



# UNIVERSIDAD DE GRANADA

Programa de Doctorado en Ingeniería Civil

Aplicación de vehículos no tripulados y técnicas GNSS en el análisis de la actividad de movimientos de ladera: Aplicación a casos en la cuenca de Loja – Ecuador.

Autor: Belizario Amador Zárate Torres

Directores: Dr. Rachid El Hamdouni Jenoui  
Universidad de Granada  
Dr. Tomás Fernández del Castillo  
Universidad de Jaén

2024

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales  
Autor: Belizario Amador Zarate Torres  
ISBN: 978-84-1195-314-6  
URI: <https://hdl.handle.net/10481/92466>

## **RESUMEN**

La presente tesis doctoral tuvo como finalidad estudiar tres laderas inestables ubicadas en la ciudad de Loja, Provincia de Loja – Ecuador mediante el empleo vehículos aéreos no tripulados (VANT) o remotamente pilotados (VARP) apoyado en técnicas GNSS. Las tres zonas, ubicadas en materiales sedimentarios de la cuenca de Loja (arcillas, limolitas, areniscas y conglomerados, fundamentalmente), corresponde a los parajes de Victoria, Colinas Lojanas y El Plateado. Los estudios se realizaron empleando los productos fotogramétricos derivados de los vuelos con VANT, como son las ortoimágenes y los modelos digitales de elevación (MDE), con una resolución de 0.10 m. Los objetivos son la caracterización geomorfológica de los movimientos y áreas inestables, así como la medida de desplazamientos mediante diversas técnicas que permitan conocer la evolución de las laderas en el periodo analizado. Con ello se contribuirá a un mayor conocimiento de los movimientos de ladera en una zona de alta incidencia como la cuenca de Loja y se ensayarán metodologías de estudio aplicables a otras zonas montañosas.

Las técnicas GNSS permitieron la obtención de posiciones de puntos superficiales tanto para medir desplazamientos como para determinar las coordenadas de los puntos de apoyo fotogramétrico denominados puntos de control (Ground Control Points – GCP). Con el vehículo aéreo no tripulado se obtuvieron fotografías aéreas de las zonas de estudio, que luego de ser procesadas en un software basado en algoritmos Structure from Motion, derivaron en dos productos fotogramétricos: ortoimágenes y modelos digitales de superficies (MDS). La observación de las ortoimágenes con el apoyo de los MDS posibilitó la realización de una zonificación de los movimientos de ladera estudiados, diferenciando sus rasgos y elementos característicos como escarpes, cabecera, cuerpo y pie. Además, los MDS de distintas fechas se

compararon a través del cálculo de modelos de diferencias (Mdd) y distancias 3D entre las superficies, así como mediante perfiles longitudinales y transversales.

Por otra parte, a partir de los MDS se generaron, en un sistema de información geográfica (SIG), diversos parámetros morfométricos recogidos en modelos de pendiente, orientación de la pendiente, sombreado, índice de posición topográfica (TPI), índice de rugosidad del terreno (TRI) e índice topográfico de humedad (TWI). Mediante análisis estadístico zonal y sobre perfiles, se caracterizaron con detalle cada uno de los elementos de los movimientos de ladera y, en general, de las áreas inestables, en función de los parámetros morfométricos considerados. Adicionalmente, a partir de los modelos TPI se extrajeron líneas de ruptura de la pendiente que corresponden a rasgos características de los movimientos como la coronación y base de los escarpes o la línea que marca la punta o frente del pie de los movimientos.

Finalmente, se emplearon distintas técnicas para medir desplazamientos dentro de los movimientos estudiados. Además de los Mdd y distancias 3D, se midieron puntos GNSS sobre terreno y se extrajeron puntos desde los productos VANT (ortoimágenes y MDS) a partir de los cuales se calcularon desplazamientos tanto horizontales como verticales. Adicionalmente, se ensayaron técnicas basadas en el análisis digital de imágenes, en este caso sobre las ortoimágenes, que permiten estimar fundamentalmente desplazamientos horizontales de forma automática.

Los resultados obtenidos han permitido en primer lugar obtener modelos precisos de la superficie del terreno con una incertidumbre a priori de 0.15 m para los desplazamientos horizontales y verticales establecida a partir de la resolución de las imágenes VANT y los errores en los puntos de chequeo y control. Tras la comprobación de los desplazamientos en



áreas estables de las zonas de trabajo, la incertidumbre final o límite de detección de los desplazamientos horizontales se fijó en 0.15 m y en 0.25 m para los desplazamientos verticales.

El análisis zonal para la caracterización de los movimientos permite establecer que los factores que mejor diferencian entre sus elementos son la pendiente y el TPI, aunque el resto de los factores (orientación, sombreado y rugosidad) también contribuyen a la identificación local de los elementos. La pendiente permite distinguir generalmente los sectores más activos de los menos activos, pero especialmente diferenciar los escarpes y los pies de los movimientos. El TPI y, particularmente, las líneas de ruptura de la pendiente son decisivas a la hora de identificar los límites superiores (coronación) e inferiores de los escarpes, así como el frente o punta de los pies de los movimientos, sobre todo cuando se remuestran los modelos a una menor resolución (1 m en este trabajo). El TWI, por su parte, aporta información relevante en cuanto a cómo se acumula el agua de escorrentía en el terreno y cómo se configuran las redes hidrográficas externas e internas a los movimientos, lo que tiene gran importancia en la estabilidad y dinámica de las laderas. La comparación de los modelos derivados de distintas fechas posibilita además obtener información sobre la evolución del movimiento; y en algunos casos, como en la comparación de líneas extraídas del TPI, medir incluso desplazamientos.

Por su parte, las técnicas para la medida de desplazamientos muestran una compatibilidad y coherencia bastante grande entre ellas, tanto para la medida de desplazamientos horizontales (puntos GNSS, puntos extraídos desde VANT y análisis de correlación de imágenes), como los verticales (puntos GNSS, puntos VANT y MdD) y totales (distancias 3D). No obstante, muestran diferencias entre ellos que se discuten en el texto, junto a las ventajas e limitaciones de cada uno de ellos. En conjunto, las distintas técnicas muestran la evolución natural de la superficie del terreno en los movimientos de ladera y áreas inestables, que es a desplazarse

hacia abajo (por retracción de escarpes o por descenso real del terreno) y hacia delante (avance del material y en menor medida pequeños ascensos reales en algunos sectores). Además, permiten estimar tasas de desplazamiento que informan sobre su cinemática.

De todo el análisis realizado, incorporando la observación sinóptica que aportan los perfiles se ha podido reconstruir el punto de partida de las zonas estudiadas y su evolución a lo largo del periodo de monitorización. Así, en primer lugar, en la zona de Victoria se tienen un área de reptación con deformación muy lenta de la superficie (tasas inferiores a 0.1 m/mes en el periodo analizado) y cambios suaves en la morfología de la ladera en sus sectores más activo y menos activo. En la zona de Colinas Lojanas se ha detectado un flujo de tierras en estado preparatorio-incipiente con tasa muy lenta de desplazamiento (en torno a 0.1 m/mes en los dos periodos analizados), más activo en el pie, afectando a una carretera y arruinando varias construcciones. Finalmente, en la zona del Plateado se ha observado un flujo de tierras en estado avanzado con un escarpe, cuerpo y pie bien desarrollados, tasa de desplazamiento lenta (hasta 1 m/mes en algunos sectores), que afecta a una carretera y probablemente la deforma. La observación de todos los elementos, la organización de la red hidrográfica mediante el TWI y algunos datos geotécnicos permiten aventurar algunas observaciones sobre la estabilidad y dinámica de los movimientos estudiados.

Como conclusión final se puede apuntar que la obtención de modelos precisos de la superficie (ortoimágenes y MDS), a partir de captura de imágenes con VANT, su precisa georreferenciación y su procesado fotogramétrico, ha permitido la caracterización geomorfológica detallada de movimientos de ladera y áreas inestables, así como la medida de desplazamientos y el conocimiento de la cinemática del movimiento. En general se aprecia una buena coherencia, compatibilidad y complementariedad entre todas las técnicas empleadas.

# INDICE GENERAL

## Contenido

RESUMEN.....	1
INDICE GENERAL.....	5
ÍNDICE DE TABLAS .....	10
ÍNDICE DE FIGURA .....	13
1. INTRODUCCIÓN.....	21
1.1. Contexto.....	21
1.2. Justificación .....	21
1.3. Objetivos de la Tesis.....	24
• Obtención de modelos precisos y fiables del terreno .....	24
• Caracterización geomorfológica de los movimientos de ladera y los elementos asociados .....	24
• Detección de cambios en la superficie del terreno y estimación de desplazamientos	25
• Conocimiento de la actividad y cinemática de los movimientos de ladera .....	25
1.4. Estructura del documento .....	26
2. ANTECEDENTES .....	29
2.1. Generalidades sobre los movimientos de ladera.....	29
2.1.1. Definición de movimiento de ladera .....	29
2.1.2. Elementos de un movimiento de ladera.....	30
2.1.3. Tipologías de movimientos de ladera.....	34
2.1.4. Causas e impacto de los movimientos de ladera .....	45
2.1.5. Riesgos y medidas de reducción.....	46
2.2. Monitorización de los movimientos de ladera.....	47
2.3. Sensores remotos para la monitorización de movimientos .....	52
2.4. Fotogrametría VANT para el estudio de movimientos de ladera.....	58
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	66
3.1. Zonas de estudio .....	66
3.1.1. Clima y vegetación .....	67
3.1.2. Hidrografía.....	68
3.1.3. Uso del Suelo.....	68

3.1.4.	Ámbito socioeconómico .....	70
3.1.5.	Contexto geológico.....	70
3.1.5.1.	Zona de Victoria .....	71
3.1.5.2.	Zona de Colinas Lojanas .....	71
3.1.5.3.	Zona de El Plateado .....	72
3.1.6.	Geomorfología y evidencias de movimientos de ladera.....	74
3.1.6.1.	Zona de Victoria .....	79
3.1.6.2.	Zona de Colinas Lojanas .....	81
3.1.6.3.	Zona de El Plateado .....	83
3.2.	Materiales .....	86
3.2.1.	Instrumental GNSS.....	86
3.2.2.	Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) y sensores.....	86
3.2.3.	Software utilizado.....	89
3.2.4.	Instrumental geotécnico.....	91
3.3.	Metodología.....	92
3.3.1.	Captura de datos .....	94
3.3.1.1.	GNSS .....	94
3.3.1.1.1.	Establecimiento de redes de control GNSS.....	94
3.3.1.1.2.	Medida de puntos con GNSS .....	97
3.3.1.2.	Imágenes capturadas con VANT .....	99
3.3.1.2.1.	Planificación y preparación del vuelo. ....	101
3.3.1.2.2.	Ejecución del vuelo y captura de imágenes .....	103
3.3.2.	Procesamiento de datos .....	104
3.3.2.1.	Descarga de datos .....	104
3.3.2.2.	Post-procesamiento de datos GNSS .....	104
3.3.2.3.	Orientación de los vuelos .....	105
3.3.2.4.	Generación de productos fotogramétricos .....	109
3.3.3.	Caracterización de los movimientos de ladera .....	111
3.3.3.1.	Obtención de modelos derivados.....	112
3.3.3.2.	Identificación y delimitación de elementos por interpretación visual.....	120
3.3.3.3.	Extracción de elementos .....	122
3.3.3.4.	Análisis de los elementos .....	124

3.3.4.	Análisis de la evolución de los movimientos de ladera.....	126
3.3.4.1.	MDS de diferencias .....	126
3.3.4.2.	Obtención y comparación de perfiles .....	129
3.3.4.3.	Cálculo de desplazamientos 3D.....	130
3.3.4.4.	Comparación de modelos derivados y elementos extraídos.....	133
3.3.4.5.	Cálculo de desplazamientos en puntos característicos .....	134
3.3.4.5.1.	Cálculo de desplazamientos entre puntos GNSS .....	135
3.3.4.5.2.	Extracción de puntos desde vuelos VANT y cálculo de coordenadas .....	136
3.3.4.5.3.	Cálculo de desplazamientos entre puntos de vuelos VANT .....	136
3.3.4.6.	Estimación de la deformación por correlación de imágenes .....	137
3.3.4.6.1.	Estimación de deformaciones mediante Software Cosi-Corr .....	139
3.3.4.6.2.	Cálculo de desplazamientos basado en SfM .....	141
3.3.4.6.3.	Otros métodos para el cálculo de desplazamientos o deformaciones .....	142
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	145
4.1.	Zona de estudio Victoria.....	145
4.1.1.	Ortoimágenes y zonificación del área inestable .....	145
4.1.2.	Modelos digitales de superficies y su evolución .....	148
4.1.2.1.	Modelos digitales de superficies.....	148
4.1.2.2.	Modelos de diferencias .....	151
4.1.2.3.	Desplazamientos 3D .....	154
4.1.2.4.	Perfiles .....	156
4.1.3.	Modelos derivados, análisis morfométrico y evolución de la morfología. ....	161
4.1.3.1.	Distribución y evolución de la pendiente .....	161
4.1.3.2.	Distribución y evolución de la orientación.....	166
4.1.3.3.	Distribución y evolución del sombreado .....	170
4.1.3.4.	Distribución y evolución del TPI.....	173
4.1.3.5.	Distribución y evolución del TRI .....	179
4.1.3.6.	Distribución y evolución del TWI .....	183
4.1.4.	Desplazamientos en puntos significativos .....	186
4.1.4.1.	Desplazamientos en puntos GNSS .....	186
4.1.4.2.	Desplazamientos en puntos extraídos a partir de los productos VANT .....	189
4.1.5.	Desplazamientos medidos mediante análisis de correlación de imágenes .....	194

4.1.5.1. Software Cosi-Corr.....	194
4.1.6. Discusión de la zona de estudio Victoria.....	197
4.1.6.1. Precisión e incertidumbre .....	197
4.1.6.2. Caracterización del área inestable .....	198
4.1.6.3. Cinemática y evolución del área inestable .....	203
4.2. Zona de estudio Colinas Lojanas.....	210
4.2.1. Ortoimágenes y zonificación del movimiento de ladera .....	210
4.2.2. Modelos digitales de superficies y su evolución .....	214
4.2.2.1. Modelos digitales de superficies.....	214
4.2.2.2. Modelos de diferencias .....	218
4.2.2.3. Desplazamientos 3D .....	220
4.2.2.4. Perfiles.....	224
4.2.3. Modelos derivados, análisis morfométrico y evolución de la morfología. ....	229
4.2.3.1. Distribución y evolución de la pendiente .....	229
4.2.3.2. Distribución y evolución de la orientación.....	235
4.2.3.3. Distribución y evolución del sombreado .....	241
4.2.3.4. Distribución y evolución del TPI.....	246
4.2.3.5. Distribución y evolución del TRI .....	256
4.2.3.6. Distribución y evolución del TWI.....	262
4.2.4. Desplazamientos en puntos significativos .....	267
4.2.4.1. Desplazamientos en puntos GNSS .....	267
4.2.4.2. Desplazamientos en puntos extraídos a partir de los productos VANT .....	272
4.2.5. Desplazamientos medidos mediante análisis de correlación de imágenes .....	278
4.2.5.1. Software Cosi-Corr.....	278
4.2.5.2. Método basado en SfM.....	280
4.2.6. Discusión de la zona de estudio de Colinas Lojanas .....	281
4.2.6.1. Precisión de MDE y Ortofotos. ....	281
4.2.6.2. Caracterización del movimiento de ladera .....	282
4.2.6.3. Cinemática y evolución del movimiento de ladera. ....	287
4.3. Zona de estudio El Plateado .....	296
4.3.1. Ortoimágenes y zonificación del movimiento de ladera.....	296
4.3.2. Modelos digitales de superficies y su evolución .....	299

4.3.2.1.	Modelos digitales de superficies y su evolución .....	299
4.3.2.2.	Modelos de diferencias .....	302
4.3.2.3.	Desplazamientos 3D .....	307
4.3.2.4.	Perfiles .....	311
4.3.3.	Modelos derivados, análisis morfométrico y evolución de la morfología .....	315
4.3.3.1.	Distribución y evolución de la pendiente .....	315
4.3.3.2.	Distribución y evolución de la orientación.....	322
4.3.3.3.	Distribución y evolución del sombreado .....	328
4.3.3.4.	Distribución y evolución del TPI.....	332
4.3.3.5.	Distribución y evolución del TRI .....	339
4.3.3.6.	Distribución y evolución del TWI .....	343
4.3.4.	Desplazamientos en puntos significativos extraídos a partir de los vuelos VANT. 347	
4.3.5.	Desplazamientos medidos a partir de correlación digital de imágenes .....	359
4.3.5.1.	Software Cosi-Corr.....	359
4.3.5.2.	Método basado en SfM.....	361
4.3.6.	Caracterización geotécnica de los materiales afectados .....	361
4.3.7.	Discusión de la zona de estudio de El Plateado.....	363
4.3.7.1.	Precisión de MDE y ortoimágenes .....	363
4.3.7.2.	Caracterización de los movimientos.....	364
4.3.7.3.	Cinemática y evolución del movimiento de ladera .....	371
5.	DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES .....	384
5.1.	Precisión e incertidumbre de los datos .....	384
5.2.	Caracterización de los movimientos y áreas inestables.....	386
5.3.	Evolución y cinemática de los movimientos .....	392
5.4.	Conclusiones generales.....	400
5.5.	Limitaciones y futuras líneas de investigación.....	404
	BIBLIOGRAFÍA.....	408

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de movimientos de ladera según Hungr et al. 2014. ....	36
Tabla 2. Clasificación de tamaños de masas movilizadas según Rodríguez Ortiz et al. (1978). .....	42
Tabla 3. Clasificación de magnitudes de los movimientos de ladera según Fell (1994). ....	42
Tabla 4. Clasificación de velocidades, ligeramente modificada a partir de la propuesta por la Comisión del inventario mundial de movimientos de ladera de la UNESCO (WP/WLI, 1995) para incluir intervalos de velocidades en varias unidades de medida. ....	43
Tabla 5. Clasificación de intensidades de los movimientos de ladera de Cardinali et al., (2002) modificada por Chacón (2008).....	44
Tabla 6. Resumen de las principales características del VANT empleado en el presente trabajo. .....	87
Tabla 7. Principales especificaciones técnicas de las cámaras empleadas.....	88
Tabla 8. Puntos de medida GNSS en las zonas de estudio. ....	97
Tabla 9. Detalle de las campañas de medición GNSS realizadas en las zonas de estudio. Los lapsos de tiempo corresponden al tiempo acumulado entre campañas de medición. Para las zonas de Victoria y Colonas Lojanas corresponden a campañas de medida de la deformación, siendo la primera y la última empleada además como apoyo fotogramétrico, mientras que en El Plateado corresponden solo a campañas de apoyo fotogramétrico. ....	98
Tabla 10. Parámetros de diseño empleados para la generación de las líneas de vuelo en las zonas de estudio.....	102
Tabla 11. Datos de las imágenes capturadas con VANT en las zonas de estudio. ....	103
Tabla 12. Errores de ajuste en los puntos de control y de chequeo en los distintos vuelos VANT de las zonas de trabajo.....	108
Tabla 13. Análisis de la elevación (en metros) por elementos en el sector Victoria. ....	150
Tabla 14. Análisis de los modelos de diferencias por elementos en el sector Victoria. Los valores indicados se expresan en metro. ....	153
Tabla 15. Detalle del valor de la pendiente (°) por elementos del deslizamiento. ....	163
Tabla 16. Detalle del valor de la orientación por elementos del deslizamiento.....	167
Tabla 17. Detalle del valor de la orientación por elementos del deslizamiento.....	171
Tabla 18. Detalle del valor del TPI por elementos del deslizamiento.....	174



Tabla 19. Detalle del valor del TRI en la zona de estudio por elementos del deslizamiento.	180
Tabla 20. Detalle del valor del TWI por elementos del deslizamiento. ....	185
Tabla 21. Resumen de desplazamientos efectivos N, E y Z de los puntos GNSS de Victoria. Se muestra la dirección y la velocidad de cada punto horizontal y vertical. ....	188
Tabla 22. Desplazamientos y tasas horizontales y verticales en los puntos extraídos en el área de Victoria. Desplazamientos expresados en m y velocidades expresadas en m/mes. Dirección de desplazamiento expresada en grados desde el N. Radio Vector Medio es adimensional (0-1). En el número de puntos se indican tanto el número total en cada elemento como los considerados para los cálculos estadísticos, después de descartar los relacionados con zonas de vegetación densa. ....	191
Tabla 23. Factores diferenciadores para la caracterización del área inestable de la zona Victoria. ....	202
Tabla 24. Análisis de la elevación por elementos en el sector Colinas Lojanas. Los valores se expresan en metros (m). ....	217
Tabla 25. Análisis del modelo de diferencias por elementos del movimiento de ladera. ....	220
Tabla 26. Estadísticos de la pendiente (°) por elementos del movimiento. ....	232
Tabla 27. Estadísticos de la orientación por elementos del movimiento. ....	238
Tabla 28. Estadísticos de la orientación por elementos del movimiento. ....	244
Tabla 29. Detalle del valor del TPI en la zona de estudio por elementos del deslizamiento.	249
Tabla 30. Detalle del valor del TRI en la zona de estudio por elementos del deslizamiento.	258
Tabla 31. Detalle del valor del TWI en la zona de estudio por elementos del deslizamiento. ....	266
Tabla 32. Resumen de desplazamientos efectivos N, E y Z de los puntos GNSS de Colinas Lojanas. Se muestra la dirección y la velocidad de cada punto horizontal y vertical. ....	269
Tabla 33. Desplazamientos y tasas horizontales y verticales en los puntos extraídos en el área de Colinas Lojanas en el primer periodo analizado (julio-noviembre de 2016). Desplazamientos expresados en m y velocidades expresadas en m/mes. Dirección de desplazamiento expresada en grados desde el N. Radio Vector Medio es adimensional (0-1) ....	275
Tabla 34. Desplazamientos y tasas horizontales y verticales en los puntos extraídos en el área de Colinas Lojanas en el segundo periodo analizado (noviembre de 2016-enero de 2018). Desplazamientos expresados en m y velocidades expresadas en m/mes. Dirección de desplazamiento expresada en grados desde el N. Radio Vector Medio es adimensional (0-1). ....	276

Tabla 35. Factores diferenciadores para la caracterización del movimiento de ladera de la zona de Colinas Lojanas. ....	286
Tabla 36. Análisis de las elevaciones por elementos del movimiento en la zona del Plateado. ....	301
Tabla 37. Análisis de las elevaciones por elementos del movimiento en la zona del Plateado. ....	307
Tabla 38. Detalle del valor de la pendiente por elementos en la zona del Plateado. ....	317
Tabla 39. Detalle del valor de la orientación por elementos en la zona del Plateado. ....	324
Tabla 40. Detalle del valor del sombreado por elementos de la zona del Plateado. ....	330
Tabla 41. Detalle del valor del TPI por elementos del deslizamiento. ....	334
Tabla 42. Detalle del valor de la rugosidad por elementos del movimiento. ....	341
Tabla 43. Detalle del valor del TWI por elementos del deslizamiento. ....	346
Tabla 44. Desplazamientos y tasas horizontales y verticales en los puntos extraídos en el área del Plateado en el primer periodo analizado (enero-junio de 2017). Desplazamientos expresados en m y velocidades expresadas en m/mes. Dirección de desplazamiento expresada en grados desde el N. Radio Vector Medio es adimensional (0-1). ....	352
Tabla 45. Desplazamientos y tasas horizontales y verticales en los puntos extraídos en el área del Plateado en el segundo periodo analizado (junio de 2017-junio de 2018). Desplazamientos expresados en m y velocidades expresadas en m/mes. Dirección de desplazamiento expresada en grados desde el N. Radio Vector Medio es adimensional (0-1). ....	353
Tabla 46. Desplazamientos y tasas horizontales y verticales en los puntos extraídos en el área del Plateado en el tercer periodo analizado (junio de 2018-marzo de 2020). Desplazamientos expresados en m y velocidades expresadas en m/mes. Dirección de desplazamiento expresada en grados desde el N. Radio Vector Medio es adimensional (0-1). ....	354
Tabla 47. Resumen de los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas a las muestras de suelo obtenidas en la ladera. ....	361
Tabla 48. Resumen de los factores diferenciales en la zona de El Plateado. ....	370

## ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1. Elementos de un movimiento de ladera. ....	31
Figura 2. Mapa de ubicación de las zonas de estudio y estación meteorológica. ....	66
Figura 3. Precipitación mensual de la estación meteorológica La Argelia. ....	68
Figura 4. Mapa de uso de suelo de la hoya de Loja. Tomado de Soto, 2018. ....	69
Figura 5. Localización y encuadre geológico de la zona de estudio de Victoria a); Colinas Lojanas b) y El Plateado c) ....	73
Figura 6. Mapa geomorfológico de la hoya de Loja. Tomado de Soto, 2018. ....	75
Figura 7. Ubicación espacial de movimientos de ladera en la hoya de Loja. Tomado de Soto, 2018. ....	77
Figura 8. Evidencia geomorfológica en el sector Victoria. Se aprecia la existencia de grietas a lo largo del cuerpo de la ladera que concuerdan con la evidencia fotográfica anexa (febrero 2016). a) y b) presencia de grietas; c) escarpe en flanco izquierdo. ....	80
Figura 9. Evidencia geomorfológica en el sector Colinas Lojanas (julio 2016). Se aprecia la existencia de grietas distribuidas dentro del cuerpo de la ladera, así como los principales escarpes. ....	82
Figura 10. Evidencia de la actividad superficial en la zona de Colinas Lojanas. Fuente: el autor. ....	83
Figura 11. a) Colapso de viviendas por actividad del movimiento de ladera; b) Presencia de grietas en el cuerpo de la ladera; c) Vista del escarpe principal en el flanco sur de la ladera; d) Zona de acumulación en el pie de la ladera. ....	85
Figura 12. a) VANT Phantom 2 provisto de cámara ventral; b) sistema de control en tierra del VANT datalink DJI, y c) marcas identificadoras de GCP colocadas en el terreno. ....	88
Figura 13. Diagrama general de la metodología empleada en el presente trabajo. ....	93
Figura 14. Ubicación de los puntos de control en la zona de estudio. a) Victoria y b) Colinas Lojanas. ....	95
Figura 15. Ubicación de los puntos de control en la zona de El Plateado. ....	96
Figura 16. Flujo de trabajo empleado para la obtención de productos fotogramétricos. ....	99
Figura 17. Ortoimágenes del sector Victoria generados a partir de los vuelos con VANT: a) 20/febrero/2016; b) 11/junio/2016. ....	145
Figura 18. Mapa de zonificación de la zona de Victoria mediante fotointerpretación. ....	146

Figura 19. MDS del sector Victoria generados a partir de los vuelos con VANT: a) 20/febrero/2016; b) 11/junio/2016. ....	148
Figura 20. Distribución de la elevación en los elementos principales de la ladera. ....	150
Figura 21. Mapa de diferencias de elevación (MdD) de la zona de estudio Victoria. ....	151
Figura 22. Vista pseudo-3D de la zona de Victoria. a) 20/febrero/2016; b) 11/junio/2016, c) mapa proyectado de desplazamientos. ....	154
Figura 23. Mapa de desplazamientos de la zona de Victoria. Las diferencias de elevación están representadas en metros. ....	155
Figura 24. Ubicación de las cuatro líneas de perfil en la zona de estudio para analizar el comportamiento de los desplazamientos verticales en cuatro secciones. ....	157
Figura 25. Cambios de elevación determinados en los cuatro perfiles de la zona de estudio y que corresponden al periodo febrero 2016 y junio 2016. ....	160
Figura 26. Mapas de pendientes de la zona de estudio. a) 18/02/2016 y b) 12/06/2016. ....	161
Figura 27. Distribución de la pendiente en los elementos principales de la ladera. ....	163
Figura 28. Evolución temporal de la pendiente en los perfiles a) perfil 1, b) perfil 2, c) perfil 3 y d) perfil 4. ....	165
Figura 29. Mapas de orientación de la pendiente en los dos periodos de control. a) 18/02/2016 y b) 12/06/2016. ....	166
Figura 30. Distribución de la orientación en los elementos principales de la ladera. ....	168
Figura 31. Evolución temporal de la orientación en los dos periodos de control 18/02/2016 y 12/06/2016). a) perfil 1, b) perfil 2, c) perfil 3 y d) perfil 4. ....	169
Figura 32. Mapas de sombreado en los dos periodos de control. a) 18/02/2016 y b) 12/06/2016. ....	170
Figura 33. Distribución de la iluminación (sombreado) en los elementos principales de la ladera. ....	172
Figura 34. Mapas del TPI en los dos períodos de control. a) 18/02/2016 y b) 12/06/2016. ..	173
Figura 35. Histograma de distribución del TPI en los diferentes elementos analizados en la ladera. ....	175
Figura 36. Líneas de ruptura superiores e inferiores, extraídas del TPI a resolución de 0.1 m en la zona de Victoria. a) 18/02/2016 y b) 12/06/2016 sobre la ortoimágenes. ....	176
Figura 37. Mapas del TPI en los dos períodos de control a resolución de 1 m. a) 18/02/2016 y b) 12/06/2016. ....	177

Figura 38. Líneas de ruptura superiores e inferiores, extraídas del TPI en la zona de Victoria, a resolución de 1 m. a) 18/02/2016 y b) 12/06/2016. ....	178
Figura 39. Mapas de la rugosidad expresada por el TRI a la resolución original de 0.1 m correspondiente a los dos periodos de control. a) 18/02/2016 y b) 12/06/2016.....	179
Figura 40. Histograma de distribución del TRI en los diferentes elementos analizados en la ladera. ....	181
Figura 41. Mapas de la rugosidad expresada por el TRI correspondiente a los dos periodos de control a la resolución de 1 m. a) 18/02/2016 y b) 12/06/2016. ....	182
Figura 42. Mapas del Índice Topográfico de Humedad (TWI) de la zona de estudio para los dos periodos de control. a) 18/02/2016 y b) 12/06/2016. ....	183
Figura 43. Distribución porcentual del TWI de algunos elementos de la ladera. ....	185
Figura 44. Mapa de desplazamientos horizontales a) y verticales b) en la zona de Victoria. ....	186
Figura 45. Mapa de vectores de desplazamiento horizontal a) y vertical b) correspondientes al sector Victoria. ....	189
Figura 46. Mapa de desplazamientos horizontal en la dirección N-S a) y E-W b) correspondientes al sector Victoria. ....	195
Figura 47. Mapa de desplazamientos horizontal totales en magnitud en la dirección N-S a) y E-W b) correspondientes al sector Victoria. ....	196
Figura 48. Mapas de diferencias entre el mapa de distancias 3D entre superficies y el MdD: a) diferencia entre valores netos; b) diferencia entre valores absolutos.....	204
Figura 49. Ortoimágenes del sector Colinas Lojanas generados obtenidas a partir de imágenes de VANT: a) 4/julio/2016, b) 29/noviembre/2016 y c) 12/enero/2018. ....	211
Figura 50. Fotointerpretación y delineación de los elementos del movimiento de ladera. ....	212
Figura 51. MDS del sector Colinas Lojanas generados obtenidas a partir de imágenes VANT: a) 4/julio/2016, b) 29/noviembre/2016 y c) 12/enero/2018. ....	215
Figura 52. Distribución de la elevación en los elementos principales de la ladera.....	217
Figura 53. Mapa de diferencias de elevación (DoD) de la zona de estudio Colinas Lojanas. a) Periodo julio – noviembre 2016; b) noviembre 2016 – enero 2018.....	219
Figura 54. Mapa de modelos de desplazamientos 3D entre las nubes de puntos entre julio 2016 y noviembre 2016.....	222
Figura 55. Mapa de modelos de desplazamientos 3D entre las nubes de puntos entre julio 2016 y noviembre 2016.....	223

Figura 56. Mapa de modelos de desplazamientos 3D entre las nubes de puntos entre noviembre 2016 y enero 2018. ....	224
Figura 57. Mapa de ubicación de los perfiles que se emplearon para analizar los cambios verticales y horizontales en los diferentes periodos de control. ....	225
Figura 58. Disposición de los perfiles transversales en los diferentes periodos de control. La línea discontinua representa el borde de la carretera. La línea amarilla corresponde al periodo (04/07/2016), verde (29/11/2016), roja (12/01/2018) .....	228
Figura 59. Mapa de pendientes obtenido para los tres periodos de control. a) 4/julio/2016, b) 29/noviembre/2016 y c) 12/enero/2018. ....	230
Figura 60. Distribución de la pendiente en los diferentes elementos de la ladera en la zona de Colinas Lojanas. ....	232
Figura 61. Evolución temporal de la pendiente en los perfiles a) línea de perfil A, b) línea de perfil B, c) línea de perfil C y, d) línea de perfil D, para cada una de las fechas de control. La línea discontinua representa el valor medio de cada fecha. ....	234
Figura 62. Mapas de orientación de la pendiente en los tres períodos de control. a) 4/julio/2016, b) 29/noviembre/2016 y c) 12/enero/2018. ....	236
Figura 63. Distribución de la orientación en la zona de estudio y analizada por elementos constitutivos de la ladera (escarpe lateral, cuerpo, pie, y zonas estables). ....	238
Figura 64. Evolución temporal de la orientación en los perfiles a) línea de perfil A, b) línea de perfil B, c) línea de perfil C y, d) línea de perfil D, para cada una de las fechas de control. La línea discontinua representa el valor medio en cada fecha. ....	240
Figura 65. Mapas de sombreado en los tres periodos de control: a) 4/julio/2016, b) 29/noviembre/2016 y c) 12/enero/2018. ....	242
Figura 66. Distribución del sombreado en la zona de estudio y análisis por elementos constitutivos de la ladera (escarpe lateral, cuerpo, pie, y zonas estables). ....	244
Figura 67. Mapas del TPI en los tres períodos de control a resolución de 0.05 m. a) 4/julio/2016, b) 29/noviembre/2016 y c) 12/enero/2018. ....	247
Figura 68. Distribución del TPI en la zona de estudio y análisis por elementos constitutivos de la ladera (escarpe lateral, cuerpo, pie, y zonas estables). En este caso, todas las gráficas coinciden y muestran una concentración prácticamente total en valores próximos a 0. ....	249
Figura 69. Líneas de ruptura de la pendiente obtenidas a partir del modelo TPI con una resolución de 0,05 m. a) corresponde a la fecha 4/julio/2016, b) 29/noviembre/2016 y c) 12/enero/2018. ....	251
Figura 70. Mapas del TPI en los tres períodos de control a resolución de 1 m a) 4/julio/2016, b) 29/noviembre/2016 y c) 12/enero/2018. ....	253

Figura 71. Líneas de ruptura de la pendiente obtenidas a partir del modelo TPI con una resolución de 1 m. a) corresponde a la fecha 4/julio/2016, b) 29/noviembre/2016 y c) 12/enero/2018.....	255
Figura 72. Distribución de la rugosidad (TRI) en diferentes partes de la ladera en tres periodos de control a la resolución de 0,05 m: a) 4/julio/2016, b) 29/noviembre/2016 y c) 12/enero/2018. ....	257
Figura 73. Distribución del TRI en la zona de estudio y analizada por elementos constitutivos de la ladera (escarpe lateral, cuerpo, pie, y zonas estables). ....	259
Figura 74. Distribución de la rugosidad (TRI) a resolución de 1 m en diferentes partes de la ladera en tres periodos de control a la resolución de 1 m: a) 4/julio/2016, b) 29/noviembre/2016 y c) 12/enero/2018.....	261
Figura 75. Mapas de TWI en la zona de estudio de Colinas Lojanas. a) julio 2016; b) noviembre 2016 y c) enero 2018.....	263
Figura 76. Distribución del TWI en la zona de estudio y análisis por elementos constitutivos de la ladera (escarpe lateral, cuerpo, pie, y zonas estables). ....	266
Figura 77. Mapa de desplazamientos horizontales y verticales en los puntos GNSS.....	267
Figura 78. Mapa de vectores de dirección y velocidad del movimiento de ladera del sector Colinas Lojanas. a) y b) corresponden al periodo julio – noviembre 2016; c) y d) corresponden al periodo noviembre 2016 – enero 2018.....	272
Figura 79. Mapa de desplazamientos horizontal en el primer periodo a) y segundo periodo b) correspondientes al sector Colinas Lojanas. ....	280
Figura 80. Mapa de vectores de desplazamiento horizontal obtenidos con el método basado en SfM en la zona de Colinas Lojanas.....	281
Figura 81. Ortoimágenes obtenidas de la zona de estudio a) 24 de enero de 2017, b) 9 de junio de 2017, c) 8 de junio de 2018 y d) 12 de marzo de 2020. ....	296
Figura 82. Zonación del movimiento de ladera donde se identifican las principales partes de la ladera obtenidas mediante fotointerpretación y digitalización de las partes.....	299
Figura 83. MDE obtenidos de la zona de estudio a) 24 de enero de 2017, b) 9 de junio de 2017, c) 8 de junio de 2018 y d) 12 de marzo de 2020. ....	300
Figura 84. Distribución de la elevación en los elementos principales de la ladera.....	302
Figura 85. Mapas de diferencias de elevación (DoD) a) enero 2017 y junio 2017, b) junio 2017 a junio 2018 y c) junio 2018 a marzo de 2020. ....	305
Figura 86. Modelo de desplazamientos entre nubes de puntos. a) 24 de enero de 2017, b) 9 de junio de 2017, c) 8 de junio de 2018 y d) 12 de marzo de 2020, e) Modelos de diferencia de nube de puntos entre 24 de enero de 2017 y 9 de junio de 2017. ....	308

Figura 87. Modelos de diferencia de nube de puntos entre 9 de junio 2017 y 8 de junio 2018 a) y entre 8 de junio de 2018 y 12 de marzo de 2020 b).....	309
Figura 88. Emplazamiento de los perfiles en la zona de estudio para el análisis de factores topográficos.....	311
Figura 89. Detalle de los perfiles obtenidos de los MDS. La línea discontinua representa el borde lateral (road side) de la carretera como punto de referencia para los análisis correspondientes: a) perfil A; b) perfil B y c) perfil C.....	314
Figura 90. Mapas de pendientes de la zona de estudio para los cuatro controles. a) 24/01/2017, b) 09/06/2017, c) 08/06/2018 y c) 12/03/2020.....	316
Figura 91. Mapas de pendientes de la zona de estudio para los cuatro controles. a) 24/01/2017, b) 09/06/2017, c) 08/06/2018 y c) 12/03/2020.....	318
Figura 92. Cambios temporales en la pendiente de la ladera en la zona de estudio. a) Perfil A; b) perfil B y c) perfil C.....	321
Figura 93. Mapas de la orientación de la pendiente de la zona de estudio del Plateado para los cuatro controles. a) 24/01/2017, b) 09/06/2017, c) 08/06/2018 y c) 12/03/2020.....	322
Figura 94. Distribución de la orientación de la pendiente en diferentes partes de la ladera. .	324
Figura 95. Cambios temporales en la orientación de la pendiente por el efecto de movimientos de ladera en los tres perfiles de referencia a) perfil A, b) perfil B, c) perfil C, y correspondientes fechas de control.....	327
Figura 96. Mapas de sombreado en las cuatro fechas de control: a) 24/01/2017, b) 09/06/2017, c) 08/06/2018 y c) 12/03/2020. ....	328
Figura 97. Distribución del sombreado en diferentes partes de la ladera. ....	330
Figura 98. Mapas del Índice Topográfico de Posición (TPI) de la zona de estudio del Plateado a resolución de 0,10 m para las cuatro fechas de monitoreo a) 24/01/2017, b) 09/06/2017, c) 08/06/2018 y c) 12/03/2020. ....	332
Figura 99. Mapas del Índice Topográfico de Posición (TPI) de la zona de estudio para los cuatro periodos de monitoreo a) 24/01/2017, b) 09/06/2017, c) 08/06/2018 y c) 12/03/2020. ....	334
Figura 100. Detección de bordes de escarpes superior (azul) e inferior (rojo) para los cuatros periodos de medición. Resolución del MDE igual a 0,05 m. a) 24/01/2017, b) 09/06/2017, c) 08/06/2018 y c) 12/03/2020. ....	336
Figura 101. Mapas del Índice Topográfico de Posición (TPI) de la zona de estudio del Plateado a resolución de 1 m para las cuatro fechas de monitoreo a) 24/01/2017, b) 09/06/2017, c) 08/06/2018 y c) 12/03/2020. ....	337



Figura 102. Detección de bordes de escarpes superior (azul) e inferior (rojo) para los cuatros periodos de medición. Resolución del MDE igual a 1 m. a) 24/01/2017, b) 09/06/2017, c) 08/06/2018 y c) 12/03/2020. ....	339
Figura 103. Distribución de la rugosidad en diferentes partes de la ladera en los cuatro periodos de control. a) 24/01/2017, b) 09/06/2017, c) 08/06/2018 y d) 12/03/2020. ....	340
Figura 104. Distribución de la rugosidad en diferente.s partes de la ladera. ....	341
Figura 105. Distribución de la rugosidad en diferentes partes de la ladera en los cuatro periodos de control a resolución de 1m. a) 24/01/2017, b) 09/06/2017, c) 08/06/2018 y c) 12/03/2020. ....	343
Figura 106. Mapas del Índice Topográfico de Humedad (TWI) de la zona de estudio para los cuatro controles. a) 24/01/2017, b) 09/06/2017, c) 08/06/2018 y c) 12/03/2020.....	344
Figura 107. Distribución del TWI en diferentes partes de la ladera. ....	346
Figura 108. Mapa de vectores de dirección y velocidad del movimiento de ladera del Plateado. a) y b) corresponden al periodo enero – julio 2017; c) y d) corresponden al periodo julio 2017 – julio 2018; e) y f) corresponden al periodo julio 2018 – marzo 2020.....	348
Figura 109. Mapa de desplazamientos horizontal en la dirección N-S a) y E-W b) correspondientes al sector del Plateado.....	360
Figura 110. Detalle de la evolución del deslizamiento en base a líneas de rotura de talud: (a) retroceso del escarpe principal con bordes superiores extraídos de TPI 0.05 m sobre la imagen del 24/01/2017 (izquierda) y la imagen del 08/06/2018 (derecha); (b): avance de la puntera con bordes inferiores extraídos de TPI 1 m sobre la imagen del 24/01/2017 (izquierda) y la imagen del 08/06/2018 (derecha).....	379

# **CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN**

# **1. INTRODUCCIÓN**

El análisis de la actividad de movimientos de ladera se erige como un pilar fundamental en la gestión de riesgos geológicos y la planificación territorial en regiones geográficas propensas a fenómenos como deslizamientos y erosiones del suelo. En la cuenca de Loja, Ecuador, una zona caracterizada por su topografía compleja y condiciones climáticas variables, el estudio y monitoreo de estos movimientos de ladera adquieren una relevancia crítica. La presente tesis doctoral se enmarca en este contexto, proponiendo una metodología innovadora que combina la aplicación de técnicas precisas de captura de datos geoespaciales como los vehículos aéreos no tripulados (VANT) y técnicas de posicionamiento por satélite (GNSS), con el análisis de imágenes, el análisis SIG y la modelización, para el estudio detallado de la actividad de movimientos de ladera en esta región.

## **1.1. Contexto**

La cuenca de Loja, ubicada en el suroeste de Ecuador, destaca por su belleza y diversidad natural, pero también enfrenta una alta incidencia de diferentes riesgos geológicos. Así, la topografía abrupta, los materiales geológicos generalmente poco resistentes y alterados, y las intensas precipitaciones estacionales la hacen susceptible a movimientos de ladera, erosiones del suelo y otros eventos relacionados con la inestabilidad del terreno. Estos fenómenos, que se producen de forma frecuente y reiterada en el tiempo, representan una amenaza tanto para la seguridad de la población local como para la infraestructura, la agricultura y el medio ambiente, que se muestran vulnerables a ellos.

## **1.2. Justificación**

La presente investigación se fundamenta en una serie de razones que resaltan la importancia y pertinencia de esta investigación en el contexto científico y actual.

En primer lugar, como se ha indicado previamente en el contexto, la cuenca de Loja es un área propensa o susceptible a fenómenos frecuentes de movimientos de ladera y erosiones del suelo, que representan una amenaza para los distintos elementos en riesgo. En ese contexto surge la necesidad de prevenir y mitigar los impactos negativos de los movimientos de ladera en la producción de alimentos y la economía local. La gestión adecuada de estos riesgos es esencial para la seguridad de la población y el desarrollo sostenible de la región. La más completa comprensión de la actividad de movimientos de ladera en la cuenca de Loja incidirá así en la toma de medidas más efectivas para la mitigación de riesgos, la protección del entorno natural y la seguridad de las comunidades locales.

De forma más relevante, la cuenca de Loja también es emblemática de un desafío geodinámico global. En muchas regiones montañosas y con pendientes pronunciadas, los movimientos de ladera son fenómenos recurrentes que requieren un enfoque multidisciplinario para su estudio y monitoreo. La cuenca de Loja, por lo tanto, sirve como un caso de estudio representativo para investigaciones de este tipo de movimientos de ladera en otras regiones, en especial aquellas más sensibles al cambio global.

La creciente urbanización y expansión de la infraestructura en regiones susceptibles a movimientos de ladera han aumentado la necesidad de un monitoreo y gestión efectivos de los riesgos geodinámicos. Comprender y cuantificar la actividad de movimientos de ladera en cuencas como las de Loja es esencial para la planificación territorial y la toma de decisiones informadas.

En los últimos años, se han producido avances significativos en la tecnología de captura de datos geoespaciales, incluyendo el uso de vehículos no tripulados (VANT) combinadas con técnicas de posicionamiento y navegación global por satélite (GNSS). Estas tecnologías ofrecen

la capacidad de recopilar datos precisos y detallados a una escala sin precedentes, lo que brinda nuevas oportunidades para el estudio, análisis y en consecuencia mitigación de los riesgos geodinámicos. Estos vehículos pueden equiparse con sensores de alta resolución que permiten generar información geoespacial de gran calidad, incluyendo modelos digitales de elevación (MDE) y ortoimágenes, que son cruciales para el análisis de movimientos de ladera. El análisis detallado de la actividad de movimientos de ladera con las técnicas mencionadas permitirá una mejor comprensión de los patrones, causas y evolución temporal de estos fenómenos. Esto, a su vez, respaldará la toma de decisiones informadas y la implementación de medidas preventivas y correctivas más efectivas.

Particularmente, la captura de datos en áreas de difícil acceso, como zonas montañosas y pendientes pronunciadas, permite la extensión de los estudios a estas zonas de gran interés a nivel global de acuerdo a lo apuntado anteriormente. Adicionalmente, la captura rápida y ágil de los datos posibilita la monitorización de las zonas de interés, si no de forma continua, sí con una alta resolución temporal.

Esta tesis doctoral busca contribuir al conocimiento científico en el campo de la geodinámica y la geomática al aplicar y perfeccionar estas tecnologías avanzadas en el contexto específico de la cuenca de Loja, Ecuador. Los resultados de esta investigación multidisciplinar tienen el potencial de enriquecer la comprensión de los procesos geodinámicos en zonas similares en todo el mundo y proporcionar información valiosa para la gestión de riesgos, la planificación territorial y el desarrollo sostenible. Por ello, pueden servir como base para futuros proyectos de monitoreo geodinámico en otras áreas propensas a movimientos de ladera dentro de Ecuador o la región andina.

En resumen, esta tesis doctoral se justifica por la necesidad crítica de comprender y gestionar la actividad de movimientos de ladera en la cuenca de Loja, Ecuador, así como por la oportunidad de aplicar tecnologías avanzadas para abordar este desafío geodinámico. La investigación promete contribuir al conocimiento científico, la toma de decisiones informadas y la mejora de la seguridad y la sostenibilidad en la región y áreas geodinámicas similares en todo el mundo.

### **1.3. Objetivos de la Tesis**

El propósito central de esta tesis doctoral es desarrollar y aplicar metodologías avanzadas de captura y análisis de datos que permitan un análisis preciso y detallado de la actividad de movimientos de ladera en la cuenca de Loja, incluyendo técnicas VANT, GNSS y SIG. Para alcanzar este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- **Obtención de modelos precisos y fiables del terreno**

El primer objetivo se enfoca en la obtención de representaciones precisas y fiables del terreno, fundamentalmente Modelos Digitales de Elevación (MDE) y ortoimágenes de muy alta resolución, elaboradas a partir de imágenes capturadas con VANT equipados con sensores fotográficos. Los modelos geospaciales obtenidos servirán como base para la consecución de los objetivos subsiguientes.

- **Caracterización geomorfológica de los movimientos de ladera y los elementos asociados**

El segundo objetivo se orienta hacia la caracterización geomorfológica de los movimientos de ladera y los elementos diferenciados dentro de ellos. Para ello, una vez identificados y delimitados los límites de los deslizamientos y dichos elementos, se obtendrán parámetros topográficos derivados de los MDE generados. El análisis de estos parámetros proporcionará

información clave para conocer la morfología de los movimientos de ladera y sus distintos elementos.

- **Detección de cambios en la superficie del terreno y estimación de desplazamientos**

El tercer objetivo se centra en la detección de cambios en la morfología del terreno en relación con los deslizamientos y la estimación de desplazamientos horizontales y verticales, mediante análisis temporal o evolutivo de las zonas afectadas por movimientos de ladera. Concretamente, la comparación de los MDS, los modelos derivados y las ortoimágenes permitirá identificar los cambios en la morfología de la superficie del terreno. Por su parte, la extracción y/o medida de puntos característicos mediante métodos de campo, manuales y automáticos, así como el análisis de correlación de imágenes, se emplearán para medir desplazamientos entre distintas fechas. Los resultados de las distintas técnicas se compararon para determinar su coherencia.

- **Conocimiento de la actividad y cinemática de los movimientos de ladera**

Como culminación de los objetivos anteriores, el objetivo final consiste en el conocimiento de la actividad de los movimientos de ladera estudiados en el entorno de la ciudad de Loja, Ecuador, y más concretamente de la cinemática de los mismos. El aporte de datos geotécnicos y geológicos, así como la observación de campo, posibilitará además avanzar algunas consideraciones sobre la geodinámica de los movimientos. En cualquier caso, este conocimiento acerca de la actividad servirá para identificar áreas críticas vulnerables y patrones de comportamiento en relación con los movimientos de ladera, contribuyendo a la planificación y mitigación de riesgos.

Se espera que las consideraciones a las que se llegue con este trabajo contribuyan al desarrollo de las nuevas técnicas de medida y monitorización de los movimientos de ladera como medio

para un mejor conocimiento de los procesos involucrados en zonas inestables en áreas montañosas, que se revelan como especialmente susceptibles y vulnerables en un contexto de desarrollo antrópico y cambio global.

#### **1.4. Estructura del documento**

El presente documento/memoria, que resume los resultados de la investigación llevada a cabo en la Tesis Doctoral, se describe en cinco capítulos que se detallan a continuación:

En el capítulo 1 se presenta una introducción donde se detalla el contexto de la investigación, la justificación de su desarrollo y el planteamiento de los objetivos de la presente tesis doctoral.

El capítulo 2 comprende un análisis del estado del arte sobre el uso de técnicas geomáticas en general, y VANT en particular, aplicadas al estudio de movimientos de ladera, principalmente en las técnicas de monitoreo para la determinación de deformaciones del terreno. Previamente se presentarán algunas generalidades sobre los movimientos de ladera, necesarias para enmarcar el estudio; y luego la exposición se centrará de forma progresiva en las técnicas de monitorización, en las basadas en sensores remotos (principalmente fotogrametría y teledetección), y finalmente en los VANT utilizados en la captura de imágenes para la monitorización de zonas inestables.

En el capítulo 3 se exponen los materiales y métodos empleados para la obtención de datos de campo y posterior análisis en las tres zonas de estudio, incluyendo la propia descripción de dichas zonas. Se exponen en forma detallada algunas características más importantes de los equipos usados como son los sistemas GNSS y VANT, además del software empleado para el procesamiento y análisis de imágenes y el análisis SIG. Más extensamente se describen con detalle las metodologías empleadas, prácticamente en el mismo orden que se han ido aplicando, comenzando por los métodos de captura y procesamiento de los datos, que culminará con la



obtención de los modelos digitales de superficies y las ortoimágenes. A partir de ahí, se describirán los análisis realizados para la caracterización de las zonas de estudio y los movimientos identificados, basada especialmente en los modelos derivados. Finalmente, se presentarán las metodologías para analizar la evolución de los movimientos, basadas en la comparación de modelos, la extracción y medida de puntos con técnicas de campo, manuales y automáticas, y el análisis de correlación de imágenes.

En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos en cada una de las zonas de estudio a partir del procesamiento y análisis de la información geoespacial. El orden seguido no es exactamente el mismo que el de la metodología, con el objetivo de agrupar los resultados por objetivos. Así, en primer lugar, se presentan las ortoimágenes y la zonificación de cada zona de estudio, siguiendo por los MDS, con sus comparaciones y perfiles; a continuación, se muestran los resultados del análisis morfométrico realizado a partir de los modelos derivados y su evolución; por último, se describen los resultados de la medida de desplazamientos, tanto los basados en la medida de puntos significativos como en el análisis de correlación de imágenes. En cada zona se finaliza con una discusión general donde se analizan las precisiones e incertidumbres, la caracterización general de los movimientos, y la cinemática y evolución de los mismos, todas ellas de forma integrada.

Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones generales, las limitaciones y las futuras líneas de investigación relacionadas a la temática propuesta.

## **CAPITULO 2. ANTECEDENTES**

## **2. ANTECEDENTES**

En este apartado primero se presentarán algunas generalidades sobre los movimientos de ladera, necesarias para enmarcar el estudio; a continuación, se resumirá de forma general las técnicas de monitorización de áreas inestables, para finalmente centrarse en las basadas en sensores remotos y específicamente en las que emplean VANT para la captura de datos.

### **2.1. Generalidades sobre los movimientos de ladera**

Dentro de las generalidades primero se definirán el concepto de movimiento de ladera y los elementos que lo constituyen; a continuación, se describirán las tipologías de los movimientos de ladera, de acuerdo a las clasificaciones más utilizadas; y finalmente se tratarán las causas e impacto de estos fenómenos, así como los riesgos que generan y las medidas de reducción del riesgo.

#### **2.1.1. Definición de movimiento de ladera**

Los movimientos de ladera o deslizamientos son procesos geológicos que alteran la superficie del terreno y se caracterizan por el movimiento gravitacional (Alcántara-Ayala, 2000; Baldi et al., 2008; Cruden & Varnes, 1996a; Mendes et al., 2017; Ortuño et al., 2017; Tagliavini et al., 2007) de una masa de tierra a favor de la pendiente. El Grupo de Trabajo del Inventario Mundial de Deslizamientos (Working Party on World Landslide Inventory, WP-WLI) define de forma simple a un deslizamiento (“landslide”) como “el movimiento de una masa de rocas, tierra o derrubios hacia abajo en una ladera” (Cruden & Varnes, 1996b), basándose en definiciones previas de autores como Sharpe (1938), Terzhagi (1950), o Bates & Jackson (1987), entre otros; y la terminología empleada en Varnes (1978), IAEG (1990) y WP-WLI (1990).

Se trata pues de una definición de deslizamiento (“landslide”) en sentido amplio, que se considera equivalente a movimiento de ladera (“slope movement”) o movimiento en masa,

palabras de amplia aceptación en lengua española (Corominas y García Yagüe, 1997; Corominas, 2004; Chacón, 2012), como inglesa (Varnes, 1978). El término deslizamiento (“slide”, “rock slide”, “debris slide” ...) tiene otra acepción en un sentido más estricto, como una tipología específica dentro de los movimientos de ladera (Hungry et al., 2014; Varnes, 1978), tal como se definirá más adelante.

Enlazando con lo anterior, el mismo grupo WP-WLI antes mencionado ha establecido una nomenclatura para describir un movimiento de ladera tipo (Cruden, 1991), así como una serie de métodos para reportarlos ((WP/WLI, 1993) o registrarlos. También se han desarrollado métodos o guías para describir su actividad (WP/WLI, 1993), tasa de movimiento (WP-WLI, 1995), causas (WP-WLI, 1994) o medidas de mitigación (WP-WLI, 2001). Adicionalmente, se proporciona un diccionario multilingüe (WP-WLI, 1993b).

### **2.1.2. Elementos de un movimiento de ladera**

En uno de los trabajos mencionados anteriormente (IAEG, 1990) se propone una nomenclatura muy completa para un movimiento de ladera tipo, que es aplicable a la mayor parte de las tipologías (deslizamientos en sentido estricto, flujos, movimientos complejos ...). En la Figura 1 a) se muestran gráficamente los distintos elementos y su ubicación en la planta y el perfil del deslizamiento.

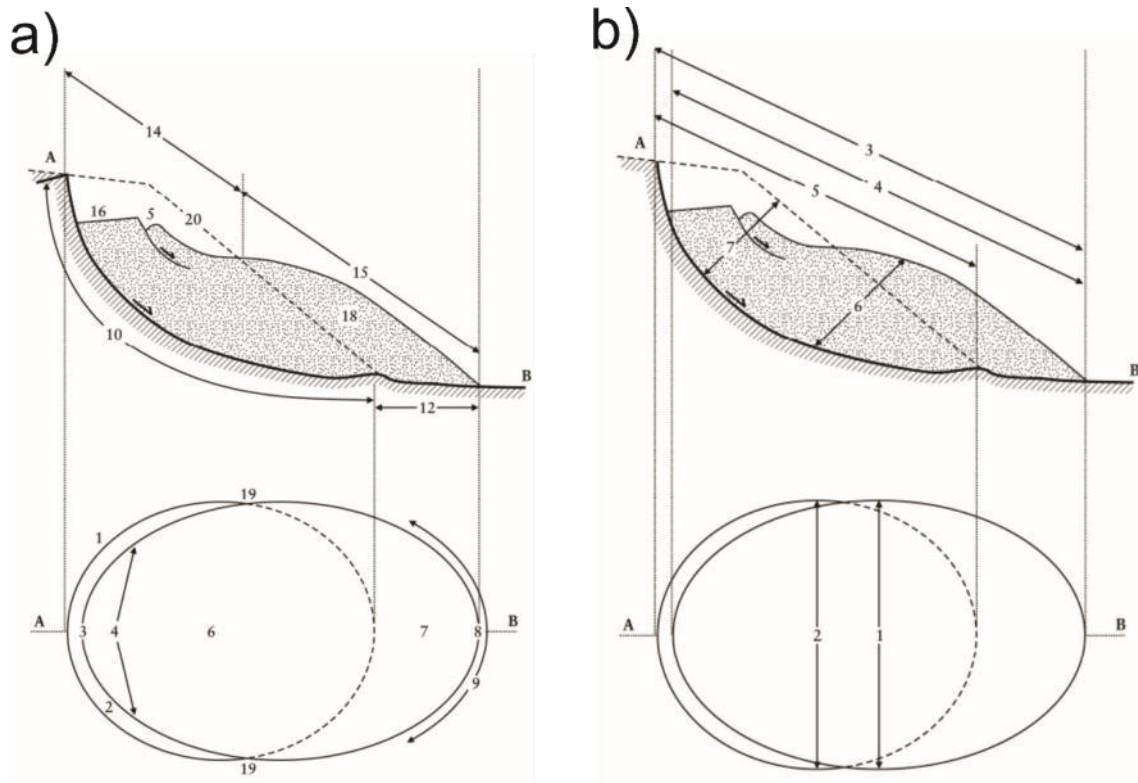


Figura 1. Elementos de un movimiento de ladera.

Los elementos descritos son los siguientes (IAEG, 1990; WP-WLI, 1993 b):

1. Corona: Es el material no desplazado que aún se mantiene en el sitio y es adyacente a las partes más altas del escarpe principal (2).
2. Escarpe principal: Una superficie muy inclinada del terreno no movilizado situada en el borde superior del deslizamiento, producida por el movimiento del material deslizado (13) hacia abajo del talud. Es la parte visible de la superficie de ruptura (10).
3. Cima: El punto más alto del contacto entre el material deslizado (13) y el escarpe principal (2).
4. Cabecera: Las partes superiores del deslizamiento situadas a lo largo del contacto entre el material deslizado y el escarpe principal (2).

5. Escarpe secundario: Una superficie muy inclinada que se presenta dentro del material desplazado por el deslizamiento, producida por movimientos diferenciales ocurridos dentro del material desplazado.
6. Cuerpo principal: La parte del material desplazado por el deslizamiento que está situada encima de la superficie de ruptura (10), localizada entre el escarpe principal (2) y el borde inferior de la superficie de ruptura (11).
7. Pie: La porción del deslizamiento que se desplaza más allá del borde inferior de la superficie de ruptura (11), y que se sitúa por encima de la superficie original del terreno (20).
8. Punta: El punto del pie (7) y más específicamente del frente (9) más alejado de la cima (3) del deslizamiento.
9. Frente: El borde inferior del material desplazado por el deslizamiento, normalmente curvo, que se encuentra más alejado del escarpe principal (2).
10. Superficie de ruptura: La superficie que forma (o que ha formado) el límite inferior del material desplazado (13), por debajo de la superficie original del terreno natural (20).
11. Frente de la superficie de ruptura: La intersección (generalmente oculta) entre la parte inferior de la superficie de ruptura (10) del deslizamiento y la superficie original del terreno (20).
12. Superficie de separación: La parte de la superficie original del terreno (20) situada debajo del pie (7) del deslizamiento.
13. Material desplazado: Material desplazado desde su posición original en el talud por el movimiento del deslizamiento. Forma tanto la masa reducida (17), como la de acumulación (18).

14. Zona de depresión o reducción: El área del deslizamiento dentro de la cual el material desplazado se encuentra por debajo de la superficie original del terreno (20).
15. Zona de acumulación: El área del deslizamiento dentro de la cual el material desplazado se encuentra por encima de la superficie original del terreno (20).
16. Reducción: El volumen limitado por el escarpe principal (2), la masa reducida (17), y la superficie original del terreno (20).
17. Masa reducida: El volumen del material desplazado que se encuentra encima de la superficie de ruptura (10) y debajo de la superficie original del terreno (20).
18. Acumulación: El volumen del material desplazado (13) que yace sobre la superficie original del terreno (20).
19. Flanco: El material no desplazado adyacente a los lados de la superficie de ruptura. Para describir los flancos es preferible usar las direcciones medidas con la brújula, pero si se emplean los términos izquierdo y derecho, deben referirse a los flancos vistos desde la corona (1).
20. Superficie original del terreno: La superficie del talud que existía antes de que ocurriera el deslizamiento.

Esta nomenclatura es la que se seguirá en este trabajo, a la hora de referirse a los distintos elementos de los movimientos estudiados. Además de los elementos en los trabajos de referencia (IAEG, 1990; WP-WLI, 1993 b), se definen parámetros dimensionales de los movimientos (Figura 1 b):

1. El ancho de la masa deslizada,  $W_d$ , es el ancho máximo de la masa desplazada, medido en dirección perpendicular a la longitud  $L_d$ .

2. El ancho de la superficie de ruptura,  $W_r$ , es el ancho máximo entre los flancos del deslizamiento, medido en dirección perpendicular a la longitud,  $L_r$ .
3. La longitud total,  $L$ , es la distancia mínima medida desde la punta del deslizamiento hasta su corona.
4. La longitud de la masa desplazada,  $L_d$ , es la distancia mínima medida desde la punta hasta la cima.
5. La longitud de la superficie de ruptura,  $L_r$ , es la distancia mínima medida desde la punta de la superficie de ruptura hasta la corona.
6. La profundidad de la masa desplazada,  $D_d$ , es la profundidad máxima de la masa desplazada medida en dirección normal al plano que contiene  $W_d$  y  $L_d$ .
7. La profundidad de la superficie de ruptura,  $D_r$ , es la profundidad máxima de la superficie de ruptura situada por debajo de la superficie original del terreno, medida en dirección normal al plano que contiene  $W_r$  y  $L_r$ .

### **2.1.3. Tipologías de movimientos de ladera**

Los movimientos de ladera pueden clasificarse de acuerdo a diferentes criterios; así, Hansen (1984) establece hasta 13 criterios. Sin embargo, para los objetivos prácticos de este trabajo que son la caracterización y monitorización de los movimientos estudiados, solo se tendrán en cuenta los más extendidos que son su tipología o mecanismo, que a su vez considera el tipo de material, el tamaño, actividad y tasa de movimiento.

En cuanto a la tipología, esta se establece generalmente a partir de la morfología, que a su vez es consecuencia del mecanismo y la naturaleza de los materiales. En el mecanismo se distingue entre mecanismo de ruptura y mecanismo de propagación (Fernández, 2001; Corominas, 2004); como en el caso de los deslizamientos en cabecera que en su desarrollo se transforman en flujos



de tierras en el pie; o los desprendimientos que terminan produciendo un flujo de derrubios. Sin embargo, en este caso, las tipologías que se van a definir a continuación se basan en los mecanismos básicos de las clasificaciones de Varnes (1978) y su actualización en Hungr et al., (2014): caídas o desprendimientos, deslizamientos y flujos, con algunos otros mecanismos menos frecuentes como los vuelcos o las expansiones laterales, o los movimientos complejos que integran más de un mecanismo. En cuanto a los materiales se van a considerar igualmente las que aparecen en dichas clasificaciones: roca, suelo (o tierra) y derrubios (o detritos).

Así, en este trabajo se va a seguir fundamentalmente la clasificación de Hungr et al. (2014), que se muestra en la Tabla 1. Esta clasificación es básicamente una actualización de la clasificación de Varnes (1978) con algunas consideraciones observadas en la clasificación de Hutchinson (1988). Utiliza solo dos columnas para los materiales, una para rocas y otra para suelos, aunque luego en los tipos concretos describe más materiales, como rocas, bloques, arcillas, tierras, arenas, gravas y derrubios.

Tabla 1. Clasificación de movimientos de ladera según Hungr et al. 2014.

Tipo de movimiento	Tipo de material involucrado	
	Roca	Suelo
Caídas	Caída de rocas	Caída de derrubios o tierras
Vuelcos	Vuelco de rocas	Vuelco de gravas, arenas o suelos
Deslizamiento rotacional	Rotacional en roca Compuesto en roca	Rotacional en arcilla o tierras Compuesto en arcilla o tierras
Deslizamiento traslacional	Traslacional en roca Cuña en roca Superficie irregular en roca (colapsos)	Traslacional en derrubios, gravas o arenas Traslacional en arcillas o tierras
Extensión lateral	Extensión en roca	Extensión en arenas o tierras Extensión en arcillas sensitivas
Flujo	Avalancha de rocas	Flujo seco de arena o tierras Deslizamiento de flujo en arenas o tierras Deslizamiento de flujo en arcillas Flujo de derrubios Avalancha de derrubios Flujo de tierras Flujo de barro Flujo de turba
Deformación de ladera	Deformación de ladera en montaña Deformación de ladera en roca	Deformación de ladera en suelo Reptación de suelos Soliflucción

Tomando como base esta clasificación y algunas de las terminologías empleadas en idioma español (Corominas y García Yagüe, 1997; Corominas, 2004; Chacón, 2012), a continuación, se definen los tipos siguientes:

**Caída de rocas:** Se refiere al despegue y caída de rocas individuales o bloques de rocas desde una ladera, que evolucionan por el aire, rebote o rodadura. Esto puede ser causado por la erosión, la meteorización o la acción de agentes externos como el viento y el agua. El término desprendimiento se suele reservar para aquellos casos en los que se produce la caída masiva de un gran volumen de bloques de roca. Las caídas también se describen en taludes formados en suelos, aunque son más frecuentes los descritos en rocas.

**Vuelcos:** Rotación hacia delante y hacia el exterior de la ladera, de una masa de suelo o roca alrededor de un eje situado por debajo de su centro de gravedad. A veces el mecanismo es la flexión que se produce en rocas con un sistema preferente de discontinuidades (esquistos, filitas, pizarras, etc.) o en secuencias rítmicas finamente estratificadas (como los flysch). En otros casos se produce la rotación y desplome en macizos rocosos afectados por discontinuidades muy inclinadas hacia el interior del talud por las que las capas se deslizan entre sí y rotan hacia la cara libre provocando finalmente caídas o desprendimientos de bloques.

**Colapsos:** Son procesos que afectan generalmente a taludes en macizos rocosos y suelos cohesivos en el que se produce un desplazamiento muy rápido de caída de material hasta una posición de reposo, sin que necesariamente esté determinado por la presencia de discontinuidades desfavorables (Chacón, 2012). En ocasiones, se puede describir como un tipo especial, aunque muy frecuente, de caídas con una trayectoria básicamente vertical de abrigos desarrollados en acantilados por la socavación efectuada por un río, el oleaje o la meteorización y disgregación de las rocas a su pie (Corominas y García Yagüe, 1997). En este sentido, se puede considerar un tipo intermedio entre las caídas y los deslizamientos, aunque en los casos en que la masa de fragmentos de roca o suelo evolucione algo más ladera abajo pueden describirse como avalanchas.

**Deslizamiento:** Es un movimiento en el cual una masa de suelo o rocas se desplaza a lo largo de una superficie neta de ruptura, o de varias superficies (deslizamientos múltiples o sucesivos). Pueden ser rotacionales, que ocurren cuando las fuerzas de corte a lo largo de una superficie determinada superan la resistencia al deslizamiento del suelo o las rocas, lo que resulta en un giro o rotación de la masa deslizante. El punto de pivote o eje de rotación puede ubicarse en la base de la pendiente o en una capa de material menos resistente dentro de la masa desplazada.

Por su complejidad los movimientos de ladera rotacionales pueden ser descritos como: completo, en cuyo caso toda una sección de la ladera se desprende y se desplaza en un movimiento rotacional descendente lo que genera un escarpe o pared vertical a nivel de cabecera; parciales, en ellos solo una parte de la ladera se desliza y rota, mientras que el resto de la ladera permanece relativamente estable. Esto puede generar una superficie de ruptura curva o inclinada. Otra forma muy común de clasificarlos, en parte coincidente con la anterior, se establece en función de la forma de la superficie curva, que puede ser cilíndrica, en cuchara (spoon-shaped) o compuesta (si una parte de la superficie llega a ser prácticamente plana). Teniendo en cuenta los materiales, los deslizamientos rotacionales se describen tanto en rocas como en suelos arcillosos o limosos.

Los deslizamientos también pueden ser traslacionales cuando una porción de la ladera se desprende a lo largo de una superficie de deslizamiento plana o ligeramente irregular. La masa deslizada se desplaza a favor de la pendiente en una dirección paralela o subparalela a la inclinación de la ladera, manteniendo una forma relativamente intacta durante el movimiento. En la parte superior de la ladera puede formarse un escarpe, que puede ser más pronunciado en los deslizamientos traslacionales de mayor magnitud, y su inclinación dependerá de la configuración y la resistencia del material constituido de la ladera, así como de las fracturas o fallas geológicas presentes. Los deslizamientos traslacionales se describen muy frecuentemente en rocas, generalmente a favor de un juego de discontinuidades rocosas (planares) o de dos o más juegos (cuñas). También se describen en suelos, tanto en tierras arcillosas, limosas o arenosas como en gravas y derrubios (deslizamientos de derrubios o “debris slides”).

**Flujos:** Los flujos son un grupo bastante heterogéneo de movimientos que involucran a materiales diferentes, desde secos a húmedos (con distintas proporciones de agua), lo que se

traduce en una distinta viscosidad de la masa, y con velocidad variable desde extremadamente lentos a extremadamente rápidos. La característica común a todos ellos es una clara deformación interna y continua de la masa movilizada, con un descenso del gradiente de velocidad en profundidad hasta desaparecer (Chacón et al., 2012), como se produce en los fluidos viscosos. Algunos de los más importantes son (Cruden & Varnes, 1996):

*Flujos de derrubios o detritos:* Flujos rápidos que contienen una gran cantidad de fragmentos de rocas, derrubios o material grueso, aunque incorporan también una importante cantidad de material fino y una variable cantidad de agua. Parten en muchas ocasiones de depósitos de otros movimientos como desprendimientos; se desarrollan asociados a barrancos o cárcavas de pendientes muy pronunciadas; y sus depósitos terminan formando un abanico cuando llegan a las zonas más llanas.

*Avalancha de rocas y/o de derrubios:* Movilización de grandes masas de tierra, fragmentos de rocas o derrubios a gran velocidad lo que representa un riesgo importante para las áreas cercanas. A diferencia de los flujos o corrientes de derrubios, no se canalizan a través de barrancos o cárcavas cerradas, pero el mecanismo es similar. En ocasiones, entran en transición con los colapsos y desprendimientos rocosos descritos anteriormente, cuando las pendientes son más elevadas.

*Flujos de tierra:* Flujos con deformación lenta a rápida, a veces intermitente, y no necesariamente muy húmeda, de tierra o rocas blandas, en laderas de inclinación moderada (Corominas y García Yagüe, 1997). Presentan una forma como de reloj de arena, con una cabecera que queda delimitada por un escarpe más o menos pronunciado, un cuerpo más estrecho y alargado, y un pie más abierto de forma semicircular. Cuando el contenido de material fino es mayor e incorporan una mayor cantidad de agua, entran en transición hacia los

flujos o coladas de barro. En relación con ellos se pueden considerar los denominados golpes de arena o limo, prácticamente en seco y con velocidad muy alta (súbitos).

*Flujos de lodo o barro:* Flujos de alta velocidad que involucran una mezcla de agua, sedimentos finos y materiales sueltos, como arcilla, limo, arena y rocas fragmentadas. Estos flujos se caracterizan por su comportamiento fluido o semisólido, similar al de un lodo o barro espeso. Generalmente están asociados con la presencia de agua en cantidades significativas. Algunas de las causas comunes incluyen fuertes precipitaciones, deshielo rápido, desbordamientos de ríos, o actividad volcánica que derrite el hielo y la nieve acumulada.

Finalmente, hay que considerar un grupo importante de flujos como las reptaciones que consisten en movimientos graduales y lentos de masa, generalmente de suelo, en una pendiente moderada o incluso baja. También se los conoce como creep o deslizamientos por fluencia. Este tipo de movimiento implica la deformación continua y progresiva del suelo de la ladera, sin una superficie de ruptura o deslizamiento brusco a lo largo del tiempo, deformándose y adaptándose a las condiciones de carga y tensión. Como se ha apuntado, es más común en suelos, como arcillas expansivas, limos, o arenas sueltas. Las reptaciones pueden manifestarse en deformaciones visibles, como grietas en el suelo, inclinaciones de árboles o postes, y desplazamiento gradual de estructuras o infraestructuras cercanas. Son generalmente procesos de movimiento de ladera de baja velocidad y largo plazo, que pueden continuar durante años o décadas. Aunque su velocidad es lenta en comparación con otros movimientos de masa, las reptaciones pueden representar un riesgo para las estructuras y la estabilidad del terreno en áreas afectadas. Un tipo relacionado es la solifluxión, que se produce en suelos cohesivos y de poco espesor, dando lugar a formas lobuladas, muchas veces asociados a ambientes periglaciares,

donde la fusión estacional del hielo en el terreno provoca el aumento de las presiones de agua en los poros, dando lugar al movimiento del material superficial.

La reptación puede producirse también en algunos tipos de rocas (filitas, esquistos ...) que bajo determinadas condiciones (fuertes presiones en profundidad en grandes laderas o valles), presentan un comportamiento de flujo o deformación lenta de la ladera o la montaña completa. Se han catalogado con distintos nombres como creep en roca, sagging o sackungen, o más recientemente como deslizamientos o deformaciones gravitacionales profundas en laderas (DGSL o DGSD en sus siglas inglesas).

Por último, hay referirse a una tipología que en las clasificaciones de Varnes y derivadas (Varnes, 1978; Cruden & Varnes, 1978; Hungr et al., 2014) se conocen como expansiones laterales, que constituyen un grupo independiente, pero que pueden estar relacionadas con los movimientos de tipo flujo. Se definen bien como la fracturación y extensión de material compacto (tanto suelo como roca), por la deformación de material subyacente, que puede deberse a procesos de licuefacción en algunos casos.

Todas las tipologías anteriores pueden combinarse, dando lugar a los conocidos como movimientos complejos, una especie de cajón de sastre que se describe en la mayor parte de las clasificaciones, y que en realidad integra a tipologías diferentes como: desprendimientos o vuelcos que evolucionan como avalanchas o como corrientes de derrubios; deslizamientos o flujos que provocan el desprendimientos de rocas más competentes en cabecera; deslizamientos que evolucionan a flujos de tierra o coladas de barro en el pie; o procesos de reptación, que en su seno acogen a flujos diferenciados. Además de la tipología, como se ha apuntado anteriormente hay otros criterios importantes de clasificación. En este trabajo se van a considerar el tamaño, la tasa de desplazamiento, la actividad y el grado de desarrollo.

Por lo que respecta al tamaño, existen algunas clasificaciones que se emplean de forma más frecuente (Rodríguez Ortíz et al., 1978; Fell, 1994). La primera clasificación es aplicable a movimientos de menor tamaño, ya que todos los movimientos con un volumen mayor de  $5 \times 10^4 \text{ m}^3$  son extremadamente grandes (por ejemplo, un movimiento de 1 ha con 5 m de espesor sería ya de este tipo), mientras que la segunda se puede extender a movimientos de mayor volumen o magnitud (del orden de los  $\text{hm}^3$ , con superficies de orden kilométrico y/o espesores del orden hectométrico). En la Tabla 2 y Tabla 3 se muestra esta clasificación.

Tabla 2. Clasificación de tamaños de masas movilizadas según Rodríguez Ortiz et al. (1978).

<b>Tamaño</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>
Pequeña	1 -50
Moderada	50 - $5 \times 10^2$
Grande	$5 \times 10^2$ - $5 \times 10^3$
Muy grande	$5 \times 10^3$ - $5 \times 10^4$
Excepcionalmente grande	$> 5 \times 10^4$

Tabla 3. Clasificación de magnitudes de los movimientos de ladera según Fell (1994).

<b>Magnitud</b>	<b>Descripción</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>
7	Extremadamente grande	$> 5 \times 10^6$
6	Muy grande	$1 \times 10^6$ - $5 \times 10^6$
5	Grande	$25 \times 10^4$ - $1 \times 10^6$
4	Mediana	$5 \times 10^4$ - $25 \times 10^4$
3	Pequeño	$5 \times 10^3$ - $5 \times 10^4$
2	Muy pequeño	$5 \times 10^2$ - $5 \times 10^3$
1	Extremadamente pequeño	$< 5 \times 10^2$

En cuanto a la tasa de desplazamiento o velocidad, puede decirse que desde el punto de vista físico son conceptos equivalentes; pero desde el punto de vista práctico, en movimientos más



lentos donde no se puede hacer una monitorización continua, se habla más genéricamente de tasa de desplazamiento como el desplazamiento que se produce entre dos tiempos de medida de la posición de los puntos del terreno. En la Tabla 4 se muestra la clasificación establecida por el Grupo de Trabajo del Inventario Mundial de Deslizamientos (WP-WLI, 1995), desde tasas de desplazamiento o velocidades extremadamente lentas (orden de mm/año) a extremadamente rápidas (orden de m/s).

Tabla 4. Clasificación de velocidades, ligeramente modificada a partir de la propuesta por la Comisión del inventario mundial de movimientos de ladera de la UNESCO (WP/WLI, 1995) para incluir intervalos de velocidades en varias unidades de medida.

<b>Clase Descripción</b>	<b>Intervalos (mm/seg)</b>	<b>Otras unidades</b>	<b>Tipos de daños (resumido)</b>
Extremadamente rápida	$> 5 \times 10^3$	$> 5$ m/s	Dstrucción total de vidas y bienes
Muy rápida	$50 - 5 \times 10^3$	3 m/min - 5 m/s	Evacuación difícil. Daños irreparables
Rápida	0.5 - 50	1.8 m/h - 3 m/min	Evacuación posible. Daños irreparables
Moderada	$5 \times 10^{-3} - 0.5$	13 m/mes - 1.8 m/h	Daños intensos a estructuras en la masa
Lenta	$50 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-3}$	1.6 m/año - 13 m/mes	Frecuentes daños, reparación costosa
Muy lenta	$0.5 \times 10^{-6} - 50 \times 10^{-6}$	16 mm/año - 1.6 m/año	Daños escasos y/o reparables
Extremadamente lenta	$< 0.5 \times 10^{-6}$	$< 16$ mm/año	Sin daños a estructuras adecuadas

Uniendo los dos conceptos anteriores (volumen y velocidad), se llega al de magnitud. Aunque algunos autores como Fell (1994) hacen equivaler la magnitud al volumen, otros incorporan parámetros físicos adicionales como la velocidad y la distancia recorrida (Guzzetti et al., 2005), lo que significa una mayor analogía con el concepto de magnitud en el riesgo sísmico que se cuantifica en función de la energía liberada por el sismo. La intensidad, haciendo igualmente analogía con el riesgo sísmico, debería incorporar además aspectos relativos a los efectos del deslizamiento, como son, por un lado, las condiciones de la zona de depósito (amplitud,

pendiente, etc.); y por el otro, los elementos en riesgo y su vulnerabilidad. Así, Cardinali et al. (2002) propone una matriz para estimar la intensidad, o más bien la magnitud de acuerdo a lo anteriormente apuntado, que posteriormente es modificada por Chacón (2008, 2012). Esta clasificación se indica en la Tabla 5:

Tabla 5. Clasificación de intensidades de los movimientos de ladera de Cardinali et al., (2002) modificada por Chacón (2008).

Volumen (m <sup>3</sup> )	VELOCIDAD (estimada)		
	Movimiento rápido		Lento
	Caída de rocas	Flujo de derrubios	Deslizamiento
<0,001	Débil		
<0,5	Moderada		
>0,5-500	Alta	Moderada	Moderada
500-10,000	Alta	Moderada	Moderada
10,000-500,000	Muy alta	Alta	Alta
>500,000	Muy alta	Muy alta	Alta
>>500,000	Muy alta	Muy alta	Muy alta

En lo relativo a la actividad, en este trabajo se sigue la propuesta por el WP-WLI (1993 a), para el estado, la distribución y el estilo de la actividad. En el estado de actividad del movimiento, se catalogan como activos los que se están desarrollando en un momento dado; y reactivados, los movimientos que estando suspendidos vuelven a la actividad. Por su parte, los suspendidos son aquellos que no están activos actualmente, pero lo han estado en el último ciclo anual. Estos tres estados se pueden describir de forma más práctica como deslizamientos activos continuos o intermitentes (ya sea estacional o cíclica) en los últimos años. El resto de los movimientos, que se catalogan como inactivos, se pueden clasificar a su vez en: dormidos, si las causas que los produjeron aún continúan vigentes; abandonados, si las condiciones en las que se produjeron ya no son las actuales; y relictos si, además, la morfología del movimiento está parcialmente

desmantelada. Finalmente, se puede hablar de movimientos estabilizados como aquellos que lo han sido mediante algún tipo de medida correctora.

En cuanto al grado de desarrollo (Chacón, 1997, 2012), los movimientos pueden dividirse en movimientos en fase preparatoria, cuando aún no se han desarrollado, pero ya hay evidencias como abombamientos o grietas; incipientes, cuando ya se empieza a formar un escarpe, se extienden las grietas y se delinea el perímetro; desarrollados, en los que ya hay un desarrollo notable del escarpe, hay evidencias de desplazamiento con formación del cuerpo y el pie del movimiento; avanzados, con un escarpe totalmente formado que remonta en la ladera, mayores evidencias aún del desplazamiento del cuerpo, y amplio desarrollo del pie; y agotados, cuando el movimiento ya se ha desarrollado por completo y no tiene posibilidad de avanzar o retrotraerse más.

#### **2.1.4. Causas e impacto de los movimientos de ladera**

Los movimientos de ladera pueden ser naturales o inducidos por la actividad humana, y a su vez son influenciados por una serie de factores como la geometría de la pendiente, las características geológicas y geotécnicas del suelo o roca, la presencia de agua (saturación del suelo) y la acción de fuerzas externas como la gravedad, el viento o los terremotos. De acuerdo con Cruden & Varnes (1996), dentro de las causas naturales se distinguen entre causas geológicas que tienen que ver con la resistencia y otras propiedades de los materiales; así como con la influencia de las discontinuidades rocosas; morfológicas como levantamientos o erosión debido a la actuación de procesos geodinámicos (volcanes, acción del agua o del hielo...) o cambios en la cubierta vegetal; y físicas, por la ocurrencia de lluvias, deshielo, actividad sísmica o volcánica... Por último, las causas antrópicas pueden deberse a excavaciones, sobrecargas, minería, explosivos, riego o deforestación, entre otras.

En cuanto a su impacto, los deslizamientos de tierra se consideran uno de los peligros naturales más importantes en todo el mundo y causan miles de víctimas y costes que ascienden a miles de millones de euros cada año (Schuster, 1996; Petley, 2012; GAR, 2009; 2019). Así, según el Reporte de la CRED (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters) y la UNISDR (United Nation Office for Disaster Risk Reduction), entre los años 1988 y 2017 alrededor de 4.8 millones de personas a nivel mundial se han visto afectadas y 18,418 han perdido la vida por acción de los movimientos de ladera (Choi & Cheung, 2013; Henn et al., 2015; Osipov et al., 2017; Pollock & Wartman, 2020; Prucksakorn et al., 2013); asimismo, se reporta que alrededor de UDS\$ 8 billones son las pérdidas económicas provocadas por la actividad de movimientos de ladera, la actividad volcánica y otros.

En comparación con otros fenómenos de riesgo como terremotos o inundaciones, el efecto de los deslizamientos de tierra es más difuso y continuo en el espacio y el tiempo, por lo que su impacto puede ser subestimado según algunas evaluaciones (Petley, 2012). En este sentido constituyen un riesgo geológico de primer nivel (Bellone et al., 2014; Bhattacharya et al., 2015; Bossi et al., 2015; Damm et al., 2013; Giordan et al., 2017; Jaiswal & van Westen, 2013; Metternicht et al., 2005; Zeybek & Şanlıoğlu, 2019) que afecta a infraestructuras como las viales, conducciones de abastecimiento, cauces y embalses; propiedades como las edificaciones y otros bienes; alteración del medio ambiente; y la interrupción de la actividad económica en las zonas afectadas, entre otras (Schuster, 1996; Petley, 2012; GAR, 2009; 2019).

### **2.1.5. Riesgos y medidas de reducción**

De acuerdo con lo anterior, los movimientos de ladera constituyen un riesgo geológico importante, lo que implica la urgente necesidad de minimizarlo o mitigarlo.

De acuerdo con la ecuación general del riesgo (Varnes, 1984), este tiene tres componentes que son la peligrosidad o amenaza, la vulnerabilidad y la exposición de los elementos en riesgo. En relación con la amenaza, tanto la susceptibilidad, como la probabilidad temporal y la magnitud (Guzzetti et al., 2005) pueden ser minoradas con alguna actuación que mejore las condiciones geológicas, morfológicas e hidrológicas del terreno, de tal forma que se reduzca la extensión de las zonas susceptibles, o la frecuencia y el tamaño de la inestabilidad. No obstante, en este caso la medida más efectiva es el conocimiento de la amenaza, lo que se consigue con la toma de datos del territorio, el análisis y modelización, y la posterior expresión de los resultados mediante cartografías de distinto nivel (inventarios multitemporales, susceptibilidad, peligrosidad, factor de seguridad ...); y formato (mapas, modelos 3D, capas SIG, servicios web, etc.). Estos modelos de amenaza son la base de modelos de riesgo de mayor nivel, que incorporan las otras componentes del riesgo (vulnerabilidad y exposición).

Sea cual sea el nivel o el formato, los modelos y cartografías de riesgo pueden constituir el punto de partida para el diseño e implantación de actuaciones para reducir tanto la amenaza como, especialmente, la vulnerabilidad y la exposición de los elementos en riesgo. Sin embargo, como se ha apuntado antes, en la base de toda la estrategia de reducción del riesgo está la toma de datos, que además debe ser de la mayor resolución posible en el parámetro o propiedad del terreno que se mida, pero también en el espacio y en el tiempo, lo que implica la implantación de sistemas de monitorización.

## **2.2. Monitorización de los movimientos de ladera**

El monitoreo o seguimiento se aplica habitualmente para observar las condiciones cambiantes del terreno, donde los factores de seguridad contra el deslizamiento son bajos, o donde existe un alto riesgo de una posible inestabilidad. Sin embargo, en los últimos años el concepto se ha

expandido a la monitorización de una zona urbanizada, una infraestructura o red de infraestructuras, o incluso a una zona más amplia de interés, una división administrativa, etc. Así, para mitigar los efectos de los movimientos de ladera muchos países, entre ellos Estados Unidos a través del USGS (U. S. Geological Survey), han establecido programas de monitoreo a fin de estudiar procesos físicos- ambientales que desencadenan movimientos de ladera.

Para la monitorización se utilizan diferentes tipos de sistemas y técnicas que se pueden clasificar según la distancia a la que se encuentre el sensor del terreno observado: técnicas terrestres, aéreas o espaciales (Fernández et al., 2012). Dentro de las primeras, se pueden citar la que emplean instrumentación topográfica-geodésica, escáner láser terrestre o cámaras fotográficas, es decir, las que se basan en técnicas geomáticas de captura de datos; las que miden movimientos relativos (extensómetros o inclinómetros); o las que capturan parámetros geotécnicos, geofísicos, hidrológicos y meteorológicos (Savvaïdis, 2003; Arbanas and Arbanas, 2015, Mikkelsen, 1996). Por su parte, las técnicas aéreas y espaciales son fundamentalmente del ámbito geomático, aunque en algún caso se pueden capturar parámetros geofísicos (gravímetros o magnetómetros aerotransportados). La selección de sensores y el diseño de un sistema de monitoreo deseable depende de los tipos de movimiento y deformación, así como del papel y propósito de la campaña de monitoreo (Savvaïdis, 2003). Así, el sistema de monitoreo debe ser adecuado y la instrumentación debe instalarse en las ubicaciones correctas. Por ello, se requiere la estrecha cooperación de expertos en distintas disciplinas como la ingeniería geológica, geofísica, geotecnia e hidrología junto a los expertos en técnicas geoespaciales (geodesia, fotogrametría y teledetección).

