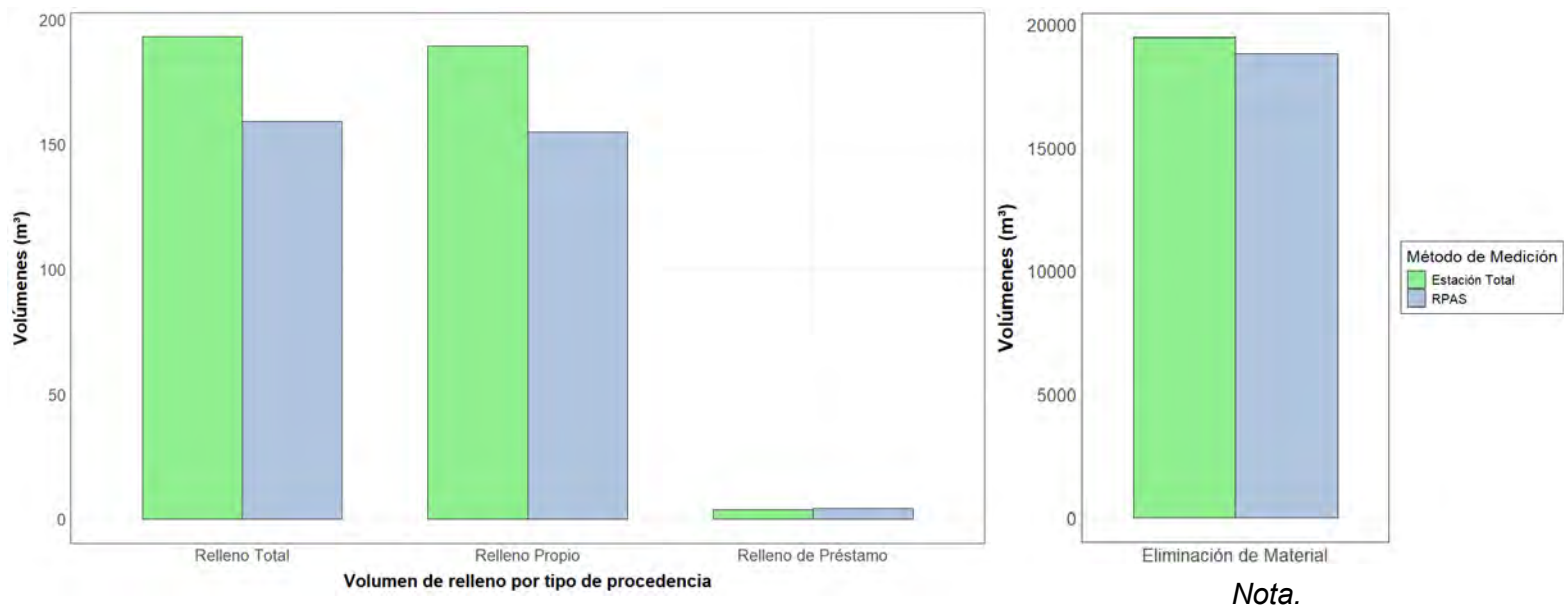
Figura 76. *MAPE vs. Precisión global en la estimación de volúmenes de relleno mediante estación total y RPAS por tipo de procedencia.*



Nota. Elaboración propia.

La Figura 76 muestra el MAPE y su precisión global en la estimación de volúmenes de relleno por tipo de procedencia, comparando los resultados entre el RPAS y la estación total. El relleno total presenta un MAPE de 23.53%, equivalente a una precisión global del 76.47%, reflejando una concordancia aceptable. El relleno propio registra el mayor error (24.77%) y la menor precisión (75.23%), mientras que el relleno de préstamo alcanza el menor MAPE (6.35%) y la mayor precisión (93.65%), destacando como la categoría más confiable. La eliminación de material, con un MAPE de 10.85% y una precisión del 89.15%, se sitúa en un rango intermedio. En conjunto, los resultados confirman que la metodología con RPAS ofrece estimaciones consistentes, con precisiones globales superiores al 75%.

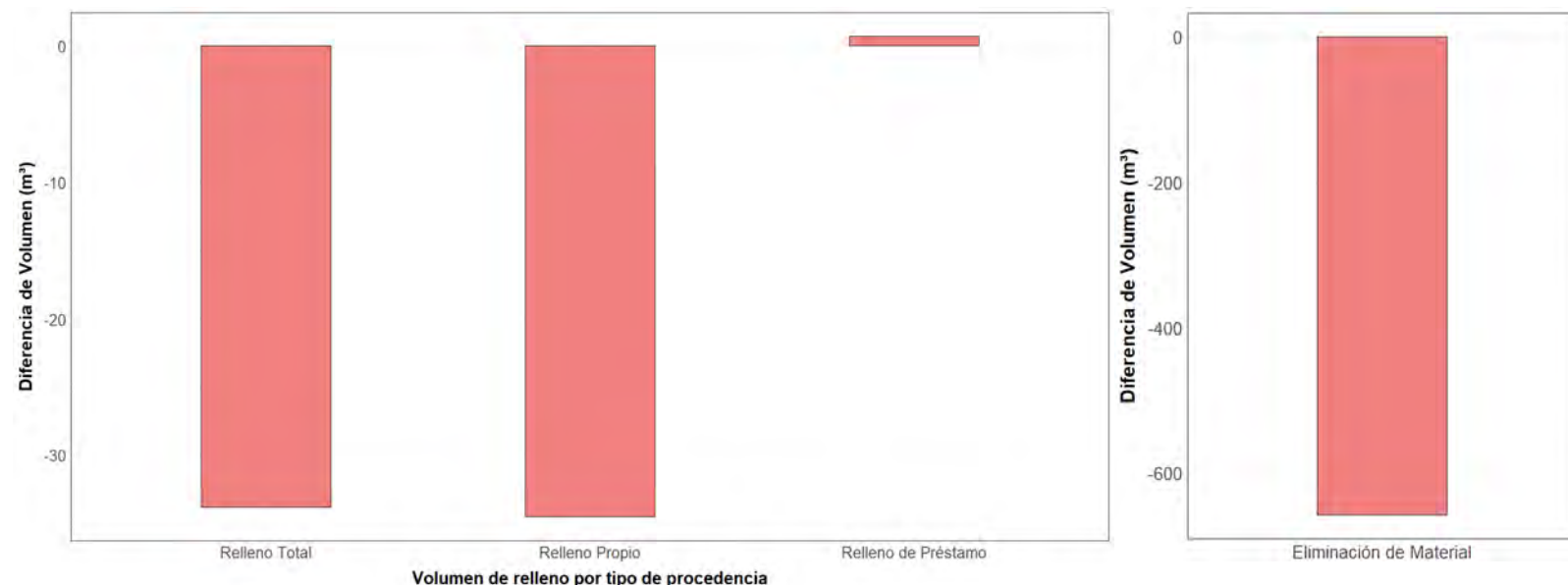
Figura 77. Comparación de volúmenes de relleno por tipo de procedencia: Estación total vs. RPAS (Suma total de los 12 sectores).



Nota. Elaboración propia.

La Figura 77 muestra la comparación de los volúmenes de relleno obtenidos mediante estación total y RPAS, considerando la suma total de los 12 sectores analizados. En el caso del relleno total, la estación total registra 193.09 m³, mientras que el RPAS obtiene un valor menor de 159.28 m³. Para el relleno propio, se mantiene la misma tendencia, con 189.41 m³ calculados con estación total y 154.91 m³ con RPAS. En contraste, el relleno de préstamo presenta una particularidad, ya que el volumen estimado por RPAS (4.37 m³) supera al de la estación total (3.68 m³). Finalmente, en la eliminación de material, los valores también son mayores con estación total (19479.53 m³) en comparación con los obtenidos por RPAS (18821.47 m³). En términos generales, los resultados indican que el RPAS tiende a reducir los volúmenes de relleno frente a la estación total, salvo en el caso del relleno de préstamo, lo cual podría atribuirse a diferencias en la metodología de interpolación y en la densidad de los puntos.

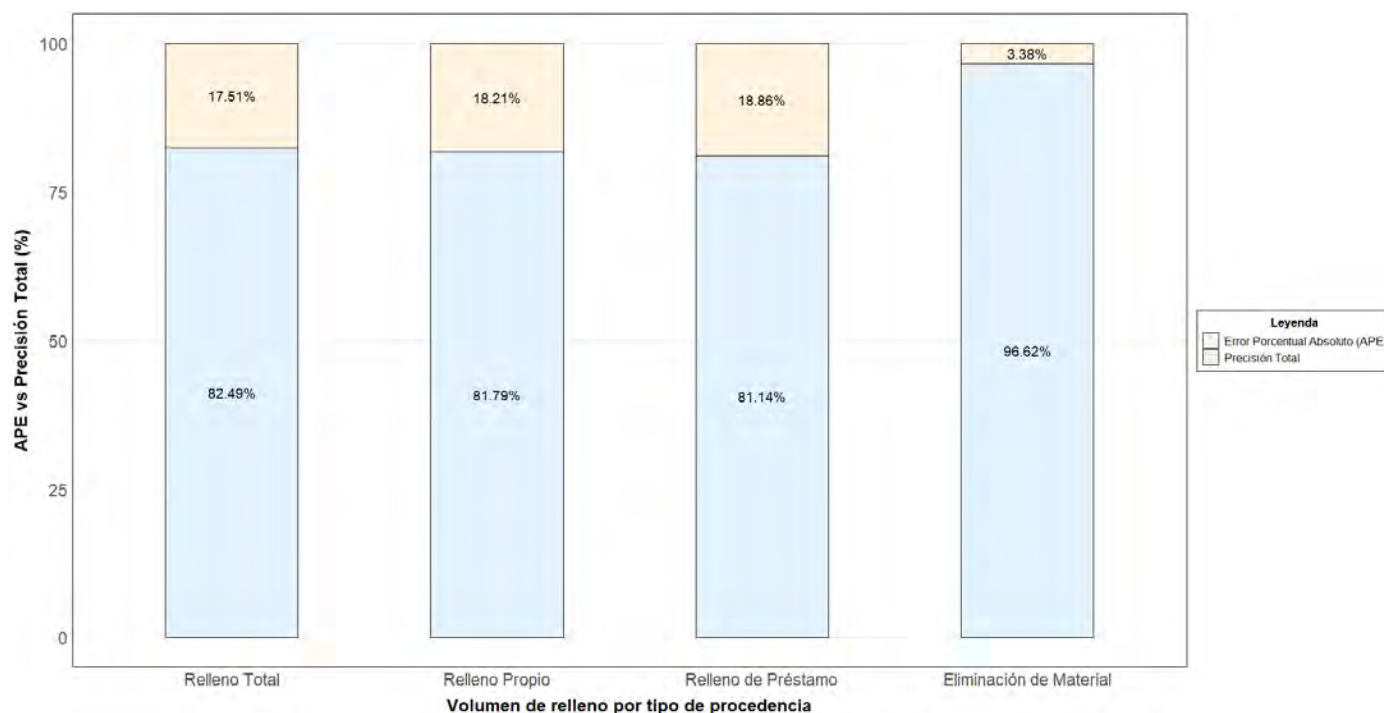
Figura 78. *Diferencia de volúmenes de relleno entre estación total y RPAS por tipo de procedencia (Suma total de los 12 sectores).*



Nota. Elaboración propia.

La Figura 78 representa la diferencia de volúmenes de relleno entre los valores obtenidos con RPAS y la estación total para cada tipo de procedencia, considerando la suma total de los 12 sectores analizados. Los valores negativos indican que los volúmenes registrados por el RPAS son menores que los de la estación total, mientras que los valores positivos reflejan lo contrario. Se observa que la mayor diferencia se presenta en la eliminación de material, con un valor de -658.07 m^3 . Le siguen el relleno propio, con -34.50 m^3 , y el relleno total, con -33.81 m^3 , en donde estas categorías presentan una menor estimación del RPAS en comparación con la estación total. En contraste, el relleno de préstamo es el único caso donde el RPAS reporta un volumen ligeramente mayor que la estación total, con una diferencia positiva de 0.69 m^3 . Este resultado se desvía de la tendencia general, indicando que el RPAS podría estar registrando valores superiores en el volumen del relleno de préstamo.

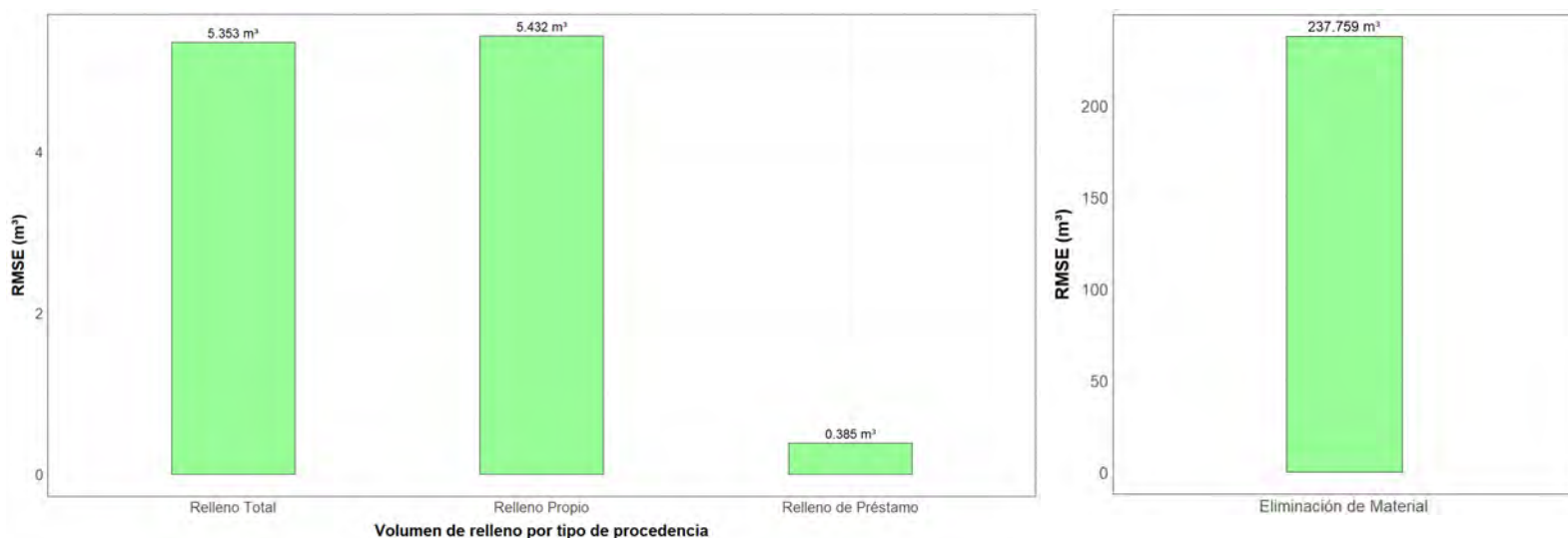
Figura 79. APE vs. Precisión total en la estimación de volúmenes de relleno mediante estación total y RPAS por tipo de procedencia (Suma total de los 12 sectores).



Nota. Elaboración propia.

La Figura 79 muestra el APE y su precisión total en la estimación de volúmenes de relleno mediante RPAS y estación total, considerando la suma total de los 12 sectores para cada tipo de procedencia. En términos generales, el APE para el relleno total es de 17.51%, lo que equivale a una precisión de 82.49%, reflejando una concordancia aceptable entre ambos métodos. Al desglosar por categoría, la eliminación de material presenta el mejor desempeño, con un APE de 3.38% y una precisión de 96.62%. En contraste, el relleno de préstamo muestra el mayor error (APE = 18.86%) y la menor precisión (81.14%), seguido de cerca por el relleno propio (APE = 18.21%, precisión = 81.79%). Estos resultados evidencian una buena capacidad del RPAS para estimar volúmenes de relleno, manteniendo una precisión superior al 81% en todas las categorías evaluadas.

Figura 80. *RMSE en la estimación de volúmenes de relleno mediante estación total y RPAS por tipo de procedencia.*

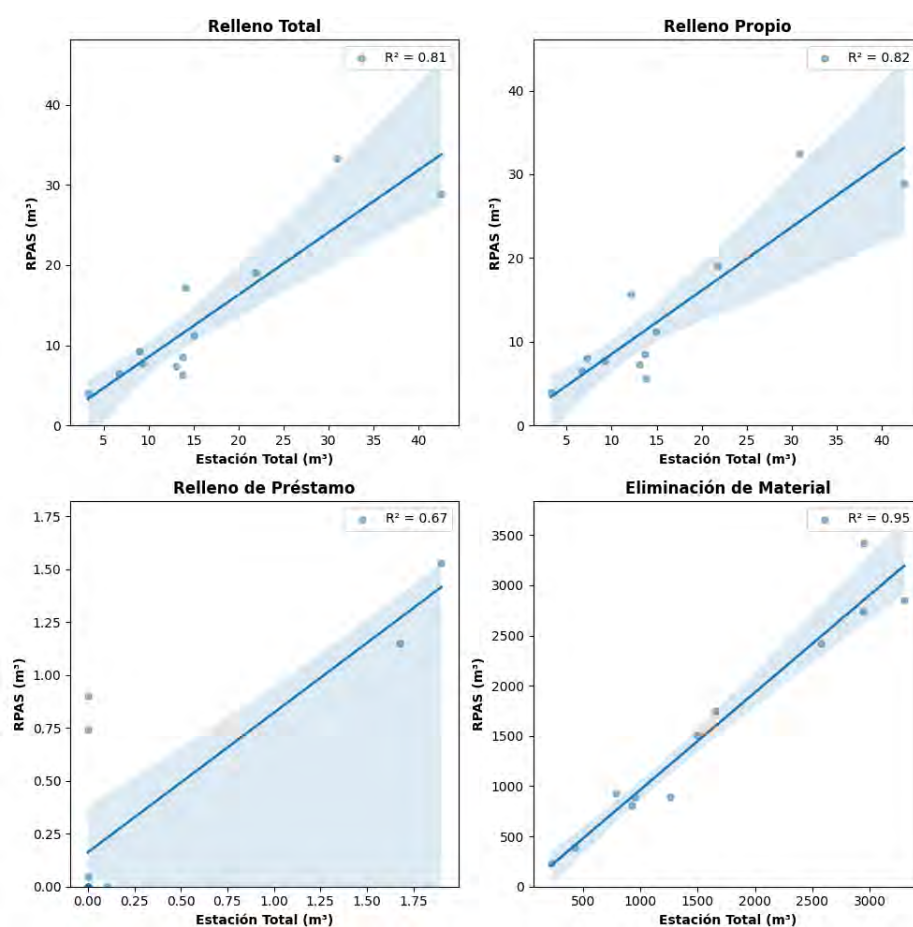


Nota. Elaboración propia.

La Figura 80 muestra el RMSE en la estimación de volúmenes de relleno según su tipo de procedencia. En general, el relleno total presenta un RMSE de 5.353 m³, lo que indica que la estimación realizada con el RPAS se desvía en

promedio unos 5.35 m^3 respecto a la referencia establecida con la estación total. El relleno propio registra un RMSE similar (5.432 m^3), mientras que el relleno de préstamo muestra el menor error, con solo 0.385 m^3 . En contraste, la eliminación de material alcanza el RMSE más alto (237.759 m^3), atribuible a su mayor volumen absoluto, lo que incrementa la dispersión en la estimación.

Figura 81. *Coeficiente de determinación en la estimación de volúmenes de relleno mediante estación total y RPAS por tipo de procedencia.*



Nota. Elaboración propia.

La Figura 81 evidencia una variabilidad en la correlación entre los volúmenes de relleno obtenidos con RPAS y estación total según su procedencia. El relleno total alcanzó un R^2 de 0.81, mientras que el relleno propio registró un valor similar ($R^2 = 0.82$), indicando una relación perfecta entre ambos métodos. El

relleno de préstamo mostró el valor más bajo ($R^2 = 0.67$), reflejando una correlación muy fuerte. En contraste, la eliminación de material presentó el R^2 más alto (0.95), evidenciando una correspondencia perfecta.

Cabe señalar que los datos numéricos mencionados en la descripción de los resultados, correspondientes a la comparación y diferencia de volúmenes, errores porcentuales y precisiones de los volúmenes de corte y relleno, se encuentran detallados en las tablas de precisiones volumétricas presentadas en los anexos de la investigación.