Las técnicas geomáticas terrestres convencionales se han empleado profusamente para monitorear los cambios y desplazamientos de la superficie del terreno en los movimientos de

ladera. Al margen de los métodos de captura masiva de puntos (LiDAR) e imágenes (fotogrametría), que aun pudiendo utilizarse desde la superficie terrestre se describirán dentro de las técnicas remotas, se pueden diferenciar dos metodologías básicas: la instrumentación de la topografía clásica, integrada actualmente en las estaciones totales; y los sistemas de posicionamiento y navegación global por satélites (GNSS en sus siglas inglesas). En ambos casos se pueden elaborar modelos digitales de elevaciones a partir de un levantamiento sistemático del terreno y sus detalles, así como un procedimiento de interpolación posterior; o bien formar una red de referencia de control de la deformación. La obtención de modelos con técnicas de topografía clásica permite disponer de una representación continua de la superficie del terreno, aunque por cuestiones prácticas (tiempo de elaboración y económicas) los levantamientos no podrán realizarse con una alta frecuencia; de ahí que sean más útiles para la descripción del terreno que para su monitorización. Por otro lado, la existencia de otras técnicas más versátiles como los GNSS o la fotogrametría de muy alta resolución han desplazado a este tipo de técnicas, que solo se justifican en condiciones muy determinadas (baja cobertura de los satélites, presencia de obstáculos para la señal o la observación visual desde el aire, etc.). Sin embargo, la creación de redes de control con puntos de referencia permite calcular las coordenadas tanto relativas como absolutas (globales o georreferenciadas) de forma precisa, y en consecuencia de los vectores de desplazamiento. La utilización de estaciones totales motorizadas o robóticas permite la captura rápida y automatizada de los puntos desde una posición conocida, lo que las hace adecuadas para la monitorización prácticamente continua de movimientos de ladera (Angeli et al., 2000; Bertacchini et al., 2009; Arbanas et al., 2012).

Los GNSS permiten igualmente la medida de coordenadas de puntos de la superficie del terreno, en este caso globales, a partir de las posiciones de las constelaciones de satélites disponibles (NAVSTAR del GPS, Glonass o Galileo), calculadas por el tiempo de tránsito de

las señales de radio emitidas por dichos satélites, con la precisión que se requiera en función de la deformación (Abernethy & Rutherford, 2000; Baldi et al., 2008; Chadwick et al., 2005; Echeverría et al., 2013; Psimoulis et al., 2018; Rawat et al., 2011; Zárata, 2011; Gili et al., 2000). Normalmente se requiere la utilización de métodos relativos o diferenciales, lo que exige el empleo de dos receptores, uno fijo (base) y otro móvil (rover); aunque la existencia de redes activas, permite la utilización de un solo receptor en zonas próximas a estaciones de referencia de estas redes. El levantamiento puede ser del tipo cinemático para levantamiento de los límites o elementos como fracturas, etc.; del conocido como “stop & go” para levantamiento del terreno y elaboración de MDS; y estático para el establecimiento de redes de control, siendo este último método el que asegura la mejor precisión (milimétrica-centimétrica). Como en el caso anterior, esta última aplicación es la que más se emplea, permitiendo obtener series temporales de coordenadas 3D de desplazamientos en puntos discretos, con gran precisión. (Gili et al., 2000; Corsini et al., 2005; Squarzoni et al., 2005; Bertacchini et al. 2009; Zárata et al., 2021). Una alternativa es la utilización de sensores fijos de bajo coste (Cina and Piras, 2013) que, aunque de menor precisión, permiten una monitorización continua y penetrativa con posibilidad de ser conectados en redes inalámbricas y enviar datos en tiempo real a centros de control.

Los sensores de movimiento son una de las técnicas más utilizadas para la monitorización de movimientos de ladera, desde sus versiones analógicas hasta las modernas versiones digitales que se pueden conectar en redes inalámbricas y proporcionar datos continuos y en tiempo real. Dentro de ellos, están los inclinómetros (Cornforth, 2005; Tagliavini et al., 2007; Calcaterra et al., 2012; Artese et al., 2015), que proporcionan datos sobre el desplazamiento de una superficie más o menos neta, mediante la instalación del instrumento en un sondeo vertical y la medida de la tasa de inclinación. Los inclinómetros pueden estar instalados de forma permanente en el sondeo o ser introducidos puntualmente mediante una sonda (Mikkelsen, 1996). Los



extensómetros incluyen varios tipos de instrumentos, principalmente mecánicos y electromecánicos, que se utilizan para medir cambios en la distancia entre dos puntos (Savvaïdis, 2003), pudiendo ser instalados dentro de un pozo (Corominas et al., 2000) o en la superficie del deslizamiento de tierra.

Otros sensores que se emplean habitualmente en la monitorización de los movimientos de ladera son los sensores geotécnicos como las celdas de carga y presión, los sensores de humedad del suelo, los geófonos o los piezómetros. La mayoría de esos sensores geotécnicos almacenan los datos medidos utilizando registradores o dataloggers en espera de descarga; o pueden enviarse en tiempo real en sistemas de sensores inalámbricos a las estaciones de control (Savvaïdis, 2003). Los geófonos utilizan técnicas de monitoreo microsísmico para medir la vibración asociada con el movimiento en deslizamientos, por lo que son utilizados para su detección (Metternicht et al., 2005; Spilmann et al., 2007; Ventura et al., 2013; Car et al., 2014; Bossi et al., 2015). Por su parte, los piezómetros, que miden el nivel del agua en sondeos, bien mediante su instalación permanente en sondeos o bien con medidas puntuales con sondas, son uno de los instrumentos más empleados, ya que el agua subterránea y la presión de poro que origina son uno de los principales factores desencadenantes de deslizamientos de tierra (Dunnicliff, 1988; Glastonbury & Fell, 2008; Penna et al., 2013; Uhlemann et al., 2016); Asimismo también se cuenta con sensores que miden la humedad del suelo a determinadas profundidades, y los medidores de la presión de poros también se utilizan en otros muchos casos (Dahal et al., 2009; Di Maio & Vassallo, 2011; Leung & Ng, 2016).

Un grupo adicional de sensores que completan las medidas habitualmente realizadas en los movimientos de ladera o en zonas susceptibles son los sensores meteorológicos que suelen estar integrados en una estación meteorológica compacta (precipitación, temperatura, viento...). Los

más extendidos son los sensores que monitorean la precipitación, considerado como el principal factor desencadenante de un movimiento de ladera (Keqiang et al., 2008; Lindner et al., 2016; Ram et al., 2019; Tofani et al., 2017; Zhao & Lu, 2018).

Por último, es necesario señalar que frecuentemente se utilizan diferentes tipos de técnicas y sensores combinadas e incluso conectadas en un sistema integral (Michoud et al., 2013). Debido a la variabilidad en los tipos y procesos de movimientos de ladera, junto con los objetivos de la investigación en este ámbito, no hay un estándar único recomendable; aunque una práctica conveniente es proporcionar alguna redundancia en los datos para evitar la pérdida de una parte de los mismos. Algunos ejemplos se describen con detalle, como en algunos casos en Italia (Cotecchia, 2006; Corsini et al., 2005; Angeli et al. ., 2000; Hervas et al., 2003; Petley et al., 2005); en Austria (Brückl et al., 2006); Noruega (Blikra., 2012); Canadá (Froese et al., 2012); o Croacia (Arbanas et al., 2012b).

### **2.3. Sensores remotos para la monitorización de movimientos**

Las técnicas de detección remota que se emplean para la cartografía de movimientos de ladera también pueden ser utilizadas para su monitoreo, si se adquieren datos multitemporales. Estas técnicas, y en general la captura de información geomática o geoespacial, han abierto una interesante línea de investigación en el estudio de los movimientos de ladera al disponer de datos con información de la superficie del suelo del pasado y en el presente (Fernánde et al., 2016, 2017).

Las técnicas remotas combinadas con los sistemas de información geográfica (SIG) son herramientas básicas para el análisis de movimientos de ladera (Chacón et al., 2006; Metternicht et al., 2005). Pueden basarse en sensores pasivos, tanto ópticos como térmicos; o activos, como los LiDAR y los instrumentos de radar de apertura sintética (SAR) (Car et al., 2014; Qiao et al.,

2013; Zhao & Lu, 2018). La mayor parte de las técnicas capturan imágenes, excepto el LiDAR que captura nubes de puntos densas, desde plataformas aéreas o satelitales hasta unidades fijas o móviles terrestres, lo que permiten la aplicación de enfoques 3D y multitemporales (4D) para la monitorización de movimientos de ladera.

La teledetección espacial con imágenes ópticas de resolución media (por ejemplo, 15-30 m en el caso del programa Landsat, con imágenes disponibles desde los años 1980's; o Sentinel-2 con imágenes de 10-20 m, disponibles desde 2015), ha sido empleada para la monitorización de grandes deslizamientos con importantes desplazamientos o cambios en la superficie (Alcántara-Ayala et al., 2006; Del Soldato et al., 2019; Lacroix et al., 2019; Liu et al., 2021; Mulas et al., 2020; Stumpf et al., 2018; Xia et al., 2022; Xiong et al., 2020; Yang et al., 2020; Zeng et al., 2015; Zhang et al., 2022). La mayor parte de estas aproximaciones corresponden a técnicas 2D de detección de cambios en píxeles, sobre pares o series de imágenes (referencias); no obstante, en los últimos años, las técnicas de correlación digital de imágenes (DIC en sus siglas inglesas) han permitido la estimación de desplazamientos horizontales de forma automática (Berg et al., 2020; Caporossi et al., 2018; De & Lazo, 2006; Mazzanti et al., 2020; Mugnai, 2023; Sutton et al., 2017). La gran ventaja de estos métodos basados en satélites es su elevada resolución temporal, que permite la obtención de imágenes cada pocos días. Las técnicas de teledetección óptica ofrecen además una buena resolución espectral, muy útiles para la detección y análisis de ciertos aspectos relacionados con los movimientos de ladera como la vegetación, humedad, litología, etc.

La interferometría diferencial de radar (DInSAR) se basa en imágenes tomadas por sensores de radar de apertura sintética (SAR) para medir las deformaciones de la superficie y construir series temporales de deformaciones de la superficie que permitan detectar, caracterizar y

mapear deslizamientos de tierra únicos o múltiples (Notti, 2010; Komac et al., 2014). Las imágenes de SAR están disponibles desde los años 1990's con los satélites de la Agencia Espacial Europea como ERS y Envisat, y más recientemente con Sentinel-1, además de otros satélites comerciales. Se diferencian dos tipos de enfoques básicos (Tofani et al., 2014): el DInSAR convencional y el conocido como reflectores permanentes (PSI por sus siglas inglesas). El primero se basa en el procesamiento de dos imágenes SAR recopiladas en el mismo área para detectar un cambio de fase relacionado con las deformaciones de la superficie que se producen entre las dos adquisiciones. La aproximación PSI se basa en el uso de una serie larga de imágenes SAR multitemporales registradas conjuntamente, lo que permite medir las deformaciones del suelo o desplazamientos en la línea de visión con precisión milimétrica, de la que se derivan a su vez desplazamientos horizontales y verticales (Žibret et al., 2012).

En estudios de alta resolución con deslizamientos con evolución diacrónica (Chacón et al., 2008) en los que se producen procesos de reactivación, la fotogrametría aérea es una técnica muy adecuada, de ahí que su uso está cada vez más extendido (Walstra et al., 2004; Cardenal et al., 2006; Delacourt et al. 2007; Prokešová et al., 2010; Dewitte et al., 2008; Kasperski et al., 2010; Sandric et al., 2010; Fabris et al., 2011; González-Díez et al., 2014; Fernández et al., 2017). En ocasiones, la fotogrametría se combina con otros métodos, como el LiDAR (Brückl et al., 2006; Corsini et al., 2009; Fernández et al., 2017; Kamps et al., 2017), los GNSS (Brückl, 2006) o incluso la digitalización de mapas antiguos (Corsini et al., 2009). En estos estudios, la orientación de los bloques de imágenes se basa en técnicas convencionales de aerotriangulación, utilizando un número reducido de puntos de control terrestre (GCP) medidos en campo por GNSS (Kraus, 2007).

Recientemente, el uso cada vez mayor de VANT/VARP, que se tratarán específicamente en el apartado siguiente, combinados con enfoques de Structure from Motion (SfM) y vídeo estéreo múltiple (MVS) (Johnson et al., 2014; Eltner et al., 2016; González Aguilera et al., 2016; Wu, 2019), han ampliado la aplicación de técnicas fotogramétricas a imágenes de muy alta resolución (Niethammer et al., 2012; Fernández et al., 2016; Rossi et al., 2018; Peppia et al., 2019) o incluso estudios de resolución ultra-alta (Cardenal et al., 2019). En algunos casos, también se han llevado a cabo experimentos de orientación directa sin el uso de GCP. En el otro extremo de las técnicas basadas en imágenes, el empleo de imágenes de satélite de alta resolución (SPOT con 2,5-10 m; Ikonos con 1-4 m; Quickbird con 0,6-2,4 m; Pleiades con 0,3-0,7 m, WorldView con 0,15-0,5 m) y con capacidad de visión estereoscópica permite igualmente el desarrollo de aproximaciones 4D sobre movimientos de ladera (Strumpf et al., 2014).

Una vez orientadas las imágenes, se pueden generar productos fotogramétricos, como modelos digitales de superficie (MDS), modelos digitales de terreno (MDT) y ortofotografías. A partir de los MDS/MDT de épocas sucesivas se han desarrollado enfoques cuantitativos, como el cálculo de modelos diferenciales (MdD), perfiles topográficos y cálculos volumétricos (Walstra et al., 2004; Cardenal et al., 2006; Prokešová et al., 2010; Dewitte et al., 2008; Corsini et al., 2009; Fernández et al., 2017; Kamps et al., 2017; Brückl et al., 2006; Niethammer et al., 2012, Fernández et al., 2016; Rossi et al., 2018; Peppia et al., 2019; Cardenal et al., 2019). Además, en algunos casos, se calculan los vectores de desplazamiento 3D (Brückl et al., 2006; Kraus, 2007; Niethammer et al., 2012, Fernández et al., 2016; Rossi et al., 2018; Cardenal et al., 2019) y se realizan observaciones para la caracterización cualitativa de los movimientos mediante la interpretación de ortoimágenes (Walstra et al., 2004; Prokešová et al., 2010; Dewitte et al.,

2008; Fernández et al., 2017; Fernández et al., 2016; Cardenal et al., 2019) y el análisis de imágenes (Sandric et al., 2010; Kamps et al., 2017).

Por su parte, las técnicas LiDAR se están utilizando igualmente de forma profusa en la investigación de movimientos de ladera (Cavalli & Marchi, 2008; Dewitte et al., 2008; Kasai et al., 2009; Jaboyedoff et al., 2012; Fernández et al., 2013; 2017; Ortuño et al., 2017; Yeh et al., 2017; Tiwari et al., 2018), ya que permiten la creación de MDS/MDT con alta resolución y precisión. Estos modelos se utilizan para obtener derivados del modelo digital de elevaciones (MDE), como modelos de pendiente y sombreado o curvatura, de los cuales se extraen deslizamientos de tierra y características de relieve (Glenn et al., 2006; Lin et al., 2014; Taroli, 2014); además, permiten aplicar técnicas de aprendizaje automático o basadas en objetos para detectar deslizamientos de tierra (Xi et al., 2015; Pradhan & Alsaleh, 2017; Pawluszek-Filipiak & Borkowski, 2020); y, de forma más extendida, calcular los MdD entre diferentes fechas (Corsini et al., 2009; Fernández et al., 2017; Kamps et al., 2017; Pradhan et al., 2017; Palenzuela et al., 2015; Bossi et al., 2015; Liu et al., 2019).

La mayoría de estos estudios, tanto fotogramétricos como LiDAR, se centran en monitorizar movimientos únicos en áreas inestables, aunque algunos de ellos se aplican para detectar movimientos de ladera y elaborar inventarios (Sandric et al., 2010; González et al., 2014; Eltner et al., 2016; Li et al., 2015; Pradhan et al., 2017; Pawluszek-Filipiak & Borkowski, 2020; Palenzuela et al., 2015; Liu et al., 2019; Mora et al., 2018; Fernández et al., 2021). Una de las desventajas que supone la utilización de sensores a bordo de plataformas aéreas es la menor capacidad para ofrecer una elevada resolución temporal, dado los costes y el tiempo que consumen los vuelos fotogramétricos y/o LiDAR. Esta limitación se ve superada hoy día con

algunas plataformas como los helicópteros y especialmente con los VANT como se tratará en el apartado correspondiente.

Por su parte, y de igual manera que en las plataformas satelitales, en el caso de las plataformas aéreas existe la posibilidad de montar sensores SAR para estudiar la actividad de los movimientos de ladera (Tofani et al., 2013b), con una mayor resolución espacial que los satélites aéreos. En este caso, la mayor limitación es el alto coste que suponen estos vuelos.

Por último, hay que referirse a las variantes terrestres de todas las técnicas anteriores, que igualmente se recogen por afinidad dentro de los sensores remotos, aunque en este caso, la distancia del sensor a los objetos observados sea menor. En cuanto a la captura y procesamiento de imágenes, las técnicas de fotogrametría terrestre han venido empleándose en la monitorización de movimientos de ladera (Cardenal et al., 2006; 2008; Alameda et al., 2019). Estas técnicas se revelan como muy adecuadas, combinadas o no con LiDAR terrestre, no solo para la obtención de MDS/MDT de alta precisión y resolución, sino para la identificación de rasgos y elementos dentro de los deslizamientos. La obtención de imágenes casi continuas o incluso vídeos desde estaciones fijas con captura estereoscópica, complementadas con técnicas de análisis digital de imágenes e inteligencia artificial, posibilitan habilitar sistemas de alarma temprana en deslizamientos activos. Como inconveniente de las técnicas terrestres, hay que mencionar la ocultación de ciertas zonas del terreno desde la perspectiva que se pueden alcanzar desde las estaciones a nivel de la superficie, especialmente en las zonas y movimientos de ladera de menor pendiente, frente a la mejor visión sinóptica que ofrecen las técnicas aéreas.

El LiDAR terrestre, más comúnmente conocido como escáner láser terrestre (TLS por sus siglas en inglés) es otro de los instrumentos más utilizados en los últimos años, con multitud de aplicaciones en la monitorización de movimientos de ladera (Jaboyedoff et al., 2012),

especialmente en aquellos casos relacionados con taludes de fuerte pendiente en macizos rocosos (Pérez et al., 2011; Irigaray y Palenzuela, 2013; Abellán et al., 2014). Los TLS permiten la obtención de MDS muy precisos y con posibilidad de ser repetitivos en el tiempo con costes no excesivos, lo que facilita la monitorización de los movimientos. Suelen utilizarse en combinación con la fotogrametría terrestre (Pérez et al., 2011).

Otra técnica empleada son los sistemas móviles de mapeo (Mobile Mapping System -MMS), que permiten la monitorización móvil de inestabilidades del terreno empleando conjuntamente sensores fotográficos y LiDAR. Normalmente estos sistemas se montan en vehículos, por lo que se emplean para la identificación, cartografía y monitorización de incidencias en carreteras o caminos (Di Stephano et al., 2020; Sellers et al., 2021), aunque también se están desarrollando sistemas para recorridos a pie.

En cuanto a los sistemas de InSAR terrestres (GB-InSAR), estos ofrecen las mismas posibilidades de detección de la deformación que sus equivalentes aéreo y espacial (Casagli et al., 2010), aunque con un cambio en la disposición de las líneas de visión, que ahora detectan mejor los desplazamientos en horizontal, a la vez que aportan una mayor resolución espacial (Corsini et al., 2006).

#### **2.4. Fotogrametría VANT para el estudio de movimientos de ladera**

En los últimos años, el empleo de aeronaves no tripuladas (VANT) o remotamente pilotadas (VARP), conocidas generalmente por sus siglas inglesas (UAV, UAS o RPAS) se han constituido en herramientas ampliamente utilizadas y en clara progresión en aplicaciones civiles (Cox et al., 2004; Nonami, 2007) incluyendo agricultura de precisión (Jiménez-Berni et al., 2009; Grenzdörffer et al., 2008), protección civil e incendios (Maza et al., 2010; y más recientemente a ingeniería, ciencias ambientales y geomática (Longo et al., 2004). El uso



generalizado actual de los VANT se ha visto estimulado por la caída de los precios, la creciente miniaturización y el mejor rendimiento de estos sistemas, así como los decididos avances en los GNSS y los sistemas inerciales, el guiado por piloto automático, etc. (Cardenal et al., 2019). Este grado de aplicabilidad también se ha visto favorecido por la introducción de nuevos algoritmos en visión por computadora. Así, una nueva generación de instrumentos de bajo costo y software fotogramétrico amigable basado en enfoques Structure from Motion (SfM) (Hartley et al., 2004; Eltner et al., 2016) ha contribuido a este espectacular aumento de las aplicaciones de VANT en las ciencias ambientales y de la Tierra.

Los enfoques SfM permite reconstruir una geometría 3D a partir de imágenes tomadas desde diferentes ángulos y que pueden contener variación entre iluminación y escala. La base de estos algoritmos consiste en la detección de puntos comunes entre fotografías capturadas en forma secuencial referidas a un plano horizontal XY o 2D, gracias a que cuentan con una superposición suficiente entre imágenes consecutivas tanto longitudinal como lateralmente, lo que se denomina traslape o solape. En la mayoría de los casos se recomienda al menos un 75% de traslape longitudinal y de al menos un 60% de traslape lateral. En lugares donde la vegetación es densa o existen bosques se recomienda un traslape longitudinal y transversal de al menos un 85%. Investigaciones relacionadas con el uso de VANT establecen ciertos rangos de traslape: por ejemplo, Carvajal et al., 2012 registraron imágenes de la zona de estudio con un traslape longitudinal del 85% y transversal del 60%; Chen et al., 2018 emplearon un traslape longitudinal del 60% y un lateral del 50% para analizar los cambios geomórficos que se producen en la bahía de Wujiao (China); Watanabe & Kawahara, 2016 emplearon un VANT para monitorear cambios topográficos y de vegetación en el río Jyoge (Japón) considerando un traslape longitudinal del 90% y traslape lateral entre 50 y 60%; Peng et al., 2015 monitorizaron un movimiento de ladera al noreste de Chongqing (China) para lo cual consideraron el uso de

un traslape longitudinal de 70% y lateral del 50%. En este caso, la geometría 3D se traduce en la obtención de una nube de puntos, generada con un algoritmo automático de detección y descripción de características denominado (SIFT: Scale Invariant Feature Transform) seguido del ajuste del bloque de imágenes. Finalmente, esta nube de puntos puede ser interpolada para generar ortofotos y Modelos Digitales de Superficie (MDS).

La precisión de los productos fotogramétricos derivados de los vuelos con VANT dependen de factores inherentes a la cámara, resoluciones y altura de vuelo, siendo el más importante el número y la distribución espacial de puntos de control (GCP), del cual se deriva la precisión absoluta de ortofotos y MDE. Varios estudios se han efectuado para establecer la relación entre el número de GCP y su ubicación respecto a la precisión obtenida en ortofotos y MDE (Agüera-Vega et al., 2017; Martínez-Carricondo et al., 2018; Peppas et al., 2016a). Sus coordenadas pueden ser determinadas empleando sistemas GNSS o en su defecto con el uso de instrumentos de precisión como estaciones totales. En el estudio realizado por Agüera-Vega et al., 2017 en la que se evaluó la precisión de mapeo fotogramétrico basado en la variación del número GCP con el uso de VANT se destaca que tanto la precisión horizontal como la vertical aumentan a medida que aumenta la cantidad de GCP utilizados logrando obtener errores medio cuadrático en X e Y por debajo de los 4 cm con el uso de 15 a 20 GCP. De la misma forma Martínez-Carricondo et al., 2018 analizó la distribución espacial de los GCP con varias configuraciones entre ellas distribución en borde, central, en esquinas, estratificada y aleatoria, logrando establecer que una distribución estratificada y de borde contribuyen a optimizar la precisión horizontal y vertical por debajo de los 5 cm.

En la investigación de movimientos de ladera se han utilizado diferentes tipos de VANT y metodologías de trabajo. En estudios de alta resolución se han empleado equipos pesados,

normalmente drones (VANT) de ala fija (Rau et al., 2011; Tahar et al., 2013; Liu et al., 2015; Shi & Liu, 2015; Hsieh et al., 2016), y también helicópteros convencionales. Sin embargo, en la mayoría de los casos, en estudios de muy alta resolución se han empleado equipos ligeros, como multicópteros (Carvajal et al., 2011; Liu et al., 2011; Neithammer et al., 2012; Stumpf et al., 2013, Turner & Lucieer, 2013; Turner et al., 2013; Fernández et al., 2013; Peterman, 2015, Al-Rawabdeh et al., 2016; Vrublova et al., 2015; Lindner et al., 2016; Daakir et al., 2015, Fernández et al., 2013, 2014, 2015; 2016). Los VANT se han utilizado en estudios preliminares que respaldan otras técnicas, como la teledetección desde satélites (Gong et al., 2010; Yang et al., 2015), la fotogrametría de vuelos históricos (Rau et al., 2011; Liu et al., 2015; Hsieh et al., 2016; Fernández et al., 2013, 2015) y el LiDAR aéreo (Hsieh et al., 2016). También se han aplicado a estudios de recopilación de datos de inventario mediante fotointerpretación (Yang et al., 2015; Lin et al., 2010), análisis de cambios (Rau et al., 2011) y análisis orientado a objetos (Shi & Liu, 2015), así como al estudio de los efectos de eventos catastróficos (Yeh et al., 2011). En algunos casos, el objetivo de los estudios es la elaboración de mapas de susceptibilidad y estabilidad (Fan et al., 2018) y la evaluación de la exposición de edificios o infraestructuras al riesgo de deslizamientos (Yeh et al., 2011; Huang et al., 2011), pero en otros casos, los VANT son integrados como subsistemas de observación, transporte de materiales y servicios de rescate en sistemas más grandes de respuesta rápida a eventos de emergencia (Liu et al., 2015; Yang et al., 2015; Huang et al., 2011; Nedjati et al., 2016; Tahar et al., 2013; Warrick et al., 2019).

En general, los distintos enfoques que se han ido desarrollando para la monitorización de movimientos de ladera se basan en la obtención de MDS/MDT y ortofotografías de muy alta resolución, entre 0.05 y 0.10 m (Rossini et al., 2018; Car et al., 2016; Carrera-Hernández et al., 2020; Carvajal et al., 2012; Fernández et al., 2014, 2017a, 2017b; Gandor et al., 2015; Hsieh et al., 2016; Huang et al., 2017; Piras et al., 2017; Thomas et al., 2020; Ueyama et al., 2014;

Wojciech et al., 2017; Zárate et al., 2021b); e incluso ultra-alta resolución, entre 0,01 y 0,02 m (Cardenal et al., 2019). En la mayoría de los casos, el punto de partida son vuelos orientados por triangulación aérea, basados en puntos de control o apoyo terrestres (GCP) medidos con GNSS (Shi & Liu, 2015; Hsieh et al., 2016; Carvajal et al., 2011; Niethammer et al., 2011, 2022; Stumpf et al., 2013; Turner et al., 2013, 2015; Fernández et al., 2015; Peterman, 2015; Stocker et al., 2017; Forlani et al., 2018; Rabah et al., 2018) o registrados a partir de modelos fotogramétricos previos (Liu et al., 2015; Fernández et al., 2016; Cardenal et al., 2019) o LiDAR (Fernández et al., 2013; 2016; 2021 a; Hsieh et al., 2016); y generalmente combinados con técnicas de SfM (Eltner et al., 2016; Niethammer et al., 2011, 2012; Stumpf et al., 2013; Turner et al., 2013, 2015; Fernández et al., 2013, 2014; Peterman, 2015, Al-Rawabdeh et al., 2016). No obstante, en los últimos años se vienen ensayando técnicas de orientación directa a partir de parámetros en vuelo (GNSS/INS), como la que se utiliza habitualmente en la fotogrametría aérea convencional, toda vez que los sistemas VANT han incorporado técnicas de posicionamiento RTK (Eltner et al., 2016; Liu et al., 2015; Daakir et al., 2015; Fernández et al., 2021 b), que permiten dotar de coordenadas a los puntos de captura.

Los MDS/MDT se utilizan con frecuencia para obtener modelos de diferencias (MdD) para estimar los desplazamientos, o más bien los cambios, verticales de la superficie del terreno (Shi & Liu, 2015; Hsieh et al., 2016; Niethammer et al., 2011, 2012; Stumpf et al., 2013; Turner & Lucieer, 2013; Turner et al., 2015; Fernández et al., 2013, 2014; Peterman, 2015; Lindner et al., 2016; James et al., 2017; Peternel et al., 2017; Peppas et al., 2017; 2019; Hu et al., 2018; Rossi et al., 2018; Fan et al., 2019; Ma et al., 2019); así como para cálculos y perfiles volumétricos (Hsieh et al., 2016; Peternel et al., 2017; Peppas et al., 2017; 2019; Hu et al., 2018; Rossi et al., 2018; Fan et al., 2019; Ma et al., 2019). Aunque los MDS introducen errores e incertidumbres en los cálculos de la superficie del terreno, la mayoría de los autores utilizan estos modelos

debido a las dificultades para obtener MDT verdaderos a partir de nubes de puntos fotogramétricos (Niethammer et al., 2011, 2012; Stumpf et al., 2013; Turner & Lucieer, 2013; Turner et al., 2015; Fernández et al., 2013, 2014; Lindner et al., 2016), especialmente en áreas cubiertas por vegetación densa. La generación de MDT solo está encontrando una vía real en la utilización de VANT equipados con LiDAR que permiten la penetración de parte de la radiación emitida desde el láser y el rebote de esta en el terreno (Fernández et al., 2022). Por otra parte, el análisis de los modelos (MDT/MDS) de muy alta resolución permite la detección automática de escarpes y otros elementos de los movimientos (Al-Rawabdeh et al., 2016; Zárate et al., 2023), lo que permite tanto la caracterización de los movimientos (Niethammer et al., 2012; Stumpf et al., 2013; Fernández et al., 2016; Al-Rawabdeh et al., 2016; Peppas et al., 2017; 2019; Hu et al., 2018; Ma et al., 2019), como su monitorización.

Las ortofotografías, además de utilizarse para inventarios de deslizamientos como en los estudios antes mencionados, permiten el reconocimiento de rasgos y elementos de los movimientos (Warrick et al., 2019; Hsieh et al., 2016; Fernández et al., 2015; 2016; Dang et al., 2016; Hut et al., 2018; Fan et al., 2019; Ma et al., 2019), además del cálculo de los desplazamientos horizontales entre puntos significativos con gran precisión, dada su alta resolución (Shi & Liu, 2015; Niethammer et al., 2011, 2012; Stumpf et al., 2013; Fernández et al., 2013, 2014; Lindner et al., 2016; James et al., 2017; Dang et al., 2016; Mozas Calvache et al., 2017; Peternel et al., 2017). En algunos estudios se han propuesto métodos y algoritmos para la detección automática de movimientos de la superficie del terreno a partir de las ortoimágenes, así como técnicas de co-registro y correlación digital de imágenes (Shi & Liu, 2015; Turner & Lucieer, 2013; Turner et al., 2015; Peterman et al., 2015) o desplazamientos de árboles u otros elementos (Warwick et al., 2019; Fernández et al., 2016; Peppas et al., 2017; 2019). Finalmente, algunos autores han utilizado ortoimágenes para el análisis textural de las

fisuras formadas en los deslizamientos y para determinar índices de vegetación como el GVI (Green Vegetation Index) con fines de clasificación de terrenos o inventario de deslizamientos (Rau et al., 2011; Shi & Liu, 2015). En algunas ocasiones las técnicas basadas en VANT se combinan con otras técnicas de gran precisión como los GNSS (Lindner et al., 2015; Buša et al., 2019; Zárate et al., 2021) para la monitorización de movimientos de ladera, específicamente para determinar la dirección y la velocidad de los desplazamientos.

La región interandina del Ecuador por su configuración topográfica de índole montañosa, ha sido afectada por movimientos de ladera que inciden directa o indirectamente a la infraestructura civil provocando pérdidas económicas. Esta situación se ve reflejada en la ciudad de Loja ubicada al sur del Ecuador donde varios movimientos de ladera han afectado a asentamientos urbanos, zonas productivas y vías de comunicación. Ante ello la presente investigación se centra en analizar tres movimientos de ladera ubicados en la ciudad de Loja en los sectores de Victoria, Colinas Lojanas y El Plateado empleando técnicas GNSS y el uso de VANT para medir los desplazamientos superficiales mediante las mediciones GNSS, así como el uso de los MDE para establecer la tipología de movimiento de ladera.

## **CAPITULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS**

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Zonas de estudio

La presente investigación se basa en el análisis de tres movimientos de ladera ubicados en el entorno de la ciudad de Loja, sur del Ecuador (Figura 2), en los sectores denominados Victoria (zona 1), Colinas Lojanas (zona 2) y El Plateado (zona 3). Los dos primeros movimientos de ladera (zona 1 y 2) tienen la característica de tener una pendiente media que oscila entre  $6^\circ$  y  $7^\circ$  y el tercero (zona 3) una pendiente media de  $22^\circ$ .

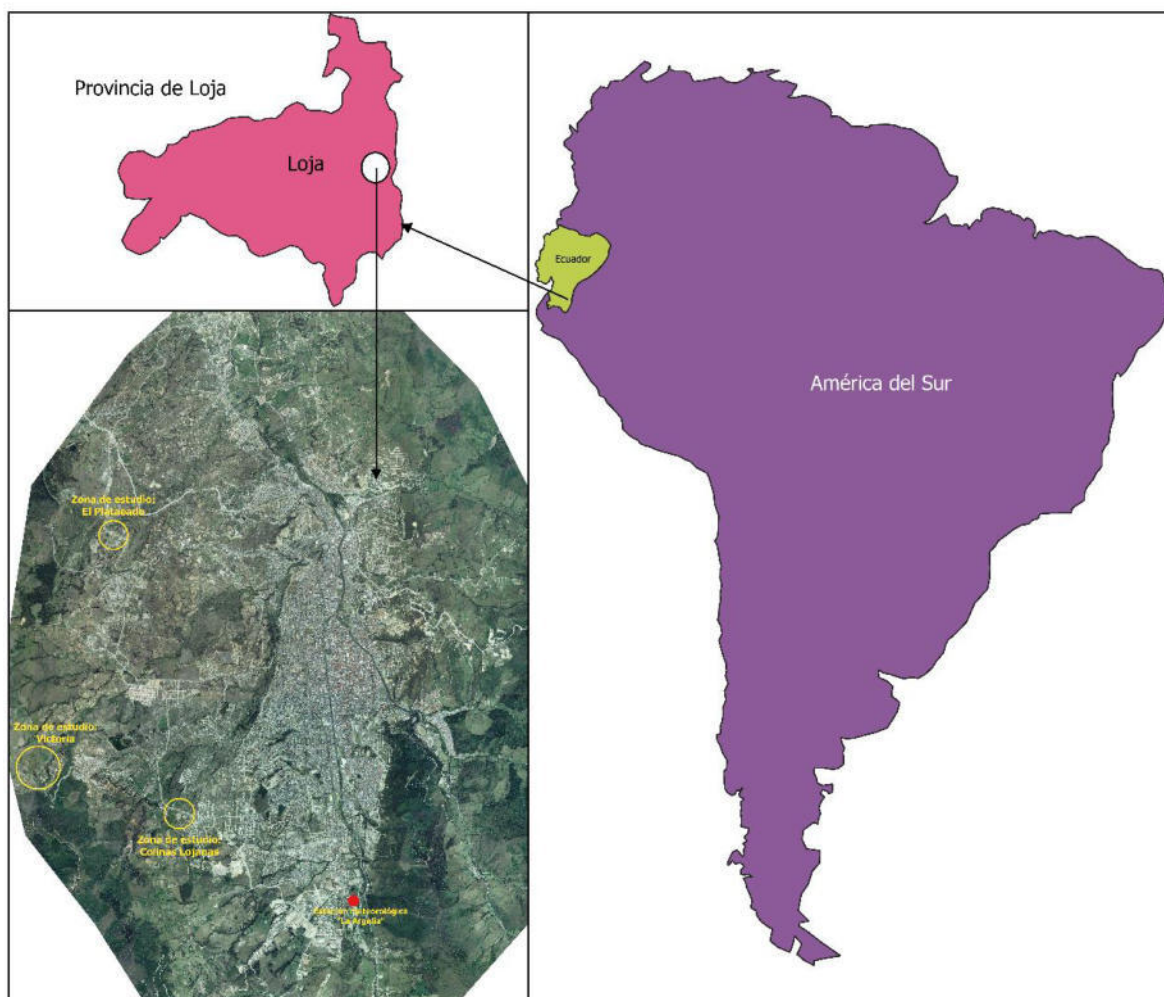


Figura 2. Mapa de ubicación de las zonas de estudio y estación meteorológica.



### **3.1.1. Clima y vegetación**

Según el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del año 2014 (Municipio de Loja, 2014) el cantón Loja tiene un tipo de clima Ecuatorial Mesotérmico Semi – Húmedo. Los factores que dan origen al clima del cantón son los factores generales que afectan a la región andina, relacionados con la latitud y el relieve; en concreto, la zona de convergencia intertropical (ZCIT), el efecto de la interacción Océano Pacífico – atmósfera (Fenómeno El Niño Oscilación del Sur y Corriente Fría de Humboldt) y la cobertura vegetal (Bendix et al. 2009; Fries et al. 2009). En la hoya de Loja se encuentran bosques de montaña bajos, pastos y cultivos. Los suelos predominantes son entisoles en la zona media y partes inferiores, e inceptisoles en la parte superior del área de estudio (MAG-PRONAREG-ORSTOM, 1984). Desde la década de 1960, la vegetación natural cerca del fondo del valle ha sido ampliamente talada para crear pastos y tierras de cultivo. Durante el año se producen dos máximos de precipitación, uno más intenso en marzo, dentro de la gran temporada de lluvias de diciembre a abril; y el otro en septiembre-octubre en la temporada más seca. Durante la temporada principal de lluvias, a menudo se producen precipitaciones de alta intensidad debido a las tormentas eléctricas pasando por los valles interandinos. La temperatura media anual oscila entre 15.3 °C en el fondo de los valles a 7.3°C en las crestas de montaña.

La variación de la precipitación media mensual en la hoya de Loja se muestra en la Figura 3 donde se puede apreciar la variación temporal de la precipitación mensual acumulada. Los registros pluviométricos corresponden a la estación meteorológica más próxima a las zonas de trabajo que es la de La Argelia, ubicada en la ciudad de Loja, en el barrio del mismo nombre al sur de la ciudad (Figura 2), y que pertenece al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). En ella se registra una precipitación media anual de 998 mm (Ochoa-Cueva et al., 2013).

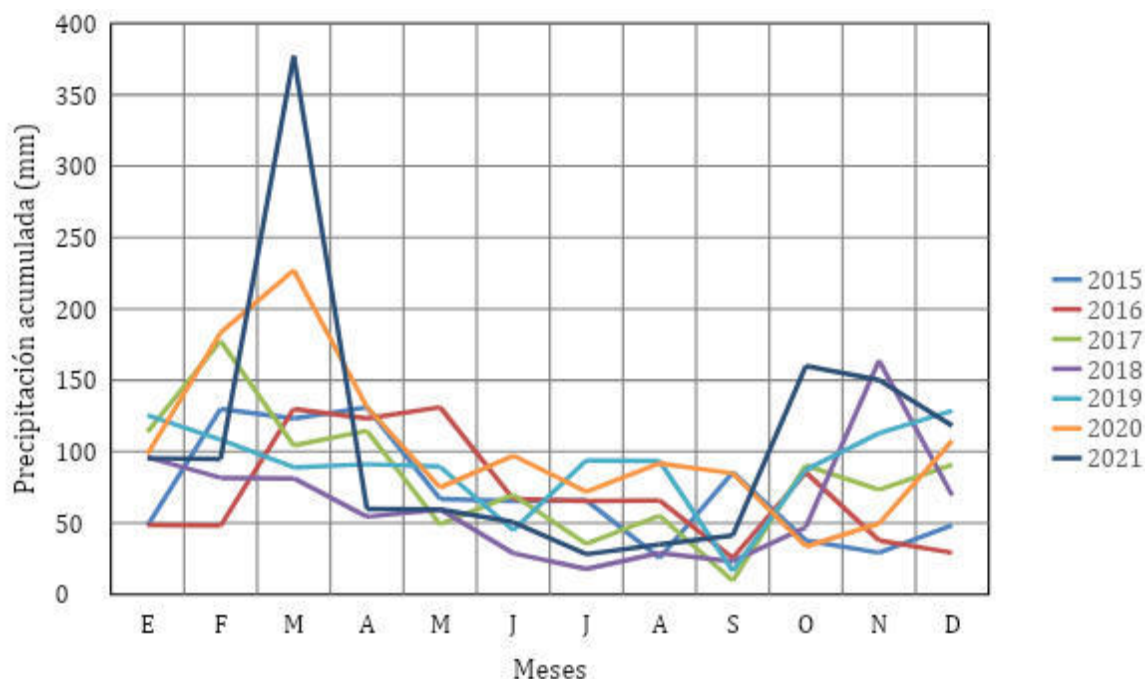


Figura 3. Precipitación mensual de la estación meteorológica La Argelia.

La vegetación de la hoya de Loja se halla representada por dos tipos de vegetación: bosque de montaña en cerros, colinas y nudos tales como alisos, pinos, eucalipto y romerillos; y el otro tipo de vegetación en valles y llanuras donde se destacan cultivos de hortalizas, cereales, plantas frutales y ornamentales.

### 3.1.2. Hidrografía

La hoya de Loja tiene un sistema hidrográfico de tipo dendrítico que es drenado por los ríos Zamora y Malacatos que fluyen hacia el norte y con gradientes de 3° a 6°. La red secundaria la conforman los ríos Jipiro, San Cayetano y Zamora Huayco. Estos cauces desembocan en la cuenca amazónica para llegar finalmente al océano Atlántico.

### 3.1.3. Uso del Suelo

La hoya de Loja está ocupada principalmente por pastizales (51.8%), la zona urbana (21.7%), cultivos (8.7%), matorrales (7.8%), plantaciones de eucalipto (6.6%), plantaciones de pino

(1.7%), bosques de neblina (1.5%) y lagunas (0.1%). En la Figura 4 se muestra el mapa de uso del suelo agrupado por categorías (Soto, 2018).

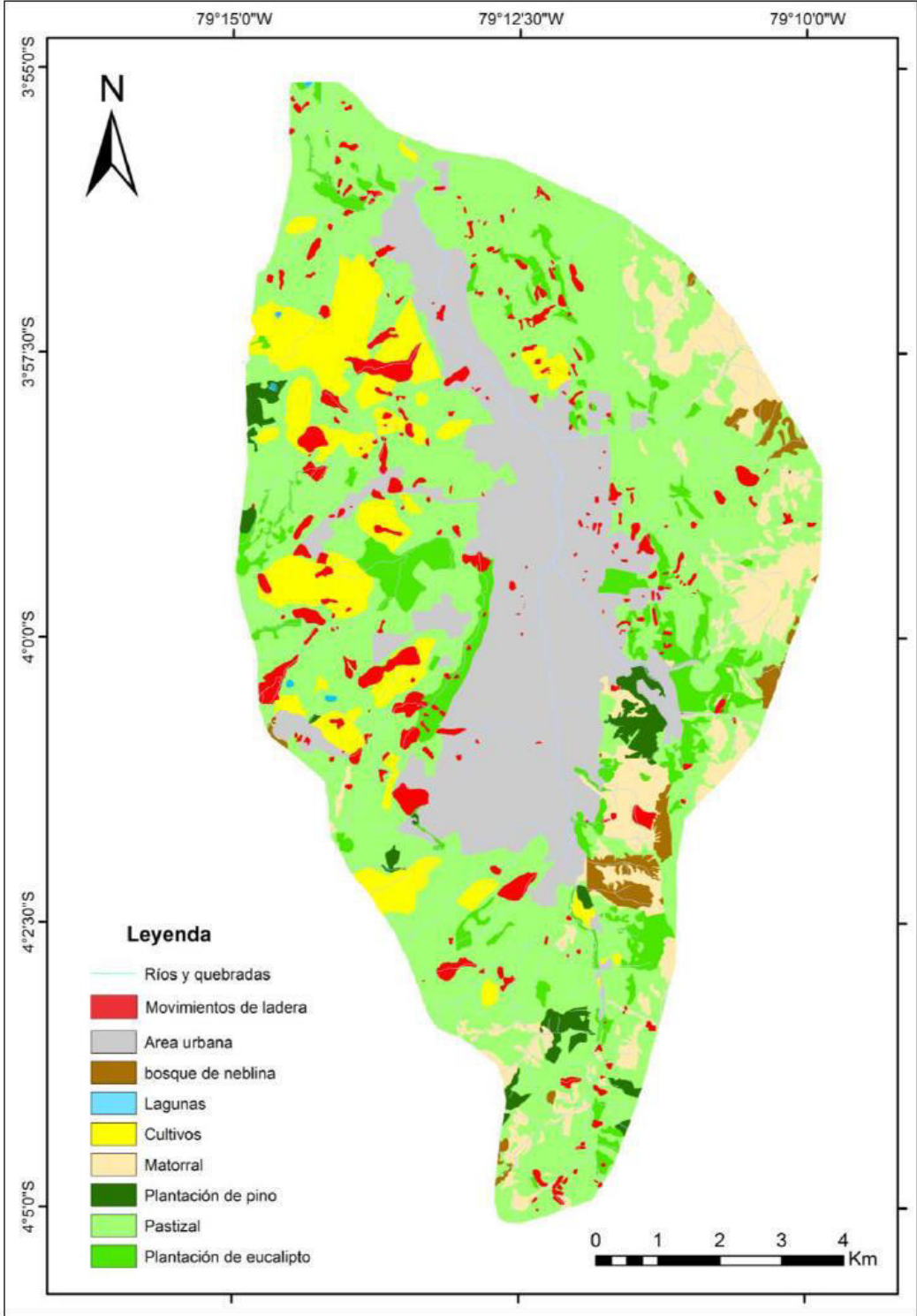


Figura 4. Mapa de uso de suelo de la hoya de Loja. Tomado de Soto, 2018.

### **3.1.4. Ámbito socioeconómico**

El cantón Loja se compone de 13 parroquias rurales (Chantaco, Chuquiribamba, El Cisne, Gualiel, Jimbilla, Malacatos, Quinara, San Pedro de Vilcabamba, San Lucas, Santiago, Taquil, Vilcabamba y Yangana) y 6 parroquias urbanas (El Sagrario, San Sebastián, Sucre, El Valle, Punzara y Carigán). Tiene un área aproximada de 1928 km<sup>2</sup> y una población de 203496 habitantes, según el censo poblacional de 2022. Las actividades que realiza la población son comercio, agricultura, construcción, enseñanza entre las principales.

### **3.1.5. Contexto geológico**

La cuenca de Loja corresponde a las cuencas neógenas del sur del Ecuador y es una cuenca sedimentaria de origen lacustre de edad miocénica pliocénica con un espesor de alrededor de 1200 m (Tamay el at., 2016), que se dispone sobre un basamento de rocas metamórficas de tipo cuarcitas de grano fino a medio, filitas negras, pizarras y esquistos de edad paleozoica, que corresponde a la Unidad Chiguinda.

Según Hungerbühler et al. (2002) las diferentes litologías que constituyen la secuencia sedimentaria de edad Mioceno comienzan con unas areniscas de grano grueso con láminas finas de conglomerados y capas menores de limolita agrupadas en la formación Trigal, de origen fluvial, que afloran al noroeste. Sobre ellas, también en el noroeste, afloran calizas masivas con láminas finas de lutitas carbonatadas, capas de cherts y areniscas amarillas de un granulado fino de la formación La Banda, de origen lacustre. A continuación, ocupando un mayor área al oeste, se presentan capas de areniscas gruesas y finas con lentes interstratificadas de conglomerados y en menor cantidad capas de lutitas que constituyen la formación Belén, de ambiente mixto fluvio-deltaico. Más al este afloran areniscas de grano fino, lutitas calcáreas y silíceas, diatomitas, carbón tipo lignito e intercalaciones de conglomerados que corresponden a la

formación San Cayetano, de origen lacustre. Por su parte, los conglomerados con soporte de clastos y lentes de areniscas de la formación Quillollaco, de tipo ambiente abanico aluvial, están presentes en un sector muy amplio al este y suroeste de la zona (Soto, 2018). Adicionalmente, de forma muy dispersa al NW, afloran tobas líticas fuertemente alteradas y transformadas en caolinita de la formación Salapa, con origen piroclástico (volcánico). Finalmente, sobre toda esta secuencia miocena se depositan materiales coluviales y aluviales del Cuaternario.

#### **3.1.5.1. Zona de Victoria**

El sector Victoria se encuentra en la formación Belén (Mioceno medio) y litológicamente consiste en capas de areniscas desde gruesas a delgadas, con lentes de conglomerado y en menor cantidad capas de lutitas en las cuales se ha depositado material tipo coluvial (Figura 5a). El ambiente de formación es mixto fluvio-deltaico (Hungerbühler et al., 2002). El área del movimiento de ladera está dominada por arenas y arcillas causadas por la meteorización de litologías preexistentes. El suelo está altamente saturado por tratarse de una zona agrícola sometida a riego continuo, sumado a ello los efectos de las lluvias. La cubierta vegetal que predomina en la zona es pastos con arbustos aislados ocasionales. Los tipos de cobertura existentes sobre el deslizamiento incluyen áreas de derrumbes, caminos, edificaciones y suelo desnudo.

#### **3.1.5.2. Zona de Colinas Lojanas**

El sector Colinas Lojanas se halla sobre la formación Quillollaco (Mioceno superior) en la cual existen cuatro litologías: conglomerados, arcillas, arenas y limolitas. Los conglomerados son las rocas predominantes en la formación Quillollaco que afloran en taludes naturales como antrópicos (Figura 5b). Este conglomerado presenta clastos subredondeados principalmente cuarzo con tamaño de hasta 15 cm cementados en una matriz areno limosa, su coloración es

café amarillento a gris clara. La cobertura vegetal que cubre la zona de estudio está constituida principalmente por pastizales; sin embargo, por acción antrópica en ciertos lugares de la ladera, la cobertura vegetal ha sido removida dejando expuesto el suelo.

### **3.1.5.3. Zona de El Plateado**

La zona de estudio se encuentra ubicada en el sector El Plateado en la vía lateral de paso ubicada al oeste de la ciudad de Loja (Provincia de Loja – Ecuador) y cubre un área de 5.4 ha. Geológicamente la zona de estudio se halla sobre la formación Trigal (Mioceno medio) (Figura 5c) que aflora únicamente al oeste de la cuenca y es una arcilla café homogénea y laminada finamente y contiene algunas vetas de yeso; así mismo está compuesto de areniscas de grano grueso con láminas finas de conglomerado y capas menores de limolitas. Las areniscas muestran estratificación horizontal, pero con planos estratificados cruzados. Las zonas circundantes del movimiento de ladera están compuestas por pastizales y por cultivos especialmente de maíz; en el cuerpo de la ladera la vegetación es escasa, lo que es debido a la misma acción dinámica del suelo que impide el crecimiento de la vegetación.

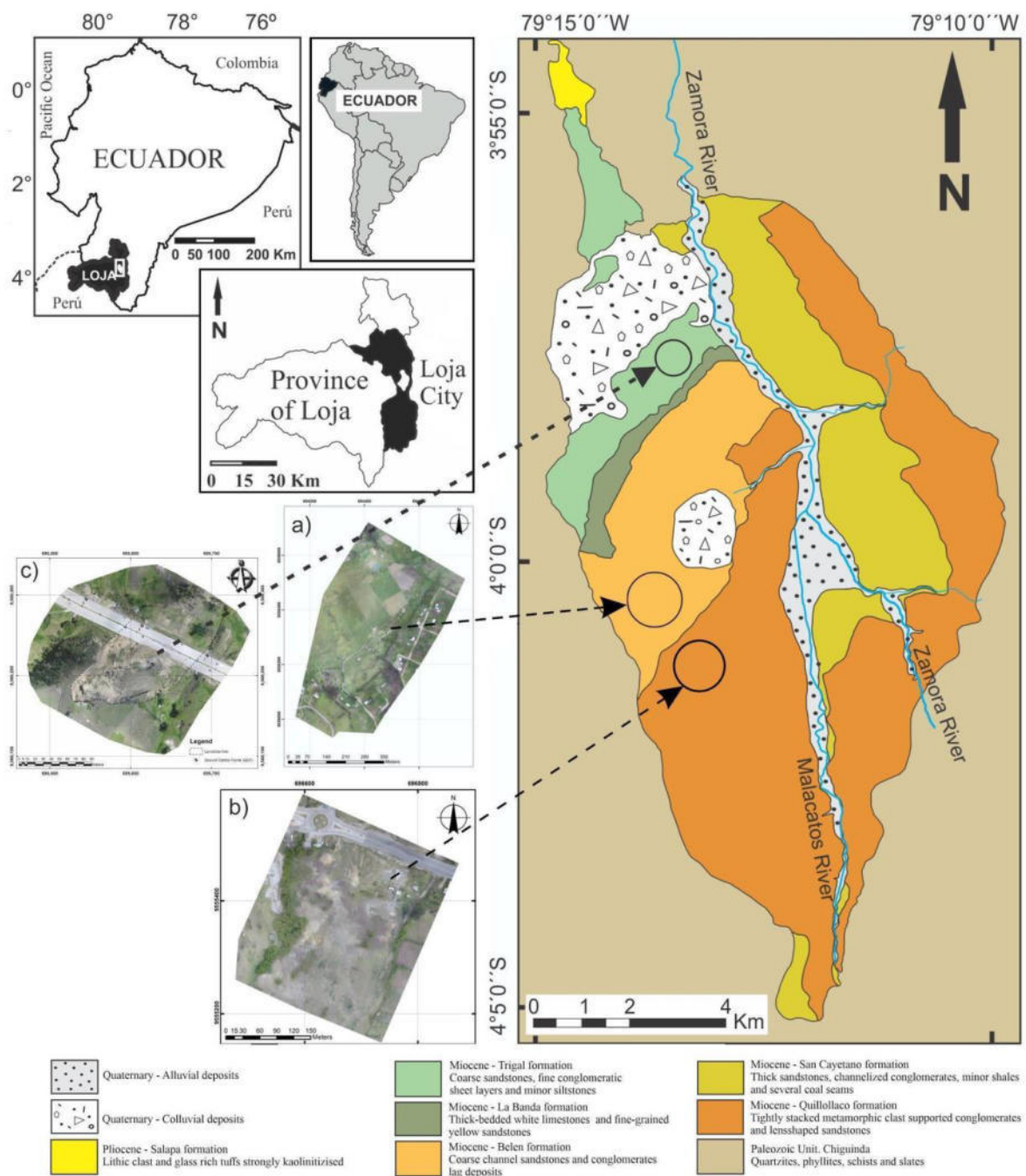


Figura 5. Localización y encuadre geológico de la zona de estudio de Victoria a); Colinas Lojanas b) y El Plateado c)

### **3.1.6. Geomorfología y evidencias de movimientos de ladera**

La cuenca de Loja corresponde a una zona montañosa donde la cordillera oriental de Los Andes flanquea el valle hacia el este, donde aparecen picos que alcanzan más de 3200 m.s.n m., así como valles abruptos y estrechos. Hacia el oeste la hoya de Loja está delimitada por el cerro Villonaco cuya altitud es de 2667 m.s.n.m, que forman parte del sistema montañoso real de los Andes. Las cordilleras mencionadas están formadas por rocas metamórficas paleozoicas derivadas de procesos orogénicos. El fondo de la cuenca tiene una altitud de 2100 m.s.n.m., siendo su longitud de unos 15 km y su anchura de 7 km aproximadamente.

En el trabajo desarrollado por Cueva (2015), en la hoya de Loja se realizó una clasificación de 16 unidades geomorfológicas considerando la forma del relieve. En la Figura 6 se muestra un mapa geomorfológico de la hoya de Loja.



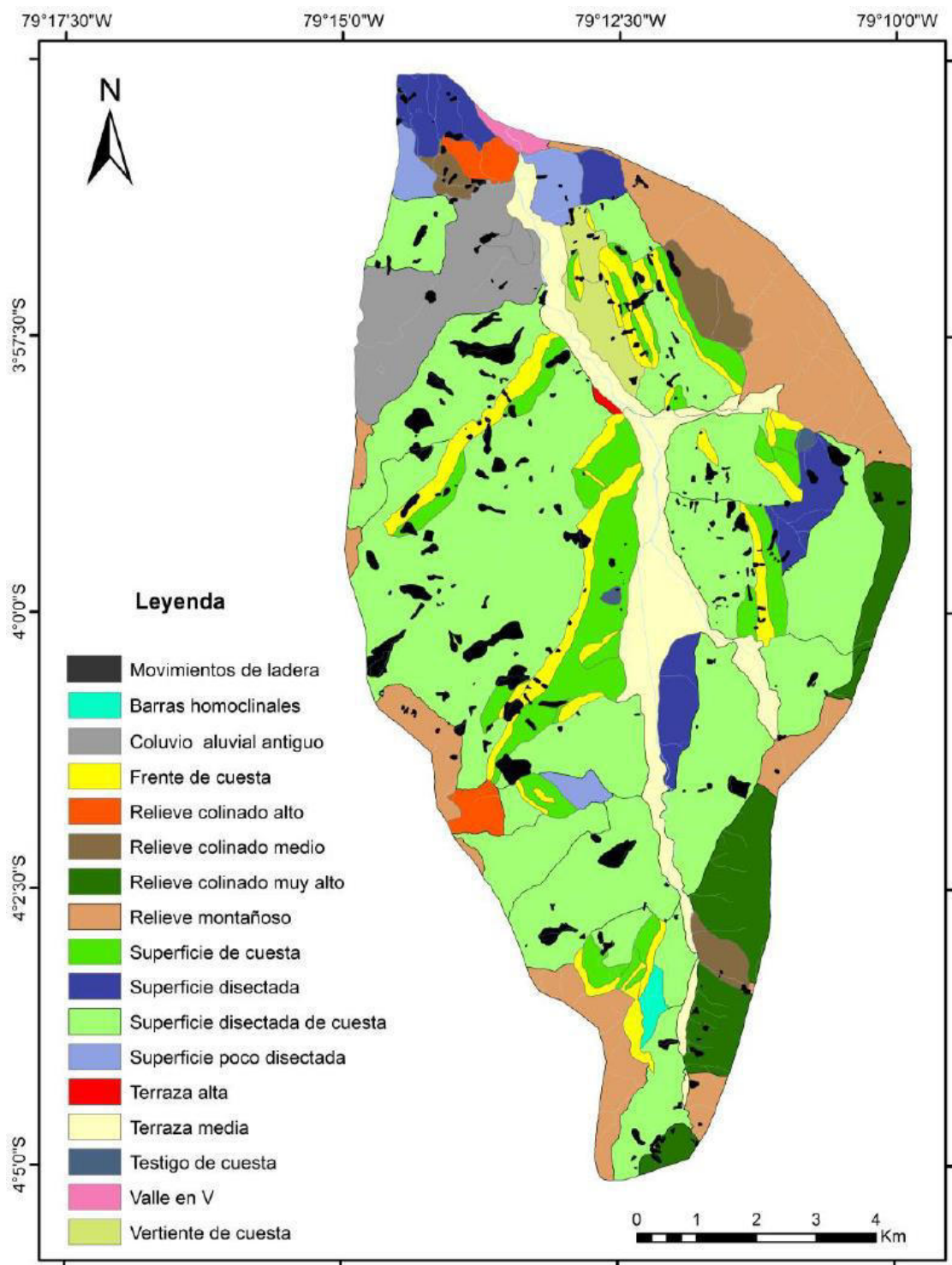


Figura 6. Mapa geomorfológico de la hoya de Loja. Tomado de Soto, 2018.

Más específicamente hablando de movimientos de ladera, en el Ecuador se han inventariado alrededor de 3518 movimientos de ladera, siendo un 93.4% de ellos deslizamientos. Según el Instituto de Investigaciones Geológico Mineras y Metalúrgicos el 80% de los movimientos de ladera se concentran en la región sierra (interandina) y se producen en mayor medida en los meses más húmedos como son enero, febrero, marzo y abril. La provincia de Loja tiene el mayor porcentaje de movimientos de ladera con un 24% seguido de Cañar (16%), Azuay (11%), Chimborazo (10%) e Imbabura (9%). El 20% restante se localiza en la región Costa y Oriente.

En el trabajo desarrollado por Soto, 2018 se efectuó un inventario de movimientos de ladera en la hoya de Loja para lo cual se emplearon técnicas clásicas de fotointerpretación y trabajo de campo, logrando inventariar 292 movimientos de ladera correspondiente a un área movida de 417.8 ha. Según su tipología se pudieron catalogar reptaciones (55.7%) que corresponden a un área de 232.7 ha, flujos (38.8%) con un área de 162.1 ha y en menor porcentaje deslizamientos rotacionales (1%) equivalente a 4.2 ha y deslizamientos traslacionales con un 4.5% (18.8 ha).

En la Figura 7 se muestra la distribución espacial de los movimientos de ladera por tipología en la hoya de Loja.

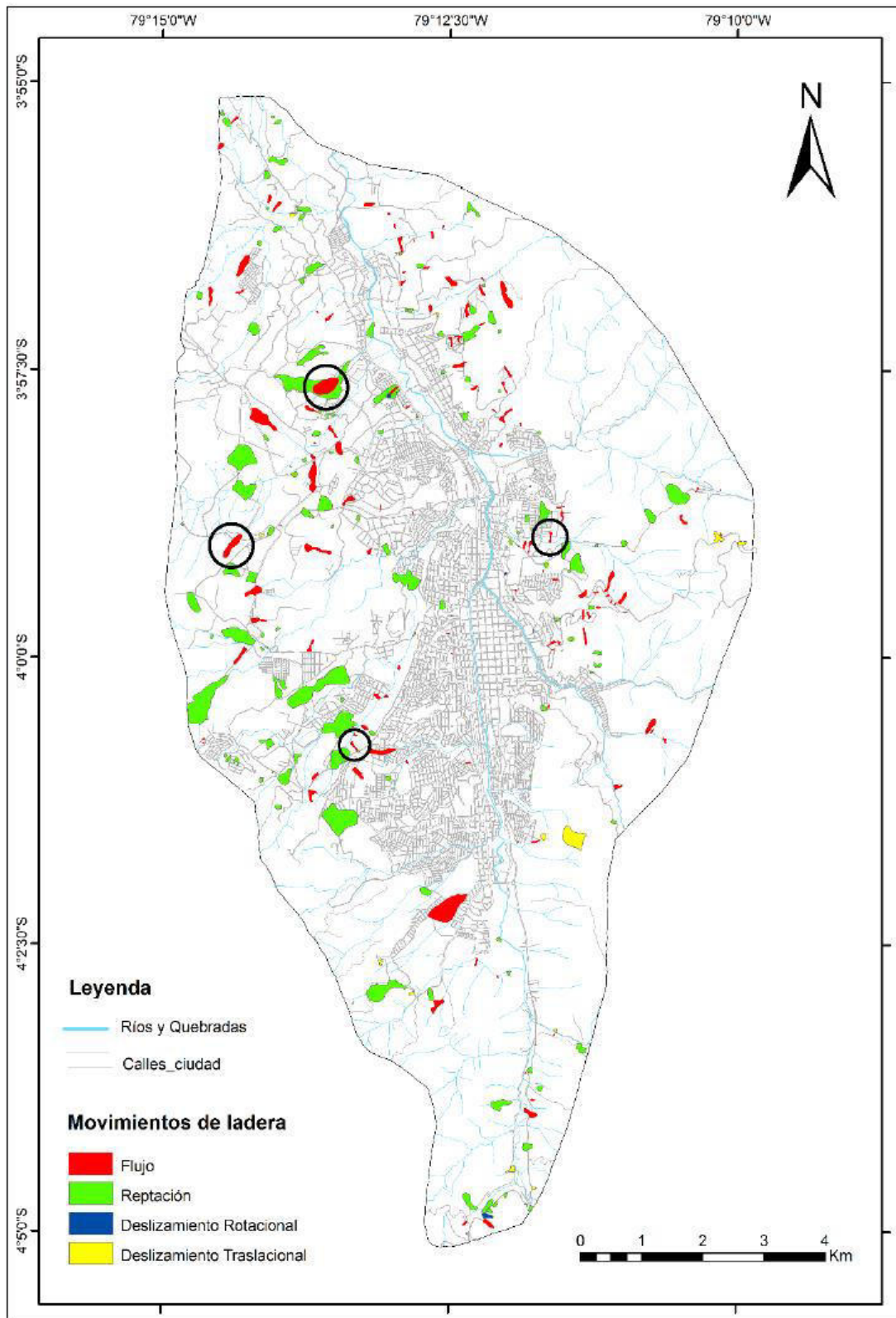


Figura 7. Ubicación espacial de movimientos de ladera en la hoya de Loja. Tomado de Soto, 2018.



### **3.1.6.1. Zona de Victoria**

La Figura 8 muestra imágenes de la superficie de la zona inestable en Victoria, que forma parte en realidad de un área más amplia tal como está identificada en los inventarios previos (Soto, 2018). La superficie de la zona inestable observada es de 216800 m<sup>2</sup> (21,68 ha), con altitudes que varían entre 2350 m y 2462 m de elevación, proporcionando un desnivel de 112 m; su longitud es de al menos 730 m y el ancho máximo de 380 m, con una pendiente media de 15.5°, orientada preferentemente al NE.

Lo más destacado son las numerosas e importantes grietas de tensión de varios metros de longitud, con anchos de 0.20 m y profundidad sobre los 0.50 m, que evidencian la actividad en la parte superior de la ladera estudiada, especialmente bajo la carretera que discurre por esta zona (Figura 8a); sin embargo, en esta no se aprecian evidencias claras, salvo en la parte más al este, hacia la vaguada; además se observan algunos escarpes por encima de la carretera que cierran la zona de inestabilidad por el sur. La actividad de esta zona superior se evidencia más hacia abajo en la ladera, junto a las edificaciones y en el entorno del camino que atraviesa la parte central de la zona, donde además de las grietas (Figura 8b), se aprecia un escarpe activo que se considera como el escarpe principal. Este escarpe junto a otros escarpes traseros y laterales delimitan el sector más activo por el sur y el oeste, en el que, no obstante, no llegan a arruinarse completamente las construcciones; mientras que por el este lo hace el arroyo o vaguada que desciende con dirección NNE; hacia el norte la actividad parece disminuir y no se aprecian apenas evidencias, aunque no se descarta una cierta reptación superficial. Otras zonas activas se aprecian hacia el noroeste, donde se observan algunas grietas e incluso algunos escarpes (Figura 8c); o en las inmediaciones del arroyo, en las laderas a ambos lados del mismo donde localmente se producen grietas y escarpes.

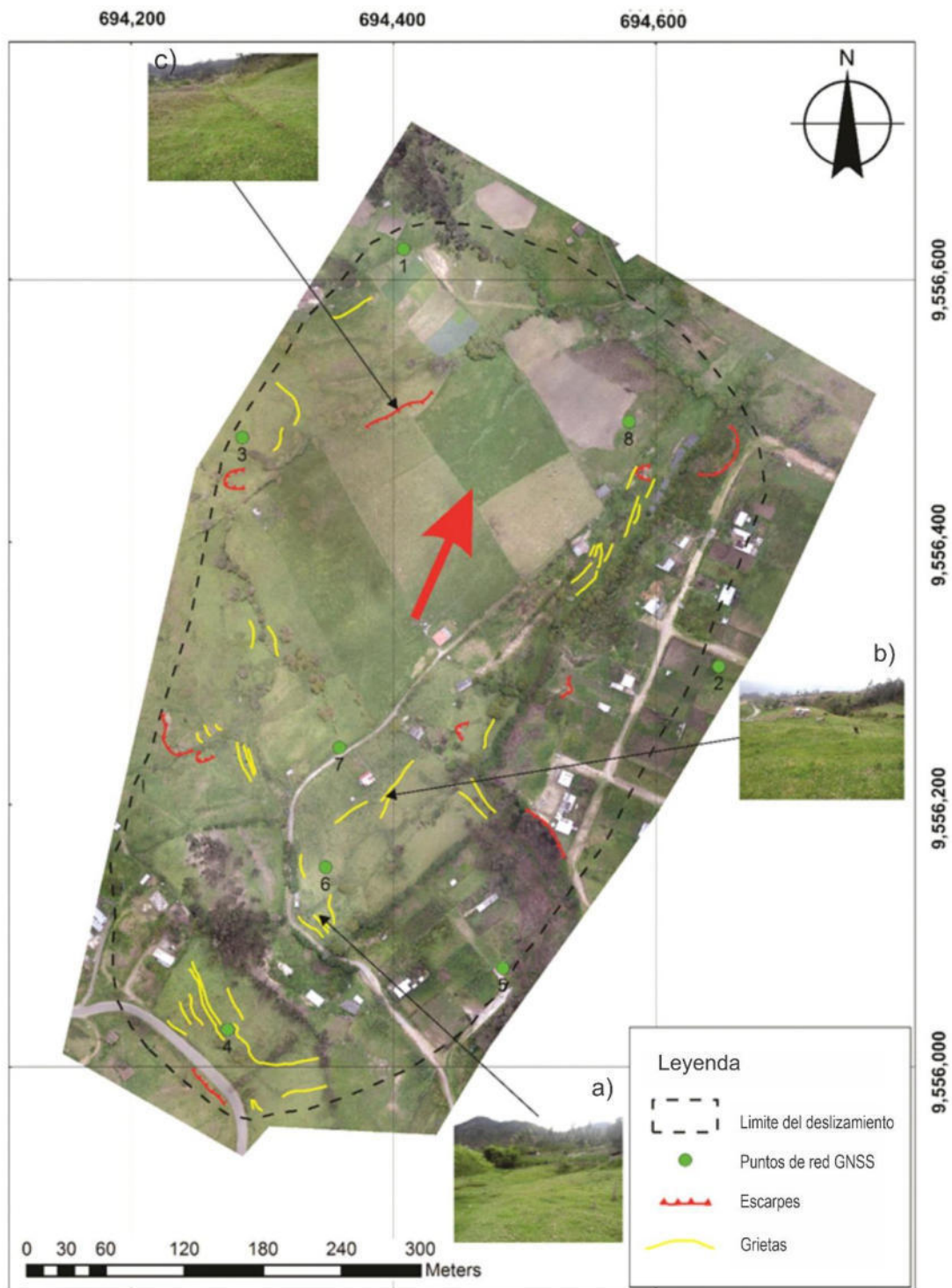


Figura 8. Evidencia geomorfológica en el sector Victoria. Se aprecia la existencia de grietas a lo largo del cuerpo de la ladera que concuerdan con la evidencia fotográfica anexa (febrero 2016). a) y b) presencia de grietas; c) escarpe en flanco izquierdo.

### **3.1.6.2. Zona de Colinas Lojanas**

En la Figura 9 se muestra la evidencia superficial de la actividad del movimiento de ladera identificado en esta segunda zona de trabajo, de tipo flujo de tierras y grado de desarrollo incipiente, como ya aparece en los trabajos previos de inventario (Soto, 2018). Sin embargo, las evidencias encontradas en este estudio extienden la zona de inestabilidad ladera arriba, posiblemente como un área amplia de inestabilidad con emisiones más o menos frecuentes de flujos, como el que nos ocupa. El área más activa del movimiento de tipo flujo estudiado cubre un área de 31300 m<sup>2</sup> activa, con altitudes entre 2306 m y 2345 m (39 m de desnivel); extendiéndose el total del área inestable por más de 65000 m<sup>2</sup>; su longitud y ancho máximo es de 300 m y 180 m, respectivamente, con una pendiente media de 10.5° y orientación norte.

El flujo desarrolla un pie activo, con abundantes grietas y escarpes secundarios (Figura 9a), especialmente en el flanco derecho al oeste (Figura 9b), que ocupa parcialmente la carretera que discurre bajo la zona inestable (Figura 9c); en este sentido la carretera ha tenido que ser sometida a obras de retirada de material y rehabilitación.



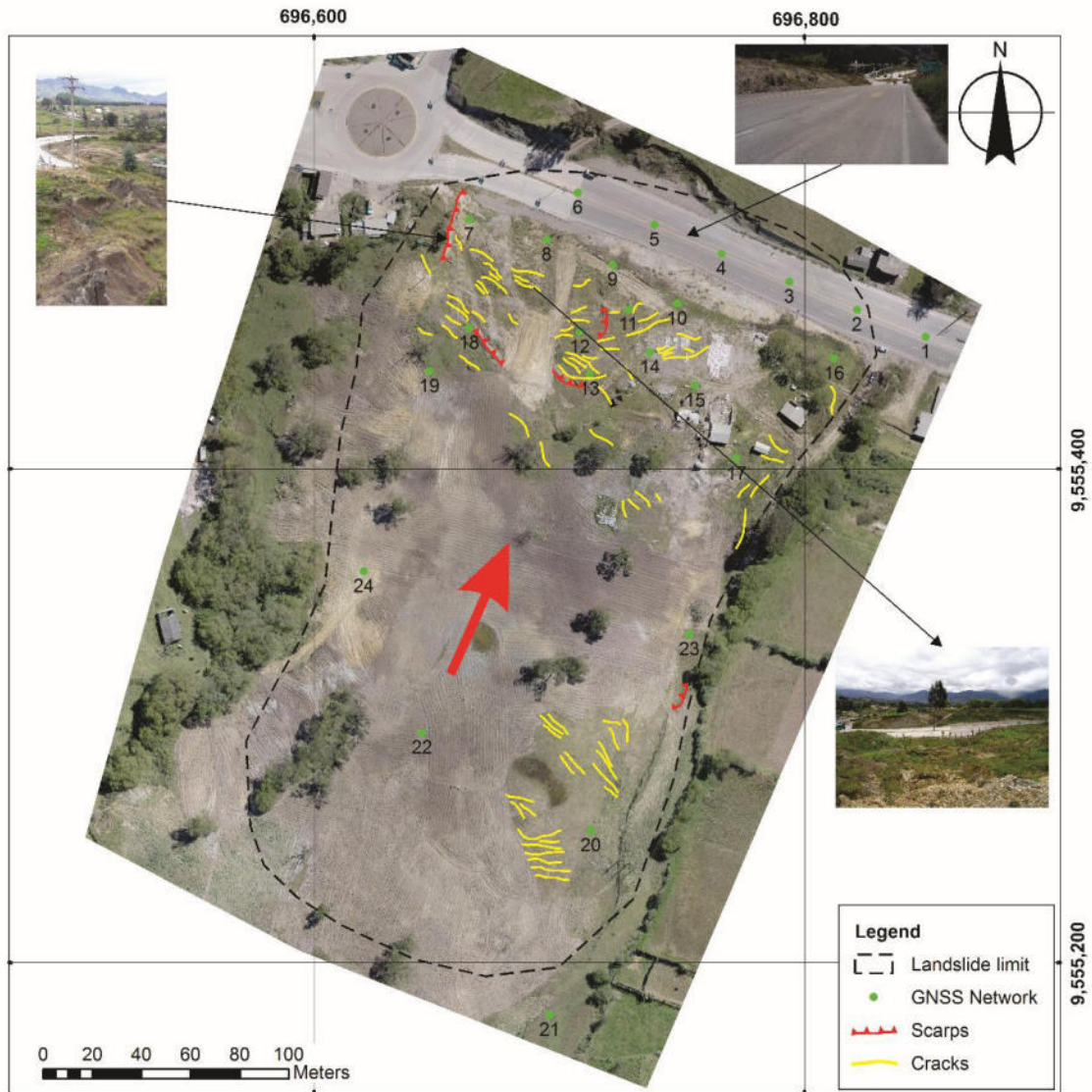


Figura 9. Evidencia geomorfológica en el sector Colinas Lojanas (julio 2016). Se aprecia la existencia de grietas distribuidas dentro del cuerpo de la ladera, así como los principales escarpes.

El deslizamiento está caracterizado por numerosas grietas y escarpes que se presentan en el cuerpo y pie de la ladera, así como en el sector SE (Figura 10 a). Más específicamente se observa un escarpe-flanco lateral en el lado izquierdo (al este) y un escarpe trasero no muy pronunciado que cierra la parte más activa del movimiento de flujo por el sur. Bajo este escarpe se observan abundantes grietas en la zona cultivada (Figura 10 c), que más abajo se van



acentuando, lo que indica una mayor actividad hacia la parte baja de la ladera (norte)(Figura 10 d), que ocasiona la ruina de algunas construcciones y edificaciones (Figura 10 b).

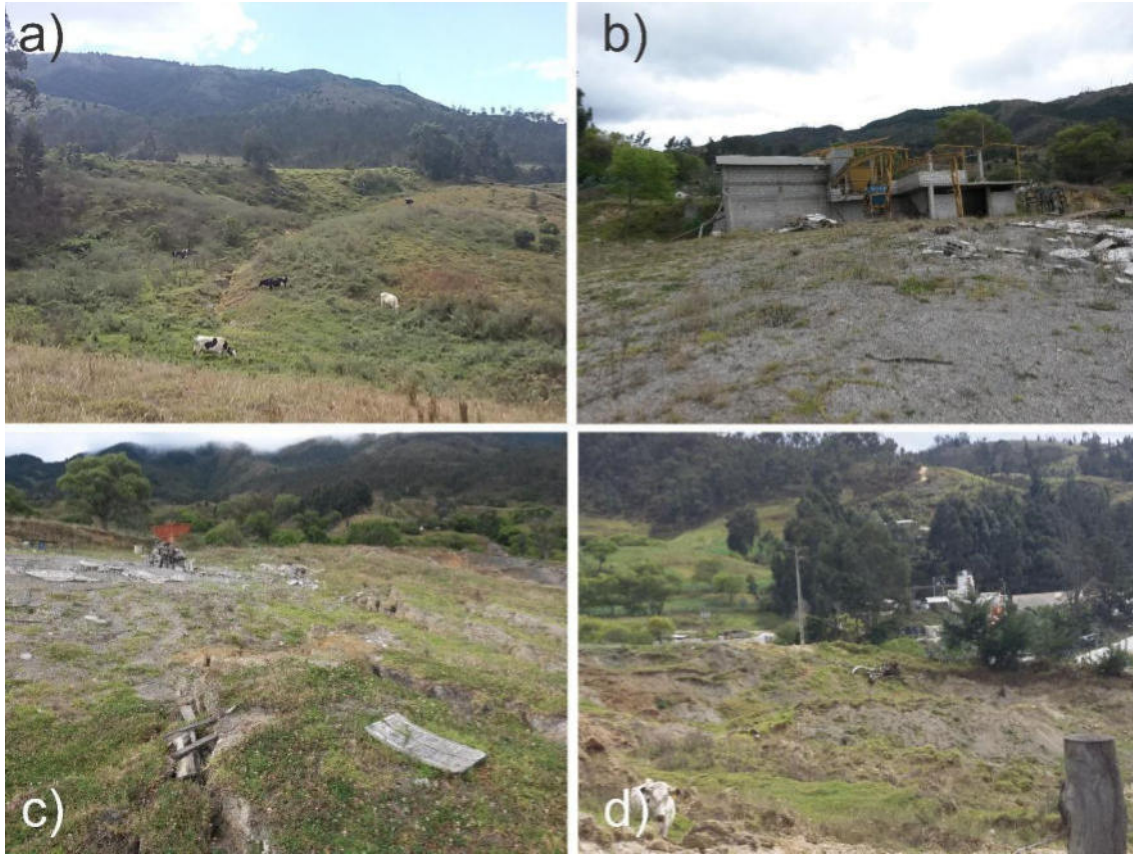


Figura 10. Evidencia de la actividad superficial en la zona de Colinas Lojanas. Fuente: el autor.

### 3.1.6.3. Zona de El Plateado

El movimiento principal que se observa en la zona es de tipo flujo de tierras, con una morfología bastante típica; el grado de desarrollo es avanzado, contando con un escarpe muy acusado, así como de un cuerpo y un pie bien diferenciados, e incluyendo además algún lóbulo secundario. El movimiento cubre un área de 8450 m<sup>2</sup>, con un rango de altitudes entre 2178 y 2214 m (36 m); la longitud es de unos 145 m y la anchura media de 105 m, siendo la pendiente media de 24,1° y la orientación general entre el N y el E. Además de este movimiento principal, situado por encima de la carretera, se observa otro bastante destacado bajo la misma (al sur), de un área

de unos 2900 m<sup>2</sup>, y otros de menor extensión en relación con los barrancos que discurren lateralmente de norte a sur.

Como consecuencia del desarrollo y avance del movimiento de tipo flujo, se produce la formación de un importante escarpe (de unos 3 m) a favor de materiales más competentes (conglomerados y arenas cementadas), que cierra el movimiento por el sur (escarpe principal, lateral y flanco derecho, Figura 11c) y el oeste (escarpe principal y flanco izquierdo). La formación de este escarpe provocó el colapso de una vivienda (Figura 11a) sin registrar pérdidas de vidas humanas, aunque sí se observan grietas de tracción ladera arriba. Esta elevada actividad del movimiento, con desplazamientos importantes de la masa, se hace muy evidente por la formación de escarpes secundarios a favor y en contra de la pendiente, tanto en la cabecera como en el cuerpo del movimiento, y de numerosas grietas y lobulaciones (Figura 11b). El movimiento termina formando un pie igualmente bien desarrollado, con una masa de una cierta altura en su punta que invade la carretera de forma importante (Figura 11d); en este pie se forman grietas tanto longitudinales como transversales. Los otros movimientos secundarios, especialmente el situado bajo la carretera, también presentan escarpes, cuerpos y pies diferenciados, aunque en este caso no tan desarrollados como en el movimiento principal; en relación con ellos también se producen grietas y escalones en el terreno.

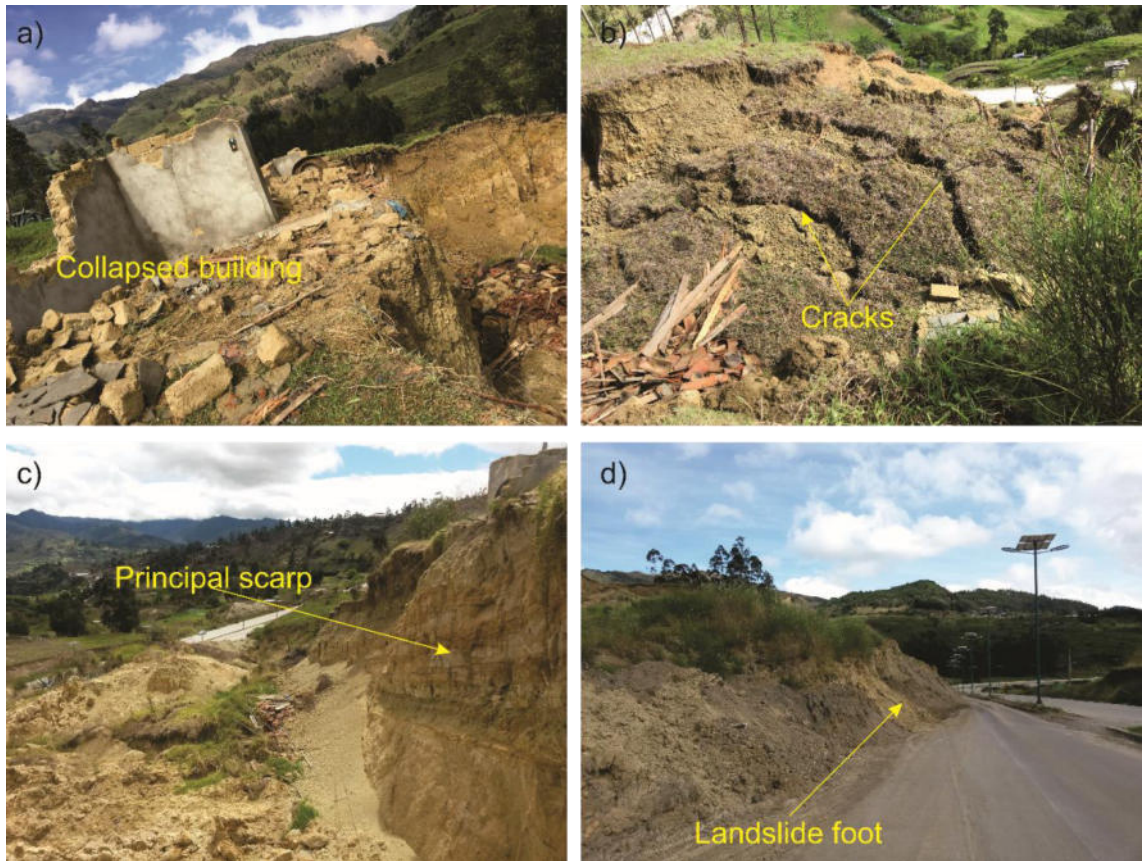


Figura 11. a) Colapso de viviendas por actividad del movimiento de ladera; b) Presencia de grietas en el cuerpo de la ladera; c) Vista del escarpe principal en el flanco sur de la ladera; d) Zona de acumulación en el pie de la ladera.

## **3.2. Materiales**

Los materiales empleados en este trabajo corresponden con la instrumentación para la captura de datos, receptores GNSS y vehículo aéreo no tripulado dotado con la correspondiente cámara, el software para el procesamiento y análisis de datos, y el instrumental para la realización de ensayos geotécnicos.

### **3.2.1. Instrumental GNSS**

Las coordenadas fueron medidas mediante técnicas de GNSS diferencial empleando un receptor marca Trimble, modelo R6. Se trata de un receptor GNSS fabricado por Trimble Navigation Limited con 220 canales y puede recibir las siguientes señales de satélites: GPS: L1C/A, L2E, L2E, GLONASS: L1C/A, L1P, L2C/A (sólo GLONASS M), L2P y SBAS: L1C/A. Para levantamientos GNSS Static y Fast Static posee las siguientes precisiones: horizontal:  $3 \text{ mm} \pm 1 \text{ ppm}$  (parte por millón) y en vertical:  $3.5 \text{ mm} \pm 0.4 \text{ ppm}$ .

### **3.2.2. Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) y sensores**

Un Phantom 2 de DJI (Figura 12 a) fue empleado como VANT provisto de las siguientes características: alcance máximo horizontal de 1000 m, velocidad horizontal máxima 12 m/s, velocidad de ascenso 6 m/s y de descenso 2 m/s, peso neto incluyendo la batería 1 kg, precisión de desplazamiento horizontal 2.50 m y vertical de 0.80 m, ángulo y temperatura de operación de  $-10 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Un resumen de estas características se muestra en la Tabla 6:

Tabla 6. Resumen de las principales características del VANT empleado en el presente trabajo.

<b>Descripción</b>	<b>Característica</b>
Alcance máximo horizontal	1000 m
Velocidad máxima horizontal	12 m/s
Velocidad de ascenso	6 m/s
Velocidad de descenso	2 m/s
Peso neto (incluye batería)	1 kg
Precisión horizontal (m)	2.5 m
Precisión vertical (m)	0.8 m
Ángulo de paso máximo	35°
Temperatura de operación	-10 °C a 50 °C

En su parte ventral posee un cardán Zenmuse H3-3D de aleación de aluminio que permite mantener la cámara en una posición fija respecto a tres ejes, gracias a su unidad de medición inercial (por sus siglas en inglés IMU). El cardan tiene un peso (sin cámara incluida) de 22 g y es compatible con cámaras GoPro y MAPIR; la energía que alimenta a la unidad es suministrada por la batería inteligente DJI del Phantom 2. El tiempo de vuelo es de 25 minutos.

Para el vuelo autónomo del VANT se empleó el sistema 2.4 GHz Datalink DJI (Figura 12 b) que permite la conexión entre la base terrena y el sistema aire mediante el empleo de módulos bidireccionales de comunicación de datos. Este sistema permite la carga de la planificación del vuelo en el VANT vía Bluetooth para su posterior ejecución.

Para la adecuada orientación de los bloques de imágenes obtenidas, en la fase procesamiento con el software, se colocaron sobre los puntos de control marcas plásticas de 1.00 m x 1.00 m (Figura 12 c). En el centro y extremos de la marca se instalaron aros metálicos que permiten el centrado sobre el punto de la red y la fijación en el terreno mediante ganchos metálicos.



Para la adquisición de imágenes se empleó una cámara digital GoPro 3+ Silver Edition de 10 Megapíxeles, distancia focal: 2.77 mm, tamaño de pixel: 1.59 x 1.59  $\mu\text{m}$  y resolución de 2624 x 1968 px. La cámara fue ajustada para capturar las imágenes a un intervalo constante de 2 s. En la zona de El Plateado se ha empleado una cámara MAPIR de 16 megapíxeles y una distancia focal de 2.8 mm. En la Tabla 7 se muestra un resumen de las principales características de las cámaras empleadas en el presente trabajo.

Tabla 7. Principales especificaciones técnicas de las cámaras empleadas.

Descripción	GoPro 3+ Silver Edition	MAPIR 2
Resolución de la imagen	10 megapíxeles	16 megapíxeles
Formato de la imagen	RAW+JPG	RAW+JPG, JPG
Tiempo de captura automático	0.5, 2, 5, 10, 30 y 60 s	2, 5, 10, 30 y 60 s

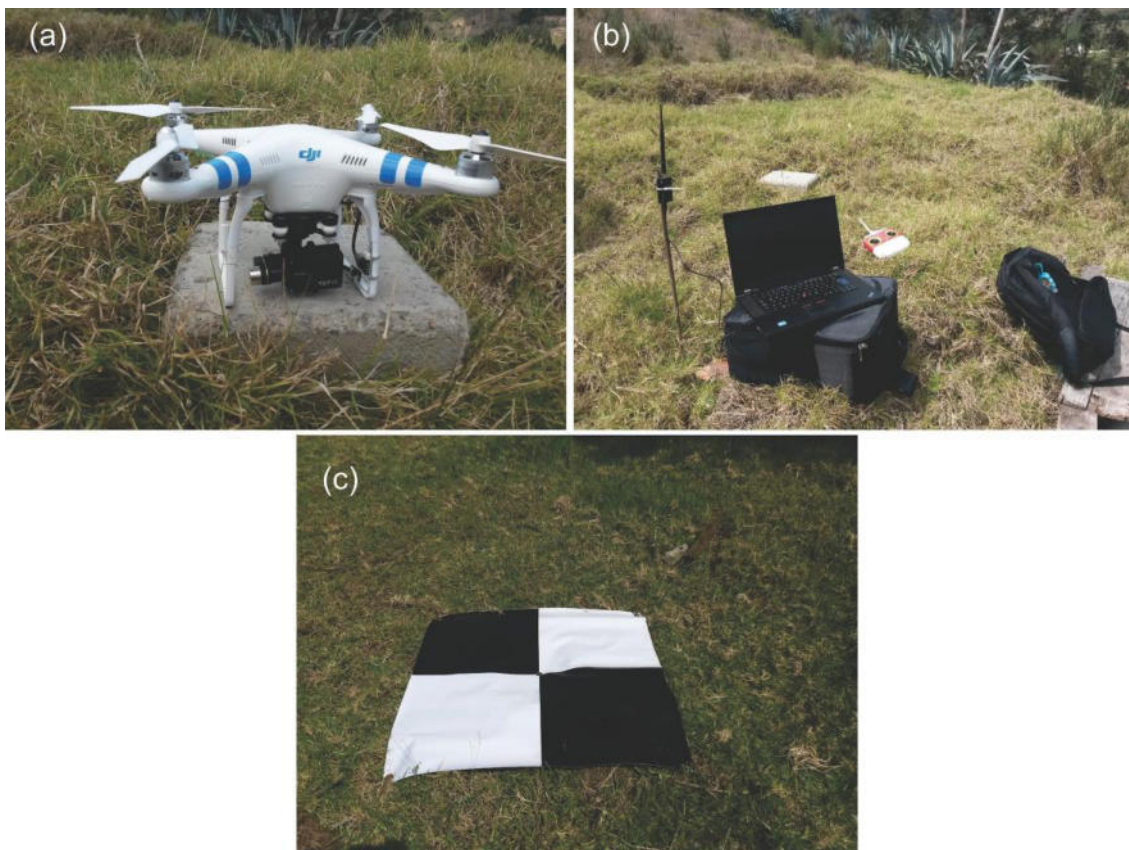


Figura 12. a) VANT Phantom 2 provisto de cámara ventral; b) sistema de control en tierra del VANT datalink DJI, y c) marcas identificadoras de GCP colocadas en el terreno.

### **3.2.3. Software utilizado**

Para el postproceso de los datos GNSS se empleó el software Trimble Business Centre V 2.6. Es un software de procesamiento de datos topográficos y geoespaciales desarrollado por Trimble. Este software se utiliza comúnmente en la industria de la topografía y la construcción para procesar datos recopilados por equipos de medición, como estaciones totales y receptores GNSS (Sistemas de Navegación Global por Satélite). Dentro de las principales funcionalidades del software se hallan: procesamiento de datos GNSS y estación total, edición y visualización de Datos, ajuste de redes geodésicas, modelado de superficies, cálculos topográficos, generación de informes, integración con otros software Trimble y compatibilidad con formatos de datos.

La planificación y ejecución de los vuelos se realizó con la aplicación Ground Station Versión 1.4.63 de DJI que está diseñada para ser utilizada con VANT DJI y compatibles, proporcionando una interfaz intuitiva para planificar y ejecutar misiones de vuelo automatizadas. Entre las potencialidades de este software está:

- **Planificación de misiones:** Permite a los usuarios definir waypoints (puntos de ruta) en un mapa interactivo para crear una trayectoria de vuelo predefinida para el VANT. Los usuarios pueden establecer altitudes, velocidades y tiempos de espera en cada waypoint.
- **Vuelo automático:** Una vez que se ha planificado la misión, el VANT puede ser configurado para volar automáticamente siguiendo la ruta definida. Esto es especialmente útil para realizar tareas repetitivas, mapeo aéreo, inspecciones y otros escenarios en los que se requiere un vuelo preciso y controlado.

- Modos de vuelo: Ground Station ofrece varios modos de vuelo, como el modo GPS, que utiliza la señal del sistema de posicionamiento global para mantener la precisión de la posición y la velocidad del VANT durante la misión.
- Telemetría en tiempo real: Proporciona información en tiempo real sobre la ubicación, velocidad, altitud y otros datos relevantes del VANT durante el vuelo.
- Edición de misiones: Permite a los usuarios modificar y ajustar las misiones existentes, añadir o eliminar waypoints, y realizar cambios en los parámetros de vuelo antes de su ejecución.

Para la orientación del bloque de imágenes y la posterior obtención de MDS y ortoimágenes, se empleó el software Agisoft PhotoScan V 1.4.5, basado en algoritmos SfM (Structure from Motion). El flujo de trabajo se inicia con la alineación y georreferenciación de las imágenes por matching denso y técnicas de Structure from Motion (SfM), que implican la medida automática de miles de puntos paso comunes entre fotografías. Posteriormente se procede a la generación del MDS por densificación de la nube de puntos y de ortoimágenes, y en su caso la creación de modelos tridimensionales digitales texturizados (Yucel & Turan, 2016). Para la orientación y georreferenciación de los vuelos se emplearon cinco GCP (puntos de control o apoyo fotogramétrico) en el sector Victoria, seis GCP en Colinas Lojana y nueve para el sector de El Plateado.

Para el análisis de las ortoimágenes y los modelos digitales de elevación obtenidos con técnicas y software fotogramétrico, así como para la generación de mapas temáticos se empleó el software QGIS (<https://qgis.org/es/site/about/index.html>) que es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código abierto que proporciona herramientas para la visualización, análisis y manipulación de datos geoespaciales. Desarrollado por una comunidad de voluntarios, QGIS



es gratuito y está disponible para múltiples plataformas, incluyendo Windows, macOS y Linux. Es una alternativa popular a los SIG propietarios y cuenta con una amplia gama de características y extensiones.

Para el análisis geomorfológico del terreno basado en los modelos digitales de elevación se empleó el software SAGA GIS versión 9.02. SAGA GIS

(<https://saga-gis.sourceforge.io/en/index.html>), que es otro Sistema de Información Geográfica (SIG) de código abierto que se utiliza para el análisis geoespacial y la manipulación de datos. Al igual que QGIS, SAGA GIS es gratuito y está disponible para varias plataformas, incluyendo Windows, Linux y macOS. SAGA GIS se centra en proporcionar un conjunto de herramientas y algoritmos para realizar análisis automatizados en el campo de las ciencias geoespaciales.

Finalmente, para el análisis digital de imágenes, que se aplicará para medir desplazamientos de forma automática a partir de imágenes y modelos, se han utilizado los software: Cosi-Corr, desarrollado por el Tectonics Observatory del California Institute of Technology, sobre lenguaje IDL e implementado en el software comercial ENVI de análisis de imágenes; y un algoritmo propio desarrollado por el Grupo Sistemas Fotogramétricos y Topométricos de la Universidad de Jaén. Los detalles del funcionamiento de ambos se presentan más adelante en la metodología.

### **3.2.4. Instrumental geotécnico**

Para la caracterización geotécnica del material constitutivo del cuerpo de la ladera se realizó la extracción de muestras de suelo a una profundidad de tres metros, para lo cual se empleó una retroexcavadora que permitió realizar la excavación a la profundidad deseada. A las muestras obtenidas se les practicaron las siguientes pruebas de laboratorio considerando la normativa ASTM:

- Contenido de humedad del suelo (ASTM D4643-17)
- Límite líquido, Límite plástico e índice de plasticidad de suelos (ASTM D4318-17e1)
- Análisis de las partículas del suelo (ASTM D422-63)
- Clasificación de suelos (ASTM D2487-17e1)
- Ensayo de corte directo de suelos en condiciones drenadas consolidadas (ASTM D3080)

Los equipos de laboratorio empleados en el presente estudio son de propiedad de la Universidad Técnica Particular de Loja. Entre los equipos empleados se detallan a continuación:

- Un equipo Kit Soil Moisture SM300 para medir la humedad del suelo ( $w\%$ ) al momento de extraer las muestras y comprobar con las obtenidas en laboratorio.
- 1 Juego de tamices marca Humboldt serie fina.
- 1 equipo motorizado ASTM para límite líquido
- 1 equipo de corte directo marca Humboldt

### **3.3. Metodología**

La metodología seguida en este trabajo comprende diferentes etapas que van desde la captura de datos y su procesamiento, hasta el análisis de los mismos; dentro del análisis hay que diferenciar la caracterización de los movimientos de ladera estudiados y el análisis evolutivo; finalmente, hay que acometer la realización de ensayos geotécnicos para la caracterización de los materiales involucrados en los movimientos. En la Figura 13 se presenta un esquema general de la metodología empleada.

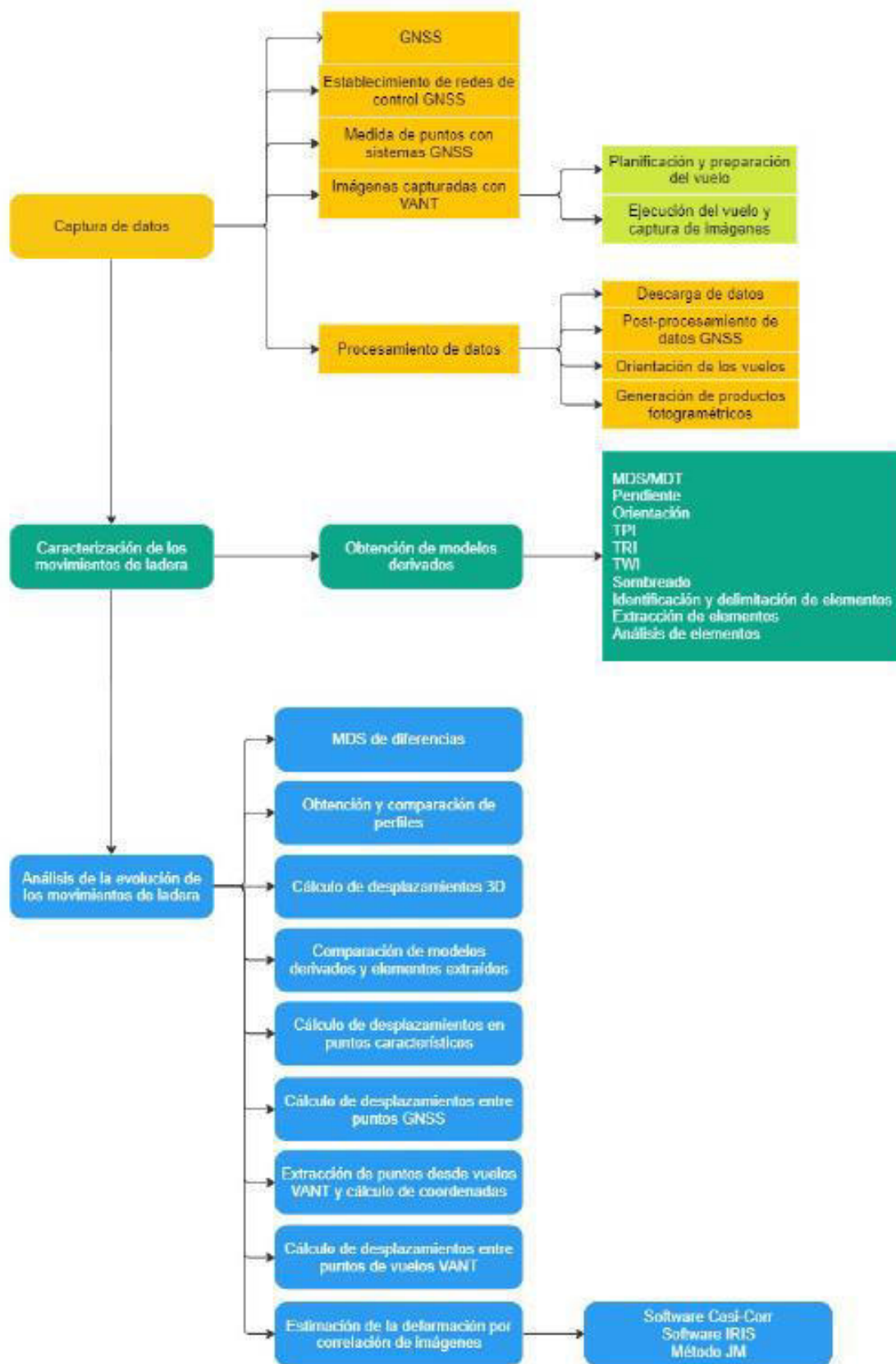


Figura 13. Diagrama general de la metodología empleada en el presente trabajo.

### **3.3.1. Captura de datos**

La captura de datos comprende la medida de puntos mediante GNSS y la toma de imágenes desde el VANT para su posterior procesamiento y análisis.

#### **3.3.1.1. GNSS**

Dentro de la medida de puntos con GNSS se describe en primer lugar el establecimiento de redes de control GNSS, tanto para el análisis de la deformación como para el apoyo fotogramétrico; en segundo lugar, el procedimiento de medida en dichos puntos mediante la instrumentación GNSS.

##### **3.3.1.1.1. Establecimiento de redes de control GNSS**

Se establecieron dos redes de control GNSS no permanentes (Wang, 2013) para monitorizar la deformación en las zonas de estudio Victoria y Colinas Lojanas, constituidas por 8 y 24 puntos respectivamente (Figura 14). Estas redes de control fueron materializadas mediante mojones de hormigón en cuyo centro se instaló una varilla de acero corrugado de 0.50 m de longitud y en cuyo extremo libre se realizó una perforación cónica de 3 mm de diámetro para el acople del bastón del receptor GNSS (Figura 15). Estos puntos fueron empleados además como puntos de apoyo fotogramétrico, según se indican en las Figura 14 .

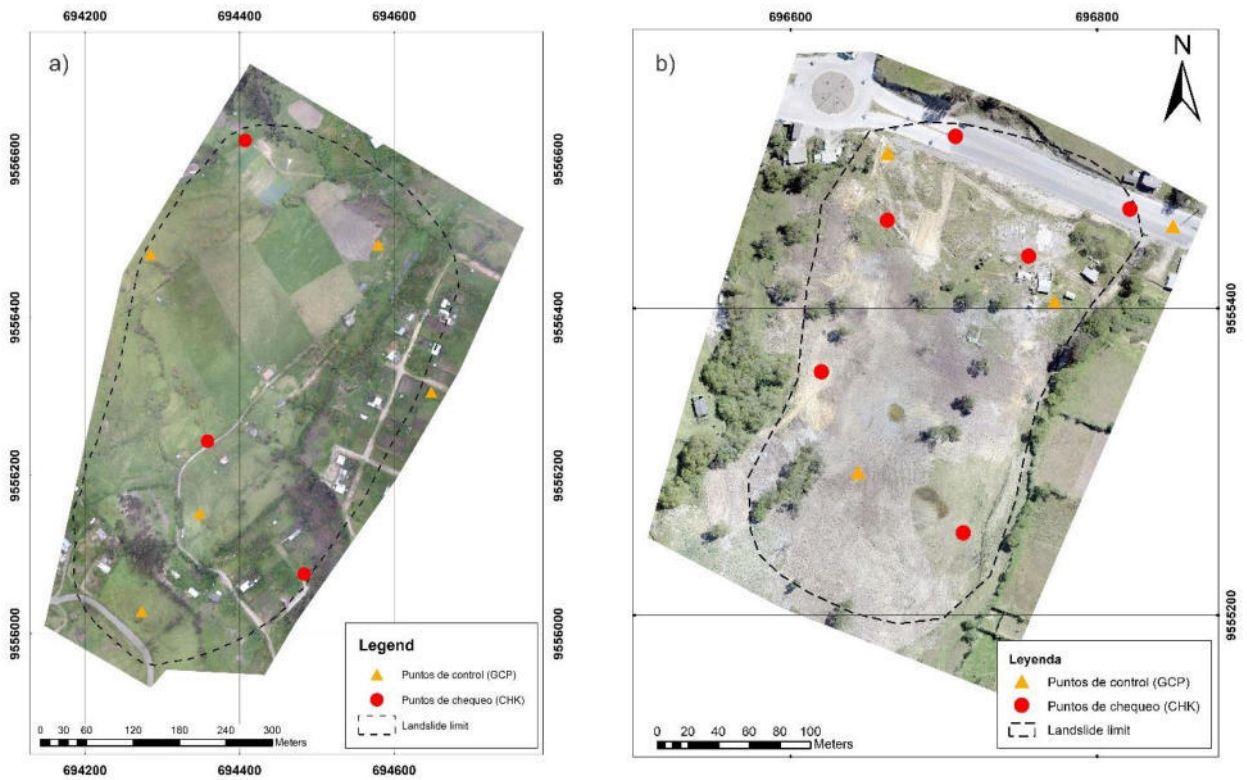


Figura 14. Ubicación de los puntos de control en la zona de estudio. a) Victoria y b) Colinas Lojanas.

En la zona de estudio El Plateado se materializaron 16 mojones que fueron utilizados solamente como puntos de control (GCP) y puntos de chequeo (CHK) para la orientación fotogramétrica de las imágenes capturadas con los vuelos VANT (Figura 16).

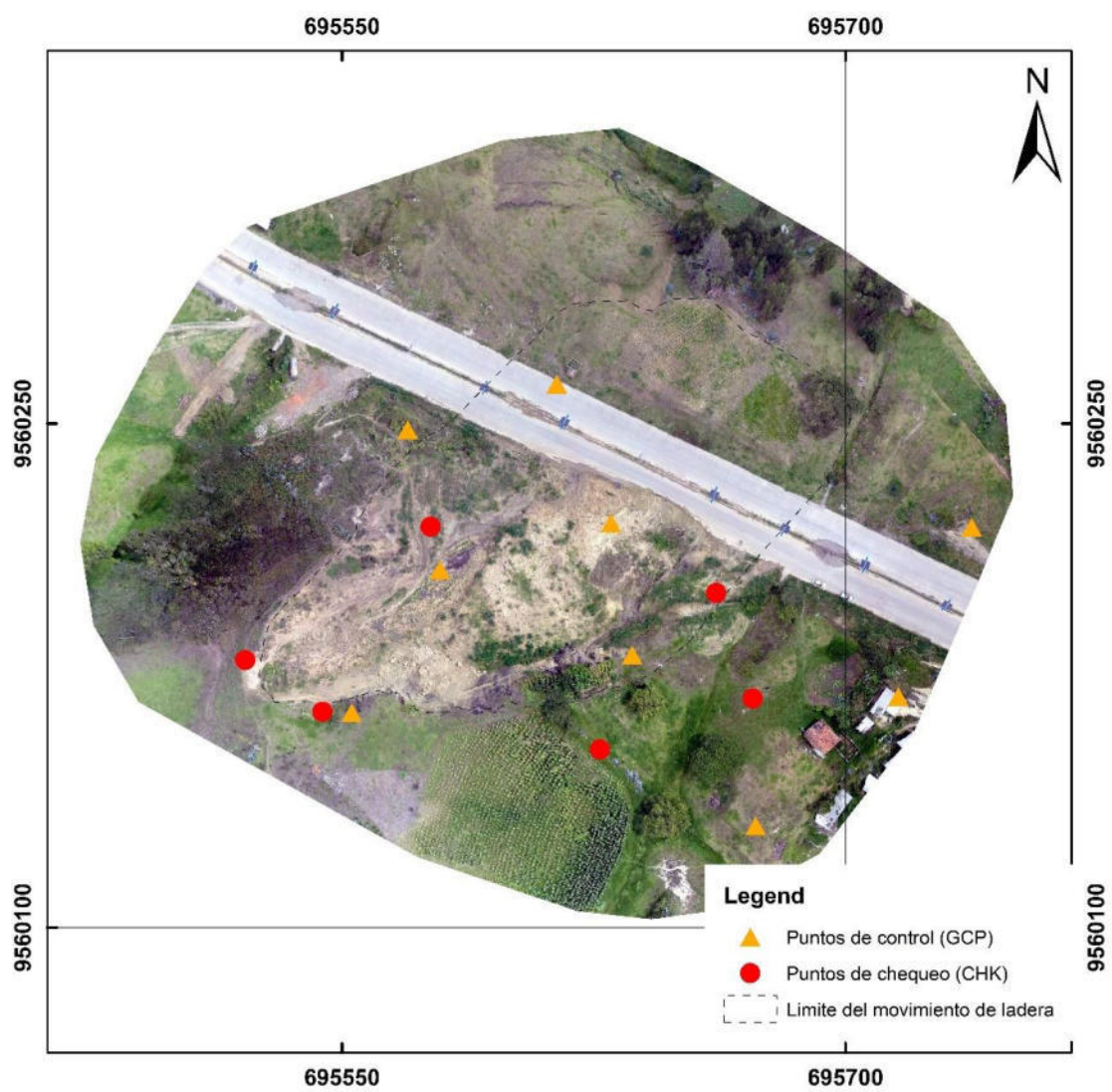


Figura 15. Ubicación de los puntos de control en la zona de El Plateado.

En la Tabla 8 se muestra un resumen de los puntos utilizados en cada zona.

Tabla 8. Puntos de medida GNSS en las zonas de estudio.

Parámetros	Victoria			
	18 febrero 2016		11 junio 2016	
Número de GCP	5		5	
Número de CHK	3		3	
Número monitor.	8		8	
Parámetros	Colinas Lojanas			
	4 Julio 2016	29 nov. 2016	12 enero 2018	
Número de GCP	6	6	6	
Número de CHK	4	4	4	
Número monitor.	24	24	24	
Parámetros	El Plateado			
	24 ene. 2017	9 junio 2017	8 junio 2018	12 mar. 2020
Número de GCP	9	9	9	9
Número de CHK	6	6	7	6

### 3.3.1.1.2. Medida de puntos con GNSS

Las coordenadas de los puntos materializados en las zonas de estudio se obtuvieron mediante técnicas de GNSS diferencial, en concreto mediante el método estático rápido (fast static). Esta técnica implica dejar un receptor GNSS estacionario sobre un punto durante un lapso de tiempo determinado de varios minutos a horas, para la recopilación de los datos de posicionamiento preciso. En las zonas de estudio, el tiempo de ocupación medio ha sido de 10 minutos.

El procedimiento aplicado con esta técnica se resume en los siguientes puntos:

- Seleccionar una estación de referencia cercana a la zona de estudio cuyas coordenadas sean conocidas, lo que asegura la aplicación de técnicas de GNSS diferencial. Por lo general se recomienda que sean estaciones de monitoreo continuo, que en este caso corresponde a la estación de referencia GNSS LJEC del Instituto Geográfico Militar (IGM) perteneciente a la Red SIRGAS.

- Configurar el receptor GNSS en el primer punto de levantamiento y recopilar datos durante un período de observación. En este caso se empleó un tiempo de 20 minutos.
- Durante el período de observación, el receptor GNSS recibe señales de varios satélites y determina su posición en tiempo real.
- Concluida la observación se mueve el receptor al siguiente punto de levantamiento y se repite el proceso.
- Una vez que se han observado todos los puntos de levantamiento requeridos, los datos recopilados de cada posición del receptor se procesan posteriormente utilizando software especializado.
- El software de procesamiento posterior combina las posiciones de cada punto de levantamiento con los datos de la estación de referencia para generar coordenadas altamente precisas para todos los puntos levantados.

En la Tabla 9 se detallan las fechas en que se realizaron medición GNSS en las zonas de trabajo.

Tabla 9. Detalle de las campañas de medición GNSS realizadas en las zonas de estudio. Los lapsos de tiempo corresponden al tiempo acumulado entre campañas de medición. Para las zonas de Victoria y Colinas Lojanas corresponden a campañas de medida de la deformación, siendo la primera y la última empleada además como apoyo fotogramétrico, mientras que en El Plateado corresponden solo a campañas de apoyo fotogramétrico.

<b>Sector</b>	<b>Campaña</b>	<b>Fecha de medición</b>	<b>Lapso de tiempo (días)</b>
Victoria	1	18/Enero/2016	1
	2	11/Junio/2016	146
Colinas Lojanas	1	22/Agosto/2016	1
	2	23/Noviembre/2016	94



### 3.3.1.2. Imágenes capturadas con VANT

Dentro de la metodología general seguida se puede considerar un subproceso de gran importancia que es el fotogramétrico. Este subproceso comienza con la captura de imágenes desde el VANT, continúa con su procesamiento y culmina con la generación de productos fotogramétricos como se aprecia en la Figura 16.

En este apartado se describe la captura de las imágenes.

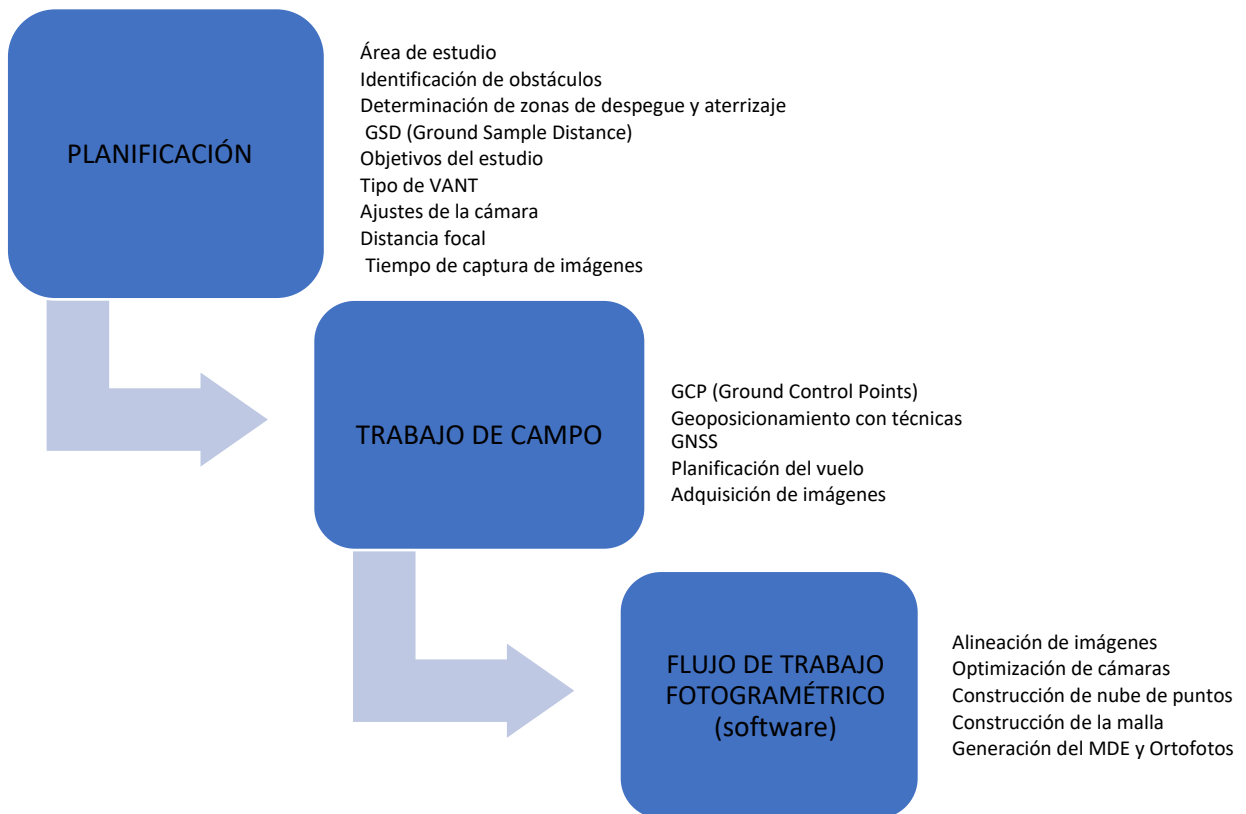


Figura 16. Flujo de trabajo empleado para la obtención de productos fotogramétricos.

La captura requiere de una etapa previa de planificación y preparación de los vuelos, que involucra conocer los objetivos del proyecto, tipo de terreno, tipo de cámara a emplear, tasa de adquisición de imágenes con la cámara (intervalo de captura), altura de vuelo y ángulo de captura de imágenes.

La altura de vuelo es el parámetro que permite definir la calidad (resolución y precisión), de las imágenes obtenidas con el VANT. La resolución está representada por la distancia de muestreo del suelo o por sus siglas en inglés GSD (Ground Sample Distance), que depende de parámetros como la distancia focal, el ancho del sensor de la cámara (mm) o el ancho de la imagen expresada en píxeles, así como la altura de la captura. En algunas cámaras la distancia focal se expresa como equivalente a 35 mm por lo que es necesario obtener la distancia focal real  $f_R$  empleando la ecuación 1:

$$f_R = \frac{f_{35} \times S_w}{34.6} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde  $f_{35}$  es la distancia focal equivalente a 35 mm y  $S_w$  corresponde al ancho del sensor de la cámara. El GSD se define como la distancia entre dos centros de píxeles consecutivos; cuanto mayor sea el GSD se obtendrán imágenes de menor resolución espacial y los detalles importantes serán menos observables.

Conociendo el GSD es posible estimar la altura media de vuelo con la cual se obtendrán las imágenes con el VANT; sin embargo, el GSD puede variar debido a diferencias de elevación del terreno y del ángulo de captura de la imagen por acciones externas al VANT como es el viento, pese a tener una altura de vuelo constante.

La determinación teórica de la altura de vuelo ( $h$ ) viene dada por la ecuación 2:

$$h = \frac{GSD \times imH}{100} \quad Ec. 2$$

donde  $GSD$  es la distancia de muestreo de suelo e  $imH$  altura de la imagen en píxeles. También la altura de vuelo ( $h$ ) viene dada por la ecuación 3 en base a la distancia focal de la cámara:

$$h = \frac{(imW \times GSD) \times f_R}{(S_w \times 100)} \quad Ec. 3$$

en la cual  $imW$ , es el ancho de la imagen expresado en píxeles (Pix4D, 2015).

### **3.3.1.2.1. Planificación y preparación del vuelo.**

Como se ha apuntado, antes de la captura de imágenes, se realiza una planificación del vuelo. Esto implica determinar el área de interés y establecer los parámetros del vuelo, como la altitud, la velocidad y la trayectoria. También se deben considerar las regulaciones y restricciones locales relacionadas con el uso de VANT establecidas por las autoridades aeronáuticas del país.

La planificación y ejecución de los vuelos se realizó con la aplicación Ground Station Versión 1.4.63 de DJI que está diseñada para ser utilizada con VANT DJI, como los empleados en este trabajo; concretamente un Phantom 2, equipado con una cámara digital GoPro 3+ Silver Edition de 10 Megapíxeles. En la Tabla 10 se muestran los parámetros empleados en cada uno de los vuelos. Estos se resumen en un valor del 70% para el traslape longitudinal para todos los vuelos en todas las zonas; y del 60% de traslape transversal en todas las zonas, excepto El Plateado que es del 70%: La altura de vuelo media es de prácticamente 120 m en la zona de Victoria; entre 77 y 97 m en Colinas Lojanas; y entre 84 y 89 m en El Plateado. El número de pasadas es de 14 en Victoria, 12 en Colinas Lojanas y 15 en El Plateado.

Tabla 10. Parámetros de diseño empleados para la generación de las líneas de vuelo en las zonas de estudio.

<b>Zona</b>	<b>Victoria</b>		<b>Colinas Lojanas</b>			<b>El Plateado</b>			
Fecha	18 febrero 2016	11 junio 2016	4 Julio 2016	29 noviembre 2016	12 enero 2018	24 enero 2017	9 junio 2017	8 junio 2018	12 marzo 2020
Traslape longitudinal	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%	70%
Traslape transversal	60%	60%	60%	60%	60%	70%	70%	70%	70%
Altura de vuelo (m)	120	119	97.4	77.3	92.2	84.2	87	87.6	89
Número de pasadas	14	14	12	12	12	15	15	15	15
Alineación respecto al Norte	35°	35°	20°	20°	20°	30°	30°	30°	30°

En cuanto a la preparación, se verifica el estado de la batería, la conexión GPS y otros sistemas relevantes. Se asegura que la cámara esté funcionando correctamente y se ajustan los parámetros de captura como la resolución, el formato de imagen, traslapes longitudinales y transversales, y la configuración de exposición y tiempo de captura de imágenes en vuelo.

La presencia de lluvia y viento (Car et al., 2016) fue un factor que se consideró previo a la puesta en marcha de la programación del vuelo debido al impacto negativo en componentes electrónicos, calidad de la imagen y seguridad del VANT. Las condiciones climáticas óptimas (Hackney & Clayton, 2015; Mozas-Calvache et al., 2012; Uysal et al., 2015) para evaluar un

movimiento de ladera son cielo nublado, sin lluvia y sin viento; sin embargo, es posible realizar vuelos con vientos de hasta 8 km/h.

### 3.3.1.2.2. Ejecución del vuelo y captura de imágenes

Se ejecuta el vuelo del VANT siguiendo la planificación establecida. Durante el vuelo, la cámara del VANT captura imágenes de la superficie o área de interés con una altura y ángulo de la cámara previamente establecidos.

Los resultados de la captura se muestran en la Tabla 11 para las tres zonas de trabajo. El GSD es de 0.06 m para la zona de Victoria, de 0.07 m para Colinas Lojanas y de entre 0.040 y 0.043 m para El Plateado.

Tabla 11. Datos de las imágenes capturadas con VANT en las zonas de estudio.

Parámetros	Victoria			
	18 febrero 2016		11 junio 2016	
Nº imágenes	243		268	
GSD (m/pix)	0.060		0.060	
Parámetros	Colinas Lojanas			
	4 Julio 2016	29 nov. 2016	12 enero 2018	
Nº imágenes	216	221	208	
GSD (m/pix)	0.070	0.070	0.070	
Parámetros	El Plateado			
	24 ene. 2017	9 junio 2017	8 junio 2018	12 mar. 2020
Nº imágenes	327	489	335	356
GSD (m/pix)	0.042	0.043	0.041	0.040

### **3.3.2. Procesamiento de datos**

El procesado de datos, de acuerdo a las Figuras 13 y 16, comienza con la descarga de datos y el post-procesamiento de los datos GNSS. A continuación se acomete la orientación de los vuelos fotogramétricos, y finalmente se obtienen los productos correspondientes.

#### **3.3.2.1. Descarga de datos**

Una vez que se completa el vuelo, las imágenes capturadas se descargan desde la tarjeta de almacenamiento del VANT a un dispositivo de almacenamiento de datos permanente.

De igual forma, los datos GNSS son igualmente descargados desde la tarjeta de datos del instrumento al sistema de almacenamiento y postprocesados, según se tratará en el apartado siguiente. Una vez dispuestos los datos GNSS y las imágenes son introducidos en el software correspondiente para su procesamiento fotogramétrico.

#### **3.3.2.2. Post-procesamiento de datos GNSS**

Para el postproceso de los datos GNSS se emplearon los datos de la estación de referencia GNSS LJEC del Instituto Geográfico Militar (IGM) perteneciente a la Red SIRGAS y el software Trimble Business Centre V 2.6. Las coordenadas fueron orientadas en el sistema UTM WGS 84 zona 17 sur.

La finalidad de este postproceso es mejorar la precisión de los datos GNSS, corrigiendo errores y mejorando la exactitud de las coordenadas geográficas calculadas. El postproceso de datos GNSS implica tomar los datos crudos registrados por el receptor GNSS y procesarlos posteriormente utilizando información adicional, como datos de estaciones base cercanas con ubicaciones conocidas (redes de estaciones de referencia) o correcciones de satélites (como las correcciones diferenciales). Este proceso se realiza después de la adquisición de datos en campo.

### **3.3.2.3. Orientación de los vuelos**

La alineación y orientación de imágenes obtenidas con el VANT implica el proceso de determinar la posición y orientación precisa de la cámara en el momento de la captura. Esto es esencial para lograr una georreferenciación adecuada y una correcta alineación de las imágenes en un sistema de coordenadas geográficas o en un modelo tridimensional. Un proceso general de orientación de imágenes con VANT se detalla a continuación:

- **Captura de datos de navegación:** Durante el vuelo del VANT, se registran datos de navegación, como información GPS, actitud (inclinación, balanceo y guiñada) y datos inerciales (como acelerómetros y giróscopos). Estos datos proporcionan información sobre la trayectoria y orientación del VANT durante la captura de imágenes.
- **Puntos de control terrestres:** Para lograr una georreferenciación precisa, se deben establecer puntos de control terrestres distribuidos en el área de estudio. Estos puntos deben ser fácilmente identificables tanto en las imágenes del VANT como en el terreno. Se miden las coordenadas precisas de estos puntos utilizando técnicas de levantamiento terrestre, como GNSS de precisión o estaciones totales.
- **Emparejamiento de puntos de control:** Se identifican y emparejan los puntos de control visibles tanto en las imágenes capturadas por el VANT como en las mediciones terrestres. Esto se puede realizar manualmente o mediante el uso de software de procesamiento de imágenes que utilice algoritmos de detección y emparejamiento de características.
- **Ajuste de la orientación:** Utilizando los puntos de control emparejados, se realiza un ajuste matemático para determinar la posición y orientación precisa de la cámara en el momento de la captura. Esto se conoce como orientación relativa y se basa en principios

de fotogrametría y triangulación. El ajuste utiliza los datos de navegación, los puntos de control y las características comunes en las imágenes.

- Georreferenciación absoluta: Una vez que se ha realizado el ajuste de la orientación relativa, se procede a la georreferenciación absoluta. Esto implica vincular las imágenes a un sistema de coordenadas geográficas o un modelo tridimensional utilizando los puntos de control terrestres también conocidos como GCP (Ground Control Points). El proceso puede requerir la utilización de software especializado para llevar a cabo transformaciones y cálculos de corrección.

En la mayor parte de los trabajos, como ocurre en este, se realiza este procedimiento de forma independiente para cada una de las campañas de captura de imágenes disponibles. Hay, no obstante, trabajos en los que los puntos de control de algunos de los vuelos se extraen de otros vuelos (puntos de control de segundo orden), lo que asegura posiblemente un mejor ajuste relativo entre la orientación fotogramétrica de los vuelos y entre los productos derivados (Fernández et al., 2016, 2017; 2020, 2021; Cardenal et al., 2023; Zárate et al., 2023).

El procesamiento de las imágenes en este trabajo, la orientación del bloque de fotografías y la posterior obtención de DSM y ortoimágenes, se ha llevado a cabo utilizando el software especializado Agisoft PhotoScan V 1.4.5. El flujo de trabajo en este software se inicia con la alineación y georreferenciación de las imágenes por matching denso y técnicas de Structure from Motion (SfM), que implican la medida automática de miles de puntos paso comunes entre fotografías. Posteriormente se procede a la generación de los MDS, por densificación de la nube de puntos, y de mosaicos de ortoimágenes; y en su caso la creación de modelos tridimensionales digitales texturizados (Yucel & Turan, 2016).



En este trabajo se han empleado cinco GCP en el sector Victoria, seis GCP en Colinas Lojana y nueve GCP para el sector de El Plateado en los distintos vuelos realizados. Además, se han empleado tres puntos de chequeo en la zona de Victoria, cuatro puntos en Colinas Lojanas y seis-siete en El Plateado.

En la Tabla 12 se muestra un resumen de los principales parámetros empleados y los errores medios cuadráticos (RMS) de ajuste en los puntos de control y de chequeo. El número de puntos de paso es de 329092 en la zona de Victoria, 276109 en Colinas Lojanas y 434624 en el Plateado.

En la zona de Victoria los errores horizontales son inferiores a 0.06 m tanto para los puntos de control como para los de chequeo, mientras que los errores verticales son inferiores a 0.04 m en los puntos de control y de 0.041-0.042 m en los de chequeo. Para Colinas Lojanas, los errores horizontales no superan 0.06 m en los puntos de control y 0.04 m en los puntos de chequeo; los errores verticales, alcanzan un valor máximo de 0.10 m en los puntos de control y de 0.06 m en los de chequeo. Finalmente, en la zona de El Plateado, los errores horizontales apenas superan 0.05 m en los puntos de control y 0.04 m en los puntos de chequeo, siendo los errores verticales inferiores a 0.035 m en los puntos de control e inferiores a 0.04 m en los de chequeo.

Tabla 12. Errores de ajuste en los puntos de control y de chequeo en los distintos vuelos VANT de las zonas de trabajo.

Parámetros	Victoria			
	18 febrero 2016		11 junio 2016	
Nº imágenes usadas	226		246	
GSD (m/pix)	0.060		0.060	
Número de GCP	5		5	
RMS XY error (m)	0.025		0.053	
RMS Z (m)	0.038		0.024	
Total RMS error (m)	0.045		0.053	
Número de CHK	3		3	
RMS XY error (m)	0.026		0.056	
RMS Z (m)	0.041		0.042	
Total RMS error (m)	0.049		0.070	
Parámetros	Colinas Lojanas			
	4 Julio 2016	29 nov. 2016	12 enero 2018	
Nº imágenes usadas	289	285	278	
GSD (m/pix)	0.070	0.070	0.070	
Número de GCP	6	6	6	
RMS XY error (m)	0.056	0.038	0.028	
RMS Z (m)	0.040	0.059	0.103	
Total RMS error (m)	0.069	0.070	0.030	
Número de CHK	4	4	4	
RMS XY error (m)	0.039	0.026	0.026	
RMS Z (m)	0.061	0.041	0.039	
Total RMS error (m)	0.073	0.049	0.047	
Parámetros	El Plateado			
	24 ene. 2017	9 junio 2017	8 junio 2018	12 mar. 2020
Nº imágenes usadas	327	489	335	356
GSD (m/pix)	0.042	0.043	0.041	0.040
Número de GCP	9	9	9	9
RMS XY error (m)	0.036	0.041	0.053	0.035
RMS Z (m)	0.031	0.034	0.023	0.031
Total RMS error (m)	0.048	0.053	0.058	0.047
Número de CHK	6	6	7	6
RMS XY error (m)	0.033	0.033	0.041	0.025
RMS Z (m)	0.025	0.041	0.028	0.026
Total RMS error (m)	0.041	0.053	0.050	0.036

#### **3.3.2.4. Generación de productos fotogramétricos**

Una vez se han procesado las imágenes, la nube de puntos dispersa se densifica, para obtener la nube de puntos densa que supone 8,260,682 puntos en la zona de Victoria, 24,210,108 puntos en Colinas Lojanas y 11,238,000 puntos en El Plateado.

A partir de la nube de puntos densa se pueden generar los productos finales, a saber, los modelos digitales del terreno y las ortoimágenes georreferenciadas. En primer lugar, se crea la malla (mesh) por triangulación (red de triángulos irregulares, o TIN en sus siglas inglesas); y finalmente, el MDE se exporta como ráster en formato TIFF, calculado la elevación por interpolación en cada uno de las celdas o píxeles. La resolución de los MDE fue de 0.10 m, dado que se partía de imágenes de entre 0.04 y 0.07 m. A pesar de que en fotogrametría convencional la resolución de los modelos suele ser varias veces mayor que el GSD de las imágenes, los nuevos algoritmos de matching denso utilizados por el software fotogramétrico basado en SfM y el uso de patrones de vuelos fotogramétricos con mayores solapamientos, como los previstos en VANT, van permitiendo reducir esta proporción (Fernández et al., 2016; 2020).

Llegado este momento, se han de clarificar algunos aspectos acerca de cómo se han empleado en este trabajo los modelos digitales de elevaciones (MDE) y los modelos digitales del terreno (MDT). Los MDT se definen como un conjunto de datos numéricos que describe la distribución espacial de una característica del territorio (Doyle, 1978), y de forma más específica de una variable cuantitativa y continua (Felicísimo, 1994). Dentro de los MDT, el modelo que se considera más primitivo y del que se derivan muchos otros de forma directa (pendientes, orientación, curvatura, rugosidad, etc.) o indirecta (insolación, escorrentía, erosión, etc.) es el modelo digital de elevaciones o MDE. Así, el MDE es aquel que se emplea para representar la

variable elevación o cota sobre una superficie de referencia horizontal (si esta superficie es el nivel del mar en calma o geoide, se hablaría de modelo de altitudes ortométricas). Por otra parte, se pueden definir los modelos digitales de superficies (MDS), como aquellos que representan la superficie del terreno junto a aquellos elementos que la cubren, tanto de forma permanente como no permanente (vegetación, construcciones o cualquier otro elemento). A partir de estos modelos, tomados como MDE, también se pueden obtener modelos derivados.

En este trabajo se han generado modelos digitales de superficies (MDS) en lugar de auténticos modelos digitales del terreno (MDT), debido a que el área de estudio presentaba una alta densidad de vegetación en algunos sectores con pastos, matorrales, arbustos y árboles que crecen intensamente con las abundantes lluvias. En esta circunstancia los MDT obtenidos a partir de MDS, utilizando las herramientas de clasificación de nubes de puntos y filtrado de PhotoScan, sólo habían eliminado parcialmente algunos árboles en el mejor de los casos. Tampoco se realizó la edición del modelo estéreo mediante estaciones de trabajo fotogramétricas y el software correspondiente, porque no aseguraba buenos resultados (no podía eliminar el pasto y el matorral denso) y hubiera requerido mucho consumo tiempo (Fernández et al., . 2016; Cardenal et al., 2019; Zárata et al., 2021; 2013).

Los modelos digitales del terreno pueden responder a una estructura tipo vectorial o de tipo ráster, existiendo distintas alternativas para la representación y almacenamiento de los datos (Felicísimo, 1994). Dentro de las estructuras vectoriales se pueden citar las nubes de puntos irregulares, las redes de triángulos irregulares o TIN (nubes de puntos con topología de puntos, aristas o triángulos), las curvas de nivel o las mallas regulares. Dentro de las estructuras ráster, destacan la versión correspondiente de las mallas o rejillas regulares, que es una de las estructuras más comunes para los MDE; son especialmente utilizadas para su análisis, por su

adecuación para el desarrollo de algoritmos como los que permiten la obtención de modelos derivados. Es por ello que, en este trabajo se generen y utilicen los modelos con esta estructura.

Una vez obtenidos los MDS, se generan las ortoimágenes u ortofotografías, en realidad mosaicos de ortoimágenes. Las ortoimágenes como su propio nombre indica son imágenes aéreas corregidas geométricamente para tener una proyección ortogonal, lo que significa que se eliminan las distorsiones causadas por el relieve del terreno y el ángulo de captura. En este caso, se generan en el propio software PhotoScan a partir de la malla o el modelo y las imágenes, que una vez corregidas y georreferenciadas se fusionan en un mosaico, utilizando en cada caso la imagen más conveniente y tras la aplicación de una normalización para eliminar las diferencias de radiometría entre las distintas imágenes del mosaico. La resolución de las ortoimágenes es de 0.05 m, es decir, del mismo orden que el GSD de las imágenes, de acuerdo al uso corriente en imágenes capturadas con VANT (Fernández et al., 2016; Zárate et al., 2021; 2023 y otras).

### **3.3.3. Caracterización de los movimientos de ladera**

La caracterización de los movimientos de ladera, incluyendo la identificación y análisis de sus elementos, se realiza a partir de los propios MDS y las ortoimágenes, pero también y de forma muy destacada a partir de los modelos derivados de los MDE (MDS en este caso). El flujo de trabajo comienza con la obtención de los modelos derivados (pendientes, orientación, sombreado, curvatura, rugosidad y humedad); continúa con la identificación y delimitación de los rasgos y elementos de los movimientos de ladera por fotointerpretación o su extracción (semi)automática con herramientas SIG; para terminar con el análisis global de los movimientos y sus elementos (Figura 13).

### **3.3.3.1. Obtención de modelos derivados**

Los modelos digitales de elevaciones se han definido previamente como aquellos que se emplean para representar la variable elevación o altitud (sobre la superficie de referencia del geoides), tanto si son MDT (superficie del terreno) como MDS (superficie del terreno o de los elementos que lo cubren). Estos modelos se consideran hoy día como un soporte básico de la investigación en la ingeniería y en las ciencias ambientales, por lo que muestran un amplio número de aplicaciones (Felicísimo, 1994), especialmente en aquellas relacionadas con la topografía-geomática, la geomorfología o la climatología.

Esto es así porque, como cualquier modelo geoespacial de datos, contienen información tanto explícita, mediante los propios datos contenidos en el modelo; como implícita, a través de las relaciones espaciales entre los objetos o datos (Felicísimo, 1994). La combinación de la información de la elevación en cada punto con el hecho de que esta información sea continua en el espacio (o al menos discreta por limitaciones del modelo), permite establecer relaciones topológicas entre la elevación de un punto y sus vecinos, y son la base de los modelos derivados. Así, a partir de la topología local se pueden definir algoritmos para calcular una serie de variables que podemos denominar topográficas (Felicísimo, 1994), ya que se derivan de la elevación como representación gráfica de la superficie terrestre con sus detalles; o quizá más propiamente morfométricas, ya que permiten la descripción cuantitativa de las formas de la superficie terrestre con sus detalles. El análisis de estas variables o parámetros morfométricos, junto con el análisis e interpretación de imágenes u ortoimágenes, es fundamental en los estudios relativos a los movimientos de ladera, ya que estos procesos dejan huellas o rasgos en el terreno que permiten su identificación, caracterización y el estudio de su evolución, cuando los modelos son multitemporales.

Dentro de los modelos, destacan los relativos a cinco parámetros básicos que son la elevación, la pendiente, la orientación, la convexidad o curvatura y el relieve local o rugosidad (Franklin & Peddle, 1987), a los que hay que añadir los modelos de iluminación o sombreado, que ofrecen una muy buena expresividad del terreno (Felicísimo, 1994). Para todos ellos, se han desarrollado algoritmos que están implementados habitualmente en los software SIG. En los últimos años, se han desarrollado algunos otros como el índice de posición topográfica (TPI en sus siglas inglesas), el índice de rugosidad del terreno (TRI), el índice de potencia de las corrientes de agua (SPI), el índice de transporte de sedimentos (STI), o el índice topográfico de humedad (TWI), que están aplicándose en distintos tipos de estudios, tanto de tipo descriptivo de las formas del terreno como para el análisis de procesos geodinámicos.

Tanto los parámetros antes mencionados, como estos últimos, muestran una alta aplicabilidad en los estudios de movimientos de ladera. Su mayor uso ha sido, no obstante, en los análisis de riesgos, como en la modelización de la susceptibilidad, tanto mediante métodos deterministas como probabilistas; ambos basados en factores que determinan la inestabilidad del terreno (van Westen et al., 2000). Así, en los modelos de tipo probabilista, el MDE y los modelos derivados son un grupo de factores que se integran como capas de información para la predicción de los movimientos de ladera (Zárate et al., 2012, 2013). Sin embargo, en los últimos años, estos factores se están comenzando a emplear en la monitorización de los movimientos de ladera, ya que a partir de estos parámetros se pueden identificar rasgos que permiten caracterizar los movimientos y sus elementos; y, por lo tanto, su seguimiento puede informar sobre aspectos relativos a la cinemática de los movimientos.

En este trabajo, se han obtenido los siguientes modelos derivados de los MDE, más concretamente de los MDS: pendiente, orientación, sombreado, índice de posición topográfico

(TPI, como sustituto de la curvatura), el índice de rugosidad del terreno (TRI) y el índice topográfico de humedad (TWI), en cada una de las fechas analizadas. El hecho de que se obtengan a partir del MDS es una limitación, ya que algunas de las formas del terreno pueden quedar ocultas o difuminadas; pero, por el contrario, permite identificar algunos elementos (árboles, construcciones...) y estudiar también su evolución. Para la determinación de estos parámetros, se han empleado los algoritmos desarrollados en el software SAGA bajo la interfaz de QGIS.

A continuación, se hace una descripción más detallada de los distintos parámetros calculados y su fundamentación.

**La pendiente** se puede definir de forma sencilla como la inclinación de la línea de máxima pendiente de una ladera en un punto determinado (pendiente o inclinación de la línea de máxima pendiente del plano tangente). Los algoritmos que determinan la pendiente se basan en el cálculo del gradiente en las dos dimensiones o direcciones principales de las mallas o rejillas regulares con estructura ráster (filas, que coinciden la dirección norte-sur; y columnas que coinciden con la dirección este-oeste). Los gradientes se pueden calcular como Ec. 4 y Ec 5:

$$grad\ x = \frac{z_{i,j+1} - z_{i,j-1}}{2d}; \quad (Ec. 4)$$

$$grad\ y = \frac{z_{i+1,j} - z_{i-1,j}}{2d} \quad (Ec. 5)$$

Donde z: es la elevación en las filas i y columnas j indicadas; y d: es el tamaño de la celda del ráster.

A partir de los gradientes se puede calcular la pendiente como (Ecuación 6):



$$pendiente = \tan^{-1}(\text{grad } x^2 + \text{grad } y^2)^{1/2} \quad (\text{Ec. 6})$$

La pendiente es probablemente la variable o parámetro más influyente en los estudios ambientales, y tiene una influencia decisiva sobre procesos como los movimientos de ladera, la erosión, la esorrentía y las inundaciones, la hidrología en general, la insolación o incluso sobre otros aspectos como el desarrollo de la vegetación o la distribución de la fauna. En la ingeniería civil o en la geomorfología, la pendiente constituye el factor más relevante en la determinación de la estabilidad de una ladera o talud y la generación de movimientos de ladera. Al alterarse la pendiente de una ladera los esfuerzos cortantes en la masa del suelo tienden a aumentar por la acción gravitatoria lo que desencadena en la ruptura. En resumen, cuando aumenta la pendiente, aumenta la inestabilidad (Vorpal et al., 2012). Dependiendo de la pendiente se pueden generar además distintas tipologías de movimientos, por ejemplo, desprendimientos en pendientes altas o deslizamientos en pendientes moderadas, con distintas velocidades de desarrollo. Por otra parte, la distribución de las pendientes en las distintas partes o elementos de los deslizamientos varía de unos a otros; es más elevada en los escarpes que en el cuerpo o en el pie, e incluso puede ser prácticamente nula en la cabecera (Zárate et al., 2023).

La orientación de la pendiente, definida como la dirección de inclinación del terreno que tiene cada celda, se puede calcular igualmente a partir de los gradientes con la siguiente expresión (Ecuación 7):

$$orientacion = \tan^{-1} \left( \frac{\text{grad } y}{\text{grad } x} \right) \quad (\text{Ec. 7})$$

**La orientación** incide en las propiedades físicas de los suelos, la exposición a las condiciones climáticas locales (Wang et al., 2022) y a algunos procesos atmosféricos como lluvia, viento, luz solar, y humedad del suelo (Vorpal et al., 2012). Así, la diferencia de humedad que

experimentan las laderas orientadas al norte o al sur a partir de ciertas latitudes, junto a las relaciones geométricas entre la orientación de las discontinuidades rocosas y las laderas influyen de forma decisiva en la estabilidad de las laderas (Bieniaswki, 1979; Selby, 1982, Cruden, 1989; Fernández et al., 2008). Respecto a los elementos, no hay diferencias globales entre la orientación de los distintos elementos, pero el análisis local de las orientaciones sí puede ayudar en la identificación de los escarpes o los pies de los movimientos de ladera (Zárate et al., 2023).

**La iluminación o sombreado** es una variable que cuantifica la irradiancia de una fuente de iluminación sobre una superficie, que en el caso del terreno es la luz solar. De esta manera, depende de la posición del sol, por lo que varía a lo largo del día y del año; y de la disposición geométrica de la ladera, es decir depende de la pendiente y orientación de la misma en cada punto. Aunque se puede calcular de varias formas, la más común es a través de la siguiente fórmula:

$$iluminación = \cos \cos (i) \quad (Ec. 8)$$

Siendo  $i$ , el ángulo de incidencia de la luz solar, que el ángulo que forma la posición del sol con la normal a la superficie. Así, las superficies perpendiculares a la posición del sol tendrán un valor de 1 y este disminuirá a medida que el ángulo aumenta.

La iluminación influye sobre las condiciones de temperatura y humedad del terreno, la vegetación, etc., y es una de las componentes a tener en cuenta en los modelos de reflectancia y albedo (Felicísimo, 1994). En los estudios de movimientos de ladera aparece como factor relacionado con la humedad del suelo. Sin embargo, en el caso de la caracterización y monitorización de los movimientos, lo que importa es que permite identificar rasgos y elementos por las diferencias de iluminación; es decir, por el sombreado que permita distinguir

los escarpes, el cuerpo, los lóbulos o el pie, para lo cual se puede recurrir a distintas posiciones del sol como fuente de iluminación (Schulz, 2004; Guzzetti et al., 2012). En este trabajo, sin embargo, se emplea un modelo de sombreado clásico como el que propone la fuente de iluminación con un azimut de 315 (NW) y un ángulo de elevación de 45°.

**La curvatura** se refiere a cambios de pendiente u orientación en una determinada dirección o plano (Conforti et al., 2014), que puede ser el horizontal, vertical o general (tangente a la superficie). Es un parámetro relacionado con la permeabilidad y la escorrentía superficial (Wang et al., 2022). Muy relacionado con la curvatura, especialmente la vertical, se ha definido el índice de posición topográfica (TPI), que se considera más adecuado para los objetivos de este trabajo, ya que permite identificar de forma más clara los elementos de los movimientos de ladera (Zárate et al., 2023).

**El índice de posición topográfica (TPI)** permite la descripción de aspectos morfológicos del terreno a través de la determinación y sectorización de las pendientes (Franklin, 2020; Roy et al., 2021; Grabowski et al., 2022; Ghosh et al., 2023; Zárate et al., 2023). Tiene distintas formulaciones que se basan en el análisis focal en torno al pixel central de referencia, siendo la más conocida la que calcula la diferencia entre la elevación del pixel central ( $z_i$ ) y la media de la elevación de los píxeles dentro de una ventana ( $\underline{z}$ ) (Guisan et al., 1999; Gallant and Wilson, 2000; Weiss, 2000; Saha et al., 2022), generalmente de 3x3:

$$TPI = (z_i - \underline{z}) \quad (Ec. 9)$$

El TPI, desde su definición, ha tenido una gran aplicación dentro de las ciencias ambientales, desde la geomorfología y la geología, la hidrología y la climatología, los estudios agronómicos y forestales, faunísticos, etc. (De Reu et al., 2013). En geomorfología, como se ha apuntado

anteriormente, permite la clasificación y segmentación de las laderas (Jennes, 2006; Franklin, 2020) entre las partes bajas, generalmente de forma cóncava; o altas, de forma generalmente convexa. Esto tiene una influencia fundamental en la formación de los movimientos de ladera, ya que condiciona la hidrografía y la circulación de las aguas de escorrentía, la actuación de los agentes erosivos, o el propio equilibrio de fuerzas en la ladera, de ahí que se utilice como factor determinante en multitud de estudios (Zárate et al., 2012, 2013). Más concretamente, en la caracterización y monitorización de los deslizamientos, permite detectar formas como la coronación y la base de los escarpes de los movimientos de ladera, lobulaciones y escalones, así como el pie del movimiento y especialmente su punta (Zárate et al., 2023). De ahí que muchos trabajos hayan utilizado este índice o la curvatura para la extracción (semi)automática de rasgos y elementos como se verá en un apartado más adelante (Chudy et al., 2019; Mauri et al., 2021). Un aspecto importante a considerar, es que este parámetro es escalable en función de la resolución y el tamaño de la ventana, lo que producirá una segmentación en elementos de distinto tamaño; de hecho, algunas clasificaciones de las formas del terreno que se basan en este índice, utilizan para ello dos escalas de análisis (Jennes, 2006).

**El índice de rugosidad del terreno (TRI** en sus siglas inglesas) es una medida que permite cuantificar la variabilidad de la elevación o altitud del terreno en un área determinada. Existen distintos algoritmos para calcular índices de rugosidad, tanto partiendo del modelo de elevaciones como de la pendiente (Felicísimo, 1994; Glenn et al., 2006; Pawluszek and Borkowski, 2017). En este caso se calcula a partir del modelo de elevaciones, como la raíz cuadrada de la sumatoria de los cuadrados de las diferencias de la elevación del pixel central ( $z_{00}$ ) respecto de la elevación del resto de las celdas ( $z_{ij}$ ) de la ventana utilizada, generalmente de 3x3 (Ecuación 10) (Riley et al., 1999):

$$TRI = \sqrt{\sum_{i=-1}^1 (z_{00} - z_{ij})} \quad (Ec. 10)$$

El índice de rugosidad del terreno (TRI) es una medida de la irregularidad del terreno (Liao et al., 2002; Dai et al., 2023), que indica cambios en el mismo por la actuación de agentes erosivos o de la geodinámica externa, o incluso de carácter antrópico (Rozycka et al., 2017; Dall'Asta et al., 2017; Mauri et al., 2021). En el caso de los movimientos de ladera, es uno de los factores que suele ser considerado en los análisis de susceptibilidad, aunque en muchos casos presenta un grado de correlación alta con la pendiente. En la caracterización de los movimientos, la rugosidad es una medida de la actividad de los movimientos en su totalidad y también para la identificación de escarpes principales y secundarios, escalones, grietas, etc. (Rozycka et al., 2017; Pawluszek and Borkowski, 2017; Pawluszek, 2019; Zárata et al., 2023).

Finalmente, se ha considerado el **índice topográfico de humedad (TWI)**, que está relacionado con la pendiente de un terreno y se emplea para establecer zonas donde se concentra la humedad o zonas de acumulación de agua. También conocido como índice topográfico compuesto (CTI) y se determina mediante la ecuación 11 (Moore et al., 1993; Gessler et al., 1995; Pawluszek and Borkowski, 2017):

$$TWI = \ln\left(\frac{A_s}{\tan \tan \beta}\right) \quad (Ec. 11)$$

Donde  $A_s$  es el área drenada (flujo acumulado) para una celda específica y  $\tan \beta$  es la pendiente de la celda analizada.

El índice de humedad topográfica (TWI) es un índice hidrológico con múltiples aplicaciones, no solo en hidrología, sino en geomorfología y en estudios agronómicos y forestales (Rozycka

et al., 2017; Sorensen et al., 2006). En los estudios de movimientos de ladera es importante porque permite representar la distribución espacial de la humedad del suelo (Liao et al., 2022), además de las condiciones de saturación del mismo durante la lluvia (Vorphal et al., 2012). Así, la determinación del índice TWI en la caracterización de los movimientos de ladera permite conocer la configuración de las redes de drenaje (Rozycka et al., 2017, Zárate et al., 2023) y las zonas donde se concentra el agua que conduce a la inestabilidad de la masa (Hong et al., 2016; Yang et al., 2021; Zárate et al., 2023).

Para la determinación de la pendiente y orientación de la pendiente se utilizó el software ArcGIS con el empleo de las herramientas Slope y Aspect, mientras que, para el TPI, TRI y TWI se usó el software QGIS y SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses).

Puesto que algunos de los parámetros como el TPI o el TRI son muy sensibles a la escala o resolución de trabajo, se han calculado no solo a la resolución original de los modelos (0.1 m) sino a una resolución inferior (1 m), con el objeto de detectar objetos o elementos de mayor tamaño. Para ello, el modelo se ha remuestreado a la nueva resolución mediante la herramienta correspondiente de QGIS.

### **3.3.3.2. Identificación y delimitación de elementos por interpretación visual**

A partir de los MDE, los modelos derivados y las ortofotografías, se pueden identificar y extraer rasgos y elementos del terreno en general, y de los deslizamientos en particular. Esta identificación se puede hacer de forma manual o (semi)automática. En este apartado se considerará la primera y en el siguiente la segunda.

La interpretación de imágenes y ortoimágenes es la metodología más empleada en la elaboración de inventarios de movimientos de ladera, basada en la identificación de sus rasgos

y elementos típicos (escarpes, escalones, grietas, lobulaciones, etc.) a partir de los cambios en el color o tono de gris que producen en la imagen y sobre todo en su textura (Brunsden et al., 1993). La disponibilidad cada vez mayor de series de fotografías o de imágenes de satélite permite que los inventarios lleguen a ser multitemporales (Guzzetti et al., 2012; Fernández et al., 2021). La fotointerpretación se ha llevado a cabo habitualmente mediante la observación estereoscópica de imágenes, tanto en estereoscopios analógicos como en restituidores digitales; o mediante observación monoscópica sobre ortoimágenes, directamente, o con el apoyo de modelos digitales de elevaciones, lo que permite una visión pseudo-3D.

Así, la interpretación de ortoimágenes ha sido profusamente empleada para la identificación de rasgos y elementos de los movimientos de ladera, así como para el estudio de su evolución, tanto en fotogrametría aérea convencional (Walstra et al., 2004; DeWitte et al., 2008; Prokesova et al., 2010; Fernández et al., 2017; Kamps et al., 2017; como en fotogrametría VANT (Niethammer et al., 2012; Turner et al., 2015; Fernández et al., 2015; 2016; Cardenal et al., 2019; Warrick et al., 2019; Dang et al., 2016; Hut et al., 2018; Fan et al., 2019; Ma et al., 2019). La obtención de índices de vegetación como el GLI (Green Leaf Index) a partir de las imágenes también puede ayudar con fines de clasificación de terrenos o inventario de deslizamientos y sus elementos (Rau et al., 2011; Shi and Liu, 2015; Fernández et al., 2021; Zárata et al., 2023).

Por otra parte, la propia observación del MDE y los derivados del mismo también se emplea para la identificación de movimientos de ladera y sus rasgos característicos (Kasai et al., 2009; Al-Rawabdeh et al., 2016; Zárata et al., 2023). Así, como se ha comentado antes, los modelos de pendiente y rugosidad permiten distinguir especialmente los escarpes, pero también los escalones, grietas y otros elementos como el cuerpo, los lóbulos o el pie (Rozycka et al., 2017; Pawluszek and Borkowski, 2017; Pawluszek, 2019; Zárata et al., 2023). También lo hacen los

modelos de sombreado (Schulz, 2004; Guzzetti et al., 2012), e incluso los modelos de TWI a través de la observación de la configuración de las redes de drenaje (Rozycka et al., 2017, Zárata et al., 2023). Sin embargo, son los modelos de TPI, los que permiten una identificación clara de formas como la coronación y la base de los escarpes de los movimientos de ladera, así como el pie del movimiento y especialmente su punta (Zárata et al., 2023), de tal forma que facilitan su extracción automática como se tratará en el siguiente apartado.

En este trabajo se realizó una observación combinada de las ortofotografías y los modelos derivados para la interpretación de los rasgos y elementos de los movimientos de ladera estudiados, lo que llevó a una zonación de las áreas de estudio. Los elementos y rasgos identificados se delinearón como una capa vectorial poligonal en el software QGIS. En concreto, se digitalizaron elementos del movimiento de ladera principal y otras zonas inestables observables, que posteriormente se emplearon para la caracterización del movimiento mediante análisis SIG.

Adicionalmente se crearon otras capas vectoriales con los elementos de la vegetación (árboles, arbustos, cultivos...) y las construcciones (edificaciones, casetas de labores, carreteras y caminos, etc.) existentes en las zonas, con el objeto de crear máscaras para analizar los parámetros morfométricos del terreno en cada uno de los elementos, sin el sesgo que introducirían los objetos situados sobre él. Para la identificación y digitalización de la vegetación, se determinó el índice de vegetación GLI (Green Leaf Index; Louhaichi et al., 2001) que trabaja sobre los valores digitales nativos de las bandas rojo, verde y azul (RGB).

### **3.3.3.3. Extracción de elementos**

La extracción semiautomática o automática de rasgos y elementos de movimientos de ladera se realiza mediante el análisis digital de imágenes (Sandric et al., 2010; Stumpf et al., 2013; Kamps



et al., 2017; Koutalakis et al., 2021) o a partir de los MDE o sus derivados (Kasai et al., 2009; Fernández et al., 2016; Al-Rawabdeh et al., 2016; Peppas et al., 2017; 2019; Hu et al., 2018; Ma et al., 2019); lo que permite tanto la caracterización de los movimientos como su monitorización. En algunos casos se aplican para ello técnicas de análisis basadas en objetos o de aprendizaje automático (Li et al., 2015; Pradhan et al., 2017; Pawluszek and Borkowski, 2020)

Como se ha apuntado en el apartado anterior, la pendiente y la rugosidad permiten identificar zonas de escarpe (fuertes pendientes), del cuerpo o el pie del deslizamiento (Kasai et al., 2009; Rozycka et al., 2017; Pawluszek and Borkowski, 2017; Pawluszek, 2019; Zárate et al., 2023), como también lo hacen los modelos de sombreado (Schulz, 2004; Guzzetti et al., 2012). Esto posibilita su extracción al menos de forma semiautomática, ya que una vez identificados se puede delimitar manualmente o mediante la clasificación del parámetro correspondiente.

Sin embargo, es la curvatura o el índice de posición topográfico, el parámetro que permite extraer las líneas de ruptura de la pendiente del terreno y en consecuencia delimitar las distintas partes del movimiento (Tarolli et al., 2012; Peppas et al., 2017; Borkowski, 2017; Chudy et al., 2019; Mauri et al., 2021 a y b; Zeybek et al., 2019; Zárate et al., 2023). De forma especial se pueden identificar los escarpes, o más bien, las líneas de ruptura o borde superior e inferior de los mismos. No obstante, otros elementos como el pie de los deslizamientos y sobre todo la punta (“tip”) también son susceptibles de ser detectados (Chudy et al., 2019).

El procedimiento seguido ha consistido en obtener el mapa de TPI y simbolizarlo con distintos esquemas de clasificación con el objeto de encontrar los umbrales más adecuados para detectar las líneas de ruptura, que finalmente se establecen en +0,05 para la línea superior del escarpe y -0,05 para la línea inferior. Una vez seleccionados los umbrales, se aplica la herramienta de

skeletonization (herramientas de SAGA) para trazar las líneas (vectores) en formato shapefile. Tanto los ráster clasificados y simbolizados en color como sobre todo los vectores de las distintas fechas se pueden emplear para ver la evolución de los escarpes (avance de los secundarios o retroceso del principal y laterales). Con los vectores se pueden hacer medidas aproximadas de los desplazamientos con las herramientas de medición de QGIS.

Sin embargo, como se indicó anteriormente este índice, como otros parámetros, es escalable (Jeness, 2006), lo que permite detectar rasgos de distinta magnitud que puedan pasar desapercibidos en la resolución original. Por ello, el TPI y en todo el procedimiento descrito, se ha ensayado con una resolución de 1 m, lo que ha permitido detectar mejor otros rasgos como el pie, donde la ruptura de la pendiente no es tan abrupta, y por ello es más visible en una mayor longitud en el perfil.

#### **3.3.3.4. Análisis de los elementos**

Dentro de la aplicación de los SIG a los movimientos de ladera destacan la elaboración de inventarios y bases de datos, el análisis factorial y la modelización del riesgo (Chacón et al., 1992; 2006; Reichenbach et al., 2018...). En lo relativo a la caracterización y monitorización de los movimientos, por un lado, hay que mencionar todos los aspectos relativos a la cartografía y delimitación de los movimientos y sus elementos, así como la aplicación de técnicas de análisis de imágenes o texturales, que aunque no son propias de los SIG, sí se implementan frecuentemente en ellos (Stumpf et al., 2013; Koutalakis et al., 2021; Al-Rawabdeh et al., 2016); por el otro, hay que señalar los análisis que se realizan para la comparación de modelos o la medida de desplazamientos en puntos relevantes de territorio (Niethammer et al., 2012; Turner et al., 2015; Fernández et al., 2016; Zárate et al., 2021).

En este punto, sin embargo, el análisis SIG que se describe es el análisis estadístico zonal aplicado a la caracterización morfométrica de los movimientos y sus elementos (Zárate et al., 2023). El objetivo de este análisis es caracterizar los elementos en distintas tipologías y las cinemáticas de los movimientos, que pueda contribuir al conocimiento de sus propiedades en general y en la zona de estudio en particular. Este mayor conocimiento puede luego ser empleado en el reconocimiento de movimientos en otras zonas.

El procedimiento seguido comienza con la digitalización de los movimientos, sus elementos, así como de la vegetación y construcciones existentes en la zona. Los elementos que se identificaron y diferenciaron en los deslizamientos principales (con ciertas variantes en las distintas zonas estudiadas) son: escarpe principal (en la cabecera), cabecera, escarpes-flancos laterales, escarpes secundarios, escarpes de contrapendiente, cuerpo, cuerpos o lóbulos secundario y pie de la ladera. También se detectaron escarpes, cuerpos y pies de otras inestabilidades menores en las zonas de estudio.

Una vez obtenidos las correspondientes capas vectoriales, se rasterizan; a continuación, se clasifican las capas de la vegetación y las construcciones en dos capas binarias; y finalmente, se aplica la calculadora ráster para obtener una nueva capa ráster de los elementos de los movimientos (principales y otros), excluyendo las zonas de vegetación y de construcción mediante la ecuación 12 (Zárate et al., 2023):

$$\text{Raster} = \text{raster elemen.} \times (\text{raster veget.} - 1) \times (\text{raster construc.} - 1) \quad \text{Ec.12}$$

Finalmente, el análisis de los parámetros morfométricos (pendiente, aspecto, TPI, TRI y TWI) de los distintos elementos se ha realizado mediante herramientas de análisis zonal (estadística zonal y e histograma zonal) de QGIS. La estadística zonal permite elaborar tablas de parámetros estadísticos de tendencia central (media y moda) y dispersión (rango, desviación típica y

coeficiente de variación), con el que se caracterizan los movimientos y sus elementos. El histograma zonal permite el cálculo de las frecuencias en cada elemento y la elaboración de diagramas de frecuencias o histogramas; además, en el caso de la orientación, que es una variable circular, permite el cálculo de los estadísticos circulares correspondientes (media, moda, rango y radio vector medio).

### **3.3.4. Análisis de la evolución de los movimientos de ladera**

Se han aplicado diferentes tipos de análisis para el seguimiento de la evolución de los movimientos de ladera estudiados. Estos comprenden la obtención de MDS de diferencias (MDSdD o más resumidamente MdD), el análisis comparativo de perfiles, la comparación de modelos derivados, la medida de desplazamientos en puntos relevantes extraídos manualmente y en campo, y la medida de desplazamientos horizontales a partir correlación digital de imágenes.

Todos estos métodos se consideran más bien métodos de estudio de la evolución de movimientos de ladera que de técnicas de monitorización, ya que no permiten un seguimiento continuo al estar basadas en campañas de captura de datos mediante VANT.

La monitorización en sentido estricto sólo podría considerarse en el caso de que estas campañas sean de una frecuencia muy elevada, lo que normalmente solo puede hacerse en un periodo de tiempo corto de monitorización, por ejemplo, en un episodio de gran actividad.

#### **3.3.4.1. MDS de diferencias**

Los MDE (MDS en este caso) de diferencias (MdD) o modelos diferenciales son una de las aproximaciones más empleadas en los estudios evolutivos de movimientos de ladera, ya que, aun tratándose de aproximaciones muy sencillas, permiten detectar cambios en la superficie del terreno o en los elementos situados sobre ella. Se han empleado tanto en modelos obtenidos con

fotogrametría aérea convencional (Walstra et al., 2004; Bruckl et al., 2006; Cardenal et al., 2008; DeWitte et al., 2008; Corsini et al., 2009; Prokesova et al., 2010; Kamps et al., 2017; Fernández et al., 2017); LiDAR aéreo (Cavalli & Marchi, 2008; Dewitte et al., 2008; Kasai et al., 2009; Corsini et al., 2009; Jaboyedoff et al., 2012; Palenzuela et al., 2015; Bossi et al., 2015; Ortuño et al., 2017; Pradhan et al., 2017; Liu et al., 2019; ; Yeh et al., 2017; Mora et al., 2018; Tiwari et al., 2018); y con fotogrametría VANT (Hsieh et al., 2016; Niethammer et al., 2011; 2012; Stumpf et al., 2013; Turner et al., 2015; Fernández et al., 2015; 2016; Lindner et al., 2016; James et al., 2017; Peternel et al., 2017; Peppas et al., 2017; 2019; Hu et al., 2018; Rossi et al., 2018; Cardenal et al., 2019; Fan et al., 2019; Ma et al., 2019).

A pesar de ello, los MdD tienen una serie de limitaciones. La primera de ellas, ya comentada anteriormente, tiene que ver con que, en la mayor parte de los casos, como el que nos ocupa, lo que se calculan son diferencias entre MDS (MDSdD) y no entre MDT, sobre todo cuando se utilizan nubes de puntos fotogramétricas en áreas cubiertas con vegetación densa. El empleo de técnicas de filtrado y clasificación es complicado en estos casos, si no se dispone de datos procedentes de LIDAR, que permitan la penetración de parte de la radiación emitida desde el láser y el rebote de esta en el terreno. Por su parte, la edición manual de los modelos que ha sido aplicada en algún trabajo de fotogrametría aérea y con una baja densidad de vegetación (Fernández et al., 2013; 2017), no suele ser aplicable en los trabajos con datos de fotogrametría VANT, incluso cuando la vegetación no sea muy densa ya que la precisión requerida no se alcanzaría normalmente. Así, los MdD calculados para el análisis del movimiento del terreno solamente son aprovechables en las zonas libre de vegetación y otros elementos como construcciones, para lo que se crean las máscaras comentadas en apartados posteriores. No obstante, la observación de objetos determinados (árboles, pequeñas construcciones y otros

elementos) en los MDS posibilita en ocasiones la medida de desplazamientos (Fernández et al., 2016).

La segunda es aún más fundamental, y es que los MdD detectan cambios en la superficie (descensos y ascensos), que, sin embargo, salvo en determinados casos, no se pueden asociar directamente al desplazamiento de puntos. Así, un punto con MdD negativo o positivo no puede asociarse de forma directa a un desplazamiento vertical de dicho punto, que se corresponda con un descenso (por ejemplo, un escarpe) o un ascenso (por ejemplo, la cabecera en un deslizamiento rotacional); sino que puede deberse a un desplazamiento horizontal de la masa del cuerpo del movimiento. Este movimiento horizontal puede dejar una zona deprimida detrás de él o una zona de acumulación de material en el pie del movimiento.

De esta manera, el desplazamiento real de una superficie se ha de determinar con otro tipo de aproximaciones: la más común, que se abordará más adelante es la medida del desplazamiento en puntos discretos, extraídos de los MDS; otra aproximación, que igualmente se abordará más adelante, es la determinación de desplazamientos 3D de la superficie, que permite determinar dichos desplazamientos de una forma más global que los puntos discretos, pero que también ofrece algún tipo de incertidumbre en cuanto al desplazamiento real.

En el presente trabajo, los MdD se calcularon mediante la herramienta de calculadora de ráster de los software utilizados (ArcGIS o QGIS), restando siempre el MDS de la fecha más antigua del MDS (1) de la fecha más moderna (Ec.13):

$$MdD = MDS_2 - MDS_1 \quad Ec. 13$$

De esta manera un MdD negativo corresponderá a descenso de la superficie y un MdD positivo corresponderá a un ascenso de la superficie en la vertical de cada celda del raster MDS.

Para su representación, se realizó un ajuste de los rangos de elevación, eliminando valores superiores a 3 metros, lo que permitió saturar la paleta de colores en valores más pequeños y poder detectar movimientos sutiles.

#### **3.3.4.2. Obtención y comparación de perfiles**

Los perfiles o secciones topográficas son una herramienta muy empleada para la observación de los cambios y desplazamientos que se producen en la superficie del terreno como los movimientos de ladera. Así, en numerosos trabajos se obtienen y comparan los perfiles a partir de los MDE fotogramétricos o LiDAR (Hsieh et al., 2016; Dang et al., 2016; Fernández et al., 2017; Peternel et al., 2017; Peppia et al., 2017; 2019; Hu et al., 2018; Rossi et al., 2018; Ma et al., 2019; Warrick et al., 2019)

Los perfiles proporcionan una visualización clara de la topografía y la microtopografía, en el caso de disponer modelos de muy alta resolución, como los obtenidos con vuelos VANT o con técnicas terrestres; así como de la pendiente, la curvatura vertical (o el TPI) y la rugosidad. Puesto que los movimientos de ladera son procesos gravitacionales, la realización de secciones verticales según la línea de máxima pendiente permite disponer de perfiles longitudinales en los que se pueden observar todos los rasgos característicos como escarpes, coronación y cabecera, cuerpo principal, pie, frente y punta de los pies e incluso grietas y escalones. No obstante, la obtención de perfiles transversales también resulta de interés para observar la morfología transversal del cuerpo o el pie del movimiento, los flancos y los escarpes laterales.

Por otra parte, en el análisis de la evolución de los movimientos, la comparación de los perfiles de distinta fecha posibilita la observación bastante clara de los cambios en la topografía a lo largo del tiempo y los desplazamientos, generalmente hacia abajo y hacia adelante de la masa, así como el eventual retroceso o desarrollo de los escarpes, formación de escarpes secundarios

y escalones o el avance del cuerpo y del pie del movimiento. Se trata pues de una aproximación cualitativa al estudio de la evolución del movimiento, aunque sobre estas líneas de perfil se puedan hacer estimaciones aproximadas y parciales de los desplazamientos, en concreto de la retracción del escarpe principal o del avance del pie del movimiento.

Para analizar los cambios topográficos en la zona de estudio se establecieron líneas de perfil tanto longitudinales como transversales, que fueron generados a partir de los MDS empleando la herramienta de “Profiles” del software ArcGIS con un muestreo horizontal de 0.50 m. Para el emplazamiento de los perfiles longitudinales y transversales, se consideró el desplazamiento de suelo evidenciados en inspecciones de campo y rasgos superficiales.

### **3.3.4.3. Cálculo de desplazamientos 3D**

Como se ha indicado anteriormente, los MdD no miden adecuadamente el desplazamiento de una superficie 3D como la del terreno y, en su caso, los elementos situados sobre él, que frecuentemente presentan una disposición inclinada o incluso muy inclinada. Una medida más adecuada sería la distancia normal a las superficies que se comparan o, dicho de otra forma, el desplazamiento se calcularía como la distancia mínima entre las dos superficies.

En la actualidad hay distintos software, tanto de carácter libre (por ejemplo, CloudCompare, <https://www.danielgm.net/cc/>) como de carácter comercial (por ejemplo, ISite), que permiten calcular las distancias entre superficies con distintas finalidades, como puede ser el propio control de calidad de los modelos 3D; o, como en esta caso, medir desplazamientos entre superficies de distinta fecha para el estudio y control de la deformación. Las medidas se pueden realizar entre dos nubes de puntos (distancias nube-nube, C2C), entre una nube de puntos y una malla (distancias nube-malla, C2M) y entre dos mallas (distancias malla-malla, M2M), entendiendo por malla un modelo continuo, generalmente de tipo red de triángulos irregulares



(TIN). Las nubes de puntos pueden ser procedentes de instrumentación LiDAR terrestre o aérea; o de fotogrametría (nubes densas resultantes de un proceso de orientación).

Los métodos de nube-nube o C2C son más simples y eficientes para calcular desplazamientos entre dos nubes de puntos (Gojic et al., 2021; CloudCompare, 2023). Los desplazamientos se calculan como las distancias euclidianas entre los puntos individuales de la nube de puntos que se toma como origen y su respectivo vecino más cercano en la nube de puntos de destino. Esta forma de calcular distancias es lo que se conoce como distancia del vecino más cercano. Por lo tanto, no se requiere ningún modelado de la superficie (triangulación, ajuste de planos, kriging, etc.).

Dentro de los métodos C2C, el conocido como M3C2 (Multiscale Model to Model Cloud Comparison) cuantifica los desplazamientos utilizando puntos de interés, es decir, puntos submuestreados de la nube de puntos de origen (Lague et al., 2013; Gojic et al., 2021; CloudCompare, 2023). El proceso se puede dividir en tres pasos: primero, se obtienen dos subnubes intersectando la nube de puntos de origen y de destino con un cilindro de diámetro  $d$  y eje principal alineado con el vector normal estimado; en segundo lugar, los puntos de cada subnube se proyectan sobre el eje del cilindro, lo que produce dos distribuciones de puntos a lo largo de la dirección normal; en tercer lugar, estas distribuciones se utilizan para calcular el desplazamiento como la distancia entre los valores medios de las distribuciones. La ventaja de este método es su robustez en el cálculo de los desplazamientos, además de ser el único método que permite calcular el signo o sentido del desplazamiento a partir de la nube origen. En la línea de proporcionar mayor significación a la medida de los desplazamientos, se han desarrollado otros métodos como el F2S3 (Gojic et al., 2020; 2021) en el que se calcula vectores de

desplazamiento entre las nubes de puntos que son suavizados mediante técnicas de super-voxelización.

En el método de nube-malla o C2M, los desplazamientos se calculan como las distancias euclidianas más cortas entre cada punto de la nube de puntos de origen y su punto de la malla (arista o cara en mallas TIN) más cercano (Cignoni et al. 1998; Gojcic et al., 2021; CloudCompare, 2023). En definitiva, para cada punto de la nube comparada, se buscará el triángulo más cercano en la malla que se emplea como referencia. Se utiliza preferentemente cuando las mallas nubes de puntos no son muy densas, en cuyo caso, las estimaciones de las distancias pueden ser poco exactas, dado que las mallas pueden tener bastante incertidumbre o incluir artefactos.

Estos tipos de medida de distancias están siendo ya empleado en la monitorización y estudio de la evolución de movimientos de ladera (Liu et al., 2018; Gojcic et al., 2021; Teo et al., 2023) o del análisis de la deformación de taludes o terraplenes artificiales (Berg et al., 2020).

En este trabajo se opta por el método de M3C2 ya que además de ofrecer una mayor representatividad en la medida de distancias o desplazamientos entre nubes de puntos, eliminando ruido en la misma, posibilita la medida del sentido del desplazamiento que, en el caso de los movimientos de ladera y otros procesos como la erosión, es fundamental para comprender la cinemática de los movimientos. Se ha utilizado el software libre CloudCompare (CloudCompare, 2023 b), que permite aplicar este método M3C2, además de métodos de punto a punto convencionales y malla a punto.

Una vez obtenido el modelo de distancias 3D, se proyecta sobre el plano horizontal, pudiendo exportar como un raster, una imagen o una matriz de puntos (archivo de texto). En este caso se ha exportado como raster (TIFF) y así se incorpora como capa al SIG. Allí, se puede comparar

visualmente con el MdD y otras técnicas que miden desplazamientos; y también numéricamente, calculando las diferencias. En concreto, se han calculado las diferencias entre el modelo de distancias 3D menos el MdD. Los resultados de este análisis son interesantes, puesto que permiten conocer algunos aspectos de la geometría del desplazamiento entre superficies, en este caso las superficies correspondientes a una zona inestable en dos momentos. Así las diferencias netas entre ambos modelos (distancias 3D-MdD) suelen ser positivas en zonas de descenso general de la superficie (distancias 3D y MdD negativos), al ser los MdD más negativos que las distancias 3D, ya que la distancia 3D es usualmente la menor distancia posible en términos absolutos; y por la misma razón estas distancias suelen ser negativas en las zonas de ascenso general (distancias 3D u MdD positivos). Si se consideran tanto las distancias 3D como los MdD en términos absolutos, la diferencia entre ambos suele ser negativa tanto en zonas de ascensos como de descensos. Esta diferencia es mayor en valor absoluto cuanto más pendiente sea la superficie, mientras que en superficies llanas tiende a 0 (coinciden ambas distancias, 3D y MdD). En términos absolutos, solo se encuentran diferencias positivas (distancias 3D mayores que los MdD) en zonas irregulares donde se produzcan desplazamientos horizontales de cierta importancia.

#### **3.3.4.4. Comparación de modelos derivados y elementos extraídos**

La comparación de modelos derivados se ha llevado a cabo mediante observación visual, mediante el cálculo de diferencias de modelos y mediante perfiles significativos y su correspondiente análisis. También se considera la comparación entre elementos extraídos de alguno de los modelos derivados como las líneas de ruptura de la pendiente desde los TPI.

La observación visual de los modelos derivados complementa a los análisis anteriores (MdD, perfiles y desplazamientos 3D) y permite observar cómo cambia la pendiente o la rugosidad

(TRI), la curvatura (TPI), la orientación o el sombreado, y el TWI (Zárate et al., 2023). A partir de la observación de estos cambios se pueden hacer inferencias sobre la cinemática o los cambios en la hidrografía del movimiento de ladera.