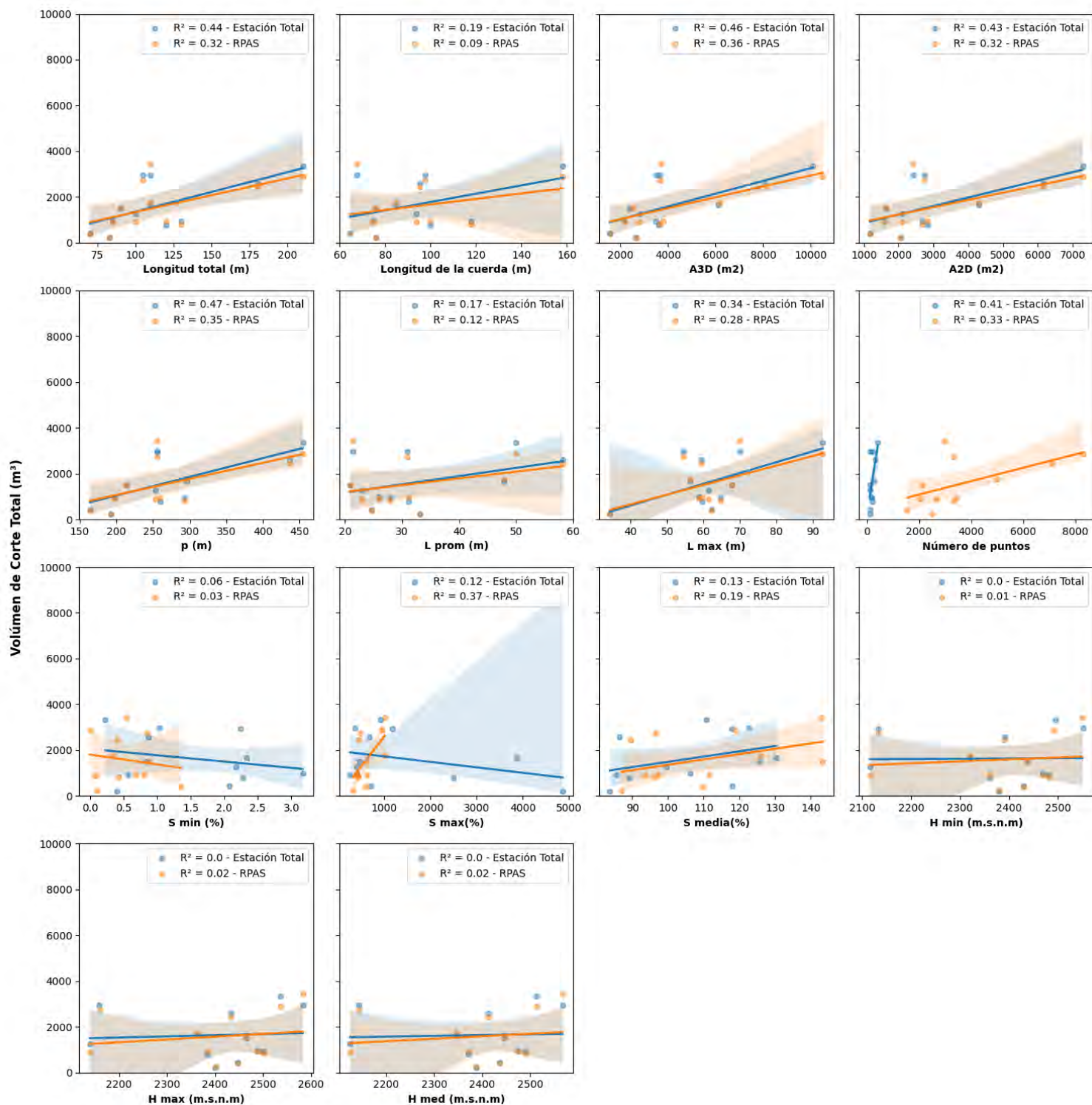
5.4. Evaluación de la influencia de los parámetros geomorfométricos en el cálculo de movimiento de tierras:

El objetivo del presente análisis es determinar en qué medida los parámetros geomorfométricos influyen en el cálculo del volumen de corte total y relleno total en cada método de medición (Estación total y RPAS). Para ello, se empleó el coeficiente de determinación (R^2), que indica qué porcentaje de la variabilidad de los volúmenes de movimiento de tierras es explicado por cada parámetro. Un R^2 cercano a 1 significa que el parámetro explica en gran medida la variación en los volúmenes de corte o relleno, mientras que un R^2 cercano a 0 indica una influencia mínima o nula. (La interpretación detallada de los valores de R^2 se encuentra en el anexo de la investigación).

5.4.1. Influencia de los parámetros geomorfométricos en el volumen de corte total:

Se analizaron los valores de R^2 obtenidos para los 14 parámetros geomorfométricos en relación con el volumen de corte total obtenido en cada método. Los resultados se presentan en la siguiente figura y tabla:

Figura 82. Gráficos de R^2 de los parámetros geomorfométricos en relación con el volumen de corte total para cada método de medición.



Nota. Elaboración propia.

Tabla 51. Valores de R^2 de los parámetros geomorfométricos en relación con el volumen de corte total para cada método de medición.

N°	Parámetros geomorfométricos	Volumen de corte total	
		Estación total	RPAS
1	Longitud total (m)	0.44	0.32
2	Longitud de la cuerda (m)	0.19	0.09
3	A3D (m ²)	0.46	0.36
4	A2D (m ²)	0.43	0.32
5	p (m)	0.47	0.35
6	L prom (m)	0.17	0.12
7	L max (m)	0.34	0.28
8	Número de puntos	0.41	0.33
9	S min (%)	0.06	0.03
10	S max (%)	0.12	0.37
11	S media (%)	0.13	0.19
12	H min (m.s.n.m)	0.00	0.01
13	H max (m.s.n.m)	0.00	0.02
14	H med (m.s.n.m)	0.00	0.02

Nota. Elaboración propia.

Como se observa en la figura y tabla presentada anteriormente, para la estación total, los parámetros con mayor influencia en la variabilidad del volumen de corte total son el perímetro (p, $R^2 = 0.47$), el área 3D (A3D, $R^2 = 0.46$), el área 2D (A2D, $R^2 = 0.43$), la longitud total ($R^2 = 0.44$) y el número de puntos ($R^2 = 0.41$), presentando una fuerte influencia, y, además, la longitud de la pendiente (L max, $R^2 = 0.34$) que presenta una relación moderada. Para el RPAS, se mantienen los mismos parámetros en su mayoría con valores similares, pero con valores de R^2 ligeramente menores, presentando una influencia moderada: Perímetro ($R^2 = 0.35$), área 3D ($R^2 = 0.36$), área 2D ($R^2 = 0.32$), longitud total ($R^2 = 0.32$), número de puntos ($R^2 = 0.33$), longitud de la pendiente ($R^2 = 0.28$) y, además, destaca la pendiente máxima (S max, $R^2 = 0.37$), que en la estación total solo alcanzó un valor de 0.12, presentando la mayor diferencia.

Los demás parámetros presentan valores de R^2 por debajo de 0.20, llegando incluso a 0, lo que indica que su grado de influencia es bajo o nulo.

Entre ellos, se encuentran las elevaciones que no representan una relación significativa con el volumen de corte en ninguno de los métodos analizados.

5.4.2. Influencia de los parámetros geomorfométricos en el volumen de relleno total:

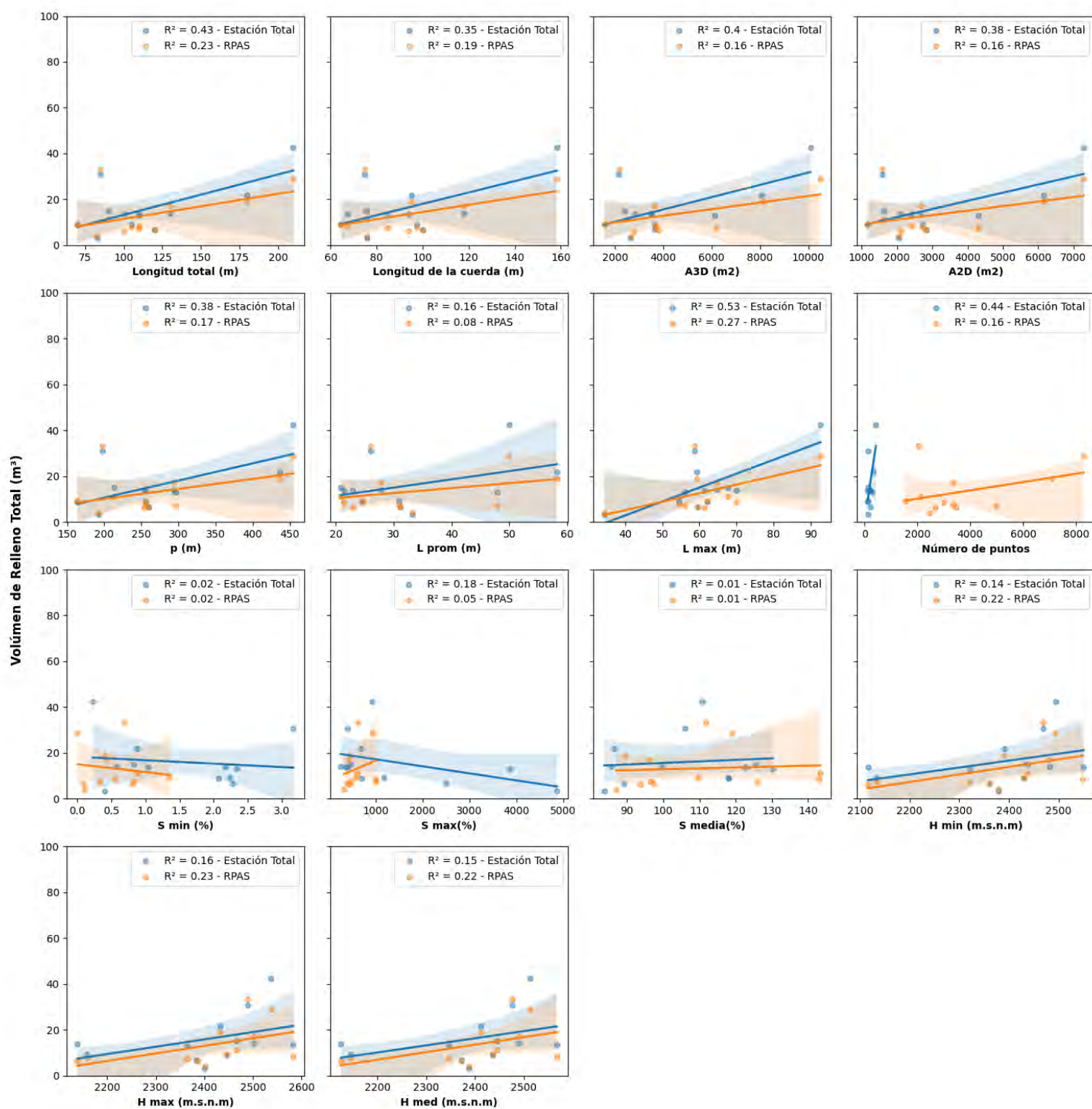
Se evaluaron los valores de R^2 obtenidos para los 14 parámetros geomorfométricos con respecto al volumen de relleno total según cada método de medición. Los resultados obtenidos se visualizan en la siguiente tabla y figura:

Tabla 52. Valores de R^2 de los parámetros geomorfométricos en relación con el volumen de relleno total para cada método de medición.

N°	Parámetros geomorfométricos	Volumen de relleno total	
		Estación total	RPAS
1	Longitud total (m)	0.43	0.23
2	Longitud de la cuerda (m)	0.35	0.19
3	A3D (m ²)	0.40	0.16
4	A2D (m ²)	0.38	0.16
5	p (m)	0.38	0.17
6	L prom (m)	0.16	0.08
7	L max (m)	0.53	0.27
8	Número de puntos	0.44	0.16
9	S min (%)	0.02	0.02
10	S max (%)	0.18	0.05
11	S media (%)	0.01	0.01
12	H min (m.s.n.m)	0.14	0.22
13	H max (m.s.n.m)	0.16	0.23
14	H med (m.s.n.m)	0.15	0.22

Nota. Elaboración propia.

Figura 83. Gráficos de R^2 de los parámetros geomorfométricos en relación con el volumen de relleno total para cada método de medición.



Nota. Elaboración propia.

Como se observa en la tabla y figura presentada, en la estación total, los parámetros con mayor influencia en la variabilidad del volumen de relleno total son la longitud de la pendiente (L_{max} , $R^2 = 0.53$), el número de puntos ($R^2 = 0.44$), la longitud total ($R^2 = 0.43$) y el área 3D ($A3D$, $R^2 = 0.40$), los cuales presentan una relación fuerte. Por otro lado, el área 2D ($A2D$, $R^2 = 0.38$), el perímetro (p , $R^2 = 0.38$) y la longitud de la cuerda ($R^2 = 0.35$) muestran una relación moderada con el volumen de relleno total.

Por otro lado, en el RPAS, los valores de R^2 son menores en comparación con la estación total, ya que ningún parámetro supera los 0.30. El parámetro con mayor influencia es la longitud de la pendiente (L_{max} , $R^2 = 0.27$), seguido por la longitud total ($R^2 = 0.23$). Además, a diferencia de la estación total, en el RPAS las elevaciones presentan influencias moderadas, con valores de R^2 entre 0.22 y 0.23.

Los demás parámetros presentan valores de R^2 por debajo de 0.20, lo que indica una influencia baja o nula en la variabilidad del volumen del relleno total en ambos métodos de medición.

5.4.3. Influencia de la morfometría del terreno en la generación de banquetas según el método de medición por sector:

La generación de banquetas en una carretera está determinada por la interacción entre el diseño geométrico y la morfometría del terreno. Como el diseño geométrico es constante para cada sector de mejoramiento, las diferencias en la presencia o ausencia de banquetas dependen exclusivamente de las variaciones en la superficie del terreno obtenida mediante ambos métodos de medición (RPAS y estación total). Este análisis busca evaluar en qué medida la morfometría del terreno influye en la generación de banquetas en cada sector según el método de medición utilizado.

- **Variación en la generación de banquetas según el método de medición por sector:** En este análisis se examina cómo la generación de banquetas cambia en cada sector de mejoramiento dependiendo del método de medición utilizado. Para ello, se comparan los diseños con las superficies obtenidas con RPAS y estación total en cada sección transversal, identificando si la presencia o ausencia de banquetas varía entre ambos métodos, permitiendo visualizar en qué sectores estas diferencias son más notorias y cómo influyen en el resultado final del diseño.

Tabla 53. *Cantidad de banquetas generadas según el método de medición por sector.*

N°	Sector	Estación total	RPAS	Diferencia
1	SM-02	4	3	1
2	SM-03	9	7	2
3	SM-05.1	3	3	0
4	SM-06	2	2	0
5	SM-07	0	0	0
6	SM-08	5	3	2
7	SM-09	0	0	0
8	SM-10	7	5	2
9	SM-11	3	3	0
10	SM-12	3	2	1
11	SM-13	8	9	-1
12	SM-14	7	7	0
Total		51	44	7

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 53 presenta la cantidad de banquetas generadas en cada sector según el método de medición. Se observa que, en términos generales, la estación total genera un mayor número de banquetas (51 en total) en comparación con el RPAS (44 banquetas), con una diferencia de 7 banquetas.

Al analizar cada sector de manera individual, se identifican cuatro escenarios:

- **Sectores donde no se generan banquetas en ninguno de los métodos:** El SM-07 y SM-09 muestran un valor de 0 con ambos métodos, lo que indica que la geometría del terreno no favorece la generación de banquetas.
- **Sectores donde ambos métodos generan la misma cantidad de banquetas:** Se encuentran los sectores SM-05.1, SM-06, SM-11 y SM-14, donde la diferencia es 0, evidenciando que en estas zonas la variación en la superficie medida no afecta la generación de banquetas.
- **Sectores donde la estación total genera más banquetas que el RPAS:** Se encuentran los sectores SM-02, SM-03, SM-08, SM-10 y SM-12, con diferencias entre 1 y 2 banquetas, lo que indica que en estos sectores la superficie medida con estación total favorece la generación de banquetas en mayor medida que la obtenida con RPAS.
- **Sectores donde el RPAS genera más banquetas que la estación total:** El SM-13 es el único donde el RPAS genera una mayor cantidad que la estación total, con una diferencia de 1, siendo un caso particular.

La tendencia general muestra que la estación total permite una mayor generación de banquetas en la mayoría de los sectores que el RPAS. Esto resalta la influencia de la morfometría del terreno captada por cada método en la generación de banquetas y su impacto en el diseño final.

- **Diferencia en la cantidad de secciones que presentan variaciones en la generación de banquetas:** Este análisis se enfoca en cuantificar cuántas secciones transversales presentan diferencias en la generación de banquetas entre ambos métodos de medición. Para ello, se contabiliza el

número de secciones donde con un método se genera banqueteta y con el otro no. Si en una sección determinada ambos métodos coinciden en la presencia o ausencia de banquetas, no se considera una diferencia. En cambio, si en una sección se genera una banqueteta con alguna superficie, pero con la otra no, se considera que existe una diferencia. Este análisis permite determinar en qué sectores hay una mayor cantidad de secciones que difieren entre sí por ambos métodos y cómo la diferencia en la representación de la superficie impacta en el diseño geométrico de la carretera.

Tabla 54. *Número de secciones transversales que presentan variaciones en la generación de banquetas por sector.*

N°	Sector	Diferencia
1	SM-02	3
2	SM-03	4
3	SM-05.1	0
4	SM-06	2
5	SM-07	0
6	SM-08	2
7	SM-09	0
8	SM-10	2
9	SM-11	0
10	SM-12	1
11	SM-13	3
12	SM-14	2
Total		19

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 54 muestra la cantidad de secciones transversales en cada sector donde se presentan diferencias en la generación de banquetas entre ambos métodos de medición.

El SM-03 es el que presenta la mayor diferencia, con 4 secciones en las que la cantidad de banquetas generadas varía entre el método de RPAS y

la estación total, lo que indica que la superficie obtenida por ambos métodos presenta diferencias más marcadas que en los demás sectores.

Por otro lado, los sectores SM-05.1, SM-07, SM-09 y SM-11 no presentan ninguna variación, lo que indica que en estos casos la representación del terreno es similar entre los dos métodos de medición. El resto de los sectores presenta diferencias que oscilan entre 1 y 3 secciones.

En total, se identifican 19 secciones con variaciones, lo que indica que la forma en que se modela la superficie impacta en la geometría del diseño.

En términos generales, este análisis refleja que la variación en la generación de banquetas no es uniforme en todos los sectores y que hay ciertos tramos donde el método de medición influye más en la determinación de estas estructuras.

Las tablas de la generación de banquetas para cada sección transversal por sector de mejoramiento se presentan en los anexos.

5.5. Evaluación costo-tiempo:

En esta sección se analizan los costos y tiempos requeridos para realizar el levantamiento de los sectores de mejoramiento con RPAS y estación total, evaluando el costo total del levantamiento y el tiempo promedio por sector.

5.5.1. Evaluación del costo:

El análisis del costo para el levantamiento de los 12 sectores con RPAS y estación total considera los equipos, la mano de obra, la logística y los materiales requeridos según la metodología empleada. A continuación, se presentan los costos desglosados para cada método, seguidos de la comparación de los costos totales entre ambos levantamientos:

Tabla 55. Costo del trabajo de levantamiento fotogramétrico con RPAS.

Trabajos de levantamiento							
Ítem	Descripción		Unidad	Cantidad	Días	Tarifa (S/)	Parcial (S/)
1.00	Equipos	Marca/Modelo					800.00
1.01	GNSS Diferencial (Base y rover) con accesorios	CHCNAV i90	Día	1.00	2.00	200.00	400.00
1.02	Dron	DJI Mavic 3 Enterprise	Día	1.00	2.00	200.00	400.00
2.00	Mano de Obra	Cargo					460.00
2.01	Topógrafo	Topógrafo	Día	1.00	2.00	120.00	240.00
2.02	Ayudantes	Ayudantes	Día	1.00	2.00	50.00	100.00
2.03	Conductor	Conductor	Día	1.00	2.00	60.00	120.00

Total (S/.)	1,260.00
--------------------	-----------------

Nota. Elaboración propia.

Tabla 56. Costos por hospedaje y alimentación del levantamiento fotogramétrico con RPAS.

Costo por hospedaje y alimentación						
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Días	Tarifa (S/)	Parcial (S/)
1.00	Hospedaje					360.00
1.01	Levantamiento					
1.01.01	Topógrafo	Día	1.00	3.00	40.00	120.00
1.01.02	Ayudantes	Día	1.00	3.00	40.00	120.00
1.01.03	Conductor	Día	1.00	3.00	40.00	120.00
2.00	Alimentación					270.00
2.01	Levantamiento					
2.01.01	Topógrafo	Día	1.00	3.00	30.00	90.00
2.01.02	Ayudantes	Día	1.00	3.00	30.00	90.00
2.01.03	Conductor	Día	1.00	3.00	30.00	90.00

Total (S/.)	630.00
--------------------	---------------

Nota. Elaboración propia.

Tabla 57. Costos por materiales del levantamiento fotogramétrico con RPAS.

Costo por materiales					
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa (S/)	Parcial (S/)
1.00	Materiales				132.25
1.01	Yeso	bls.	1.00	17.90	17.90
1.02	Varillas de fierros de 1/2"	Und.	1.00	41.55	41.55
1.03	Comba	Und.	1.00	40.90	40.90
1.04	Agua	Und.	2.00	8.50	17.00
1.05	Cinta métrica	Und.	1.00	14.90	14.90
2.00	Útiles de Escritorio				6.50
2.01	Libreta	Und.	1.00	6.50	6.50
3.00	Equipos de protección				147.20
3.01	Casco de seguridad	Und.	2.00	14.90	29.80
3.02	Chaleco	Und.	2.00	13.90	27.80
3.03	Botas de seguridad	Und.	2.00	36.90	73.80
3.04	Lentes de seguridad	Und.	2.00	7.90	15.80
4.00	Equipos de comunicación				250.00
4.01	Radios	Und.	2.00	125.00	250.00

Total (S/.)	535.95
--------------------	---------------

Nota. Elaboración propia.

Tabla 58. Costos por movilización y desmovilización del levantamiento fotogramétrico con RPAS.

Costo por movilización y desmovilización					
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa (S/)	Parcial (S/)
1.00	Movilización				1,700.00
1.01	Movilización y desmovilización de equipos	glb	1.00	1,700.00	1,700.00

Total (S/.)	1,700.00
--------------------	-----------------

Nota. Elaboración propia.

Tabla 59. Presupuesto total del levantamiento fotogramétrico con RPAS.

Presupuesto total del levantamiento con RPAS				
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo
1.00	Trabajos de levantamiento	glb	1.00	S/. 1,260.00
2.00	Costo por hospedaje y alimentación	glb	1.00	S/. 630.00
3.00	Costo por materiales	glb	1.00	S/. 535.95
4.00	Costo por movilización y desmovilización	glb	1.00	S/. 1,700.00
Costo Total (S/.)				S/. 4,125.95

Nota. Elaboración propia.

Tabla 60. Costo del trabajo de levantamiento topográfico con estación total.

Trabajos de levantamiento							
Ítem	Descripción		Unidad	Cantidad	Días	Tarifa (S/)	Parcial (S/)
1.00	Equipos	Marca/Modelo					600.00
1.01	Estación total con accesorios	Leica TS-06 Plus 2" - R500	Día	1.00	4.00	150.00	600.00
2.00	Mano de Obra	Cargo					1,120.00
2.01	Topógrafo	Topógrafo	Día	1.00	4.00	120.00	480.00
2.02	Ayudantes	Ayudantes	Día	2.00	4.00	50.00	400.00
2.03	Conductor	Conductor	Día	1.00	4.00	60.00	240.00
Total (S/.)							1,720.00

Nota. Elaboración propia.

Tabla 61. Costos por hospedaje y alimentación del levantamiento topográfico con estación total.

Costo por hospedaje y alimentación						
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Días	Tarifa (S/)	Parcial (S/)
1.00	Hospedaje					800.00
1.01	Levantamiento					
1.01.01	Topógrafo	Día	1.00	5.00	40.00	200.00
1.01.02	Ayudantes	Día	2.00	5.00	40.00	400.00
1.01.03	Conductor	Día	1.00	5.00	40.00	200.00
2.00	Alimentación					600.00
2.01	Levantamiento					
2.01.01	Topógrafo	Día	1.00	5.00	30.00	150.00
2.01.02	Ayudantes	Día	2.00	5.00	30.00	300.00
2.01.03	Conductor	Día	1.00	5.00	30.00	150.00
Total (S/.)						1,400.00

Nota. Elaboración propia.

Tabla 62. Costos por materiales del levantamiento topográfico con estación total.

Costo por materiales					
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa (S/)	Parcial (S/)
1.00	Materiales				40.40
1.01	Agua	Und.	3.00	8.50	25.50
1.02	Cinta métrica	Und.	1.00	14.90	14.90
2.00	Útiles de Escritorio				6.50
2.01	Libreta	Und.	1.00	6.50	6.50
3.00	Equipos de protección				220.80
3.01	Casco de seguridad	Und.	3.00	14.90	44.70
3.02	Chaleco	Und.	3.00	13.90	41.70
3.03	Botas de seguridad	Und.	3.00	36.90	110.70
3.04	Lentes de seguridad	Und.	3.00	7.90	23.70
4.00	Equipos de comunicación				375.00
4.01	Radios	Und.	3.00	125.00	375.00
Total (S/.)					642.70

Nota. Elaboración propia.

Tabla 63. Costos por movilización y desmovilización del levantamiento topográfico con estación total.

Costo por movilización y desmovilización					
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa (S/)	Parcial (S/)
1.00	Movilización				1,700.00
1.01	Movilización y desmovilización de equipos	glb	1.00	1,700.00	1,700.00
Total (S/.)					1,700.00

Nota. Elaboración propia.

Tabla 64. *Presupuesto total del levantamiento topográfico con estación total.*

Presupuesto total del levantamiento con estación total				
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo
1.00	Trabajos de levantamiento	glb	1.00	S/. 1,720.00
2.00	Costo por hospedaje y alimentación	glb	1.00	S/. 1,400.00
3.00	Costo por materiales	glb	1.00	S/. 642.70
4.00	Costo por movilización y desmovilización	glb	1.00	S/. 1,700.00
Costo Total (S/.)				S/. 5,462.70

Nota. Elaboración propia.

Tabla 65. *Comparación de los costos totales por método de medición.*

Ítem	Descripción	Costo por método de medición		
		RPAS	Estación total	Diferencia
1.00	Trabajos de levantamiento	S/. 1,260.00	S/. 1,720.00	S/. 460.00
2.00	Costo por hospedaje y alimentación	S/. 630.00	S/. 1,400.00	S/. 770.00
3.00	Costo por materiales	S/. 535.95	S/. 642.70	S/. 106.75
4.00	Costo por movilización y desmovilización	S/. 1,700.00	S/. 1,700.00	S/. -
Costo Total (S/.)		S/. 4,125.95	S/. 5,462.70	S/. 1,336.75

Nota. Elaboración propia.

El análisis de los costos totales evidencia que el levantamiento con RPAS tiene un menor costo en comparación con la estación total. Para ello, los costos se desglosaron en cuatro categorías: I) Trabajos de levantamiento, II) hospedaje y alimentación, III) materiales, y IV) movilización y desmovilización. En todas las categorías, excepto en la última, el método con estación total presenta mayores costos. La principal diferencia se origina en el tiempo requerido para el trabajo de campo. El RPAS logró completar el levantamiento de los 12 sectores en tan solo 2 días, mientras que con estación total se necesitó el doble de tiempo (4 días). Esta mayor duración se traduce en un incremento de costos asociados a la mano de obra, alimentación, hospedaje, consumo de materiales y uso de equipos. Además, la estación total requiere una cuadrilla de 4 personas, frente a las 3 necesarias para operar el RPAS, lo cual también incide

en los costos laborales. Como resultado, el costo total del levantamiento con RPAS asciende a S/. 4,125.95, mientras con estación total es de S/. 5,462.70, generando una diferencia de S/. 1,336.75, lo que representa un ahorro del 24.47 % a favor del método con RPAS. En términos unitarios, el costo promedio por sector es de S/. 343.83 con RPAS y S/. 455.23 con estación total, reflejando una diferencia de S/. 111.40 por sector.

Por otro lado, se analizó el impacto económico en el movimiento de tierras a partir de los volúmenes totales de corte y relleno obtenidos con ambos métodos. Para ello, se aplicaron los precios unitarios por m³ de excavación y terraplén tomados del estudio de metrados, costos y presupuesto del perfil de inversión del proyecto de mejoramiento. Esta evaluación permite estimar la variación en los costos globales del proyecto según el método de medición empleado. A continuación, se presenta la comparación de los costos calculados:

Tabla 66. Comparación de los costos del movimiento de tierras.

ESTACION TOTAL	Explanación	Precio unitario (S/.)	Movimiento de tierra (m ³)	Sub total (S/.)
	Excavación	S/ 32.83	19672.62	S/ 645,852.11
	Terraplén	S/ 42.90	193.09	S/ 8,283.56
	Costo Total (S/.)			S/ 654,135.68

RPAS	Explanación	Precio unitario (S/.)	Movimiento de tierra (m ³)	Sub total (S/.)
	Excavación	S/ 32.83	18980.75	S/ 623,138.02
	Terraplén	S/ 42.90	159.28	S/ 6,833.11
	Costo Total (S/.)			S/ 629,971.13

Diferencia (S/.)		S/ 24,164.54
-------------------------	--	---------------------

Nota. Elaboración propia.

Al aplicar los mismos precios unitarios de excavación (corte) y terraplén (relleno), se observa que el costo total del movimiento de tierras calculado a partir de los volúmenes obtenidos con la estación total es superior al estimado

con RPAS. Esta diferencia se mantiene en cada categoría de obra, donde los costos derivados del uso de estación total son elevados. En términos absolutos, la diferencia alcanza los S/ 24,164.54, lo que representa una reducción del 3.69 % en los costos al emplear el RPAS como método de levantamiento.

Esta disminución en el costo total se atribuye a la mayor densidad de puntos capturados por el RPAS, permitiendo una representación más precisa y continua del terreno. En consecuencia, los volúmenes generados reflejan de manera más realista las condiciones de la superficie, generando estimaciones de costos más ajustadas a la realidad. En contraste, el levantamiento con estación total, al registrar un menor número de puntos, tiende a generalizar la geometría del terreno, lo que puede derivar en valores superiores de volumen y los costos asociados.

5.5.2. Evaluación del tiempo:

El análisis del tiempo en este estudio abarca todas las etapas del relevamiento topográfico, desde la planificación inicial, el trabajo de campo y el procesamiento de la información, hasta la obtención del metrado de movimiento de tierras. Se comparan los tiempos requeridos en la metodología con RPAS y estación total, evaluando su eficiencia en cada fase.

Antes de presentar la comparación de tiempos entre ambos métodos, se determinaron los tiempos del procesamiento fotogramétrico en cada área de vuelo, considerando la generación de la ortofoto y del MDT.

Tabla 67. *Tiempos del procesamiento fotogramétrico por área de vuelo.*

Área de vuelo	Etapas	Tiempo (h)	
		Sub-Total	Total
AV-02	Generación de la ortofoto	4.30	5.73
	Generación del MDT	1.43	
AV-03	Generación de la ortofoto	4.80	5.77
	Generación del MDT	0.97	
AV-05.1	Generación de la ortofoto	2.65	4.04
	Generación del MDT	1.39	
AV-06	Generación de la ortofoto	7.72	8.84
	Generación del MDT	1.12	
AV-07	Generación de la ortofoto	6.26	7.18
	Generación del MDT	0.92	
AV-08	Generación de la ortofoto	8.82	14.85
	Generación del MDT	6.03	
AV-09-10	Generación de la ortofoto	1.12	1.54
	Generación del MDT	0.42	
AV-11	Generación de la ortofoto	2.60	4.16
	Generación del MDT	1.56	
AV-12	Generación de la ortofoto	3.15	4.92
	Generación del MDT	1.77	
AV-13-14	Generación de la ortofoto	8.96	20.14
	Generación del MDT	11.18	
Total			77.17

Nota. Elaboración propia.

El tiempo de procesamiento fotogramétrico varía entre las diferentes áreas de vuelo debido a factores como la cantidad de imágenes procesadas y la extensión de la zona de estudio. El AV-09-10 presenta el menor tiempo con 1.54 horas, debido a que en esta zona se realizó el vuelo a una altura de 120 m, generando un menor número de imágenes a procesar (42 fotos) en comparación con las demás áreas, donde se voló a 70 m y se superaron las 100 imágenes.

Por otro lado, las áreas con mayor tiempo son el AV-08 (14.85 horas) y el AV-13-14 (20.14 horas), ya que abarcan las mayores áreas de estudio y presentan la mayor cantidad de imágenes a procesar (290 y 335 fotos respectivamente).

En tercer lugar, el AV-06 alcanza las 8.84 horas de procesamiento, con 251

imágenes, lo que también contribuye a su mayor tiempo de cálculo. Las demás áreas presentan tiempos comprendidos entre 4 y 7 horas, los cuales presentan una cantidad de imágenes que varía entre 100 y 200 fotos.

En total, el procesamiento fotogramétrico de los 12 sectores demandó 77.17 horas de trabajo. Cabe mencionar que el tiempo total de procesamiento se obtiene a partir de la suma de las etapas de generación de la ortofoto y del MDT, cada una compuesta por diversas subetapas.

Con el objetivo de determinar un tiempo de referencia para el procesamiento fotogramétrico por sector, se calculó el promedio del tiempo empleado en cada una de sus etapas: Generación de la ortofoto y del MDT. Este cálculo se realizó considerando los tiempos de todas las áreas de vuelo analizadas por etapa, permitiendo establecer un valor representativo del tiempo que, en promedio, se requiere para procesar un sector completo. A continuación, se presentan los valores promedio obtenidos en la siguiente tabla:

Tabla 68. *Tiempo promedio del procesamiento fotogramétrico por sector.*

Etapas de procesamiento	Tiempo promedio (h)
Generación de la ortofoto	5.04
Generación del MDT	2.68
Total	7.72

Nota. Elaboración propia.

Los resultados obtenidos muestran que, en promedio, el tiempo requerido para la generación de la ortofoto es de 5.04 horas, mientras que la generación del MDT demanda un promedio de 2.68 horas. Esto da como resultado un tiempo total estimado de 7.72 horas para el procesamiento fotogramétrico de un sector en promedio.

Para evaluar el tiempo requerido en cada método de levantamiento, se ha determinado la duración de todas las etapas involucradas, desde la

planificación inicial hasta la obtención del metrado de movimiento de tierras. Este análisis permite comparar la eficiencia temporal entre el uso del RPAS y la estación total.

A continuación, se presentan las tablas con los tiempos registrados para cada método, los cuales presentan el tiempo promedio requerido para el levantamiento de un sector, así como la comparación de los tiempos totales entre ambos métodos de medición.

Tabla 69. *Tiempo promedio del levantamiento fotogramétrico con RPAS por sector.*

Trabajo de pre-campo		
Ítem	Etapas	Tiempo (h)
01.0	Caracterización de la zona de estudio	1.00
02.0	Planificación del levantamiento fotogramétrico	1.00
Total		2.00

Trabajo de campo		
Ítem	Etapas	Tiempo (h)
01.0	Medición de los PAF con el método RTK	1.00
02.0	Vuelo fotogramétrico	0.50
Total		1.50

Procesamiento de la información		
Ítem	Etapas	Tiempo (h)
01.0	Transformación de coordenadas UTM a topográficas de los PAF	0.50
02.0	Procesamiento fotogramétrico	7.72
02.1	Generación de la ortofoto	5.04
02.2	Generación del MDT	2.68
03.0	Generación de la superficie topográfica	0.50
04.0	Diseño geométrico	3.00
05.0	Generación del metrado de movimiento de tierra	1.00
Total		12.72

Nota. Elaboración propia.

Tabla 70. *Tiempo promedio del levantamiento topográfico con estación total por sector.*

Trabajo de pre-campo		
Ítem	Etapas	Tiempo (h)
01.0	Caracterización de la zona de estudio	1.00
02.0	Planificación del levantamiento topográfico	1.00
Total		2.00

Trabajo de campo		
Ítem	Etapas	Tiempo (h)
01.0	Levantamiento topográfico con estación total	3.00
Total		3.00

Procesamiento de la información		
Ítem	Etapas	Tiempo (h)
01.0	Descarga y revisión de los puntos del levantamiento con estación total	1.00
02.0	Generación de la superficie topográfica	1.00
03.0	Diseño geométrico	3.00
04.0	Generación del metrado de movimiento de tierra	1.00
Total		6.00

Nota. Elaboración propia.

Tabla 71. *Comparación de tiempos totales entre el RPAS y la estación total por sector.*

Método de medición	Tiempo por fases del levantamiento (h)			
	Trabajo de pre-campo	Trabajo de campo	Procesamiento de la información	Total
RPAS	2.00	1.50	12.72	16.22
Estación total	2.00	3.00	6.00	11.00
Diferencia	0.00	1.50	6.72	5.22

Nota. Elaboración propia.

En las tablas mostradas anteriormente, se presentan los tiempos promedios requeridos para levantar y procesar un sector utilizando el RPAS y estación total, diferenciados por las fases del levantamiento.

Al comparar los tiempos totales de ambos métodos, se observa que, en la fase de trabajo de pre-campo, ambos métodos requieren el mismo tiempo, con 2.00 horas cada uno. Sin embargo, en la fase de trabajo de campo, el levantamiento

con estación total requiere 3.00 horas, lo que representa el doble del tiempo necesario en comparación con el RPAS, que solo demanda 1.50 horas.

Por otro lado, la mayor diferencia se encuentra en el procesamiento de información, donde el RPAS requiere 12.72 horas, más del doble del tiempo necesario con estación total (6.00 horas). Esta diferencia resalta la mayor carga de procesamiento que implica el uso del RPAS.

Como resultado, se observa que el método con RPAS demanda 16.22 horas, mientras que la estación total requiere 11.00 horas, lo que indica que el RPAS necesita 5.22 horas adicionales en promedio por sector, representando un incremento del 47.45% en comparación con la estación total.

El uso del RPAS permite optimizar el tiempo en campo, reduciéndolo a la mitad en comparación con la estación total. Sin embargo, presenta una desventaja en el procesamiento de la información, donde el tiempo requerido es más del doble que el de la estación total. Esto implica que, aunque el RPAS permite una recolección más rápida de datos del terreno, su procesamiento es más lento.

Los procedimientos metodológicos, el procesamiento de la información y los resultados presentados en la presente investigación son de autoría propia y han sido desarrollados específicamente para este estudio.

CAPÍTULO VI

6. DISCUSIÓN:

- a) De acuerdo con los resultados, se puede obtener la precisión planimétrica para aplicaciones cartográficas a escala grande. Según el Manual Técnico para Generación de Ortoimágenes del IGN (2021), la exactitud posicional de los PAF para la escala 1:1000 tomada como referencia, debe cumplir con un umbral de 0.0800 m para el RMSE_{xy}, así como un umbral de 0.1400 m para el intervalo de confianza del 95 %. En este estudio, los valores de RMSE totales en ambos ejes (este y norte) por área procesada presentaron un rango de 0.0072 m a 0.0160 m, mientras que el RMSE global fue de 0.0113 m. Dado que todos estos valores se encuentran por debajo del umbral de 0.0800 m, se confirma que la precisión planimétrica de los PAF cumple con los criterios normativos para la escala evaluada. Además, al encontrarse dentro del primer umbral, se confirma que también se mantiene por debajo del umbral al 95% de confianza (0.1400 m), reforzando la validez de los resultados obtenidos.

Por otro lado, el análisis de los resultados obtenidos permite evaluar la precisión altimétrica en relación a los estándares establecidos para productos cartográficos de escala 1:1000. Siguiendo los mismos criterios normativos, la exactitud altimétrica debe cumplir un umbral de 0.0600 m para el RMSE altimétrico y de 0.1200 m para el intervalo de confianza al 95 % (IGN, 2021). Los valores obtenidos en la presente investigación muestran un RMSE altimétrico por área procesada que oscila entre 0.0050 m a 0.0170 m, lo que indica que todos los resultados se encuentran por debajo del umbral de 0.0600 m establecido por norma. Asimismo, al considerar el RMSE altimétrico global de 0.0121 m, se confirma que se mantiene dentro del umbral establecido. Además, dado que todos los valores obtenidos están por debajo de este

límite, también se encuentran dentro del umbral del 95 % de confianza (0.1200 m), garantizando la precisión exigida para los PAF.

b) Los resultados obtenidos en la estimación de volúmenes de corte mediante RPAS evidencian un alto nivel de precisión respecto a los valores registrados con estación total:

- El análisis por sector revela que el SM-02 presenta la mayor diferencia en todas las categorías, con un APE de 29.69 % y una precisión de 70.31 %. En contraste, el SM-10 registra el menor APE (0.35 %) y la mayor precisión (99.65 %) en todos los tipos de materiales.
- El análisis del MAPE en el volumen de corte total arrojó un 10.72 %, equivalente a una precisión del 89.28 %. El mayor error se registró en el material suelto con un MAPE de 10.90 % (precisión de 89.10 %), mientras que la roca suelta presentó la mejor precisión con un 89.47 % (MAPE de 10.53%). En conjunto, todos los materiales evaluados mostraron una precisión superior al 89% en promedio por sector.
- El APE global (suma de los 12 sectores) del volumen de corte total fue de 3.52 %, reflejando una precisión del 96.48 %. Por material, la roca fija tuvo el menor error (1.77 %, precisión de 98.23 %), mientras que el material suelto presentó el mayor (4.03 %, precisión de 95.97 %). Estos resultados confirman que el RPAS logra estimar volúmenes de corte con precisión superior al 95 %.
- En cuanto a los RMSE, los resultados globales evidencian buena precisión en la estimación de volúmenes. El corte total presentó un RMSE de 239.936 m³. Por material, la roca fija tuvo la menor variabilidad (68.575 m³), mientras que el material suelto registró mayor dispersión (102.119 m³).
- Finalmente, el análisis del R² demostró una alta correlación entre las estimaciones del RPAS y la estación total. El volumen de corte total alcanzó un R² de 0.95,

destacando la roca fija con el valor más alto (0.97), mientras que el material suelto presentó el menor (0.95), confirmando la fiabilidad del RPAS.

En cuanto los resultados del volumen de relleno estimado con RPAS muestran una mayor variabilidad en la precisión respecto a los obtenidos con estación total:

- Las precisiones por sector en la estimación del relleno con RPAS evidencian una alta variabilidad en los APE, según el tipo de procedencia y sector evaluado. Para el relleno total, el SM-09 obtuvo la mayor precisión con un 96.93 % (APE: 3.07 %) y el SM-02 la menor con 45.83 % (APE: 54.17 %). En el relleno propio, el SM-06 alcanzó la mejor precisión con 96.65 % (APE: 3.35 %), mientras que nuevamente el SM-02 fue el menos preciso, con un 40.47 % (APE: 59.53 %). En el relleno de préstamo, varios sectores (SM-03, SM-05.1, SM-06, SM-08, SM-13 y SM-14) lograron una coincidencia total (APE: 0%), mientras que los SM-09 y SM-12 presentaron las menores precisiones con 68.66 % (APE: 31.34 %) y 80.53 % (APE: 19.47 %), respectivamente. En los SM-02, SM-07, SM-10 y SM-11 no se calcularon precisiones por volúmenes nulos en ambos métodos. Finalmente, para la eliminación de material, el SM-10 obtuvo la mejor precisión, con un 99.39 % (APE: 0.61 %) y el SM-02 la menor, con un 70.58 % (APE: 29.42 %).
- El análisis del MAPE para el volumen de relleno total fue de 23.53 %, con una precisión moderada del 76.47 %. Por tipo de procedencia, el relleno propio presentó el mayor error con un MAPE de 24.77 % (precisión: 75.23 %), mientras que el relleno de préstamo tuvo el mejor desempeño, con un MAPE de 6.35 % (precisión: 93.65 %). En conjunto, la precisión promedio por sector superó el 75 % en todas las categorías.
- El APE global (suma de los 12 sectores) del volumen de relleno fue de 17.51 %, indicando una precisión de 82.49 %. Por procedencia, el mayor error se dio en el

relleno de préstamo con un APE de 18.86 % (precisión: 81.14 %). En contraste, la eliminación de material, con un APE de 3.38 %, lo que se traduce una precisión del 96.62 %. En general, el RPAS demostró buena capacidad para estimar volúmenes de relleno, superando el 81 % de precisión en todas las categorías.

- En cuanto a los RMSE, sus resultados indican una precisión destacada en su estimación volumétrica. Para el relleno total fue de 5.353 m³, reflejando buena precisión. Por tipo de procedencia, el relleno de préstamo tuvo el menor RMSE (0.385 m³), mientras que la eliminación de material presentó el mayor (237.759 m³), debido a su elevado volumen, lo que genera una mayor dispersión en la estimación.
- Por último, el análisis del R² evidenció una buena correlación entre ambos métodos. El relleno total obtuvo un R² de 0.81, reflejando una relación perfecta. En tanto, el relleno de préstamo el menor valor, con 0.67, indicando una relación muy fuerte. Finalmente, la eliminación de material alcanzó el valor más alto, con un R² de 0.95, reflejando una excelente concordancia entre las mediciones.

Los resultados muestran que los volúmenes totales de corte y relleno estimados con RPAS son ligeramente menores que los obtenidos con estación total, sin implicar menor precisión. Gracias a su mayor densidad de puntos, el RPAS genera modelos más detallados del terreno, favoreciendo estimaciones más ajustadas, mientras que la estación total, con menos datos, tiende a generalizar y generar valores superiores de volúmenes.