En el caso de los TPI, que son los modelos que han permitido la extracción de elementos como las líneas de ruptura de la pendiente, más concretamente los bordes superior e inferior de los escarpes, así como la punta del pie de los movimientos, la comparación de dichas líneas y la estimación manual de desplazamientos mediante las herramientas de medida del SIG, proporciona información muy interesante sobre la cinemática del movimiento (Zarate et al., 2023). En el caso de los escarpes, indica y estima la retracción de los escarpes o su desarrollo. En el segundo informa y estima el avance del movimiento en la parte del pie, y la posible ocupación del terreno o los objetos de interés situados sobre él (carreteras, construcciones, etc.). Finalmente, la comparación de perfiles de los modelos derivados es una forma sencilla de proporcionar información rápida de la variación de los parámetros correspondientes a lo largo de estas líneas significativas de los movimientos, siendo de especial interés el perfil longitudinal (Zárate et al., 2023). Así, se puede cuantificar si a lo largo de la evolución del movimiento la pendiente aumenta o disminuye o cómo cambia la orientación o la hidrografía (TWI).

#### **3.3.4.5. Cálculo de desplazamientos en puntos característicos**

El cálculo de desplazamientos en puntos característicos o relevantes es uno de los métodos más utilizados tanto para la monitorización como para los estudios evolutivos de movimientos de ladera. El cálculo de desplazamientos se basa en la medida de coordenadas en dichos puntos, mediante métodos directos de campo (métodos topográficos o GNSS) y métodos indirectos sobre fotografía aérea y/o nubes de puntos.

Dentro de los métodos de medida directa sobre el terreno, hay que citar en primer lugar la topografía clásica con el empleo de estaciones totales convencionales o robotizadas (Angeli et al., 2000; Savvaidis, 2003; Arnhardt, 2007; Bertacchini et al., 2009; Arbanas et al., 2012; Arbanas and Arbanas, 2015); aunque, sin duda, la versatilidad y rapidez que ofrecen los métodos GNSS hace que estos sean los métodos más utilizados en la mayor parte de las situaciones, por lo que se han empleado en un gran número de trabajos (Abernethy & Rutherford, 2000; Gili et al., 2000; Chadwick et al., 2005; Corsini et al., 2005; Squarzoni et al., 2005; Bruckl et al., 2006; Baldi et al., 2008; Bertacchini et al. 2009; Rawat et al., 2011; Zárate, 2011; Echeverría et al., 2013; Cina and Piras, 2013; Psimoulis et al., 2018; Zárate et al., 2021).

Por lo que respecta a la medida indirecta de los puntos sobre productos fotogramétricos (MDE y ortoimágenes), los trabajos en los que se ha aplicado esta técnica para los estudios evolutivos de movimientos de ladera son también muy abundantes (Bruckl et al., 2006; Niethammer et al., 2011; 2012; Stumpf et al., 2013; Fernández et al., 2015, 2016; Lindner et al., 2016; James et al., 2017; Dang et al., 2016; Mozas Calvache et al., 2017; Perternel et al., 2017; Rossi et al., 2018; Cardenal et al., 2019; Zárate et al., 2021). En este caso, primero se ha de realizar la extracción de los puntos desde los MDS y las ortoimágenes, y posteriormente se calculan los desplazamientos.

#### **3.3.4.5.1. Cálculo de desplazamientos entre puntos GNSS**

En el caso de las redes de puntos GNSS, las coordenadas se han obtenido con GNSS diferencial, como se indicó previamente; dichas coordenadas son proyectadas y con altura elipsoidal. Los desplazamientos entre cada campaña se calculan de forma sencilla restando las coordenadas de los puntos de cada campaña a los puntos homónimos de la campaña inmediatamente posterior. Así, los desplazamientos totales a lo largo de todo el periodo de monitoreo se calculan restando

las coordenadas iniciales (primera campaña) a las coordenadas finales (última campaña). Así, valores positivos indican desplazamientos al E, N y hacia arriba, y valores negativos indican desplazamientos al W, S y hacia abajo (Zárate et al., 2021).

#### **3.3.4.5.2. Extracción de puntos desde vuelos VANT y cálculo de coordenadas**

En el caso de los puntos extraídos desde los productos procedentes de los vuelos VANT, la primera operación es la extracción manual de estos puntos. Para ello, se localizan puntos que sean inequívocamente identificables en las ortoimágenes de todos los vuelos. Los puntos se digitalizan manualmente sobre las primeras ortofotos tanto en la zona considerada estable como en la inestable, tratando en lo posible de ubicarlos en suelo descubierto y sin vegetación. Posteriormente, los puntos se editan y se desplazan utilizando como base las ortoimágenes de las fechas posteriores, con lo que se dispondrá de una red de puntos para cada una de las fechas los vuelos analizados (Fernández et al., 2015; 2016; Cardenal et al., 2019; Zárate, 2021). Las redes de puntos son almacenadas como capas de puntos en el SIG, tomando como base el sistema de coordenadas WGS84-UTM 17S (Zárate et al., 2021).

Las coordenadas horizontales (x e y) se calculan mediante las herramientas correspondientes de geometría del SIG sobre las ortoimágenes de cada fecha, mientras que la coordenada vertical (z) se calcula mediante herramientas de extracción de datos ráster desde los MDS.

#### **3.3.4.5.3. Cálculo de desplazamientos entre puntos de vuelos VANT**

En este caso, una vez obtenidas las coordenadas de la red de puntos extraída en el paso anterior, en el sistema de referencia WGS84-UTM 17S, se procede de igual manera que con los puntos medidos con GNSS. Así, los desplazamientos entre cada campaña se calculan de forma sencilla restando las coordenadas de los puntos de cada campaña a los puntos homónimos de la campaña

inmediatamente posterior; y los desplazamientos totales a lo largo de todo el periodo analizado se calculan restando las coordenadas iniciales a las coordenadas finales. Como antes, valores positivos indican desplazamientos al E, N y hacia arriba, y valores negativos indican desplazamientos al W, S y hacia abajo (Fernández et al., 2015; 2016; Cardenal et al., 2019; Zárate et al., 2021).

Los desplazamientos calculados en la zona estable servirán para evaluar las precisiones e incertidumbres de los productos, mientras que los calculados en la zona inestable son los que se emplearán para medir los desplazamientos del terreno y en consecuencia la cinemática de los movimientos (Fernández et al., 2016; Zárate et al., 2021).

#### **3.3.4.6. Estimación de la deformación por correlación de imágenes**

Las metodologías antes descritas permiten analizar la deformación de forma discreta o parcial, por lo que se hace necesario buscar alternativas que permitan una aproximación más completa. Dentro de ellas, en los últimos años se han desarrollado dos tipos de métodos: la interferometría diferencial de radar (DInSAR), que permite medir la cinemática de las deformaciones del terreno u otras superficies en la única dimensión de la línea de visión (LOS), aunque luego se puede descomponer en su componente horizontal y vertical (Ferretti et al., 2001; Berardino et al., 2002); y el seguimiento o la detección del desplazamiento de píxeles (POT por sus siglas en inglés) mediante técnicas de correlación digital de imágenes, que permite medir deformaciones en 2D en el plano perpendicular a la observación (Leprince, 2007; Delacourt et al., 2007; McCormick et al., 2010). El DInSAR ha demostrado su capacidad para estimar la deformación con gran precisión y en los últimos años con alta resolución, incluso cuando se utilizan imágenes de satélite, lo que, unido a elevada resolución temporal, ha hecho que la técnicas se haya aplicado en diversos ámbitos de monitorización de la deformación, incluidos

los movimientos de ladera; sin embargo, requiere del procesamiento de imágenes de radar, que están fuera del ámbito de este trabajo.

Por su parte, las técnicas de POT por correlación de imágenes se puede aplicar a cualquier tipo de imagen, desde las de radar (Dille et al., 2021; Xia et al., 2022; Polcari et al., 2019) a las ópticas o incluso térmicas, y con cualquier resolución sin más limitación que la dimensión del fenómeno que se estudie, por lo que se emplea profusamente en imágenes tanto como de satélite (Berthier et al., 2005; Leprince, 2007; Stumpf et al., 2014; 2017; Rosu et al., 2015; Ding et al., 2016; Lacroix et al., 2018; Ali et al., 2020; Mulas et al., 2020; Samanta and Majumdar, 2020; Yang et al., 2020; Provost et al., 2022; Yao et al., 2022; Zhang et al., 2022) como aéreas (Fernández and Whitworth, 2016; ) o de VANT (Lucieer et al., 2014; Puniach et al., 2021; Hermle et al., 2022; Mugnai et al., 2023) para analizar la componente horizontal 2D de la deformación.

Así, se ha empleado para estudiar la deformación cosísmica y tectónica (Leprince et al., 2007), el flujo de los glaciares (Kääb et al., 2000; Berthier et al., 2005; Heid y Kääb, 2012), los movimientos de ladera (Delacourt et al., 2007, Travelletti et al., 2012; Lucieer et al., 2014; Stumpf et al., 2014; Rosu et al., 2015; Fernandez and Whitworth 2016; Lacroix et al., 2018; Polcari et al. 2019; Samanta and Majumdar 2020; Mulas et al., 2020; Yang et al., 2020; Dille et al. 2021; Xia et al. 2021; Cai et al., 2022; Mugnai et al, 2023; Yao et al., 2022; Zhang et al., 2022) y otros procesos de la superficie terrestre ( Vermeesch y Drake, 2008; Ali et al., 2020).

El principio de las técnicas POT es utilizar ventanas deslizantes que recorren la imagen para calcular una función de similitud entre una imagen maestra y una imagen esclava, y así determinar el movimiento de la superficie (Leprince et al. 2007; Provost et al. 2022). La deformación mínima que se detecta con este método depende de la resolución espacial de las



imágenes utilizadas, aunque en términos de píxeles va desde subpíxeles (1/5 e incluso menos según algunas estimaciones) hasta deformaciones de muchos píxeles (Lacroix et al. 2020). Como en el caso del InSAR, los métodos POT pueden verse afectados por ruido de fondo cuando se implementan en regiones grandes; por otra parte, cuando se trabaja con imágenes ópticas, las nubes, la vegetación y los terrenos irregulares pueden empeorar los resultados de la correlación y por tanto de la estimación de la deformación horizontal (Provost et al. 2022).

#### **3.3.4.6.1. Estimación de deformaciones mediante Software Cosi-Corr**

El algoritmo Co-registration of Optically Sensed Images and Correlation, abreviado como COSI-Corr se basa en la correlación de imágenes en el dominio de la frecuencia, para detectar deformaciones sub-píxel (LePrince et al., 2007; Rosu et al., 2015; Yang et al., 2020; Caltech, 2023). El algoritmo utiliza un núcleo de imagen para calcular la correlación entre dos imágenes para lo que se proponen dos algoritmos de correlación (LePrince et al., 2007): el primero es un método de correlación que calcula el desplazamiento relativo entre el par de imágenes tras aplicarles una transformada de Fourier; el segundo es un método de correlación estadística definido como el valor absoluto del coeficiente de correlación de una ventana en una imagen y la ventana correspondiente en la otra imagen. El error de registro o desplazamiento estimado, expresado en píxeles, se determina a partir de una aproximación cuadrática, por separado en cada dimensión x e y. El análisis de correlación se aplica utilizando tamaños de ventana decrecientes de 128 a 16 píxeles, con pasos de 4 píxeles entre correlaciones adyacentes y un radio de búsqueda de unos pocos metros. La ventana inicial se utiliza para estimar aproximadamente los desplazamientos a nivel de píxeles y la ventana final se utiliza para examinar desplazamientos sutiles a nivel de subpíxeles. Las imágenes de entrada deben registrarse conjuntamente con la mayor precisión posible, ya que el algoritmo de correlación es

sensible a errores de registro erróneo de imágenes. Además, el ruido de la imagen o las diferencias de iluminación (por ejemplo, causadas por las nubes y las sombras), tendrán un efecto de deterioro en el análisis de desplazamiento.

Las imágenes pueden ser de cualquier fuente y resolución, como imágenes ópticas de satélite (Leprince et al., 2007; Stumpf et al., 2014; Lacroix et al., 2018; Ali et al., 2020; Dille et al., 2020; Yang et al., 2020; Yao et al., 2022; Xia et al., 2022; Zhang et al., 2022) o MDE sombreados (Scherler et al., 2008; Lucieer et al., 2014). COSI Corr también puede trabajar con fotografía aérea ortorrectificada (Fernández and Whitworth, 2016), como con ortoimágenes VANT (Lucieer et al., 2014). Dado que el algoritmo funciona con imágenes de una sola banda, las imágenes RGB o multispectrales, en su caso, deben convertirse en una imagen de una sola banda.

El algoritmo de desplazamiento en COSI-Corr requiere una serie de configuraciones iniciales: tamaño en píxeles de la ventana que se correlacionarán en las direcciones x e y; paso en píxeles entre dos ventanas deslizantes en x e y; rango de búsqueda o distancia máxima en píxeles donde se buscarán los desplazamientos en la dirección x e y (Lucieer et al., 2014). El resultado de la aplicación del algoritmo proporciona tres imágenes de salida: las dos primeras imágenes proporcionan el campo de desplazamiento 2D calculado a partir de la correlación de imágenes que contiene el desplazamiento en x (este-oeste con el este positivo) y los desplazamientos en y (norte-sur con el sur positivo), ambos expresados en metros. La tercera imagen muestra la distribución espacial de la relación señal-ruido, lo que permite evaluar la calidad del desplazamiento calculado. También se proporciona un mapa con símbolos lineales (flechas) con el módulo y la dirección de desplazamiento, calculados a partir de los desplazamientos en x e y.

El software está implementado en IDL y está disponible en el software de procesamiento de imágenes ENVI. Finalmente, el desplazamiento calculado se puede visualizar utilizando campos vectoriales que ilustran la dirección y la magnitud de los desplazamientos.

En las zonas de estudio, se ha probado con distintas imágenes de partida, como las bandas de las ortoimágenes, en especial la banda 3 (rojo); los modelos de sombreado; e incluso los modelos de pendiente. Además, se ha probado con distintos tamaños de ventana inicial y final, así como de distintos pasos, todos ellos medidos en píxeles. Aunque luego se ampliarán los detalles en los resultados, en general se han empleado mayores ventanas de inicio (hasta 1024) en donde cabe esperar mayores desplazamientos como en El Plateado (en ambos períodos analizados), y menores donde los desplazamientos sean menores (512 en el segundo periodo de Colinas Lojanas; y 256 en Victoria y en el primer periodo de Colinas Lojanas).

#### **3.3.4.6.2. Cálculo de desplazamientos basado en SfM**

Es un método de trabajo desarrollado por investigadores del Grupo Sistemas Fotogramétricos y Topométricos de la Universidad de Jaén, consistente en identificar y extraer puntos característicos del terreno sobre imágenes sucesivas de distinta época. Al igual que los métodos SfM encuentran puntos por correlación entre imágenes estereoscópicas que se utilizan como puntos de paso entre ellas en los procesos de orientación fotogramétrica, en este caso se trata de puntos coincidentes entre imágenes de distinta época. Una vez extraídos los puntos, se calculan sus coordenadas (xy); y en el caso de disponer de un MDS, se calcula también la coordenada vertical (z). A partir de las coordenadas, como en algunos métodos anteriores, se calculan los desplazamientos.

En este caso, se ha aplicado a todas las zonas de trabajo y todas las fechas, salvo la última en El Plateado, donde el gran cambio que se produce entre imágenes no permite la correlación entre imágenes.

### **3.3.4.6.3. Otros métodos para el cálculo de desplazamientos o deformaciones**

Además de los anteriores, que son los que se van a emplear en este estudio, en distintos trabajos previos se han desarrollado otros software para el cálculo de desplazamientos, basados en la correlación digital de imágenes:

- El software IRIS, desarrollado por NHAZCA, implementa algoritmos de procesamiento de imágenes para monitorear los desplazamientos y cambios en el terreno o en estructuras. Permite trabajar con imágenes terrestres, aéreas y satelitales de cualquier tipo de datos (ópticos, térmicos, infrarrojos cercanos) permitiendo alcanzar una precisión de subpíxeles en el seguimiento de desplazamientos (NHAZCA, 2023; Hermle et al., 2022; Mugnai et al., 2023). El código para el DIS está disponible gratuitamente para OpenCV (OpenCV, 2023). Los parámetros que deben configurarse en IRIS son: tamaño de paso entre las dos ventanas deslizantes, en píxeles para x e y.; el tamaño de la ventana móvil; la resolución de subpíxeles. La salida es un mapa de colores y flechas.
- CIAS (Correlation Image Analysis): Basado en la correlación cruzada normalizada desarrollada por Heid and Kaab (2012). Se han aplicado deslizamientos a partir de imágenes de satélite (Mulas et al., 2020).
- MPIC–OPT (Multiple-Pairwise Image Correlation toolbox for processing OPTical images) desarrollado por la Universidad de Estrasburgo y disponible en la Plataforma

de Explotación de GeoAmenazas de la Agencia Espacial Europea. Ha sido aplicado a diversos tipos de procesos geológicos a partir de imágenes de satélite (Provost et al., 2022).

- Algoritmo de correlación de imágenes integrado en la librería abierta de estereofotogrametría de MicMac desarrollado por el IGN de Francia (Rosu et al., 2015; Pierrot et al., 2023). Ha sido aplicado a deformaciones del terreno a partir de imágenes de satélite (Rosu et al., 2015; Stumpf et al., 2017).
- Software propios como DIC-Flo, desarrollado por la Universidad de Florencia Mugnai et al., 2023); u otros como los incluidos en Puniach et al. (2021) o Samanta et al. (2020).

## **CAPITULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Zona de estudio Victoria

#### 4.1.1. Ortoimágenes y zonificación del área inestable

En la Figura 17 se muestran las ortoimágenes obtenidas en la zona de estudio en las dos fechas consideradas con una resolución de 0.05 m. Se asume una incertidumbre de 0.10 m.

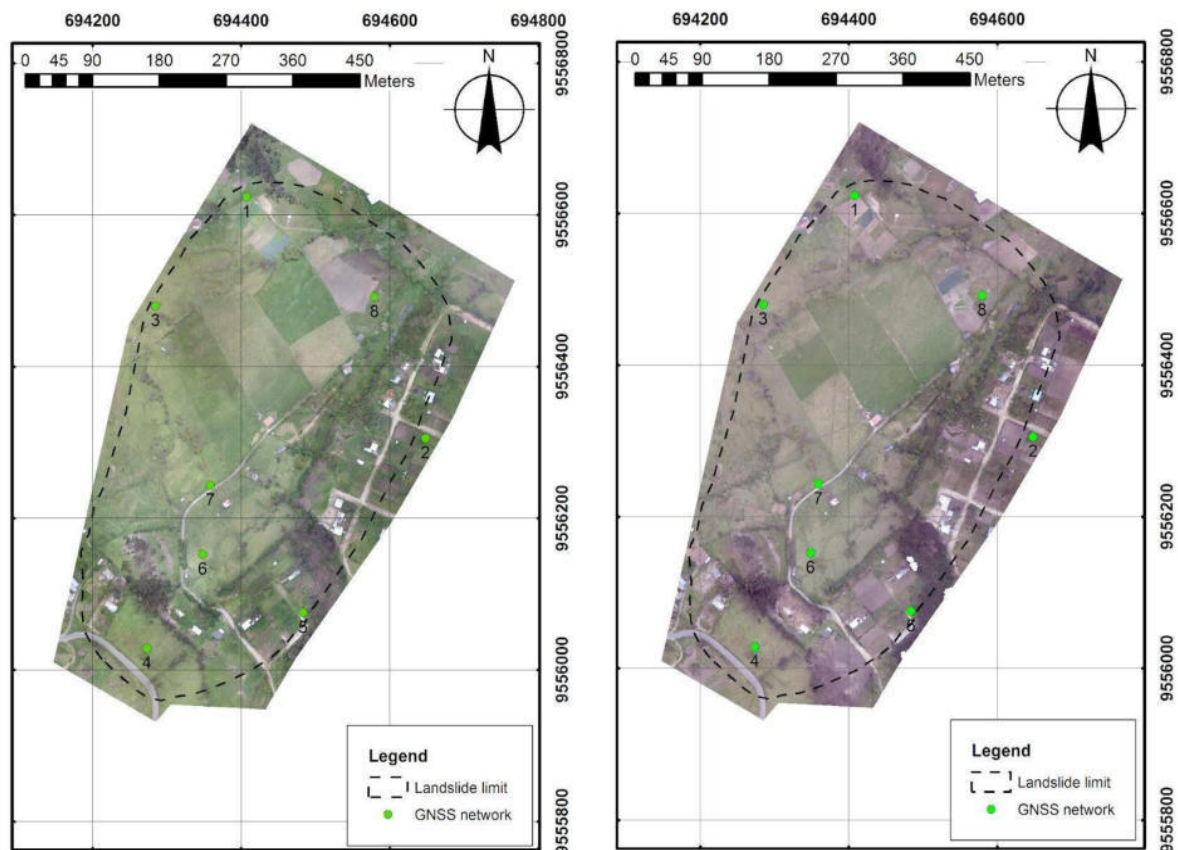


Figura 17. Ortoimágenes del sector Victoria generados a partir de los vuelos con VANT: a) 20/febrero/2016; b) 11/junio/2016.

A partir de la ortoimagen, pero con el apoyo del MDS, los MdD y los modelos derivados, se lleva a cabo la fotointerpretación y delineación de los elementos de la zona inestable del sector de Victoria que se muestra en la Figura 18.

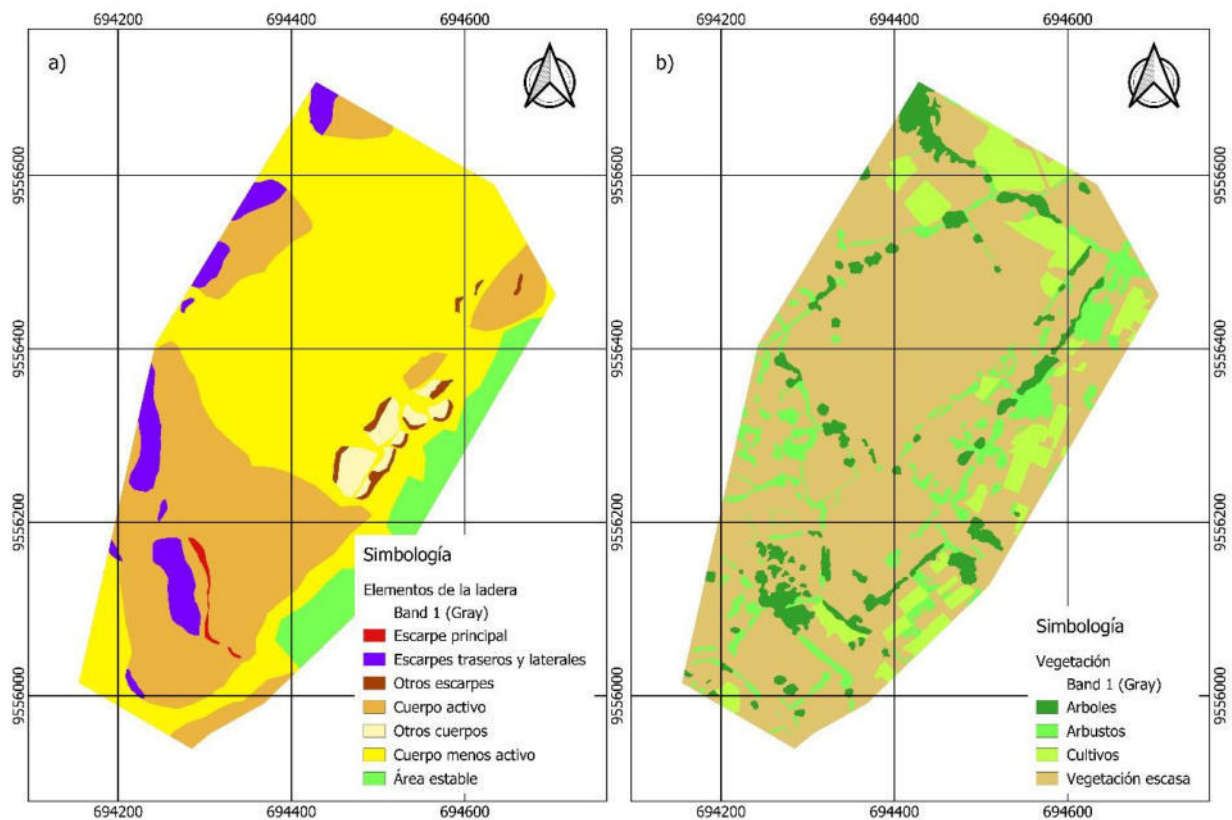


Figura 18. Mapa de zonificación de la zona de Victoria mediante fotointerpretación.

En el sector de Victoria, se observa una zona de inestabilidad general, que de acuerdo a las evidencias observadas superficialmente corresponde a un proceso de reptación, en el que se observan zonas más activas (más evidencias como grietas, escalones, pequeños escarpes, lobulaciones, etc.) y más inactivas (menos o ninguna evidencia). Localmente se observan escarpes, uno de ellos el que delimita la zona más activa y otros que circunda la zona inestable en general. Además, se observan inestabilidades que corresponden a pequeños deslizamientos o colapsos, en relación con arroyo que desciende por el este de la zona. Así, los elementos diferenciados en este sector son:



#### Área de inestabilidad principal:

1. Escarpe principal del área más activa de la inestabilidad en el periodo estudiado, se localiza por encima del camino describiendo una forma discontinua más alargada por el oeste.
2. Escarpes traseros y laterales en los límites del área más activa de la inestabilidad, se distribuyen por el sur y el oeste, tras el escarpe principal, en un zona más amplia.
3. Cuerpo del área más activa de la inestabilidad, contiene a los escarpes, aunque se extiende hacia la parte más alta de la ladera estudiada, hasta la carretera.
4. Área menos activa dentro de la inestabilidad, se sitúa en la parte más baja de la ladera.

#### Inestabilidades menores:

5. Otros escarpes de las inestabilidades menores, que corresponden a pequeños deslizamientos o colapsos en el sector del barranco.
6. Otros cuerpos de las inestabilidades menores, corresponden a los cuerpos de los movimientos antes citados en el sector del barranco.

#### Área estable

7. Área estable, que se localiza en sectores marginales de la zona de estudio, sobre todo al sureste de la misma.

### 4.1.2. Modelos digitales de superficies y su evolución

En este apartado se presentan los MDS de las dos fechas consideradas, junto al modelo de diferencia y los desplazamientos en 3D entre ambas fechas, así como los correspondientes perfiles topográficos.

#### 4.1.2.1. Modelos digitales de superficies

En la Figura 19 se muestran los MDS obtenidos en la zona de estudio en las dos fechas consideradas, con una resolución de 0.10 m y una incertidumbre vertical igualmente de 0.10 m. Se representa con una paleta gradual que pasa del marrón en las partes más deprimidas al amarillo y azuladas en las partes más elevadas.

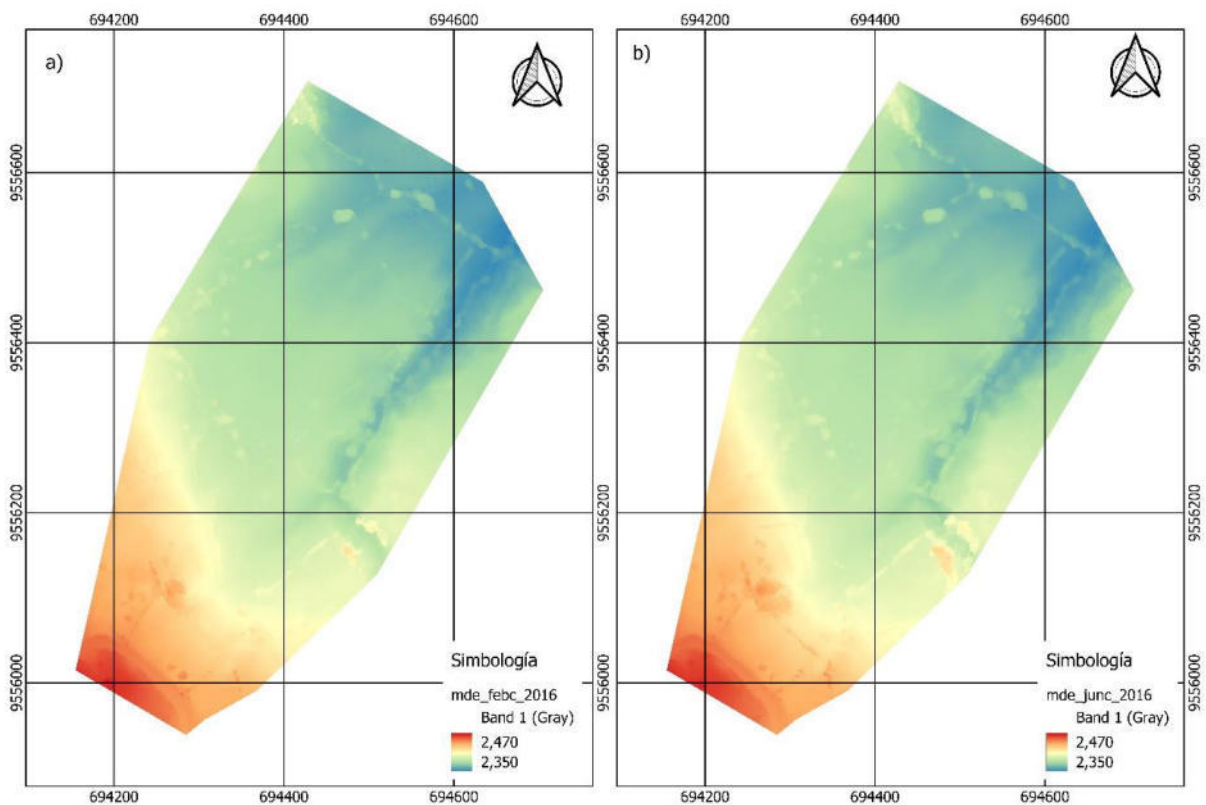


Figura 19. MDS del sector Victoria generados a partir de los vuelos con VANT: a) 20/febrero/2016; b) 11/junio/2016.

El análisis del modelo se muestra en la Tabla 13. En ella, se observa que la elevación media de los escarpes de la inestabilidad principal, sobre todo la del escarpe principal (2416 m) está unos metros por encima del cuerpo activo (2404 m), estando el área poco activa aún más baja topográficamente (2376 m); los escarpes de las otras inestabilidades menores presentan una elevación media ligeramente superior a sus cuerpos. El parámetro más significativo de la dispersión de los valores de la altitud lo proporciona el rango por unidad de área, que es superior en los escarpes (valores en torno a 2 para el principal y los correspondientes a las inestabilidades menores) que, en los cuerpos de las inestabilidades, especialmente en las áreas menos activas de la inestabilidad principal.

Tabla 13. Análisis de la elevación (en metros) por elementos en el sector Victoria.

Elemento	Media	Moda	Mínimo	Máximo	Rango	Desv.T.	Rang/A
<b>Área de inestabilidad principal</b>							
Escarpe principal	2416	2413	2411	2422	12	3,14	1,99
Escarpe trasero	2408	2384	2372	2462	90	19,43	1,33
Cuerpo activo	2404	2390	2352	2459	107	22,07	0,19
Áreas poco activas	2384	2386	2351	2471	120	20,63	0,14
<b>Inestabilidades menores</b>							
Otros escarpes	2379	2380	2355	2389	33	7,71	2,23
Otros cuerpos	2376	2375	2367	2387	20	4,01	0,78
<b>Área estable</b>							
Área estable	2395	2399	2373	2415	42	10,74	0,70

En la Figura 20 se muestra la distribución de la elevación en los distintos elementos del deslizamiento, que muestra la concentración de las elevaciones del escarpe principal, en valores más altos, frente a la mayor dispersión del resto de los elementos, con elevaciones decrecientes en el cuerpo activo, el área estable y las áreas poco activas.

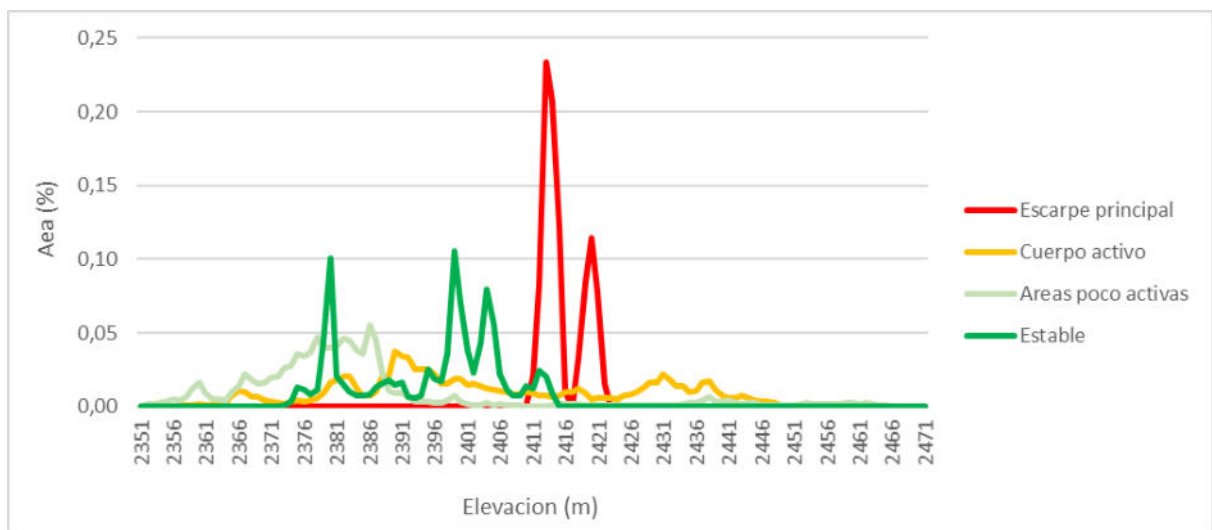


Figura 20. Distribución de la elevación en los elementos principales de la ladera.

#### 4.1.2.2. Modelos de diferencias

El MdD obtenido a partir de la sustracción de los MDS se presenta en la Figura 21, con la misma resolución que los MDS (0.10 m) y una incertidumbre de 0.10 m. Se ha diseñado con una paleta de color trimodal mediante la cual los valores negativos, correspondientes a un descenso de la superficie, se representan en azul-verde; y los positivos, que corresponden a un ascenso de la misma, lo hacen en rojo-naranja. Además, el rango de valores se ha ajustado para poder observar cambios sutiles en los MdD.

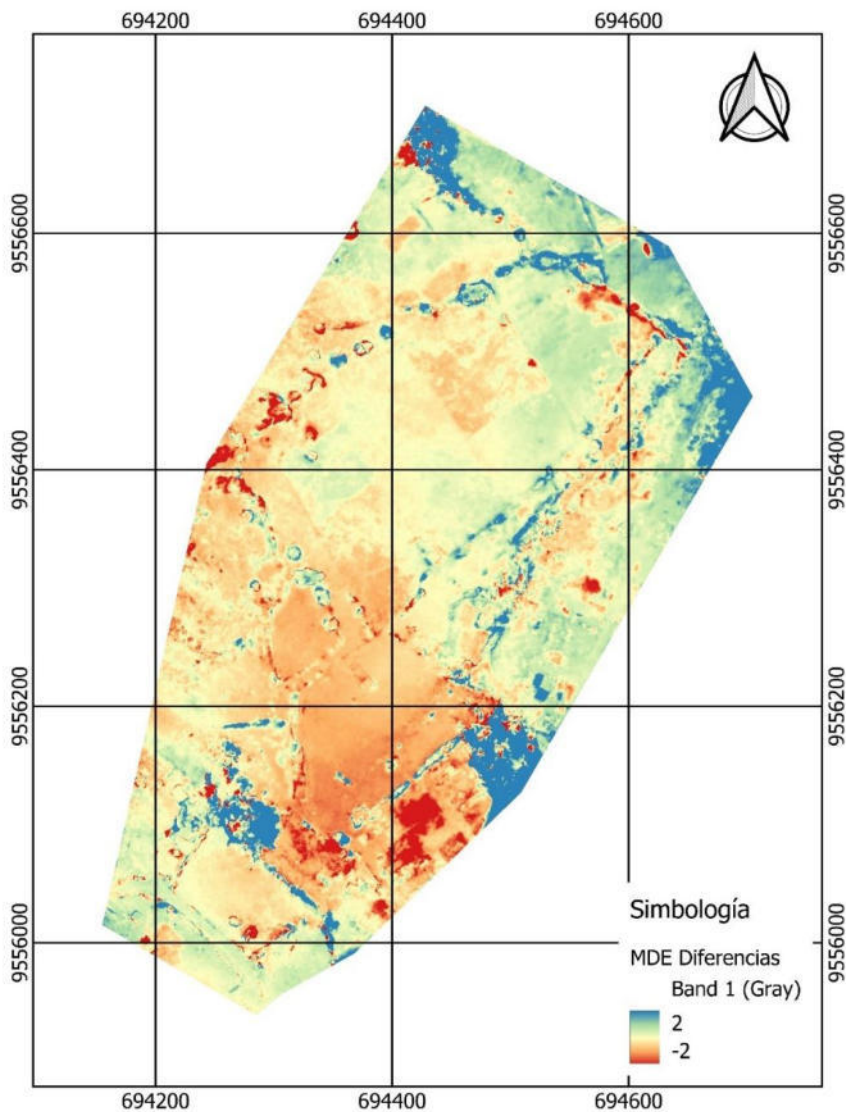


Figura 21. Mapa de diferencias de elevación (MdD) de la zona de estudio Victoria.

A partir del MdD se observan cambios en la superficie, que no sólo corresponden a cambios de elevación del terreno, sino a una modificación de la cobertura vegetal. Descartando algunos crecimientos de la cubierta vegetal, pero también decrecimientos, que se observan en distintos sectores del área de estudio, algunos de ellos de menor cuantía que pueden estar en relación con cultivos en la parte más baja de la ladera, se observan algunos cambios que parecen producirse en el terreno. Así, se observa una zona clara de descensos de hasta 1 – 1.5 m en el sector central, bajo la carretera y en torno al camino; así como otras zonas dispersas en el sector noreste y en la zona del arroyo, a ambos lados del mismo. Por el contrario, no se observan ascensos de forma clara (no superan los 0.3 m). También se observan algunos aparentes ascensos y descensos en las partes marginales, probablemente más debidas a desajustes de los modelos que a cambios reales de la superficie.

En general, los cambios sutiles observados en la superficie del terreno, son más compatibles con un área inestable de tipo reptación que con un movimiento claro y en desarrollo. Tan solo en la zona central antes mencionada se observa un descenso más acusado que apunta a la formación de un escarpe incipiente, junto con otras zonas de inestabilidad de menor extensión.

El análisis de los MdD por elementos se muestra en la Tabla 14. Los mayores descensos medios se presentan en los escarpes, sobre todo el principal (-0.56 m) y en la parte más activa del cuerpo principal (-0.34), presentando leves ascensos medios en las áreas poco activas y estables (0.10 y 0.20 m, respectivamente) y en los cuerpos de las inestabilidades menores (0.08). Salvo la última los ascensos parecen estar más relacionados con cambios en la vegetación de la parte baja de la ladera que con cambios reales del terreno.

Tabla 14. Análisis de los modelos de diferencias por elementos en el sector Victoria. Los valores indicados se expresan en metro.

<b>Elemento</b>	<b>Media</b>	<b>Moda</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Rango</b>	<b>Desv.T.</b>	<b>Rang/A</b>
<b>Área inestable principal</b>							
Escarpe principal	-0.56	-0.68	-1.53	5.42	6.95	0.52	-0.93
Escarpe trasero	-0.09	-0.17	-6.48	8.22	14.70	1.30	-14.41
Cuerpo activo	-0.28	-0.36	-8.50	8.72	17.22	0.86	-3.07
Áreas poco activas	0.10	-0.04	-9.50	8.15	17.65	1.48	14.76
<b>Inestabilidades menores</b>							
Otros escarpes	-0.34	-0.47	-1.93	2.49	4.42	0.50	-1.46
Otros cuerpos	0.08	0.02	-8.85	9.28	18.13	1.01	12.59
<b>Área estable</b>							
Estable	0.23	0.24	-3.77	7.61	11.38	1.72	7.47

### 4.1.2.3. Desplazamientos 3D

El modelo de desplazamientos 3D entre las nubes de puntos calculado con el software CloudCompare se muestra mediante una vista pseudo-3D en la Figura 22 y el mapa correspondiente una vez proyectado en la Figura 23.

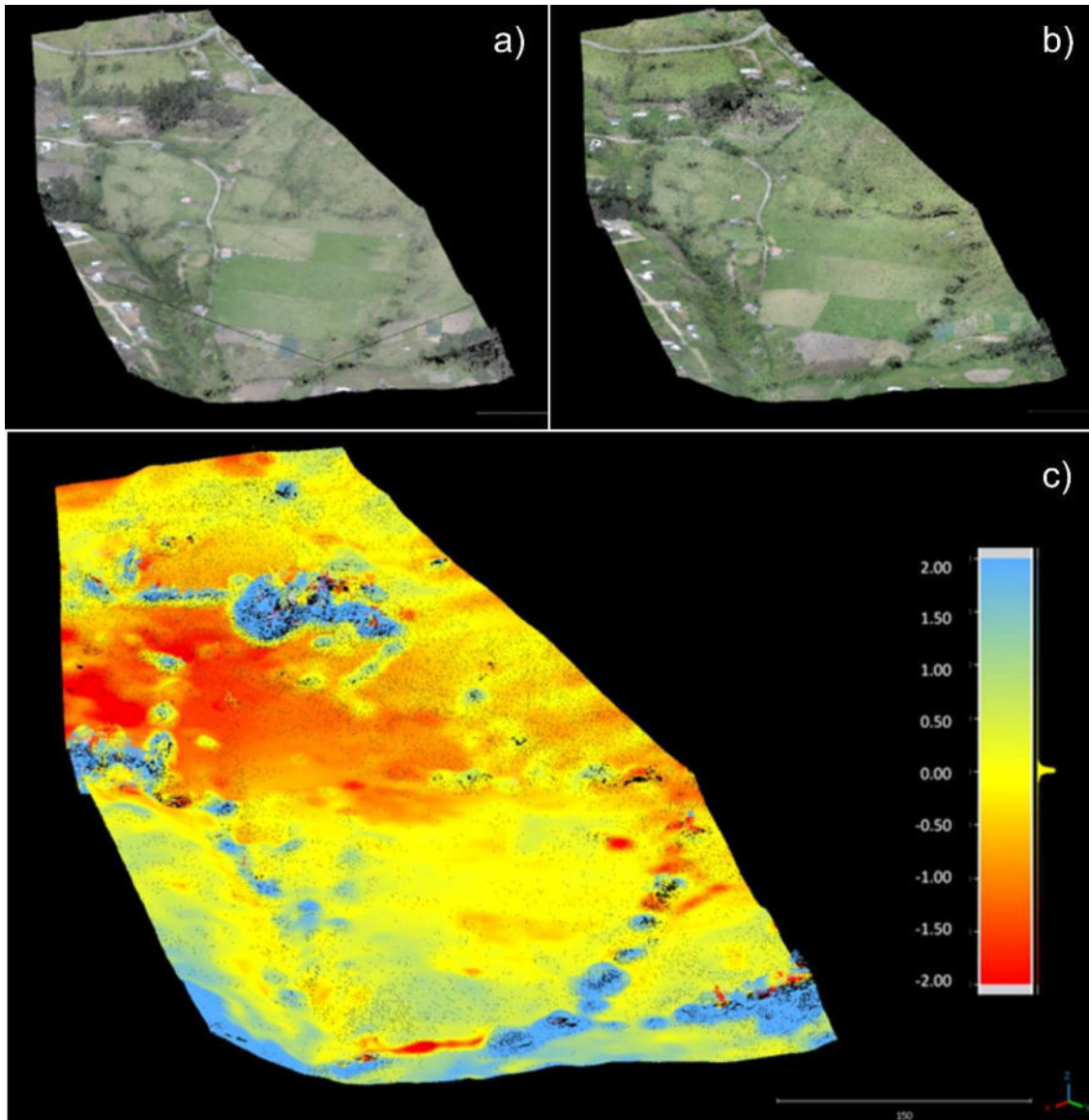


Figura 22. Vista pseudo-3D de la zona de Victoria. a) 20/febrero/2016; b) 11/junio/2016, c) mapa proyectado de desplazamientos.



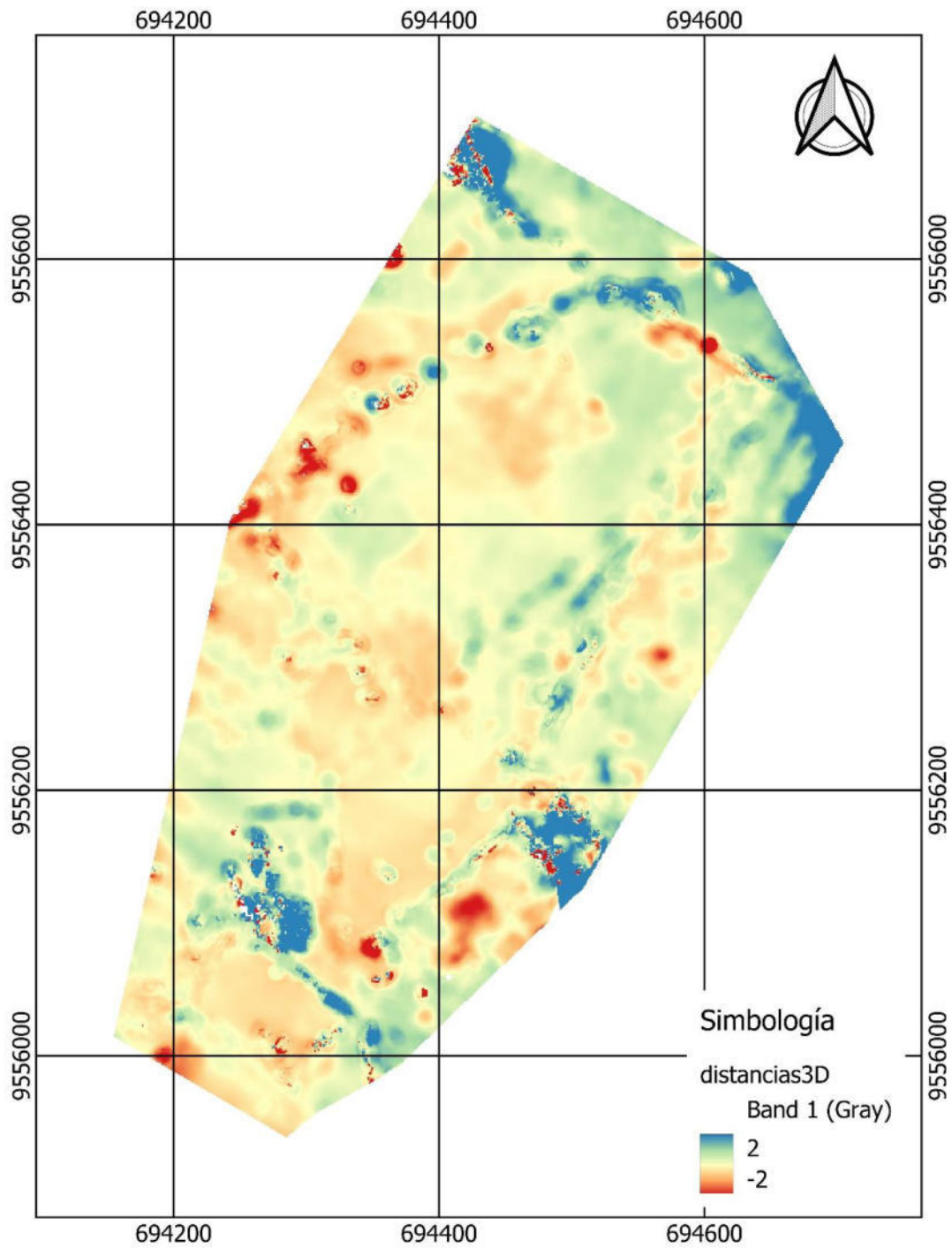


Figura 23. Mapa de desplazamientos de la zona de Victoria. Las diferencias de elevación están representadas en metros.

La observación de ambos permite identificar cambios en la superficie muy similares a los del modelo de diferencias. Así, se observan desplazamientos negativos, que indican que la superficie del segundo MDS está por debajo de la del primero; y positivos, cuando el segundo MDS está sobre el primero. La mayor parte de los cambios observados se deben a crecimientos o decrecimientos de la vegetación, o a pequeñas modificaciones en las arboledas e incluso en las construcciones, casetas y otros elementos ajenos al terreno. Sin embargo, en el sector central se aprecian una zona de desplazamientos negativos de hasta 2 m, en el entorno del escarpe principal y la parte más activa del cuerpo del área inestable; además, hay otras zonas dispersas en el sector noreste y en menor medida en la zona del arroyo. Por el contrario, no se observan desplazamientos positivos de forma clara, aunque en la parte baja menos activa del área inestable se observan en algunos sectores, aunque relacionados con el crecimiento de la vegetación y los cultivos. En las partes periféricas se observan algunos desplazamientos notables, pero probablemente más debidos a desajustes de los modelos que a cambios reales de la superficie.

#### **4.1.2.4. Perfiles**

Con el fin de analizar la morfología de la superficie y su evolución se ubicaron cuatro líneas de perfil como se muestra en la Figura 24, uno de ellos longitudinal y el resto transversales en la parte alta, media y baja de la zona de estudio.



Figura 24. Ubicación de las cuatro líneas de perfil en la zona de estudio para analizar el comportamiento de los desplazamientos verticales en cuatro secciones.

En la Figura 25 se muestran los cuatro perfiles distribuidos en la zona de estudio. La línea roja representa el perfil de referencia correspondiente al periodo febrero 2016 y en azul al periodo junio 2016. El más significativo es el perfil 1 (longitudinal) donde se observa una pendiente más elevada en el tramo alto de la ladera (sur), entre la carretera y el camino central, que más

abajo se suaviza hasta el arroyo que discurre con una leve incisión en el tramo más bajo (norte). Este tramo de pendiente más inclinada puede asociarse a una zona de escarpe que en parte comprende lo que se ha interpretado como escarpe trasero, y presenta un pequeño sector aún más inclinado que corresponde al escarpe trasero. En todo este tramo, la superficie de la segunda fecha (11-jun-2016) está ligeramente por debajo (apenas 1-1.5 m) de la superficie de la primera fecha (18-feb-2016); sin embargo, hacia la zona más llana, las superficies son prácticamente coincidentes.

El perfil 2 (transversal en la parte alta, bajo la carretera) muestra un primer tramo al oeste con mayor elevación; a continuación desciende hacia el este, formando una vaguada hacia la zona situada sobre el escarpe principal más activo; y posteriormente se recupera con una pendiente más elevada. Estas dos pendientes más elevadas a ambos lados de la vaguada parecen corresponder a los cierres laterales del escarpe trasero. Por otra parte, mientras que en los flancos la superficie de ambas fechas es bastante coincidente, salvo los cambios en la vegetación, en la parte de la vaguada la superficie desciende en aproximadamente 1 m. De este modo, se deduce que la vaguada corresponde a la parte central de la cabecera de una inestabilidad flanqueada por un escarpe (trasero) que se hace más activo hacia abajo en la ladera.

En el perfil 3 (transversal en la parte media de la ladera), el primer tramo al oeste comienza con una pendiente pronunciada que corresponde al escarpe trasero, con algunos árboles que rompen la regularidad de la superficie; posteriormente esta se dispone prácticamente horizontal hacia el centro para acentuarse de nuevo en el sector donde discurre el barranco al este; el otro margen del barranco termina en una zona llana donde hay abundante vegetación de arbolado. En el tramo central más llano, que está situado aún en la zona del cuerpo más activo, la superficie de

la segunda fecha desciende aproximadamente medio metro respecto a la de la primera fecha. En el resto del perfil las superficies son bastante coincidentes.

Finalmente, el cuarto perfil (transversal en la parte más baja de la ladera, al norte) comienza con una pendiente más elevada, que de nuevo corresponde al escarpe trasero (en este caso más bien lateral); a continuación, y durante un buen tramo, la pendiente transversal se mantiene prácticamente horizontal para terminar en el barranco en el tramo situado al este. En el barranco son visibles algunas pequeñas inestabilidades a ambos lados con formación de escarpe sobre todo en el margen derecho bajo la zona urbanizada. La comparación de las dos superficies muestra una coincidencia prácticamente total en todo el perfil, especialmente en el tramo llano central y sólo difiere ligeramente en el sector del barranco debido a las inestabilidades que se forman ahí.

,

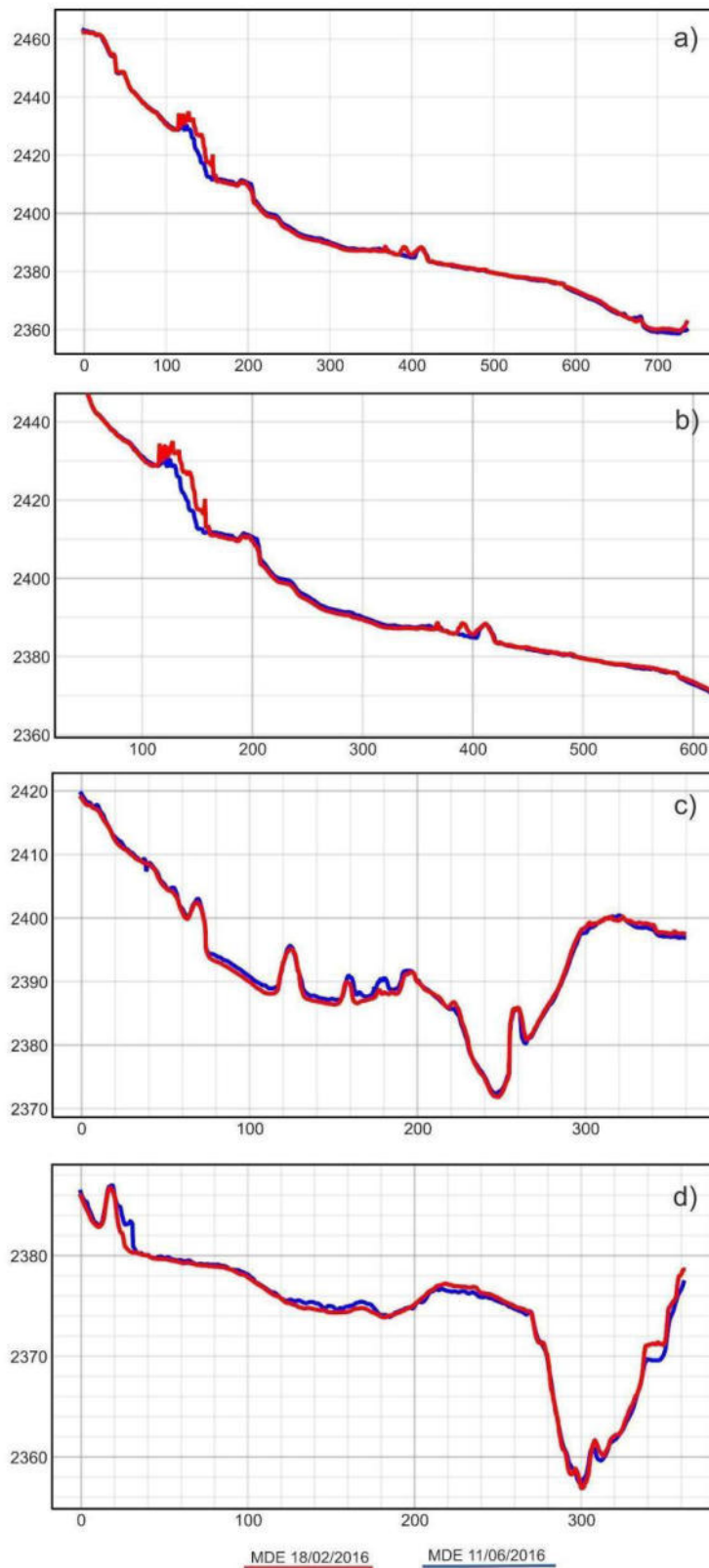


Figura 25. Cambios de elevación determinados en los cuatro perfiles de la zona de estudio y que corresponden al periodo febrero 2016 y junio 2016.

### 4.1.3. Modelos derivados, análisis morfométrico y evolución de la morfología.

En este apartado se presentarán los modelos derivados del MDS de pendiente, orientación, sombreado, TPI, TRI y TWI, así como su análisis zonal en los distintos elementos de la zona inestable y su evolución en las dos fechas consideradas.

#### 4.1.3.1. Distribución y evolución de la pendiente

Los modelos de pendiente se muestran en la Figura 26, a partir de los cuales se analizó en primer lugar su distribución espacial por sectores y elementos; y en segundo lugar su cambio de una fecha a otra.

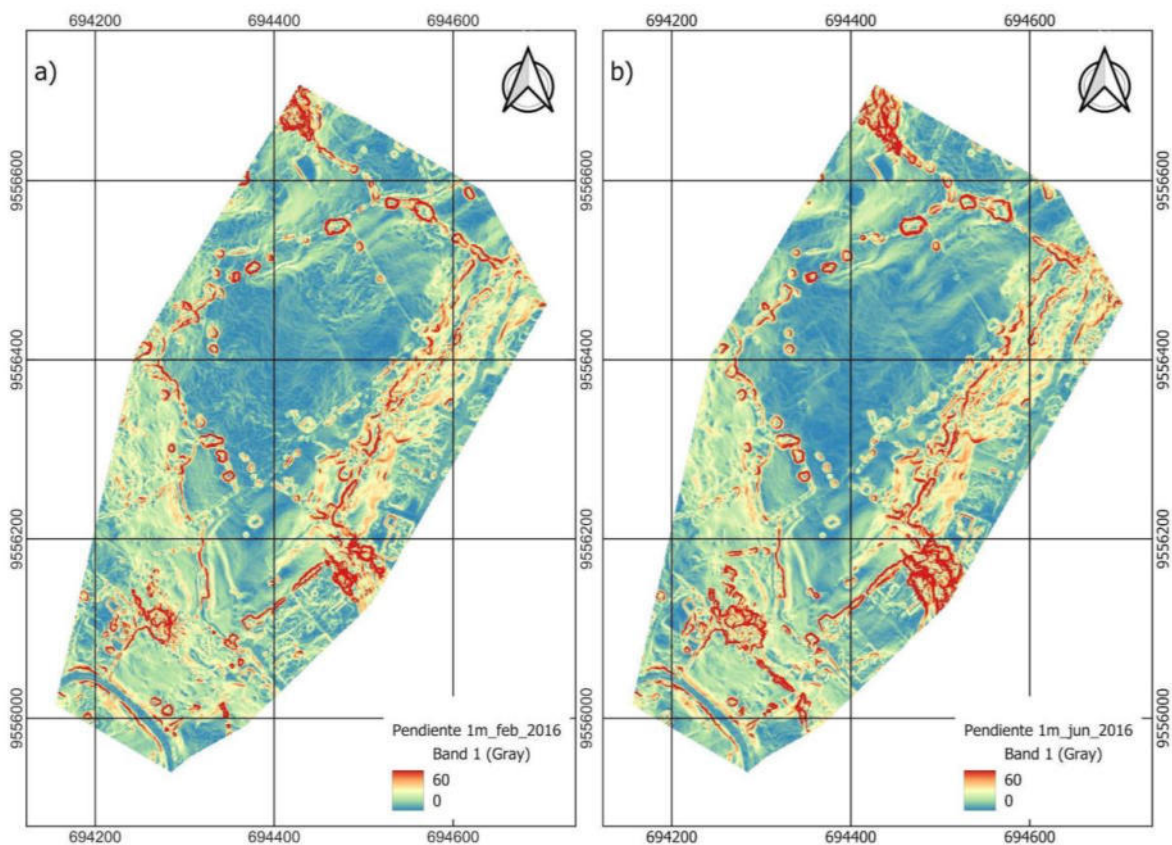


Figura 26. Mapas de pendientes de la zona de estudio. a) 18/02/2016 y b) 12/06/2016.

En los mapas de la Figura 26, y descartando la vegetación, se aprecian zonas con pendientes bajas en el centro de la zona y pendientes medias en el sector más al sur, que coinciden con el identificado como escarpe trasero, e incluso pendientes altas puntualmente como en el escarpe principal. También se aprecia sectores con pendientes medias al oeste, en el flanco este de la zona inestable, donde se han delimitado algunas zonas de escarpe trasero-lateral; y en el este, en el sector del barranco que se hace más pronunciado hacia el sur, detectándose localmente pendientes altas algunas veces asociadas a los escarpes de colapsos o pequeños deslizamientos.

Los estadísticos de las pendientes por elementos de la zona inestable se muestran en la Tabla 15 y la distribución completa de las pendientes en los elementos más significativos en la Figura 27. Se puede apreciar que la pendiente media de los escarpes se encuentra entre  $23^\circ$  y  $35^\circ$ ; destaca principalmente el escarpe principal de la inestabilidad principal con una pendiente media de  $25.51^\circ$ , los traseros y laterales con  $22.86^\circ$  y los otros escarpes asociados a inestabilidades menores en torno al barranco con  $34.76^\circ$ . La zona del cuerpo presenta ya menores pendientes, siendo la del sector más activo de  $17.44^\circ$ , y la del menos activo de  $13.01^\circ$ , prácticamente la misma que la zona estable. Por su parte, en los cuerpos de las inestabilidades menores asociadas al barranco las pendientes son sensiblemente mayores, en torno a  $30^\circ$ .



Tabla 15. Detalle del valor de la pendiente (°) por elementos del deslizamiento.

Elemento	Media	Moda	Mínimo	Máximo	Rango	Desv.T.	Coef.V.
<b>Área de inestabilidad principal</b>							
Escarpe principal	25.51	25.97	0.28	71.04	70.76	10.10	0.40
Escarpe trasero	22.86	14.13	0.00	89.54	89.54	12.43	0.54
Cuerpo activo	17.44	9.22	0.00	89.56	89.56	11.36	0.65
Áreas poco activas	13.01	4.64	0.00	89.78	89.78	11.91	0.92
<b>Inestabilidades menores</b>							
Otros escarpes	34.76	33.16	0.28	87.14	86.86	12.26	0.35
Otros cuerpos	30.29	16.66	0.00	89.42	89.42	15.55	0.51
<b>Área estable</b>							
Estable	13.01	3.36	0.00	84.54	84.54	9.82	0.75

En la Figura 27 se muestra la distribución de las pendientes en los distintos elementos de la zona inestable.

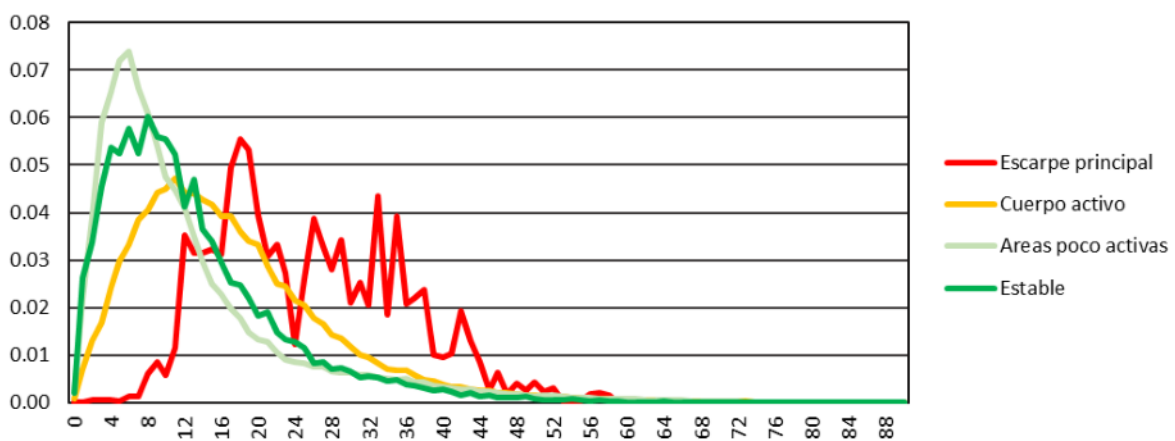


Figura 27. Distribución de la pendiente en los elementos principales de la ladera.

El análisis de la evolución de la pendiente (Figuras 27 y 28) que se deduce de los modelos correspondientes a las dos fechas consideradas muestra cambios significativos solamente relacionados con la vegetación, fundamentalmente la arbórea y arbustiva, pero también los cultivos. Así, en los perfiles que se muestran en la Figura 28, la pendiente media es muy similar (18.47 y 18.25°) y los diagramas de frecuencia de los mismos muestran distribuciones similares en todos los casos. Así, en el perfil 1, que es el más significativo, la pendiente media es de 15.67° en la primera fecha y de 15.72° en la segunda. En los perfiles transversales, la distribución es igualmente muy similar, con pequeñas variaciones debidas a los cambios en la vegetación arbórea y los cultivos.

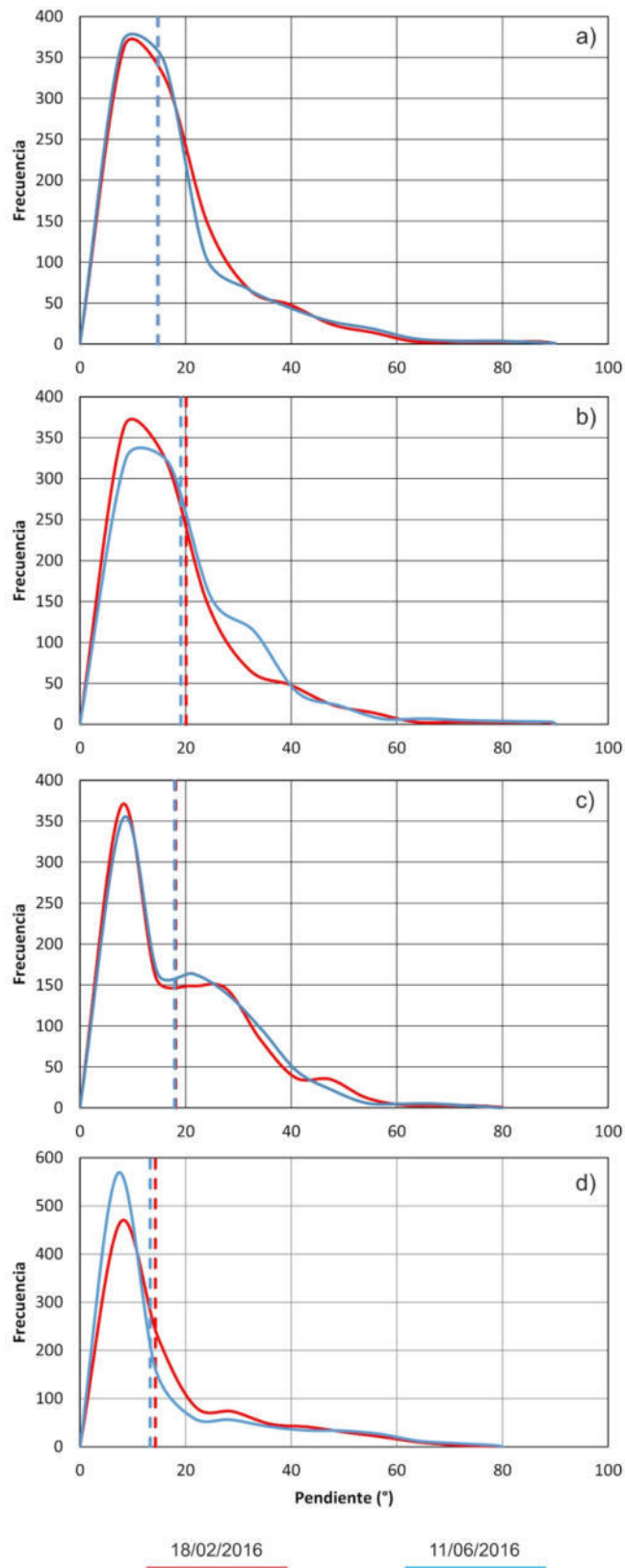


Figura 28. Evolución temporal de la pendiente en los perfiles a) perfil 1, b) perfil 2, c) perfil 3 y d) perfil 4.

### 4.1.3.2. Distribución y evolución de la orientación

En la Figura 29 se muestran los mapas de la orientación en la zona de estudio en las dos fechas analizadas.

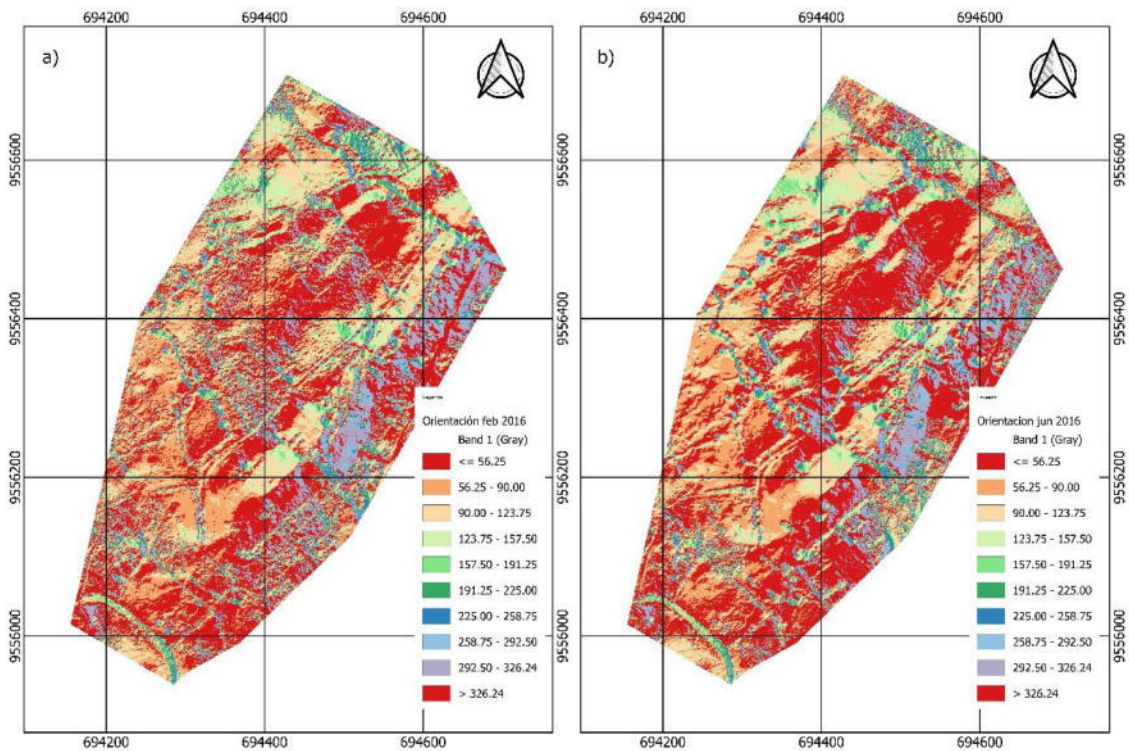


Figura 29. Mapas de orientación de la pendiente en los dos periodos de control. a) 18/02/2016 y b) 12/06/2016.

Como se puede observar se trata de una ladera orientada al N y NE, que se corresponde con los sectores más o menos activos de la zona inestable, aunque alguno de los escarpes traseros y sobre todo laterales de la parte oeste presentan orientaciones al E e incluso en la parte baja al SE, que cierra dicha zona inestable. En el margen este del arroyo, sin embargo, predominan las orientaciones al N y NW.

Analizando los datos estadísticos que se presentan en la Tabla 16 y el diagrama de frecuencias de la Figura 30, se observa más específicamente que el escarpe principal tiene una orientación

media al ENE y el escarpe trasero una orientación más claramente al E, con una relativamente alta uniformidad. Otros escarpes, localizados en el sector del barranco, presentan orientaciones variables entre el E, NE, N y NW, es decir una mayor dispersión. El cuerpo del área inestable, tanto la parte más activa como la menos activa presenta una disposición media hacia el NE y una dispersión media, mientras los cuerpos de las inestabilidades menores lo hacen más al N, como sus escarpes, y con una alta dispersión. La zona estable presenta igualmente una orientación media hacia el N.

Tabla 16. Detalle del valor de la orientación por elementos del deslizamiento.

Zona	Media	Moda	Mínimo	Máximo	Rango	RadioVM
<b>Área de inestabilidad principal</b>						
Escarpe principal	67.49	71.57	0.00	359.83	359.83	0.89
Escarpe trasero	87.77	90.00	0.00	359.98	359.98	0.64
Cuerpo activo	58.94	90.00	0.00	360.00	360.00	0.57
Áreas poco activas	46.52	0.00	0.00	359.99	359.99	0.42
<b>Inestabilidades menores</b>						
Otros escarpes	18.92	90.00	0.00	359.95	359.95	0.24
Otros cuerpos	22.10	315.00	0.00	359.94	359.94	0.11
<b>Área estable</b>						
Estable	354.86	0.00	0.00	359.90	359.90	0.36

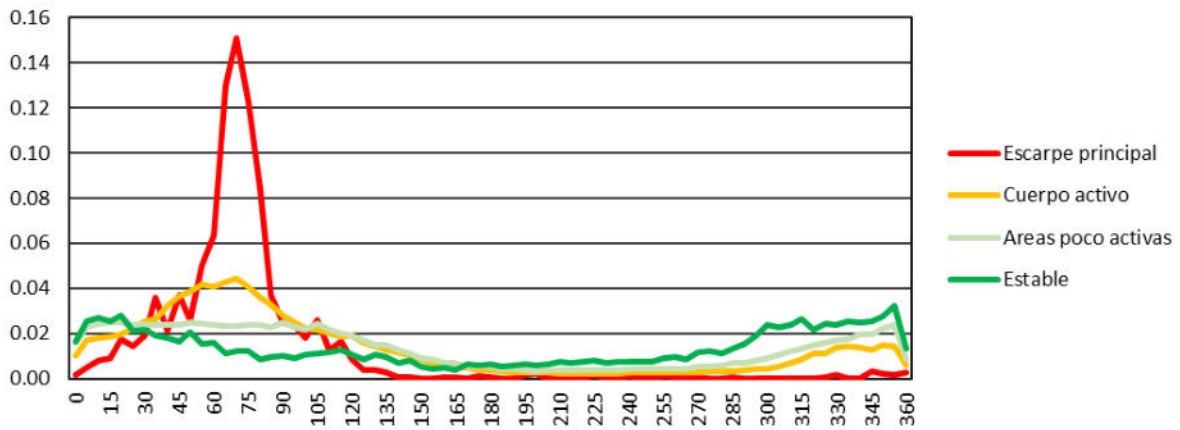


Figura 30. Distribución de la orientación en los elementos principales de la ladera.

En cuanto a la comparación entre la orientación de las dos fechas analizadas, hay que decir que los cambios son mínimos a nivel general de la ladera y solo se producen en el detalle. Suelen estar relacionados con la vegetación, muy especialmente con los cultivos, introduciendo generalmente una mayor variabilidad en estas áreas cuando hay un mayor crecimiento de la cubierta. Los cambios en la superficie del terreno son muy sutiles y no se reflejan en los modelos de orientación, ni siquiera en las zonas más activas (escarpes y cabecera).

En la evolución temporal de la orientación en los perfiles (Figura 31) se puede apreciar que los sutiles cambios de la orientación en el perfil A (Figura 31 a) se asocian a las direcciones S y SW, en incremento y decremento, respectivamente, sin que la observación de los modelos muestre de forma clara la causa de estas diferencias, que probablemente son debidas a la vegetación y cultivos. En el perfil transversal más alto B (Figura 31 b) las variaciones son aún menos significativas, y lo mismo sucede en el perfil transversal medio C (Figura 31 c). En el perfil transversal bajo D (Figura 31 d), los cambios de la orientación son más notables; la frecuencia aumenta hacia el E y el S, y disminuye al W, lo que coincide en parte con lo observado en el perfil A. De todo lo dicho se deduce que los cambios sutiles de la orientación se centran en la parte baja de la ladera; y puesto que esta corresponde a la parte más estable de la ladera. cabe pensar como anteriormente en que los cambios se deben a la vegetación.

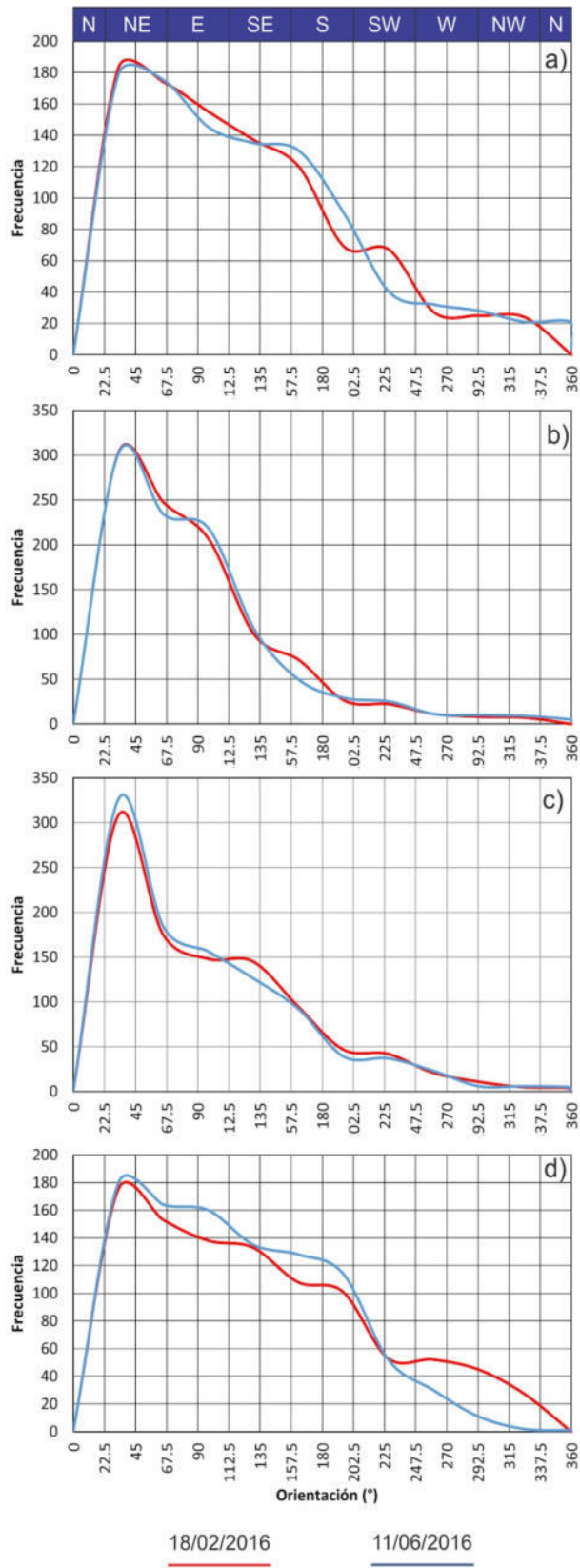


Figura 31. Evolución temporal de la orientación en los dos periodos de control 18/02/2016 y 12/06/2016). a) perfil 1, b) perfil 2, c) perfil 3 y d) perfil 4.

### 4.1.3.3. Distribución y evolución del sombreado

En la Figura 32 se muestra la distribución del sombreado en la zona de estudio.

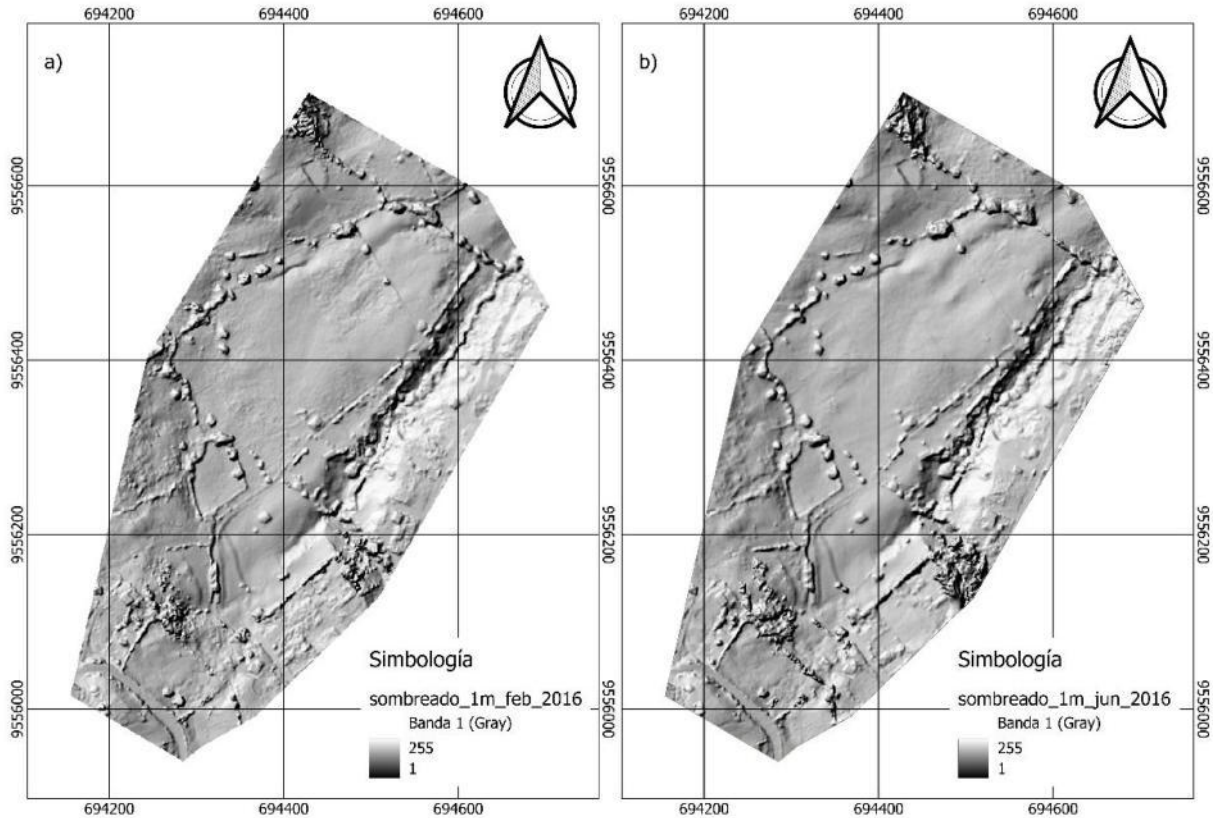


Figura 32. Mapas de sombreado en los dos periodos de control. a) 18/02/2016 y b) 12/06/2016. Como se puede observar la zona en general presenta una elevada iluminación, según el modelo aplicado (fuente desde el NW), como corresponde a una ladera orientada al norte, luego el escarpe principal (NNE) no destaca mucho, mientras los escarpes traseros y laterales si lo hacen más al estar más orientados al E. El barranco sí se observa claramente, siendo el margen derecho, orientado al NW, el sector más iluminado. Además, el sombreado permite detectar el arbolado y las construcciones, distinguiendo los objetos concretos; incluso las zonas de cultivos, donde la iluminación presenta una textura más irregular. Analizando los datos estadísticos que se presentan en la Tabla 17 y el diagrama de frecuencias de la Figura 33, se observa cuantitativamente la mayor iluminación media del cuerpo de la zona inestable (162



para la parte activa y 172 para la menos activa), respecto a los escarpes (134). Las otras inestabilidades presentan algo menos de iluminación (en torno a 160) al estar algunos de ellos en la zona sombreada del barranco. El sector más iluminado es el área estable con una orientación NNW.

Tabla 17. Detalle del valor de la orientación por elementos del deslizamiento.

<b>Zona</b>	<b>Media (°)</b>	<b>Moda (°)</b>	<b>Mínimo (°)</b>	<b>Máximo (°)</b>	<b>Rango (°)</b>	<b>Desv.T. (°)</b>	<b>Coef.V.</b>
<b>Área de inestabilidad principal</b>							
Escarpe principal	134.46	155.00	1.00	254.00	253.00	38.83	0.29
Escarpe trasero	134.49	1.00	1.00	255.00	254.00	46.05	0.34
Cuerpo activo	161.68	165.00	1.00	255.00	254.00	41.66	0.26
Áreas poco activas	172.33	182.00	1.00	255.00	254.00	38.50	0.22
<b>Inestabilidades menores</b>							
Otros escarpes	159.97	247.00	1.00	255.00	254.00	86.34	0.54
Otros cuerpos	157.84	1.00	1.00	255.00	254.00	74.99	0.48
<b>Área estable</b>							
Estable	184.96	194.00	1.00	255.00	254.00	33.93	0.18

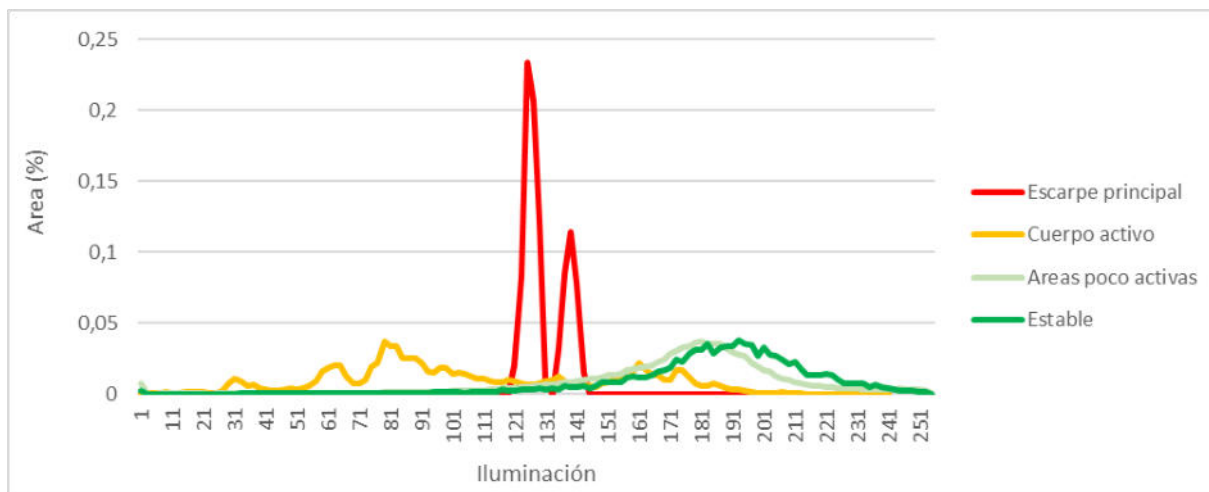


Figura 33. Distribución de la iluminación (sombreado) en los elementos principales de la ladera. La comparación entre el sombreado de las dos fechas no permite detectar cambios claros en la superficie del terreno, ni siquiera en la zona de los escarpes que solamente muestran pequeñas diferencias cuando se observan con detalle. Por el contrario, sí se encuentran diferencias en relación con la vegetación, tanto crecimientos como decrecimientos o simples cambios en el arbolado. En general, la observación de árboles u otros elementos como las construcciones, que en otras zonas permiten medir desplazamientos tomando estos elementos como referencia, en esta son tan sutiles que no permiten detectarlos de forma clara.

#### 4.1.3.4. Distribución y evolución del TPI

En la Figura 34 se muestran los mapas del TPI, derivados del MDE para las dos fechas analizadas a la resolución original de 0.1 m

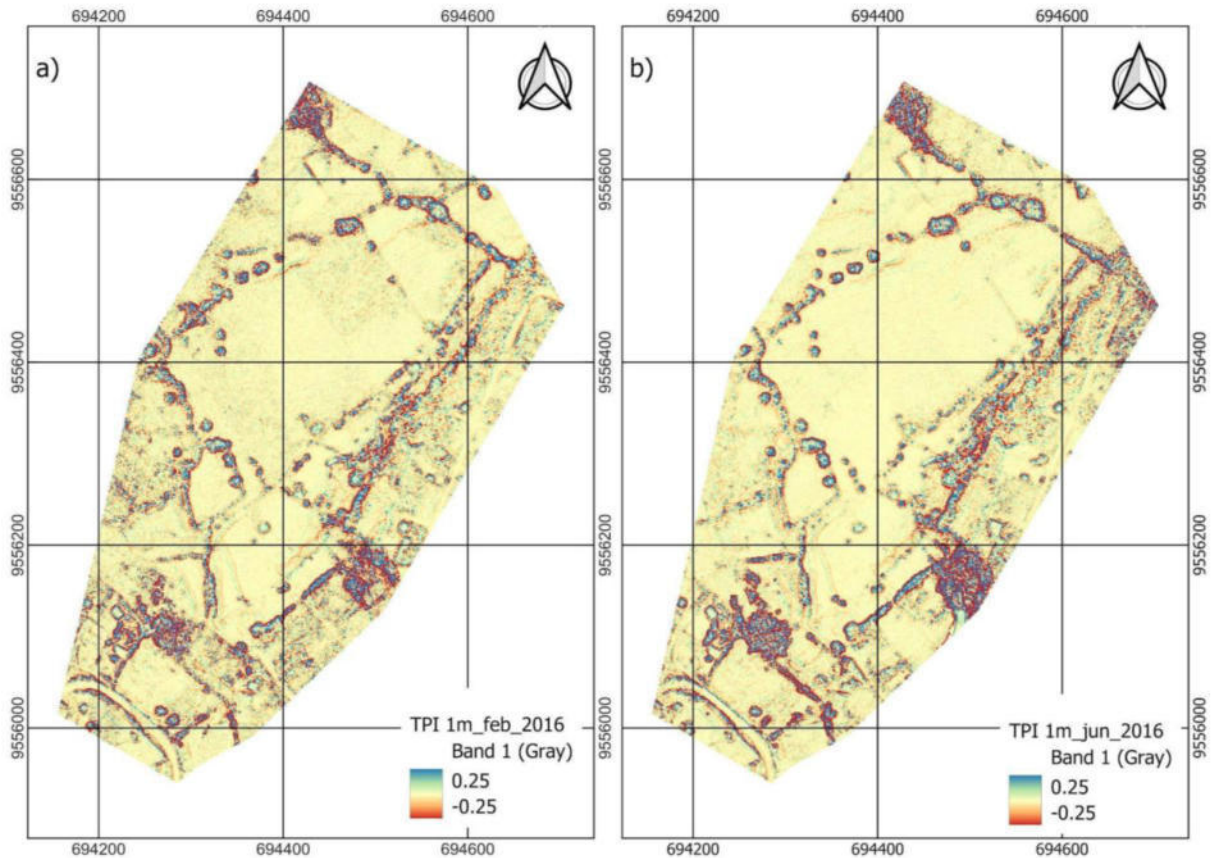


Figura 34. Mapas del TPI en los dos períodos de control. a) 18/02/2016 y b) 12/06/2016.

En general los valores son muy próximos a 0, por lo que no se observan grandes diferencias, aun empleando una escala de valores muy estrecha, entre -0,05 y 0,05. Solamente aparecen valores fuera de este rango en sectores muy concentrados y generalmente alargados en una determinada dirección. Estos sectores corresponden con rupturas de la pendiente muy acusada que se corresponden con los límites superiores de superficies muy inclinadas. En la zona de estudio, la mayor parte de ellas corresponden con árboles o incluso construcciones, no

observándose de forma clara su relación con superficies muy inclinadas de la superficie del terreno, es decir, con escarpes.

En el análisis por elementos que se muestra en la Tabla 18 y la Figura 35, se aprecia que prácticamente todos los elementos presentan valores medios igual a 0, lo que parece lógico al existir en la superficie tanto formas cóncavas (TPI negativo) como convexas (TPI positivo), que se tienden a compensar, junto con las formas planas que ya tienen valores próximos a 0. En ese caso interesan más los valores de la desviación típica, que no obstante tampoco superan el umbral de 0.3, lo que indica que la forma del terreno es bastante plana y no hay rupturas que nos informen sobre la presencia de escarpes u otros elementos como el pie de los movimientos. Como antes se ha indicado, los sectores dentro de la zona con valores absolutos más elevados del TPI, se producen en relación con la vegetación y las construcciones, que quedan excluidos del análisis.

Tabla 18. Detalle del valor del TPI por elementos del deslizamiento.

Elemento	Media	Moda	Mínimo	Máxim	Rango	Desv.T.	Coef.V.
<b>Área de inestabilidad principal</b>							
Escarpe principal	0.00	0.00	-0.02	0.03	0.05	0.00	-17.43
Escarpe trasero	0.00	0.00	-4.50	3.19	7.68	0.03	-2024.11
Cuerpo activo	0.00	0.00	-4.23	4.89	9.12	0.02	-398.28
Áreas poco activas	0.00	0.00	-9.65	8.31	17.96	0.03	-773.10
<b>Inestabilidades menores</b>							
Otros escarpes	0.00	0.00	-0.60	0.47	1.07	0.01	-127.33
Otros cuerpos	0.00	0.00	-2.29	4.30	6.59	0.03	-161.37
<b>Área estable</b>							
Estable	0.00	0.00	-0.28	0.27	0.55	0.00	-34.83

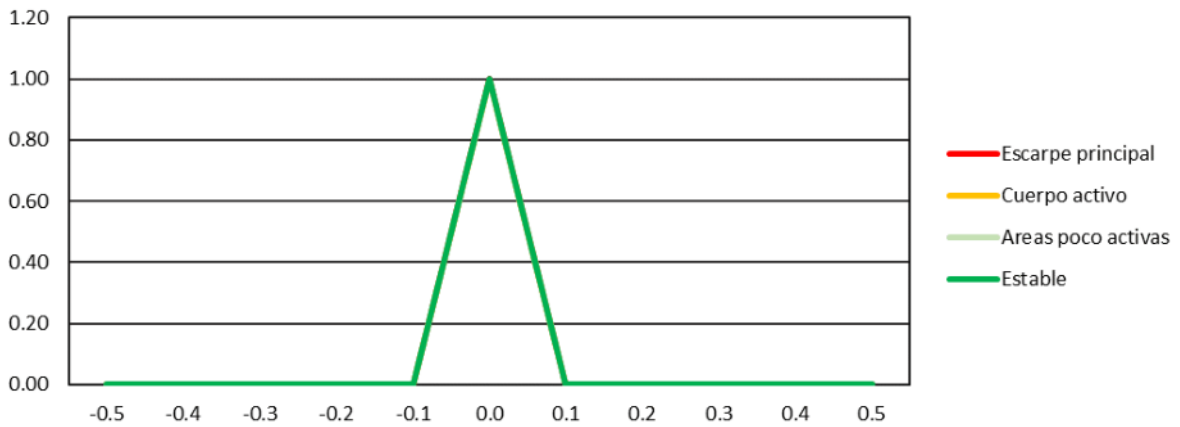


Figura 35. Histograma de distribución del TPI en los diferentes elementos analizados en la ladera.

Tampoco se aprecian diferencias reseñables entre los mapas de TPI de las dos fechas, salvo en lo relativo a la vegetación y las construcciones, pero no así en cuanto a las formas del terreno, principalmente debido a la escasa variabilidad que muestran las mismas.

A partir de los mapas de TPI se pueden extraer (mediante skeletonization) las líneas de ruptura superior e inferior de una superficie inclinada. Estas líneas, que se han extraído con umbrales de +0,05 (la superior) y -0,05 (la inferior) se muestran en la Figura 36. Como se puede apreciar están igualmente relacionadas, de forma lógica ya que parten del TPI, con la vegetación en esta zona de trabajo.

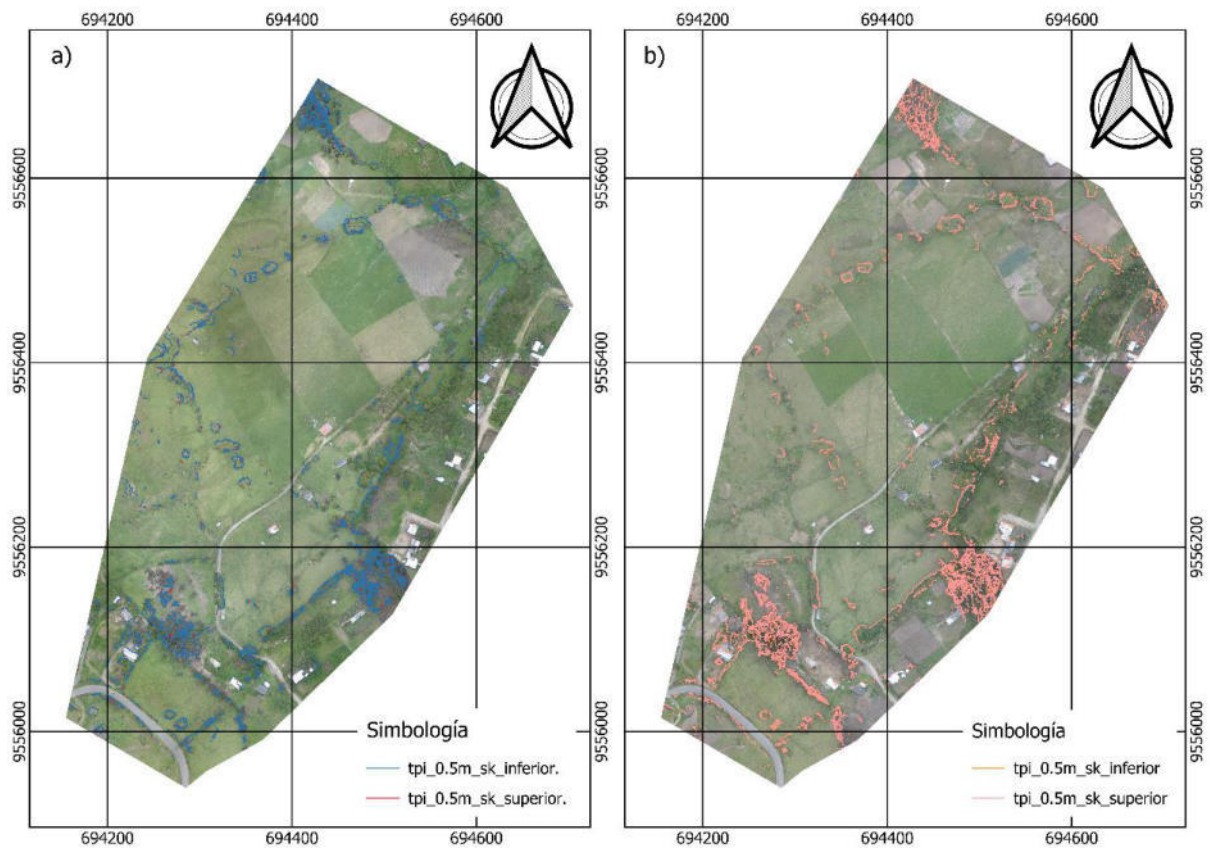


Figura 36. Líneas de ruptura superiores e inferiores, extraídas del TPI a resolución de 0.1 m en la zona de Victoria. a) 18/02/2016 y b) 12/06/2016 sobre la ortoimágenes.

Como se apuntó en el apartado de metodología, este índice es especialmente sensible a la resolución por lo que se ha analizado también con un tamaño de celda de 1 m. Los resultados se muestran en la Figura 37, con una escala algo más ancha, entre -0.25 y 0.25. En general se observan en los mapas lineamientos más simples, asociados mayoritariamente a la vegetación y en menor medida a las construcciones, pero a diferencia de antes, también aparecen algunos asociados al terreno, que están relacionados con el escarpe principal e incluso con los traseros y laterales. No se observan, sin embargo, diferencias significativas entre las dos fechas analizadas entre estos mapas.

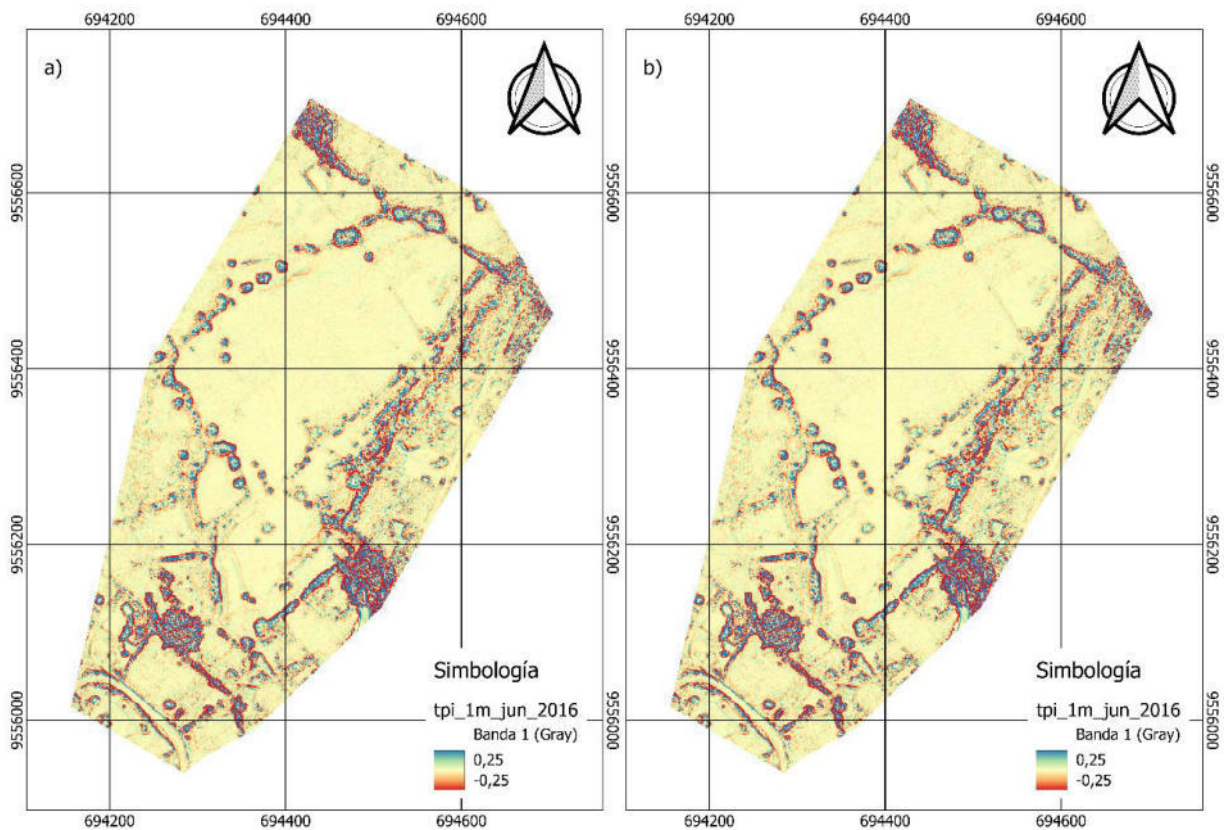


Figura 37. Mapas del TPI en los dos períodos de control a resolución de 1 m. a) 18/02/2016 y b) 12/06/2016.

Como en la resolución anterior, se han extraído las líneas de ruptura superiores e inferiores de superficies muy inclinadas, que se muestran en la Figura 38. Las líneas son claramente más simples y nítidas, y si se descartan las relacionadas con el arbolado, los setos y las construcciones, en el detalle se observan líneas de ruptura del terreno, correspondientes a escarpes (sobre todo tramos del escarpe principal). Lo que no se observa es ni diferencia ni desplazamiento significativo entre las líneas correspondientes, desde una fecha a la otra.



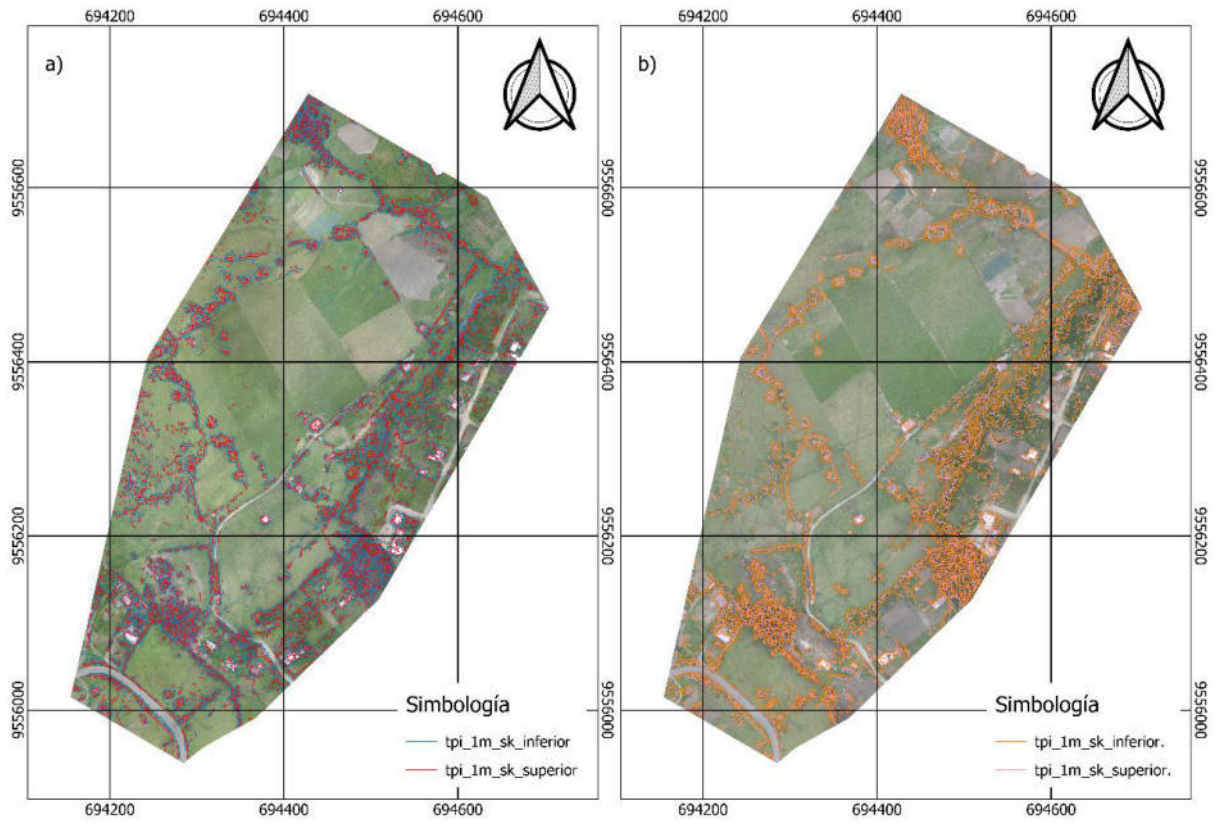


Figura 38. Líneas de ruptura superiores e inferiores, extraídas del TPI en la zona de Victoria, a resolución de 1 m. a) 18/02/2016 y b) 12/06/2016.



#### 4.1.3.5. Distribución y evolución del TRI

En la Figura 39 se muestran los mapas del TRI para las dos fechas consideradas, a la misma resolución que los MDS originales, de los que parten estos.

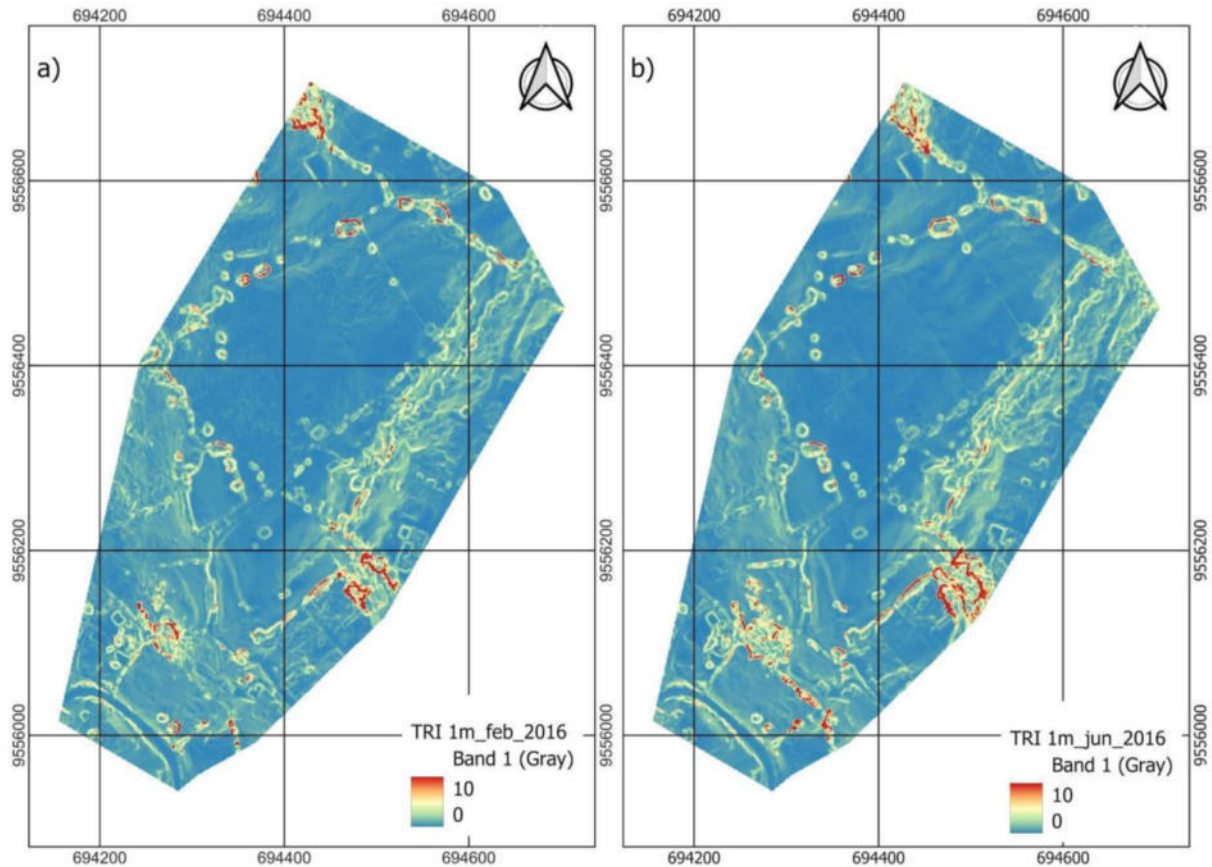


Figura 39. Mapas de la rugosidad expresada por el TRI a la resolución original de 0.1 m correspondiente a los dos periodos de control. a) 18/02/2016 y b) 12/06/2016.

Descartando las zonas cubiertas de vegetación, en especial las arboledas y setos, junto a las construcciones, se pueden apreciar zonas de mayor rugosidad en relación con los escarpes sobre todo en el principal, así como en los traseros y laterales. También destaca la zona del barranco que discurre por el este de la zona, que igualmente presenta una mayor rugosidad, especialmente en algunos sectores que pueden estar relacionados con los escarpes de las zonas de inestabilidad menores. Por el contrario, la zona del cuerpo principal y sobre todo del área menos activa presenta una rugosidad baja, al igual que la zona estable, salvo cuando hay cultivos que

introducen una rugosidad algo mayor. Según esto, estos modelos muestran una distribución muy similar a la de los modelos de pendiente.

Los valores de rugosidad medios por elementos se muestran en la Tabla 19 y la Figura 40. En ellas se observa que las zonas de escarpe, principal y trasero, presentan una rugosidad media de 0.6, mientras que los escarpes de las áreas de inestabilidad menores alcanzan un valor medio de 0.09. La rugosidad es más baja en las áreas más o menos activas de la inestabilidad principal, así como en la zona estable, y algo más elevada en el cuerpo de las inestabilidades menores (colapsos y deslizamientos) en la zona del barranco).

Tabla 19. Detalle del valor del TRI en la zona de estudio por elementos del deslizamiento.

<b>Elemento</b>	<b>Media</b>	<b>Moda</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Rango</b>	<b>Desv.T.</b>	<b>Coef.V.</b>
<b>Área de inestabilidad principal</b>							
Escarpe principal	0.06	0.06	0.00	0.36	0.35	0.03	0.49
Escarpe trasero	0.06	0.02	0.00	18.46	18.46	0.19	2.99
Cuerpo activo	0.04	0.02	0.00	20.86	20.86	0.12	2.65
Áreas poco activas	0.04	0.01	0.00	39.45	39.45	0.18	5.16
<b>Inestabilidades menores</b>							
Otros escarpes	0.09	0.08	0.00	2.50	2.50	0.06	0.67
Otros cuerpos	0.10	0.01	0.00	15.55	15.54	0.22	2.28
<b>Área estable</b>							
Estable	0.03	0.01	0.00	1.36	1.36	0.03	0.96

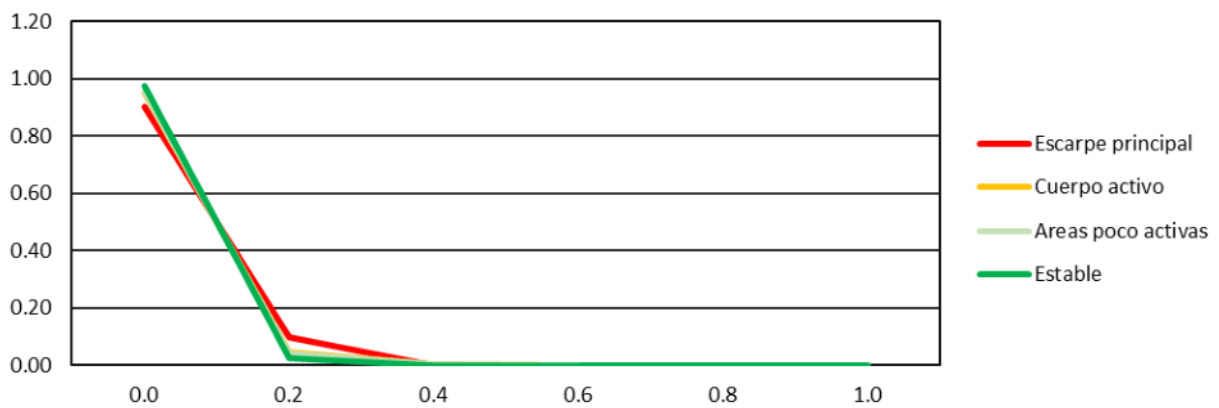


Figura 40. Histograma de distribución del TRI en los diferentes elementos analizados en la ladera.

Lo que tampoco se observa en este caso es una diferencia sustancial entre los modelos TRI de las dos fechas consideradas, salvo en las zonas de arbolado y los cultivos; en el último caso, el desarrollo del cultivo introduce una rugosidad leve y su pérdida la reduce.

Como en el TPI, este índice también se ha calculado a resolución de 1 m, y el resultado se presenta en la Figura 41. La distribución de la rugosidad es muy similar a la que se producía con la resolución de 0.05 m, presentándose una mayor rugosidad en relación con los escarpes y el sector del barranco, con las inestabilidades menores; además, lógicamente, de las zonas de arboleda y los cultivos, que cuando se desarrollan muestran una rugosidad media más suavizada que en el caso anterior. Tampoco se observan diferencias significativas entre el TRI de las dos fechas analizadas.

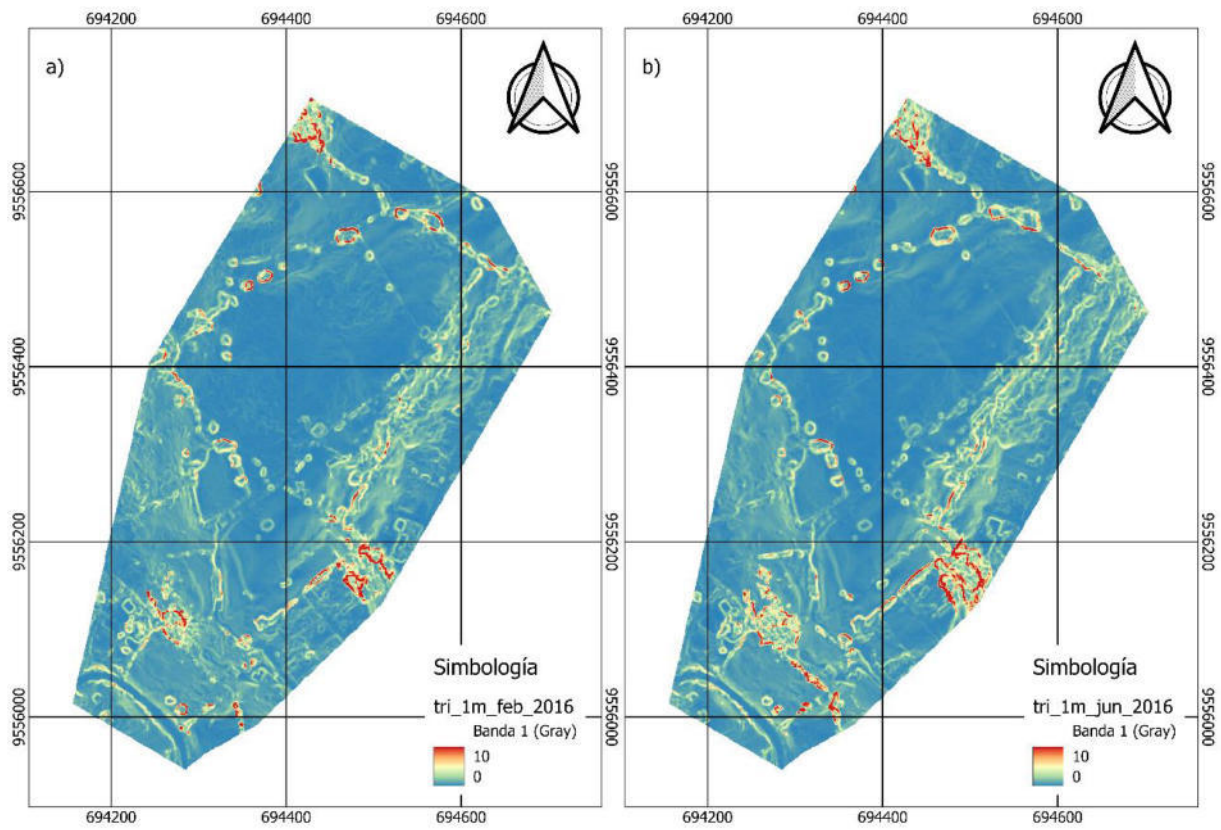


Figura 41. Mapas de la rugosidad expresada por el TRI correspondiente a los dos periodos de control a la resolución de 1 m. a) 18/02/2016 y b) 12/06/2016.

#### 4.1.3.6. Distribución y evolución del TWI

En la Figura 42 se muestran los mapas de TWI para las dos fechas consideradas. En tonalidades azuladas más oscuras se representan los valores positivos más elevados de TWI. Este índice destaca las zonas donde existe predisposición para acumular agua o circulación de agua proveniente principalmente de la lluvia por escurrimiento superficial; de esta forma se evidencia la red de drenaje de la ladera. Valores negativos corresponden a los sectores donde no es posible la acumulación de agua, situados generalmente en las partes altas de la ladera.

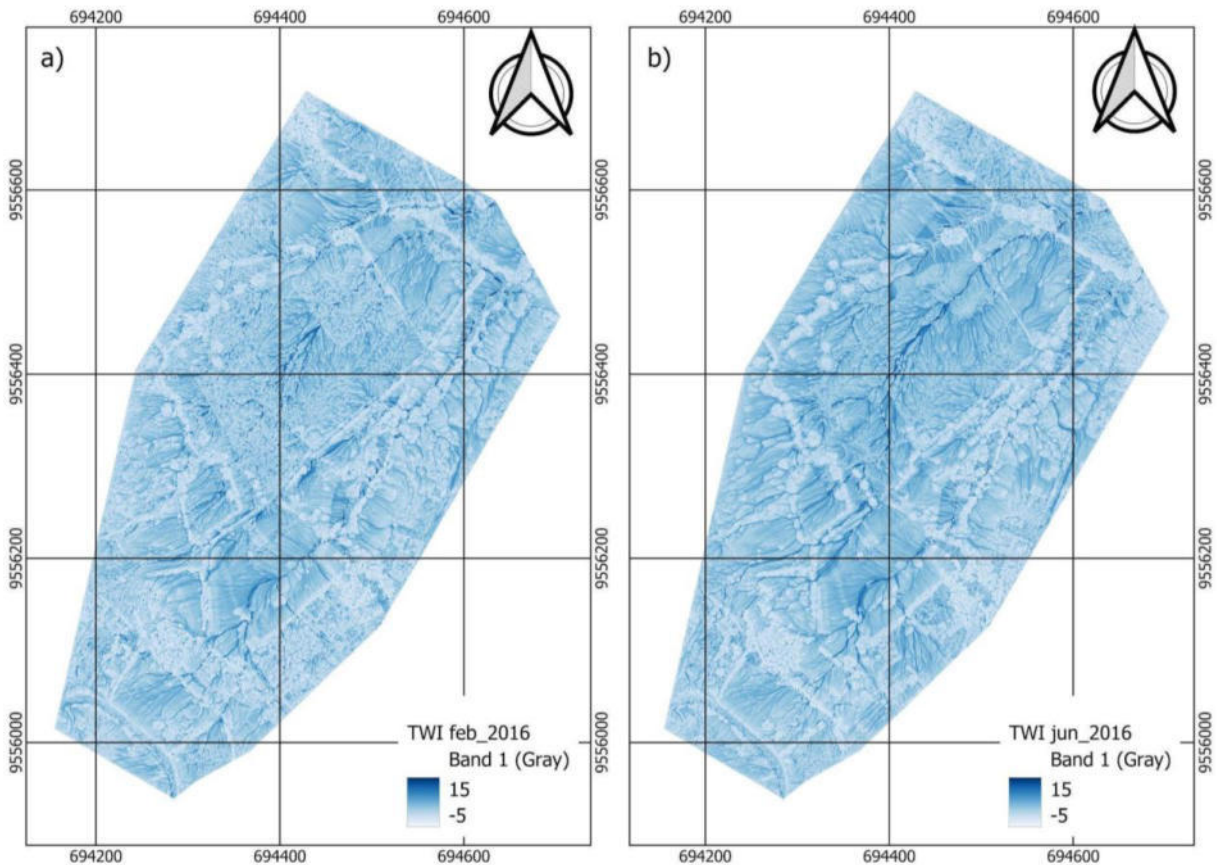


Figura 42. Mapas del Índice Topográfico de Humedad (TWI) de la zona de estudio para los dos periodos de control. a) 18/02/2016 y b) 12/06/2016.

Se puede observar que el TWI presenta en general valores más elevados cuanto más se descende en la ladera; por lo tanto, en sector en torno a la carretera y los escarpes traseros y laterales se encuentran valores más bajos, mientras en la zona de inestabilidad los valores son más altos especialmente en la parte menos activa de la parte baja de la ladera. Pero lo que más importante es el desarrollo de micro-redes de drenaje, entre las que destacan dos líneas claramente, una es el barranco de la parte este de la zona y la otra que se produce en la parte central del área inestable hasta el sector más bajo de ladera. La vegetación arbórea condiciona mucho las micro-redes ya que los árboles presentan en su copa valores bajos, lo que tratándose de un MDS pueden falsear en alguna medida la configuración del índice y las propias redes, de tal forma que las aguas pueden circular de forma más intensa bajo los árboles; los cultivos igualmente interrumpen los flujos de agua, en este caso de forma más real.

Los resultados del análisis por elementos se muestran en la Tabla 20 y la Figura 43. Los escarpes traseros, en una posición topográfica más alta presenta un valor medio de 3.24, mientras que el escarpe principal el valor medio es de 1.95, ya que se encuentra bajo una forma cerrada de vaguada como se apuntó al discutir los MDS y perfiles. El cuerpo presenta valores de 3.16-3.17, no tan altos debido a la presencia de cultivos que no facilitan la circulación del agua y el aumento del índice; mientras que el área estable, situada en una posición alta topográficamente, presenta un valor algo más reducido de 2.73. Finalmente, las inestabilidades menores, localizadas en el entorno del barranco, presentan índices más altos, especialmente el cuerpo que está más próximo al fondo del barranco.

Tabla 20. Detalle del valor del TWI por elementos del deslizamiento.

Elemento	Media	Moda	Mínimo	Máximo	Rango	Desv.T.	Coef.V.
<b>Área de inestabilidad principal</b>							
Escarpe principal	3.24	0.49	-3.57	16.73	20.30	1.98	0.61
Escarpe trasero	1.95	-1.66	-7.47	18.48	25.95	1.98	1.01
Cuerpo activo	3.16	0.49	-7.56	21.61	29.17	2.25	0.71
Áreas poco activas	3.17	3.59	-8.13	21.54	29.67	2.33	0.73
<b>Inestabilidades menores</b>							
Otros cuerpos	4.04	1.12	-7.59	20.62	28.21	2.84	0.70
Otros escarpes	2.44	-2.74	-5.31	17.29	22.60	1.73	0.71
<b>Área estable</b>							
Estable	2.73	1.12	-5.09	17.38	22.47	2.15	0.79

En la Figura 43 se muestra la distribución del TWI en los elementos principales de la ladera.

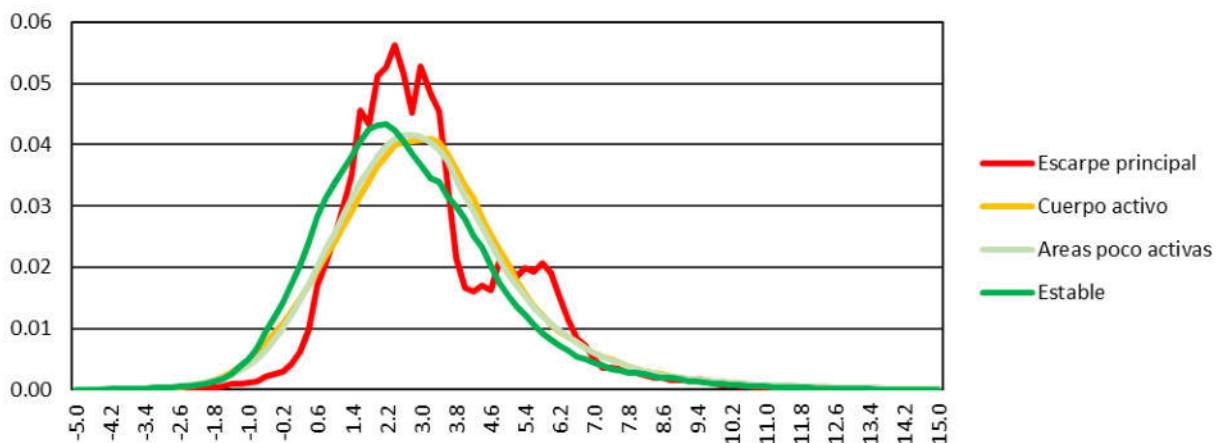


Figura 43. Distribución porcentual del TWI de algunos elementos de la ladera.

La comparación de los mapas del TWI en las dos fechas analizadas muestra bastante similitud general y en el propio desarrollo de la red de drenaje; pero también ciertas diferencias, que parecen más relacionadas con cambios en la vegetación que en el terreno. Así, los cultivos que hay en la parte más baja de la ladera (cuerpo menos activo de la inestabilidad), más



desarrollados en la primera fecha, interrumpen la red de drenaje; cuando esos cultivos desaparecen en la segunda fecha, la red se desarrolla de nuevo en este sector. Lo mismo ocurre con el crecimiento y decrecimiento del arbolado o los setos en otros sectores.

#### 4.1.4. Desplazamientos en puntos significativos

En este apartado se presentan los resultados del análisis de desplazamientos en puntos significativos de la zona de Victoria, tanto de los puntos medidos con GNSS, como de los puntos extraídos y calculados a partir de las ortoimágenes y MDS VANT.

##### 4.1.4.1. Desplazamientos en puntos GNSS

El intervalo de tiempo empleado para las campañas de monitoreo GNSS fue de 94 días (3.13 meses) para el sector Victoria. En la Figura 44 se muestran los desplazamientos horizontales y verticales en los puntos GNSS.

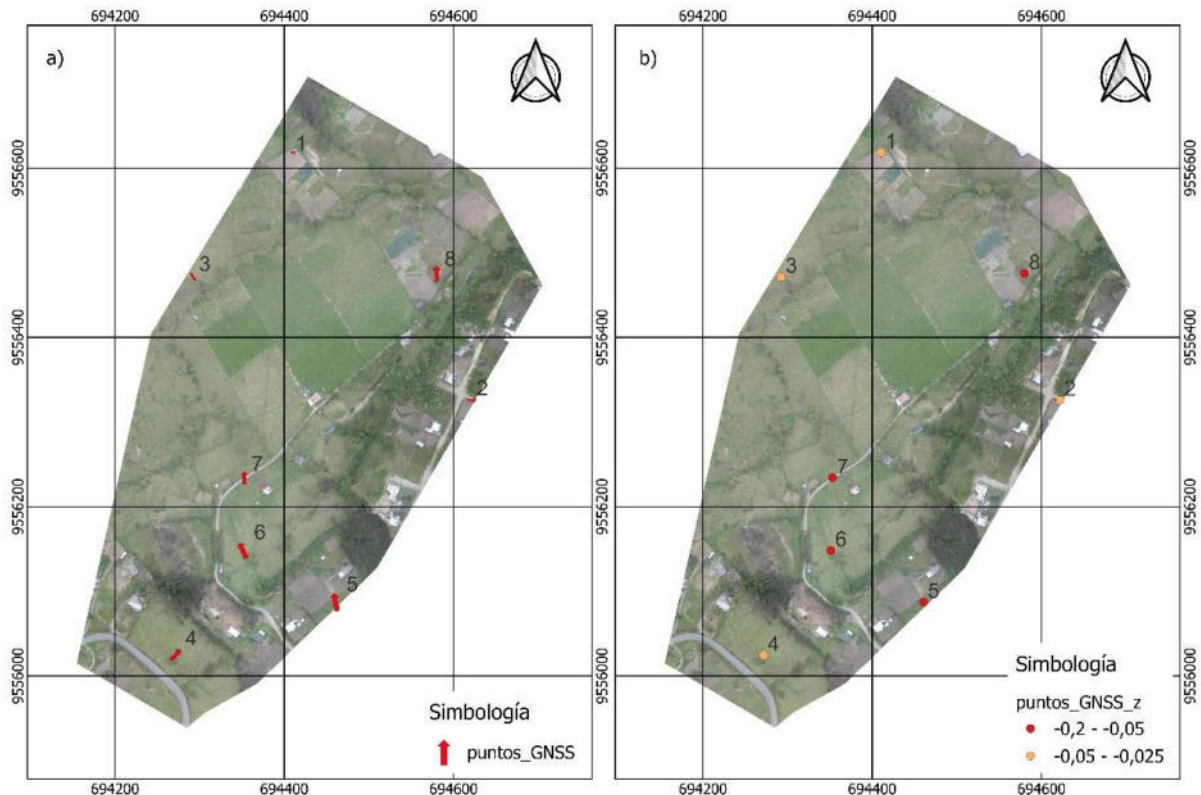


Figura 44. Mapa de desplazamientos horizontales a) y verticales b) en la zona de Victoria.



Asimismo, en la Tabla 21 se muestran los desplazamientos efectivos, dirección y velocidad de los puntos de la red GNSS establecida en Victoria. La velocidad ( $V_H$ ) fue establecida entre el vector resultante ( $V_{N-E}$ ) y el tiempo de monitoreo correspondiente.

Analizando las componentes de desplazamiento horizontal de los puntos de monitorización GNSS, se aprecia que la dirección predominante es norte (N) en especial los puntos 4, 5, 6, 7 y 8 con rangos de desplazamiento entre 0.11 m a 0.21 m. Estos puntos se sitúan dentro de la zona de inestabilidad, tanto en la parte alta más activa (4, 6 y 7) como en la parte menos activa (5 en la parte alta cerca del límite y 8 en la parte baja de la ladera). Los puntos 1, 2 y 3 tienen una tendencia hacia el este (E) con valores que apenas superan a 0.10 m; se sitúan en el flanco oeste de la inestabilidad (1 y 3, este último en un escarpe lateral) o ya fuera del área inestable, en la zona urbanizada al este (2). En todos los casos, los desplazamientos horizontales totales en todos los puntos superan ampliamente al umbral definido por la precisión de los instrumentos y método de posicionamiento GPS empleado (0.03 m), por lo que se pueden considerar significativos.

Los desplazamientos verticales en todos los puntos muestran descensos variables entre 0.03 y 0.10 m, estando en general por encima de la precisión instrumental definida en 0.035 m, excepto en los puntos 1 y 2. Los mayores descensos se observan en la zona central (puntos 5, 6 y 7).

Traducido a velocidades o, más exactamente, a tasas de desplazamiento, se observan valores entre 1.6 y 6.9 cm/mes de la componente horizontal. Las tasas son ligeramente superiores en la parte más activa del área inestable (puntos 4, 6 y 7), especialmente en el punto 6 con 6.4 cm/mes, respecto a la parte más baja (punto 8) y sobre todo respecto a los flancos (puntos 1 y 3) o la zona externa (punto 2) a la inestabilidad, donde se observan las tasas más bajas (1.7 – 3.5 cm/mes). En cuanto a las tasas de desplazamiento vertical los valores igualmente son

máximos en la parte más activa del área inestable (puntos 6 y 7), donde se encuentran tasas de descenso de 2.2-2.4 cm/mes; algo inferiores en otros puntos de dicha área (puntos 4 y 8), con tasas de 1.2-1.8 cm/mes; y más aún en el flanco oeste (puntos 1 y 3) y el área estable (punto 2), con tasas de 0.8-1.3 cm/mes.

Tabla 21. Resumen de desplazamientos efectivos N, E y Z de los puntos GNSS de Victoria. Se muestra la dirección y la velocidad de cada punto horizontal y vertical.

<b>Punto GNSS</b>	<b>N (m)</b>	<b>E (m)</b>	<b>Z (m)</b>	<b>D<sub>NE</sub> (m)</b>	<b>V<sub>H</sub>(m/mes)</b>	<b>V<sub>V</sub>(m/mes)</b>	<b>Dirección</b>
1	-0.029	0.048	-0.025	0.056	0.017	-0.008	E
2	-0.028	0.104	-0.031	0.108	0.035	-0.010	E
3	-0.057	0.080	-0.040	0.098	0.031	-0.013	S 54.5° E
4	0.118	0.114	-0.037	0.164	0.052	-0.012	N 44.0° E
5	0.212	-0.043	-0.098	0.216	0.069	-0.031	N 11.5° W
6	0.178	-0.088	-0.076	0.199	0.064	-0.024	N 26.3° W
7	0.154	-0.036	-0.068	0.158	0.050	-0.022	N
8	0.181	-0.015	-0.055	0.181	0.058	-0.018	N

#### 4.1.4.2. Desplazamientos en puntos extraídos a partir de los productos VANT

Los desplazamientos en los puntos de monitorización extraídos a partir de los MDS y ortoimágenes obtenidas con los vuelos VANT se muestran en los mapas de vectores correspondientes para la zona de Victoria (Figura 45). Los resultados se resumen estadísticamente en la Tabla 21.

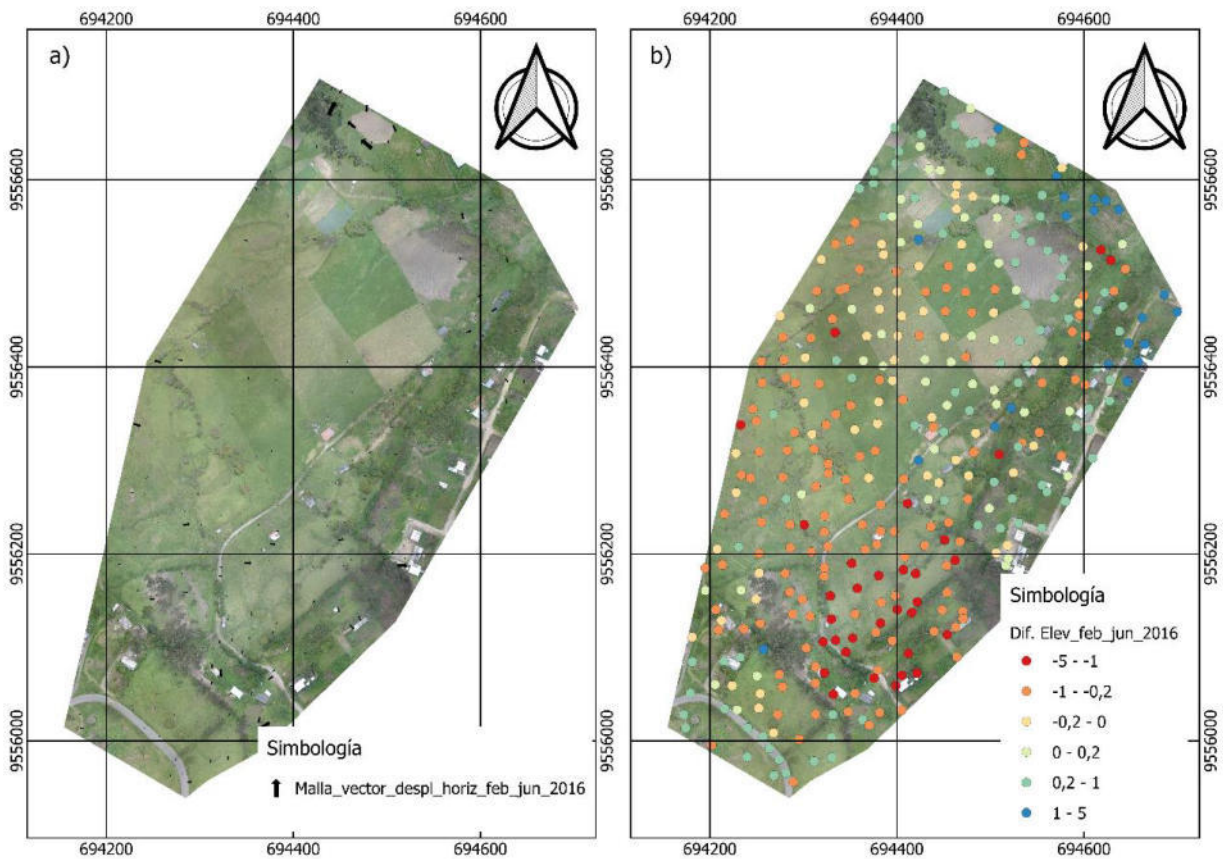


Figura 45. Mapa de vectores de desplazamiento horizontal a) y vertical b) correspondientes al sector Victoria.

En el mapa de desplazamientos horizontales se observa una tendencia general de desplazamiento hacia el N y NE, con un módulo mayor en la zona alta de la ladera, más activa, y menor en la zona más baja, de menor actividad. Así, en el sector norte, que coincide con la parta más alta de la zona inestable y en el entorno de la carretera, los desplazamientos son

moderados y predominantemente al NE; algo más abajo, donde el escarpe principal, se producen los mayores desplazamientos con una componente más hacia el N; sin embargo, en la zona central y oeste, desde el escarpe secundario hasta el barranco, los desplazamientos de nuevo moderados tienden a tomar una dirección componente al E; finalmente en la parte más baja, la actividad es menor, con desplazamientos mucho más bajos entre el N y el E. El sector este de la zona, en el entorno del barranco, tienden a mostrar desplazamientos moderados hacia el NE, aunque en el margen derecho, hay algunos desplazamientos hacia el NW a favor de la pendiente y en relación con inestabilidades menores. Los sectores estables, al norte, este y sureste, presentan desplazamientos bajos y sin una dirección clara.

Por lo que respecta a los desplazamientos verticales, se observa un predominio claro de los desplazamientos hacia abajo (negativos, en tonos naranja-rojo) sobre los desplazamientos hacia arriba (positivos, en tonos verde-azul). Además, los desplazamientos negativos tienen un mayor valor absoluto en la zona alta-central, más activa, del área inestable y algo menor hacia abajo, donde la actividad es menor. Otros sectores con mayores desplazamientos se observan en el sector oeste (escarpes laterales) y este (barranco, donde se producen las inestabilidades menores).

Estos resultados se resumen en la Tabla 22. En ella, en primer lugar, se han de analizar los resultados en el área estable, con vistas a validar la precisión de los modelos y ortoimágenes de acuerdo a los trabajos previos (Fernández et al., 2016; Zárata et al., 2021). En segundo lugar, se analizarán los resultados por la zonificación de los elementos diferenciados, con objeto de conocer la cinemática del movimiento en el periodo transcurrido entre las dos fechas consideradas.

Tabla 22. Desplazamientos y tasas horizontales y verticales en los puntos extraídos en el área de Victoria. Desplazamientos expresados en m y velocidades expresadas en m/mes. Dirección de desplazamiento expresada en grados desde el N. Radio Vector Medio es adimensional (0-1). En el número de puntos se indican tanto el número total en cada elemento como los considerados para los cálculos estadísticos, después de descartar los relacionados con zonas de vegetación densa.

Elementos	Nº P	Desplazamientos horizontales						
		Media	Min.	Max.	Desv. T.	Tasa M	Dir. M	Rad. V
Escarpe principal	3/3	0.252	0.052	0.353	0.173	0.07	354.76	0.69
Escarpes traseros	14/12	0,346	0,000	0,807	0,241	0,09	122,13	0,52
Cuerpo activo	122/105	0,210	0,000	1,057	0,202	0,05	49,77	0,22
Áreas poco activas	189/136	0,144	0,000	1,521	0,178	0,04	67,59	0,41
Otros escarpes	6/6	0,201	0,112	0,366	0,092	0,05	125,63	0,72
Otros cuerpos	5/5	0,292	0,213	0,336	0,049	0,08	60,15	0,75
Estable	26/13	0.120	0.039	0.629	0.154	0.03	76.68	0.31
Total	365/280	0.186	0.000	1.590	0.203	0.05	68.24	0.34
		Desplazamientos verticales					Desp. Totales	
Elementos		Media	Min.	Max.	Desv.T.	Tasa M	Media	Tasa M
Escarpe principal		-0.924	-1.065	-0.712	0.187	-0.24	0.963	0.25
Escarpes traseros		-0.209	-1.835	0.927	0.633	-0.05	0.866	0.23
Cuerpo activo		-0.443	-1.695	4.707	0.769	-0.10	0.736	0.19
Áreas poco activas		0.047	-4.393	2.478	0.649	0.02	0.449	0.12
Otros escarpes		-0.037	-0.458	1.408	0.633	-0.02	0.200	0.05
Otros cuerpos		-0.499	-1.245	-0.104	0.463	-0.13	0.605	0.16
Estable		-0.050	-0.426	0.277	0.239	-0.03	0.130	0.03
Total		-0.102	-4.393	5.336	0.813	-0.03	0.619	0.16

Con respecto a los puntos situados en el sector estable, se observa que los desplazamientos horizontales presentan un valor medio de 0,120 m y una desviación típica de 0,154, que exceden la incertidumbre o límite de detección que se estableció en 0.10 m para la componente horizontal. Este exceso en estos puntos se explica por la posición periférica de las áreas consideradas estables, en las que los modelos no se ajustan bien y generan ciertos errores. De hecho, dentro del área inestable menos activa, los desplazamientos medios y la desviación típica son similares a los del área estable (0,120 m y 0,154 m, respectivamente), al ocupar una posición más centrada en la zona de estudio. La dirección de desplazamiento no es significativa, de hecho, esta área presenta al menor radio vector medio, lo que es indicativo de una fuerte dispersión. Por su parte, los desplazamientos verticales en el área considerada estable presentan un valor medio de -0,050 m y una desviación de 0,239 m, siendo esta última algo superior a la incertidumbre establecida en 0,15 m. La explicación de este exceso es la misma que en el caso anterior, es decir, los desplazamientos se deben a errores en los modelos en la periferia de la zona, más que a verdaderos desplazamientos. Las tasas de desplazamiento deducidas, tanto en la componente horizontal (0.04 m/mes) y vertical (-0.03 m/mes) no se consideran tampoco significativas. Como consecuencia de todo lo expuesto, y aún con este exceso de error en los puntos estables, dados los errores calculados en la orientación, los modelos se consideran fiables, aunque el límite de detección debería aumentarse en esta zona de trabajo, hasta 0.20 m en la componente horizontal y 0.25 m en la vertical.

En el resto de las áreas y elementos diferenciados se observan mayores desplazamientos y tasas de desplazamiento. Así, los mayores desplazamientos horizontales medios se producen en los escarpes principales (0.25 m) y traseros-laterales (0.35 m) que se traducen en tasas de 0.7-0.9 m/mes, con direcciones medias hacia el N y el E, respectivamente. La parte más activa del cuerpo del área inestable presenta un desplazamiento medio por encima del límite de detección

(0.21 m), con una tasa de 0.05 m/mes; mientras que la parte menos activa está por debajo (0.14 m), ambas áreas con una dirección en torno al NE, pero con bastante dispersión). Finalmente, las áreas de inestabilidad menores presentan desplazamientos medios algo por encima del límite de percepción (0.20 en los escarpes y 0.29 en los cuerpos), con tasas entre 0.05 y 0.08 m/mes, respectivamente; y direcciones E y NE.

En cuanto a los desplazamientos verticales, destacan los fuertes descensos medios observados en el escarpe principal (0.92 m), la parte más activa del cuerpo de la zona inestable (0.44 m) y en menor medida en los escarpes traseros (0.21 m), lo que produce tasas de 0.24, 0.19 y 0.05 m/mes, respectivamente. Por el contrario, la parte más baja y menos activa del área inestable, presenta desplazamientos de -0.05 m, claramente por debajo del límite de percepción de 0.25 m. En cuanto a las inestabilidades menores, los escarpes presentan descensos poco significativos (0.04), frente a los cuerpos (0.50 m), que producen tasas de 0.13 m/mes en el caso de los últimos.

El resultado combinado de ambas componentes produce los mayores desplazamientos en los escarpes principal y traseros (0.96 y 0.87 m) seguidos de la parte más activa de la zona inestable (0.74 m) con una mayor componente vertical en el escarpe principal y horizontal en los escarpes traseros y el cuerpo. A continuación, se encuentran las áreas inestables menores, con desplazamientos de 0.20m en los escarpes y 0.60 m en los cuerpos. Los menores desplazamientos se producen en las partes menos activas del área inestable (0.45 m) y el área estable (0.130 m).

### **4.1.5. Desplazamientos medidos mediante análisis de correlación de imágenes**

En este apartado se presentan los resultados de la aplicación de las técnicas de correlación digital de imágenes para la estimación de desplazamientos horizontales (y verticales en el caso del método basado en SfM).

#### **4.1.5.1. Software Cosi-Corr**

Los resultados obtenidos en la aplicación de este software para la detección de desplazamientos horizontales se muestran en la Figura 46. Los resultados corresponden a la utilización de la banda 4 (rojo) de las ortoimágenes como imágenes de partida, con unas ventanas de análisis de 256 píxeles de inicio y 32 píxeles de final, y un paso entre imágenes de 16 píxeles. . Se han realizado otras pruebas con otras imágenes (sombreado) y bandas, tamaños de ventana y paso, siendo esta la que da resultados más coherentes. Se ha empleado una escala trimodal para la representación de los desplazamientos negativos (rojo-naranja) y positivos (azul-verde).



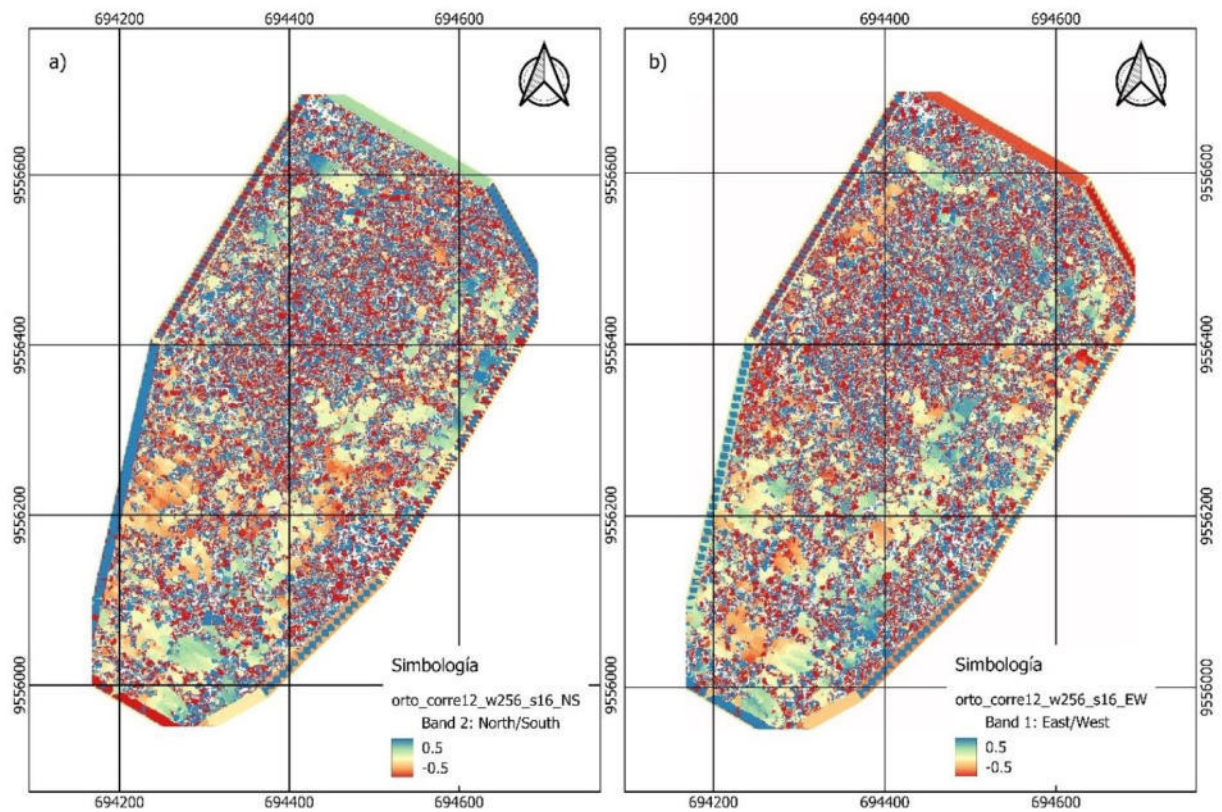


Figura 46. Mapa de desplazamientos horizontal en la dirección N-S a) y E-W b) correspondientes al sector Victoria.

Por su parte, en la Figura 47 se muestra los desplazamientos horizontales totales en magnitud, en una escala de rojos (más intensos cuanto mayor desplazamiento); y orientación, con la paleta utilizada para los modelos de orientaciones.

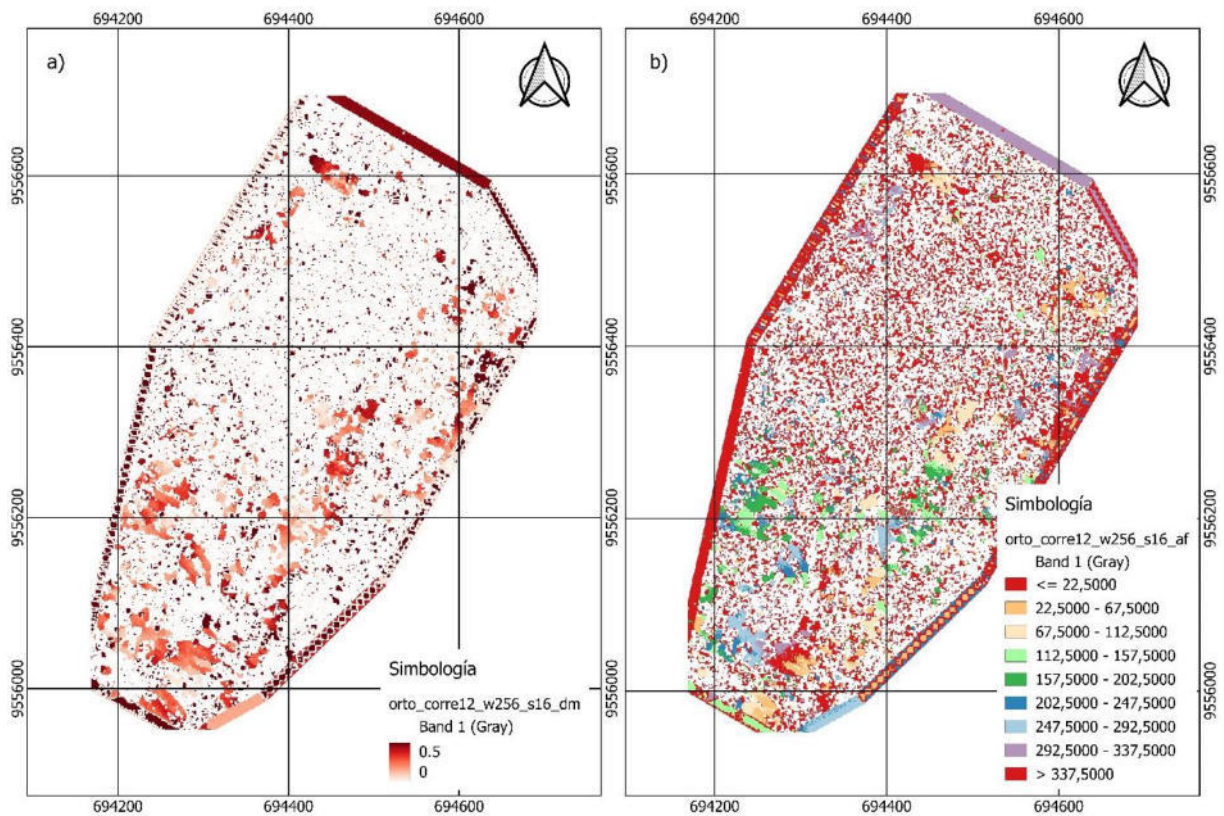


Figura 47. Mapa de desplazamientos horizontales totales en magnitud en la dirección N-S a) y E-W b) correspondientes al sector Victoria.

La observación de las imágenes de desplazamientos no permite llegar a establecer un patrón claro de deformación, lo que está en consonancia con la imagen del índice SNR que muestra una gran irregularidad. Tan solo en la zona alta de la ladera, se aprecian sectores con una cierta coherencia en torno a los escarpes y por encima de ellos, con desplazamientos positivos tanto en la dirección N-S como en la dirección E-W, lo que indica desplazamientos en dirección NE, aunque no suelen ser superiores a 0.5 m en ambas direcciones. En algunos sectores más al oeste se aprecian desplazamientos negativos en N-S y positivos en E-W; es decir, desplazamientos al E o SE, de similar magnitud que los anteriores. En los sectores este de la zona (barranco) y sur (parte menos activa del área inestable) apenas se aprecian desplazamientos con una cierta coherencia.

#### **4.1.6. Discusión de la zona de estudio Victoria**

En este apartado, primero se presentan algunas reflexiones sobre la precisión e incertidumbre de los datos obtenidos; en segundo lugar, se discute sobre la caracterización de la zona y el área inestable a partir de las ortoimágenes, los modelos y sus derivados; en tercer lugar, se resumen y comparan los resultados de las medidas de desplazamientos con vistas a conocer la evolución y cinemática del área inestable.

##### **4.1.6.1. Precisión e incertidumbre**

La precisión de los modelos y ortoimágenes obtenidas a partir de las imágenes capturadas mediante vuelos VANT se estableció a priori en el proceso de orientación fotogramétrica, con los errores calculados en los puntos de control y chequeo.

En esta zona los errores horizontales son inferiores a superan 0.06 m y los verticales prácticamente no superan los 0.04 m, tanto en los puntos de control como en los de chequeo. De ahí, con los criterios establecidos en el apartado 3.3.2.4 comunes todas las zonas de trabajo, la precisión horizontal de las ortoimágenes se estableció en 0.10 m, la de los MDS se fijó igualmente de 0.10 m y la de los MdD en 0.15 m, en consonancia con lo encontrado en trabajos anteriores (Carvajal et al., 2011; Niethammer et al., 2012; Turner et al., 2015; Vruloba et al., 2015; Peterman, 2015; Fernández et al., 2015; 2016; Eltner et al., 2016; Lindner et al., 2016; Cardenal et al., 2019). A estos datos hay que añadir que, si se comparan puntos observados en dos ortoimágenes, la precisión del desplazamiento sería de 0.15 m, siguiendo un criterio similar al de los MdD.

Sin embargo, tras la extracción de los puntos significativos y sus coordenadas XYZ en las ortoimágenes y MDS de los dos vuelos, el cálculo de los desplazamientos entre puntos homólogos en la zona considerada estable, concretamente de la media y la desviación típica nos

proporciona una medida de la precisión. En este caso, los desplazamientos horizontales tienen una media de 0.120 m y una desviación típica de 0.158 m, que excede ligeramente de la precisión a priori, que es de 0.15 m. Por su parte, los desplazamientos verticales presentan un valor medio de -0.050 y una desviación típica de 0.239 m, que excede claramente de la precisión vertical de las comparaciones de modelos como en los MdD. En relación con estos últimos, el valor medio del MdD en el área estable es de 0.13 m y la desviación típica es de 0.31 m, este último valor excediendo de las precisiones verticales establecidas para estos modelos, lo que se explica porque el área inestable ocupa una posición muy periférica, de ahí que el ajuste no sea muy bueno; de hecho, los valores medios del MdD en el área inestable poco activa que ocupa una posición más centrada, sí están dentro del umbral (media de 0,10 m y desviación típica de 0.23 m) . De ahí, que como conclusión de todo y para una mayor seguridad en las medidas la precisión horizontal se fije finalmente en 0.15 m en la componente horizontal y 0.25 m en la vertical.

#### **4.1.6.2. Caracterización del área inestable**

La caracterización general de la zona de inestabilidad general, sus elementos y otras inestabilidades presentes en la zona se realiza fundamentalmente a partir del análisis de la ortoimagen, el MDS, perfil y modelos derivados de la primera fecha considerada.

Así, tanto en la ortoimagen como en la representación pseudo 3D de la nube de puntos y el modelo de sombreado se observa una ladera que no muestra grandes evidencias de inestabilidad, más allá de algunos escarpes, escalones y grietas en algunos sectores determinados como la zona central superior entre la carretera y el camino, y las evidencias menores que se observan en el entorno del barranco al este de la zona. La interpretación de estas imágenes permite diferenciar un escarpe principal con evidencias de actividad; otros escarpes

traseros y laterales con menos evidencias; un área de inestabilidad general más activa en la parte más alta y menos activa en la parte más baja; y una serie de inestabilidades menores en la zona del barranco en la que se han distinguido el escarpe y el cuerpo.

En este apartado, primero se presentan algunas reflexiones sobre la precisión e incertidumbre de los datos obtenidos; en segundo lugar, se discute sobre la caracterización de la zona y el área inestable a partir de las ortoimágenes, los modelos y sus derivados; en tercer lugar, se resumen y comparan los resultados de las medidas de desplazamientos con vistas a conocer la evolución y cinemática del área inestable.

La observación detallada del MDS y los modelos derivados, junto al análisis correspondiente, permite la caracterización general de la ladera ocupada en su mayor parte por el área inestable, así como de sus elementos y los rasgos del relieve diferenciados. De esta manera, prescindiendo de las distorsiones que introduce la vegetación de arbolado y los propios cultivos, en la parte central de la zona se observa una ladera inclinada hacia el NNE, con los sectores de mayor elevación circundando al área inestable por el S, pero también por el W; el área considerada inestable tiene una orientación hacia el NE frente a la estable orientada más hacia el N. La pendiente media es algo mayor en el sector más elevado que coincide con la parte más activa de la inestabilidad general ( $17^\circ$ ), y más suave en la parte más baja y menos activa de la misma ( $13^\circ$ ), al igual que en el área estable ( $13^\circ$ ). El sombreado no permite diferenciar unas áreas de otras de forma clara, con valores moderados de iluminación en todas ellas (161, 172 y 184, respectivamente). Todo este sector muestra una curvatura (TPI) prácticamente nula y una baja rugosidad (TRI) de 0.04 en el área inestable y 0.03 en la estable. Finalmente, el TWI aumenta en términos medios hacia la parte baja y central de la ladera con un valor medio de 3.2 en el área inestable activa, 3.4 en la menos activa y 2.7 en la estable; así, aunque el área inestable no

muestra morfología clara de vaguada, sí parece acumular el agua en este sector. Por lo tanto, las únicas diferencias significativas en los factores analizados se producen en la pendiente y el TWI (Tabla 23).

Toda esta morfología más o menos uniforme, se ve interrumpida por la presencia de algunos escarpes en el sector más activo del área inestable y de un barranco que discurre por el este de la zona. Los escarpes se observan en casi todos los modelos derivados, especialmente el escarpe considerado principal. Este destaca de forma clara en el modelo de pendientes y en menor medida en el de rugosidad (TRI); así, el rango por área de estos elementos es de 1.99 y 1.33 para el escarpe principal y secundario; las pendientes medias son de 25.5 y 22.9, respectivamente, sensiblemente superiores a los de las otras áreas; y el TRI alcanza igualmente valores más altos (0.06 frente a 0.04), pero no es tan diferenciador a esta resolución como la pendiente. Los escarpes también quedan marcados en el modelo de sombreado (valor de 134, sensiblemente más bajos que las otras áreas), pero no el de orientación ya que el escarpe presenta orientaciones similares al terreno circundante, al ENE en el principal y al E en los trasero-laterales. Además de la pendiente, un factor de gran interés para la detección de escarpes es la curvatura o el TPI, que en este caso no proporciona resultados claros a la resolución de 0,05 m, aunque los valores son algo más altos que en las otras áreas (0.06 frente a 0.04); sin embargo, a la resolución de 1 m, sí se marca las líneas de ruptura de la pendiente superiores e inferiores al escarpe, sobre todo en el principal. La observación del TWI no proporciona una gran ventaja en la detección de los escarpes, ya que presentan valores similares a las otras áreas en el escarpe principal (3.2) y algo más bajos en los traseros y laterales al estar en una posición topográficamente más alta (1.9). Por lo tanto, en los escarpes, además de la pendiente, aparece como factor diferenciador respecto a las otras áreas el sombreado, y el TPI y TRI a resolución de 1 m.

En cuanto al sector del barranco, en el que aparecen las inestabilidades menores, este queda definido por la menor elevación respecto a sus márgenes, la pendiente y rugosidad elevadas, las diferencias de orientación a ambos márgenes (NE y NW), el sombreado cambiante, un TPI negativo, así como un TWI elevado. Algunas de estas características las presentan los cuerpos y escarpes de las inestabilidades que en él se generan. Así, tanto unos como otros, pero especialmente los escarpes, presentan una mayor pendiente y rugosidad que el resto de la zona y el sector del barranco; así, la relación R/A es de 2.23 en los escarpes y 0,76 en los cuerpos; la pendiente es de 35° y 30°, respectivamente; y la rugosidad de 0.09 y 0.10, todas ellas sensiblemente mayores que otros elementos, aunque no tanto de su entorno en el barranco. La orientación (N en ambos casos, como promedio entre las orientaciones NW y NE) y el sombreado moderado no son muy distintivos ya que son similares al entorno. El TPI tampoco permite distinguir los escarpes ni el cuerpo, a pesar que las desviaciones típicas son algo significativas (0.03 y 0.02), ya que los escarpes están en la línea superior y los cuerpos en la línea inferior de ruptura de pendiente del barranco, es decir, no se diferencian de su entorno. Con el TWI sucede algo similar ya que los escarpes están situados en la parte alta del barranco con valores menores (2.73) y los cuerpos en la parte baja con valores más altos (4.04) y tampoco tienen valores diferenciales respecto a su entorno. En este caso los factores diferenciadores son la pendiente y en menor medida el TPI y el TRI a resolución de 1 m, y el TWI.

En la Tabla 23 se resumen los factores diferenciadores:

Tabla 23. Factores diferenciadores para la caracterización del área inestable de la zona Victoria.

Elemento	R/A	Pendi.	Orient.	Somb.	TPI-DT	TRI	TWI
<b>Área de inestabilidad principal</b>							
Escarpe principal	1.99	25.51	67.49	134	0,03	0.06	3.24
Escarpe trasero	1.33	22.86	87.77	134	0,02	0.06	1.95
Cuerpo activo	0.19	17.44	58.94	162	0,02	0,04	3.16
Áreas poco activas	0.14	13.01	46.52	172	0,01	0,04	3.37
<b>Inestabilidades menores</b>							
Otros escarpes	2.23	34.76	18.92	160	0,03	0.09	2.44
Otros cuerpos	0.76	30.29	22.10	158	0,02	0.10	4.04
<b>Área estable</b>							
Estable	0.70	13.01	354.86	185	0,00	0,03	2.73

Los perfiles corroboran la interpretación y el análisis realizado. Así, el perfil longitudinal muestra los dos tramos de pendiente tramos con bastante nitidez, la parte superior más activa del área inestable, con mayor pendiente, incluso a veces fuerte como en el escarpe principal; y la parte inferior menos activa, con menor pendiente. No se observan tramos contrapendiente, salvo en sectores donde hay vegetación arbórea, lo que es compatible con la uniformidad de la orientación y el sombreado en la ladera. En la parte del escarpe principal, se pueden observar las rupturas de la pendiente que se corresponden con los valores positivos y negativos del TPI. La rugosidad también se observa muy baja en todo el perfil, salvo en los sectores con vegetación arbórea y los cultivos.

En los perfiles transversales se aprecia la forma en general plana y llana de la ladera, aunque con una cierta concavidad en la parte central, lo que lleva a que el TWI sea más alto en este sector central, tanto en la parte más alta de la ladera (más activa) como en la más baja (menos activa). El hecho de que la morfología sea cóncava, y no convexa, implica que de momento no



se ha diferenciado ningún cuerpo en el área inestable. En algunos de los perfiles se observan los escarpes trasero-laterales con sus pendientes y sus líneas de ruptura, ambas más moderadas que en el escarpe principal; y el barranco con su mayor pendiente y su línea de ruptura superior, a favor de la cual se producen escarpes y movimientos de menor envergadura.

#### **4.1.6.3. Cinemática y evolución del área inestable**

En este apartado, en primer lugar, se analizarán la coherencia entre los distintos métodos de medida de los desplazamientos, tanto los automáticos (MdD, distancias entre superficies 3D y análisis de correlación de imágenes), como los manuales (puntos extraídos y sobre el terreno (puntos GNSS)). A continuación, se examinarán las observaciones realizadas en los perfiles y los modelos derivados en relación con los desplazamientos medidos. Finalmente se hará una reconstrucción de la evolución del movimiento.

El MdD y la proyección sobre el plano de las distancias entre las superficies 3D muestran una coincidencia bastante grande, como se observa en la comparación visual entre ambos, con descensos en el área inestable más activa, sobre todo en el escarpe principal, y sin cambios perceptibles en el resto de la zona. Así, si se obtiene el mapa de diferencias entre ambos (concretamente distancias 3D-MdD), la diferencia es bastante reducida en valor absoluto (Figura 48). No obstante, en la parte más activa y los escarpes se observa una tendencia a valores positivos en el mapa de diferencias y negativas en el mapa de diferencias entre valores absolutos. Esto se debe a que las distancias calculadas entre las superficies 3D son las distancias mínimas posibles y, por lo tanto, inferior a las calculadas en cualquier otra dirección, como la vertical que es la correspondiente a los MdD. Al ser un sector con distancias negativas en ambos casos, el mapa de diferencias proporciona una diferencia positiva (negativa en valor absoluto). En la zona baja de la ladera, menos activa y baja pendiente, las diferencias en valor absoluto

son mucho menores. Esto se debe a que la diferencia entre ambas distancias (superficies 3D y Mdd) es nula cuando las superficies son horizontales, incrementándose conforme la pendiente de ambas superficies aumenta. La aparición de diferencias absolutas positivas entre ambas superficies se produce en superficies muy irregulares con cambios en la componente horizontal y vertical, como el caso de la vegetación arbórea.

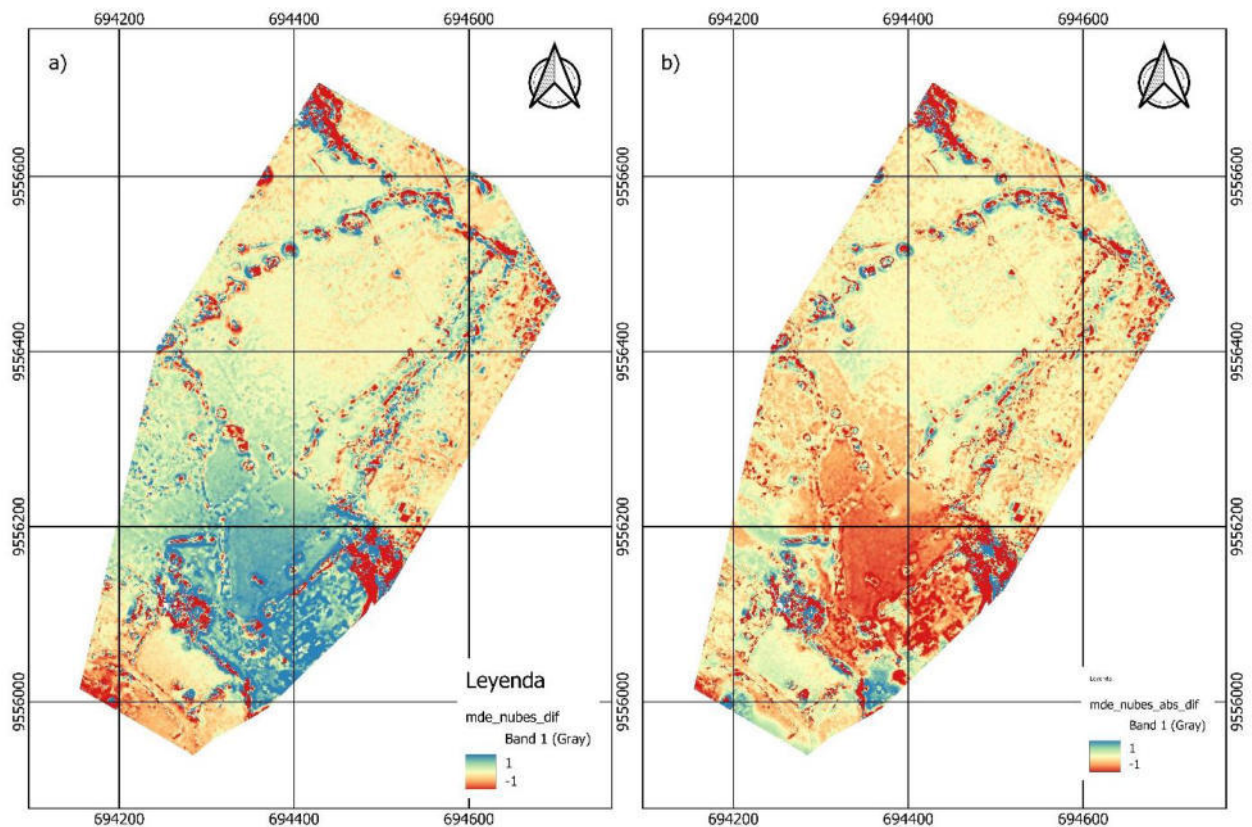


Figura 48. Mapas de diferencias entre el mapa de distancias 3D entre superficies y el Mdd: a) diferencia entre valores netos; b) diferencia entre valores absolutos.

Por su parte, el mapa de desplazamientos horizontales obtenido con Cosi-Corr muestra solo desplazamientos muy sutiles, inferiores a 0.5 m en la parte superior del área inestable, hacia el N en el sector del escarpe principal y hacia el ENE en el sector de los escarpes laterales, casi siempre según la inclinación de ladera y de avance del movimiento. Esto coincide en términos generales con los sectores de mayores descensos del área inestable, observados tanto en el Mdd como en el modelo de distancias 3D, siguiendo así la tendencia general de la evolución del

terreno, y los objetos situados sobre él, en un área inestable, que es desplazarse hacia abajo y hacia adelante. También se observan desplazamientos hacia el E en el sector del barranco coincidiendo con alguna de las inestabilidades menores en las que se aprecian descensos de la superficie; y en el NW de la zona, en el área menos activa pero cerca de los escarpes laterales, que igualmente coinciden con sectores de descensos sutiles en el MdD y el modelo distancias 3D.

Considerando ahora los desplazamientos medidos en puntos extraídos de los productos VANT, en primer lugar, se van a analizar los desplazamientos horizontales en relación con los observados en los puntos GNSS y los estimados con el análisis de correlación de imágenes; y en segundo lugar, se analizarán los desplazamientos verticales en relación con los observados en los GNSS, así como con los MdD y las distancias 3D.

En cuanto a los primeros, se aprecian de forma clara desplazamientos horizontales destacados hacia el N en el sector más activo del área inestable, en el entorno del escarpe principal, con magnitudes que normalmente no superan 0.5 m y prácticamente nunca 1 m. En este sector hay un punto GNSS (6) que marca un desplazamiento de 0.2 m hacia el NNW, compatible con lo dicho. Por encima de este sector, hasta la carretera, se observan vectores de desplazamiento hacia el NE, de 0.20-0.30 m (en el límite de la incertidumbre horizontal) hacia el NE; en este sector se encuentra otro punto GNSS (4) que igualmente presentan un desplazamiento de 0.164 al NE coincidente con la tendencia general. En todo este sector se aprecian desplazamientos generalmente inferiores a 0.5 m al N y NE en el mapa de desplazamientos horizontales obtenido con análisis de correlación de imágenes, que igualmente son compatibles los calculados en los puntos VANT y GNSS.

Más hacia el sur y hacia el oeste de la zona, en el sector también activo entre los escarpes laterales y el camino, se aprecian vectores de desplazamiento horizontal hacia el ENE y E, de nuevo con magnitudes moderadas que apenas superan 0.5-1 m. En este sector, el punto GNSS medido (7) marca, sin embargo, 0.158 m en dirección N, lo que puede ser debido a un efecto local, como se observa en algunos otros puntos aislados de este sector; sin embargo, otros puntos GNSS como el 1 o 3 situados más al sur, en el área menos activa pero cercanos a los escarpes laterales, muestran desplazamientos de 0.05-0.10 m al E y SE, compatibles con este sector menos activo de la ladera. Finalmente, en el sector del barranco también se observan desplazamientos al E y localmente al NNW, algunos de ellos en relación con las inestabilidades menores (desplazamientos medios de 0.25 m). También en estos sectores se observan una buena coincidencia con los desplazamientos estimados con las técnicas de correlación de imágenes, con desplazamientos al E en el sector del escarpe lateral, y al E y NW en el barranco.

Como resumen, los desplazamientos horizontales medios del área activa (0.21 m y dirección NE) coinciden con los valores medios de los puntos 4, 5, 6 y 7; mientras que los situados en el área menos activa (0.14 m al E) lo hacen con los puntos 1 y 3. En estas áreas hay sectores donde se pueden estimar desplazamientos con las técnicas de correlación de imágenes compatibles con los desplazamientos medidos a partir de los productos VANT y los GNSS. Otros puntos GNSS como el 8, situado en la parte menos activa aunque cerca del barranco, no muestra una coincidencia clara con la tendencia general del sector hacia al NE. Algo similar sucede con el punto 2 situado en el área estable que muestra un desplazamiento de 0.10 hacia el E en un sector cercano al límite de la zona donde la tendencia no es nada clara.

Por lo que respecta a los desplazamientos verticales, los puntos situados en el área más activa presentan los desplazamientos negativos más destacados (0.5-1 m) en el sector del escarpe

principal y menos (0.2-0.5) en el entorno de la carretera y de los escarpes laterales. En esta área se sitúan los puntos GNSS 4, 5 6 y 7 con descensos de entre 0.04 y 0.10 m, sensiblemente inferiores a los valores de los puntos extraídos desde los productos VANT, cuyo valor medio es de -0,44 m. En el área más activa, prescindiendo de los sectores con vegetación, se localizan igualmente los mayores descensos en los MdD y los modelos de distancias 3D, que llegan a superar 1 m en algunos sectores como el del escarpe (media de -0,56 m), aunque en general son inferiores (la media del MdD en el área es de -0,28 m).

Por su parte, en el área menos activa los desplazamientos verticales son muy reducidos, con una media de -0,05 m que indica un descenso muy leve en términos generales, compatible en este caso con los valores calculados en los puntos 1 y 3, de -0.025 y -0.040 m, respectivamente. El MdD y el mapa de distancias 3D muestran igualmente diferencias casi imperceptibles, salvo en zonas con arbolado y cultivos (la media del MdD es de 0.13 m). Como excepción aparecen los sectores en torno al barranco donde se aprecian descensos, en algunos casos relacionados con las inestabilidades menores; y ascensos, generalmente consecuencia del crecimiento de la vegetación. El MdD y el mapa de distancias 3D muestran diferencias negativas y positivas compatibles con lo observado en los puntos. El punto GNSS 8 presenta un descenso de 0.055 m compatible con los descensos observados tanto en los puntos VANT y el MdD en este sector del área menos activa. En el punto GNSS 2, situado en el área considerada estable, el descenso de 0.10 m contrasta un poco con el leve ascenso observado en el MdD, aunque la posición del mismo en límite de la zona puede haber distorsionado el ajuste del modelo.

Como resumen de los desplazamientos verticales, se aprecia de nuevo una buena coincidencia general entre los desplazamientos en los puntos extraídos de los productos VANT con los puntos GNSS y los estimados a partir del MdD y el mapa de distancias 3D entre superficies.

Por otra parte, una forma interesante de estudiar los cambios, y por lo tanto, la evolución de una ladera inestable es la comparación de los modelos derivados. Sin embargo, en esta zona donde los cambios del MDS son tan limitados, si se exceptúan los sectores con arbolado y en menor medida los cultivos, este análisis no proporciona resultados demasiado prometedores. Solamente en el detalle se aprecian algunos cambios muy sutiles en los escarpes, como aumento de la pendiente o una mayor oscuridad en el sombreado; pero tampoco se observan retracción de los mismos, por ejemplo, mediante la comparación de las líneas de ruptura extraídas del TPI, que siguen un trazado prácticamente coincidente. Tampoco se pueden ver cambios significativos en la orientación, la rugosidad o el TWI, ni siquiera en los escarpes.

De todo lo dicho, junto con la información sinóptica que aportan los perfiles se puede resumir la evolución de la ladera y el área inestable entre ambas fechas consideradas. Así, en el perfil longitudinal que coincide aproximadamente con la dirección general de inclinación de la ladera, se observa que la superficie del terreno presenta una pendiente moderada en el tramo superior, que llega a ser más acusada en el escarpe principal y que se va suavizando hacia la parte inferior. A partir de esta situación se produce un cierto desplazamiento del terreno en algunos sectores, especialmente en lo que ha definido como área inestable activa, que está localizada en la parte superior de la ladera de mayor pendiente. El desplazamiento tiene una pequeña componente horizontal (0.5 m) y vertical (en torno a 0.5 m en ambas), como se deduce del MdD y el modelo de distancia 3D, además del perfil, siendo la tasa de 0,13 m/mes en la parte activa; siendo mucho menor, de 0.04 m/mes en la parte menos activa. Así, el área inestable activa puede ser catalogada dentro de los movimientos muy lentos, mientras que el área menos activa estaría cerca de las extremadamente lentas, aunque los desplazamientos están por debajo del umbral de incertidumbre. En los otros perfiles transversales a la ladera, se aprecia la forma ligeramente cóncava de la ladera hacia el sector central, lo que facilita la circulación y acumulación de agua,

como se observa también en los modelos TWI. Solo se detecta un pequeño descenso en el perfil superior, no así en los otros dos en sectores más estables. Además, se puede observar tanto el escarpe lateral con ligeros descensos de la superficie compatibles con los datos como el perfil del barranco, en el que hay pequeños cambios asociados a la parte alta, correspondientes a las inestabilidades menores. La conclusión de todo ello es un área inestable de tipo reptación, con sectores de mayor actividad en la parte alta de ladera, donde se forman escarpes (principal) o se reactivan escarpes previos. Estos pueden corresponder a una ladera residual donde se han ido formando flujos de tierra a lo largo del tiempo en el proceso de evolución de las vertientes de la cuenca de Loja; esta evolución se produce a favor de materiales de tipo areniscas con lutitas, fuertemente alterados en superficie por las condiciones climáticas y la intensa actividad agrícola de la zona.