La investigación evidenció diferencias del 3.52 % en volúmenes de corte y 17.51 % en los de relleno entre el RPAS y la estación total, siendo menores los valores obtenidos con RPAS. Estos resultados reflejan una alta precisión en las estimaciones: 96.48 % para corte y 82.49 % para relleno. En tanto, Cuenca (2021)

señaló que el RPAS presentaba menor precisión que la estación total en estimaciones volumétricas. Sin embargo, esta afirmación contrasta con los hallazgos de la presente investigación, en la que el RPAS mostró un nivel de precisión comparable al de la estación total. Por otro lado, Vásquez (2021) reportó pequeñas diferencias entre los volúmenes obtenidos con RPAS y estación total, con variaciones entre 0.40 % y 1.30 %, siendo mayores los obtenidos con el drone. La diferencia en los volúmenes puede ser atribuida a la metodología de levantamiento y a la densidad de puntos, pero en términos de precisión, los resultados del RPAS son comparables a los de la estación total. Además, Alca y Gutierrez (2021) destacaron que el método de diferencia de superficies con RPAS ofrece una mayor precisión en la estimación volumétrica, gracias a su capacidad de representar con mayor detalle las superficies del terreno. Esta afirmación se ve respaldada por los resultados obtenidos en la presente investigación.

- c) En la estimación del volumen de corte total, los parámetros geomorfométricos más influyentes con estación total fueron el perímetro, las áreas 2D y 3D, la longitud total y número de puntos ($R^2 > 0.40$), evidenciando una fuerte incidencia. En el caso del RPAS, estos conservaron su importancia con R^2 entre 0.30 y 0.40, sumándose la pendiente máxima (S_{max}) como factor de influencia moderada. Esta última mostró la mayor diferencia entre ambos métodos: R^2 de 0.12 en estación total frente a 0.37 en RPAS, atribuible a la mayor densidad de puntos capturada por el RPAS, lo que permite representar con mayor detalle las zonas de pendiente pronunciada y, por tanto, realizar una estimación más precisa del volumen de corte. En general, la S_{max} fue el parámetro más determinante y diferenciador, siendo clave en proyectos de movimiento de tierras. El RPAS evidenció mayor precisión al modelar con detalle las superficies inclinadas, donde se concentran los mayores volúmenes de excavación y se establecen, en muchos de los casos, la generación de banquetas.

Estos resultados coinciden con estudios previos que destacan la influencia decisiva de la pendiente en la modelación del terreno. Navia (2023) identificó que la pendiente de un talud influye de manera significativa en el factor de seguridad durante las etapas de excavación y construcción, lo que subraya la necesidad de una representación precisa de las pendientes en el diseño de taludes. De manera similar, Coco y Buccolini (2015) señalaron que el Índice Morfométrico de Pendiente (MSI) es fundamental para entender la evolución del paisaje y los procesos erosivos, permitiendo analizar de manera más precisa los patrones morfodinámicos y los procesos de modelado del terreno. En este contexto, los resultados de la presente investigación confirman que la mayor capacidad del RPAS para representar zonas de alta pendiente incide directamente en la precisión del cálculo de volúmenes de corte, superando las limitaciones de la estación total en terrenos con topografía compleja.

En la estimación del volumen de relleno total, la estación total mostró una mayor influencia de parámetros geomorfométricos como la longitud de la pendiente, el número de puntos, la longitud total y área 3D ($R^2 > 0.40$), reflejando una fuerte correlación. En el método RPAS, aunque la influencia fue menor, destacaron la longitud de la pendiente, la longitud total y las elevaciones (R^2 entre 0.20 y 0.30), siendo una relación moderada. Además, se evidenciaron diferencias notables en su grado de influencia de los parámetros, tales como: el número de puntos, la longitud de la pendiente, el área 3D, entre otros. Sin embargo, no se logra identificar un patrón fijo en estas diferencias, posiblemente debido a los bajos volúmenes de relleno total, que limitan la expresión uniforme de las características geométricas en ambos métodos de levantamiento.

En cuanto a la influencia de la morfometría del terreno en la generación de banquetas, se identificaron diferencias pese al diseño geométrico constante en todos los sectores, atribuibles al método de medición utilizado, que afecta directamente la caracterización de la pendiente, factor clave en dicho diseño. Según el MTC (2018), el Manual de Carreteras - Diseño Geométrico DG-2018, establece la necesidad de banquetas en cortes superiores a los 7 metros de altura en terrenos inestables, con la posibilidad de ajustar este valor según los estudios geológicos de cada zona. Este requerimiento busca evitar deslizamientos y facilitar la compactación del terraplén, por lo que una correcta representación de la pendiente es esencial para aplicar adecuadamente el diseño. En este contexto, el uso del RPAS, al generar una mayor densidad de puntos, permite una representación más detallada y precisa del relieve, lo que mejora la caracterización de pendientes locales. En contraste, la estación total, al trabajar con menos puntos, tiende a simplificar la superficie, lo que puede derivar en errores en la identificación de zonas críticas para la implementación de banquetas. Como resultado, se generaron una mayor cantidad de banquetas con la superficie obtenida por la estación total (51) que con la generada por el RPAS (44). Además, se identificaron 19 secciones transversales en las que ambos métodos difieren en la presencia o ausencia de banquetas, lo que evidencia cómo las diferencias morfométricas entre modelos influyen directamente en la aplicación del diseño vial. Estas discrepancias no solo afectan el diseño técnico, sino también la planificación y los costos del proyecto. Una mayor cantidad de banquetas implica mayores trabajos de movimiento de tierras, lo que incrementa el uso de materiales, mano de obra, tiempo y costo. Asimismo, una medición imprecisa puede alterar la ubicación y dimensiones de estas estructuras, comprometiendo la estabilidad y funcionalidad de la carretera.

d) Los resultados de la evaluación del costo muestran que la implementación de tecnologías RPAS es una alternativa más eficiente frente al uso de métodos tradicionales como la estación total. El análisis comparativo indica que el levantamiento con RPAS de los 12 sectores redujo el costo en un 24.47 %, lo que equivale a S/ 1,336.75 de diferencia a favor del RPAS. Además, el costo unitario por sector mostró un ahorro promedio de S/. 111.40, lo que resalta la eficiencia del RPAS en este tipo de levantamientos. Estos hallazgos coinciden con estudios previos: Vásquez (2021) reportó una reducción del 60.28% con drones en comparación con la estación total, generando un ahorro de S/ 1593.33 debido a la menor duración y requerimientos operativos. Cuenca (2021) también observó que el levantamiento aerofotogramétrico con drone fue más económico en comparación con la estación total, con una diferencia de S/ 216.15. León (2018) confirmó que el costo del levantamiento con drone fue inferior al de la estación total, con una diferencia de S/ 84.44. En cuanto al costo del movimiento de tierras, el análisis de los volúmenes obtenidos con RPAS y estación total también mostraron una diferencia económica significativa. Utilizando los mismos precios unitarios, el costo total del levantamiento con RPAS fue 3.69 % inferior, lo que representó una reducción de S/ 24,164.54 respecto a la estación total. La mayor densidad de puntos del RPAS permite una representación más precisa del terreno, ajustando mejor los volúmenes y los costos en comparación con la estación total, cuyo menor número de puntos tiende a generalizar los valores y aumentar los costos.

En la evaluación del tiempo, se determinó que el método RPAS, si bien agiliza la recolección de datos en campo (1.50 h por sector frente a 3.00 h de la estación total), presenta una mayor carga de trabajo en gabinete. El procesamiento fotogramétrico total de los 12 sectores tomó 77.17 horas, promediando 7.72 horas por sector (5.04 h para ortofoto y 2.68 h para MDT). Ambos métodos demandan 2.00 horas en pre-

campo, pero en gabinete, el RPAS requiere 12.72 horas por sector, más del doble que la estación total (6.00 h). En total, el RPAS demanda 16.22 horas por sector, frente a las 11.00 horas de la estación total, lo que representa un incremento del 47.45 % (5.22 h adicionales). El tiempo de procesamiento fotogramétrico se relaciona con la densidad de la nube de puntos, determinada por el GSD. Para la escala 1:1000, la RJ 053-2021 establece un GSD máximo de 10 cm; no obstante, en este estudio se empleó un GSD de 1.88 cm, cumpliendo con la normativa y generando mayor nivel de detalle, lo cual implica mayores tiempos de procesamiento, condicionados por el hardware y el software empleados, actuando como factores limitantes. Estos resultados coinciden con lo reportado por otros estudios. Cuenca (2021) identificó que el drone reduce drásticamente el tiempo en campo (0.5 h frente a 9.1 h de la estación total), aunque aumenta en gabinete (8.25 h frente a 1.00 h de la estación total), con un tiempo total de 8.75 h frente a 10.1 h de la estación total. Aunque la diferencia total fue de solo 1.35 horas, se resalta que el tiempo de procesamiento con drones depende en gran medida del hardware utilizado. Sin embargo, Vásquez (2021) reportó que el RPAS requirió 16.56 h frente a las 28.00 h de la estación total, logrando una reducción del 40.85%. De forma similar, León (2018) reportó una diferencia aún mayor: 9.6 h con drone frente a 50 h con estación total, lo que representa un ahorro del 80.8%. En conjunto, estos estudios confirman que, aunque el RPAS optimiza el tiempo en campo, su fase de procesamiento es más prolongada.

7. CONCLUSIONES:

- a) La evaluación de la precisión planimétrica y altimétrica del levantamiento fotogramétrico mediante RPAS evidenció un alto nivel de precisión para productos a escala 1:1000. Los valores de RMSE planimétricos, tanto por área como a nivel global (0.0113 m), se mantuvieron por debajo del umbral normativo de 0.0800 m; de igual forma, los RMSE altimétricos por área y el valor global (0.0121 m) fueron inferiores al umbral de 0.0600 m. Estos resultados se encuentran dentro del intervalo de confianza del 95%, lo que confirma la confiabilidad del modelo generado con RPAS para su aplicación en carreteras de montaña con topografía compleja.
- b) La estimación de volúmenes de corte y relleno mediante RPAS presentó una precisión significativa frente a la estación total. A nivel promedio por sector (MAPE), el volumen de corte total alcanzó un 10.72% (precisión de 89.28%), siendo la roca suelta la más precisa (MAPE = 10.53%) y el material suelto el de mayor error (MAPE = 10.90%); mientras que el volumen de relleno total registró un MAPE de 23.53% (precisión de 76.47%), destacando el relleno de préstamo como el más preciso (MAPE = 6.35%) y el relleno propio como el menos preciso (MAPE = 24.77%). En conjunto, la diferencia promedio por sector fue inferior al 11% en corte y al 25% en relleno (precisiones superiores al 89% y al 75% respectivamente). A nivel global (APE), el volumen de corte total presentó un 3.52% (precisión de 96.48%), con mayor precisión en roca fija (APE = 1.77%) y mayor error en material suelto (APE = 4.03%), mientras que el volumen de relleno total alcanzó un APE de 17.51% (precisión de 82.49%), siendo la eliminación de material la más precisa (APE = 3.38%) y el relleno de préstamo la de mayor error (APE = 18.86%). En todos los casos, la diferencia global fue inferior al 5% en corte y al 19% en relleno (precisiones superiores al 95% y al 81% respectivamente). Estos resultados se sustentan en los valores de RMSE y R^2 . Por tanto, se acepta la hipótesis, confirmando que el RPAS presenta una mayor

precisión en el cálculo del movimiento de tierras, con diferencias que no superan el 20% frente a los métodos tradicionales, tanto a nivel sectorial como global.

- c) El análisis de los parámetros geomorfométricos evidenció correlaciones relevantes tanto en el volumen de corte total como en el de relleno total. En el volumen de corte total, la pendiente máxima (S_{max}) se identificó como el parámetro diferenciador entre ambos métodos, al presentar una baja correlación en la estación total ($R^2 = 0.12$) y una influencia moderada en el RPAS ($R^2 = 0.37$), lo que refleja la mayor capacidad del RPAS para representar zonas de alta pendiente. Otros parámetros, como el área y la longitud, mostraron buena correlación en ambos métodos, aunque con mayor incidencia en la estación total. En el volumen de relleno total, si bien parámetros como la longitud de la pendiente y la longitud total presentaron correlaciones aceptables, no se identificó un parámetro claramente diferenciador entre ambos métodos. En consecuencia, la hipótesis se confirma parcialmente, siendo válida para el volumen de corte total, donde la pendiente máxima resulta el factor geomorfométrico más influyente en el método RPAS. En el volumen de relleno total, al no identificarse un parámetro diferenciador, su cumplimiento resulta limitado.

Por otro lado, se concluye que la morfometría del terreno influye significativamente en la generación de banquetas, incluso bajo un diseño geométrico constante, siendo la representación de la pendiente el factor determinante. El RPAS, al captar con mayor detalle las irregularidades del terreno, permite una caracterización más precisa, mientras que la estación total tiende a simplificar el relieve. Como resultado, se generaron 44 banquetas con RPAS y 51 con estación total, identificándose discrepancias en 19 secciones transversales entre ambos métodos, lo que incide en el diseño técnico, la planificación y los costos del proyecto.

- d) El modelo desarrollado, basado en la integración de tecnologías RPAS y el análisis geomorfológico, permitió optimizar la generación del MDT mediante una adecuada

clasificación de la nube de puntos en zonas con cobertura vegetal variable. La evaluación del radio de erosión del algoritmo de clasificación evidenció que su valor óptimo depende del nivel de vegetación presente, siendo 0.5 m en áreas con vegetación densa, 0.75 m en vegetación media y 1 m en sectores con vegetación dispersa. Esta optimización permitió obtener un MDT representativo de la superficie real del terreno, constituyendo una base precisa para el cálculo de volúmenes de movimiento de tierras y cumpliendo con el objetivo general de la investigación.

Así mismo, en relación con el objetivo de reducir el tiempo y el costo en proyectos de movimiento de tierras, se concluye que el RPAS cumple con la reducción de costos, pero no alcanza el umbral del 20% de reducción de tiempo planteado en la hipótesis, debido principalmente a las diferencias en el procesamiento de datos. El análisis de costos evidenció una disminución del 24.47% (ahorro de S/ 1,336.75) y un ahorro de S/ 24,164.54 (reducción del 3.69%) en el costo del movimiento de tierras, confirmando su eficiencia económica. No obstante, el tiempo total aumentó en un 47.45% respecto a la estación total, especialmente en la fase de gabinete, como consecuencia del uso de imágenes RGB con un GSD de 1.88 cm (valor inferior al GSD máximo de 10 cm establecido por la RJ 053-2021), lo que incrementa la densidad de la nube de puntos, así como por las limitaciones del hardware y software empleados. A pesar de ello, el RPAS presentó mayor eficiencia en campo, con una reducción de 1.50 h por sector, y permitió generar un modelo continuo del terreno que cumple con la RJ 053-2021, lo que posibilita realizar análisis geomorfológicos detallados, mientras que la estación total, aunque más rápida, proporciona una representación simplificada del terreno. En este sentido, para carreteras de montaña de geometría compleja, el mayor tiempo de procesamiento del RPAS constituye una inversión en calidad del diseño y precisión volumétrica. Así mismo, se concluye que los modelos digitales generados a partir de la data recolectada en 2024 representan

de manera confiable la realidad del terreno. Además, el análisis temporal demuestra que la información topográfica de alta precisión mantiene su vigencia y es aplicable para la toma de decisiones en proyectos viales en zonas montañosas.

8. RECOMENDACIONES:

- a) Se recomienda la incorporación de puntos de chequeo en los levantamientos fotogramétricos realizados con RPAS. A diferencia de los puntos de apoyo fotogramétrico (PAF), que se utilizan para orientar y escalar el modelo fotogramétrico, los puntos de chequeo permiten validar de forma independiente la precisión planimétrica y altimétrica del modelo generado.
- b) Se aconseja realizar una evaluación comparativa entre diferentes niveles de calidad (media o alta) en el procesamiento de la nube de puntos densa, comparándolas con la calidad extra-alta utilizada en este estudio, a fin de analizar su impacto en la precisión de la estimación de volúmenes de corte y relleno, así como en la reducción del tiempo de procesamiento.
- c) La combinación de análisis geomorfológicos con tecnologías RPAS mejora la precisión en la representación del terreno, por lo que se recomienda seguir integrando ambos enfoques en el diseño y planificación de obras viales, especialmente en terrenos complejos como las carreteras de montaña.
- d) Se sugiere ampliar los estudios comparativos en distintos tipos de infraestructura, a fin de validar la efectividad del uso del RPAS bajo diversas condiciones topográficas, morfométricas y tipos de materiales en proyectos de movimiento de tierras.
- e) Dado el buen desempeño del RPAS en la reducción de costos, especialmente en el cálculo de volúmenes de corte y relleno, se recomienda su aplicación en proyectos a nivel similar como en intervenciones de mayor escala, para obtener estimaciones más precisas y ajustadas a la realidad para la planificación y ejecución de proyectos.

Así mismo, se sugiere que futuras investigaciones analicen de manera específica la influencia del GSD, así como del hardware y software utilizados, en el tiempo de procesamiento.

- f) Se recomienda que las entidades públicas actualicen o complementen sus manuales técnicos o términos de referencia, integrando metodologías con RPAS y análisis geomorfométricos, para respaldar normativamente su uso y facilitar su implementación en proyectos oficiales.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- Alca, G., Gutierrez, D. (2021). *Análisis de movimiento de tierras en carreteras generado por el método de diferencia de superficies con drone en contraste al método de prisma de carretera* [Trabajo de grado, Universidad Nacional del Altiplano, Ciencias de la Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Civil]. Repositorio institucional UNAP. http://tesis.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/17320/Alca_Gustavo_Gutierrez_Diego.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Alcántara, D. (2014). *Topografía y sus aplicaciones* (1.^a ed.). Compañía Editorial Continental. <https://editorialpatria.com.mx/pdf/files/9789702409151.pdf>
- Asociación Mundial de la Carretera . (2021). PIARC. Obtenido de https://www.piarc.org/es/pedido-de-publicacion/36043-es-Manual%20de%20Obras%20de%20Tierra%20-%20Aspectos%20t%C3%A9cnicos%20espec%C3%ADficos%20E2%80%93%202E%20-Aspectos%20ambientales.htm?utm_source=chatgpt.com
- Autodesk. (2023). *Ficha Estadística (cuadro de diálogo Propiedades de superficie)*. Autodesk Knowledge Network. <https://help.autodesk.com/view/CIV3D/2023/ESP/?guid=GUID-334D8EEB-A995-4394-B263-A19FD17FB7F9>
- Ayenew, D. (2023, 9 de febrero). *Coefficient of determination (R^2) ~ Definition & interpretation*. BachelorPrint. <https://www.bachelorprint.com/statistics/coefficient-of-determination/>
- Banco de Desarrollo de América Latina y El Caribe. (2023). Carreteras hacia el desarrollo. La Plata, Buenos Aires: Rosario Inés De Rosa. Obtenido de <https://www.caf.com/media/4663671/impacto-caf-carreteras-informe-completo.pdf>
- Berné Valero, J. L., Anquela Julián, A. B., & Garrido Villén, N. (2014). GNSS.GPS: fundamentos y aplicaciones en Geomática. España : Editorial Universitat Politècnica de València. Obtenido de https://www.academia.edu/34699683/GNSS_GPS_fundamentos_y_aplicaciones_en_Geom%C3%A1tica
- Carmona, K., & Huircan, M. (2013). GEOMETRÍA (1.a ed.). Jose Luis Moncada Campos. <https://epja.mineduc.cl/wp-content/uploads/sites/43/2019/06/Gu%C3%ADa-N%C2%B0-5-Matem%C3%A1tica-Geometr%C3%ADa.pdf>
- Casanova, L. (2002). Topografía plana (1.a ed.). Merida. http://www.serbi.ula.ve/serbiula/libros-electronicos/Libros/topografia_plana/pdf/topografia.pdf

- Centro de Operaciones de Emergencia Nacional [COEN]. (02 de Abril de 2017). Mapa | Las carreteras en Perú dañadas por el Fenómeno El Niño. *RPP NOTICIAS*. <https://rpp.pe/peru/desastres-naturales/fenomeno-el-nino-estas-son-las-vias-que-permanecen-bloqueadas-por-la-caida-de-huaicos-noticia-1038035?ref=rpp>
- Claros, R. A., Guevara, A. E., & Pacas, N. R. (2016). *Aplicación de fotogrametría aérea en levantamientos topográficos mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados* [Tesis de grado, Universidad de El Salvador]. Repositorio Institucional de la Universidad de El Salvador.
- Coco, L., & Buccolini, M. (2015). *The morphometric slope index (MSI) as an indicator of landscape evolution: A multi-scale analysis*. *Géomorphologie: Relief, Processus, Environnement*, 21(3), 275-288. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11345>
- Congreso de la República del Perú. (2018). Ley N.º 30740: *Ley que regula el uso y las operaciones de los sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS)*. Diario Oficial El Peruano. <https://www.gob.pe/institucion/mtc/normas-legales/9848-30740>
- Coralogix. (2023). *Root Mean Square Error (RMSE): The cornerstone for evaluating regression models*. Coralogix. <https://coralogix.com/ai-blog/root-mean-square-error-rmse-the-cornerstone-for-evaluating-regression-models/>
- Coralogix (2023). *A comprehensive guide to mean absolute percentage error (MAPE)*. Coralogix. <https://coralogix.com/ai-blog/a-comprehensive-guide-to-mean-absolute-percentage-error-mape/>
- Corporación Autónoma Regional del Tolima (Cortolima). (2018). *Caracterización morfométrica de la Subzona Hidrográfica del río Coello*. Cortolima. https://cortolima.gov.co/images/POMCA/Rio_Coello/2fase/CARACTERIZACION_MORFOMETRICA.pdf
- Cuenca, B. (2021). *Análisis comparativo técnico – económico entre el levantamiento topográfico aerofotogramétrico usando drones y el método tradicional con estación total* [Trabajo de grado, Universidad Peruana del Centro, Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Civil]. Repositorio institucional UPECEN. <https://repositorio.upecen.edu.pe/handle/20.500.14127/275>
- Dandois, J. P., Olano, M., & Ellis, E. C. (2015). *Optimal altitude, overlap, and weather conditions for computer vision UAV estimates of forest structure*. *Remote Sensing*, 7(10), 13895–13920. <https://doi.org/10.3390/rs71013895>
- Flores, P. (2002). Superficie y área. En *Guías Praxis para el profesorado de ESO. Matemáticas, Contenidos, Actividades y Recursos* (G.P.P. Junio, 2002, Puesta al Día número 12, pp. 56/75-56/101). <https://www.ugr.es/~pflores/textos/ARTICULOS/Propuestas/Praxissuperfi.pdf>

- García, F. (1994). *Curso básico de topografía* (3.^a ed.). Árbol Editorial. https://www.academia.edu/23340466/Curso_Basico_de_Topografia_Fernando_Garcia_Marquez
- Guillen, D., Cabello, G. (2021). *Aplicación del Sistema de Coordenadas LTM para Disminuir la Distorsión en la Cartografía de Carreteras*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.
- Hsieh, C.-S., Hsiao, D.-H., & Lin, D.-Y. (2023). *Contour mission flight planning of UAV for photogrammetric in hillside areas*. *Applied Sciences*, 13(13), 7666. <https://doi.org/10.3390/app13137666>
- Instituto Geográfico Nacional [IGN]. (2011). *Especificaciones Técnicas Para la Producción de Cartografía Básica Escala 1:5000*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/670433/ESPECIFICACIONES-TECNICAS-PARA-LA-PRODUCCION-1-5.000.pdf>
- Instituto Geográfico Nacional [IGN]. (2021, junio). *MANUAL TÉCNICO PARA GENERACIÓN DE ORTOIMÁGENES*. <https://www.gob.pe/institucion/ign/informes-publicaciones/1977732-especificaciones-tecnicas-para-generacion-de-ortoimagenes>
- ITC, University of Twente. (2020). *RMSE*. Living Textbook. <https://ltb.itc.utwente.nl/498/concept/81471>
- Jauregui, L. (2008, 21 de octubre). *Introducción a la topografía*. Web del profesor. http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/iluis/publicaciones/Topograf%EDa/TEMA_1.pdf
- Jenness, J. (2011). *DEM Surface Tools for ArcGIS (versión 2.1.292)* [Software]. Jenness Enterprises.
- León, D. (2018). *Uso de cuatro métodos topográficos de recolección de datos con el objeto de evaluar la precisión y costos de cada uno. Caso real taludes de vía E35 Colibrí - Pifo, Sector KM 20 – KM 24* [Trabajo de grado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ingeniería, Escuela de Civil]. Repositorio institucional PUCE. <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/14611>
- Lugo Hubp, J. I. (2025). *Diccionario Geomorfológico*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, México. doi:<http://dx.doi.org/10.14350/gsxxtu.07>
- Mark, A., & Marek, P. E. (2009). *Landscape and aesthetics design manual*. Texas Department of Transportation.