## **4.2. Zona de estudio Colinas Lojanas**

### **4.2.1. Ortoimágenes y zonificación del movimiento de ladera**

La Figura 49 muestra las ortoimágenes de la zona de estudio de Colinas Lojanas en los tres periodos de observación. La resolución es de 0.05 m y la incertidumbre asumida es de 0.10 m.



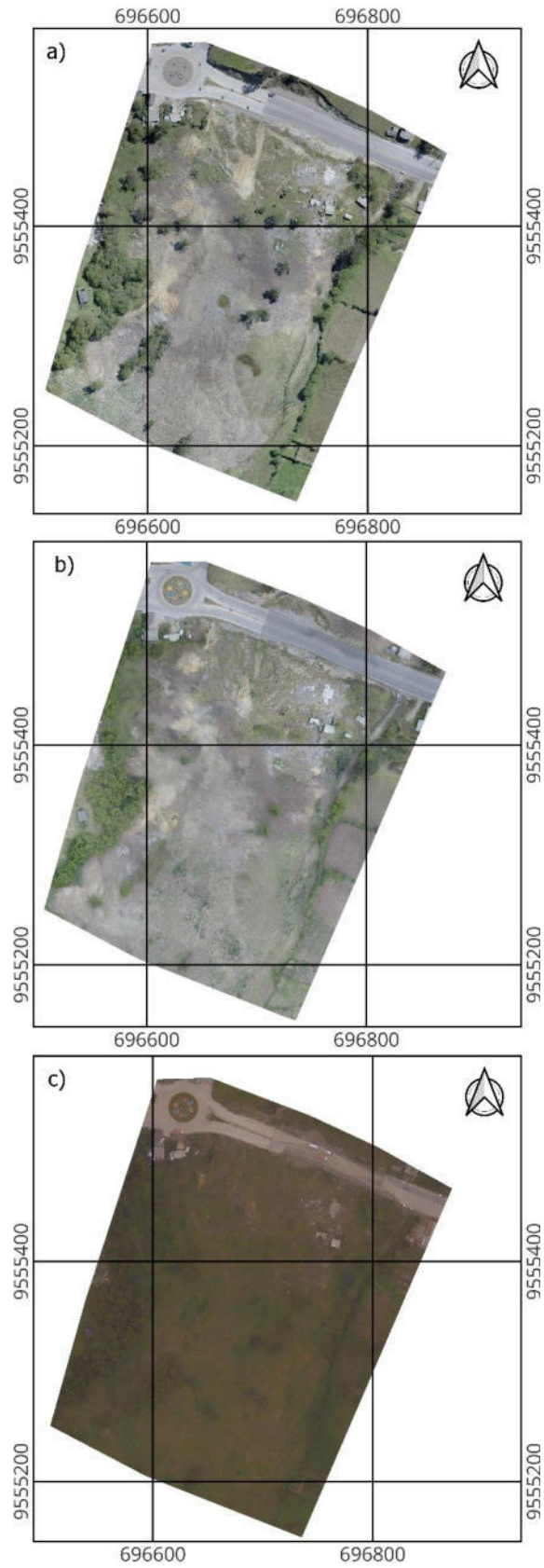


Figura 49. Ortoimágenes del sector Colinas Lojanas generados obtenidas a partir de imágenes de VANT: a) 4/julio/2016, b) 29/noviembre/2016 y c) 12/enero/2018.

La fotointerpretación y delineación de los elementos del movimiento de ladera de la zona de Colinas Lojanas, llevadas a cabo a partir de la ortoimágen, con el apoyo del MDS, los MdD y los modelos derivados se muestra en el mapa de la Figura 50.

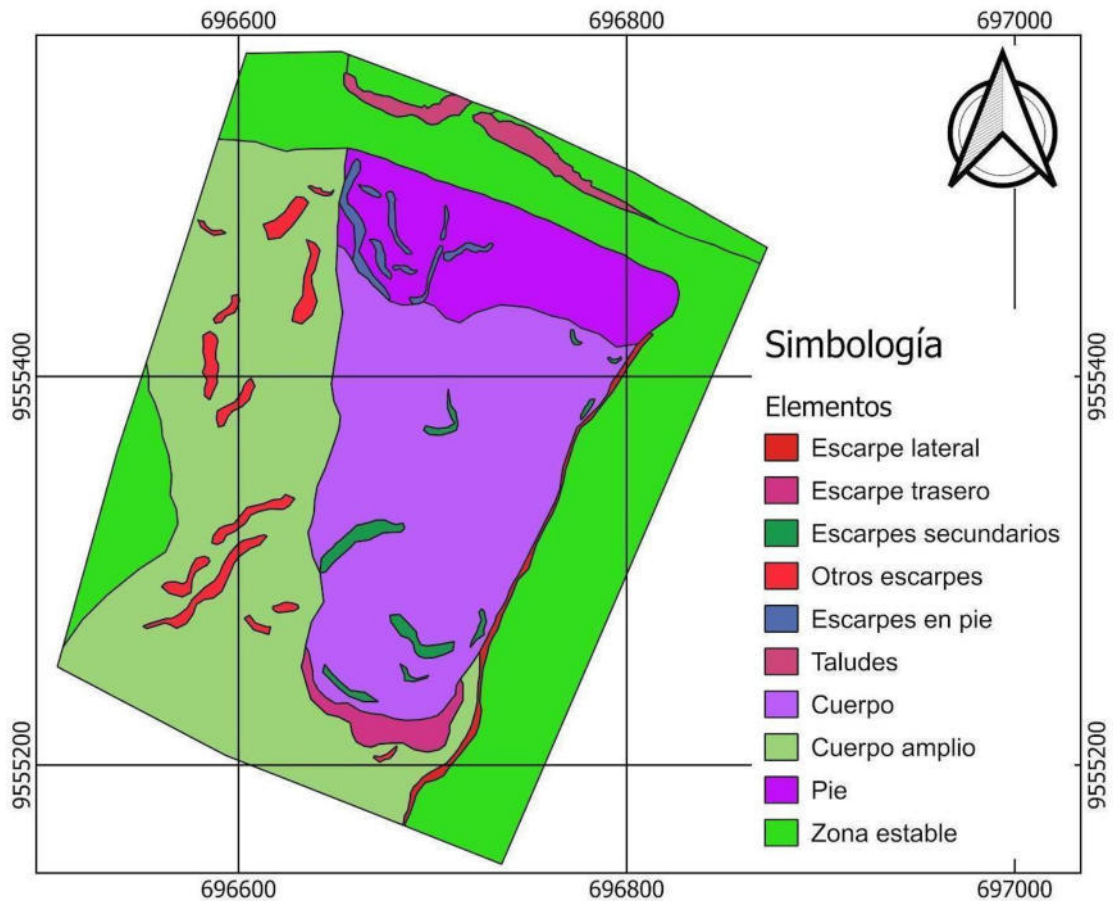


Figura 50. Fotointerpretación y delineación de los elementos del movimiento de ladera.

En general se aprecia un área de inestabilidad, con procesos de reptación en toda la ladera que originan la emisión de flujos de tierras como el que se ha producido en el periodo estudiado, afectando a la carretera que discurre por la parte más baja de la zona de estudio, así como a algunas construcciones y cultivos situados sobre ella. En el mapa se han diferenciado los siguientes elementos:

#### Movimiento principal:

1. Escarpe principal del movimiento de tipo flujo de tierras (movimiento principal, más activo en el periodo de estudio) que afecta a la zona de estudio.
2. Escarpe lateral bien desarrollado, localizado en el flanco derecho del movimiento. El escarpe continúa por encima del movimiento principal, lo que induce a pensar en que forma parte de un movimiento mayor y más antiguo.
3. Cuerpo del movimiento principal, que se extiende hacia abajo en la ladera, entre el escarpe principal y el pie de la zona de la carretera. Por las características del movimiento no se ha podido diferenciar una zona de cabecera bajo el escarpe.
4. Escarpes secundarios dentro del cuerpo del movimiento principal, con morfologías no muy pronunciadas pero evidentes.
5. Pie del movimiento principal, que representa la terminación del movimiento en la parte baja de la zona estudiada, sobre la carretera.
6. Escarpes y escalones en la zona del pie del movimiento principal.

#### Área de inestabilidad general

7. Cuerpo del área de inestabilidad general, con movimientos residuales de tipo reptación que se extiende más allá del escarpe principal (parte más alta de la ladera, al sur) y el flanco izquierdo (sector oeste de la zona).
8. Otros escarpes, formados fuera del movimiento principal en el área de inestabilidad general.

Otros elementos en la zona de estudio

9. Taludes en el margen sur de la carretera, donde se producen algunos procesos de erosión, pequeños colapsos y caída de piedras

Área estable

10. Área estable, que se sitúa fundamentalmente en el sector este de la zona de estudio, tras una vaguada que discurre con dirección NS, o bajo la carretera; también aparece en menor medida en el sector oeste, tras otra vaguada.

#### **4.2.2. Modelos digitales de superficies y su evolución**

En este apartado se presentan los MDS de las tres fechas consideradas, junto al modelo de diferencia y los desplazamientos en 3D entre cada dos fechas, así como los correspondientes perfiles topográficos de cada una de ellas. La resolución es de 0.10 m y la incertidumbre vertical se asume de 0.15 m.

##### **4.2.2.1. Modelos digitales de superficies**

En la Figura 51 se muestran los MDS de la zona de Colinas Lojanas en las tres fechas consideradas, con una resolución de 0.10 m y una incertidumbre vertical igualmente de 0.10 m. Como en la zona anterior, se representa con una paleta gradual que pasa del verde al amarillo y marrón.

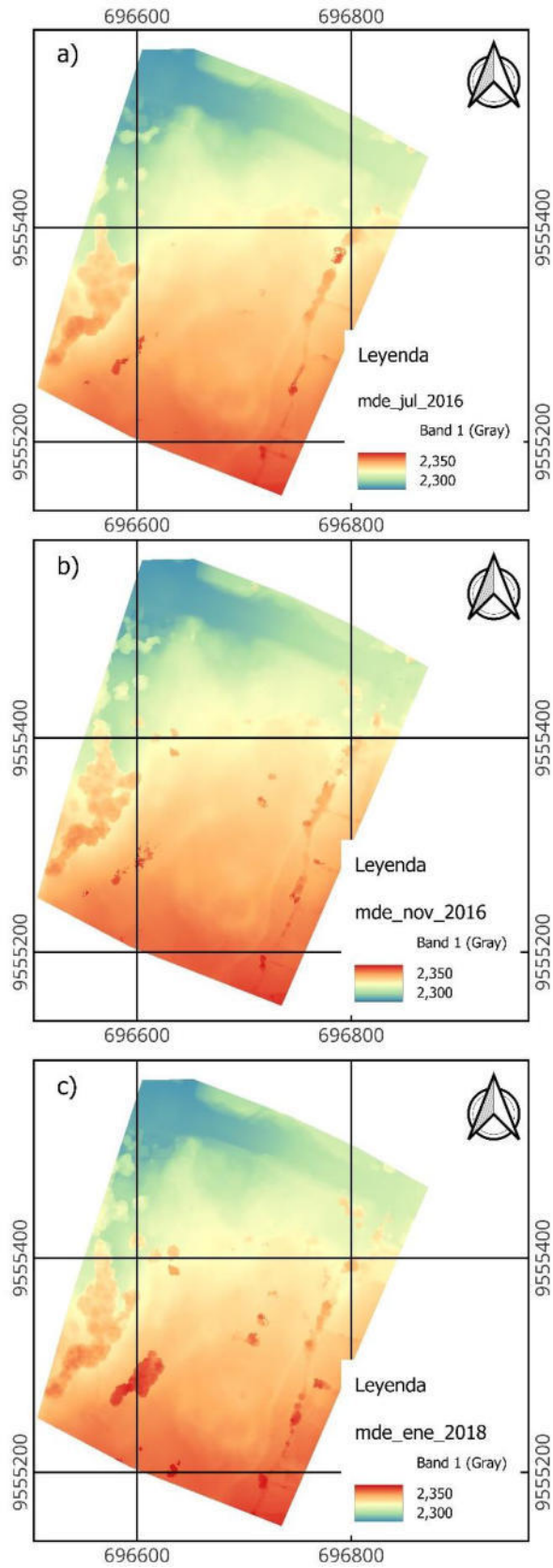


Figura 51. MDS del sector Colinas Lojanas generados obtenidas a partir de imágenes VANT: a) 4/julio/2016, b) 29/noviembre/2016 y c) 12/enero/2018.

El análisis del modelo se muestra en la Tabla 24 y en la Figura 52. En ella, se observa que lógicamente la elevación media del escarpe principal es superior (2341 m) a la del cuerpo principal (2331 m) y el pie (2318) para dar un desnivel total de unos 37 m. Las elevaciones medias de los escarpes secundarios, el escarpe lateral, así como el cuerpo del área de inestabilidad general y el área estable se encuentran entre 2330 y 2340 m, que corresponden aproximadamente a la elevación media de la zona de estudio, ya que todas ellas se extienden o distribuyen por toda ella. Nuevamente, el parámetro más significativo es el rango por unidad de área, que informa sobre la dispersión de la altitud en cada uno de los elementos. Este es superior en los escarpes (valores en torno a 1-2 para todos los tipos de escarpes considerados, salvo el lateral que es de 4) y los taludes de la carretera (1.35), respecto al cuerpo principal y general (0.10-0.20), el pie (0.24) y el área estable (0.36).

Tabla 24. Análisis de la elevación por elementos en el sector Colinas Lojanas. Los valores se expresan en metros (m).

Elemento	Mediana	Moda	Mín.	Máxi.	Rango	D.Típ.	C.Var
<b>Movimiento principal</b>							
Escarpe principal	2341	2341	2335	2348	12.97	1.16	0.44
Escarpe lateral	2335	2328	2321	2345	23.78	7.20	4.00
Cuerpo principal	2331	2335	2320	2341	20.92	4.88	0.10
Escarpes secundarios	2334	2336	2322	2340	18.06	4.01	2.06
Pie	2318	2322	2306	2324	18.44	4.58	0.24
Escarpes en pie	2317	2319	2307	2323	16.10	3.28	2.17
<b>Área de inestabilidad general</b>							
Cuerpo general	2331	2343	2305	2345	40.20	10.79	0.20
Otros escarpes	2326	2334	2307	2343	35.94	8.74	2.14
<b>Otros elementos</b>							
Talud carretero	2313	2315	2305	2319	13.70	3.34	1.35
<b>Área estable</b>							
Área estable	2330	2318	2303	2351	47.41	10.15	0.36

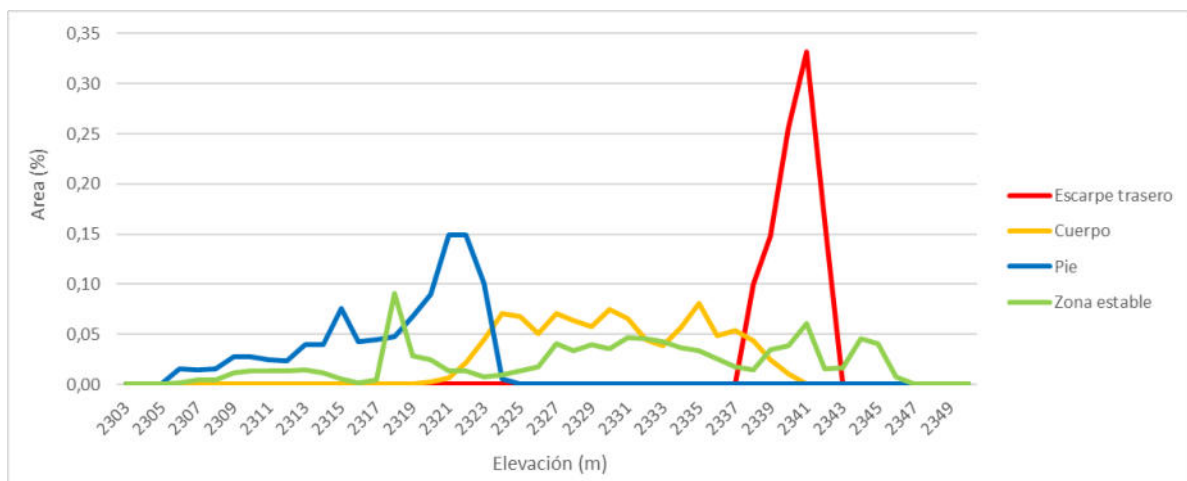


Figura 52. Distribución de la elevación en los elementos principales de la ladera.

#### 4.2.2.2. Modelos de diferencias

Los MDS de diferencias o MdD de la zona de Colinas Lojanas se muestran en la Figura 53. La paleta de color trimodal ha sido diseñada para diferenciar los cambios, tanto valores negativos (en rojo) como positivos (en azul), correspondientes descensos y ascensos de la superficie, respectivamente. Además, ha sido ajustada para poder observar cambios sutiles en los MdD entre -2 y 2 m, empleando la misma escala para los dos periodos considerados con el objeto de poder comparar los resultados.

Los dos periodos considerados son julio-noviembre de 2016, es decir, un intervalo de unos cuatro meses (Figura 53 a); y noviembre 2016 – enero 2018, es decir un intervalo de unos 14 meses (Figura 53 b). En el primer periodo, descartando los cambios debidos a la vegetación relacionados fundamentalmente con arbolado y también con cultivos, se aprecian solamente descensos de la superficie muy sutiles en la zona del pie. En el resto del movimiento, y en la zona completa, apenas se observan cambios por encima del nivel de detección vertical que se establece en 0.15 m.

Sin embargo, en el segundo periodo analizado, además de los cambios en el arbolado y en la vegetación (que en ocasiones son bastante grandes), se observan descensos más intensos en la zona del pie (hasta 1-2 m), alternando con ascensos menores (hasta 0.5 m). Estas alternancias son típicas de un terreno escalonado, con formación de pequeños escarpes y grietas, siendo los ascensos debidos más a desplazamiento horizontal del terreno que a verdaderos ascensos. Este esquema se produce, aunque de una forma más sutil, en el resto del cuerpo del deslizamiento, hasta el escarpe superior, con el desarrollo de los escarpes secundarios que se describieron anteriormente. En el resto de la zona, los cambios son más sutiles aún, en el límite de la detección, hasta las zonas consideradas estables donde son prácticamente nulos. Poniendo el



foco en la zona de la carretera, se observa como esta es parcialmente ocupada por la masa del movimiento, experimentando así un cierto ascenso, que además puede verse acompañado por el propio levantamiento del firme de la carretera como consecuencia del empuje que produce el movimiento.

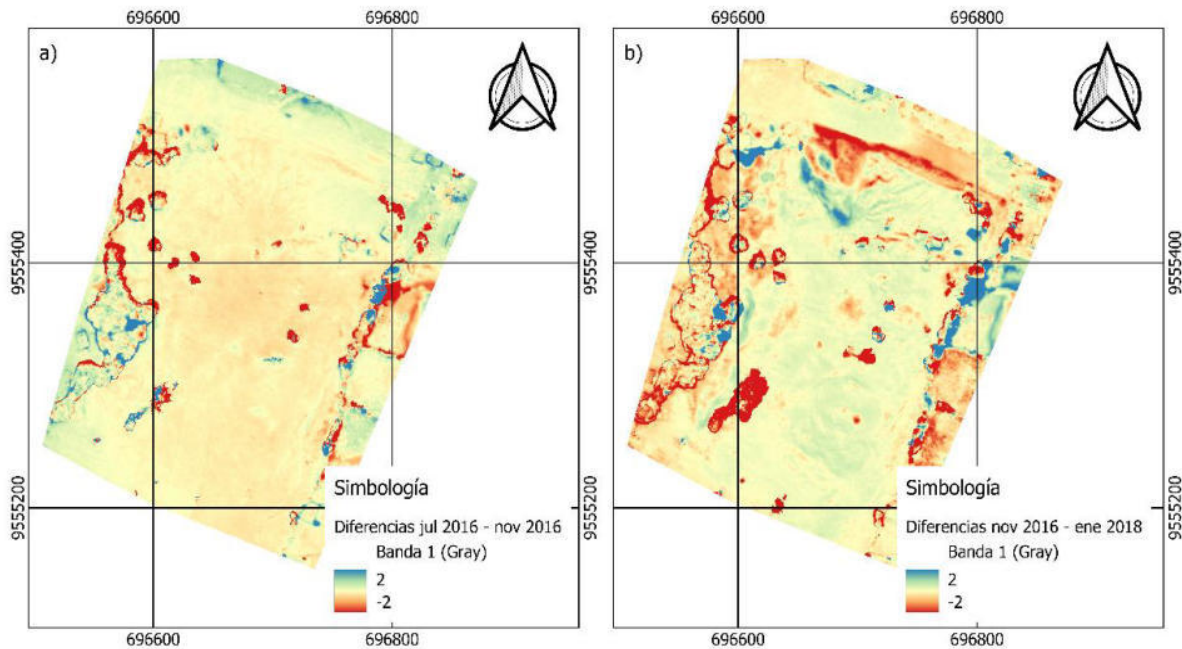


Figura 53. Mapa de diferencias de elevación (DoD) de la zona de estudio Colinas Lojanas. a) Periodo julio – noviembre 2016; b) noviembre 2016 – enero 2018.

Así, el análisis de los Mdd por elementos sugiere que los escarpes muestran descensos de la superficie, de -0.11 m en el escarpe principal, -0.09 m en los secundarios y -0.12 en los escarpes de la zona del pie. Mientras tanto, el cuerpo principal, el cuerpo amplio del área inestable y sobre todo el pie presentan ascensos de 0.09 m, 0.23 m y 0.29 m. El área estable muestra un valor medio de 0.06 m, muy por debajo del umbral de detección.

Tabla 25. Análisis del modelo de diferencias por elementos del movimiento de ladera.

Elemento	Media	Moda	Mín.	Máxi.	Rango	D.Típ.	C.Var
<b>Movimiento principal</b>							
Escarpe principal	-0.11	-0.13	-0.63	0.45	12.97	0.10	-0.95
Escarpe lateral	0.05	-0.04	-8.63	6.58	15.21	0.78	7.44
Cuerpo principal	0.09	-0.09	-8.72	11.90	20.62	0.67	-7.68
Escarpes secundarios	-0.09	-0.19	-1.75	5.10	6.85	0.47	-4.97
Pie	0.29	-0.11	-3.62	8.89	12.51	1.03	3.59
Escarpes en pie	-0.12	-0.10	-2.22	5.49	7.71	0.88	-7.14
<b>Área de inestabilidad general</b>							
Cuerpo general	0.23	-0.12	-11.30	13.58	24.87	1.17	5.08
Otros escarpes	-0.05	-0.04	-0.82	4.10	4.92	0.15	2.98
<b>Otros elementos</b>							
Talud carretera	-0.59	-0.31	-2.11	0.28	2.39	0.39	-0.65
<b>Área estable</b>							
Área estable	0.06	0.19	-8.33	12.15	20.48	0.76	12.42

#### 4.2.2.3. Desplazamientos 3D

Los modelos de desplazamientos 3D entre las nubes de puntos se muestran mediante una vista pseudo-3D en la Figura 54 y el mapa proyectado en las Figura 55 y Figura 56. La observación de los mismos permite identificar cambios en la superficie muy similares a los de los modelos de diferencias. Así, en el primer periodo entre julio y noviembre de 2016, se observan sutiles desplazamientos positivos en toda el área del flujo más activa y de la inestabilidad general, que indican que la superficie de la segunda fecha está por encima de la de la primera, es decir, un cierto avance del movimiento. Hacia abajo, en el pie se observan algunos desplazamientos negativos que indican que la superficie de la segunda fecha está por debajo de la primera, es decir, retroceso y/o descenso del terreno por formación de escarpes. En el segundo periodo los cambios son igualmente sutiles en el cuerpo y el área de inestabilidad, en este caso desplazamientos negativos; y mucho más notorios en la zona del pie, tanto negativos por

formación de escarpes y retroceso de la superficie como positivos como consecuencia del avance de la masa del flujo, incluso sobre la superficie de la carretera. Los desplazamientos observados en este sector del pie del flujo son muy similares en magnitud a los ascensos y descensos verticales de los MDS; así los descensos están entre 0.5-1 m y los ascensos en torno a 1-2 m.

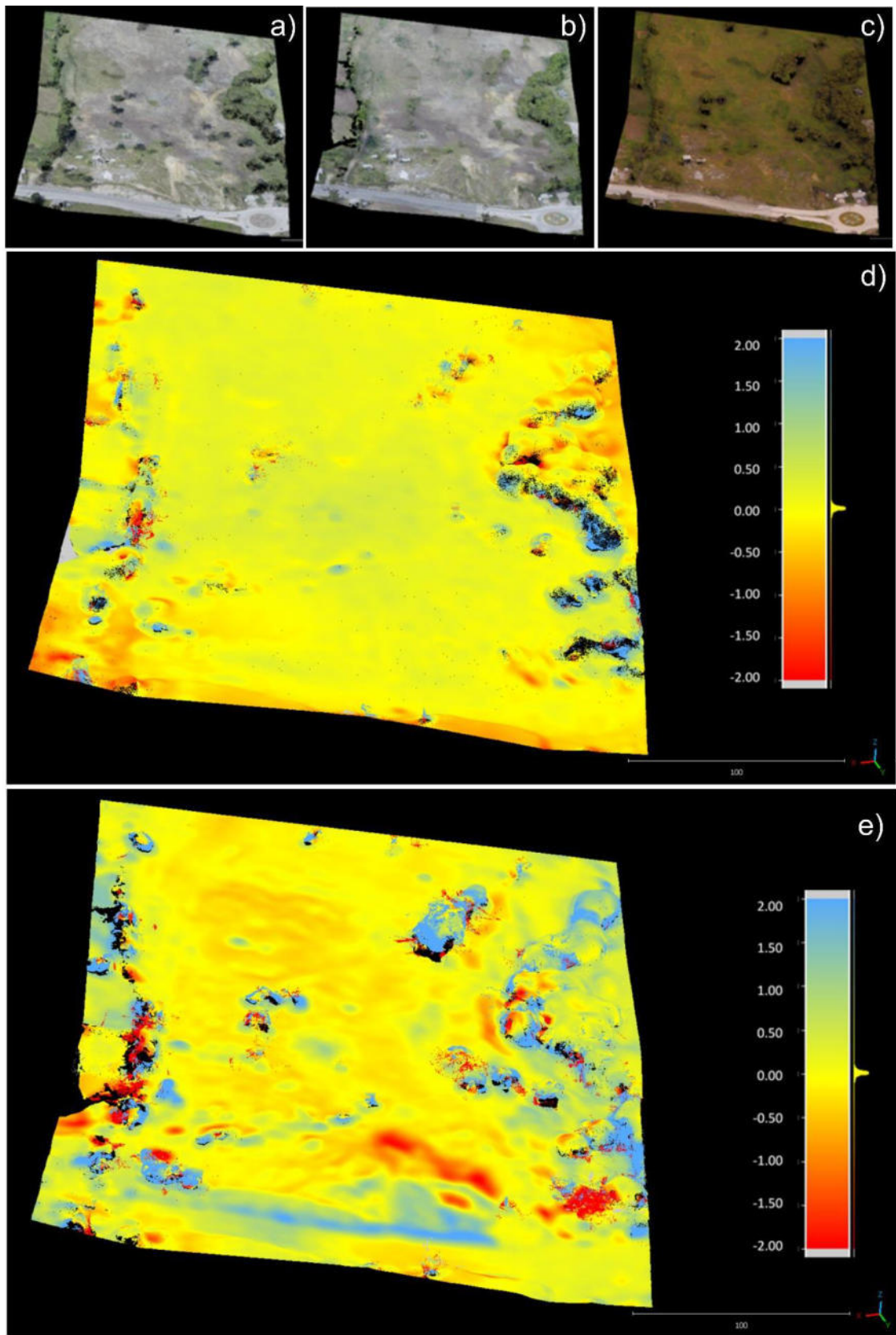


Figura 54. Mapa de modelos de desplazamientos 3D entre las nubes de puntos entre julio 2016 y noviembre 2016.

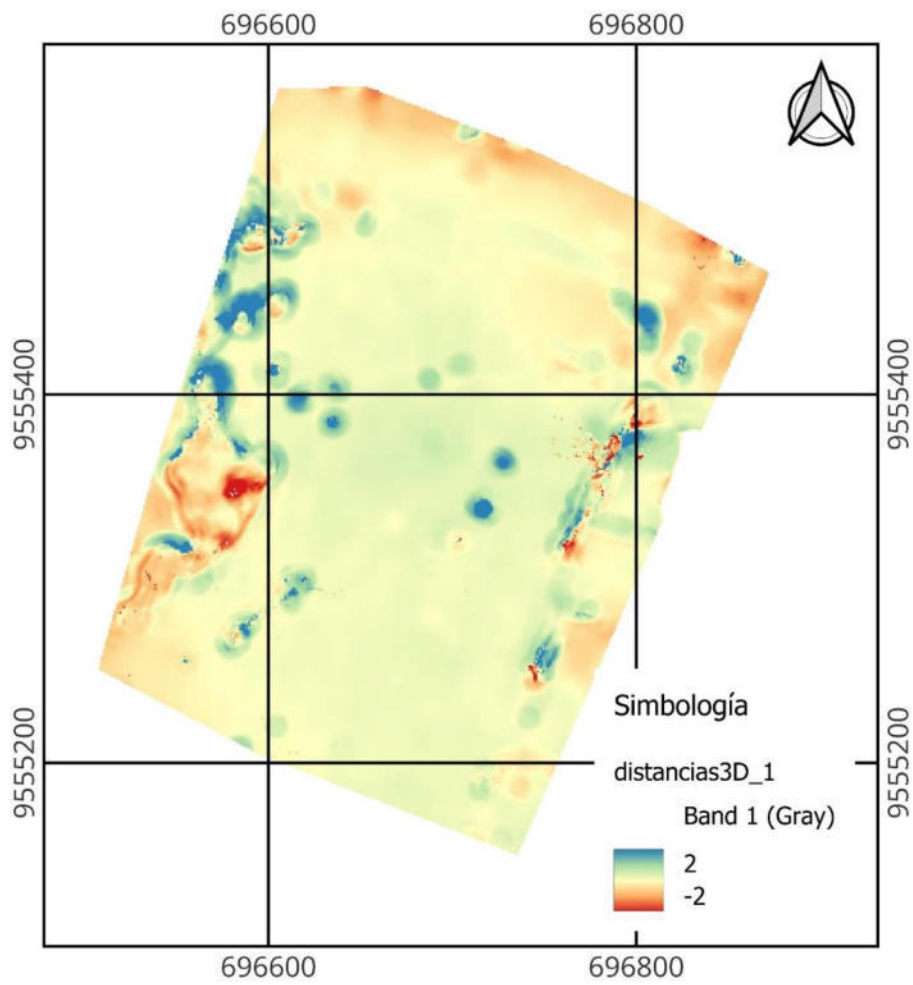


Figura 55. Mapa de modelos de desplazamientos 3D entre las nubes de puntos entre julio 2016 y noviembre 2016.

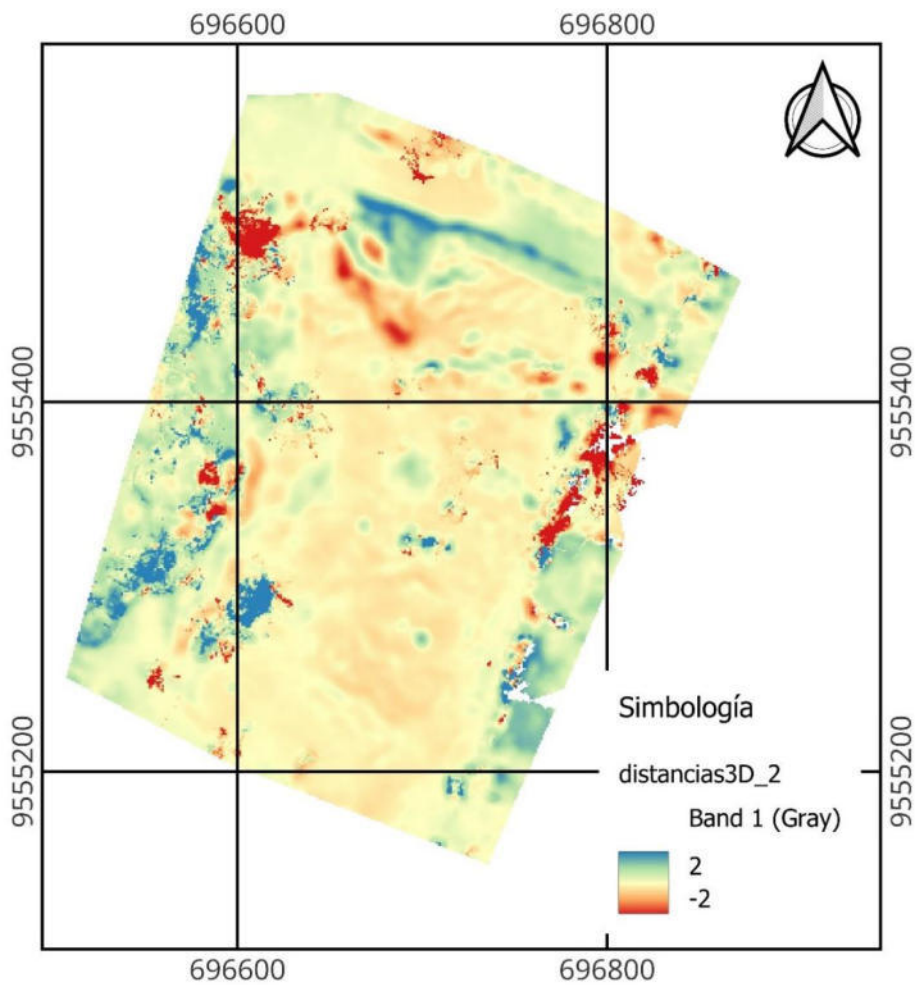


Figura 56. Mapa de modelos de desplazamientos 3D entre las nubes de puntos entre noviembre 2016 y enero 2018.

#### 4.2.2.4. Perfiles.

En la Figura 57 se muestran la ubicación de los perfiles sobre la ortoimagen que se han empleado para analizar los cambios superficiales que se han producido en el terreno producto del movimiento de ladera. Otra referencia importante es la proyección de la línea del carril para establecer el avance a nivel del pie de la ladera.



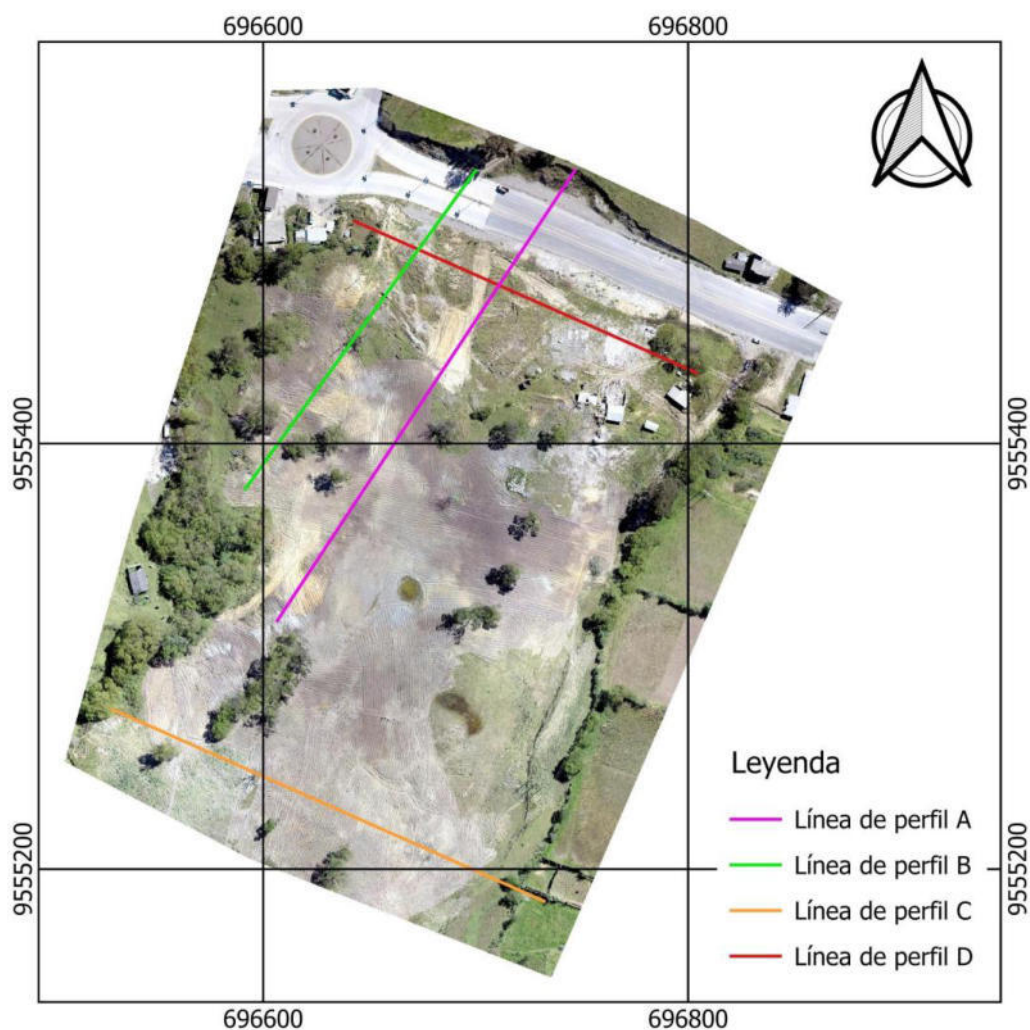


Figura 57. Mapa de ubicación de los perfiles que se emplearon para analizar los cambios verticales y horizontales en los diferentes periodos de control.

En la Figura 58 se presentan los perfiles longitudinales y transversales obtenidos para las tres fechas de monitoreo. En total se plantean 4 perfiles: dos de ellos longitudinales (A, más centrado en el movimiento activo; y B, más cerca del flanco izquierdo); y dos transversales (C en la parte más alta del movimiento; y D en la zona del pie). La línea amarilla representa los perfiles correspondientes al 4 de julio de 2016, la línea verde a los perfiles del 29 de noviembre de 2016 y la línea roja a los perfiles del 12 de enero de 2018.

La línea de perfil A (Figura 58 a), longitudinal y centrado en el movimiento activo, muestra una morfología de una pendiente bastante suave que se ve interrumpida por una serie de escalones que corresponden escarpes, tanto en la zona alta (escarpe principal) como más abajo (cuerpo) hasta acabar en un pie que se corta en la carretera mediante un talud más pendiente que la ladera. La evolución en el primer periodo es muy limitada, observándose solo pequeños avances de la masa (submétricos) en la parte central y en la parte del pie. En el segundo periodo se produce un avance generalizado desde la parte alta, aunque sigue siendo limitado, excepto en sector bajo del cuerpo y alto del pie donde se observa un cierto retroceso/descenso de la superficie, por formación de escarpes; pero sobre todo en el pie y su frente, donde se producen desplazamientos horizontales de avance entre 1-2 m, con invasión clara del trazado de la carretera por parte del talud donde cierra dicho pie. La carretera, aparte de verse invadida por el pie, puede que realmente experimente un cierto ascenso del firme, debido al empuje lateral que se produce por el avance del movimiento.

En la línea B (Figura 58 b), más próximo al flanco izquierdo, se observa un perfil de pendiente baja pero irregular al inicio, en la parte del cuerpo; a partir de un punto de inflexión, la pendiente aumenta hacia el sector del pie del movimiento donde se visualiza una superficie escalonada con formación de algunos escarpes. Como antes, en el primer periodo considerado los cambios son casi imperceptibles, tanto en el cuerpo, como en el pie. Sin embargo, en el segundo periodo se observan cambios a partir del punto de inflexión antes mencionado, con formación de un escarpe junto a un claro avance de la masa, que se hace más evidente en el pie, donde el desplazamiento supera los 3-4 m y ocupa la carretera.

El perfil transversal C (Figura 58 c), en la parte central del movimiento, presenta una pendiente más elevada en el tramo más al oeste (barranco) y luego una morfología más llana, pero de



forma ligeramente convexa hasta el escarpe lateral y el otro barranco que aparece como una incisión hacia el sector este de la zona. La evolución en el primer periodo es prácticamente imperceptible y las superficies son prácticamente coincidentes a lo largo de todo el perfil. En el segundo periodo, casi no se observan cambios en la parte central del movimiento, salvo un pequeño descenso de la superficie; sin embargo, en el sector oeste, ya fuera del movimiento más activo se observan ciertas evidencias con formación de pequeños escarpes y desplazamientos hacia el barranco, lo que indica que la actividad no se reduce al sector central, sino que hay evidencias de reptación y pequeños movimientos en otros sectores de la ladera, como en las proximidades del barranco que discurre al oeste.

Finalmente, el perfil D (Figura 58 d), transversal en el pie del movimiento y paralelo al trazado de la carretera, muestra una morfología interesante con varios tramos: el primero corresponde al barranco al oeste de la zona que desemboca en la zona de la rotonda; tras esto, se observa un promontorio, que forma hacia el este un escarpe lateral bastante pronunciado sobre el pie del movimiento que en este sector está más deprimido; a continuación, se observa la morfología ligeramente convexa con algunos escalones o escarpes transversales que conduce a una elevación de la superficie del pie en el sector este del movimiento; finalmente se observa el barranco de la parte oeste de la zona, tras la cual aparece ya el área estable prácticamente horizontal. En este caso, la evolución en el primer periodo se reduce a un leve descenso de la superficie en el sector central de morfología convexa. En el segundo periodo, además de esta misma tendencia, se aprecia el mayor desarrollo de escarpes laterales que dismantelan el pie del movimiento hacia el oeste, lo que induce a pensar en avances del mismo hacia esa dirección además de al norte.

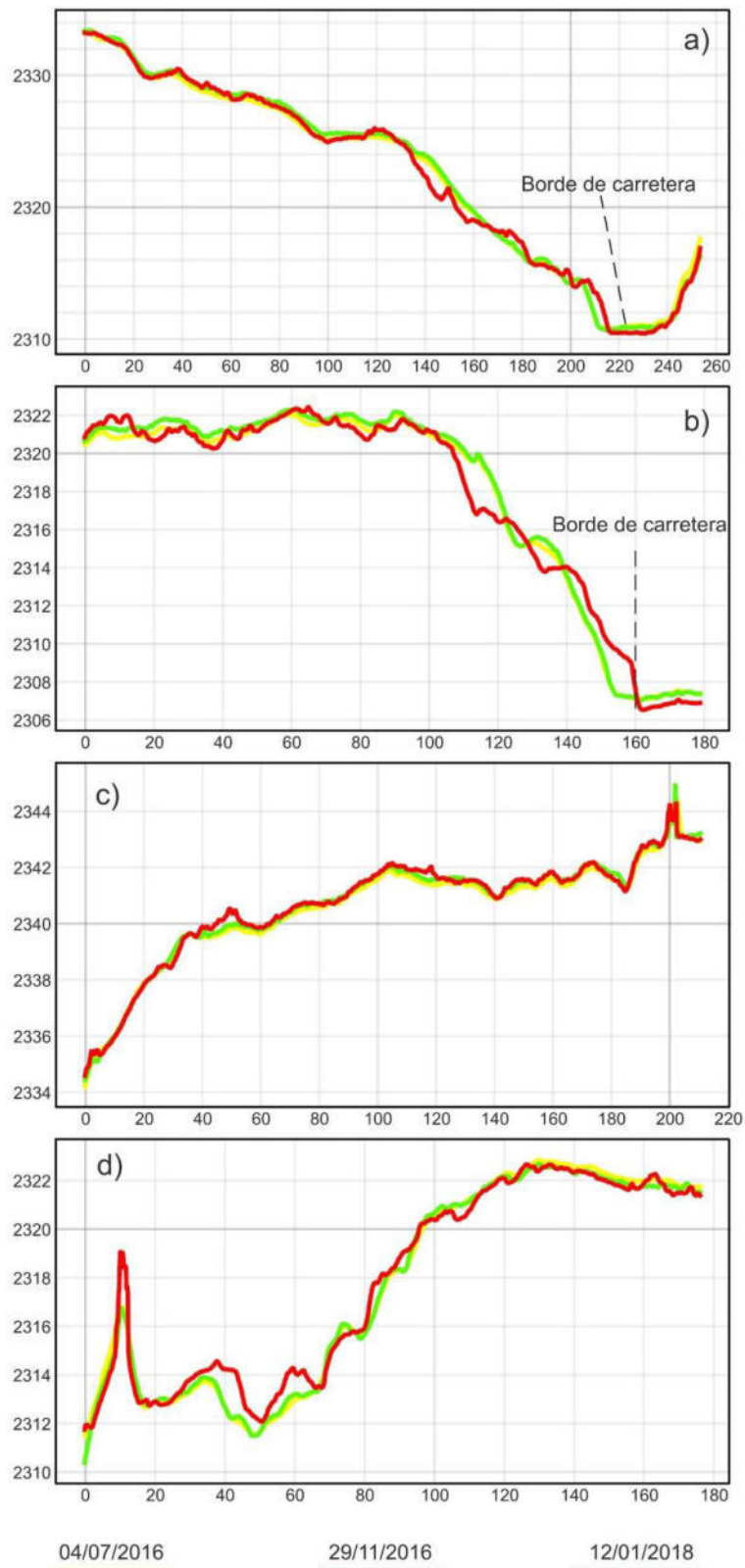


Figura 58. Disposición de los perfiles transversales en los diferentes periodos de control. La línea discontinua representa el borde de la carretera. La línea amarilla corresponde al periodo (04/07/2016), verde (29/11/2016), roja (12/01/2018)

### **4.2.3. Modelos derivados, análisis morfométrico y evolución de la morfología.**

En este apartado se presentarán los modelos derivados del MDS de pendiente, orientación, sombreado, TPI, TRI y TWI, así como su análisis zonal en los distintos elementos de la zona inestable y su evolución en las dos fechas consideradas.

#### **4.2.3.1. Distribución y evolución de la pendiente**

En la Figura 59 se presentan los mapas de pendiente obtenidos para las tres fechas de control, obtenidos a partir de los correspondientes MDE.

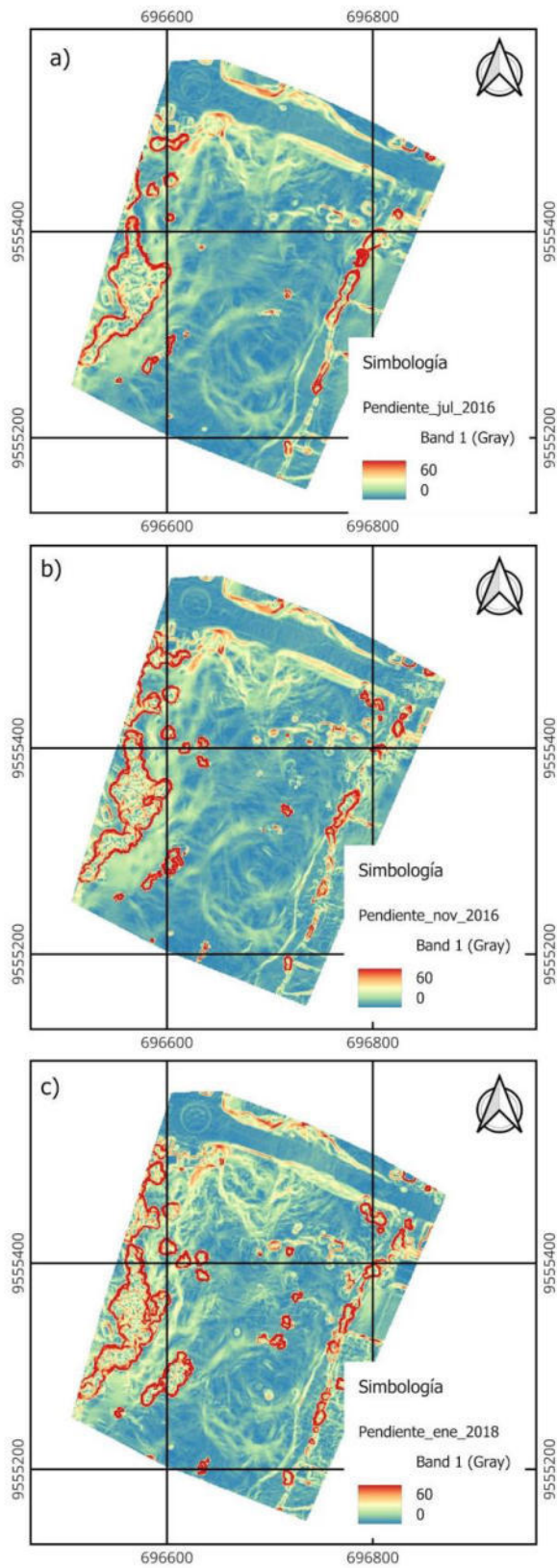


Figura 59. Mapa de pendientes obtenido para los tres periodos de control. a) 4/julio/2016, b) 29/noviembre/2016 y c) 12/enero/2018.

En dicha figura, descartando las pendientes anómalas que introduce la vegetación, se pueden observar el predominio de las pendientes bajas en la mayor parte de la ladera, tanto en el movimiento de tipo flujo diferenciado como en el área menos activa e incluso el área estable. Solo se observan pendientes moderadas y puntualmente altas en los distintos escarpes identificados (principal, lateral, secundarios y otros fuera del movimiento, en las inmediaciones del barranco); así como en el sector del pie, sobre todo en los escarpes que se forman en él y en su terminación o punta, sobre la carretera. En el pie, se forma una pendiente bastante escalonada, con una sucesión de pequeños escarpes y rellenos, así como grietas, que se reflejan en un cierto bandeo de la pendiente.

Del análisis por elementos, que se muestra en la Tabla 26 y la Figura 60, se deduce que la pendiente media de los escarpes identificados en el movimiento es de  $18.2^\circ$  en el escarpe lateral,  $11.5^\circ$  en el escarpe principal y  $13.8^\circ$  en los secundarios. En el cuerpo principal la pendiente media es de  $7.6^\circ$ , mientras que en el pie es de  $14.2^\circ$ , con escarpes de hasta  $24,5^\circ$ . Por su parte, el área de inestabilidad general presenta un pendiente de  $10.5^\circ$ , algo mayor que el propio flujo, con escarpes de hasta  $20.3^\circ$ , y el área estable de  $11.8^\circ$ . Los taludes del otro margen de la carretera llegan hasta  $33^\circ$ .

Tabla 26. Estadísticos de la pendiente (°) por elementos del movimiento.

Elemento	Media	Moda	Mín.	Máxi.	Rango	D.Típ.	C.Var
<b>Movimiento principal</b>							
Escarpe principal	11.61	2.25	0.00	40.14	40.14	6.04	0.52
Escarpe lateral	18.18	1.68	0.00	83.57	83.57	9.68	0.53
Cuerpo principal	7.59	1.40	0.00	84.66	84.66	6.14	0.81
Escarpes secundarios	13.79	1.98	0.00	78.77	78.77	7.39	0.54
Pie	14.21	1.40	0.00	77.08	77.08	10.81	0.76
Escarpes en pie	24.51	15.56	0.00	70.44	70.44	11.16	0.46
<b>Área de inestabilidad general</b>							
Cuerpo general	10.46	1.98	0.00	89.17	89.17	9.56	0.91
Otros escarpes	20.30	15.56	0.00	79.00	79.00	10.38	0.51
<b>Otros elementos</b>							
Talud carretera	32.95	10.29	0.00	77.86	77.86	13.20	0.40
<b>Área estable</b>							
Área estable	11.72	1.98	0.00	89.12	89.12	10.61	0.91

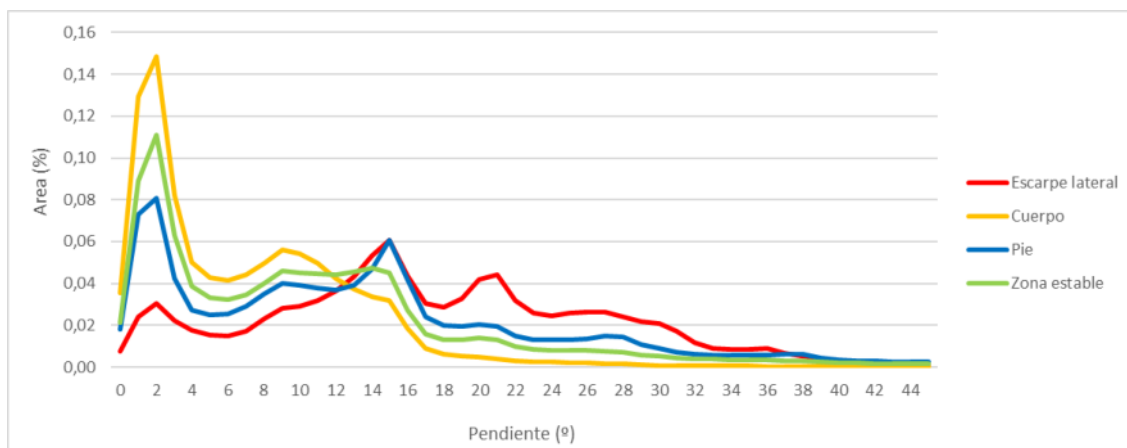


Figura 60. Distribución de la pendiente en los diferentes elementos de la ladera en la zona de Colinas Lojanas.

En cuanto a la evolución de la pendiente observada en los modelos correspondientes, esta solo muestra cambios por el crecimiento de la vegetación, fundamentalmente de árboles y arbustos, también cultivos, en las dos últimas fechas respecto a la primera en la que la ladera está bastante desprovista de vegetación. El terreno apenas sufre cambios en el primer periodo considerado

(entre las dos primeras fechas), tan solo de forma muy sutil en el sector del pie; sin embargo, en el segundo periodo (entre la segunda y la tercera fecha) sí se observan cambios por toda la ladera, más sutiles en el cuerpo y el área inestable general, y mucho más evidentes en el sector del pie del flujo, con formación de escarpes y avance de la punta sobre la carretera. Estos escarpes y los rellanos correspondientes cambian su configuración, especialmente en el segundo periodo analizado.

En la Figura 61 se muestra con más detalle la evolución de la pendiente en las tres fechas de medición así como en los cuatro perfiles en base a la distribución de frecuencias. En el perfil A, tomando como referencia la primera fecha (4/06/2016) tiene una pendiente media de  $12.3^\circ$ , aumenta ligeramente en la segunda y algo más, hasta cerca de  $14^\circ$ , en la tercera. Los mayores cambios de la pendiente en este segundo periodo se dan entre  $15^\circ$  y  $25^\circ$ , con un decremento de la frecuencia entre  $15$  y  $20^\circ$  y un incremento entre  $20$  y  $25^\circ$ . En relación al perfil B, longitudinal en el flanco izquierdo, en el primer periodo no existen grandes variaciones de la pendiente; pero sí en el segundo, donde se producen un cambio bastante bastante significativo en entre los  $5^\circ$  y  $10^\circ$ , con una disminución de la frecuencia. Analizando el perfil C, tampoco se observan variaciones significativas de la pendiente, en este caso en ninguno de los dos períodos. Finalmente, en el perfil D, el primer periodo apenas muestra cambios, mientras que en el segundo la frecuencia disminuye en el intervalo de  $5$  a  $15^\circ$ . La conclusión es que la pendiente muestra sólo cambios menores, excepto en el segundo periodo en las partes bajas de la ladera (perfiles B y D), donde en general disminuyen las pendientes bajas y moderadas ( $5$  a  $15^\circ$ ) y aumentan las fuertes ( $20-30^\circ$ ), por la formación de escarpes y escalones en el pie, así como de un talud en su frente.

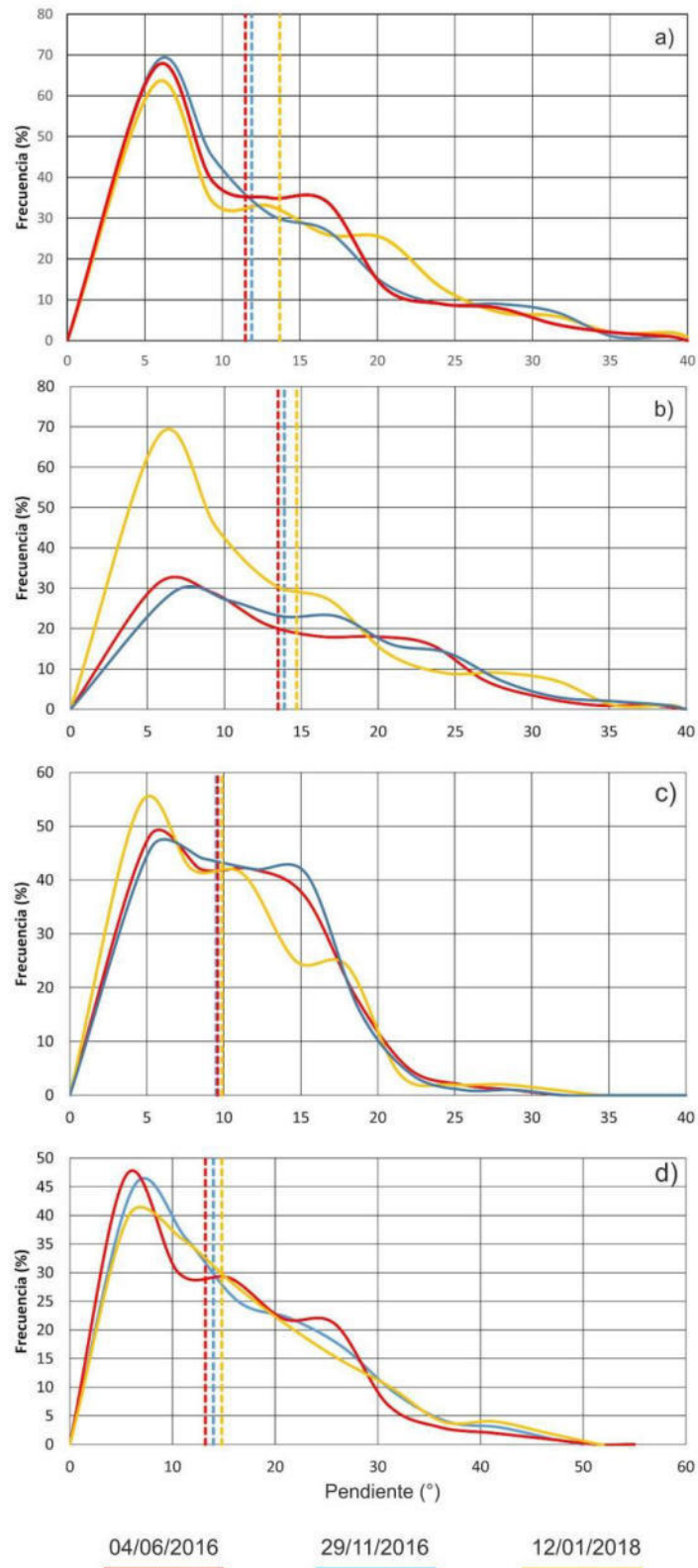


Figura 61. Evolución temporal de la pendiente en los perfiles a) línea de perfil A, b) línea de perfil B, c) línea de perfil C y, d) línea de perfil D, para cada una de las fechas de control. La línea discontinua representa el valor medio de cada fecha.



#### **4.2.3.2. Distribución y evolución de la orientación**

En la Figura 62 se muestran los mapas de orientación de la pendiente de la zona de estudio correspondiente a las tres fechas de control.

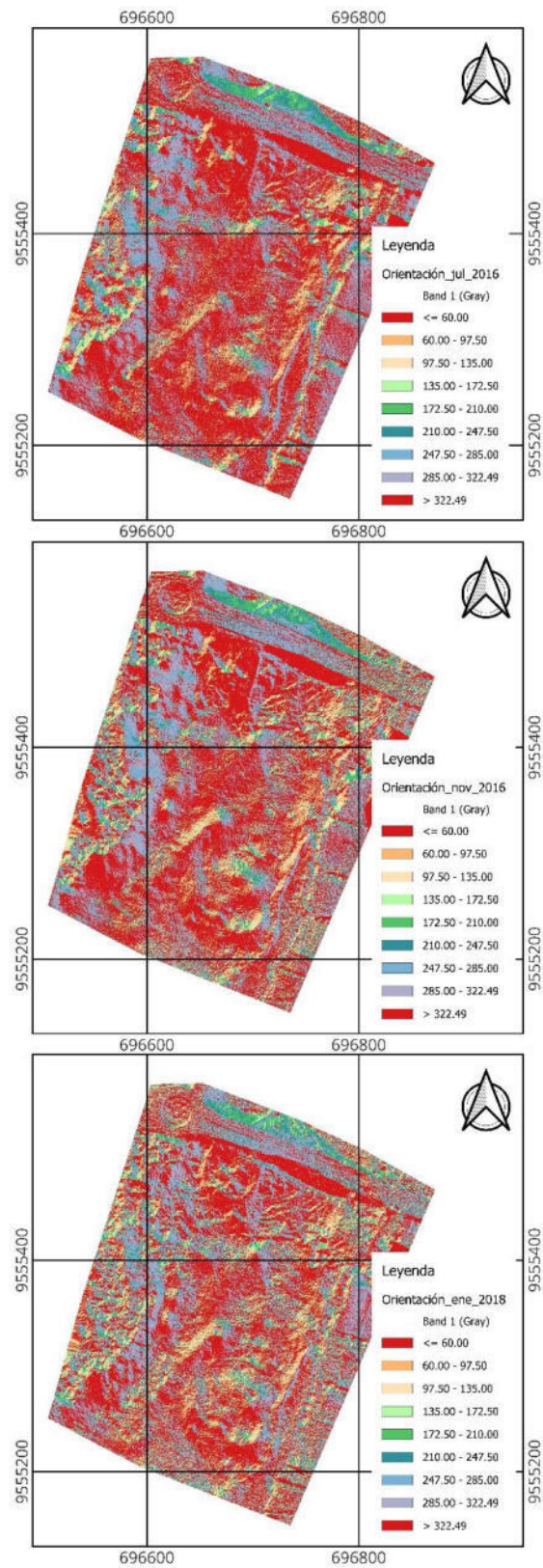


Figura 62. Mapas de orientación de la pendiente en los tres períodos de control. a) 4/julio/2016, b) 29/noviembre/2016 y c) 12/enero/2018.

En los mapas se aprecia una ladera de orientación preferentemente al norte, aunque variando entre el NW y el NE, tanto en el movimiento principal como en el área inestable amplia, incluyendo los escarpes y el pie, que se orientan todos en la misma dirección general de avance del movimiento. Las excepciones son el escarpe lateral que se inclina al NW, los dos márgenes del barranco del sector oeste inclinados al ENE y WNW, y los taludes del otro lado de la carretera orientados al S. Además, en la zona del pie se produce un cierto bandeo como ya sucedía en la pendiente, con alternancia de orientaciones al N, NE e incluso NW en los escarpes y pequeñas bandas al S y SE en los rellanos (pequeñas bandas de contrapendiente).

Analizando los datos que se muestran en la Tabla 27 y Figura 63, se observa que el escarpe lateral del flanco izquierdo tiene una orientación media al NW y el escarpe trasero una orientación N, como el cuerpo principal y los escarpes secundarios: todos ellos tienen una baja dispersión excepto el cuerpo que presenta una dispersión mayor. El pie tiene igualmente una orientación al N y los escarpes al NNE, debido al importante escarpe que se forma en el flanco derecho, ambos con baja dispersión. El área estable y el área de inestabilidad general presenta una orientación con una cierta componente W (NNW), más patente en los escarpes (NW) que se forman en relación con el barranco del sector oeste. Finalmente, los taludes del otro lado de la carretera están orientados al S.

Tabla 27. Estadísticos de la orientación por elementos del movimiento.

Elemento	Media	Moda	Mínimo	Máximo	Rango	RadioV
<b>Movimiento principal</b>						
Escarpe principal	10.19	0.00	0.00	359.78	359.78	0.81
Escarpe lateral	314.92	315	0.00	359.87	359.87	0.81
Cuerpo principal	3.34	0.00	0.00	359.97	359.97	0.56
Escarpes secundarios	3.28	0.00	0.00	359.83	359.83	0.71
Pie	359.56	0.00	0.00	359.95	359.95	0.67
Escarpes en pie	24.23	0.00	0.00	359.89	359.89	0.74
<b>Área de inestabilidad general</b>						
Cuerpo general	335.42	0.00	0.00	359.99	359.99	0.65
Otros escarpes	315.59	315.00	0.00	359.91	359.91	0.84
<b>Otros elementos</b>						
Taludes carretera	212.06	225.00	0.00	358.93	358.93	0.91
<b>Área estable</b>						
Estable	333.28	0.00	0.00	359.99	359.99	0.55

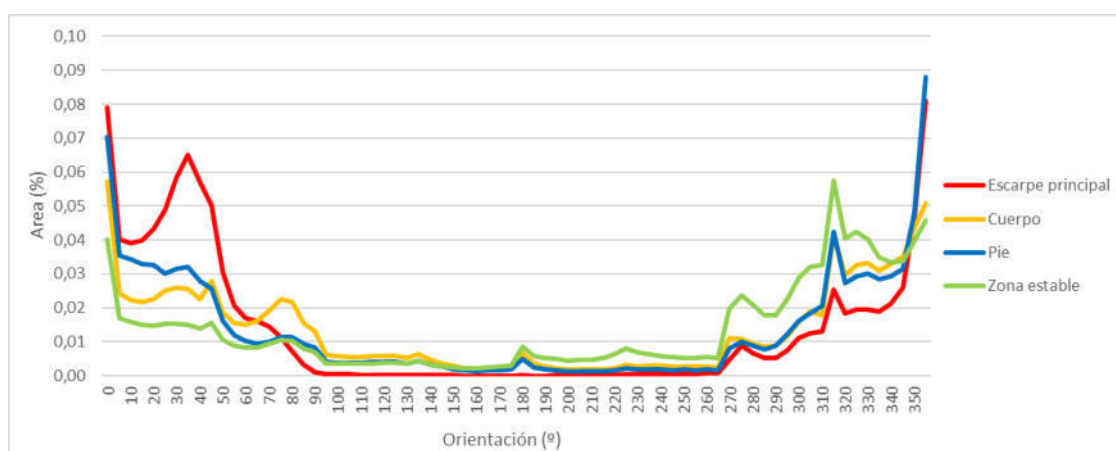


Figura 63. Distribución de la orientación en la zona de estudio y analizada por elementos constitutivos de la ladera (escarpe lateral, cuerpo, pie, y zonas estables).

La evolución de la orientación no está sujeta a grandes cambios en la mayor parte de ladera y solamente los crecimientos de la vegetación, fundamentalmente de los árboles, produce cambios evidentes. Sin embargo, en algunos sectores del cuerpo del movimiento, pero sobre todo en el pie (con mayor actividad), se observa un cierto desplazamiento de los bandeados de escarpes (N y NE) y rellanos (E y SE), como consecuencia del avance

del movimiento, y en general un cambio de la configuración de la orientación, en el segundo periodo analizado.

La evolución de la orientación en la línea de perfil longitudinal A (Figura 64 a) muestra una mayor predisposición del terreno con una orientación al NE abarcando la zona de escarpe, cuerpo y pie, ya que se trata de un perfil general. Esta orientación se mantiene en la segunda y tercera fecha de control, aunque disminuye algo en la última a favor de orientaciones al SW, probablemente por la formación de escalones y rellanos. En la Figura 64 b, correspondiente al perfil longitudinal B, cercano al flanco izquierdo, se observa igualmente una orientación predominante NE en la primera fecha, que se mantiene en la segunda; y que incluso llega a aumentar en la tercera, posiblemente por el mayor desarrollo del escarpe del flanco mencionado. En la Figura 64 c, transversal en la parte superior de nuevo se aprecia la orientación preferente al NE, sin apenas cambios entre las distintas fechas. Por último, en relación al perfil D (Figura 64 d), transversal de la parte del pie, de nuevo se observa el predominio de las orientaciones an NE, aunque en este caso, sí se producen cambios en la tercera fecha respecto a las otras dos; estos consisten en una reducción de las orientaciones al NE frente a un aumento de las orientaciones al SE, como consecuencia de la movilización de este sector del pie. En resumen, se aprecia un predominio general de la orientación al NE en todos los sectores de la ladera, con cambios muy sutiles en la segunda fecha y algo mayores en la tercera, como consecuencia de la mayor actividad.

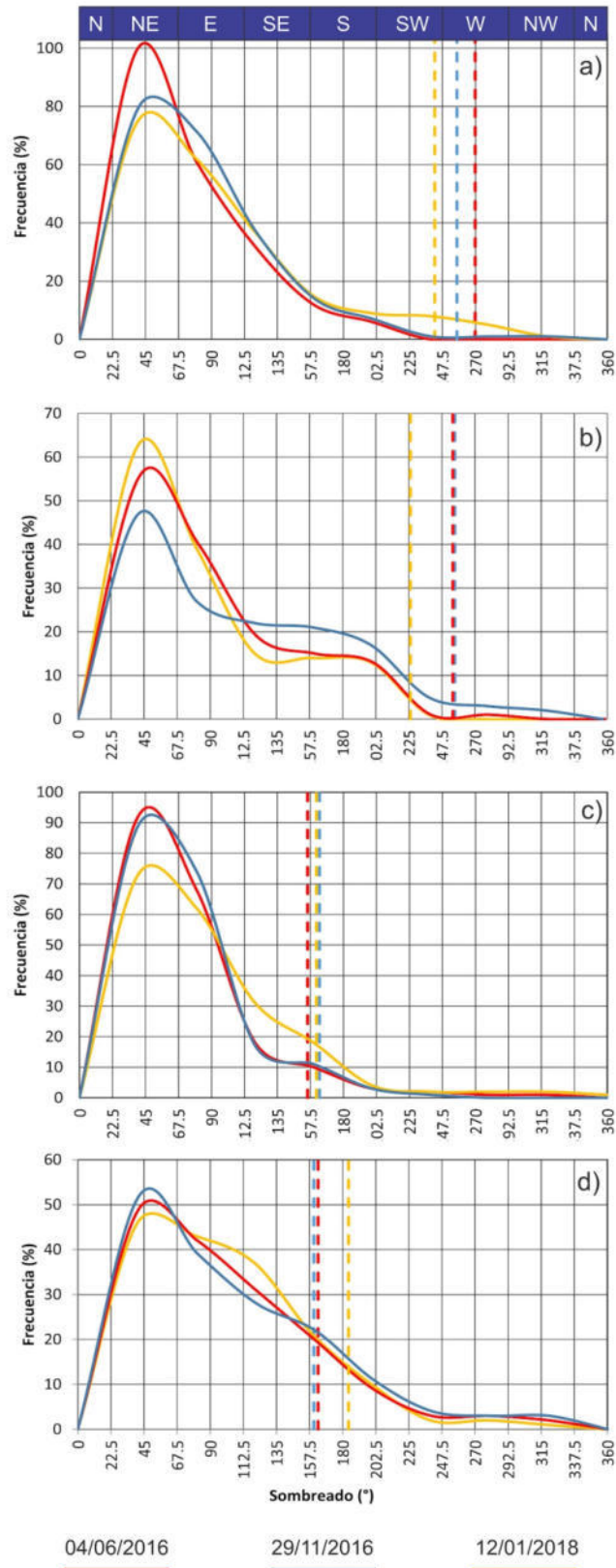


Figura 64. Evolución temporal de la orientación en los perfiles a) línea de perfil A, b) línea de perfil B, c) línea de perfil C y, d) línea de perfil D, para cada una de las fechas de control. La línea discontinua representa el valor medio en cada fecha.

#### **4.2.3.3. Distribución y evolución del sombreado**

En la Figura 65 se muestran los mapas de sombreado en las tres fechas de monitoreo en la zona de Colinas Lojanas.

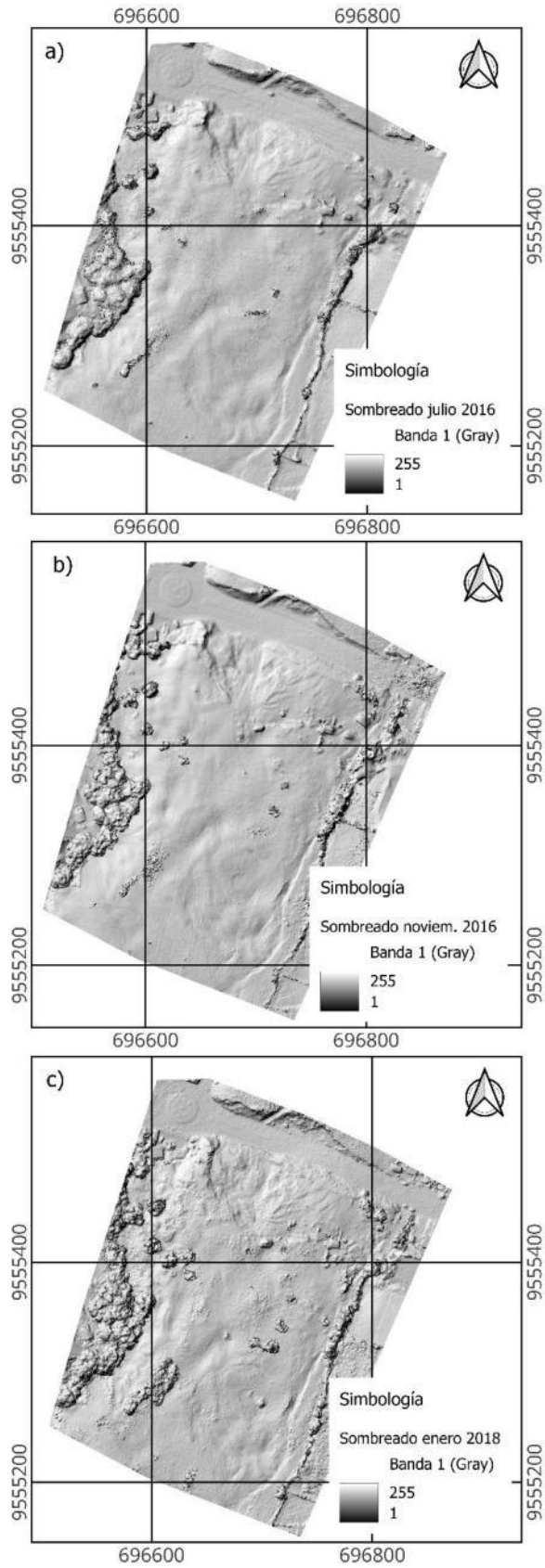


Figura 65. Mapas de sombreado en los tres periodos de control: a) 4/julio/2016, b) 29/noviembre/2016 y c) 12/enero/2018.



La zona, cuya orientación general es al N, presenta una elevada iluminación media, según el modelo aplicado (fuente desde el NW) y en ella destacan sobre todo los elementos como la vegetación (arbolado y construcciones) y en menor medida los cultivos que introducen un cierto granulado. En estas condiciones, los escarpes no destacan mucho y, de hecho, al presentar en muchos casos una orientación NNW y una mayor pendiente aparecen más iluminados que otros sectores de la pendiente. Como excepción algunos de los escarpes que aparecen en el pie con orientación NE, que proporcionan un cierto sombreado. El escarpe lateral, de orientación NW aparece muy iluminado, mientras que los taludes de la margen contraria de la carretera aparecen muy oscuros al estar orientados al S. En el pie se observa una mayor irregularidad del sombreado reflejo de la morfología del terreno, especialmente en las dos últimas fechas.

Del análisis por elementos (Tabla 28), se deduce que la mayor parte de ladera y sus los elementos están bien iluminados (suponiendo una fuente en el NW), con valores entre 180-190 para el cuerpo y el pie, y valores un poco mayores para los escarpes (190-192), excepto los del pie (170), con una orientación media más al NE. El área de inestabilidad general, con una orientación NNW presenta una iluminación mayor (194), especialmente sus escarpes, más pendientes y orientados al NW (219). Lo mismo sucede con el área estable, con una buena iluminación (189), al contrario que los taludes de la carretera con fuertes pendientes orientadas al S (128). Respecto a la variabilidad, el pie y sus escarpes presentan el mayor coeficiente de variación (0,28).

Tabla 28. Estadísticos de la orientación por elementos del movimiento.

Elemento	Media	Moda	Mín.	Máxi.	Rango	D.Típ.	C.Var
<b>Movimiento principal</b>							
Escarpe principal	190.50	185	67	252	185	17.00	0.09
Escarpe lateral	216.12	233	1	255	254	23.39	0.11
Cuerpo principal	184.55	185	1	255	254	19.09	0.10
Escarpes secundarios	192.22	209	1	255	254	29.62	0.15
Pie	191.90	185	1	255	254	24.90	0.13
Escarpes en pie	175.10	209	1	255	254	48.56	0.28
<b>Área de inestabilidad general</b>							
Cuerpo general	194.31	185	1	255	254	25.20	0.13
Otros escarpes	219.14	210	1	255	254	18.93	0.09
<b>Otros elementos</b>							
Talud carretera	128.54	1	1	255	254	49.18	0.38
<b>Área estable</b>							
Área estable	189.26	185	1	255	254	30.62	0.16

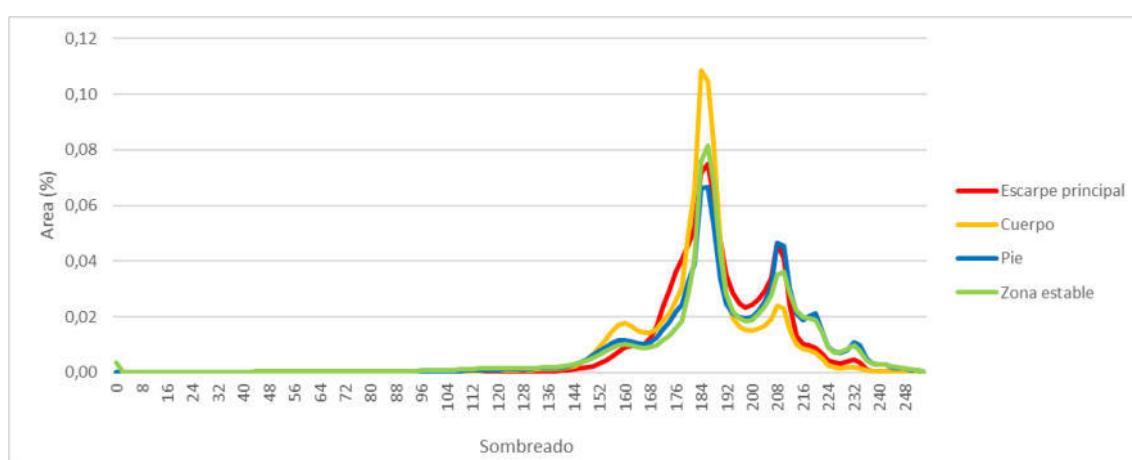


Figura 66. Distribución del sombreado en la zona de estudio y análisis por elementos constitutivos de la ladera (escarpe lateral, cuerpo, pie, y zonas estables).

En la evolución del sombreado (Figura 66) en las tres fechas consideradas, lo más destacable tras la observación directa son los cambios en la vegetación, fundamentalmente el crecimiento que experimentan los árboles y arbustos en el periodo estudiado (parte de una situación de relativa escasez de vegetación en la primera fecha), así como de algunos cultivos que introducen una cierta textura en el sombreado. Los

cambios en las construcciones también son visibles, especialmente su arruinamiento como consecuencia de la actividad del movimiento. En cuanto al terreno, los cambios son más sutiles en la mayor parte de la ladera, aunque ciertos desplazamientos de las sombras hacia el S pueden ser observados sobre todo en el segundo periodo analizado, y en particular, en el sector del pie del movimiento. Así, la configuración de las sombras se desplaza, cambia y se hace más irregular como consecuencia de la actividad del movimiento tipo flujo que provoca una cierta deformación en el terreno.

#### **4.2.3.4. Distribución y evolución del TPI**

En la Figura 67 se muestran los mapas del TPI para las tres fechas analizadas en la zona de Colinas Lojanas.

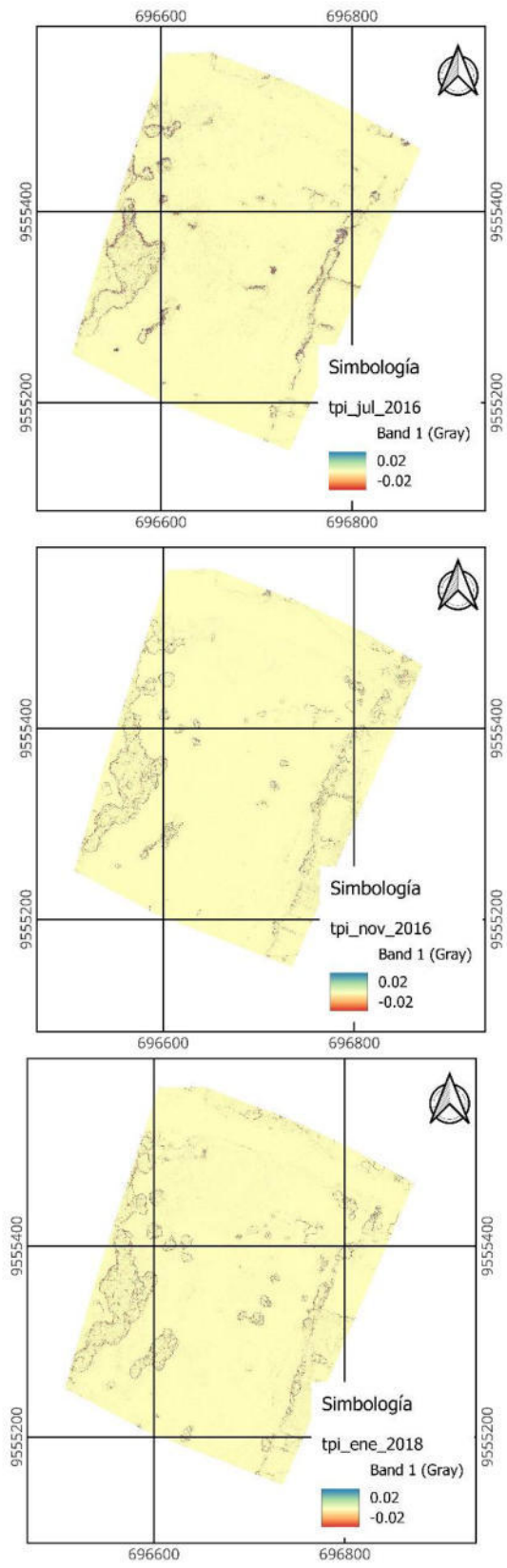


Figura 67. Mapas del TPI en los tres períodos de control a resolución de 0.05 m. a) 4/julio/2016, b) 29/noviembre/2016 y c) 12/enero/2018.

En estos mapas se aprecia un predominio general de valores del índice cercanos a 0 por toda el área, que tan solo se desvía en algunos puntos de la superficie que describen líneas de ruptura de la pendiente, correspondientes a los límites superior e inferior de superficies muy inclinadas. La mayor parte de ellos se deben a la presencia de vegetación arbolada o arbustos, que en este caso forman alineaciones en torno a los barrancos que discurren en el sector este y oeste de la zona, aunque también aparecen de forma aislada. También aparecen en relación con las pequeñas construcciones que se observan en la ladera, sobre todo en la parte baja. Sin embargo, también pueden corresponder a los escarpes del terreno, apreciándose el escarpe lateral izquierdo, aunque de forma tenue, y algunos otros como los que aparecen en el pie del movimiento. En cualquier caso, el TPI en esta resolución no muestra valores especialmente elevados, salvo los relacionados con la vegetación.

En el análisis por elementos para la primera fecha, que se muestra en la Tabla 29 y la Figura 68, se aprecia que todos los elementos y zonas presentan valores medios igual a 0. Incluso la desviación típica que marcaría la mayor presencia de zonas cóncavas y convexas tampoco, como ocurre en las otras zonas, aquí también presenta valores muy bajos, ligeramente superiores en el escarpe lateral, los secundarios y los que se producen en el pie del movimiento y fuera de él (0.02). Los valores más elevados se producen en los taludes de la carretera (0.04). En el gráfico de la Figura 63, se aprecia la coincidencia prácticamente total entre los distintos elementos de este factor a la resolución de 0.1 m.

Tabla 29. Detalle del valor del TPI en la zona de estudio por elementos del deslizamiento.

Elemento	Media	Moda	Mín.	Máx.	Rango	D. Típ
<b>Movimiento principal</b>						
Escarpe principal	0.00	0.00	-0.02	0.02	0.04	0.01
Escarpe lateral	0.00	0.00	-0.13	0.05	0.18	0.02
Cuerpo	0.00	0.00	-0.27	0.24	0.51	0.01
Escarpes secundarios	0.00	0.00	-0.10	0.10	0.20	0.02
Pie	0.00	0.00	-0.10	0.09	0.19	0.01
Escarpes en pie	0.00	0.00	-0.08	0.010	0.18	0.02
<b>Área de inestabilidad general</b>						
Cuerpo general	0.00	0.00	-0.80	0.96	1.76	0.01
Otros escarpes	0.00	0.00	-0.09	0.08	0.17	0.02
<b>Otros elementos</b>						
Taludes carretera	0.00	0.00	-0.15	0.19	0.34	0.04
<b>Área estable</b>						
Estable	0.00	0.00	-0.78	0.72	1.50	0.01

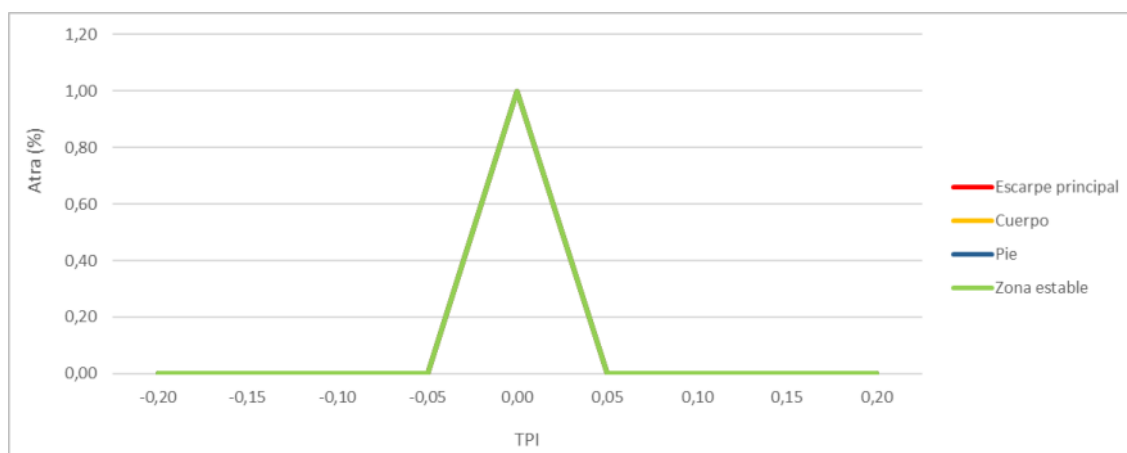


Figura 68. Distribución del TPI en la zona de estudio y análisis por elementos constitutivos de la ladera (escarpe lateral, cuerpo, pie, y zonas estables). En este caso, todas las gráficas coinciden y muestran una concentración prácticamente total en valores próximos a 0.

La evolución en las tres fechas consideradas tampoco ofrece grandes cambios de unas a otras, y la mayor parte de ellos están relacionados con el desarrollo de las arboledas en los sectores este y oeste, y de forma aislada en la parte central de la zona. También con las construcciones que se observan sobre todo en la parte baja de la ladera. En cuanto al

terreno, apenas se observan cambios, excepto en los escarpes del pie, donde se aprecian sutiles diferencias en las líneas de ruptura de la pendiente.

La extracción de las líneas de ruptura de la pendiente, tanto las superiores (extraídas con un umbral de +0.05) como las inferiores (umbral de -0.05) se muestran en la Figura 69. Las líneas obtenidas a esta resolución están prácticamente en su totalidad relacionadas con la vegetación y apenas con la morfología del terreno. Así, las diferencias que se observan en las distintas fechas responden igualmente a los cambios de la vegetación, que como se observa, son fundamentalmente crecimientos de las zonas de arboleda.



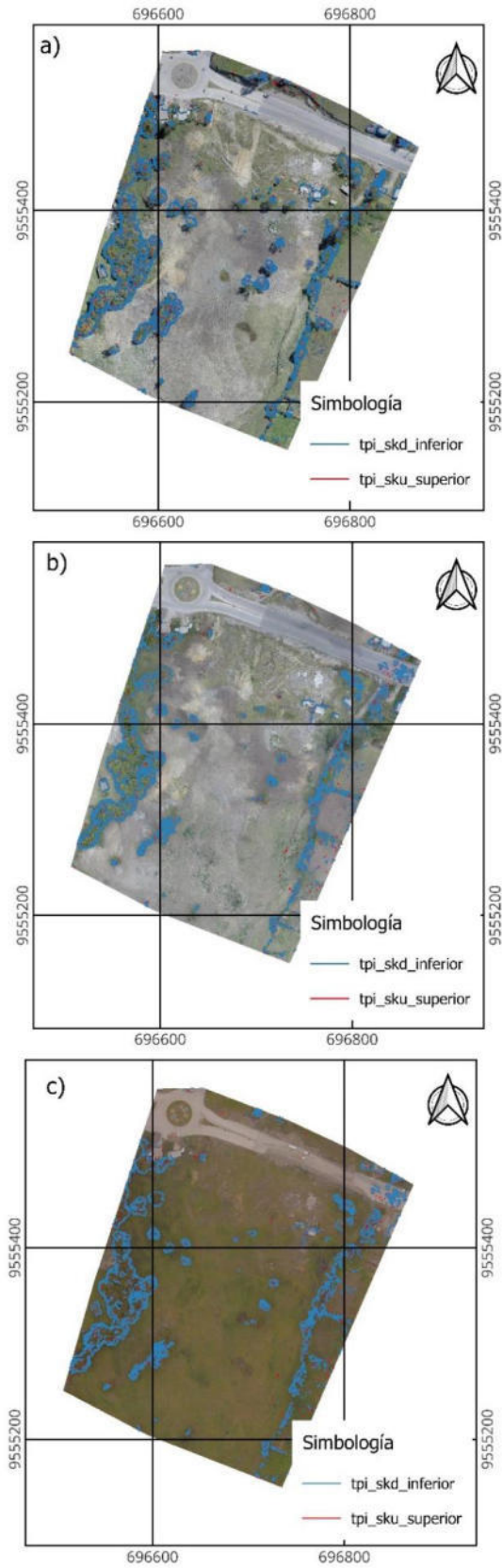


Figura 69. Líneas de ruptura de la pendiente obtenidas a partir del modelo TPI con una resolución de 0,05 m. a) corresponde a la fecha 4/julio/2016, b) 29/noviembre/2016 y c) 12/enero/2018.

Como se ha comentado ya, este factor es muy sensible a la resolución, por lo que también se ha calculado a partir del MDS con un tamaño de celdilla de 1 m. Los resultados se muestran en la Figura 70 con una escala entre -0,25 y 0,25 m, observándose sectores con valores absolutos (positivos y negativos) más elevados generalmente relacionados con la vegetación de arbolada y las construcciones. Sin embargo, a diferencia de lo observado con la resolución de 0,05 m, en este caso destacan algunos elementos del terreno como el escarpe lateral izquierdo, los escarpes del pie y algunos otros más, distribuidos por el área más activa o menos activa. También se puede observar bastante claramente la terminación del pie (punta) y los taludes del otro margen de la carretera.

En cuanto a la evolución, además de los relacionados con el crecimiento de las arboledas y las construcciones (algunas de ellas derrumbadas o demolidas en la última fecha), se aprecian cambios bastante claros en la configuración de la ladera en general, y del pie en general. En el pie se observan tanto un desplazamiento de las franjas de valores positivos y negativos, que delimitan escarpes y rellanos, como la formación de nuevos escarpes en las últimas fechas, que presentan una mayor densidad de los valores más altos (en términos absolutos).

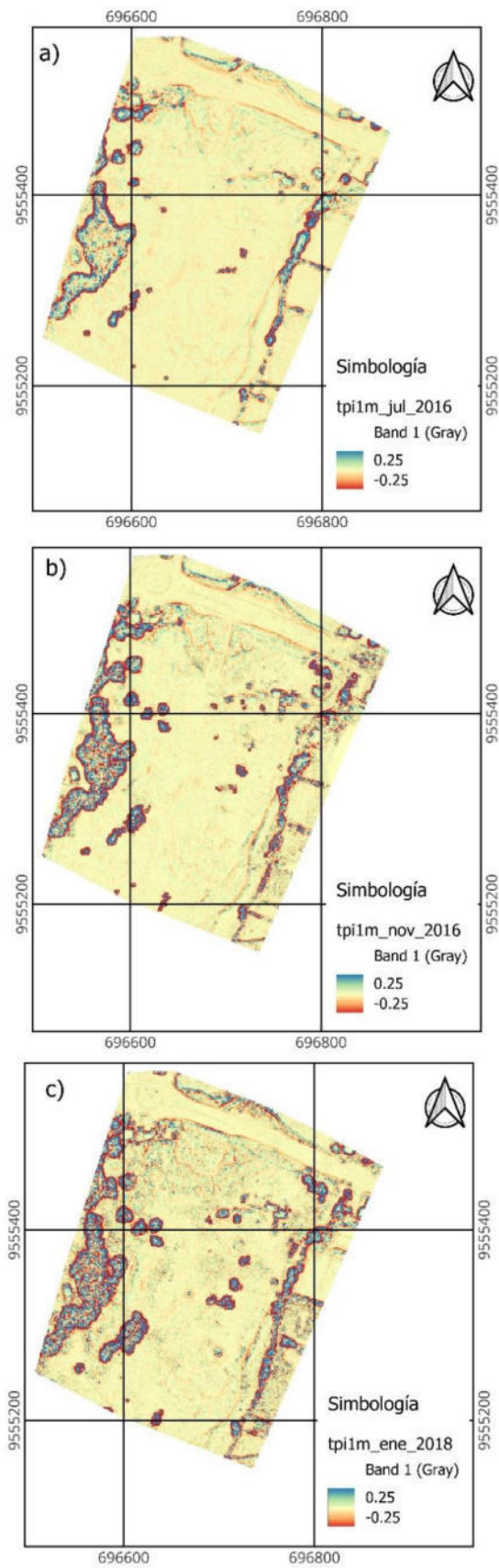


Figura 70. Mapas del TPI en los tres períodos de control a resolución de 1 m a) 4/julio/2016, b) 29/noviembre/2016 y c) 12/enero/2018.

En este caso, la extracción de líneas de ruptura, que se muestran en la Figura 71 es mucho más efectiva y se aprecian no solo asociadas a la vegetación y las construcciones sino a la morfología del propio terreno. Así, se aprecia de forma muy clara el escarpe lateral, los escarpes del pie y algunos otros distribuidos por la ladera, incluido el principal, aunque este es muy sutil. Todos ellos aparecen limitados por una línea superior y una línea inferior. En relación con el pie, además de los escarpes, se observa la línea de punta o terminación del mismo en el margen o incluso en la propia carretera. Por último, se aprecian también de forma muy clara los taludes del otro lado de la carretera.

En la evolución de las líneas, aparte de los cambios relacionados con el crecimiento de las arboledas y con las construcciones, lo más destacable es el desplazamiento que se produce en los escarpes del sector del pie y en menor medida de otros en sectores del área más activa del movimiento. En la parte alta y concretamente en el escarpe lateral no se aprecian desplazamientos claros, por lo tanto, no hay retracción de los escarpes. Sin embargo, en la parte baja y sobre todo en el pie, se aprecia un desplazamiento general hacia adelante de las líneas (en torno a 0,5 m en el primer periodo y 1-3 m en el segundo) como consecuencia del avance del flujo. Lo más interesante es el avance de la línea de ruptura inferior, que corresponde a la punta del pie del movimiento, que es de en torno a 0,5-1 m en el primer periodo y de 2-4 m en el segundo, lo que implica que la masa del flujo irrumpe en la carretera. Por último, en relación con los taludes del otro margen de la carretera, se observa una pequeña retracción en algunos sectores, como consecuencia del derrumbe o colapso de algunos de ellos en el periodo analizado.

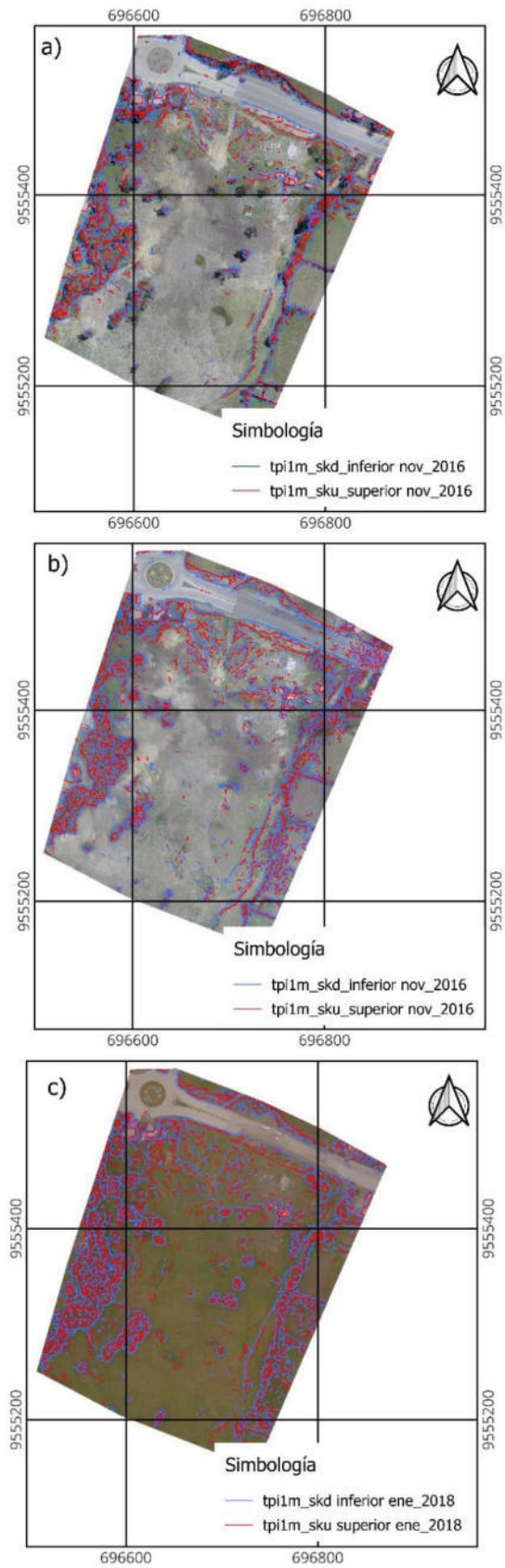


Figura 71. Líneas de ruptura de la pendiente obtenidas a partir del modelo TPI con una resolución de 1 m. a) corresponde a la fecha 4/julio/2016, b) 29/noviembre/2016 y c) 12/enero/2018.

#### **4.2.3.5. Distribución y evolución del TRI**

Los mapas de TRI de la zona de Colinas Lojanas en las tres fechas analizadas se muestran en la Figura 72. En ellos, se aprecian zonas de alta rugosidad en relación con la vegetación (arbolado); de rugosidad media en algunos escarpes, como el lateral del flanco izquierdo; y de rugosidad moderada en los escarpes principal, secundarios y del pie del movimiento, que destacan de forma tenue sobre el cuerpo del movimiento, el área de inestabilidad y la zona estable, que presentan rugosidad baja. El pie del movimiento presenta una mayor densidad de las zonas de rugosidad moderada respecto a otros sectores. Finalmente, destacan los taludes de la carretera con una media-alta rugosidad.

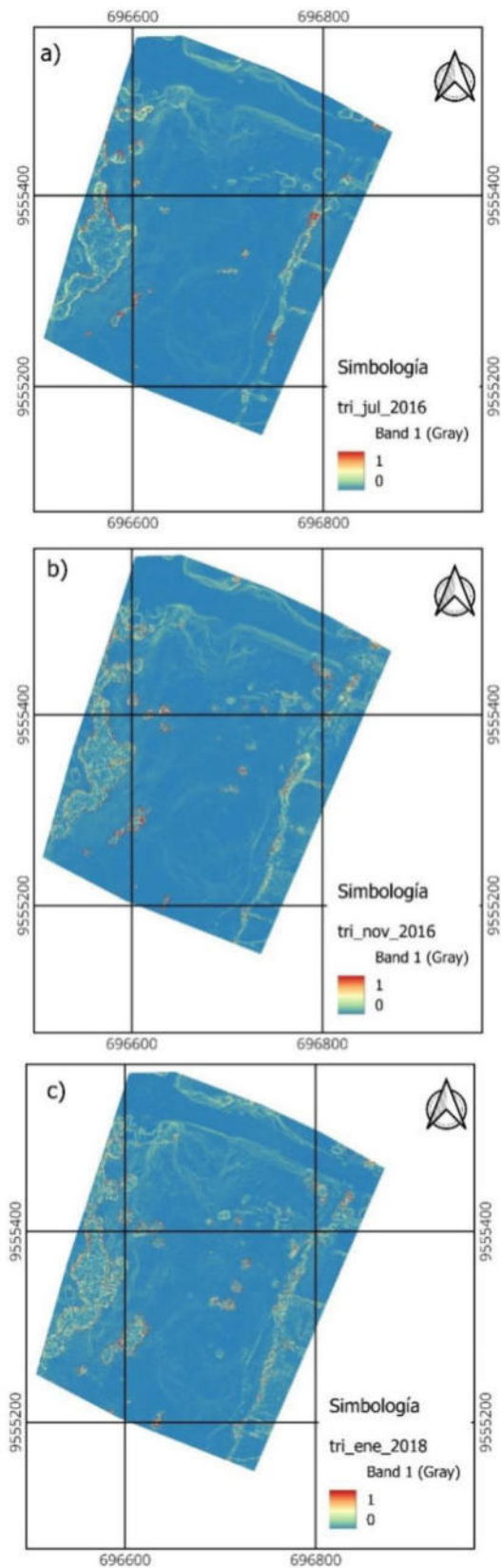


Figura 72. Distribución de la rugosidad (TRI) en diferentes partes de la ladera en tres periodos de control a la resolución de 0,05 m: a) 4/julio/2016, b) 29/noviembre/2016 y c) 12/enero/2018.

Los valores de rugosidad media por elementos del movimiento se muestran en la Tabla 30 y la Figura 73. En ella se observa que los escarpes presentan una rugosidad media que oscila entre 0.03 a 0.06, siendo la más alta de los escarpes del pie, y la menor la del escarpe principal, que es muy poco pronunciado. El cuerpo del movimiento de flujo principal, el área de inestabilidad general y el área estable presentan valores bajos de rugosidad entre 0,02 y 0,03. Por su parte, los taludes del otro lado de la carretera presentan los valores medio más altos de hasta 0,09.

Tabla 30. Detalle del valor del TRI en la zona de estudio por elementos del deslizamiento.

Elemento	Media	Moda	Mín.	Máx.	Rango	D.Típ.	C.Var.
Movimiento principal							
Escarpe principal	0,03	0,01	0,00	0,10	0,10	0,01	0,52
Escarpe lateral	0,04	0,00	0,00	1,12	1,12	0,03	0,59
Cuerpo	0,02	0,00	0,00	1,30	1,30	0,02	0,90
Escarpes secundarios	0,03	0,00	0,00	0,61	0,61	0,02	0,59
Pie	0,03	0,00	0,00	0,53	0,53	0,03	0,85
Escarpes en pie	0,06	0,03	0,00	0,35	0,35	0,03	0,54
Área de inestabilidad general							
Cuerpo amplio	0,03	0,00	0,00	9,32	9,32	0,12	4,01
Otros escarpes	0,05	0,03	0,00	0,62	0,62	0,03	0,60
Otros elementos							
Taludes carretera	0,09	0,00	0,00	0,57	0,57	0,05	0,54
Área estable							
Estable	0,03	0,00	0,00	8,00	8,00	0,09	2,93



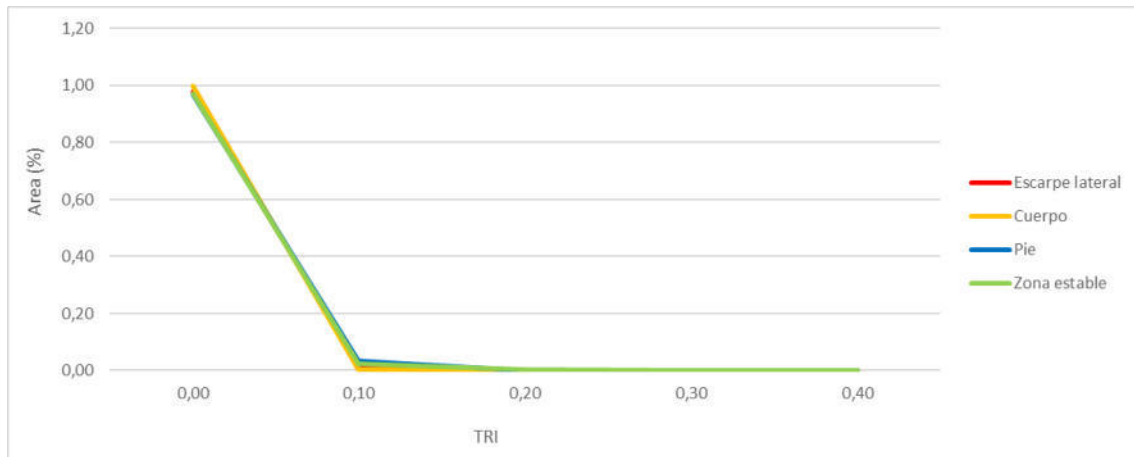


Figura 73. Distribución del TRI en la zona de estudio y analizada por elementos constitutivos de la ladera (escarpe lateral, cuerpo, pie, y zonas estables).

La evolución entre las tres fechas consideradas, no resulta muy evidente, en especial la que se produce en el primer periodo, que se circunscribe a los sectores con vegetación y en las inmediaciones de las zonas con construcciones. En el terreno, los cambios son poco perceptibles en la mayor parte de la ladera en este primer periodo. Sin embargo, en el segundo periodo, además de los cambios relacionados con la vegetación y las construcciones, se aprecian de forma más clara los escarpes, sobre todo en el sector del pie, donde hay una mayor rugosidad general y un cambio de configuración más visible.

Como en el caso del TRI, en este caso se presentan también los resultados de calcular la rugosidad con una resolución de 1 m, que se muestran en la Figura 74. En general, todo lo dicho para la resolución anterior, se puede encontrar en esta otra, pero con bastante más claridad. Así, prescindiendo de la vegetación y las construcciones, se perciben mejor los escarpes, tanto los asociados al movimiento principal como al área de inestabilidad general, como sectores de mayor rugosidad que el cuerpo del movimiento principal y el extendido. Destaca con una mayor rugosidad general el sector del pie y con una alta rugosidad los taludes de la carretera.

La evolución, nuevamente, es más notoria en el segundo periodo que en el primero. Así, en el primer periodo solamente se observan cambios muy tenues en relación con los

escarpes. En el segundo periodo, sin embargo, se aprecia por un lado una mayor nitidez en los escarpes; y por el otro, un desplazamiento y cambio de configuración de los mismos que es más evidente en el sector del pie. De ahí se deduce tanto un movimiento de avance del movimiento, como una mayor desorganización de la masa como consecuencia del mismo.

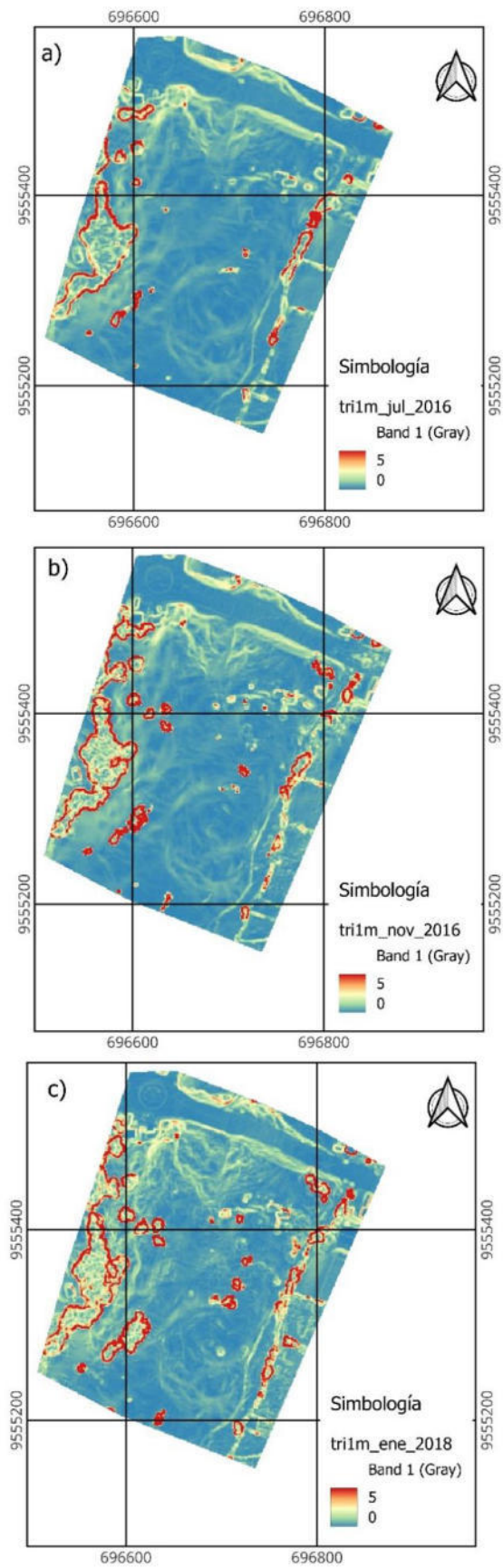


Figura 74. Distribución de la rugosidad (TRI) a resolución de 1 m en diferentes partes de la ladera en tres periodos de control a la resolución de 1 m: a) 4/julio/2016, b) 29/noviembre/2016 y c) 12/enero/2018.

#### **4.2.3.6. Distribución y evolución del TWI**

En la Figura 75 se muestran los mapas del TWI correspondientes a las tres fechas de análisis en la zona de estudio de Colinas Lojanas.

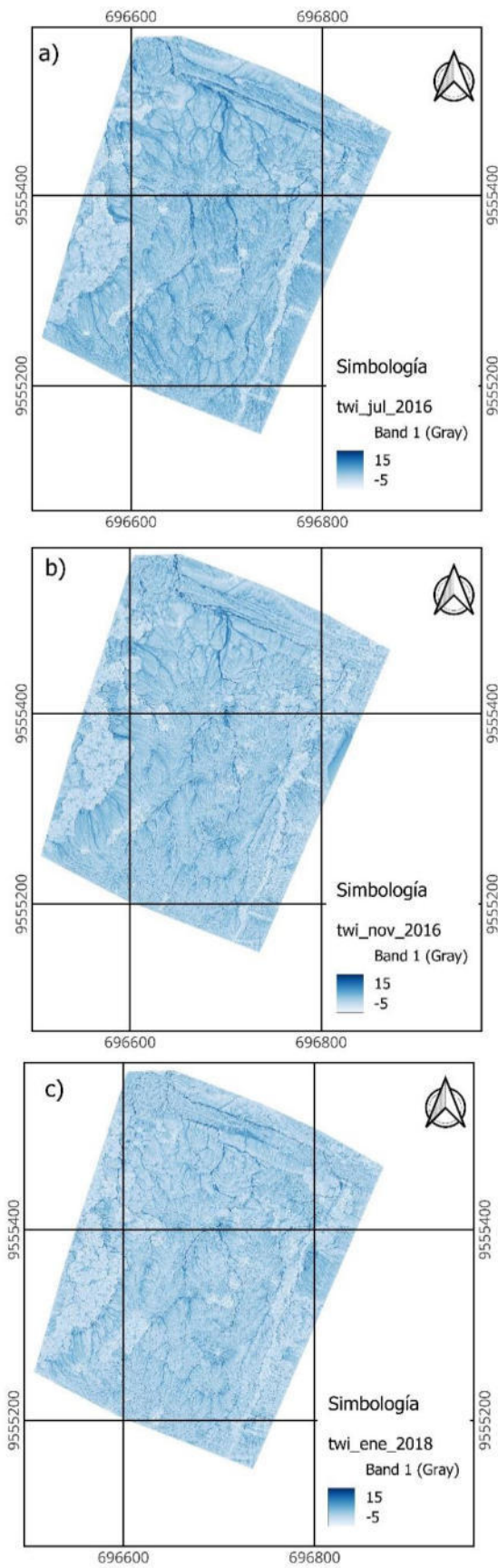


Figura 75. Mapas de TWI en la zona de estudio de Colinas Lojanas. a) julio 2016; b) noviembre 2016 y c) enero 2018.

Los mapas de TWI muestran las zonas de potencial acumulación de agua en las laderas, y como consecuencia son un reflejo de la red hidrográfica. Se representan con una escala de color azul, en las que los tonos más oscuros corresponden a los valores más elevados del TWI. Dada la resolución de los modelos, se trata de una red de detalle, en la que los elementos situados sobre el terreno influyen de forma clara en las direcciones de flujo del agua. En la zona de estudio, se produce una red jerárquica con al menos 3 o 4 corrientes principales de concentración del flujo, que discurre en la dirección media de orientación de la ladera que es prácticamente N o NNE. Dos de ellas se encuentran en los márgenes de la zona, al oeste y este a favor de dos barrancos que, no obstante, al estar bastante poblados por vegetación arbórea y/o arbustiva, no muestran una zona clara de concentración del flujo, al menos aparentemente. Las otras dos y algunas otras menores discurren por el centro de la zona, concretamente por el propio movimiento principal y tienden a confluir en el centro de la misma hacia el pie del deslizamiento. Sin embargo, la desorganización que se produce en el terreno en este sector, interrumpe las líneas de flujo y probablemente se infiltren en el suelo a favor de las grietas que se forman en el mismo. Finalmente hay que mencionar la circulación de aguas por la carretera, tanto en el pie del deslizamiento y los taludes del otro lado.

La evolución no muestra diferencias muy significativas en el TWI, de forma que la red hidrográfica tiene una configuración similar en los tres casos, aun con ciertas diferencias que se acentúan hacia la parte baja de la ladera en el sector del pie. Así, mientras que entre las dos primeras fechas no hay apenas cambios, en las dos últimas la interrupción de la red de drenaje antes comentada se acentúa, de tal forma que los valores máximos en la zona de acumulación son menores en la tercera fecha considerada. Esto supone una menor concentración del flujo y en consecuencia un menor poder erosivo de las aguas de escorrentía, pero por el contrario una mayor circulación de las aguas subterráneas que se

infiltran por las grietas con las consecuencias que esto puede tener en el aumento de la presión de poros y la reducción de presiones efectivas en el sector del pie del movimiento. En cualquier caso, la mayor desorganización de la masa movilizada y deformada en este sector a medida que evoluciona el movimiento tiene su reflejo en los cambios de la red hidrográfica superficial en este sector.

Los resultados del análisis del TWI por elementos se muestran en la Tabla 31 y la Figura 76. No hay grandes variaciones entre los valores medios de los distintos elementos, que se encuentran en un rango de 2,5 a 3,6. En general los cuerpos del movimiento principal y del área inestabilidad general tienen un valor medio superior a los escarpes (principal, lateral y otros), ya que estos últimos están topográficamente más altos, excepto los escarpes secundarios que se hayan repartidos por el cuerpo. Sin embargo, en esta zona, destaca el hecho de que el pie del movimiento, que está en la parte más baja de la ladera, presenta valores medio del TPI algo inferiores a los del cuerpo. Esto se debe al hecho antes comentado de que la jerarquía de la red hidrográfica se ve interrumpida debido a la infiltración de las aguas superficiales a través de grietas, y a la propia desorganización de la red por la deformación en este sector. Por último, hay que mencionar que los taludes presentan los valores más bajos del índice por la escasa longitud de la pendiente, a pesar de lo cual en su pie presentan un valor elevado por la fuerte pendiente que muestran.

Tabla 31. Detalle del valor del TWI en la zona de estudio por elementos del deslizamiento.

Elemento	Media	Moda	Mínimo	Máximo	Rango	D.Típ.	C.Var.
<b>Movimiento principal</b>							
Escarpe principal	3,24	-0,56	-3,88	12,55	16,43	1,86	0,58
Escarpe lateral	2,67	-1,42	-4,50	16,01	20,51	1,99	0,75
Cuerpo	3,34	2,33	-5,90	19,02	24,92	2,61	0,78
Escarpes secundarios	3,61	-0,14	-5,20	15,96	21,15	2,46	0,68
Pie	3,27	2,33	-5,82	19,38	25,19	2,46	0,75
Escarpes en pie	2,49	1,27	-3,20	14,24	17,44	1,84	0,74
<b>Área de inestabilidad general</b>							
Cuerpo amplio	3,34	2,33	-7,11	19,13	26,24	2,47	0,74
Otros escarpes	2,93	0,82	-3,86	13,99	17,85	1,87	0,64
<b>Otros elementos</b>							
Taludes carretera	1,65	1,11	-3,60	11,00	14,61	1,37	0,83
<b>Área estable</b>							
Estable	3,01	2,33	-6,71	18,53	25,24	2,39	0,80

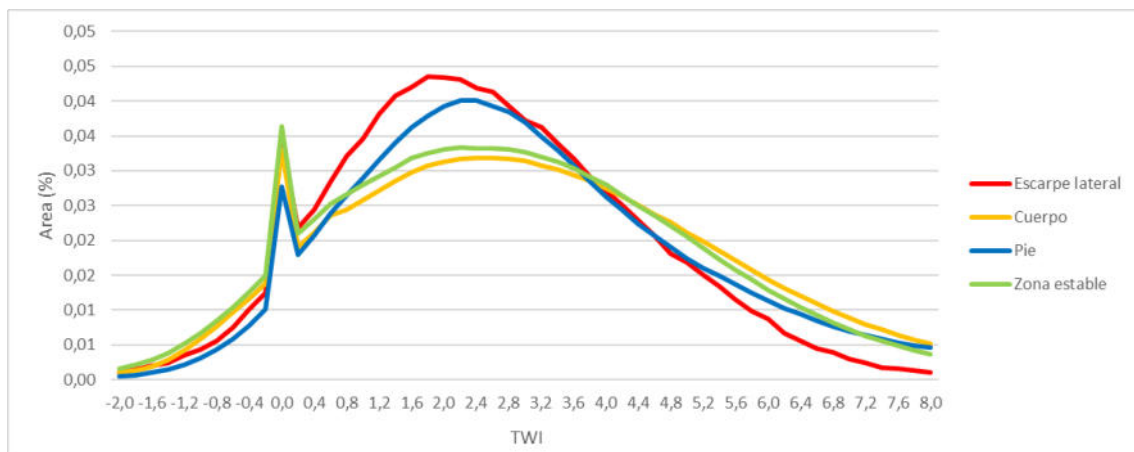


Figura 76. Distribución del TWI en la zona de estudio y análisis por elementos constitutivos de la ladera (escarpe lateral, cuerpo, pie, y zonas estables).



#### 4.2.4. Desplazamientos en puntos significativos

En este apartado se presentan los resultados del análisis de desplazamientos en puntos significativos de la zona de Colinas Lojanas, en primer lugar, los puntos medidos con GNSS; y, en segundo lugar, los puntos extraídos a partir de las ortoimágenes y MDS VANT.

##### 4.2.4.1. Desplazamientos en puntos GNSS

En la Figura 77 se muestran los desplazamientos horizontales y verticales en los puntos GNSS de la zona de Colinas Lojanas.

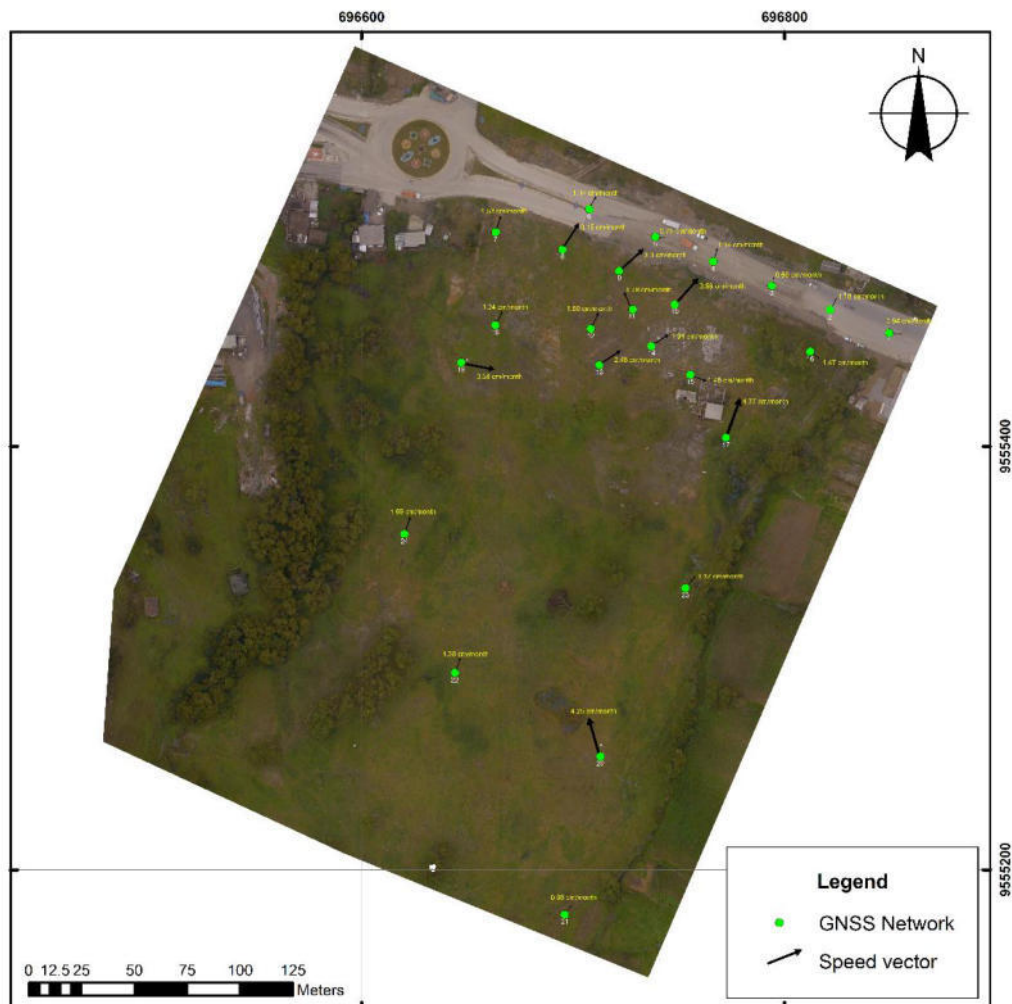


Figura 77. Mapa de desplazamientos horizontales y verticales en los puntos GNSS.

Asimismo, la Tabla 32 presenta los resultados de desplazamientos, dirección y velocidades horizontales y verticales. El intervalo de tiempo empleado para las campañas de monitoreo GNSS fue de 104 días (3.47 meses) para esta zona. Hay que tener en cuenta que el periodo de monitorización GNSS en esta zona corresponde con el primer periodo entre vuelos VANT.

Tabla 32. Resumen de desplazamientos efectivos N, E y Z de los puntos GNSS de Colinas Lojanas. Se muestra la dirección y la velocidad de cada punto horizontal y vertical.

<b>Punto GNSS</b>	<b>N (m)</b>	<b>E (m)</b>	<b>Z (m)</b>	<b>D<sub>NE</sub> (m)</b>	<b>V<sub>H</sub> (m/mes)</b>	<b>V<sub>V</sub> (m/mes)</b>	<b>Dirección</b>
1	-0.015	0.029	0.038	0.033	0.010	0.011	-
2	0.034	0.017	0.069	0.038	0.011	0.020	N
3	0.017	0.012	0.093	0.021	0.006	0.027	-
4	0.036	0.016	0.104	0.039	0.011	0.030	NNE
5	0.002	0.026	0.061	0.026	0.007	0.018	E
6	0.035	0.018	0.036	0.039	0.011	0.010	NNE
7	0.052	0.010	-0.042	0.053	0.015	-0.012	N
8	0.084	0.070	-0.060	0.109	0.031	-0.017	NE
9	0.089	0.072	0.047	0.114	0.033	0.014	N 38.9 E
10	0.097	0.078	-0.126	0.124	0.036	-0.036	N 38.8 E
11	0.039	0.048	-0.070	0.062	0.018	-0.020	N 50.9 E
12	0.026	0.049	-0.057	0.055	0.016	-0.016	ENE
13	0.036	0.078	-0.170	0.086	0.025	-0.049	N 65.2 E
14	0.018	0.065	-0.051	0.067	0.019	-0.015	ENE
15	-0.027	0.044	-0.053	0.052	0.015	-0.015	SE
16	-0.036	0.036	-0.095	0.051	0.015	-0.027	S 45.0 E
17	0.143	0.050	-0.108	0.151	0.044	-0.031	NNE 19.3 E
18	0.040	0.024	-0.062	0.047	0.014	-0.018	NNE
19	-0.028	0.114	-0.184	0.117	0.034	-0.053	ESE
20	0.142	-0.040	-0.111	0.148	0.043	-0.032	N 15.7 W
21	0.024	0.023	-0.111	0.033	0.010	-0.032	-
22	0.021	0.043	-0.100	0.048	0.014	-0.029	ESE
23	0.036	0.031	-0.051	0.048	0.014	-0.015	NE
24	0.048	0.034	-0.042	0.059	0.017	-0.012	NNE

En este caso, a diferencia del anterior y, dado el mayor número de puntos analizados, se hará la descripción conjunta de las componentes horizontal y vertical de los desplazamientos, lo que permitirá una mejor comprensión de la deformación. Considerando el umbral de precisión horizontal en 0.03 m y el de precisión vertical en 0.035 m, solo los puntos 3 y 5 están bajo el primer umbral, mientras que el segundo lo

cumplen todos los puntos, así que a priori no se descarta ningún punto. El resto de los puntos presentan valores de desplazamiento horizontal significativos, entre 0.033 y 0.151 m; y verticales, entre 0.052 y 0,184 m; diferenciándose distintos grupos de puntos en función de la deformación.

En primer lugar, hay que citar una serie de puntos situados en la carretera (1, 2, 4, 5, 6 y el propio punto 3), prácticamente fuera de la masa movilizada y solamente afectados por los empujes de la misma; en todos ellos se aprecian desplazamientos reducidos en esta componente horizontal (inferiores a 0.053) con una dirección predominante al N y NNE. Sus desplazamientos verticales son positivos (entre 0.036 y 0.104 m), lo que refuerza la idea del empuje de la carretera que está delante del movimiento y, por lo tanto, resulta desplazada hacia el N y ligeramente levantada. Las tasas de desplazamiento son de 0,006-0,011 m/mes en horizontal y 0.010-0.030 m/mes en vertical.

Un poco por encima de ellos, en el centro del pie del movimiento, pero cerca de la punta, hay un conjunto de puntos (8, 9 y 10), con deformaciones algo mayores: 0,109-0,124 para la componente horizontal y hacia el NE; y entre 0.047 (ascenso) y -0.126 (descenso) en la vertical. Así, las tasas en valor absoluto varían entre 0,031-0.036 m/mes en horizontal y 0.014-0.036 en vertical. A la misma altura, pero cerca del flanco derecho está el punto 7, y cerca del izquierdo está el punto 16. Ambos tienen un desplazamiento horizontal sensiblemente inferior (0.051-0.053), hacia el N el primero y el E el segundo; y un desplazamiento vertical de descenso de -0.042 m y -0.092 m, respectivamente.

Nuevamente, un poco más arriba topográficamente, pero dentro del sector del pie, se pueden considerar un grupo de cinco puntos (11, 12, 13, 14 y 15), con desplazamientos algo inferiores a los anteriores. Concretamente, entre 0.052-0.087 m en la componente horizontal, hacia el ENE, y -0.051-0,070 de descenso en la vertical, salvo el punto 13 que

presenta un descenso de -0.170 m. Las velocidades son de 0.015 m/mes en horizontal y 0.015-0.049 m/mes en la vertical. El punto 17, más alto y en el límite del pie con el cuerpo hacia el flanco derecho, presenta una mayor deformación de 0.151 m en la horizontal, hacia NNE, y -0.108 en la vertical (tasas de 0.044 m/mes y 0.031 m/mes, respectivamente). Finalmente, los puntos 18 y 19, igualmente en el límite del pie con el cuerpo, pero cerca del flanco izquierdo, muestran desplazamientos variables entre 0.047-0.151 en la componente horizontal, hacia el NE, y -0.062-0.184 en la vertical (tasas de 0.014-0.034 m/mes y 0.018-0.053, respectivamente).

El resto de puntos están topográficamente mucho más elevados, tres de ellos en la parte más activa del movimiento (20, 22, 23) y dos de ellos fuera de él, aunque en la zona de inestabilidad general. Todos ellos, excepto el 20, muestran deformaciones más bien bajas, sobre todo en la componente horizontal, con desplazamientos de 0.033-0.059 m hacia el NNE, y algo mayores en la vertical, con desplazamientos de descenso entre 0.042-0.111 m; siendo las tasas de 0.010-0.017 m/mes y 0.012-0.032 m/mes, respectivamente. El punto 20, entre el escarpe principal y el lateral, muestra mayores desplazamientos, de 0.148 m en horizontal, hacia NNW, y -0.111 en vertical (tasas de 0.043 m/mes y 0.032 m/mes, respectivamente).

En resumen, se observa un desplazamiento generalizado del movimiento hacia el N (entre el NW y el E), con un sector de mayor deformación en el pie, con tasas de desplazamiento horizontal de 0.02-0.04 m/mes y de descenso vertical de -0.01-0.05 m/mes; y una menor deformación general, salvo excepciones en el cuerpo con tasas de 0.01-0.02 m/mes y 0.01-0.03 m/mes, respectivamente. La carretera resulta empujada hacia delante (N) y hacia arriba por el movimiento de tipo flujo con tasas de 0.01 m/mes y 0.01-0.03 m/mes, respectivamente.

#### 4.2.4.2. Desplazamientos en puntos extraídos a partir de los productos VANT

Los desplazamientos en los puntos de monitorización extraídos a partir de los MDS y ortomágenes obtenidas con los vuelos VANT se muestran en los mapas de vectores correspondientes a los periodos considerados para la zona de Colinas Lojanas en la Figura 78, y se resumen en las Tablas 33 y 34.

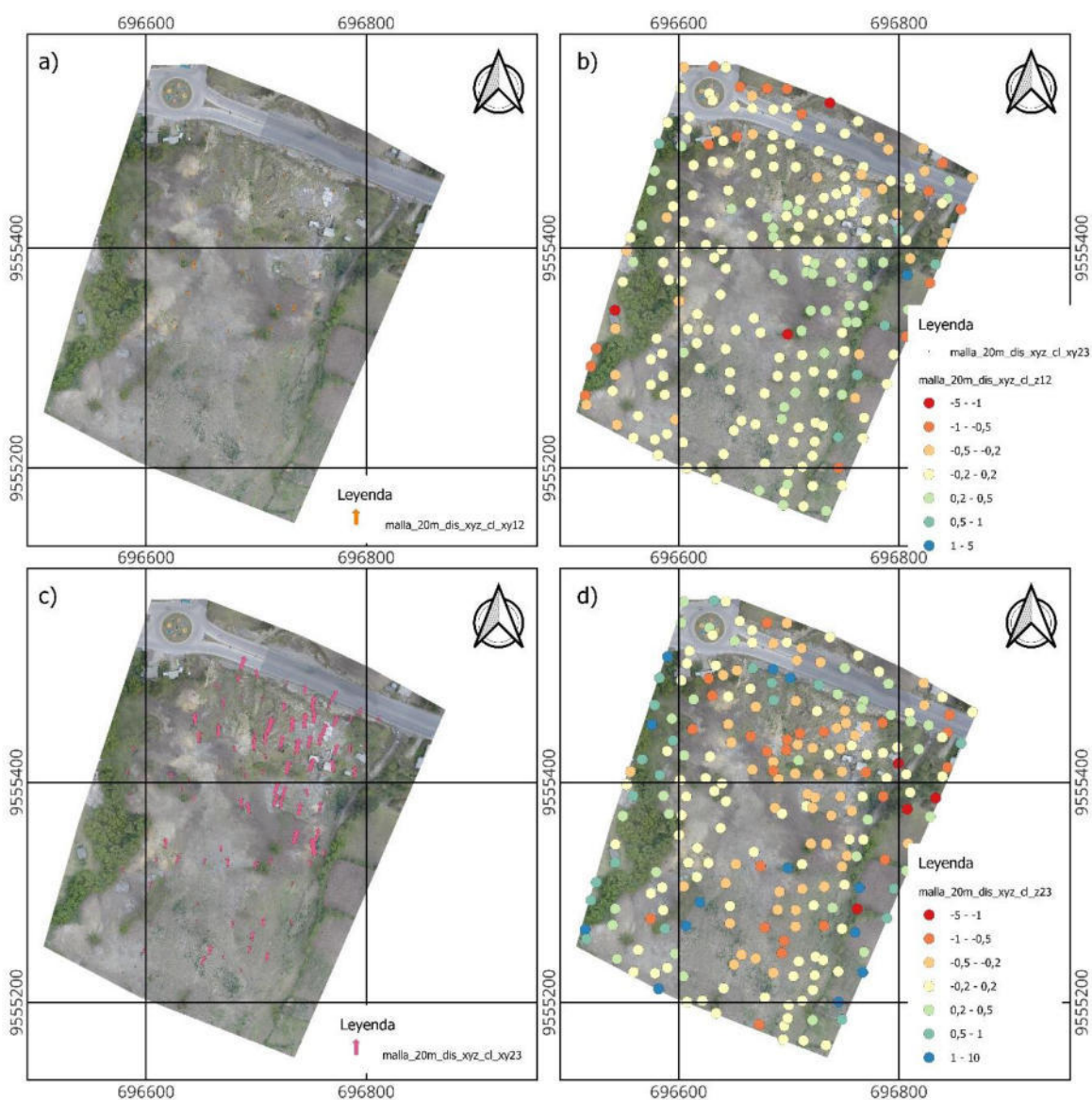


Figura 78. Mapa de vectores de dirección y velocidad del movimiento de ladera del sector Colinas Lojanas. a) y b) corresponden al periodo julio – noviembre 2016; c) y d) corresponden al periodo noviembre 2016 – enero 2018.

En el mapa de vectores de desplazamientos horizontales correspondiente al primer periodo analizado entre julio y noviembre de 2016 (Figura 78 a) se observa una dirección bastante uniforme de los desplazamientos hacia el NNE, coincidiendo con la orientación de la ladera, aunque con un cierto giro hacia el N en el sector del pie. Los desplazamientos son bastante moderados en general, tanto en el cuerpo como en el pie del flujo del movimiento principal; de hecho, no suelen superar la magnitud de 0.5 m, aunque puntualmente alcanzan hasta 1-1.30 m en algunos puntos situados en el cuerpo del movimiento principal. En el área estable los desplazamientos son bastante más reducidos, no superando en muchos casos el nivel de detección establecido para la componente horizontal (0.10 m). En cuanto a los desplazamientos verticales (Figura 78 b) se observa un predominio de desplazamientos inferiores a límite de detección establecido en 0.15 m, especialmente fuera del movimiento principal, pero también dentro de él. Centrando la atención en el movimiento, se observan desplazamientos positivos (ascensos) sobre todo en la parte del cuerpo y negativos en la parte del pie, casi siempre por debajo de 0.5 m en términos absolutos; aunque puntualmente se observan desplazamientos mayores.

En el segundo periodo, entre noviembre de 2016 y enero de 2018, el mapa de vectores de desplazamientos horizontales (Figura 78 c) muestra igualmente un claro predominio de los desplazamientos con dirección NNE, aunque en algunos sectores como el del barranco en el oeste, los desplazamientos giran al NW a favor de la pendiente. La magnitud es sensiblemente mayor que en el periodo anterior, fundamentalmente en el sector este (cerca del flanco izquierdo) y hacia la parte del pie del movimiento, donde se alcanzan desplazamientos de 2-3 m en muchos puntos. En el cuerpo del movimiento principal e incluso en el área de inestabilidad general los desplazamientos son menores, como máximo de 1-1.5 m y en el área inestable muchos puntos están por debajo del límite de detección horizontal. Los desplazamientos verticales (Figura 78 d) son generalmente

reducidos y en muchos casos por debajo del límite de detección vertical, sobre todo en el área estable. Focalizando en el movimiento principal, los desplazamientos suelen ser negativos (descenso) en todo el movimiento y mayores hacia el sector del pie donde alcanzan magnitudes superiores a 0.5 en valor absoluto. No obstante, en la punta y en la propia carretera se observan algunos puntos con desplazamientos positivos (ascenso), debido al avance de la masa que invade el trazado de la carretera y posiblemente por el empuje lateral que ejerce sobre ella.



Tabla 33. Desplazamientos y tasas horizontales y verticales en los puntos extraídos en el área de Colinas Lojanas en el primer periodo analizado (julio-noviembre de 2016). Desplazamientos expresados en m y velocidades expresadas en m/mes. Dirección de desplazamiento expresada en grados desde el N. Radio Vector Medio es adimensional (0-1)

<b>Desplazamientos horizontales</b>									
<b>Elemento</b>	<b>Nº P</b>	<b>Media</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>D.Típ.</b>	<b>Tasa M</b>	<b>Dir M</b>	<b>Rad.V</b>	
Escarpes principal	7/7	0,362	0,169	0,477	0,097	0,073	4,28	1,00	
Cuerpo	57/48	0,444	0,125	1,209	0,229	0,090	5,50	0,98	
Pie	30/26	0,437	0,205	0,694	0,165	0,088	358,60	0,967	
Cuerpo amplio	69/45	0,369	0,000	1,309	0,259	0,075	7,88	0,853	
Taludes carretera	1/1	0,085	0,085	0,085	0,000	0,017	63,00	1,00	
Estable	68/33	0,117	0,064	0,389	0,087	0,024	11,75	0,61	
	232/160	0,343	0,000	1,309	0,221	0,070	8,869	0,80	
		<b>Desplazamientos verticales</b>					<b>Desp. Totales</b>		
<b>Elemento</b>	<b>Nº P</b>	<b>Media</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>D.Típ.</b>	<b>Tasa M</b>	<b>Desp</b>	<b>TasaM</b>	
Escarpes principal	7/7	0,013	-0,186	0,243	0,118	0,003	0,364	0,074	
Cuerpo	57/48	0,158	-0,087	0,443	0,103	0,032	0,471	0,096	
Pie	30/26	-0,055	-0,488	0,290	0,165	-0,011	0,443	0,090	
Cuerpo amplio	69/45	0,007	-0,752	0,488	0,219	0,001	0,370	0,075	
Taludes carretera	1/1	-0,205	-0,205	-0,205	0,000	-0,042	0,222	0,045	
Estable	68/33	-0,067	-0,656	0,510	0,240	-0,014	0,135	0,027	
	232/160	-0,016	-2,022	1,010	0,359	-0,003	0,344	0,070	

Tabla 34. Desplazamientos y tasas horizontales y verticales en los puntos extraídos en el área de Colinas Lojanas en el segundo periodo analizado (noviembre de 2016-enero de 2018). Desplazamientos expresados en m y velocidades expresadas en m/mes. Dirección de desplazamiento expresada en grados desde el N. Radio Vector Medio es adimensional (0-1).

Desplazamientos horizontales								
Elemento	Nº P	Media	Mín.	Máx.	D.Típ.	Tasa M	Dir M	Rad.V
Escarpes principal	7/7	0,440	0,151	1,081	0,261	0,089	1,77	0,97
Cuerpo	1,488	0,035	3,418	0,789	0,302	3,40	0,98	1,488
Pie	30/26	1,751	0,357	3,144	0,716	0,355	4,77	1,751
Cuerpo amplio	69/45	0,486	0,000	2,198	0,502	0,099	359,81	0,486
Taludes carretera	1/1	0,232	0,232	0,232	0,000	0,047	189,00	1,00
Estable	68/33	0,103	0,028	0,412	0,110	0,031	9,66	0,51
	232/160	0,818	0,000	3,418	0,826	0,166	4,55	0,71
Desplazamientos verticales							Desp. Totales	
Elemento	Nº P	Media	Mín.	Máx.	D.Típ.	Tasa M	Desp	TasaM
Escarpe principal	7/7	-0,028	-0,784	0,298	0,346	-0,006	0,448	0,090
Cuerpo	57/48	-0,294	-0,741	0,390	0,203	-0,060	1,518	0,310
Pie	30/26	-0,122	-1,262	1,686	0,746	-0,025	1,794	0,364
Cuerpo amplio	69/45	-0,102	-0,401	1,834	0,391	-0,021	0,493	0,100
Taludes carretera	1/1	0,061	0,061	0,061	0,000	0,012	0,240	0,049
Estable	68/33	<b>0,097</b>	<b>-0,558</b>	<b>0,824</b>	<b>0,212</b>	<b>0,020</b>	<b>0,141</b>	<b>0,029</b>
	232/160	0,115	-1,224	6,834	0,921	0,023	0,826	0,167

Respecto a los datos mostrados en las Tablas 33 y 34, los resultados obtenidos en el área estable permiten observar desplazamientos horizontales con un valor medio de 0.12 y 0.10 m, en el primer y segundo periodo, respectivamente; y una desviación típica de 0.09 y 0.11 m, que están por debajo del límite de detección horizontal, establecido en 0,15 m. Ello a pesar de que, como en la zona anterior, una buena parte de estos puntos están en una posición periférica en las que los modelos no se ajustan bien y generan ciertos errores.

La dirección de desplazamiento en estos puntos no es muy significativa, y de hecho esta área presenta el menor radio vector medio, de 0,61 y 0,51, lo que es indicativo de una cierta dispersión, dentro de una zona que presenta en general una baja dispersión de los vectores de desplazamiento. De la misma forma, los desplazamientos verticales en esta área considerada estable presentan un valor medio de -0,07 y 0,10 m, respectivamente; y una desviación típica de 0,24 y 0,21 m, los últimos por encima del límite de detección vertical establecido en 0,15 m, lo que se podría explicar en parte por la posición de muchos de estos puntos cerca del límite de la zona. En cualquier caso, el exceso no es muy grande, por lo que, dados los errores calculados en la orientación, los modelos se consideran fiables también en esta zona; aunque sería conveniente también para esta zona que el límite de detección se aumente hasta 0,20 m en la componente horizontal y 0,25 m en la vertical. En realidad, en esta zona el límite horizontal podría estar en 0,15 m, pero se lleva a 0,20 m por uniformizar con las otras zonas.

Una vez analizadas las precisiones e incertidumbres, los desplazamientos horizontales y verticales de los distintos elementos del movimiento nos informan sobre su cinemática. Así, en el primer periodo se observan desplazamientos medios en torno a 0,44 m para el cuerpo y el pie del movimiento, siendo algo menores los que se encuentran en el área de inestabilidad general, que es de 0,37 m. Las tasas de desplazamiento oscilan así entre 0,09 m/mes y 0,07 m/mes, respectivamente. En cuanto a la dirección, esta es bastante uniforme hacia el N, con radios vectores próximos a 1, aunque algo más virada al NNW en el sector del pie. Los desplazamientos verticales medios son positivos en el cuerpo, de hasta 0,16 m, lo que produce una tasa de 0,03 m/mes; mientras que, en los escarpes traseros, el pie y la zona de inestabilidad general son mucho más reducidos, generalmente por debajo de 0,05 m, proporcionando tasas que apenas superan 0,01 m/mes. Los desplazamientos

totales resultantes son bastante similares para todos los elementos, entre 0,30 y 0,50 m, con tasas cercanas a 0,1 m/mes.

En el segundo periodo se observan desplazamientos mayores en general y más diferenciados por elementos. Así, los desplazamientos horizontales medios son cercanas 0.5 m en el área de inestabilidad general y los escarpes, de 1.5 m en el cuerpo y de 1.8 en el pie del movimiento principal, lo que proporciona unas tasas de 0,1 m/mes, 0.3 m/mes y casi 0.4 m/mes, respectivamente. Todos ellos tienen una orientación general al N, pero en el pie giran ligeramente al NNW en algunos puntos. Los desplazamientos verticales medios que en general son negativos por todo el movimiento y el área de inestabilidad general, son de -0.27 m en el cuerpo, lo que proporciona unas tasas de al menos -0,05 m/mes; por su parte, en el sector del pie son inferiores en valor absoluto, de -0,12 m, con una tasa -0.03 m/mes, y en el área inestable general y los escarpes son aún más reducidos. Los desplazamientos totales son similares a los de la componente horizontal, al ser estos casi un orden de magnitud superior a los verticales.

#### **4.2.5. Desplazamientos medidos mediante análisis de correlación de imágenes**

En este apartado se presentan los resultados de la aplicación de las técnicas de correlación digital de imágenes para la estimación de desplazamientos horizontales (y verticales en el caso del método basado en SfM).

##### **4.2.5.1. Software Cosi-Corr**

Los resultados obtenidos en la aplicación de este software para la detección de desplazamientos horizontales se muestran en los mapas de la Figura 79.

Para el primer periodo de análisis donde cabe esperar desplazamiento más reducidos se utilizó nuevamente la banda 3 (rojo) de las ortoimágenes como imágenes de partida,

con unas ventanas de análisis de 256 píxeles de inicio y 32 píxeles de final, y un paso entre imágenes de 16 píxeles. Se han realizado otras pruebas con otras imágenes, tamaños de ventana y paso, siendo esta la que da resultados más coherentes como en la zona de Victoria. Se ha encontrado un sector con alto coeficiente SNR, hacia el pie del movimiento que indica desplazamientos coherentes, de hasta 0,5 m (positivos) en la componente N-S y valores próximos a 0 o ligeramente negativos en la componente E-W lo que indica pequeños desplazamientos al N o incluso NNW. Secundariamente se observa otro sector en el cuerpo y en las cercanías de los escarpes con desplazamientos positivos algo más bajos (0,3-0,4) en la componente N-S e igualmente próximos a 0 en la componente E-W, lo que indica de nuevo movimientos aún más reducidos hacia el N.

En el segundo periodo, cuando cabe esperar mayores desplazamientos, se ha partido de la banda 3 (rojo) de las ortoimágenes, aunque la imagen de la tercera fecha que aparece más oscura se ha sometido a un proceso de expansión del contraste, para normalizar su radiometría a la de las fechas anteriores. En este caso, se han utilizado ventanas entre 512 píxeles (inicio) y 32 píxeles (final) con paso de 16 píxeles. Solo se ha encontrado un sector con buena coherencia (bajo SNR) en el pie del movimiento, ya cerca de la carretera, con desplazamientos positivos de 2-2,5 m en la componente N-S y mucho más reducidos en la componente E-W, lo que indica desplazamientos moderados hacia el N.

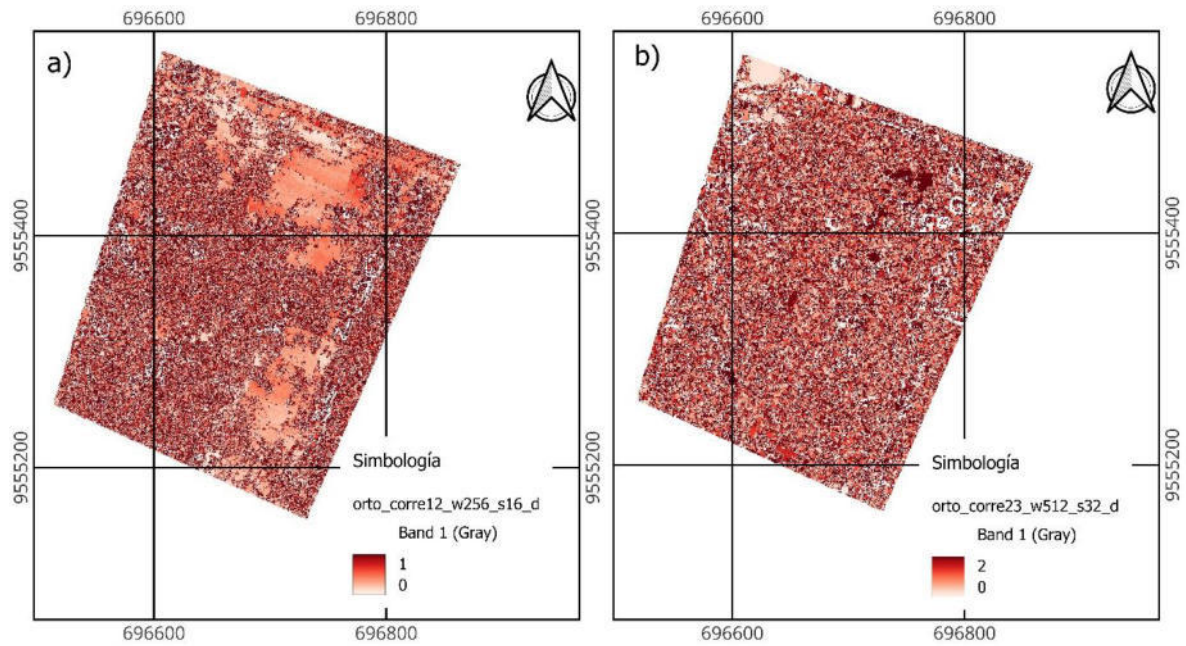


Figura 79. Mapa de desplazamientos horizontal en el primer periodo a) y segundo periodo b) correspondientes al sector Colinas Lojanas.

#### 4.2.5.2. Método basado en SfM

Los mapas de vectores que se muestran en la Figura 80, se han obtenido a partir de las ortoimágenes en color de las distintas fechas. Así, la comparativa en el primer periodo analizado, entre las ortoimágenes de las dos primeras fechas muestran desplazamientos horizontales del orden de 0.3-0.4 m y hacia el NNW en el sector más bajo del cuerpo y el pie del movimiento. En el resto de la zona no se han encontrado desplazamientos a tener en cuenta, o bien no se han encontrado puntos correspondientes en las ortoimágenes.

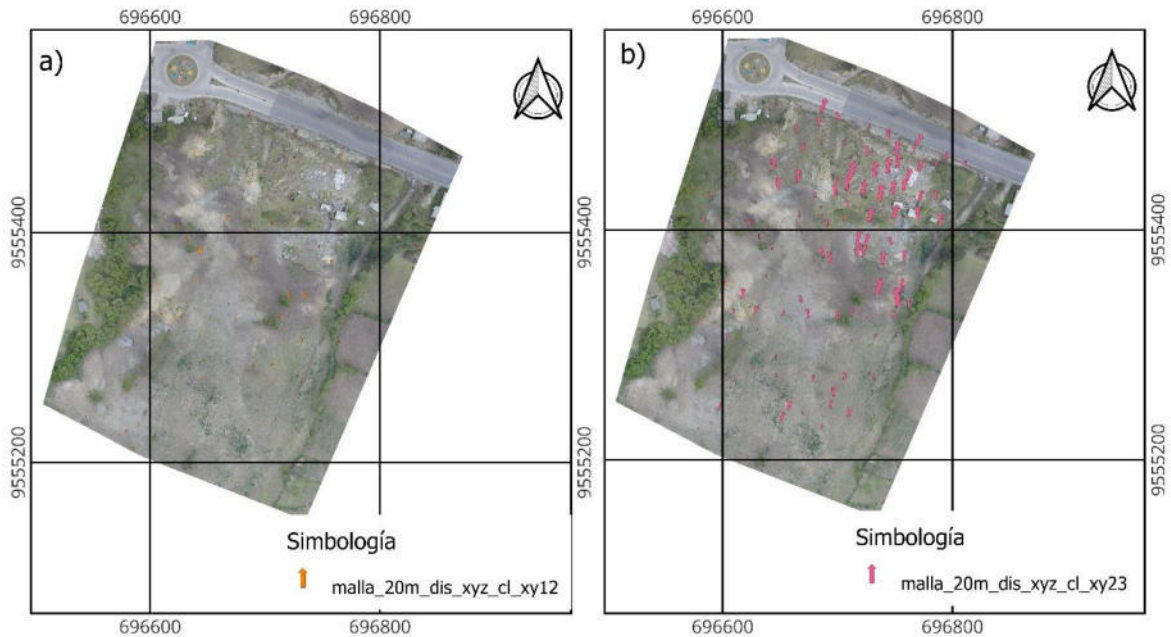


Figura 80. Mapa de vectores de desplazamiento horizontal obtenidos con el método basado en SfM en la zona de Colinas Lojanas.

#### 4.2.6. Discusión de la zona de estudio de Colinas Lojanas

En este apartado, primero se presenta una discusión sobre la precisión e incertidumbre de los datos obtenidos; en segundo lugar, se discute sobre la caracterización de la zona y el movimiento de ladera a partir de las ortoimágenes, los modelos y sus derivados; y en tercer lugar, se resumen y comparan los resultados de las medidas de desplazamientos con vistas a conocer la evolución y cinemática del movimiento diferenciado

##### 4.2.6.1. Precisión de MDE y Ortofotos.

La precisión de los modelos y ortoimágenes se estableció a priori en el proceso de orientación fotogramétrica a partir de los errores en los puntos de control y chequeo. Así, los errores en la componente XY se hallan en un rango de 0.028-0.056 m para los primeros y entre 0.026-0.039 m para los segundos. Por su parte, los errores en la componente vertical están respectivamente en el rango de 0.040-0.103 m y de 0.039-0.061 m. Estos errores se encuentran como es lógico dentro de las incertidumbres establecidas para todas las zonas de trabajo, ya que se consideraron en su momento para

fijarlas: 0.10 m para la componente horizontal de las ortoimágenes y 0.15 m para la comparación entre puntos de dos ortoimágenes; e igualmente 0.10 m para los MDS y 0.15 m para los MdD.

Sin embargo, la extracción de los puntos significativos en las ortoimágenes y MDS entre cada dos vuelos consecutivos y el cálculo de los desplazamientos horizontales y verticales en la zona considerada estable permiten testear también esta precisión. Así, los desplazamientos horizontales tienen una media de 0.120-0.103 m y una desviación típica de 0.087-0.110 m, ambos por debajo de la incertidumbre horizontal a priori. Por su parte, los desplazamientos verticales presentan un valor medio entre -0.067 y 0,097 m y una desviación típica entre 0.240 y 0.212 m, estas últimas algo por encima de la incertidumbre vertical a priori. Sin embargo, si como ya se hiciera en la zona anterior las incertidumbres se elevarán hasta 0.20 m para la componente horizontal y 0.25 m para la vertical, los errores encontrados en esta zona estarían dentro del umbral.

#### **4.2.6.2. Caracterización del movimiento de ladera**

La caracterización general del movimiento de ladera y el área de inestabilidad general, sus elementos y otras inestabilidades presentes en la zona se realiza fundamentalmente a partir del análisis de la ortoimagen, el MDS, perfil y modelos derivados de la primera fecha considerada.

Así, tanto en la ortoimagen como en la representación pseudo 3D de la nube de puntos y el modelo de sombreado se observa una ladera con evidencias de inestabilidad como escalones y grietas, e incluso escarpes que cierran un área alargada en la misma dirección de inclinación de la ladera con la planta típica de un movimiento de tipo flujo. En su flanco derecho, hay un escarpe bien desarrollado, que probablemente sea heredado de una inestabilidad anterior, mientras que, por la coronación y el flanco derecho, así como



dentro del área inestable hay escarpes en general poco desarrollados. En el sector más bajo, sobre la carretera, se encuentra el área más deformada, con pequeños escarpes, escalones y grietas más abundantes formando un pie en desarrollo que invade parcialmente e incluso deforma la carretera. Según estos indicios, se puede decir que el área inestable corresponde a un movimiento de tipo flujo de tierras con grado de desarrollo incipiente. El terreno en el sector del movimiento está bastante desnudo, aunque arado, y la vegetación se restringe a los sectores laterales, sobre todo al oeste por donde discurre un arroyo. Ampliando la vista mediante las imágenes disponibles en GE, en la parte más alta de la ladera ya fuera de la zona de estudio, se observan evidencias de otros movimientos de tipo flujo más antiguos y áreas de reptación general.

La observación detallada del MDS y los modelos derivados, junto al análisis correspondiente, permite la caracterización general de la ladera ocupada en su mayor parte por el movimiento de tipo flujo incipiente, así como de sus elementos y los rasgos del relieve diferenciados. De esta manera, prescindiendo de las distorsiones que introducen árboles aislados en un terreno bastante desprovisto de vegetación en la parte central, se observa una ladera inclinada hacia el NNE, con la parte más elevada y más estable al norte y la más baja e inestable al sur.

La pendiente media es similar en casi toda la ladera incluyendo el cuerpo del movimiento principal, el área de inestabilidad circundante e incluso el área considerada estable, entre 7.6 y 11.8°. Por ello tampoco se observan diferencias en el valor R/A (0.10-0.30) ni en el sombreado, presentando valores relativamente altos de iluminación (entre 185 y 194). Todo este sector muestra una curvatura (TPI) prácticamente nula (desviación típica de 0.02) y una baja rugosidad (TRI) de 0.01 en todos los casos. Finalmente, el TWI aumenta en términos medios hacia la parte baja y central de la ladera, donde confluyen los flujos de escorrentía que, no obstante, se ven interrumpidos hacia el sector del pie, lo que ahora

se comentará; así, los valores del TWI son de 3.34 en el cuerpo principal y área de inestabilidad general, y de 3.01 en el área estable. No hay, por lo tanto, diferencias significativas en los factores analizados entre el cuerpo principal, el área de inestabilidad general y el área estable (Tabla 35), lo que informa de un movimiento de carácter incipiente en el que la masa completa no se ha movilizó de forma significativa en la primera fecha.

Toda la morfología más o menos uniforme, se ve interrumpida por la presencia de algunos escarpes tanto en el movimiento principal como en el área de inestabilidad general, y de una vaguada que discurre por el oeste de la zona. Los escarpes se observan en casi todos los modelos derivados, algunos de ellos de forma muy sutil como el escarpe trasero principal y otros más claramente como el lateral del flanco izquierdo. Este destaca de forma clara en el modelo de pendientes y en menor medida en el de rugosidad (TRI); así, el rango por área de estos elementos es de 0.44, 2.06, 2.14 y 4.00, muy reducido para el escarpe principal y significativamente más alto en los escarpes secundarios de dentro y fuera del cuerpo principal, y sobre todo en el escarpe lateral del flanco izquierdo. La propia pendiente es de  $11.61^\circ$  y  $13.79^\circ$  para el escarpe principal y los secundarios del cuerpo principal; y de  $18.18^\circ$  y  $20.30^\circ$  para el escarpe lateral y los situados fuera del cuerpo. Sin embargo, la rugosidad a resolución de 0.05 m varía sólo entre 0.03 en el escarpe principal y 0.05 en el lateral. La orientación es al N en el caso del escarpe principal y los secundarios del cuerpo, por lo que apenas destaca su sombreado (191-192) respecto al cuerpo; y hacia el NW en el caso de los escarpes del área de inestabilidad general y el lateral, lo que permiten su diferenciación, tanto en el modelo de orientación como sobre todo en el sombreado, proporcionando un mayor valor de iluminación (216-219) que las áreas de su entorno. Por su parte, el TPI no muestra resultados claros a la resolución de 0.05 m, aunque los valores son ligeramente más altos que en las otras áreas

(0.02 frente a 0.01); y tampoco en este caso a la resolución de 1 m, por lo que no se pueden extraer líneas de ruptura de la pendiente. Respecto al TWI, no se observan grandes contrastes de los escarpes con su entorno, aunque los valores son algo más reducidos en términos generales (2.67 en el escarpe lateral a 3.24, muy similar al entorno, en el principal). Por lo tanto, en los escarpes de esta zona de trabajo aparecen como factores diferenciadores solamente la pendiente, y el sombreado-orientación en algunos casos.

De forma muy interesante, hacia la parte baja de la zona se desarrolla un pie, con características diferenciales respecto al cuerpo principal. Además de ocupar una posición topográfica más baja, el pie presenta una pendiente y una rugosidad media más altas (14.21 y 0.03), incluso a la resolución de 0.05m, que el cuerpo. La orientación, es similar (N), aunque el sombreado es ligeramente más bajo (175), por la mayor pendiente. El TPI a la resolución de 0,05 m muestra valores muy próximos a 0 (desviación típica de 0.01), como en el cuerpo; pero a la resolución de 1 m permite extraer líneas bastante claras de ruptura de la pendiente que delimitan escarpes y escalones en su seno, así como la punta o terminación del pie sobre la carretera; en este caso, con una línea bastante continua. El TWI no muestra un aspecto de interés en la zona, y es que debido a la mayor irregularidad y la formación de grietas ya desde la parte baja del cuerpo, los flujos de escorrentía se interrumpen en este sector, por lo tanto, el TWI no alcanza un valor medio más alto que el propio cuerpo (3.27). En este caso los factores diferenciadores son la pendiente y el TPI y el TRI a resolución de 1 m.

En el seno del pie, debido a su actividad, comienzan a formarse algunos escarpes con pendiente diferencial respecto al resto del pie; así, el R/A es de 2.17, la pendiente de 24.51° y la rugosidad de 0.06. Además, la orientación y, por lo tanto, el sombreado es cambiante, y así hay escarpes que destacan más dentro del pie, a pesar de que los valores medios sean similares al resto del pie. El TPI a 1 m proporciona resultados muy evidentes

a la hora de extraer líneas de ruptura de pendiente, que son muy visibles como se ha comentado anteriormente. Finalmente, el TWI muestra valores algo más bajos (media 2.41) que el resto del pie. Así, los factores diferenciadores de los escarpes en el pie son la pendiente, TPI y TRI a resolución de 1 m, y en menor medida orientación, sombreado y TWI.

De forma anecdótica, los escarpes al otro lado de la carretera, también con evidencias de inestabilidad (caída de bloques y erosión), muestran valores diferenciales de la pendiente (media de 32.95°) y rugosidad (0.09); orientación (al SSW) y sombreado (129); y sobre todo el TPI a 1 m, que permite extraer de forma nítida las líneas de ruptura de pendiente superior e inferior que definen los taludes.

Los datos resumidos de los factores diferenciales se muestran en la Tabla 35

Tabla 35. Factores diferenciadores para la caracterización del movimiento de ladera de la zona de Colinas Lojanas.

<b>Elemento</b>	<b>R/A</b>	<b>Pendi.</b>	<b>Orient.</b>	<b>Somb.</b>	<b>TPI-DT</b>	<b>TRI</b>	<b>TWI</b>
<b>Movimiento principal</b>							
Escarpe principal	0.44	11.61	10.19	191	0.01	0.03	3.24
Escarpe lateral	4.00	18.18	314.92	216	0.02	0.04	2.67
Cuerpo	0.10	7.59	3.34	185	0.01	0.02	3.34
Escarpes secundarios	2.06	13.79	3.28	192	0.02	0.03	3.61
Pie	0.24	14.21	359.56	192	0.01	0.03	3.27
Escarpes en pie	2.17	24.51	24.23	175	0.02	0.06	2.49
<b>Área de inestabilidad general</b>							
Cuerpo amplio	0.20	10.46	335.42	194	0.01	0.03	3.34
Otros escarpes	2.14	20.30	315.59	219	0.02	0.05	2.93
<b>Otros elementos</b>							
Taludes carretera	1.35	32.95	212.06	129	0.04	0.09	1.65
<b>Área estable</b>							
Estable	0.36	11.72	333.28	189	0.01	0.03	3.01

Los perfiles corroboran la interpretación y el análisis realizado. Así, el perfil longitudinal general (A) permite apreciar la pendiente bastante tendida del área de inestabilidad general y movimiento principal, interrumpida por la presencia de escarpes incipientes (principal y secundarios); hasta llegar al sector del pie, con mayor pendiente y rugosidad, formando escalones y rellanos, y finalmente un talud que invade la carretera, lo que es más visible en el otro perfil longitudinal (B), más centrado en la parte baja más, más activa, del movimiento. Tanto en una parte como en otra no se observan sectores con pendientes fuertes ni contrapendientes.

En el perfil transversal de la parte del pie se observa su irregularidad en los dos tramos diferenciados. En el primero de ellos, en la parte oeste, se aprecia un fuerte escarpe lateral en el flanco derecho orientado hacia el E que resalta bastante en el modelo de sombreado y a continuación un sector deprimido, irregular con pequeñas cárcavas que pueden acumular agua de escorrentía. En el segundo, se aprecia una forma convexa correspondiente a la masa que se va descomponiendo con grietas, escalones y pequeños escarpes hacia la carretera y hacia el W; en este perfil no se aprecia el escarpe lateral del flanco izquierdo que se ha extinguido aquí. En el otro perfil transversal en el centro del movimiento principal, se observa una morfología más uniforme, lo que indica una mayor estabilidad; no obstante, el perfil es ligeramente convexo en el tramo central, aumentando la pendiente hacia el oeste por la presencia de la vaguada; hacia el este tiene un resalte importante, que corresponde al escarpe lateral.

#### **4.2.6.3. Cinemática y evolución del movimiento de ladera.**

En este apartado, en primer lugar, se analizará la coherencia entre los distintos métodos de medida de los desplazamientos, tanto automáticos como manuales y sobre el terreno. Una vez hecho esto, se examinarán las observaciones realizadas en los perfiles y los

modelos derivados en relación con los desplazamientos medidos. Finalmente se hará una reconstrucción de la evolución del movimiento.

Los MdD y las correspondientes proyecciones sobre el plano de las distancias entre las superficies 3D muestran una coincidencia bastante grande en la comparación visual en ambos periodos analizados. Así en el primero, se observan desplazamientos negativos (descensos) muy reducidos (-0.2 a -0.3 m) de la superficie en la zona del pie; en el resto del área inestable se observan incluso sutiles ascensos o más bien abombamientos de la superficie. Los mapas de diferencias entre ambos métodos (distancias 3D-MdD) muestran pocos cambios si se prescinde de los sectores con vegetación o construcciones, dado que la superficie tiene una pendiente muy baja. Tan solo se aprecian diferencias sutiles en el sector del pie con mayor pendiente, que son positivas en los sectores donde hay descenso de la superficie y negativas en los sectores donde hay ascenso como en la punta, como es lo esperable ya que la distancia 3D entre superficies suelen ser la mínima posible. Se observa más claramente en el mapa de diferencias absolutas que sólo se perciben en el pie y son negativas; en este mapa solo aparecen diferencias positivas en el caso de los sectores con vegetación por la irregularidad que introducen en las superficies.

En el segundo periodo, se aprecian claramente desplazamientos negativos tanto en los mapas de distancias 3D como en los MdD, de -0.5 m en el cuerpo y de -1 a 2 m en el pie, aunque parecen mayores en el MdD en valor absoluto. Así, los mapas de diferencias entre métodos muestran mayores cambios en general, más apreciables en el sector del pie y algunos escarpes de la parte más alta del movimiento, con mayor pendiente. Generalmente son positivas en relación con los sectores en descenso como en los escarpes, sobre todo en los del pie que son más acusados, y positivas en las zonas de ascenso como en la punta del pie. Las diferencias en valor absoluto muestran valores negativos en ambos casos (ascensos y descensos de la superficie), lo que es compatible

con el hecho de que la distancia en 3D es la mínima posible y su diferencia con el MdD aumenta a medida que lo hace la pendiente. Como antes, el mapa de diferencias entre superficies en valor absoluto solo presenta valores positivos en sectores muy irregulares por la presencia de vegetación arbórea o construcciones.

Por su parte, el mapa de desplazamientos horizontales obtenidos para el primer periodo con Cosi-Corr muestra desplazamientos del orden de a 0.3-0.5 m hacia el N en la parte inferior del cuerpo y en todo el pie, especialmente en la parte más al este. Hacia arriba de la ladera también se observa un sector en las inmediaciones del escarpe lateral y principal con la misma magnitud y dirección. A grandes rasgos, corresponden con los sectores de mayores valores de los MdD y los modelos de distancias 3D, siendo la magnitud y la dirección compatibles con los estimados en estos. Por su parte, los desplazamientos horizontales estimados con el método basado en SfM en el sector más bajo del cuerpo y el pie del movimiento, que son del orden de 0.3-0.4 m hacia el NNW, son prácticamente coincidentes con los estimados con el software Cosi-Corr y, por tanto, compatibles con las MdD y las distancias 3D. En el segundo periodo, los desplazamientos estimados con Cosi-Corr son menos coherentes que los del primer periodo, probablemente por la diferencia de radiometría de las imágenes de partida y por el crecimiento de vegetación herbácea en la tercera fecha que confieren a la imagen de un aspecto distinto a las otras dos. Aun así, en los sectores donde se ha podido estimar los desplazamientos, que es en la parte baja de cuerpo y el pie, los desplazamientos son de 2-2.5 m, nuevamente compatibles con los MdD y las distancias 3D, aunque estos sean inferiores en casi un orden de magnitud; como ya se ha apuntado, desplazamientos horizontales importantes en superficies de baja pendiente, se traducen muchas veces en distancias verticales y 3D mucho más bajas. En cuanto a los desplazamientos estimados con SfM, estos son

igualmente muy similares (2-3 m) a los obtenidos con Cosi-Corr y, por lo tanto, compatibles con los MdD.

Por lo que respecta a los desplazamientos medidos en puntos extraídos de los productos VANT, en primer lugar, se van a analizar los desplazamientos horizontales en relación con los observados en los puntos GNSS y los estimados con el análisis de correlación de imágenes; y en segundo lugar, se analizarán los desplazamientos verticales en relación con los observados en los GNSS y en los MdD.

En cuanto a los desplazamientos horizontales, en el primer periodo se aprecian ciertos desplazamientos en determinados sectores del cuerpo y del pie, con valores medios entre de 0.44 m en ambos casos. Así en la parte de la punta los desplazamientos son algo menores, de aproximadamente 0.4 m; en la parte media-alta del pie aumentan ligeramente hasta 0.5-0.7 m; en ambos casos son ligeramente superiores en la parte central que en los laterales; finalmente, en el cuerpo hay sectores en la parte este del movimiento donde se alcanzan desplazamientos de hasta 1-2 m, mientras el resto muestra desplazamientos mucho más reducidos. Todo ello coincide en buena medida con la monitorización realizada con GNSS aproximadamente en el mismo periodo de tiempo, que incluye un conjunto bastante denso de puntos en el sector del pie junto a unos cuantos puntos aislados en el cuerpo. Los puntos situados en el sector de la punta muestran desplazamientos inferiores a 0.053 m hacia el NE; son menores que los calculados en los puntos extraídos de las ortoimágenes, pero se ha de tener en cuenta que los puntos GNSS están justo en la punta, donde el movimiento prácticamente se detiene y lo que se observan son los empujes en la carretera. Los puntos situados en el pie presentan desplazamientos mayores en el centro y en la parte alta del mismo, entre 0.10 y 0.15 m y también al NE, aunque inferiores a los estimados a partir de las ortoimágenes. Finalmente, los puntos medidos en el cuerpo presentan desplazamientos generalmente inferiores a 0.06 m, aunque algunos



puntos aislados muestran desplazamientos horizontales de 0.15 m. En resumen, se aprecia una buena coincidencia entre ambos métodos de medida por sectores en términos relativos, pero los desplazamientos GNSS son inferiores a los estimados a partir de la extracción de puntos de los productos VANT.

La comparación con los desplazamientos horizontales estimados con métodos de correlación de imágenes, muestra una coincidencia en ambos periodos. Así, en el primero, los desplazamientos en torno a 0.4-0.7 m medidos en el pie y la parte baja del cuerpo a partir de las ortoimágenes coinciden bastante fielmente con los estimados con el software Cosi-Corr y el método basado en SfM. Por su parte, en el segundo periodo, los desplazamientos observados de 2-3 m en el pie, que es el área donde se registra la mayor deformación, así como en algunos sectores de la parte baja y este del cuerpo, igualmente coinciden con las estimaciones que muestran una cierta coherencia en Cosi-Corr; y, de la misma manera, con los vectores calculados mediante las técnicas basadas en SfM.

Por lo que respecta a los desplazamientos verticales, en el primer periodo se observan solamente descensos leves en algunos puntos del pie (-0.2-0.4 m), mientras que, en el resto de los puntos, sobre todo los situados en el cuerpo, se aprecian desplazamientos aún menores que en algunos casos son incluso de ascenso. En los Mdd se observan sectores del pie tanto con suaves descensos como ascensos, especialmente en la punta; mientras que en el cuerpo prácticamente no hay desplazamientos verticales. Las medidas con GNSS muestran pequeños ascensos en la punta del movimiento, inferiores a 0.10 m, que también se observan en algunos puntos extraídos de los productos VANT en este sector, así como en el Mdd. En el resto de los puntos GNSS del pie y la parte baja del cuerpo, se observan descensos de entre -0.05 y -0.18 m, del mismo orden que los observados en los puntos VANT y también en el Mdd. Ya en el cuerpo, los puntos GNSS muestran descensos muy reducidos de -0.05-0.10 m, como sucede en los puntos VANT y el Mdd

donde los desplazamientos (de descenso e incluso de ascenso) están prácticamente por debajo de la incertidumbre vertical, salvo en algunos casos aislados. En el segundo periodo, para el que no hay medidas GNSS, presenta ya mucho más claramente descensos en los puntos VANT en toda el área del cuerpo (-0.2-0.5 m) y sobre todo en el pie (-0.5-1 m), donde se alcanza la mayor deformación; en este caso, sí se observan ascensos leves pero significativos en la punta que invade la carretera (0.2-0.5 m). Todo ello es coincidente con el MdD y el mapa de distancias 3D, en los que se aprecian descensos en el cuerpo, a veces relacionados con los escarpes secundarios, y sobre todo en la parte alta y central del pie; mientras que en la punta se aprecian ascensos que alcanzan valores de hasta 2 m, sensiblemente superiores a los observados en los puntos. Esto se explica porque estos ascensos aparentes de la superficie son más debidos a los desplazamientos horizontales de la superficie, por lo que son compatibles con ascensos reales reducidos en los puntos, como en este caso, o incluso con descensos. En el resto de la ladera, los descensos suaves en los MdD y el mapa de distancias 3D coinciden con lo observado en los puntos.

En cuanto a los cambios observados en los modelos derivados en este caso en el primer periodo los cambios del MDS son tan limitados, si se exceptúan los sectores con arbolado y construcciones, que este análisis no proporciona resultados claros. Solamente en el detalle se aprecian algunos cambios muy sutiles en los escarpes y en su configuración, por el aumento de la pendiente o mayor oscuridad en el sombreado. Tampoco se observa de forma clara retracción de los escarpes ni avances en el pie, tanto en los modelos de pendientes, el TRI o incluso el TPI, en ninguna de las dos resoluciones; de hecho, la comparación de las líneas de ruptura extraídas del TPI a la resolución de 1 m no muestra desplazamientos claros, aunque sí una mejor definición en la segunda fecha. Además, los modelos de orientación y TWI no presentan cambios significativos. En la segunda fecha,

sin embargo, el examen de los cambios de los modelos derivados sí aportan información sobre el movimiento de ladera. La observación de la pendiente no permite observar retracción de escarpes, pero sí su intensificación en algunos casos y su desplazamiento ladera abajo en el sector del pie, junto con el desplazamiento claro de la punta que avanza sobre la carretera; lo mismo sucede con las franjas de orientaciones NNW y ENE, el propio sombreado o el TRI, sobre todo si se considera el de resolución 1 m. Los cambios son aún más observables en el TPI, especialmente en el de resolución 1 m; así las líneas de ruptura de la pendiente, tanto superiores en los escarpes, como inferiores en la punta, se desplazan claramente ladera abajo. En todos los casos, los desplazamientos observados en los modelos derivados en este segundo periodo son de aproximadamente 2 m, compatible con todas las estimaciones anteriores. El TWI permite observar cambios en la configuración de la red de drenaje, no así en los desplazamientos.

De todo lo dicho, junto con la información sinóptica que aportan los perfiles se puede resumir la evolución del movimiento de ladera de tipo flujo que se comenzó a desarrollar en la zona de Colinas Lojanas en los años de monitorización (2016-2018). Así, en el perfil longitudinal general (A) y el centrado en la parte baja (B), se observan cambios casi imperceptibles en el primer periodo, quizá un cierto abombamiento en la zona del cuerpo y el inicio de la deformación en el pie con un cierto avance sobre la carretera. Este, sin embargo, no supera 0.5 m en la componente horizontal (0.09 m/mes) en la dirección N, con descensos-ascensos casi imperceptibles en la vertical. En el segundo periodo, la evolución es más evidente con desplazamientos fundamentalmente horizontales en toda la ladera pero especialmente en el sector bajo del cuerpo y el pie donde llegan a ser de 2-3 m (0.13 m/mes); según esto aunque los desplazamientos son claramente mayores en este segundo periodo, la tasa es solo algo mayor, las dos en torno a 0.1 m/mes, dentro de los movimientos catalogados como muy lentos, aunque la velocidad puede ser mayor ya

que el movimiento puede haber tenido su actividad en episodios más cortos. En los perfiles transversales (C y D) no se observan prácticamente cambios; sin embargo, en el perfil D se aprecia la forma interesante que presenta el pie con una parte más deprimida al oeste y una más elevada y ligeramente convexa al este, típica de una masa de un flujo. Esta forma evoluciona de unas fechas a otras observándose el desarrollo de pequeños escarpes, escalones y grietas que descomponen la masa no solo en sentido norte sino también hacia el oeste. El TWI de las tres fechas, por lo tanto, la red hidrográfica se ve interrumpida en la transición del cuerpo con el pie, especialmente en la última fecha debido a la infiltración de las aguas superficiales a través de grietas, y a la propia desorganización de la red por la deformación en este sector.