- Mejía G., A. B., Ospina J., F., Sierra L., A., & Zapata O., O. (2005). *Cuaderno de altimetría - Propuesta de modernización de enseñanza de topografía en la Facultad de Minas*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/77862/CUADERNOS_TOPOGRAFIA_ALTIMETRIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Mendoza, J. (2010). *Transformación de coordenadas UTM a topográficas*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC]. (2018). *Manual de carreteras: Diseño geométrico DG-2018*. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual.de.Carreteras.DG-2018.pdf
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC]. (2015). *Manual de carreteras: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES PARA CONSTRUCCIÓN*. <https://www.gob.pe/institucion/mtc/normas-legales/4438760-22-2013-mtc-14>
- Ministerio de Transporte y Comunicaciones [MTC]. (10 de febrero de 2006). Reglamento Nacional de Gestión de Infraestructura Vial. (G. B. Soto, Ed.) *El Peruano*, pág. 12. <https://www.proviasdes.gob.pe/Normas/Proyecto.pdf>
- Navarro Hudiel, S. (2010). *NIVELACIÓN - Apuntes de Topografía II*. <https://sjnnavarro.files.wordpress.com/2008/08/unidad-i-altimetria1.pdf>
- Navia Gemio, R. A. (2023). *Influencia de la pendiente en la estabilidad de taludes durante el proceso de excavación y construcción con el software Slide V6.0* [Tesis de licenciatura, Universidad Mayor de San Andrés]. Repositorio Institucional UMSA. <https://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/34262>
- Oficina Internacional de Pesas y Medidas. (2006). Longitud. En *Sistema Internacional de Unidades* (Trad. Centro Español de Metrología). Centro Español de Metrología. (Trabajo original publicado en 2006).
- Oropeza, J. (2023). *Análisis comparativo de productos cartográficos elaborados a escala grande, obtenidos mediante fotogrametría con RPAS y topografía con tecnología GNSS – RTK*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.
- Orta, P. (2013). *Tecnología de Construcción de las Explanaciones* (1.a ed.). Editorial Félix Varela. <https://www.geologiaviva.info/wp-content/uploads/2021/05/Tecnologia-de-construccion-de-las-explanaciones-Pedro-A.-Orta-Amaro.pdf>
- Pedraza Gilsanz, J. (1996). *Geomorfología: Principios, métodos y aplicaciones*. Editorial Rueda.

- Pike, R. J., Evans, I. S., & Hengl, T. (2009). *Geomorphometry: A brief guide*. En T. Hengl & H. I. Reuter (Eds.), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications* (pp. 3-30). Elsevier.
- Pix4D. (2016). *Manual de Pix4Dmapper 2.1*. Recuperado de <https://www.gisandbeers.com/RRSS/Publicaciones/Manual-Pix4D-Mapper.pdf>
- Real Academia Española [RAE] (2022). Volumetría. Diccionario de la lengua española (23.^a ed.). Obtenido de <https://dle.rae.es/volumetr%C3%ADa>
- Riaño Rodríguez, E. (2018). *Metodología para el diseño de un vuelo fotogramétrico usando UAV'S*. Bogotá D.C., Colombia. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11349/13097>
- Rivera, J. (2015, 5 de diciembre). La red vial es imprescindible para el desarrollo y crecimiento de un país. UDEP Hoy. <https://www.udep.edu.pe/hoy/2015/12/la-red-vial-es-imprescindible-para-el-desarrollo-y-crecimiento-de-un-pais/>
- Rodríguez Sánchez, A., García García, C., Salmerón Gómez, R., & García García, C. B. (2018). *The coefficient of determination in the ridge regression*. *Anales de ASEPUMA*, (26). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6641075>
- Schumm, S. A. (1991). *To Interpret the Earth: Ten Ways to Be Wrong*. Cambridge University Press.
- Soler, T., & Fury, R. J. (2000). *GPS alignment surveys and meridian convergence*. *Journal of Surveying Engineering*, 126(3), 69-82. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(2000\)126:3\(69\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(2000)126:3(69))
- Teso Cuesta, E. (2022). *Aplicación de rastreo satelital mediante uso de datos de posicionamiento y tiempo extraídos de sistemas GNSS*. (E. T. Informática, Ed.) Madrid, España: Universidad Rey Juan Carlos. Obtenido de <https://hdl.handle.net/10115/22773>
- Tiktin, J. (1997). *Procedimientos Generales de Construcción - Movimiento de Tierras* (3 ed.). Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. https://oa.upm.es/67524/1/movimiento_tierras.pdf
- Tofallis, C. (2015). *Measuring relative accuracy: A better alternative to mean absolute percentage error*. *Journal of the Operational Research Society*, 66*(8), 1352–1362. <https://doi.org/10.1057/jors.2014.103>
- Topoprogram and Service. (2019). *Definición del plan de vuelo y de los parámetros característicos para los relieves topográficos con el drone*. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/definici%C3%B3n-del-plan-de-vuelo-y-los-par%C3%A1metros-para-con-and-service/>

USGS. (2014). *USGS SCIENCE FOR A CHANGING WORLD*. Obtenido de <https://www.usgs.gov/landsat-missions/ground-control-points>

Vásquez, A. (2021). *Análisis del volumen de material apilado obtenido de un levantamiento topográfico con drone comparado con el volumen obtenido de un levantamiento topográfico con estación total* [Trabajo de grado, Universidad Nacional de Cajamarca, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil]. Repositorio Institucional UNC. <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/4747>

Wolf, P., & Ghilani, C. (2016). *TOPOGRAFÍA* (14.a ed.). Alfaomega Grupo Editor. https://www.academia.edu/53527805/Topograf%C3%ADa_Paul_R_Wolf

10. ANEXOS:

Anexo 1. Matriz de consistencia.

Integración de tecnologías RPAS y análisis geomorfológico para la evaluación de la precisión en el cálculo de movimiento de tierras en carreteras de montaña. 2024			
Problema general:	Objetivo general:	Hipótesis general:	Variable independiente:
¿Cuál es la precisión que se puede obtener en el cálculo de movimiento de tierras en carreteras de montaña utilizando tecnologías RPAS y análisis geomorfológico?	Evaluar la precisión en el cálculo de movimiento de tierras en carreteras de montaña utilizando tecnologías RPAS y análisis geomorfológico	La precisión en el cálculo de movimiento de tierras en carreteras de montaña mejora significativamente mediante la integración de tecnologías RPAS y análisis geomorfológico	Tecnologías RPAS y análisis geomorfológico
Problemas específicos:	Objetivos específicos:	Hipótesis específicas:	Variable dependiente:
¿Cuál es la precisión actual en el cálculo de movimiento de tierras en carreteras de montaña utilizando tecnologías RPAS en comparación con los métodos tradicionales?	Evaluar la precisión actual en el cálculo de movimiento de tierras en carreteras de montaña utilizando tecnologías RPAS en comparación con los métodos tradicionales	La precisión en el cálculo de movimiento de tierras en carreteras de montaña utilizando tecnologías RPAS es significativamente mayor que la precisión obtenida con métodos tradicionales, con una diferencia que no supera el 20 %	Precisión en el cálculo de movimiento de tierras

¿Cuáles son los parámetros geomorfométricos que más influyen en la precisión del cálculo de movimiento de tierras en carreteras de montaña utilizando tecnologías RPAS en comparación con los métodos tradicionales?	Identificar los parámetros geomorfométricos que más influyen en la precisión del cálculo de movimiento de tierras en carreteras de montaña utilizando tecnologías RPAS en comparación con los métodos tradicionales	La integración de parámetros geomorfométricos, como la pendiente, la longitud y el área, influye notablemente en la precisión del cálculo de movimiento de tierras en carreteras de montaña, siendo más significativos en los resultados obtenidos con tecnologías RPAS que con los métodos tradicionales	
¿Cómo puede la utilización de tecnologías RPAS y análisis geomorfológico reducir el tiempo y el costo en la planificación y ejecución de los proyectos de movimiento de tierras en comparación con los métodos tradicionales en carreteras de montaña?	Desarrollar un modelo que integre tecnologías RPAS y análisis geomorfológico para reducir el tiempo y el costo en la planificación y ejecución de los proyectos de movimiento de tierras en comparación con los métodos tradicionales en carreteras de montaña	La utilización de tecnologías RPAS y análisis geomorfológico reduce el tiempo y el costo en la planificación y ejecución de los proyectos de movimiento de tierras en al menos un 20%, en comparación con los métodos tradicionales en carreteras de montaña	

Nota. Elaboración propia.

Anexo 2. Transformación de coordenadas UTM a topográficas de los PAF del AV-02-03.

N°	PUNTO	COORDENADAS UTM		Δ N (m)	Δ E (m)	ANGULO (rad)	AZIMUT (rad)	DISTANCIA UTM (m)	FACTOR COMBINADO	DISTANCIA TOPOGRÁFICA (m)	Δ ESTE (m)	Δ NORTE (m)	COORDENADAS TOPOGRÁFICAS	
		NORTE	ESTE										NORTE	ESTE
1	PA35	9,409,722.896	677,642.739										9,409,722.066	677,643.097
2	PA34	9,409,928.591	677,572.280	205.695	-70.459	-1.241	5.953	217.428	0.99965892525	217.502	-70.484	205.765	9,409,927.832	677,572.613
3	P1-SM2	9,410,023.111	677,587.653	94.520	15.373	1.410	0.161	95.762	0.99965892525	95.795	15.379	94.552	9,410,022.384	677,587.992
4	P2-SM2	9,409,994.997	677,624.216	-28.114	36.563	-0.655	2.226	46.122	0.99965892525	46.138	36.575	-28.124	9,409,994.260	677,624.567
5	P3-SM2	9,409,928.332	677,608.147	-66.665	-16.069	1.334	3.378	68.574	0.99965892525	68.598	-16.074	-66.688	9,409,927.573	677,608.493
6	P4-SM2	9,409,879.672	677,600.510	-48.660	-7.637	1.415	3.297	49.256	0.99965892525	49.272	-7.640	-48.677	9,409,878.896	677,600.853
7	PA35	9,409,722.896	677,642.739	-156.776	42.229	-1.308	2.878	162.364	0.99965892525	162.419	42.243	-156.829	9,409,722.066	677,643.097
8	P1-SM3	9,409,768.894	677,666.763	45.998	24.024	1.089	0.481	51.894	0.99965892525	51.912	24.032	46.014	9,409,768.080	677,667.129
9	P2-SM3	9,409,707.965	677,682.982	-60.929	16.219	-1.311	2.881	63.051	0.99965892525	63.072	16.225	-60.950	9,409,707.130	677,683.353
10	P3-SM3	9,409,690.636	677,680.363	-17.329	-2.619	1.421	3.292	17.526	0.99965892525	17.532	-2.620	-17.335	9,409,689.795	677,680.734
11	P4-SM3	9,409,818.650	677,638.744	128.014	-41.619	-1.256	5.969	134.610	0.99965892525	134.655	-41.633	128.058	9,409,817.853	677,639.100

Nota. Elaboración propia.

Anexo 3. Transformación de coordenadas UTM a topográficas de los PAF del AV-05.1.

N°	PUNTO	COORDENADAS UTM		ΔN (m)	ΔE (m)	ANGULO (rad)	AZIMUT (rad)	DISTANCIA UTM (m)	FACTOR COMBINADO	DISTANCIA TOPOGRÁFICA (m)	Δ ESTE (m)	Δ NORTE (m)	COORDENADAS TOPOGRÁFICAS	
		NORTE	ESTE										NORTE	ESTE
1	PA46	9,410,185.050	678,155.095										9,410,184.409	678,155.639
2	P1-SM5.1	9,410,273.921	678,195.095	88.871	40.000	1.148	0.423	97.458	0.99962750555	97.494	40.015	88.904	9,410,273.314	678,195.654
3	P2-SM5.1	9,410,175.857	678,200.636	-98.064	5.541	-1.514	3.085	98.220	0.99962750555	98.257	5.543	-98.101	9,410,175.213	678,201.197
4	P3-SM5.1	9,410,210.735	678,173.229	34.878	-27.407	-0.905	5.617	44.358	0.99962750555	44.374	-27.417	34.891	9,410,210.104	678,173.780
5	P4-SM5.1	9,410,216.559	678,194.870	5.824	21.641	0.263	1.308	22.411	0.99962750555	22.419	21.649	5.826	9,410,215.930	678,195.429

Nota. Elaboración propia.

Anexo 4. Transformación de coordenadas UTM a topográficas de los PAF del AV-06.

N°	PUNTO	COORDENADAS UTM		ΔN (m)	ΔE (m)	ANGULO (rad)	AZIMUT (rad)	DISTANCIA UTM (m)	FACTOR COMBINADO	DISTANCIA TOPOGRÁFICA (m)	Δ ESTE (m)	Δ NORTE (m)	COORDENADAS TOPOGRÁFICAS	
		NORTE	ESTE										NORTE	ESTE
1	PA48	9,409,812.729	678,047.633										9,409,811.949	678,048.137
2	PA47	9,409,871.350	678,033.971	58.621	-13.662	-1.342	6.054	60.192	0.99962750555	60.215	-13.667	58.643	9,409,870.593	678,034.470
3	P1-SM6	9,409,929.065	678,077.228	57.715	43.257	0.928	0.643	72.126	0.99962750555	72.153	43.273	57.736	9,409,928.329	678,077.743
4	P2-SM6	9,409,890.793	678,058.964	-38.272	-18.264	1.126	3.587	42.407	0.99962750555	42.422	-18.271	-38.286	9,409,890.043	678,059.472
5	P3-SM6	9,409,858.657	678,055.738	-32.136	-3.226	1.471	3.242	32.298	0.99962750555	32.310	-3.227	-32.148	9,409,857.895	678,056.245
6	P4-SM6	9,409,873.656	678,077.070	14.999	21.332	0.613	0.958	26.077	0.99962750555	26.087	21.340	15.005	9,409,872.899	678,077.585
7	P5-SM6	9,409,781.169	678,126.208	-92.487	49.138	-1.082	2.653	104.730	0.99962750555	104.769	49.156	-92.521	9,409,780.378	678,126.742

Nota. Elaboración propia.

Anexo 5. Transformación de coordenadas UTM a topográficas de los PAF del AV-07.

N°	PUNTO	COORDENADAS UTM		ΔN (m)	ΔE (m)	ANGULO (rad)	AZIMUT (rad)	DISTANCIA UTM (m)	FACTOR COMBINADO	DISTANCIA TOPOGRÁFICA (m)	Δ ESTE (m)	Δ NORTE (m)	COORDENADAS TOPOGRÁFICAS	
		NORTE	ESTE										NORTE	ESTE
1	PA49	9,409,731.293	678,172.693										9,409,730.484	678,173.243
2	P1-SM7	9,409,723.899	678,243.007	-7.394	70.314	-0.105	1.676	70.702	0.99962750555	70.728	70.340	-7.397	9,409,723.087	678,243.584
3	P2-SM7	9,409,639.808	678,223.842	-84.091	-19.165	1.347	3.366	86.247	0.99962750555	86.279	-19.172	-84.122	9,409,638.964	678,224.411
4	P3-SM7	9,409,590.289	678,226.395	-49.519	2.553	-1.519	3.090	49.585	0.99962750555	49.603	2.554	-49.537	9,409,589.427	678,226.965
5	P5-SM7	9,409,683.707	678,249.859	93.418	23.464	1.325	0.246	96.320	0.99962750555	96.356	23.473	93.453	9,409,682.880	678,250.438

Nota. Elaboración propia.

Anexo 6. Transformación de coordenadas UTM a topográficas de los PAF del AV-08.

N°	PUNTO	COORDENADAS UTM		ΔN (m)	ΔE (m)	ANGULO (rad)	AZIMUT (rad)	DISTANCIA UTM (m)	FACTOR COMBINADO	DISTANCIA TOPOGRÁFICA (m)	Δ ESTE (m)	Δ NORTE (m)	COORDENADAS TOPOGRÁFICAS	
		NORTE	ESTE										NORTE	ESTE
1	PA50	9,409,172.699	678,231.122										9,409,171.681	678,231.695
2	P1-SM8	9,409,231.736	678,245.074	59.037	13.952	1.339	0.232	60.663	0.99962750555	60.686	13.957	59.059	9,409,230.740	678,245.652
3	GPS05	9,409,094.038	678,238.377	-137.698	-6.697	1.522	3.190	137.861	0.99961092330	137.915	-6.700	-137.752	9,409,092.988	678,238.952
4	P2-SM8	9,409,123.482	678,313.263	29.444	74.886	0.375	1.196	80.467	0.99961048535	80.498	74.916	29.456	9,409,122.444	678,313.868
5	P3-SM8	9,409,214.929	678,395.921	91.447	82.658	0.836	0.735	123.268	0.99961048535	123.316	82.690	91.483	9,409,213.926	678,396.558

Nota. Elaboración propia.

Anexo 7. Transformación de coordenadas UTM a topográficas de los PAF del AV-11-12-13-14.

N°	PUNTO	COORDENADAS UTM		Δ N (m)	Δ E (m)	ANGULO (rad)	AZIMUT (rad)	DISTANCIA UTM (m)	FACTOR COMBINADO	DISTANCIA TOPOGRÁFICA (m)	Δ ESTE (m)	Δ NORTE (m)	COORDENADAS TOPOGRÁFICAS	
		NORTE	ESTE										NORTE	ESTE
1	PA53	9,409,837.191	679,439.906										9,409,836.440	679,440.961
2	P1-SM11	9,409,837.436	679,241.836	0.245	-198.070	-0.001	4.714	198.070	0.99959712225	198.150	-198.150	0.245	9,409,836.685	679,242.812
3	P2-SM11	9,409,789.256	679,217.734	-48.180	-24.102	1.107	3.605	53.872	0.99959712225	53.894	-24.112	-48.199	9,409,788.486	679,218.700
4	P3-SM11	9,409,776.176	679,179.813	-13.080	-37.921	0.332	4.380	40.113	0.99959712225	40.130	-37.936	-13.085	9,409,775.400	679,180.764
5	P4-SM11	9,409,765.091	679,148.532	-11.085	-31.281	0.341	4.372	33.187	0.99959712225	33.200	-31.294	-11.089	9,409,764.311	679,149.470
6	PA53	9,409,837.191	679,439.906	72.100	291.374	0.243	1.328	300.162	0.99959712225	300.283	291.492	72.129	9,409,836.440	679,440.961
7	P1-SM12	9,409,818.125	679,365.026	-19.066	-74.880	0.249	4.463	77.269	0.99959712225	77.300	-74.910	-19.073	9,409,817.366	679,366.051
8	P2-SM12	9,409,909.937	679,468.053	91.812	103.027	0.728	0.843	138.000	0.99959712225	138.056	103.069	91.849	9,409,909.215	679,469.120
9	P3-SM12	9,409,939.762	679,481.873	29.825	13.820	1.137	0.434	32.871	0.99959712225	32.885	13.826	29.837	9,409,939.052	679,482.945
10	P1-SM13	9,410,069.628	679,581.054	129.866	99.181	0.919	0.652	163.408	0.99959712225	163.473	99.221	129.918	9,410,068.971	679,582.166
11	PA54	9,410,045.494	679,713.483	-24.134	132.429	-0.180	1.751	134.610	0.99959712225	134.665	132.483	-24.143	9,410,044.827	679,714.649
12	P2-SM13	9,410,123.274	679,708.332	77.779	-5.151	-1.505	6.217	77.950	0.99959712225	77.981	-5.153	77.811	9,410,122.638	679,709.496
13	P3-SM13	9,410,176.157	679,719.784	52.884	11.452	1.358	0.213	54.109	0.99959712225	54.131	11.457	52.905	9,410,175.543	679,720.952
14	PA55	9,410,090.515	679,639.852	-85.642	-79.932	0.820	3.893	117.149	0.99959712225	117.196	-79.965	-85.677	9,410,089.866	679,640.987
15	P1-SM14	9,410,211.241	679,666.699	120.726	26.847	1.352	0.219	123.676	0.99959712225	123.725	26.858	120.775	9,410,210.641	679,667.846
16	P2-SM14	9,410,130.448	679,638.809	-80.793	-27.890	1.238	3.474	85.471	0.99959712225	85.506	-27.901	-80.826	9,410,129.815	679,639.945
17	P3-SM14	9,410,186.328	679,592.205	55.880	-46.604	-0.876	5.588	72.763	0.99959712225	72.793	-46.623	55.903	9,410,185.718	679,593.322

Nota. Elaboración propia.

Anexo 8. Metrado de movimiento de tierra del SM-02 con estación total.

Progresiva	Áreas (m²)		Distancia (m)	VOLUMEN DE CORTE (m³)				% de Explanaciones			VOLUMEN DE RELLENO (m³)			
	Corte	Relleno		Corte total	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Relleno total	Relleno propio	Relleno préstamo	Eliminación de material
4+190	0.51	0.25												
4+200	2.22	0.34	10.00	13.65	5.46	4.10	4.10	40%	30%	30%	2.95	2.95		10.70
4+210	5.03	0.29	10.00	36.25	14.50	10.88	10.88	40%	30%	30%	3.15	3.15		33.10
4+220	6.33	0.15	10.00	56.80	22.72	17.04	17.04	40%	30%	30%	2.20	2.20		54.60
4+230	5.53	0.15	10.00	59.30	23.72	17.79	17.79	40%	30%	30%	1.50	1.50		57.80
4+240	3.53	0.10	10.00	45.30	18.12	13.59	13.59	40%	30%	30%	1.25	1.25		44.05
4+250	27.50	0.09	10.00	155.15	62.06	46.55	46.55	40%	30%	30%	0.95	0.95		154.20
4+260	42.40	0.08	10.00	349.50	139.80	104.85	104.85	40%	30%	30%	0.85	0.85		348.65
4+270	19.32	0.02	10.00	308.60	123.44	92.58	92.58	40%	30%	30%	0.50	0.50		308.10
4+280	12.53	0.03	10.00	159.25	63.70	47.78	47.78	40%	30%	30%	0.25	0.25		159.00
4+290	5.58	0.01	10.00	90.55	36.22	27.17	27.17	40%	30%	30%	0.20	0.20		90.35

Nota. Elaboración propia.

Anexo 9. Metrado de movimiento de tierra del SM-03 con estación total.

Progresiva	Áreas (m ²)		Distancia (m)	VOLUMEN DE CORTE (m ³)				% de Explanaciones			VOLUMEN DE RELLENO (m ³)			
	Corte	Relleno		Corte total	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Relleno total	Relleno propio	Relleno préstamo	Eliminación de material
4+430	11.63							40%	30%	30%				
4+440	14.13	0.23	10.00	128.80	51.52	38.64	38.64	40%	30%	30%	0.58	0.58		128.23
4+450	17.36	0.36	10.00	157.45	62.98	47.24	47.24	40%	30%	30%	2.95	2.95		154.50
4+460	21.66	0.04	10.00	195.10	78.04	58.53	58.53	40%	30%	30%	2.00	2.00		193.10
4+470	38.03		10.00	298.45	119.38	89.54	89.54	40%	30%	30%	0.10	0.10		298.35
4+480	57.74	0.01	10.00	478.85	191.54	143.66	143.66	40%	30%	30%	0.03	0.03		478.83
4+490	69.04	0.07	10.00	633.90	253.56	190.17	190.17	40%	30%	30%	0.40	0.40		633.50
4+500	45.49	0.08	10.00	572.65	229.06	171.80	171.80	40%	30%	30%	0.75	0.75		571.90
4+510	21.72	0.16	10.00	336.05	134.42	100.82	100.82	40%	30%	30%	1.20	1.20		334.85
4+520	2.88	0.06	10.00	123.00	49.20	36.90	36.90	40%	30%	30%	1.10	1.10		121.90
4+530	1.39		10.00	21.35	8.54	6.41	6.41	40%	30%	30%	0.15	0.15		21.20
4+535	2.30		5.00	9.23	3.69	2.77	2.77	40%	30%	30%				9.23

Nota. Elaboración propia.

Anexo 10. Metrado de movimiento de tierra del SM-05.1 con estación total.

Progresiva	Áreas (m²)		Distancia (m)	VOLUMEN DE CORTE (m³)				% de Explanaciones			VOLUMEN DE RELLENO (m³)			
	Corte	Relleno		Corte total	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Relleno total	Relleno propio	Relleno préstamo	Eliminación de material
8+450	0.50	0.01												
8+460	0.84		10.00	6.70	4.02	1.34	1.34	60%	20%	20%	0.03	0.03		6.68
8+470	0.68	0.17	10.00	7.60	4.56	1.52	1.52	60%	20%	20%	0.43	0.43		7.18
8+480	1.21	0.03	10.00	9.45	5.67	1.89	1.89	60%	20%	20%	1.00	1.00		8.45
8+490	3.96		10.00	25.85	15.51	5.17	5.17	60%	20%	20%	0.08	0.08		25.78
8+500	5.25		10.00	46.05	27.63	9.21	9.21	60%	20%	20%				46.05
8+510	28.99	0.44	10.00	171.20	102.72	34.24	34.24	60%	20%	20%	1.10	1.10		170.10
8+520	71.74	0.41	10.00	503.65	302.19	100.73	100.73	60%	20%	20%	4.25	4.25		499.40
8+530	46.63	0.54	10.00	591.85	355.11	118.37	118.37	60%	20%	20%	4.75	4.75		587.10
8+540	5.67		10.00	261.50	156.90	52.30	52.30	60%	20%	20%	1.35	1.35		260.15
8+550	0.66		10.00	31.65	18.99	6.33	6.33	60%	20%	20%				31.65
8+560	0.71	0.03	10.00	6.85	4.11	1.37	1.37	60%	20%	20%	0.08	0.08		6.78

Nota. Elaboración propia.

Anexo 11. Metrado de movimiento de tierra del SM-06 con estación total.

Progresiva	Áreas (m ²)		Distancia (m)	VOLUMEN DE CORTE (m ³)				% de Explanaciones			VOLUMEN DE RELLENO (m ³)			
	Corte	Relleno		Corte total	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Relleno total	Relleno propio	Relleno préstamo	Eliminación de material
8+910	1.39	0.23												
8+920	3.27	0.04	10.00	23.30	13.98	6.99	2.33	60%	30%	10%	1.35	1.35		21.95
8+930	5.29	0.14	10.00	42.80	25.68	12.84	4.28	60%	30%	10%	0.90	0.90		41.90
8+940	5.81	0.04	10.00	55.50	33.30	16.65	5.55	60%	30%	10%	0.90	0.90		54.60
8+950	5.03	0.06	10.00	54.20	32.52	16.26	5.42	60%	30%	10%	0.50	0.50		53.70
8+960	4.53	0.06	10.00	47.80	28.68	14.34	4.78	60%	30%	10%	0.60	0.60		47.20
8+970	3.73		10.00	41.30	24.78	12.39	4.13	60%	30%	10%	0.15	0.15		41.15
8+980	6.16		10.00	49.45	29.67	14.84	4.95	60%	30%	10%				49.45
8+990	9.38		10.00	77.70	46.62	23.31	7.77	60%	30%	10%				77.70
9+000	20.92	0.01	10.00	151.50	90.90	45.45	15.15	60%	30%	10%	0.03	0.03		151.48
9+010	4.41	0.03	10.00	126.65	75.99	38.00	12.67	60%	30%	10%	0.20	0.20		126.45
9+020	5.11	0.13	10.00	47.60	28.56	14.28	4.76	60%	30%	10%	0.80	0.80		46.80
9+030	9.97	0.13	10.00	75.40	45.24	22.62	7.54	60%	30%	10%	1.30	1.30		74.10

Nota. Elaboración propia.

Anexo 12. *Metrado de movimiento de tierra del SM-07 con estación total.*

Progresiva	Áreas (m ²)		Distancia (m)	VOLUMEN DE CORTE (m ³)				% de Explanaciones			VOLUMEN DE RELLENO (m ³)			
	Corte	Relleno		Corte total	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Relleno total	Relleno propio	Relleno préstamo	Eliminación de material
9+220	1.03													
9+230	0.76	0.01	10.00	8.95	5.37	2.69	0.90	60%	30%	10%	0.03	0.03		8.93
9+240	0.97	0.01	10.00	8.65	5.19	2.60	0.87	60%	30%	10%	0.10	0.10		8.55
9+250	1.12	0.02	10.00	10.45	6.27	3.14	1.05	60%	30%	10%	0.15	0.15		10.30
9+260	1.48		10.00	13.00	7.80	3.90	1.30	60%	30%	10%	0.05	0.05		12.95
9+270	3.75	0.02	10.00	26.15	15.69	7.85	2.62	60%	30%	10%	0.05	0.05		26.10
9+280	5.12	0.15	10.00	44.35	26.61	13.31	4.44	60%	30%	10%	0.85	0.85		43.50
9+290	8.05	0.10	10.00	65.85	39.51	19.76	6.59	60%	30%	10%	1.25	1.25		64.60
9+300	0.42	0.05	10.00	42.35	25.41	12.71	4.24	60%	30%	10%	0.75	0.75		41.60
9+303	1.11		3.00	2.30	1.38	0.69	0.23	60%	30%	10%	0.04	0.04		2.26

Nota. Elaboración propia.

Anexo 13. *Metrado de movimiento de tierra del SM-09 con estación total.*

Progresiva	Áreas (m ²)		Distancia (m)	VOLUMEN DE CORTE (m ³)				% de Explanaciones			VOLUMEN DE RELLENO (m ³)			
	Corte	Relleno		Corte total	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Relleno total	Relleno propio	Relleno préstamo	Eliminación de material
10+340	5.76	0.07												
10+350	3.13	0.05	10.00	44.45	22.23	17.78	4.45	50%	40%	10%	0.60	0.60		43.85
10+360	5.24		10.00	41.85	20.93	16.74	4.19	50%	40%	10%	0.13	0.13		41.73
10+370	19.72	0.01	10.00	124.80	62.40	49.92	12.48	50%	40%	10%	0.03	0.03		124.78
10+380	9.89	0.03	10.00	148.05	74.03	59.22	14.81	50%	40%	10%	0.20	0.20		147.85
10+390	1.63	0.16	10.00	57.60	28.80	23.04	5.76	50%	40%	10%	0.95	0.95		56.65
10+400	0.85	0.46	10.00	12.40	6.20	4.96	1.24	50%	40%	10%	3.10	3.10		9.30
10+410	0.06	0.33	10.00	4.55	2.28	1.82	0.46	50%	40%	10%	3.95	2.28	1.68	0.60

Nota. Elaboración propia.

Anexo 14. Medrado de movimiento de tierra del SM-10 con estación total.

Progresiva	Áreas (m ²)		Distancia (m)	VOLUMEN DE CORTE (m ³)				% de Explanaciones			VOLUMEN DE RELLENO (m ³)			
	Corte	Relleno		Corte total	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Relleno total	Relleno propio	Relleno préstamo	Eliminación de material
10+440	19.12	0.23												
10+450	23.58	0.04	10.00	213.50	106.75	85.40	21.35	50%	40%	10%	1.35	1.35		212.15
10+460	30.69	0.01	10.00	271.35	135.68	108.54	27.14	50%	40%	10%	0.25	0.25		271.10
10+470	19.16		10.00	249.25	124.63	99.70	24.93	50%	40%	10%	0.03	0.03		249.23
10+480	17.32	0.09	10.00	182.40	91.20	72.96	18.24	50%	40%	10%	0.23	0.23		182.18
10+490	25.60	0.02	10.00	214.60	107.30	85.84	21.46	50%	40%	10%	0.55	0.55		214.05
10+500	10.53	0.24	10.00	180.65	90.33	72.26	18.07	50%	40%	10%	1.30	1.30		179.35
10+510	13.34	0.45	10.00	119.35	59.68	47.74	11.94	50%	40%	10%	3.45	3.45		115.90
10+520	0.76	0.39	10.00	70.50	35.25	28.20	7.05	50%	40%	10%	4.20	4.20		66.30
10+530	0.68	0.35	10.00	7.20	3.60	2.88	0.72	50%	40%	10%	3.70	3.60	0.10	3.50

Nota. Elaboración propia.

Anexo 15. Metrado de movimiento de tierra del SM-11 con estación total.

Progresiva	Áreas (m ²)		Distancia (m)	VOLUMEN DE CORTE (m ³)				% de Explanaciones			VOLUMEN DE RELLENO (m ³)			
	Corte	Relleno		Corte total	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Relleno total	Relleno propio	Relleno préstamo	Eliminación de material
11+195	0.60	0.15												
11+200	6.10	0.16	5.00	16.75	8.38	6.70	1.68	50%	40%	10%	0.78	0.78		15.98
11+210	2.56	0.24	10.00	43.30	21.65	17.32	4.33	50%	40%	10%	2.00	2.00		41.30
11+220	0.17	0.27	10.00	13.65	6.83	5.46	1.37	50%	40%	10%	2.55	2.55		11.10
11+230	1.12	0.18	10.00	6.45	3.23	2.58	0.65	50%	40%	10%	2.25	2.25		4.20
11+240	24.10	0.62	10.00	126.10	63.05	50.44	12.61	50%	40%	10%	4.00	4.00		122.10
11+250	41.26	0.64	10.00	326.80	163.40	130.72	32.68	50%	40%	10%	6.30	6.30		320.50
11+260	22.67	0.41	10.00	319.65	159.83	127.86	31.97	50%	40%	10%	5.25	5.25		314.40
11+270	0.79	0.35	10.00	117.30	58.65	46.92	11.73	50%	40%	10%	3.80	3.80		113.50
11+280	0.84	0.44	10.00	8.15	4.08	3.26	0.82	50%	40%	10%	3.95	3.95		4.20

Nota. Elaboración propia.

Anexo 16. Metrado de movimiento de tierra del SM-12 con estación total.

Progresiva	Áreas (m ²)		Distancia (m)	VOLUMEN DE CORTE (m ³)				% de Explanaciones			VOLUMEN DE RELLENO (m ³)			
	Corte	Relleno		Corte total	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Relleno total	Relleno propio	Relleno préstamo	Eliminación de material
11+470	0.22	0.33												
11+480	0.66	0.16	10.00	4.40	1.76	1.32	1.32	40%	30%	30%	2.45	1.76	0.69	1.95
11+490	0.72	0.04	10.00	6.90	2.76	2.07	2.07	40%	30%	30%	1.00	1.00		5.90
11+500	13.09		10.00	69.05	27.62	20.72	20.72	40%	30%	30%	0.10	0.10		68.95
11+510	31.94	0.03	10.00	225.15	90.06	67.55	67.55	40%	30%	30%	0.08	0.08		225.08
11+520	13.32	0.07	10.00	226.30	90.52	67.89	67.89	40%	30%	30%	0.50	0.50		225.80
11+530	6.95	0.05	10.00	101.35	40.54	30.41	30.41	40%	30%	30%	0.60	0.60		100.75
11+540	2.81	0.01	10.00	48.80	19.52	14.64	14.64	40%	30%	30%	0.30	0.30		48.50
11+550	3.82	0.03	10.00	33.15	13.26	9.95	9.95	40%	30%	30%	0.20	0.20		32.95
11+560	11.75	0.09	10.00	77.85	31.14	23.36	23.36	40%	30%	30%	0.60	0.60		77.25
11+570	5.53	0.10	10.00	86.40	34.56	25.92	25.92	40%	30%	30%	0.95	0.95		85.45
11+580	2.19	0.13	10.00	38.60	15.44	11.58	11.58	40%	30%	30%	1.15	1.15		37.45
11+590	0.46	0.45	10.00	13.25	5.30	3.98	3.98	40%	30%	30%	2.90	2.90		10.35
11+600	0.56	0.20	10.00	5.10	2.04	1.53	1.53	40%	30%	30%	3.25	2.04	1.21	1.85

Nota. Elaboración propia.

Anexo 17. Metrado de movimiento de tierra del SM-13 con estación total.

Progresiva	Áreas (m ²)		Distancia (m)	VOLUMEN DE CORTE (m ³)				% de Explanaciones			VOLUMEN DE RELLENO (m ³)			
	Corte	Relleno		Corte total	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Relleno total	Relleno propio	Relleno préstamo	Eliminación de material
11+860	2.81	0.07												
11+870	26.51	0.01	10.00	146.60	73.30	58.64	14.66	50%	40%	10%	0.40	0.40		146.20
11+880	40.95	0.11	10.00	337.30	168.65	134.92	33.73	50%	40%	10%	0.60	0.60		336.70
11+890	7.16	0.27	10.00	240.55	120.28	96.22	24.06	50%	40%	10%	1.90	1.90		238.65
11+900	0.81	0.16	10.00	39.85	19.93	15.94	3.99	50%	40%	10%	2.15	2.15		37.70
11+910	1.12	0.36	10.00	9.65	4.83	3.86	0.97	50%	40%	10%	2.60	2.60		7.05
11+920	13.15	0.39	10.00	71.35	35.68	28.54	7.14	50%	40%	10%	3.75	3.75		67.60
11+930	3.72	0.36	10.00	84.35	42.18	33.74	8.44	50%	40%	10%	3.75	3.75		80.60
11+940	4.40	0.22	10.00	40.60	20.30	16.24	4.06	50%	40%	10%	2.90	2.90		37.70
11+950	40.57	0.45	10.00	224.85	112.43	89.94	22.49	50%	40%	10%	3.35	3.35		221.50
11+960	59.04	0.11	10.00	498.05	249.03	199.22	49.81	50%	40%	10%	2.80	2.80		495.25
11+970	40.17	0.58	10.00	496.05	248.03	198.42	49.61	50%	40%	10%	3.45	3.45		492.60
11+980	0.67	0.29	10.00	204.20	102.10	81.68	20.42	50%	40%	10%	4.35	4.35		199.85
11+990	0.81	0.14	10.00	7.40	3.70	2.96	0.74	50%	40%	10%	2.15	2.15		5.25
12+000	0.31	0.25	10.00	5.60	2.80	2.24	0.56	50%	40%	10%	1.95	1.95		3.65
12+010	0.68	0.24	10.00	4.95	2.48	1.98	0.50	50%	40%	10%	2.45	2.45		2.50
12+020	1.05		10.00	8.65	4.33	3.46	0.87	50%	40%	10%	0.60	0.60		8.05
12+030	1.25		10.00	11.50	5.75	4.60	1.15	50%	40%	10%				11.50
12+040	33.99		10.00	176.20	88.10	70.48	17.62	50%	40%	10%				176.20
12+050	38.78	0.34	10.00	363.85	181.93	145.54	36.39	50%	40%	10%	0.85	0.85		363.00
12+060	13.39	0.07	10.00	260.85	130.43	104.34	26.09	50%	40%	10%	2.05	2.05		258.80
12+070	9.23	0.02	10.00	113.10	56.55	45.24	11.31	50%	40%	10%	0.45	0.45		112.65

Nota. Elaboración propia.

Anexo 18. Medrado de movimiento de tierra del SM-14 con estación total.

Progresiva	Áreas (m ²)		Distancia (m)	VOLUMEN DE CORTE (m ³)				% de Explanaciones			VOLUMEN DE RELLENO (m ³)			
	Corte	Relleno		Corte total	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Relleno total	Relleno propio	Relleno préstamo	Eliminación de material
12+990	2.63	0.01												
13+000	10.20	0.01	10.00	64.15	19.25	19.25	25.66	30%	30%	40%	0.10	0.10		64.05
13+010	24.71		10.00	174.55	52.37	52.37	69.82	30%	30%	40%	0.03	0.03		174.53
13+020	49.08	0.05	10.00	368.95	110.69	110.69	147.58	30%	30%	40%	0.13	0.13		368.83
13+030	79.69	0.40	10.00	643.85	193.16	193.16	257.54	30%	30%	40%	2.25	2.25		641.60
13+040	58.96	0.15	10.00	693.25	207.98	207.98	277.30	30%	30%	40%	2.75	2.75		690.50
13+050	29.28	0.31	10.00	441.20	132.36	132.36	176.48	30%	30%	40%	2.30	2.30		438.90
13+060	25.62	0.38	10.00	274.50	82.35	82.35	109.80	30%	30%	40%	3.45	3.45		271.05
13+070	12.30		10.00	189.60	56.88	56.88	75.84	30%	30%	40%	0.95	0.95		188.65
13+080	3.20	0.11	10.00	77.50	23.25	23.25	31.00	30%	30%	40%	0.28	0.28		77.23
13+090	1.64	0.03	10.00	24.20	7.26	7.26	9.68	30%	30%	40%	0.70	0.70		23.50
13+100	1.10	0.13	10.00	13.70	4.11	4.11	5.48	30%	30%	40%	0.80	0.80		12.90

Nota. Elaboración propia.

Anexo 19. Medrado de movimiento de tierra del SM-02 con RPAS.

Progresiva	Áreas (m ²)		Distancia (m)	VOLUMEN DE CORTE (m ³)				% de Explanaciones			VOLUMEN DE RELLENO (m ³)			
	Corte	Relleno		Corte total	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Relleno total	Relleno propio	Relleno préstamo	Eliminación de material
4+190	0.62	0.15												
4+200	0.26	0.35	10.00	4.40	1.76	1.32	1.32	40%	30%	30%	2.50	1.76	0.74	1.90
4+210	3.93	0.19	10.00	20.95	8.38	6.29	6.29	40%	30%	30%	2.70	2.70		18.25
4+220	2.72		10.00	33.25	13.30	9.98	9.98	40%	30%	30%	0.48	0.48		32.78
4+230	5.21		10.00	39.65	15.86	11.90	11.90	40%	30%	30%				39.65
4+240	4.06		10.00	46.35	18.54	13.91	13.91	40%	30%	30%				46.35
4+250	27.89	0.04	10.00	159.75	63.90	47.93	47.93	40%	30%	30%	0.10	0.10		159.65
4+260	19.38		10.00	236.35	94.54	70.91	70.91	40%	30%	30%	0.10	0.10		236.25
4+270	15.53		10.00	174.55	69.82	52.37	52.37	40%	30%	30%				174.55
4+280	5.54	0.09	10.00	105.35	42.14	31.61	31.61	40%	30%	30%	0.23	0.23		105.13
4+290	9.55		10.00	75.45	30.18	22.64	22.64	40%	30%	30%	0.23	0.23		75.23

Nota. Elaboración propia.

Anexo 20. Medrado de movimiento de tierra del SM-03 con RPAS.

Progresiva	Áreas (m ²)		Distancia (m)	VOLUMEN DE CORTE (m ³)				% de Explanaciones			VOLUMEN DE RELLENO (m ³)			
	Corte	Relleno		Corte total	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Relleno total	Relleno propio	Relleno préstamo	Eliminación de material
4+430	4.54	0.21						40%	30%	30%				
4+440	14.77	0.10	10.00	96.55	38.62	28.97	28.97	40%	30%	30%	1.55	1.55		95.00
4+450	6.83	0.23	10.00	108.00	43.20	32.40	32.40	40%	30%	30%	1.65	1.65		106.35
4+460	9.31		10.00	80.70	32.28	24.21	24.21	40%	30%	30%	0.58	0.58		80.13
4+470	24.86		10.00	170.85	68.34	51.26	51.26	40%	30%	30%				170.85
4+480	63.80		10.00	443.30	177.32	132.99	132.99	40%	30%	30%				443.30
4+490	81.44	0.03	10.00	726.20	290.48	217.86	217.86	40%	30%	30%	0.08	0.08		726.13
4+500	43.48	0.02	10.00	624.60	249.84	187.38	187.38	40%	30%	30%	0.25	0.25		624.35
4+510	18.33	0.13	10.00	309.05	123.62	92.72	92.72	40%	30%	30%	0.75	0.75		308.30
4+520	7.49	0.12	10.00	129.10	51.64	38.73	38.73	40%	30%	30%	1.25	1.25		127.85
4+530	1.56	0.16	10.00	45.25	18.10	13.58	13.58	40%	30%	30%	1.40	1.40		43.85
4+535	2.55		5.00	10.28	4.11	3.08	3.08	40%	30%	30%	0.20	0.20		10.08

Nota. Elaboración propia.

Anexo 21. Metrado de movimiento de tierra del SM-05.1 con RPAS.

Progresiva	Áreas (m ²)		Distancia (m)	VOLUMEN DE CORTE (m ³)				% de Explanaciones			VOLUMEN DE RELLENO (m ³)			
	Corte	Relleno		Corte total	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Relleno total	Relleno propio	Relleno préstamo	Eliminación de material
8+450	0.86													
8+460	1.19		10.00	10.25	6.15	2.05	2.05	60%	20%	20%				10.25
8+470	0.81	0.17	10.00	10.00	6.00	2.00	2.00	60%	20%	20%	0.43	0.43		9.58
8+480	0.89	0.02	10.00	8.50	5.10	1.70	1.70	60%	20%	20%	0.95	0.95		7.55
8+490	6.71		10.00	38.00	22.80	7.60	7.60	60%	20%	20%	0.05	0.05		37.95
8+500	14.66	0.05	10.00	106.85	64.11	21.37	21.37	60%	20%	20%	0.13	0.13		106.73
8+510	25.57	0.41	10.00	201.15	120.69	40.23	40.23	60%	20%	20%	2.30	2.30		198.85
8+520	75.66		10.00	506.15	303.69	101.23	101.23	60%	20%	20%	1.03	1.03		505.13
8+530	45.61	0.49	10.00	606.35	363.81	121.27	121.27	60%	20%	20%	1.23	1.23		605.13
8+540	3.27		10.00	244.40	146.64	48.88	48.88	60%	20%	20%	1.23	1.23		243.18
8+550	0.59		10.00	19.30	11.58	3.86	3.86	60%	20%	20%				19.30
8+560	0.94		10.00	7.65	4.59	1.53	1.53	60%	20%	20%				7.65

Nota. Elaboración propia.

Anexo 22. Medrado de movimiento de tierra del SM-06 con RPAS.

Progresiva	Áreas (m ²)		Distancia (m)	VOLUMEN DE CORTE (m ³)				% de Explanaciones			VOLUMEN DE RELLENO (m ³)			
	Corte	Relleno		Corte total	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Relleno total	Relleno propio	Relleno préstamo	Eliminación de material
8+910	1.15	0.22												
8+920	2.49	0.04	10.00	18.20	10.92	5.46	1.82	60%	30%	10%	1.30	1.30		16.90
8+930	5.60	0.06	10.00	40.45	24.27	12.14	4.05	60%	30%	10%	0.50	0.50		39.95
8+940	8.08	0.09	10.00	68.40	41.04	20.52	6.84	60%	30%	10%	0.75	0.75		67.65
8+950	6.80	0.12	10.00	74.40	44.64	22.32	7.44	60%	30%	10%	1.05	1.05		73.35
8+960	6.55	0.06	10.00	66.75	40.05	20.03	6.68	60%	30%	10%	0.90	0.90		65.85
8+970	9.83		10.00	81.90	49.14	24.57	8.19	60%	30%	10%	0.15	0.15		81.75
8+980	11.38		10.00	106.05	63.63	31.82	10.61	60%	30%	10%				106.05
8+990	12.21		10.00	117.95	70.77	35.39	11.80	60%	30%	10%				117.95
9+000	15.43	0.03	10.00	138.20	82.92	41.46	13.82	60%	30%	10%	0.08	0.08		138.13
9+010	4.07		10.00	97.50	58.50	29.25	9.75	60%	30%	10%	0.08	0.08		97.43
9+020	8.93	0.12	10.00	65.00	39.00	19.50	6.50	60%	30%	10%	0.30	0.30		64.70
9+030	3.32	0.16	10.00	61.25	36.75	18.38	6.13	60%	30%	10%	1.40	1.40		59.85

Nota. Elaboración propia.

Anexo 23. Medrado de movimiento de tierra del SM-07 con RPAS.

Progresiva	Áreas (m ²)		Distancia (m)	VOLUMEN DE CORTE (m ³)				% de Explanaciones			VOLUMEN DE RELLENO (m ³)			
	Corte	Relleno		Corte total	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Relleno total	Relleno propio	Relleno préstamo	Eliminación de material
9+220	0.35	0.06												
9+230	0.12	0.13	10.00	2.35	1.41	0.71	0.24	60%	30%	10%	0.95	0.95		1.40
9+240	0.69	0.04	10.00	4.05	2.43	1.22	0.41	60%	30%	10%	0.85	0.85		3.20
9+250	1.12	0.01	10.00	9.05	5.43	2.72	0.91	60%	30%	10%	0.25	0.25		8.80
9+260	2.27		10.00	16.95	10.17	5.09	1.70	60%	30%	10%	0.03	0.03		16.93
9+270	5.28		10.00	37.75	22.65	11.33	3.78	60%	30%	10%				37.75
9+280	4.96	0.04	10.00	51.20	30.72	15.36	5.12	60%	30%	10%	0.10	0.10		51.10
9+290	8.69	0.06	10.00	68.25	40.95	20.48	6.83	60%	30%	10%	0.50	0.50		67.75
9+300	0.42	0.11	10.00	45.55	27.33	13.67	4.56	60%	30%	10%	0.85	0.85		44.70
9+303	0.06	0.21	3.00	0.72	0.43	0.22	0.07	60%	30%	10%	0.48	0.43	0.05	0.24

Nota. Elaboración propia.

Anexo 24. Metrado de movimiento de tierra del SM-09 con RPAS.

Progresiva	Áreas (m ²)		Distancia (m)	VOLUMEN DE CORTE (m ³)				% de Explanaciones			VOLUMEN DE RELLENO (m ³)			
	Corte	Relleno		Corte total	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Relleno total	Relleno propio	Relleno préstamo	Eliminación de material
10+340	6.43	0.30												
10+350	3.70	0.09	10.00	50.65	25.33	20.26	5.07	50%	40%	10%	1.95	1.95		48.70
10+360	2.49		10.00	30.95	15.48	12.38	3.10	50%	40%	10%	0.23	0.23		30.73
10+370	19.06	0.04	10.00	107.75	53.88	43.10	10.78	50%	40%	10%	0.10	0.10		107.65
10+380	9.66		10.00	143.60	71.80	57.44	14.36	50%	40%	10%	0.10	0.10		143.50
10+390	0.99	0.16	10.00	53.25	26.63	21.30	5.33	50%	40%	10%	0.40	0.40		52.85
10+400	0.75	0.47	10.00	8.70	4.35	3.48	0.87	50%	40%	10%	3.15	3.15		5.55
10+410	0.11	0.19	10.00	4.30	2.15	1.72	0.43	50%	40%	10%	3.30	2.15	1.15	1.00

Nota. Elaboración propia.

Anexo 25. Metrado de movimiento de tierra del SM-10 con RPAS.

Progresiva	Áreas (m ²)		Distancia (m)	VOLUMEN DE CORTE (m ³)				% de Explanaciones			VOLUMEN DE RELLENO (m ³)			
	Corte	Relleno		Corte total	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Relleno total	Relleno propio	Relleno préstamo	Eliminación de material
10+440	24.80	0.04												
10+450	34.57		10.00	296.85	148.43	118.74	29.69	50%	40%	10%	0.10	0.10		296.75
10+460	8.97	0.08	10.00	217.70	108.85	87.08	21.77	50%	40%	10%	0.20	0.20		217.50
10+470	27.93	0.02	10.00	184.50	92.25	73.80	18.45	50%	40%	10%	0.50	0.50		184.00
10+480	21.04	0.07	10.00	244.85	122.43	97.94	24.49	50%	40%	10%	0.45	0.45		244.40
10+490	27.38	0.03	10.00	242.10	121.05	96.84	24.21	50%	40%	10%	0.50	0.50		241.60
10+500	10.81	0.22	10.00	190.95	95.48	76.38	19.10	50%	40%	10%	1.25	1.25		189.70
10+510	6.93	0.33	10.00	88.70	44.35	35.48	8.87	50%	40%	10%	2.75	2.75		85.95
10+520	0.69	0.34	10.00	38.10	19.05	15.24	3.81	50%	40%	10%	3.35	3.35		34.75
10+530	1.38	0.09	10.00	10.35	5.18	4.14	1.04	50%	40%	10%	2.15	2.15		8.20

Nota. Elaboración propia.

Anexo 26. Medrado de movimiento de tierra del SM-11 con RPAS.

Progresiva	Áreas (m ²)		Distancia (m)	VOLUMEN DE CORTE (m ³)				% de Explanaciones			VOLUMEN DE RELLENO (m ³)			
	Corte	Relleno		Corte total	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Relleno total	Relleno propio	Relleno préstamo	Eliminación de material
11+195	0.55	0.25												
11+200	7.45	0.30	5.00	20.00	10.00	8.00	2.00	50%	40%	10%	1.38	1.38		18.63
11+210	2.75	0.36	10.00	51.00	25.50	20.40	5.10	50%	40%	10%	3.30	3.30		47.70
11+220	0.05	0.37	10.00	14.00	7.00	5.60	1.40	50%	40%	10%	3.65	3.65		10.35
11+230	1.78	0.23	10.00	9.15	4.58	3.66	0.92	50%	40%	10%	3.00	3.00		6.15
11+240	17.08	0.68	10.00	94.30	47.15	37.72	9.43	50%	40%	10%	4.55	4.55		89.75
11+250	43.66	0.63	10.00	303.70	151.85	121.48	30.37	50%	40%	10%	6.55	6.55		297.15
11+260	20.25	0.17	10.00	319.55	159.78	127.82	31.96	50%	40%	10%	4.00	4.00		315.55
11+270	0.56	0.37	10.00	104.05	52.03	41.62	10.41	50%	40%	10%	2.70	2.70		101.35
11+280	0.76	0.47	10.00	6.60	3.30	2.64	0.66	50%	40%	10%	4.20	3.30	0.90	2.40

Nota. Elaboración propia.

Anexo 27. Metrado de movimiento de tierra del SM-12 con RPAS.

Progresiva	Áreas (m ²)		Distancia (m)	VOLUMEN DE CORTE (m ³)				% de Explanaciones			VOLUMEN DE RELLENO (m ³)			
	Corte	Relleno		Corte total	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Relleno total	Relleno propio	Relleno préstamo	Eliminación de material
11+470	0.25	0.43												
11+480	0.66	0.24	10.00	4.55	1.82	1.37	1.37	40%	30%	30%	3.35	1.82	1.53	1.20
11+490	0.93	0.18	10.00	7.95	3.18	2.39	2.39	40%	30%	30%	2.10	2.10		5.85
11+500	14.81		10.00	78.70	31.48	23.61	23.61	40%	30%	30%	0.45	0.45		78.25
11+510	29.37	0.07	10.00	220.90	88.36	66.27	66.27	40%	30%	30%	0.18	0.18		220.73
11+520	9.60	0.09	10.00	194.85	77.94	58.46	58.46	40%	30%	30%	0.80	0.80		194.05
11+530	5.42	0.06	10.00	75.10	30.04	22.53	22.53	40%	30%	30%	0.75	0.75		74.35
11+540	3.29	0.02	10.00	43.55	17.42	13.07	13.07	40%	30%	30%	0.40	0.40		43.15
11+550	3.13	0.05	10.00	32.10	12.84	9.63	9.63	40%	30%	30%	0.35	0.35		31.75
11+560	6.15	0.14	10.00	46.40	18.56	13.92	13.92	40%	30%	30%	0.95	0.95		45.45
11+570	6.14	0.08	10.00	61.45	24.58	18.44	18.44	40%	30%	30%	1.10	1.10		60.35
11+580	1.30	0.17	10.00	37.20	14.88	11.16	11.16	40%	30%	30%	1.25	1.25		35.95
11+590	0.82	0.31	10.00	10.60	4.24	3.18	3.18	40%	30%	30%	2.40	2.40		8.20
11+600	0.88	0.32	10.00	8.50	3.40	2.55	2.55	40%	30%	30%	3.15	3.15		5.35

Nota. Elaboración propia.

Anexo 28. Metrado de movimiento de tierra del SM-13 con RPAS.

Progresiva	Áreas (m²)		Distancia (m)	VOLUMEN DE CORTE (m³)				% de Explanaciones			VOLUMEN DE RELLENO (m³)			
	Corte	Relleno		Corte total	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Relleno total	Relleno propio	Relleno préstamo	Eliminación de material
11+860	2.54	0.10												
11+870	23.62		10.00	130.80	65.40	52.32	13.08	50%	40%	10%	0.25	0.25		130.55
11+880	35.05	0.13	10.00	293.35	146.68	117.34	29.34	50%	40%	10%	0.33	0.33		293.03
11+890	7.25	0.04	10.00	211.50	105.75	84.60	21.15	50%	40%	10%	0.85	0.85		210.65
11+900	1.09	0.08	10.00	41.70	20.85	16.68	4.17	50%	40%	10%	0.60	0.60		41.10
11+910	1.27	0.18	10.00	11.80	5.90	4.72	1.18	50%	40%	10%	1.30	1.30		10.50
11+920	2.02	0.20	10.00	16.45	8.23	6.58	1.65	50%	40%	10%	1.90	1.90		14.55
11+930	0.85	0.24	10.00	14.35	7.18	5.74	1.44	50%	40%	10%	2.20	2.20		12.15
11+940	1.69	0.10	10.00	12.70	6.35	5.08	1.27	50%	40%	10%	1.70	1.70		11.00
11+950	27.60	0.33	10.00	146.45	73.23	58.58	14.65	50%	40%	10%	2.15	2.15		144.30
11+960	54.61	0.36	10.00	411.05	205.53	164.42	41.11	50%	40%	10%	3.45	3.45		407.60
11+970	36.74	0.43	10.00	456.75	228.38	182.70	45.68	50%	40%	10%	3.95	3.95		452.80
11+980	1.34	0.22	10.00	190.40	95.20	76.16	19.04	50%	40%	10%	3.25	3.25		187.15
11+990	2.17	0.01	10.00	17.55	8.78	7.02	1.76	50%	40%	10%	1.15	1.15		16.40
12+000	0.35	0.21	10.00	12.60	6.30	5.04	1.26	50%	40%	10%	1.10	1.10		11.50
12+010	1.52	0.22	10.00	9.35	4.68	3.74	0.94	50%	40%	10%	2.15	2.15		7.20
12+020	1.62		10.00	15.70	7.85	6.28	1.57	50%	40%	10%	0.55	0.55		15.15
12+030	1.23	0.03	10.00	14.25	7.13	5.70	1.43	50%	40%	10%	0.08	0.08		14.18
12+040	19.80		10.00	105.15	52.58	42.06	10.52	50%	40%	10%	0.08	0.08		105.08
12+050	27.20	0.18	10.00	235.00	117.50	94.00	23.50	50%	40%	10%	0.45	0.45		234.55
12+060	29.17	0.06	10.00	281.85	140.93	112.74	28.19	50%	40%	10%	1.20	1.20		280.65
12+070	21.49		10.00	253.30	126.65	101.32	25.33	50%	40%	10%	0.15	0.15		253.15

Nota. Elaboración propia.

Anexo 29. Medrado de movimiento de tierra del SM-14 con RPAS.

Progresiva	Áreas (m ²)		Distancia (m)	VOLUMEN DE CORTE (m ³)				% de Explanaciones			VOLUMEN DE RELLENO (m ³)			
	Corte	Relleno		Corte total	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Material suelto	Roca suelta	Roca fija	Relleno total	Relleno propio	Relleno préstamo	Eliminación de material
12+990	2.10	0.01												
13+000	5.85		10.00	39.75	11.93	11.93	15.90	30%	30%	40%	0.03	0.03		39.73
13+010	22.10		10.00	139.75	41.93	41.93	55.90	30%	30%	40%				139.75
13+020	43.67		10.00	328.85	98.66	98.66	131.54	30%	30%	40%				328.85
13+030	85.47	0.36	10.00	645.70	193.71	193.71	258.28	30%	30%	40%	0.90	0.90		644.80
13+040	65.49	0.10	10.00	754.80	226.44	226.44	301.92	30%	30%	40%	2.30	2.30		752.50
13+050	43.47	0.20	10.00	544.80	163.44	163.44	217.92	30%	30%	40%	1.50	1.50		543.30
13+060	31.15	0.08	10.00	373.10	111.93	111.93	149.24	30%	30%	40%	1.40	1.40		371.70
13+070	33.73	0.10	10.00	324.40	97.32	97.32	129.76	30%	30%	40%	0.90	0.90		323.50
13+080	6.12	0.06	10.00	199.25	59.78	59.78	79.70	30%	30%	40%	0.80	0.80		198.45
13+090	4.26	0.03	10.00	51.90	15.57	15.57	20.76	30%	30%	40%	0.45	0.45		51.45
13+100	1.38	0.02	10.00	28.20	8.46	8.46	11.28	30%	30%	40%	0.25	0.25		27.95

Nota. Elaboración propia.

Anexo 30. Evaluación de la precisión volumétrica del corte total.

Número	Tramo de estudio	Sector de mejoramiento	Progresiva inicial	Progresiva final	Longitud (m)	VOLUMEN DE CORTE (m³)			PRECISIÓN VOLUMÉTRICA	
						Corte total (Estación Total)	Corte total (RPAS)	Diferencia	APE (%)	Precisión relativa (%)
1	Tramo 9	2	4+190	4+290	100.00	1274.35	896.05	-378.30	29.69%	70.31%
2	Tramo 9	3	4+430	4+535	105.00	2954.83	2743.88	-210.95	7.14%	92.86%
3	Tramo 9	5.1	8+450	8+560	110.00	1662.35	1758.60	96.25	5.79%	94.21%
4	Tramo 9	6	8+910	9+030	120.00	793.20	936.05	142.85	18.01%	81.99%
5	Tramo 9	7	9+220	9+303	83.00	222.05	235.87	13.83	6.23%	93.77%
6	Tramo 9	8	9+760	9+940	180.00	2597.95	2440.25	-157.70	6.07%	93.93%
7	Tramo 9	9	10+340	10+410	70.00	433.70	399.20	-34.50	7.95%	92.05%
8	Tramo 9	10	10+440	10+530	90.00	1508.80	1514.10	5.30	0.35%	99.65%
9	Tramo 9	11	11+195	11+280	85.00	978.15	922.35	-55.80	5.70%	94.30%
10	Tramo 9	12	11+470	11+600	130.00	936.30	821.85	-114.45	12.22%	87.78%
11	Tramo 9	13	11+860	12+070	210.00	3345.50	2882.05	-463.45	13.85%	86.15%
12	Tramo 9	14	12+990	13+100	110.00	2965.45	3430.50	465.05	15.68%	84.32%
				Total	1393.00	19672.62	18980.75	-691.87	3.52%	96.48%

MAPE	10.72%
Precisión global	89.28%
R²	0.95
RMSE	239.936 m³

Nota. Elaboración propia.

Anexo 31. Evaluación de la precisión volumétrica del material suelto.

Número	Tramo de estudio	Sector de mejoramiento	Progresiva inicial	Progresiva final	Longitud (m)	VOLUMEN DE CORTE (m³)			PRECISIÓN VOLUMÉTRICA	
						Material suelto (Estación Total)	Material suelto (RPAS)	Diferencia	APE (%)	Precisión relativa (%)
1	Tramo 9	2	4+190	4+290	100.00	509.74	358.42	-151.32	29.69%	70.31%
2	Tramo 9	3	4+430	4+535	105.00	1181.93	1097.55	-84.38	7.14%	92.86%
3	Tramo 9	5.1	8+450	8+560	110.00	997.41	1055.16	57.75	5.79%	94.21%
4	Tramo 9	6	8+910	9+030	120.00	475.92	561.63	85.71	18.01%	81.99%
5	Tramo 9	7	9+220	9+303	83.00	133.23	141.52	8.29	6.23%	93.77%
6	Tramo 9	8	9+760	9+940	180.00	1088.17	998.54	-89.63	8.24%	91.76%
7	Tramo 9	9	10+340	10+410	70.00	216.85	199.60	-17.25	7.95%	92.05%
8	Tramo 9	10	10+440	10+530	90.00	754.40	757.05	2.65	0.35%	99.65%
9	Tramo 9	11	11+195	11+280	85.00	489.08	461.18	-27.90	5.70%	94.30%
10	Tramo 9	12	11+470	11+600	130.00	374.52	328.74	-45.78	12.22%	87.78%
11	Tramo 9	13	11+860	12+070	210.00	1672.75	1441.03	-231.73	13.85%	86.15%
12	Tramo 9	14	12+990	13+100	110.00	889.64	1029.15	139.52	15.68%	84.32%
				Total	1393.00	8783.62	8429.56	-354.06	4.03%	95.97%

MAPE	10.90%
Precisión global	89.10%
R²	0.95
RMSE	102.119 m³

Nota. Elaboración propia.

Anexo 32. Evaluación de la precisión volumétrica de la roca suelta.

Número	Tramo de estudio	Sector de mejoramiento	Progresiva inicial	Progresiva final	Longitud (m)	VOLUMEN DE CORTE (m³)			PRECISIÓN VOLUMÉTRICA	
						Roca suelta (Estación Total)	Roca suelta (RPAS)	Diferencia	APE (%)	Precisión relativa (%)
1	Tramo 9	2	4+190	4+290	100.00	382.31	268.82	-113.49	29.69%	70.31%
2	Tramo 9	3	4+430	4+535	105.00	886.45	823.16	-63.29	7.14%	92.86%
3	Tramo 9	5.1	8+450	8+560	110.00	332.47	351.72	19.25	5.79%	94.21%
4	Tramo 9	6	8+910	9+030	120.00	237.96	280.82	42.85	18.01%	81.99%
5	Tramo 9	7	9+220	9+303	83.00	66.61	70.76	4.15	6.23%	93.77%
6	Tramo 9	8	9+760	9+940	180.00	990.20	953.66	-36.53	3.69%	96.31%
7	Tramo 9	9	10+340	10+410	70.00	173.48	159.68	-13.80	7.95%	92.05%
8	Tramo 9	10	10+440	10+530	90.00	603.52	605.64	2.12	0.35%	99.65%
9	Tramo 9	11	11+195	11+280	85.00	391.26	368.94	-22.32	5.70%	94.30%
10	Tramo 9	12	11+470	11+600	130.00	280.89	246.56	-34.34	12.22%	87.78%
11	Tramo 9	13	11+860	12+070	210.00	1338.20	1152.82	-185.38	13.85%	86.15%
12	Tramo 9	14	12+990	13+100	110.00	889.64	1029.15	139.52	15.68%	84.32%
				Total	1393.00	6572.98	6311.72	-261.26	3.97%	96.03%

MAPE	10.53%
Precisión global	89.47%
R²	0.96
RMSE	79.659 m³

Nota. Elaboración propia.

Anexo 33. Evaluación de la precisión volumétrica de la roca fija.

Número	Tramo de estudio	Sector de mejoramiento	Progresiva inicial	Progresiva final	Longitud (m)	VOLUMEN DE CORTE (m ³)			PRECISIÓN VOLUMÉTRICA	
						Roca fija (Estación Total)	Roca fija (RPAS)	Diferencia	APE (%)	Precisión relativa (%)
1	Tramo 9	2	4+190	4+290	100.00	382.31	268.82	-113.49	29.69%	70.31%
2	Tramo 9	3	4+430	4+535	105.00	886.45	823.16	-63.29	7.14%	92.86%
3	Tramo 9	5.1	8+450	8+560	110.00	332.47	351.72	19.25	5.79%	94.21%
4	Tramo 9	6	8+910	9+030	120.00	79.32	93.61	14.29	18.01%	81.99%
5	Tramo 9	7	9+220	9+303	83.00	22.20	23.59	1.38	6.23%	93.77%
6	Tramo 9	8	9+760	9+940	180.00	519.59	488.05	-31.54	6.07%	93.93%
7	Tramo 9	9	10+340	10+410	70.00	43.37	39.92	-3.45	7.95%	92.05%
8	Tramo 9	10	10+440	10+530	90.00	150.88	151.41	0.53	0.35%	99.65%
9	Tramo 9	11	11+195	11+280	85.00	97.82	92.24	-5.58	5.70%	94.30%
10	Tramo 9	12	11+470	11+600	130.00	280.89	246.56	-34.34	12.22%	87.78%
11	Tramo 9	13	11+860	12+070	210.00	334.55	288.21	-46.35	13.85%	86.15%
12	Tramo 9	14	12+990	13+100	110.00	1186.18	1372.20	186.02	15.68%	84.32%
				Total	1393.00	4316.02	4239.46	-76.56	1.77%	98.23%

MAPE	10.72%
Precisión global	89.28%
R²	0.97
RMSE	68.575 m ³

Nota. Elaboración propia.

Anexo 34. Evaluación de la precisión volumétrica del relleno total.

Número	Tramo de estudio	Sector de mejoramiento	Progresiva inicial	Progresiva final	Longitud (m)	VOLUMEN DE RELLENO (m³)			PRECISIÓN VOLUMÉTRICA	
						Relleno total (Estación Total)	Relleno total (RPAS)	Diferencia	APE (%)	Precisión relativa (%)
1	Tramo 9	2	4+190	4+290	100.00	13.80	6.33	-7.48	54.17%	45.83%
2	Tramo 9	3	4+430	4+535	105.00	9.25	7.70	-1.55	16.76%	83.24%
3	Tramo 9	5.1	8+450	8+560	110.00	13.05	7.33	-5.73	43.87%	56.13%
4	Tramo 9	6	8+910	9+030	120.00	6.73	6.50	-0.23	3.35%	96.65%
5	Tramo 9	7	9+220	9+303	83.00	3.26	4.01	0.74	22.76%	77.24%
6	Tramo 9	8	9+760	9+940	180.00	21.83	19.05	-2.78	12.71%	87.29%
7	Tramo 9	9	10+340	10+410	70.00	8.95	9.23	0.28	3.07%	96.93%
8	Tramo 9	10	10+440	10+530	90.00	15.05	11.25	-3.80	25.25%	74.75%
9	Tramo 9	11	11+195	11+280	85.00	30.88	33.33	2.45	7.94%	92.06%
10	Tramo 9	12	11+470	11+600	130.00	14.08	17.23	3.15	22.38%	77.62%
11	Tramo 9	13	11+860	12+070	210.00	42.50	28.83	-13.68	32.18%	67.82%
12	Tramo 9	14	12+990	13+100	110.00	13.73	8.53	-5.20	37.89%	62.11%
				Total	1393.00	193.09	159.28	-33.81	17.51%	82.49%

MAPE	23.53%
Precisión global	76.47%
R²	0.81
RMSE	5.353 m³

Nota. Elaboración propia.

Anexo 35. Evaluación de la precisión volumétrica del relleno propio.

Número	Tramo de estudio	Sector de mejoramiento	Progresiva inicial	Progresiva final	Longitud (m)	VOLUMEN DE RELLENO (m³)			PRECISIÓN VOLUMÉTRICA	
						Relleno propio (Estación Total)	Relleno propio (RPAS)	Diferencia	APE (%)	Precisión relativa (%)
1	Tramo 9	2	4+190	4+290	100.00	13.80	5.59	-8.22	59.53%	40.47%
2	Tramo 9	3	4+430	4+535	105.00	9.25	7.70	-1.55	16.76%	83.24%
3	Tramo 9	5.1	8+450	8+560	110.00	13.05	7.33	-5.73	43.87%	56.13%
4	Tramo 9	6	8+910	9+030	120.00	6.73	6.50	-0.23	3.35%	96.65%
5	Tramo 9	7	9+220	9+303	83.00	3.26	3.96	0.69	21.29%	78.71%
6	Tramo 9	8	9+760	9+940	180.00	21.83	19.05	-2.78	12.71%	87.29%
7	Tramo 9	9	10+340	10+410	70.00	7.28	8.08	0.80	11.00%	89.00%
8	Tramo 9	10	10+440	10+530	90.00	14.95	11.25	-3.70	24.75%	75.25%
9	Tramo 9	11	11+195	11+280	85.00	30.88	32.43	1.55	5.02%	94.98%
10	Tramo 9	12	11+470	11+600	130.00	12.18	15.70	3.52	28.91%	71.09%
11	Tramo 9	13	11+860	12+070	210.00	42.50	28.83	-13.68	32.18%	67.82%
12	Tramo 9	14	12+990	13+100	110.00	13.73	8.53	-5.20	37.89%	62.11%
				Total	1393.00	189.41	154.91	-34.50	18.21%	81.79%

MAPE	24.77%
Precisión global	75.23%
R²	0.82
RMSE	5.432 m³

Nota. Elaboración propia.

Anexo 36. Evaluación de la precisión volumétrica del relleno de préstamo.

Número	Tramo de estudio	Sector de mejoramiento	Progresiva inicial	Progresiva final	Longitud (m)	VOLUMEN DE RELLENO (m³)			PRECISIÓN VOLUMÉTRICA	
						Relleno de préstamo (Estación Total)	Relleno de préstamo (RPAS)	Diferencia	APE (%)	Precisión relativa (%)
1	Tramo 9	2	4+190	4+290	100.00	0.00	0.74	0.74	-	-
2	Tramo 9	3	4+430	4+535	105.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	100.00%
3	Tramo 9	5.1	8+450	8+560	110.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	100.00%
4	Tramo 9	6	8+910	9+030	120.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	100.00%
5	Tramo 9	7	9+220	9+303	83.00	0.00	0.05	0.05	-	-
6	Tramo 9	8	9+760	9+940	180.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	100.00%
7	Tramo 9	9	10+340	10+410	70.00	1.68	1.15	-0.53	31.34%	68.66%
8	Tramo 9	10	10+440	10+530	90.00	0.10	0.00	-0.10	-	-
9	Tramo 9	11	11+195	11+280	85.00	0.00	0.90	0.90	-	-
10	Tramo 9	12	11+470	11+600	130.00	1.90	1.53	-0.37	19.47%	80.53%
11	Tramo 9	13	11+860	12+070	210.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	100.00%
12	Tramo 9	14	12+990	13+100	110.00	0.00	0.00	0.00	0.00%	100.00%
				Total	1393.00	3.68	4.37	0.69	18.86%	81.14%

MAPE	6.35%
Precisión global	93.65%
R²	0.67
RMSE	0.385 m³

Nota. Elaboración propia.

Anexo 37. Evaluación de la precisión volumétrica de la eliminación de material.

Número	Tramo de estudio	Sector de mejoramiento	Progresiva inicial	Progresiva final	Longitud (m)	VOLUMEN DE RELLENO (m³)			PRECISIÓN VOLUMÉTRICA	
						Eliminación de material (Estación Total)	Eliminación de material (RPAS)	Diferencia	APE (%)	Precisión relativa (%)
1	Tramo 9	2	4+190	4+290	100.00	1260.55	889.73	-370.83	29.42%	70.58%
2	Tramo 9	3	4+430	4+535	105.00	2945.58	2736.18	-209.40	7.11%	92.89%
3	Tramo 9	5.1	8+450	8+560	110.00	1649.30	1751.28	101.98	6.18%	93.82%
4	Tramo 9	6	8+910	9+030	120.00	786.48	929.55	143.08	18.19%	81.81%
5	Tramo 9	7	9+220	9+303	83.00	218.78	231.87	13.08	5.98%	94.02%
6	Tramo 9	8	9+760	9+940	180.00	2576.13	2421.20	-154.93	6.01%	93.99%
7	Tramo 9	9	10+340	10+410	70.00	424.75	389.98	-34.78	8.19%	91.81%
8	Tramo 9	10	10+440	10+530	90.00	1493.75	1502.85	9.10	0.61%	99.39%
9	Tramo 9	11	11+195	11+280	85.00	947.28	889.03	-58.25	6.15%	93.85%
10	Tramo 9	12	11+470	11+600	130.00	922.23	804.63	-117.60	12.75%	87.25%
11	Tramo 9	13	11+860	12+070	210.00	3303.00	2853.23	-449.78	13.62%	86.38%
12	Tramo 9	14	12+990	13+100	110.00	2951.73	3421.98	470.25	15.93%	84.07%
				Total	1393.00	19479.53	18821.47	-658.07	3.38%	96.62%

MAPE	10.85%
Precisión global	89.15%
R²	0.95
RMSE	237.759 m³

Nota. Elaboración propia.

Anexo 38. Generación de banquetas del SM-02.

Presencia de banquetas				
Sector	Progresiva	Estación total	RPAS	Diferencia
SM-02	4+190	NO	NO	No existe diferencia
	4+200	NO	NO	No existe diferencia
	4+210	NO	NO	No existe diferencia
	4+220	NO	NO	No existe diferencia
	4+230	NO	NO	No existe diferencia
	4+240	NO	NO	No existe diferencia
	4+250	SI	SI	No existe diferencia
	4+260	SI	NO	Existe diferencia
	4+270	SI	SI	No existe diferencia
	4+280	SI	NO	Existe diferencia
	4+290	NO	SI	Existe diferencia
Cantidad de banquetas		4	3	
Cantidad de secciones que difieren entre sí		3		

Nota. Elaboración propia.

Anexo 39. Generación de banquetas del SM-03.

Presencia de banquetas				
Sector	Progresiva	Estación total	RPAS	Diferencia
SM-03	4+430	SI	NO	Existe diferencia
	4+440	SI	SI	No existe diferencia
	4+450	SI	NO	Existe diferencia
	4+460	SI	NO	Existe diferencia
	4+470	SI	SI	No existe diferencia
	4+480	SI	SI	No existe diferencia
	4+490	SI	SI	No existe diferencia
	4+500	SI	SI	No existe diferencia
	4+510	SI	SI	No existe diferencia
	4+520	NO	SI	Existe diferencia
	4+530	NO	NO	No existe diferencia
	4+535	NO	NO	No existe diferencia
Cantidad de banquetas		9	7	
Cantidad de secciones que difieren entre sí		4		

Nota. Elaboración propia.

Anexo 40. Generación de banquetas del SM-05.1.

Presencia de banquetas				
Sector	Progresiva	Estación total	RPAS	Diferencia
SM-05.1	8+450	NO	NO	No existe diferencia
	8+460	NO	NO	No existe diferencia
	8+470	NO	NO	No existe diferencia
	8+480	NO	NO	No existe diferencia
	8+490	NO	NO	No existe diferencia
	8+500	NO	NO	No existe diferencia
	8+510	SI	SI	No existe diferencia
	8+520	SI	SI	No existe diferencia
	8+530	SI	SI	No existe diferencia
	8+540	NO	NO	No existe diferencia
	8+550	NO	NO	No existe diferencia
	8+560	NO	NO	No existe diferencia
Cantidad de banquetas		3	3	
Cantidad de secciones que difieren entre sí		0		

Nota. Elaboración propia.

Anexo 41. Generación de banquetas del SM-06.

Presencia de banquetas				
Sector	Progresiva	Estación total	RPAS	Diferencia
SM-06	8+910	NO	NO	No existe diferencia
	8+920	NO	NO	No existe diferencia
	8+930	NO	NO	No existe diferencia
	8+940	NO	NO	No existe diferencia
	8+950	NO	NO	No existe diferencia
	8+960	NO	NO	No existe diferencia
	8+970	NO	NO	No existe diferencia
	8+980	NO	NO	No existe diferencia
	8+990	NO	NO	No existe diferencia
	9+000	SI	SI	No existe diferencia
	9+010	NO	NO	No existe diferencia
	9+020	NO	SI	Existe diferencia
	9+030	SI	NO	Existe diferencia
Cantidad de banquetas		2	2	
Cantidad de secciones que difieren entre sí		2		

Nota. Elaboración propia.

Anexo 42. Generación de banquetas del SM-07.

Presencia de banquetas				
Sector	Progresiva	Estación total	RPAS	Diferencia
SM-07	9+220	NO	NO	No existe diferencia
	9+230	NO	NO	No existe diferencia
	9+240	NO	NO	No existe diferencia
	9+250	NO	NO	No existe diferencia
	9+260	NO	NO	No existe diferencia
	9+270	NO	NO	No existe diferencia
	9+280	NO	NO	No existe diferencia
	9+290	NO	NO	No existe diferencia
	9+300	NO	NO	No existe diferencia
	9+303	NO	NO	No existe diferencia
Cantidad de banquetas		0	0	
Cantidad de secciones que difieren entre sí		0		

Nota. Elaboración propia.

Anexo 43. Generación de banquetas del SM-08.

Presencia de banquetas				
Sector	Progresiva	Estación total	RPAS	Diferencia
SM-08	9+760	NO	NO	No existe diferencia
	9+770	NO	NO	No existe diferencia
	9+780	SI	NO	Existe diferencia
	9+790	SI	NO	Existe diferencia
	9+800	NO	NO	No existe diferencia
	9+820	NO	NO	No existe diferencia
	9+830	SI	SI	No existe diferencia
	9+840	SI	SI	No existe diferencia
	9+850	SI	SI	No existe diferencia
	9+860	NO	NO	No existe diferencia
	9+880	NO	NO	No existe diferencia
	9+900	NO	NO	No existe diferencia
	9+910	NO	NO	No existe diferencia
	9+920	NO	NO	No existe diferencia
	9+930	NO	NO	No existe diferencia
	9+940	NO	NO	No existe diferencia
Cantidad de banquetas		5	3	
Cantidad de secciones que difieren entre sí		2		

Nota. Elaboración propia.

Anexo 44. Generación de banquetas del SM-09.

Presencia de banquetas				
Sector	Progresiva	Estación total	RPAS	Diferencia
SM-09	10+340	NO	NO	No existe diferencia
	10+350	NO	NO	No existe diferencia
	10+360	NO	NO	No existe diferencia
	10+370	NO	NO	No existe diferencia
	10+380	NO	NO	No existe diferencia
	10+390	NO	NO	No existe diferencia
	10+400	NO	NO	No existe diferencia
	10+410	NO	NO	No existe diferencia
Cantidad de banquetas		0	0	
Cantidad de secciones que difieren entre sí		0		

Nota. Elaboración propia.

Anexo 45. Generación de banquetas del SM-10.

Presencia de banquetas				
Sector	Progresiva	Estación total	RPAS	Diferencia
SM-10	10+440	SI	SI	No existe diferencia
	10+450	SI	SI	No existe diferencia
	10+460	SI	NO	Existe diferencia
	10+470	SI	SI	No existe diferencia
	10+480	SI	SI	No existe diferencia
	10+490	SI	SI	No existe diferencia
	10+500	NO	NO	No existe diferencia
	10+510	SI	NO	Existe diferencia
	10+520	NO	NO	No existe diferencia
	10+530	NO	NO	No existe diferencia
Cantidad de banquetas		7	5	
Cantidad de secciones que difieren entre sí		2		

Nota. Elaboración propia.

Anexo 46. Generación de banquetas del SM-11.

Presencia de banquetas				
Sector	Progresiva	Estación total	RPAS	Diferencia
SM-11	11+195	NO	NO	No existe diferencia
	11+200	NO	NO	No existe diferencia
	11+210	NO	NO	No existe diferencia
	11+220	NO	NO	No existe diferencia
	11+230	NO	NO	No existe diferencia
	11+240	SI	SI	No existe diferencia
	11+250	SI	SI	No existe diferencia
	11+260	SI	SI	No existe diferencia
	11+270	NO	NO	No existe diferencia
	11+280	NO	NO	No existe diferencia
Cantidad de banquetas		3	3	
Cantidad de secciones que difieren entre sí		0		

Nota. Elaboración propia.

Anexo 47. Generación de banquetas del SM-12.

Presencia de banquetas				
Sector	Progresiva	Estación total	RPAS	Diferencia
SM-12	11+470	NO	NO	No existe diferencia
	11+480	NO	NO	No existe diferencia
	11+490	NO	NO	No existe diferencia
	11+500	SI	SI	No existe diferencia
	11+510	SI	SI	No existe diferencia
	11+520	NO	NO	No existe diferencia
	11+530	NO	NO	No existe diferencia
	11+540	NO	NO	No existe diferencia
	11+550	NO	NO	No existe diferencia
	11+560	SI	NO	Existe diferencia
	11+570	NO	NO	No existe diferencia
	11+580	NO	NO	No existe diferencia
	11+590	NO	NO	No existe diferencia
	11+600	NO	NO	No existe diferencia
Cantidad de banquetas		3	2	
Cantidad de secciones que difieren entre sí		1		

Nota. Elaboración propia.

Anexo 48. *Generación de banquetas del SM-13.*

Presencia de banquetas				
Sector	Progresiva	Estación total	RPAS	Diferencia
SM-13	11+860	NO	NO	No existe diferencia
	11+870	SI	SI	No existe diferencia
	11+880	SI	SI	No existe diferencia
	11+890	NO	NO	No existe diferencia
	11+900	NO	NO	No existe diferencia
	11+910	NO	NO	No existe diferencia
	11+920	SI	NO	Existe diferencia
	11+930	NO	NO	No existe diferencia
	11+940	NO	NO	No existe diferencia
	11+950	SI	SI	No existe diferencia
	11+960	SI	SI	No existe diferencia
	11+970	SI	SI	No existe diferencia
	11+980	NO	NO	No existe diferencia
	11+990	NO	NO	No existe diferencia
	12+000	NO	NO	No existe diferencia
	12+010	NO	NO	No existe diferencia
	12+020	NO	NO	No existe diferencia
	12+030	NO	NO	No existe diferencia
	12+040	SI	SI	No existe diferencia
	12+050	SI	SI	No existe diferencia
	12+060	NO	SI	Existe diferencia
	12+070	NO	SI	Existe diferencia
Cantidad de banquetas		8	9	
Cantidad de secciones que difieren entre sí		3		

Nota. Elaboración propia.

Anexo 49. *Generación de banquetas del SM-14.*

Presencia de banquetas				
Sector	Progresiva	Estación total	RPAS	Diferencia
SM-14	12+990	NO	NO	No existe diferencia
	13+000	SI	NO	Existe diferencia
	13+010	SI	SI	No existe diferencia
	13+020	SI	SI	No existe diferencia
	13+030	SI	SI	No existe diferencia
	13+040	SI	SI	No existe diferencia
	13+050	SI	SI	No existe diferencia
	13+060	SI	SI	No existe diferencia
	13+070	NO	SI	Existe diferencia
	13+080	NO	NO	No existe diferencia
	13+090	NO	NO	No existe diferencia
	13+100	NO	NO	No existe diferencia
Cantidad de banquetas		7	7	
Cantidad de secciones que difieren entre sí		2		

Nota. Elaboración propia.

Anexo 50. *Interpretación de los valores del coeficiente de determinación (R^2).*

Valor de R^2	Relación	Interpretación
0	Sin relación	No explica ninguna de las variaciones en la variable dependiente.
0 - 0.2	Relación débil	Explica muy poca variación en la variable dependiente
0.2 - 0.4	Relación moderada	Explica algunas de las variaciones en la variable dependiente.
0.4 - 0.6	Relación fuerte	Explica una parte significativa de la variación en la variable dependiente
0.6 - 0.8	Relación muy fuerte	Explica una gran proporción de la variación en la variable dependiente.
0.8 - 1.0	Relación perfecta	Explica todas las variaciones en la variable dependiente.

Nota. Extraído de Ayenew (2023).