Todo ello conduce a describir un flujo de tierras en estado incipiente que se comenzó a desarrollar en la zona de estudio, en la que la mayor deformación se produce en la parte más baja de ladera (pie) afectando a la carretera y las construcciones existentes en este sector, muchas de las cuales resultan arruinadas. En el resto de la ladera hay una cierta deformación, pero no ha llegado a formarse un escarpe neto, aunque en conjunto se ha delimitado un área más inestable, dentro de la inestabilidad general de casi toda la ladera. Los desplazamientos llegan a adquirir una magnitud métrica en el segundo periodo analizado, pero la velocidad es muy lenta más propia de un proceso de reptación o, como en este caso a la fase preparatoria de un flujo de tierras que se mantiene en un equilibrio metaestable; la observación de elementos como escarpes, escalones y grietas en la parte baja invita más a la segunda opción. Es posible que haya habido un periodo con deformación más intensa en el segundo periodo, aunque en ese caso se habría estabilizado y tampoco hay evidencias de esto, salvo la retirada de material del pie sobre la carretera. La acumulación y circulación de aguas en la parte baja de la ladera, en parte subterráneas, que son visibles en las imágenes incluida la última, lleva a pensar en que el área ha sido

inestable durante todo el periodo analizado. Todo ello unido a una litología donde alternan conglomerados con arcillas y arenas susceptibles a este tipo de movimientos cuando las condiciones ambientales lo determinan.

### 4.3. Zona de estudio El Plateado

#### 4.3.1. Ortoimágenes y zonificación del movimiento de ladera

Las ortoimágenes obtenidas en el área de estudio para los distintos vuelos se muestran en la Figura 81. Como en las zonas anteriores las ortoimágenes se han obtenido con una resolución de 0.05 m, asumiendo una incertidumbre horizontal de 0.10 m.

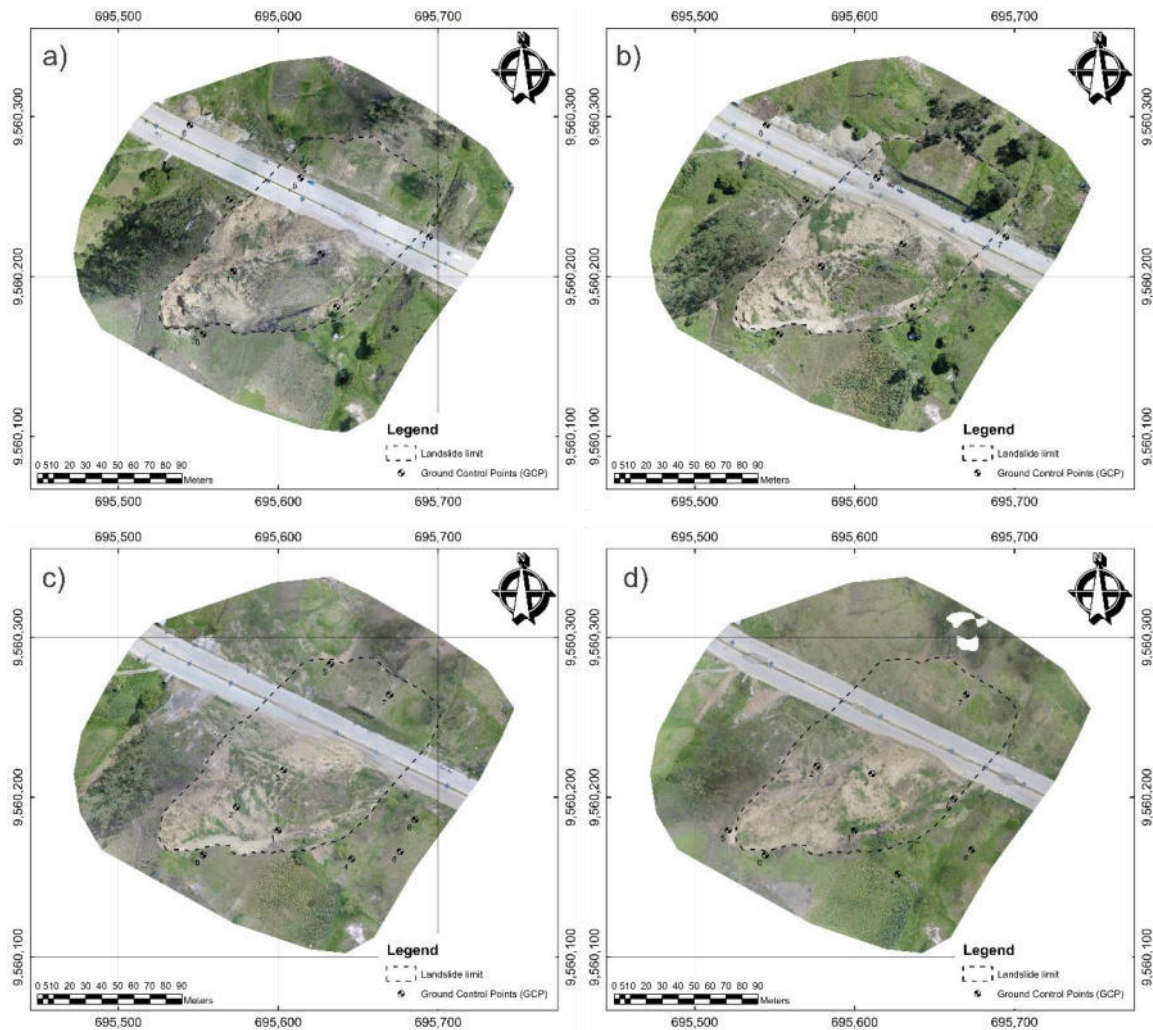


Figura 81. Ortoimágenes obtenidas de la zona de estudio a) 24 de enero de 2017, b) 9 de junio de 2017, c) 8 de junio de 2018 y d) 12 de marzo de 2020.

El análisis de las ortoimágenes, apoyado en los MDS, los MdD y los modelos derivados, permitió identificar el escarpe principal, la cabecera, y diversos escarpes secundarios y laterales, así como otros elementos. Entre estos destacan las grietas de tensión en la cabecera, el cuerpo y el pie del deslizamiento, tanto de disposición longitudinal como

transversal. El movimiento se clasifica como un flujo de tierras con un alto grado de desarrollo, que va evolucionando en las distintas fechas de análisis, hasta la última en la cual el movimiento es estabilizado y su morfología cambia sensiblemente.

A nivel de corona, la apertura inicial de grietas terminó en una falla de la zona de coronación, generando varios escarpes. La corona del escarpe principal mantiene una forma semicircular en los tres periodos de observación. El cuerpo de la ladera se identifica claramente, así como la zona de acumulación al pie de la ladera y el avance del material en uno de los carriles de la carretera, como se puede apreciar en las distintas ortoimágenes. El escarpe principal fue continuamente erosionado por la caída del material al cuerpo de la ladera; sin embargo, su retroceso no fue significativo.

Además del movimiento principal, se identificaron y delimitaron otras áreas de inestabilidad menores, en algunas de las cuales se pudieron diferenciar a su vez los escarpes, cabeceras, cuerpos y pies correspondientes. En conjunto, se diferenciaron los siguientes elementos en la zona del Plateado, que se presentan en la Figura 82:

#### Movimiento principal

1. Escarpe principal: Situado en la parte alta de la ladera, cierra el movimiento con una forma semicircular, es decir, bastante cerrada. Tiene una altura de unos 4 m y con una pendiente muy inclinada, subvertical en algunos sectores.
2. Cabecera: Localizada como su nombre indica bajo el escarpe principal, entre este y el cuerpo, presenta una pendiente casi horizontal o poco inclinada, no llega a producir una contrapendiente o evidencias de rotación.
3. Escarpes-flancos laterales: Son la continuación del escarpe principal hacia los flancos derecho e izquierdo que, por el importante desarrollo del movimiento y la pendiente general de la ladera, producen escarpes de unos pocos metros de

altura hasta extinguirse lateralmente hacia la parte baja del movimiento. No obstante, el flanco derecho tiene una longitud menor por la cinemática del movimiento y la morfología general de la ladera.

4. Escarpes secundarios: Son escarpes que se desarrollan entre la cabecera y el cuerpo, y ya dentro de este último sector hasta la parte más baja de la ladera.
5. Escarpes contrapendiente: Son escarpes secundarios formados en contra de la pendiente general del movimiento de ladera, en los que los bloques más avanzados están topográficamente más altos que los más traseros.
6. Cuerpo principal del movimiento, que al ser de tipo flujo y con una evolución avanzada, presenta una fuerte deformación con formación de abundantes escarpes secundarios, escalones y grietas.
7. Cuerpo secundario: Lóbulo lateral de dimensiones relativamente grandes en relación con el tamaño del cuerpo principal que se mueve en dirección a la carretera, en una dirección oblicua a la del cuerpo principal
8. Pie del movimiento que dado el avanzado grado de evolución, presenta un desarrollo importante, experimentando una gran deformación con formación de escalones y grietas tanto transversales como longitudinales, así como una disgregación de la masa y cuya punta invade parcialmente la carretera.

En cuanto a otros movimientos, se han identificado varios, uno de ellos de mayores dimensiones bajo la carretera, y otros menores relacionados con los barrancos que discurren en los sectores oeste y este de la zona. Dentro de ellos se diferencian los siguientes elementos:

9. Otros escarpes, que se distinguen en todos los movimientos.
10. Otras cabeceras, no se diferencian en los de tamaño más reducido.
11. Otros escarpes secundarios, no se diferencian en los de menor tamaño.



12. Otros cuerpos, que se diferencian en todos los movimientos.
13. Otros pies, no diferenciados en los movimientos menores.

Finalmente se ha diferenciado el área estable (14).

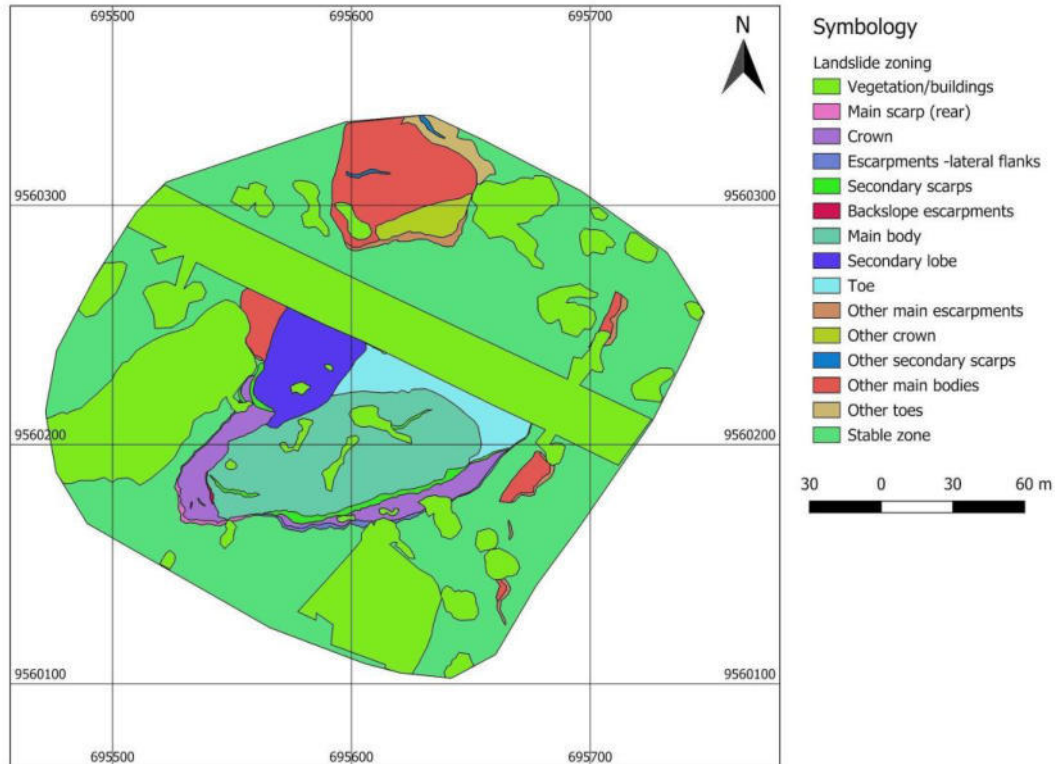


Figura 82. Zonación del movimiento de ladera donde se identifican las principales partes de la ladera obtenidas mediante fotointerpretación y digitalización de las partes.

### 4.3.2. Modelos digitales de superficies y su evolución

En este apartado se presentan los MDS de las cuatro fechas consideradas, junto a los modelos de diferencias y los desplazamientos en 3D entre cada dos fechas, así como los correspondientes perfiles topográficos.

#### 4.3.2.1. Modelos digitales de superficies y su evolución

Los MDE de la zona del Plateado, generados mediante el procesado fotogramétrico en las cuatro fechas de monitorización se presentan en la Figura 83. Como en los casos anteriores, la resolución de los modelos es de 0.10 m y su incertidumbre vertical de 0.10

m a priori. Los mapas de elevación se representan con una paleta gradual que pasa del verde en las partes más deprimidas al amarillo y marrón en las partes más elevadas.

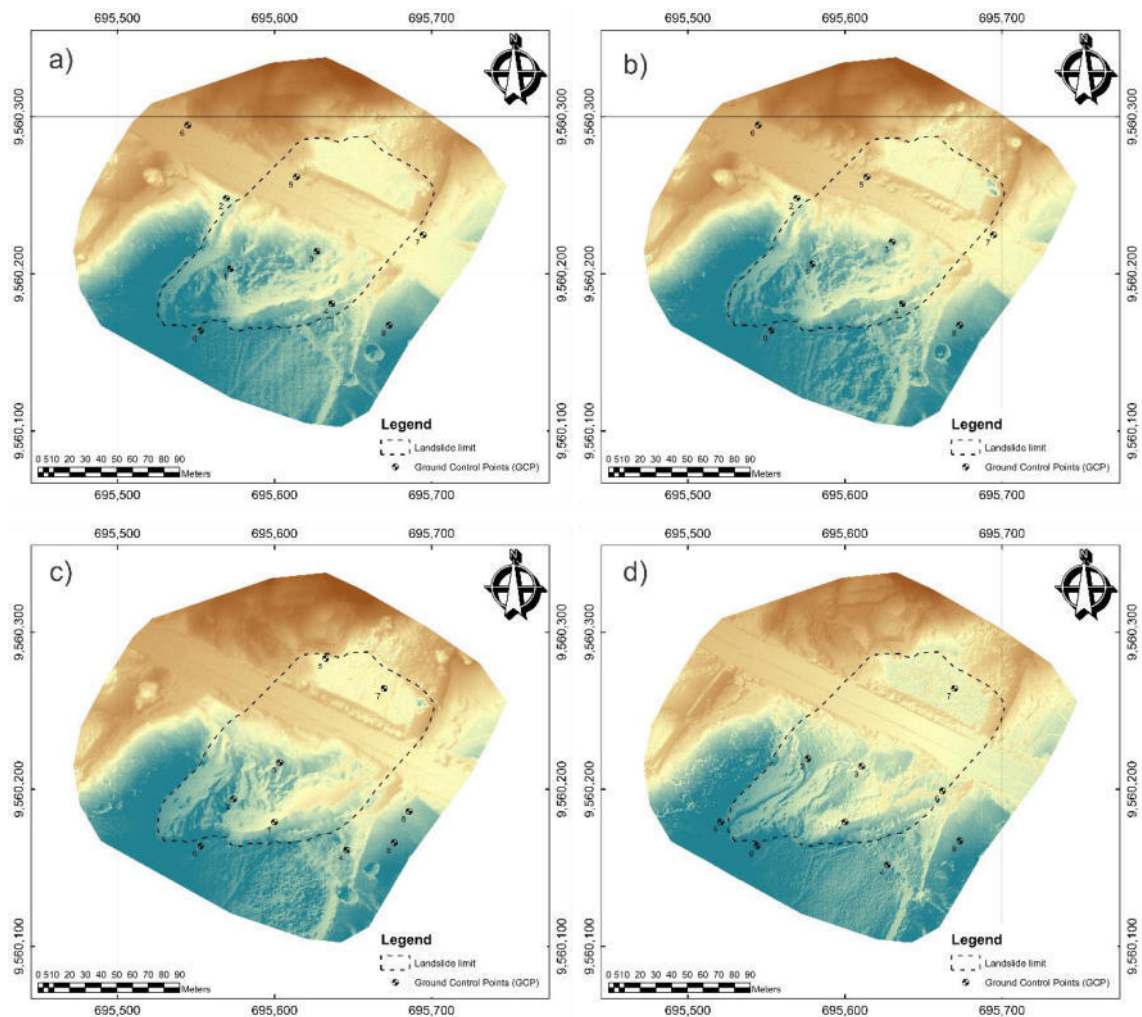


Figura 83. MDE obtenidos de la zona de estudio a) 24 de enero de 2017, b) 9 de junio de 2017, c) 8 de junio de 2018 y d) 12 de marzo de 2020.

El análisis del modelo se muestra en la Tabla 36 y la Figura 84. En ella, se observa que la elevación media de los escarpes de la inestabilidad principal, sobre todo la del escarpe principal (2211 m), está unos metros por encima de la cabecera (2200 m) y el cuerpo principal (2196 m); mientras que el pie aún más abajo topográficamente (2184 m). Los escarpes de las otras inestabilidades menores presentan una elevación media ligeramente superior a sus cuerpos. El parámetro más significativo de la dispersión de los valores de la elevación lo proporciona la razón entre el rango por unidad de área, que es superior en

los escarpes del movimiento, con valores en torno a 8 m para el escarpe principal y algo menos en los laterales, secundarios y contrapendientes (4-6 m), respecto al que se calcula para la cabecera (2,32), el cuerpo (0,69) y el pie (1,29). En las otras inestabilidades igualmente los escarpes presentan mayores valores medios (2,06), que las cabeceras (1,91), los cuerpos (0,69) y los pies (0,99). El área estable presenta claramente la menor relación (0,32).

Tabla 36. Análisis de las elevaciones por elementos del movimiento en la zona del Plateado.

<b>Elemento</b>	<b>Media</b>	<b>Moda</b>	<b>Min.</b>	<b>Max.</b>	<b>Rango</b>	<b>Des.T.</b>	<b>Ran/A</b>
<b>Movimiento principal</b>							
Escarpe principal	2211	2210	2209	2214	5	1,31	8,14
Cabecera	2200	2208	2185	2211	27	7,25	2,32
Escarpes laterales	2199	2196	2182	2210	28	7,29	4,20
Escarpes secundarios	2196	2197	2185	2212	27	6,05	8,72
Escarpes contrapend.	2208	2207	2206	2210	3	0,81	5,69
Cuerpo	2196	2195	2186	2212	27	5,78	0,69
Cuerpo secundario	2187	2194	2177	2198	21	5,16	1,61
Pie	2184	2185	2179	2192	13	2,41	1,29
<b>Otros movimientos</b>							
Escarpe principal	2182	2179	2173	2200	27	7,19	2,06
Cabecera	2176	2177	2171	2179	8	1,56	1,91
Escarpes secundarios	2167	2169	2162	2170	8	2,53	1,84
Cuerpos	2173	2169	2164	2198	34	6,49	0,67
Pies	2165	2166	2160	2160	12	2,22	0,99
<b>Área estable</b>							
Area estable	15,61	7,10	0,00	84,30	84,30	10,28	0,32

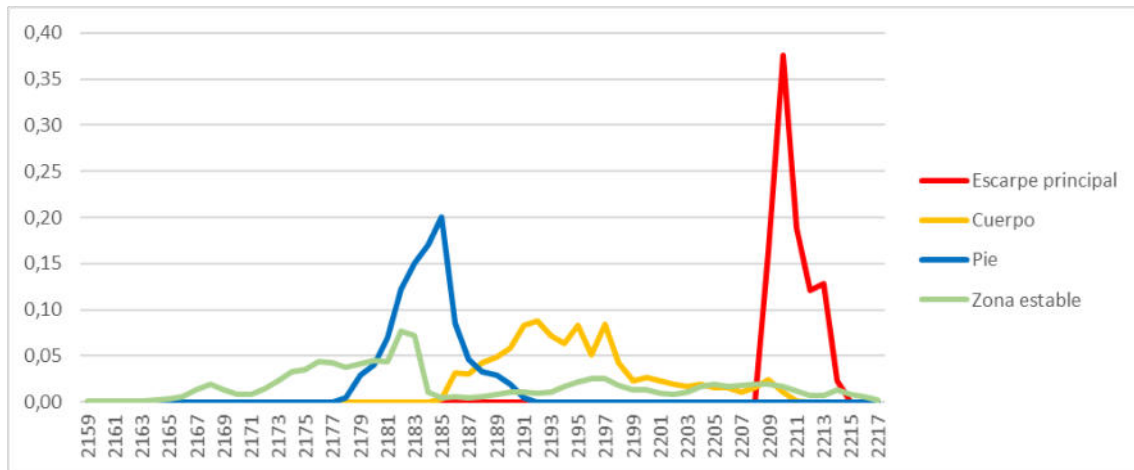


Figura 84. Distribución de la elevación en los elementos principales de la ladera.

#### 4.3.2.2. Modelos de diferencias

En la Figura 85 se presentan los MdD del sector El Plateado, obtenidos a partir de la sustracción de los MDS entre cada dos fechas consecutivas, estimándose la incertidumbre vertical en 0.15 m. La paleta de colores trimodal fue diseñada con el fin de diferenciar claramente los valores negativos correspondientes a descensos de la superficie, que se representan en rojo, de los valores positivos o ascensos de la superficie, que se representan en verde-azul.

En total se calcularon tres MdD: el primero corresponde al periodo entre enero 2017 y junio 2017; el segundo al periodo entre junio 2017 y junio 2018; y finalmente, el tercero al periodo entre junio 2018 y marzo de 2020. En el primero periodo (Figura 85 a) se pueden apreciar claramente descensos de la superficie en los sectores correspondientes a los escarpes, cabecera y parte alta del cuerpo de la ladera, llegando a superar los 5 m, como en el caso del escarpe principal, lo que indica un cierto retroceso del mismo. Además, en el cuerpo de la ladera se observan sectores de descenso relacionados con los escarpes secundarios, entre 2-3 m, pero también sectores donde asciende la superficie por acumulación del material proveniente del desprendimiento del escarpe principal y de los

secundarios; pero sobre todo son ascensos aparentes como consecuencia del avance horizontal de la masa. En el pie del movimiento sobre la carretera se produce un claro ascenso de hasta 4 m de la superficie del terreno, por la acumulación y sobre todo por el avance del material. El resto de la zona muestra cambios más relacionados con el crecimiento y decrecimiento de la vegetación, tanto árboles y arbustos como cultivos (maíz), que con cambios en el terreno. No se aprecian todavía cambios importantes en relación con las inestabilidades menores, ni siquiera la más importante que se produce bajo la carretera.

La Figura 85 b que corresponde al MdD del periodo junio 2017 a junio 2018 muestra igualmente sectores de descenso o de ascenso de la superficie, de hasta más de 5 m, tanto en la cabecera como en el cuerpo del deslizamiento, que aparecen algo desplazadas ladera abajo respecto a las anteriores; esto es indicativo del avance progresivo de la ladera hacia abajo principalmente en dirección noreste (NE). En el pie se observa en este caso descenso de la superficie probablemente relacionado con el comienzo de la retirada de material de la carretera, aunque también se aprecian ascensos en algunos sectores como en el del lóbulo secundario al oeste del movimiento principal. Resulta muy evidente la aparición de una inestabilidad bajo la carretera, con un descenso de material en unos 2 m, que indica la formación de un escarpe; así como una cierta actividad en las otras áreas de inestabilidad menores. En el resto de la ladera, en la parte considerada estable, los cambios están más relacionados con la vegetación de arbolado y los cultivos.

Finalmente, en la Figura 85 c, correspondiente al tercer periodo de análisis, se muestra un descenso generalizado en todo el cuerpo de la ladera, de hasta 7-8 m en algunos puntos, que se atribuye a la acción antrópica de retirada del material para la estabilización de la ladera efectuada a inicios del año 2020. Aunque también puede deberse a la cinemática del movimiento en la parte más alta, como en la cabecera y sobre todo en los escarpes

principal y en lateral derecho, donde se observa una cierta retracción del mismo. La inestabilidad observada bajo la carretera continúa su evolución con descensos en la zona de escarpe y cabecera, y suaves ascensos en la parte baja de cuerpo y el pie, que ya se distinguen bien en las últimas fechas.

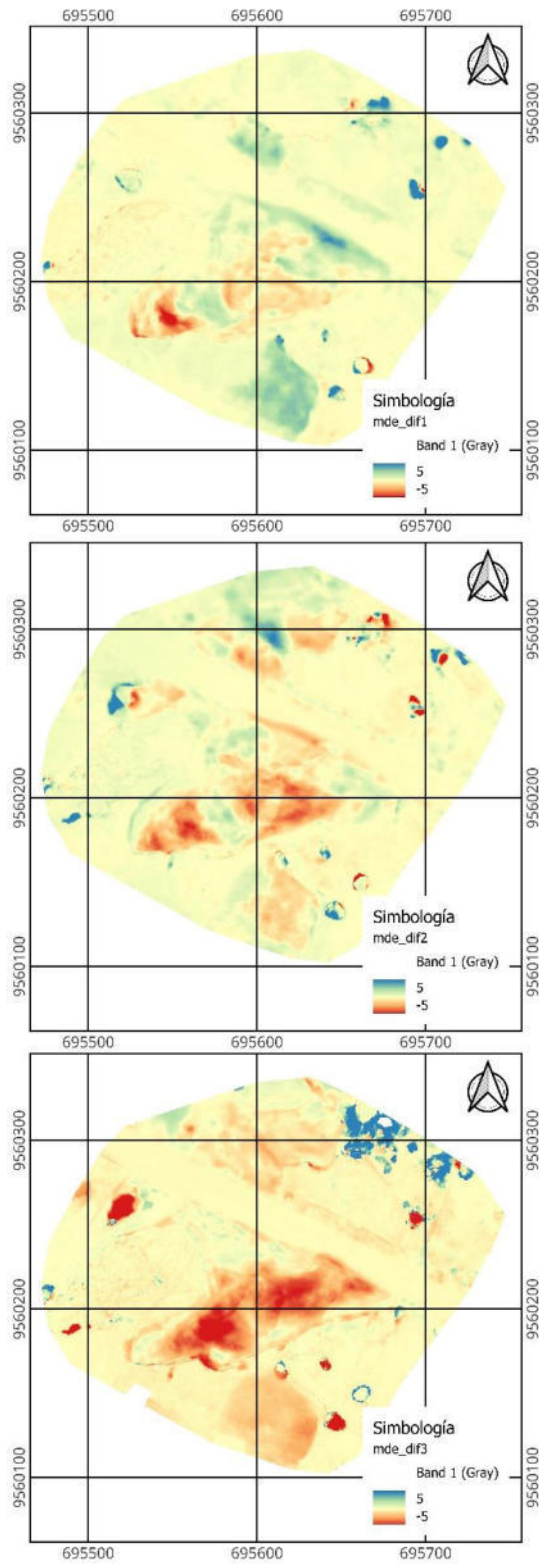


Figura 85. Mapas de diferencias de elevación (DoD) a) enero 2017 y junio 2017, b) junio 2017 a junio 2018 y c) junio 2018 a marzo de 2020.

El análisis de los MdD del primer periodo por elementos identificados en el movimiento principal y las inestabilidades menores se muestra en la Tabla 37. En esta se puede observar como el MdD muestra valores medios negativos en los escarpes, la cabecera y el cuerpo, mientras que en el cuerpo secundario y el pie muestra valores positivos. En valor absoluto, los descensos más acusados se producen en el escarpe principal (-1.68 m), mucho más que en los laterales, lo que indica una actividad de retracción en el primero y no tanto en los otros. También muestran descensos importantes los escarpes contrapendiente (-1.64 m) y en menor medida los secundarios y el cuerpo (0.46 y 0.27 m, respectivamente), como consecuencia del avance del movimiento ladera abajo; sin embargo, la cabecera muestra un menor descenso (-0.16 m) como consecuencia de la acumulación de material que cae de los escarpes compensando el descenso. Por su parte, el cuerpo secundario y sobre todo el pie (0.40 y 0.75 m) presentan ascensos más por el avance horizontal de la masa que por levantamiento del terreno.

En cuanto a los otros movimientos e inestabilidades menores, en este caso presentan solamente suaves ascensos (0.11-0.25 m), como consecuencia de su baja actividad en este primer periodo y el crecimiento de la vegetación que afecta a alguno de ellos, según se observó en la Figura 86 a. Igual sucede en el área estable, donde el crecimiento de algún cultivo de maíz hace que el valor medio sea ligeramente positivo (0.23 m).



Tabla 37. Análisis de las elevaciones por elementos del movimiento en la zona del Plateado.

<b>Elemento</b>	<b>Media</b>	<b>Moda</b>	<b>Min.</b>	<b>Max.</b>	<b>Rango</b>	<b>Des.T.</b>	<b>C.Var.</b>
<b>Movimiento principal</b>							
Escarpe principal	-1,68	-1,56	-4,56	0,63	5,19	0,88	-0,52
Cabecera	-0,16	0,08	-2,29	1,58	3,87	0,48	-3,03
Escarpes laterales	-0,08	0,11	-1,77	1,50	3,28	0,37	-4,62
Escarpes secundarios	-0,47	0,05	-7,69	2,20	9,89	1,13	-2,42
Escarpes contrapend.	-1,64	-0,70	-3,96	-0,09	3,86	0,81	-0,49
Cuerpo	-0,26	-0,84	-7,71	2,92	10,63	1,28	-4,85
Cuerpo secundario	0,40	0,13	-0,72	1,77	2,50	0,40	1,00
Pie	0,75	0,13	-1,42	4,93	6,35	1,16	1,56
<b>Otros movimientos</b>							
Escarpe principal	0,23	0,04	-1,49	2,23	3,71	0,58	2,46
Cabecera	0,11	0,06	-0,30	2,01	2,31	0,25	2,28
Escarpes secundarios	0,20	0,25	-0,31	1,01	1,32	0,21	1,06
Cuerpos	0,19	0,11	-0,67	2,45	3,12	0,24	1,24
Pies	0,25	0,23	-0,36	1,56	1,92	0,17	0,69
<b>Área estable</b>							
Area estable	0,23	0,10	-4,58	17,53	22,11	0,54	2,34

#### 4.3.2.3. Desplazamientos 3D

El modelo de desplazamientos 3D entre las nubes de puntos calculado con el software CloudCompare se muestra mediante una vista pseudo-3D en las Figura 86 y Figura 87; y el mapa correspondiente una vez proyectado en la Figura 88.

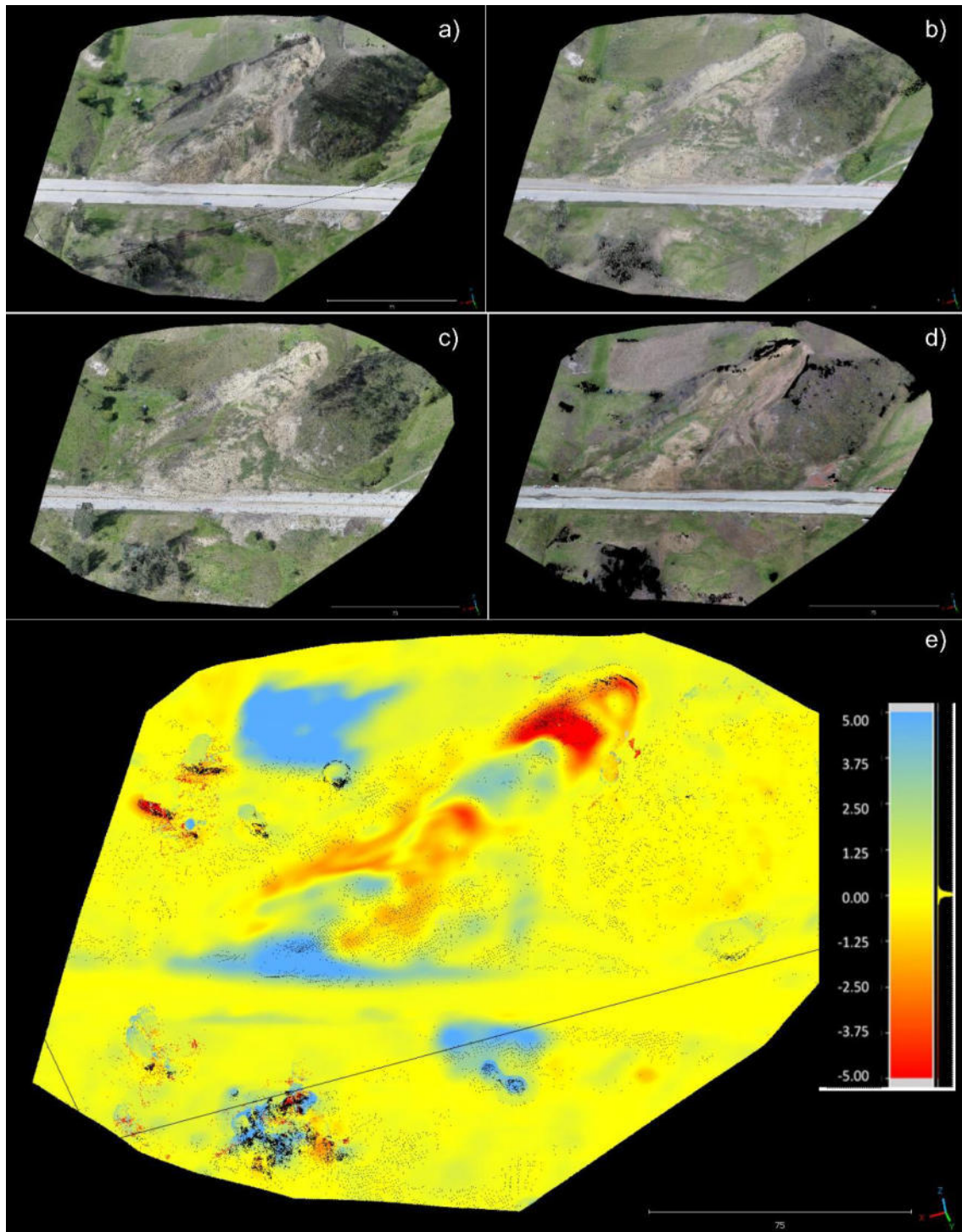


Figura 86. Modelo de desplazamientos entre nubes de puntos. a) 24 de enero de 2017, b) 9 de junio de 2017, c) 8 de junio de 2018 y d) 12 de marzo de 2020, e) Modelos de diferencia de nube de puntos entre 24 de enero de 2017 y 9 de junio de 2017.

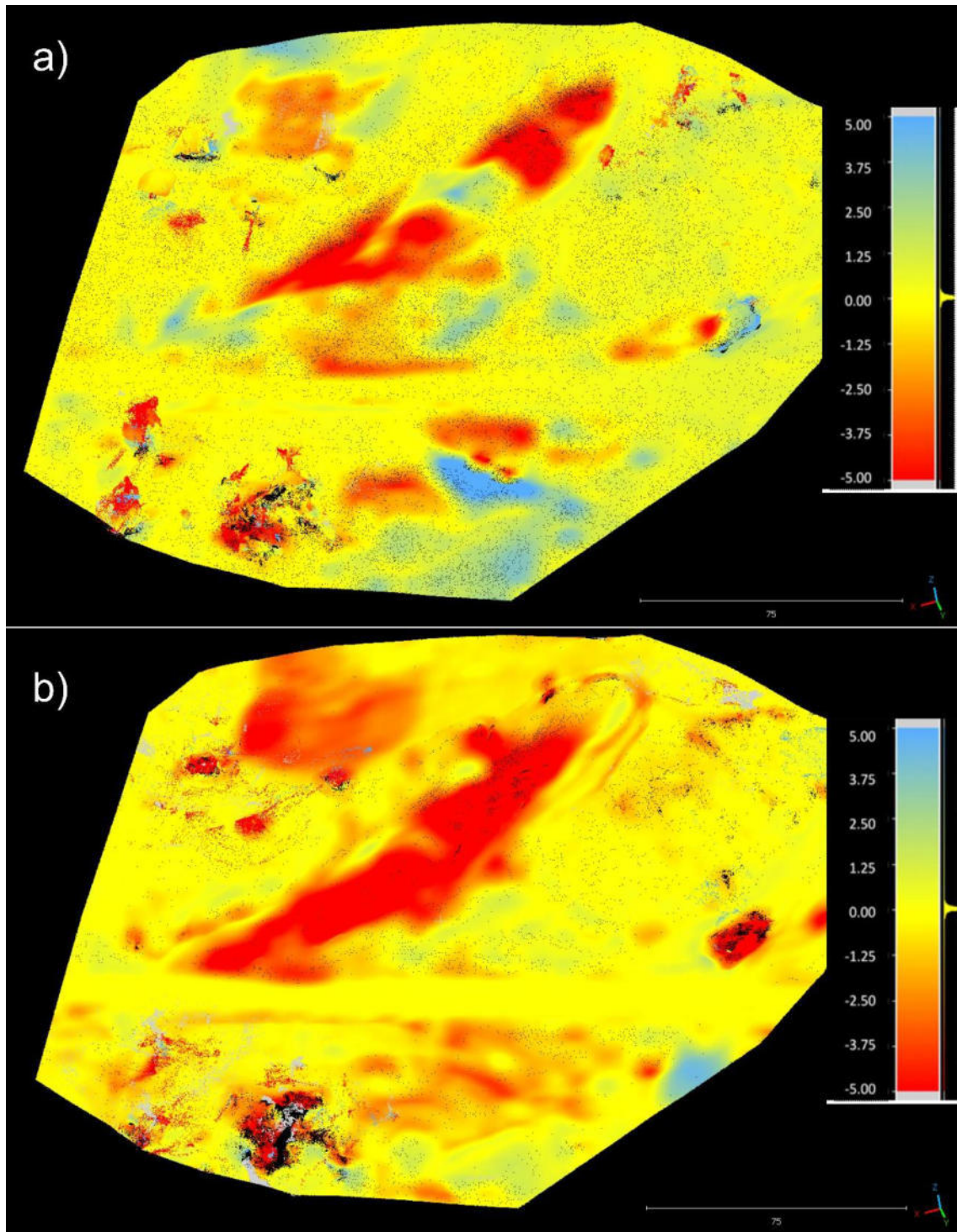


Figura 87. Modelos de diferencia de nube de puntos entre 9 de junio 2017 y 8 de junio 2018 a) y entre 8 de junio de 2018 y 12 de marzo de 2020 b).

La observación de ambos permite identificar cambios en la superficie muy similares a los de los modelos de diferencias en todos los periodos. Así, en el primer periodo se observan sectores desplazamiento positivos, donde la superficie de la segunda fecha está por debajo de la primera, de hasta más de 5 m en la parte de los escarpes y cabecera, pero también en torno a 2 m en sectores más abajo en el cuerpo, como consecuencia de la evolución del movimiento hacia adelante y hacia abajo. En el pie se observan desplazamientos positivos de 2-4 m, sobre todo en las proximidades de la carretera. En el resto de la zona, incluyendo el área estable y los movimientos menores, se aprecian solo desplazamientos positivos de pequeña magnitud relacionados con el crecimiento de vegetación y cultivos,

En el segundo periodo se vuelven a observar desplazamientos negativos en sectores de los escarpes, cabecera y el cuerpo de 2 a 5 m, alternando con franjas de suaves desplazamientos positivos como consecuencia del avance del movimiento; estas franjas parecen desplazarse en la dirección del movimiento. Mientras tanto, en el pie ahora hay desplazamientos negativos en el centro por la retirada de material que había invadido la carretera, pero también desplazamientos positivos como en el sector del cuerpo o lóbulo secundario. Además, se observan desplazamientos negativos en la parte alta del movimiento (escarpe y cabecera) que se forma bajo la carretera y positivos hacia las partes más bajas (pie). En el área estable hay sectores con cambios localizados debido a la vegetación y los cultivos.

En el tercer periodo se observa casi exclusivamente desplazamientos negativos bastante importantes en los escarpes y el cuerpo del movimiento y hasta en el pie principal, de más de 5 m, como consecuencia de la evolución postrera del mismo, pero sobre todo de la retirada de material para su estabilización y el acondicionamiento de la carretera. Por su parte, también se observan cambios negativos y positivos en el sector del movimiento menor bajo la carretera, muestra de su actividad. Finalmente, en este periodo se producen



destacados desplazamientos negativos por decrecimiento de la vegetación, sobre todo arbórea o arbustiva, en determinados sectores de la zona.

#### 4.3.2.4. Perfiles

En la Figura 88 se muestran la ubicación de los perfiles en la zona de estudio y su orientación geográfica. Hay un perfil longitudinal según la dirección principal del movimiento ENE y dos perfiles oblicuos al mismo (NNE), pero perpendiculares a la carretera en el sector central y este del movimiento.

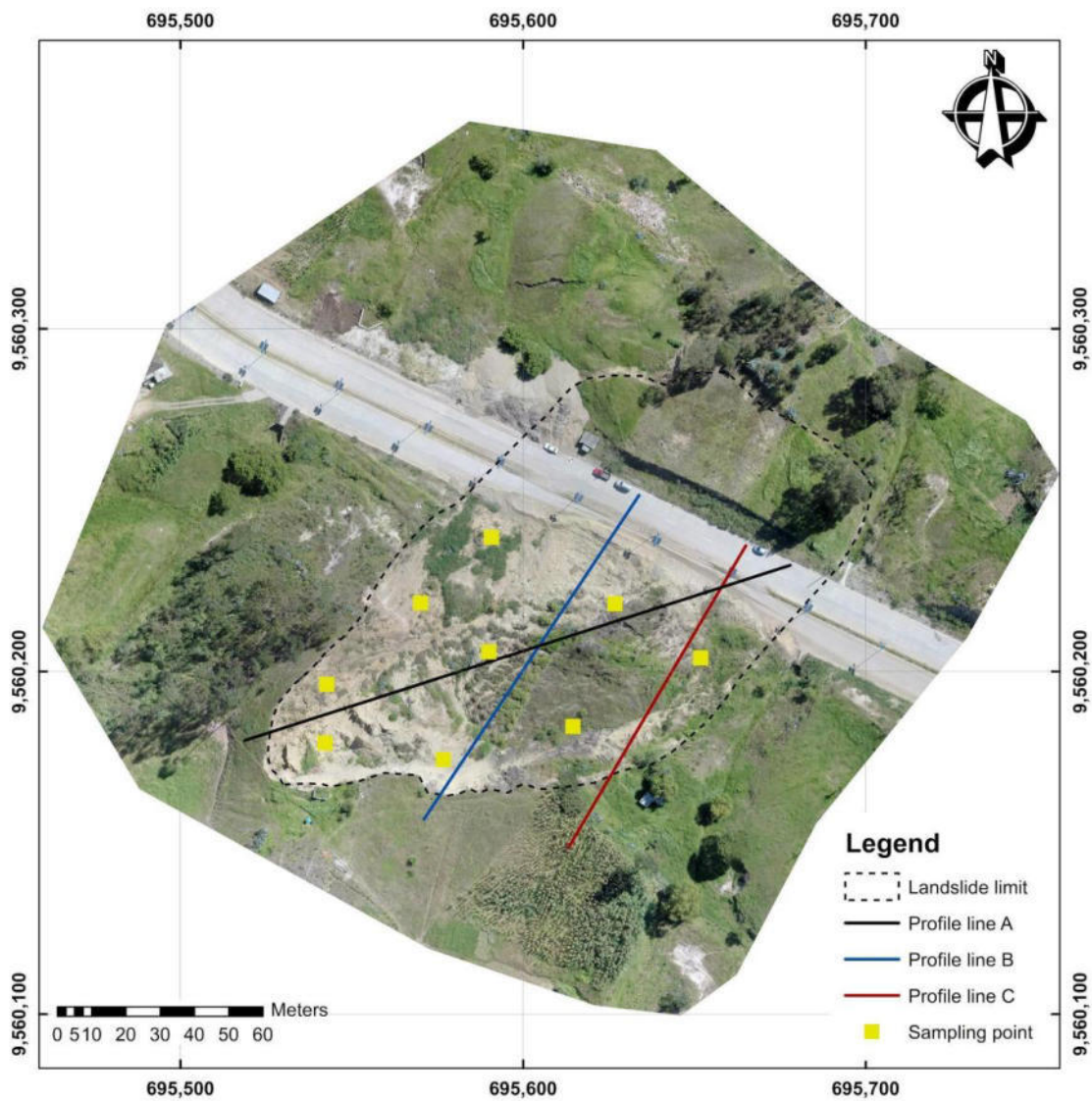


Figura 88. Emplazamiento de los perfiles en la zona de estudio para el análisis de factores topográficos.

Los resultados de los perfiles (Figura 89) obtenidos a partir de los MDE de las sucesivas fechas permitieron el reconocimiento de cambios a nivel de escarpes, cuerpo y pie de la ladera, correspondientes tanto a cambios de elevación y como a desplazamientos horizontales, tomando como referencia inicial los perfiles correspondientes al primer MDE (24 enero 2017). La línea de perfil A, que corresponde a un perfil longitudinal en la dirección principal de avance del deslizamiento desde la corona al pie, permite observar bastante claramente las partes del deslizamiento con el escarpe trasero principal y la cabecera: a continuación, el cuerpo, con un escarpe contrapendiente en la parte alta y escarpes secundarios hacia la parte más baja; y finalmente el pie que acaba en la carretera. Este mismo perfil se observa en las dos siguientes fechas (09-junio-2017 y 08-junio-2018), aunque desplazado ladera abajo y con los escarpes más atenuados, por la propia evolución del deslizamiento. Sin embargo, el perfil de la última fecha (12-marzo-2020) es diferente con una pendiente mucho más uniforme desde la zona de coronación hasta el pie. Estos rasgos permiten estimar descensos y avances de la masa que son mayores en el escarpe principal, la cabecera y parte alta del cuerpo (descenso total de unos 6-8 m y avances en torno a 20-25 m; aproximadamente 3-4 m y 10-12 m, en cada uno de los dos periodos). Por su parte, en el pie, el avance de la masa es de unos 5-6 m que, sin embargo, puede haberse visto reducido por la retirada de material del talud de la carretera. Sin embargo, en el tercer periodo, lo que se observa es un aplanamiento de la ladera, con eliminación de material y desaparición de la morfología típica, tanto en el escarpe, como sobre todo en el cuerpo e incluso el pie, donde ahora se presenta una fuerte pendiente en el talud de la carretera.

En el caso de la línea de perfil B, que se trata de un perfil oblicuo desde el escarpe trasero-flanco derecho hasta la carretera, lo que se observa en la primera fecha es el escarpe en la parte superior y a continuación la cabecera con una cierta contrapendiente hacia el

escarpe; más abajo aparece el cuerpo con una forma convexa, que termina adquiriendo una mayor pendiente hacia la parte baja del cuerpo y el pie en la carretera. Esta forma se mantiene, aunque la superficie va descendiendo progresivamente en la segunda y tercera fecha. Mientras que en la última, lo que se produce es una suavización de la forma de ladera desde el escarpe hasta la carretera, aunque aquí todavía se aprecia una cierta pendiente. En este perfil prácticamente no se observa ningún avance de la masa por la dirección casi transversal del mismo respecto a la dirección principal del movimiento.

La línea de perfil C, paralelo al anterior pero desplazado hacia la zona del pie al E, muestra en la primera fecha el flanco derecho con una pendiente mucho más tendida, prácticamente sin escarpe; algo más abajo se encuentra el cuerpo, donde se forma un escarpe secundario y finalmente la pendiente algo más elevada en la zona del pie y la carretera. En las dos fechas siguientes se produce un descenso de unos 3-5 m y un avance horizontal de unos 6-8 m, como corresponde a la zona del pie, aunque este puede ser incluso mayor y haberse visto atenuado por la retirada de material de la carretera. En la última fecha el cambio es menor y responde sobre todo a un descenso de la superficie por las obras de reparación de la ladera.

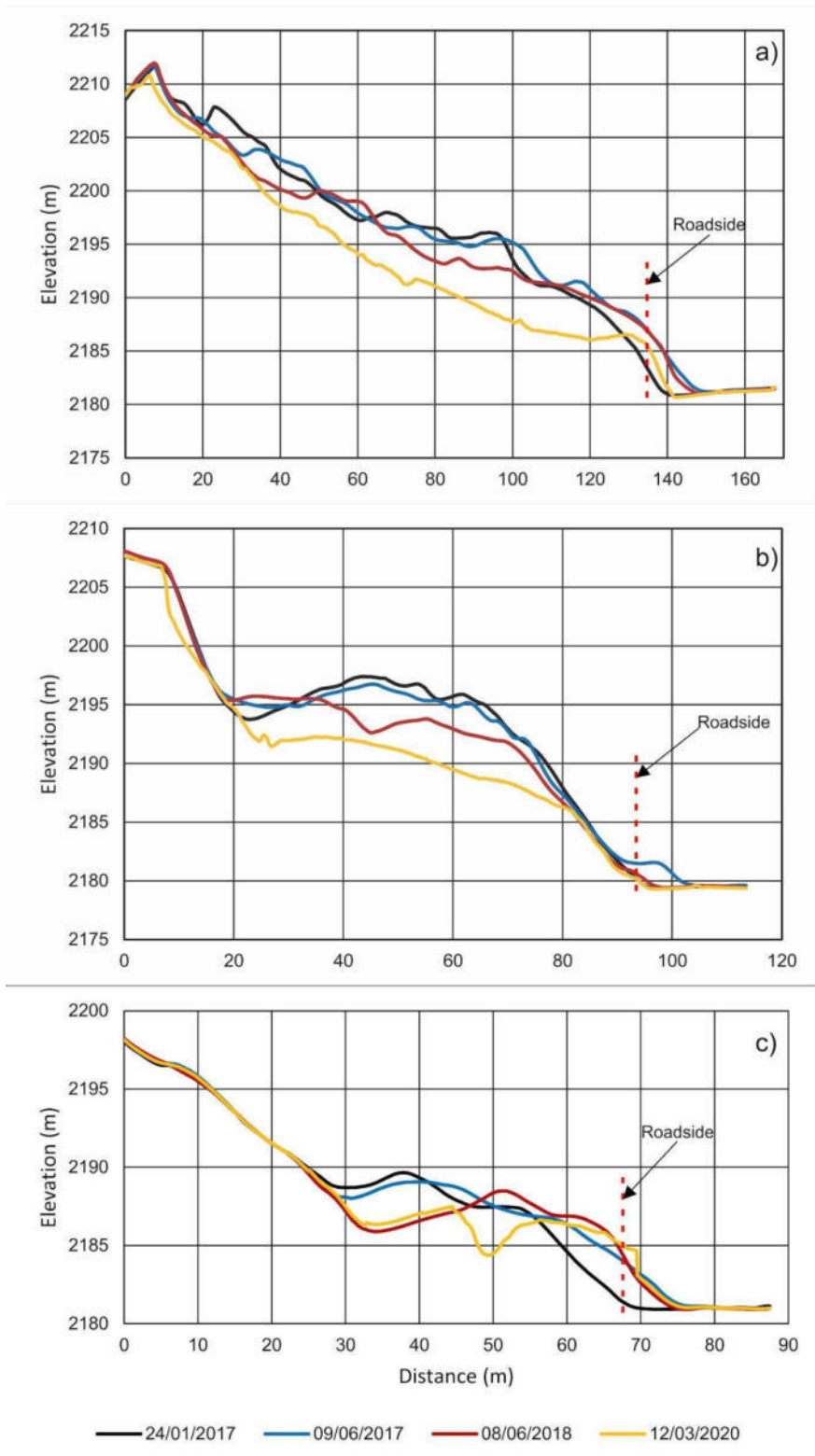


Figura 89. Detalle de los perfiles obtenidos de los MDS. La línea discontinua representa el borde lateral (road side) de la carretera como punto de referencia para los análisis correspondientes: a) perfil A; b) perfil B y c) perfil C.



### **4.3.3. Modelos derivados, análisis morfométrico y evolución de la morfología**

En este apartado se presentarán los modelos derivados del MDS de pendiente, orientación, sombreado, TPI, TRI y TWI, así como su análisis zonal en los distintos elementos de la zona inestable y su evolución en las cuatro fechas consideradas.

#### **4.3.3.1. Distribución y evolución de la pendiente**

La pendiente constituye el parámetro topográfico más importante que permite describir el comportamiento del terreno en el tiempo debido a los cambios superficiales provocados por la actividad inherente a la cinemática de la ladera. Para analizar los cambios temporales de la pendiente se comparó visualmente la distribución de la pendiente basados en los cuatro MDE (Figura 90), se analizó zonalmente el primero de ellos en relación con los elementos del movimiento principal el resto de áreas diferenciadas en la zonificación realizada (Tabla 38) y se compararon cuantitativamente las pendientes en los tres perfiles indicados en la Figura 91).

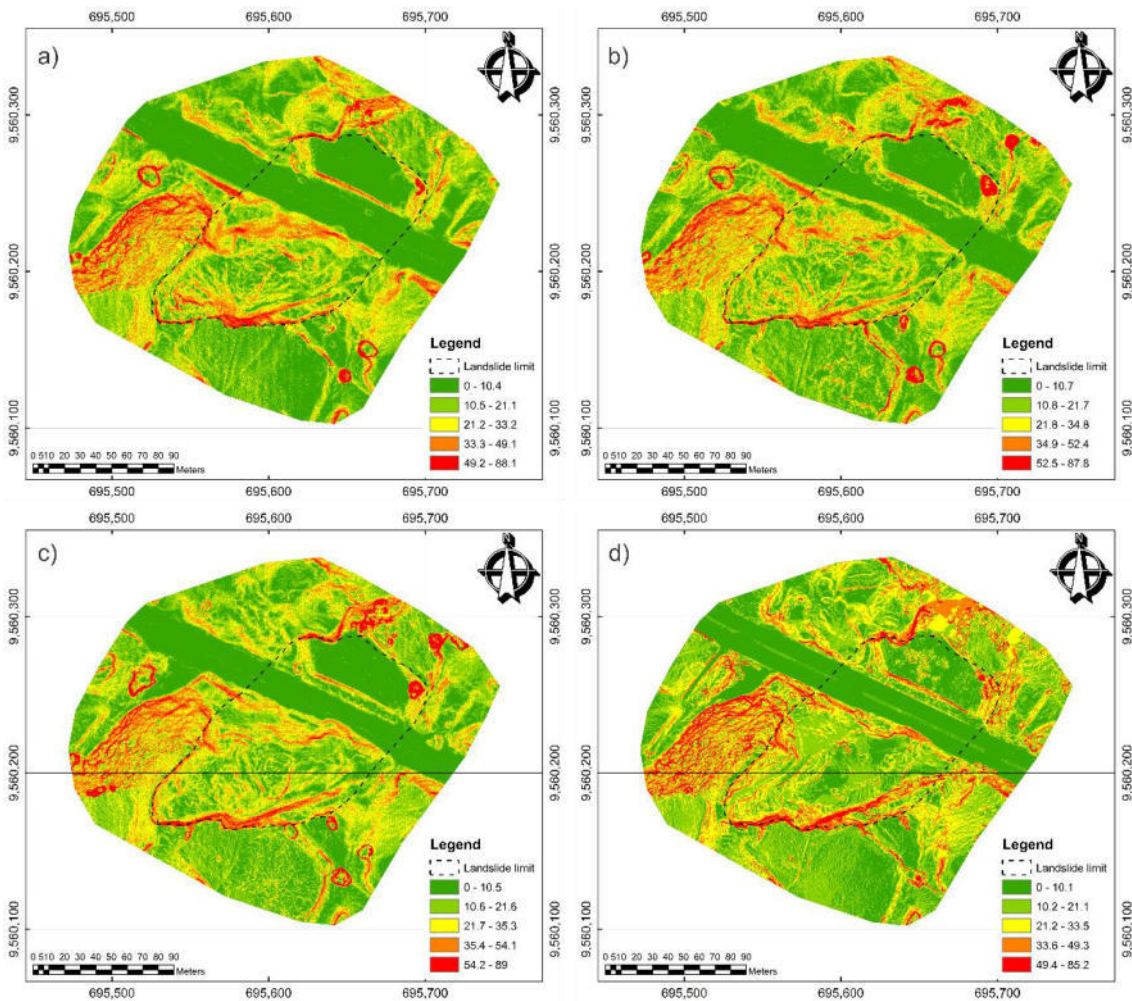


Figura 90. Mapas de pendientes de la zona de estudio para los cuatro controles. a) 24/01/2017, b) 09/06/2017, c) 08/06/2018 y d) 12/03/2020.

En los mapas de la Figura 90, en especial en el del primer periodo (Figura 90 a), que se toma como referencia para la descripción del movimiento, se aprecian sectores con pendientes bajas ( $<10^\circ$ ) en la carretera y la explanada por debajo de ella, así como en el sector más elevado de la zona por encima de la corona del deslizamiento, considerado como; también se observan sectores con pendientes fuertes (por encima de  $30^\circ$ ) en zonas con vegetación, especialmente árboles y arbustos, que se han de descartar. Focalizando en el movimiento principal, se observan claramente las pendientes elevadas en los distintos escarpes, principal, laterales y secundarios, mientras que en el cuerpo las pendientes son menores, alternando rellanos con sectores de mayor pendiente y escarpes. Finalmente, en el pie se observan de nuevo pendientes algo más elevadas. En los otros

movimientos identificados, especialmente en el de mayor tamaño localizado en la parte más baja de la zona, se aprecian también sectores con mayor pendiente que marcan los escarpes principal y secundarios de estos movimientos.

El análisis de las pendientes por elementos del movimiento y otros rasgos presentes en la zona se muestran en la Tabla 38 y la Figura 91. En ella se puede observar que las zonas de escarpe presentan pendientes medias superiores a  $40^\circ$ , siendo la del escarpe principal de casi  $54^\circ$ . Por su parte, la cabecera alcanza  $23.2^\circ$ , el cuerpo principal de  $19.9^\circ$  y el pie de  $27.8^\circ$ , siendo la pendiente general del deslizamiento de  $24.15^\circ$ , frente a la zona estable que es de  $15.6^\circ$ . Otras zonas inestables presentan pendientes medias de  $22.9^\circ$ , siendo las pendientes de los escarpes algo inferiores a la de los escarpes del deslizamiento principal.

Tabla 38. Detalle del valor de la pendiente por elementos en la zona del Plateado.

Elemento	Media	Moda	Min.	Max.	Rango	Std-D.	C.Var.
<b>Movimiento principal</b>							
Escarpe principal	53,53	20,61	0,15	85,63	85,48	16,14	0,30
Cabecera	23,25	20,48	0,00	75,60	75,60	12,39	0,53
Escarpes laterales	40,97	19,12	0,56	83,23	82,67	16,08	0,39
Escarpes secundarios	43,65	25,46	0,30	82,28	81,98	13,67	0,31
Escarpes contrapend.	48,02	12,93	2,80	74,53	71,73	15,09	0,31
Cuerpo	19,84	7,10	0,00	77,69	77,69	10,60	0,53
Cuerpo secundario	26,75	25,46	0,07	81,11	81,04	12,49	0,47
Pie	27,76	25,46	0,07	70,36	70,29	12,50	0,45
<b>Otros movimientos</b>							
Escarpe principal	40,95	32,01	0,00	83,05	83,05	13,60	0,33
Cabecera	18,83	12,93	0,00	74,74	74,74	10,41	0,55
Escarpes secundarios	35,99	14,64	1,05	65,63	64,59	13,54	0,38
Cuerpos	20,21	12,93	0,00	75,27	75,27	11,97	0,59
Pies	29,98	30,99	0,25	63,58	63,33	9,34	0,31
<b>Área estable</b>							
Área estable	15,61	7,10	0,00	84,30	84,30	10,28	0,66

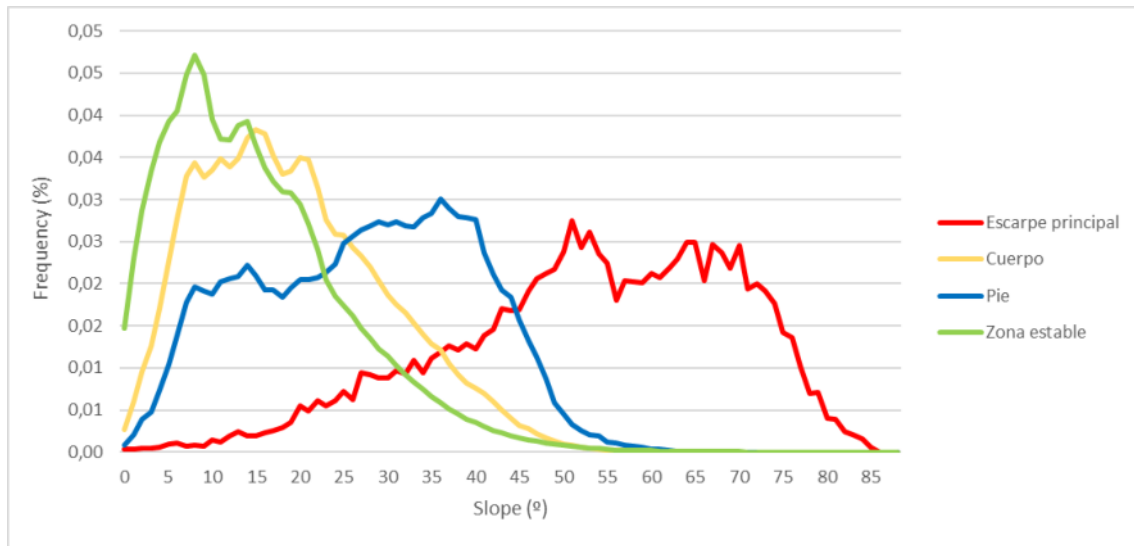


Figura 91. Mapas de pendientes de la zona de estudio para los cuatro controles. a) 24/01/2017, b) 09/06/2017, c) 08/06/2018 y c) 12/03/2020.

La evolución de las pendientes se puede observar tanto en el terreno como en los objetos que hay sobre él, que en esta zona se restringen casi exclusivamente a la vegetación. Descartando estos últimos cambios, que son lógicamente muy notorios en el arbolado, pero también en los cultivos al introducir una mayor irregularidad en sectores más o menos llanos, se aprecian algunos cambios interesantes en la distribución de la pendiente del terreno. Así, en los dos primeros periodos analizados y en el área ocupada por el movimiento principal, las bandas de sectores con mayor pendiente (correspondientes a los escarpes secundarios y contrapendiente) y menor pendiente (los rellanos que hay en el cuerpo) van cambiando de posición y desplazándose varios metros hacia abajo en la ladera; por su parte, los escarpes principal y lateral se retraen ligeramente hacia arriba. En el pie también se observan algunos cambios en las pendientes por sectores, como consecuencia de la evolución del flujo y de la retirada de material en las proximidades de la carretera. Por su parte, en el tercer periodo analizado, la pendiente disminuye en todo el cuerpo debido sobre todo al aplanamiento que sufre la ladera como consecuencia de las obras de reparación del movimiento. Finalmente, en el sector de la inestabilidad activa

bajo la carretera, se observan cambios consistentes en un aumento de la pendiente en los escarpes como consecuencia del desarrollo del movimiento.

De forma más detallada y cuantitativa, la evolución de las pendientes se puede seguir a partir del análisis de la distribución de su frecuencia en cada uno de los perfiles, que se muestra en la Figura 92. Así, en el perfil longitudinal A, tomando como referencia en la primera fecha (24/01/2017) cuya pendiente media es de  $18,1^\circ$ , se observa un descenso paulatino de la pendiente medida que pasa a ser de  $17,8^\circ$  en la segunda,  $16,7^\circ$  en la tercera y, de forma más pronunciada en la cuarta, hasta  $13,3^\circ$ . La frecuencia de las pendientes inferiores a  $20^\circ$  comienza en un 60%, desciende ligeramente en la segunda fecha hasta al 58%, para aumentar claramente en el tercero (65%) y sobre todo en el cuarto (76%).

En el perfil B, oblicuo a la dirección del deslizamiento y cuya pendiente media inicial es de  $21,8^\circ$ , la tendencia es a disminuir progresivamente, hasta  $21,4^\circ$  en la segunda fecha,  $20,4^\circ$  en la tercera y  $18,1^\circ$  en la cuarta. En este perfil, el porcentaje de pendientes inferior a  $20^\circ$  parte del 46%, aumenta levemente en la segunda fecha, y más aún en la tercera (52%) y la cuarta (64%). Por su parte, el perfil C, con una disposición más marginal que los anteriores, comienza con una pendiente media inicial de  $17,4^\circ$ , pero luego presenta un comportamiento diferente a los anteriores y mucho más irregular; así, en la segunda fecha aumenta hasta  $20,2^\circ$ , en la tercera disminuye hasta  $18,7^\circ$  y la cuarta vuelve a aumentar hasta  $21,4^\circ$ . En cuanto al porcentaje de pendientes inferior a  $20^\circ$ , éste comienza en el 66%, desciende en la segunda fecha hasta el 56%, aumenta en la tercera hasta el 68% y vuelve a descender en la cuarta hasta el 60%.

En resumen, en los perfiles A y B, más representativos del flujo de tierras en su conjunto y de todos sus elementos, el desarrollo del movimiento y su avance ladera abajo se traduce en una disminución general de la pendiente, sobre todo en el último periodo, cuando

además entran en juego otros procesos como las actuaciones realizadas para la estabilización del movimiento. El perfil C que ocupa una posición más marginal presenta una evolución mucho más irregular como consecuencia del desarrollo del movimiento y las obras de estabilización.

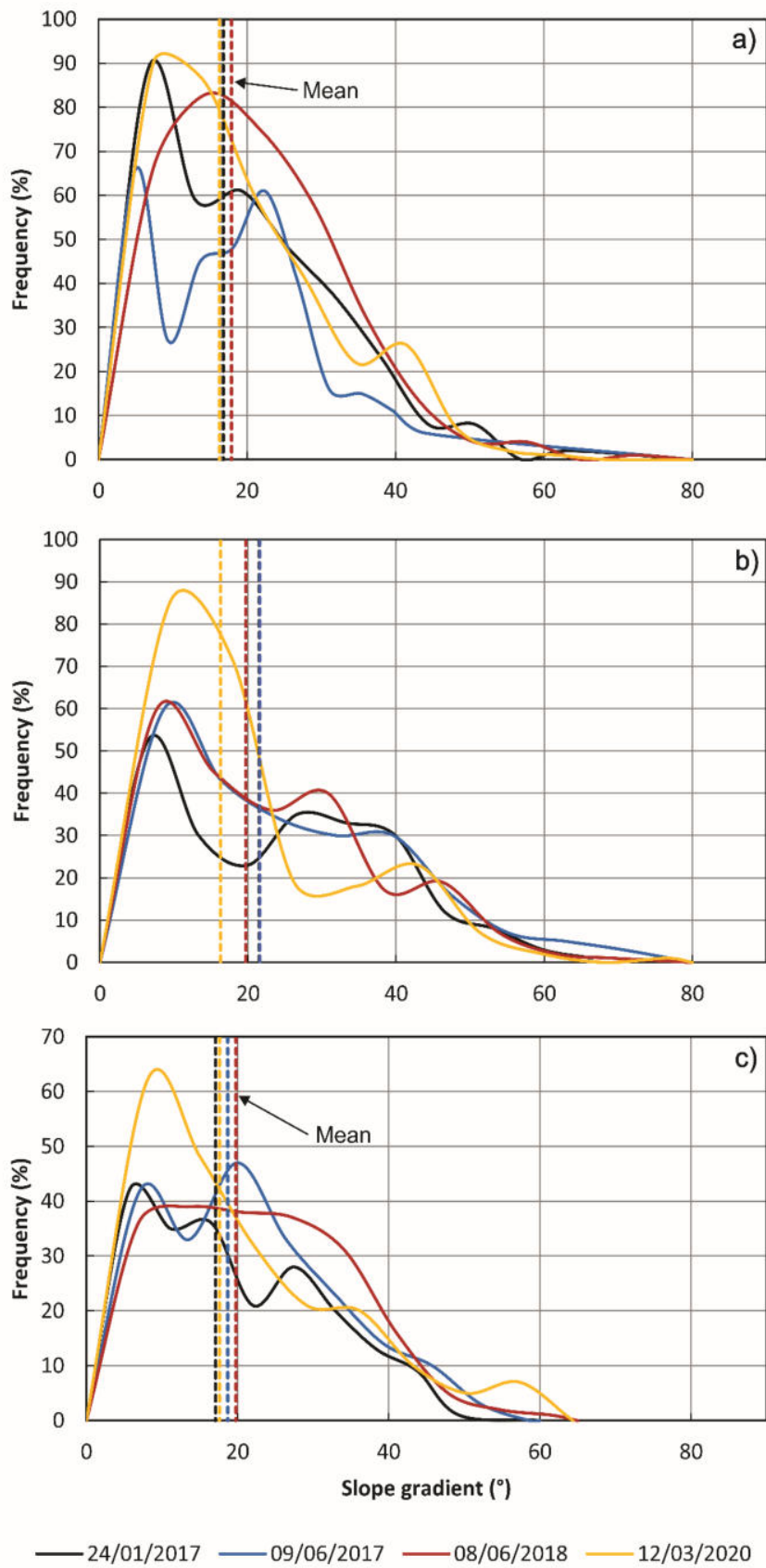


Figura 92. Cambios temporales en la pendiente de la ladera en la zona de estudio. a) Perfil A; b) perfil B y c) perfil C.



### 4.3.3.2. Distribución y evolución de la orientación

En la Figura 93 se muestran los mapas de orientación de la pendiente de la zona de estudio del Plateado, correspondiente a los cuatro periodos de control.

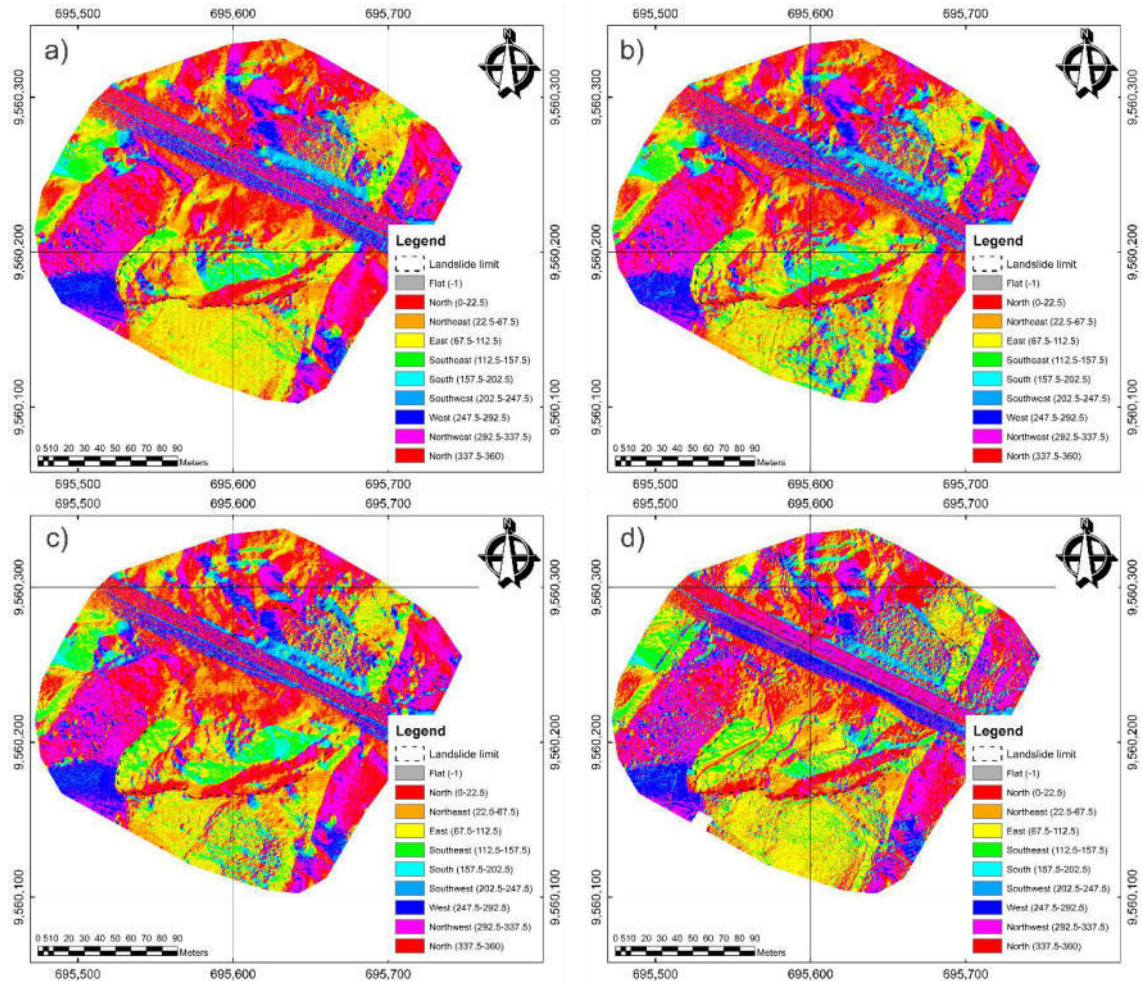


Figura 93. Mapas de la orientación de la pendiente de la zona de estudio del Plateado para los cuatro controles. a) 24/01/2017, b) 09/06/2017, c) 08/06/2018 y c) 12/03/2020.

En los mapas de la Figura 93, se aprecia un conjunto de laderas orientadas alternativamente hacia el NW y NE, separadas por divisorias y vaguadas o barrancos como los que circulan a ambos extremos de la zona de estudio, al este y oeste. Esta disposición se mantiene en líneas generales por encima y debajo de la carretera, aunque obviamente queda interrumpida por ella. El movimiento principal de tipo flujo de tierras se forma en una de estas laderas, orientada preferentemente hacia el NE, pero con un



amplio rango entre el N y el S, y con algunos sectores localizados en contrapendiente, hacia el SW.

En el análisis por elementos para la primera fecha, que se muestra en la Tabla 39 y la Figura 94, se aprecia que el escarpe principal presenta una orientación media al NE, aunque con varios máximos relativos al N y el E. Los escarpes laterales están igualmente orientados al NE en términos medios, aunque con dos máximos al SE y al N, correspondientes al flanco izquierdo y derecho, respectivamente. Los escarpes secundarios tienen una orientación media al N y los escarpes contrapendiente se orientan al W. Por su parte, la cabecera y el cuerpo tienen una orientación al ENE, aunque este último con un amplio rango (RVM de 0.47) entre una orientación preferente al N en la parte más baja del mismo y al S en la parte más alta, como consecuencia de su forma lobulada con un eje de simetría al NE. Mientras tanto, la orientación del pie y el cuerpo secundario están mucho más concentrados al NNE (RVM de 0.85 y 0.79, respectivamente). Las otras zonas inestables presentan orientaciones variables, mientras que la zona estable presenta una media poco significativa (RVM de 0.38), con máximos entre el N y E o al NW.

Tabla 39. Detalle del valor de la orientación por elementos en la zona del Plateado.

Elemento	Media	Moda	Min	Max	Rango	Rad.VM
<b>Movimiento principal</b>						
Escarpe principal	24,00	0	0,00	359,99	359,99	0,77
Cabecera	56,06	90	0,00	359,98	360,98	0,60
Escarpes laterales	31,13	0	0,00	359,99	359,99	0,65
Escarpes secundarios	9,98	0	0,00	359,98	359,98	0,84
Escarpes contrapend.	267,08	270	1,28	358,73	357,45	0,88
Cuerpo	65,60	90	0,00	359,97	360,97	0,47
Cuerpo secundario	23,80	0	0,00	359,98	359,98	0,79
Pie	21,35	0	0,00	359,97	359,97	0,85
<b>Otros movimientos</b>						
Escarpe	321,54	0	0,00	359,99	360,99	0,84
Cabecera	314,97	0	0,00	359,97	360,97	0,62
Escarpes secundarios	99,77	180	0,00	358,79	358,79	0,32
Cuerpos	348,10	0	0,00	359,98	360,98	0,67
Pies	22,26	0	0,00	359,97	359,97	0,92
<b>Área estable</b>						
Área estable	15,22	0	0,00	359,98	359,98	0,38

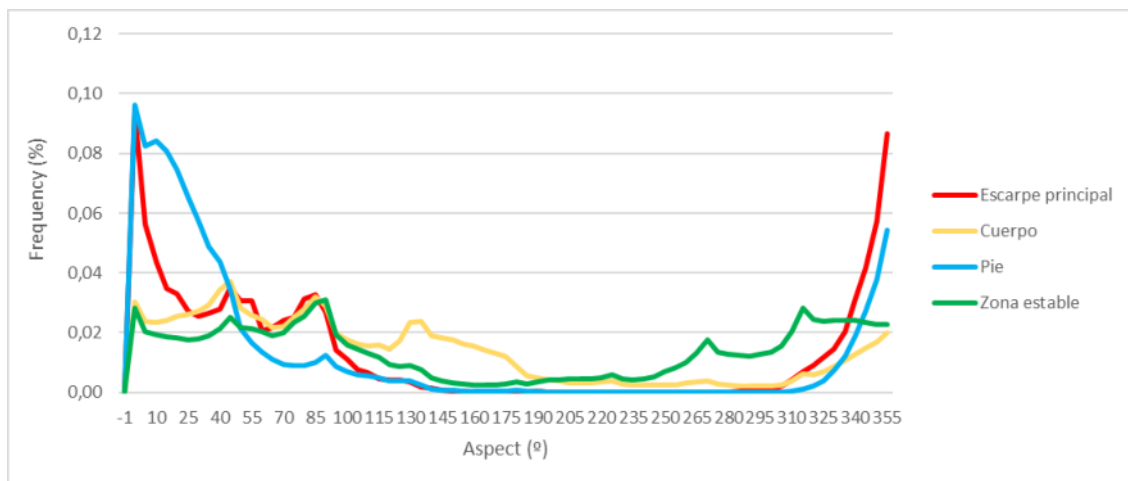


Figura 94. Distribución de la orientación de la pendiente en diferentes partes de la ladera.

La orientación de la ladera y de los elementos (escarpes, cuerpo y pie) se mantiene en todas las fechas analizadas; sin embargo, mientras que los escarpes principal y laterales, así como el pie mantienen su configuración, esta cambia significativamente en el cuerpo. Así, se observa de forma clara un avance de las bandas que forman los escarpes contrapendiente, con orientación entre el W y el S en una ladera de orientación NE, de unos metros ladera abajo en todos los periodos analizados como consecuencia del desarrollo del movimiento principal, salvo en el último en las que prácticamente desaparecen con el aplanamiento de la ladera. Además, la forma lobulada antes descrita también va experimentando cambios en su configuración como consecuencia de la deformación. En el resto de la zona, los cambios que se observan tienen que ver fundamentalmente con cambios en la vegetación, como en el caso del crecimiento de cultivos que aumentan la variabilidad local de la orientación. También se observan cambios en la inestabilidad bajo la carretera, donde se producen algunos sectores contrapendiente que se ven desplazados ladera abajo como consecuencia de la evolución de este movimiento.

La evolución de la orientación en el perfil A (Figura 95 a), comienza en la primera fecha con una orientación preferente al N y NE (escarpe, cuerpo y pie), aunque también aparece un máximo relativo hacia el S (parte alta del cuerpo y escarpes contrapendiente). A partir de ahí, la orientación mayoritaria va tornándose cada vez más hacia el NE, reduciéndose las orientaciones hacia el S y W, como consecuencia del desarrollo del movimiento y la deformación de la masa. En el perfil B (Figura 495 b), igualmente se observa una orientación con máximo absoluto al N y NE en la primera fecha, con máximo relativo al S; en las dos fechas siguientes no se observan cambios significativos, aunque las orientaciones al S se van reduciendo, por el avance de la masa; en la última fecha, continúa esta tendencia, pero el máximo absoluto se desplaza más claramente al ENE, en

este caso como consecuencia del aplanamiento de la superficie lobulada del movimiento. Por último, en el perfil C (Figura 95 c), la evolución de orientación es algo diferente a los otros dos, ya que tiene una posición más marginal dentro del movimiento principal; así en la primera fecha se distribuye igualmente entre en el N y E, continuando así en la segunda fecha; en la tercera fecha, sin embargo, aparece un máximo relativo al S que se mantiene en la cuarto fecha.

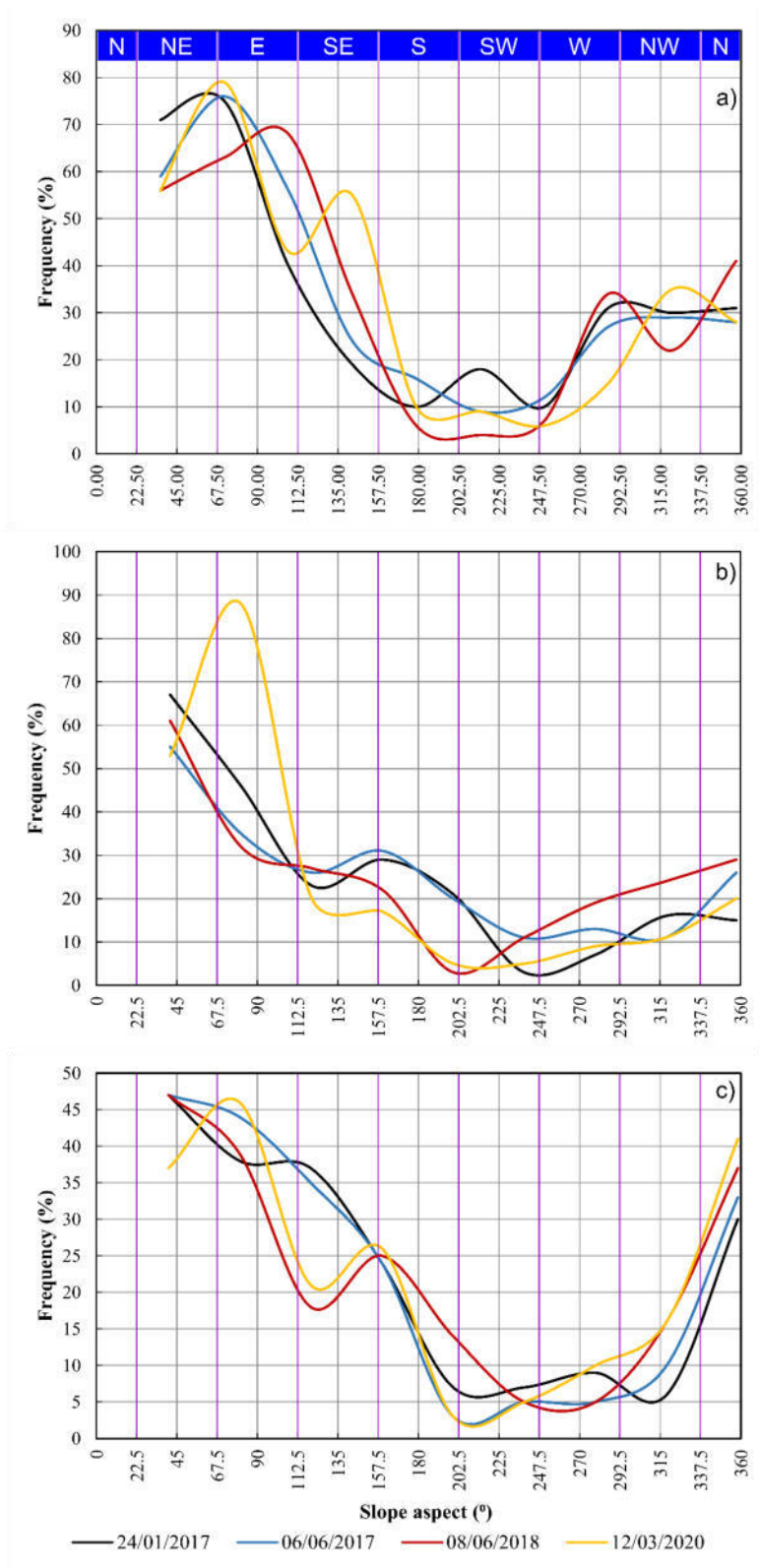


Figura 95. Cambios temporales en la orientación de la pendiente por el efecto de movimientos de ladera en los tres perfiles de referencia a) perfil A, b) perfil B, c) perfil C, y correspondientes fechas de control.

### 4.3.3.3. Distribución y evolución del sombreado

En la Figura 96 se muestran los mapas de sombreado de la zona de estudio correspondiente a los cuatro periodos de control.

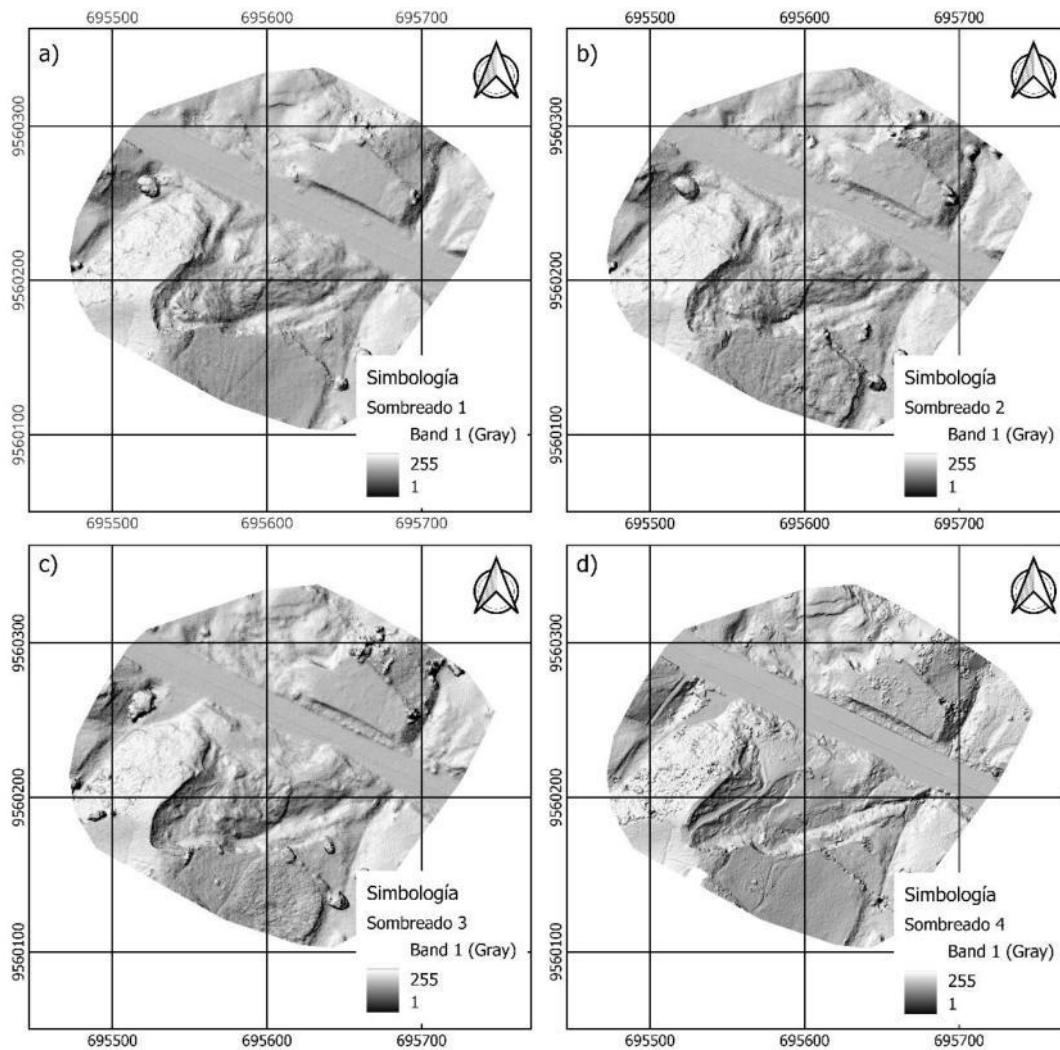


Figura 96. Mapas de sombreado en las cuatro fechas de control: a) 24/01/2017, b) 09/06/2017, c) 08/06/2018 y c) 12/03/2020.

Como se puede observar la zona presenta una elevada iluminación en general, según el modelo aplicado (fuente desde el NW), como corresponde a una ladera orientada generalmente al norte, aunque la ladera que contiene al movimiento de orientación NE esta algo menos iluminada que las que aparecen al este y al oeste de ella, con una

orientación NW y por tanto más iluminadas. En el movimiento principal, algunos tramos del escarpe principal, así como el escarpe lateral del flanco derecho aparecen muy iluminados; al contrario que otros tramos del principal y el lateral del flanco izquierdo que aparecen muy oscuros. En ambos casos contrastan con el cuerpo lobulado que en su parte más alta aparece poco iluminado y en la parte más baja está más iluminado, por los cambios de orientación. Los escarpes secundarios al NE y sobre todo los de contrapendiente al W aparecen más bien iluminados, aunque no destacan demasiado en el cuerpo. Por su parte, el pie y el cuerpo secundarios, con orientación al N, aparecen bastante bien iluminados. El resto de la ladera, además de la orientación general de las laderas consecutivas, destaca la presencia de árboles y la irregularidad en el sombreado que introducen los cultivos. En cuanto al movimiento bajo la carretera se aprecian diferencias en el sombreado por la formación de escarpes, pero bastante tenues en esta primera fecha en la que el movimiento es bastante incipiente.

Tabla 40. Detalle del valor del sombreado por elementos de la zona del Plateado.

Elemento	Media	Moda	Min.	Max.	Rango	Std-D.	C.Var.
<b>Movimiento principal</b>							
Escarpe principal	142,10	1	1	255	254	74,67	0,53
Cabecera	153,75	177	1	255	254	53,55	0,35
Escarpes laterales	159,69	1	1	255	254	63,21	0,40
Escarpes secundarios	178,85	1	1	255	254	63,29	0,35
Escarpes contrapend.	195,06	244	1	255	254	51,61	0,26
Cuerpo	157,98	176	1	255	254	43,63	0,28
Cuerpo secundario	180,52	176	1	255	254	40,71	0,23
Pie	188,91	193	14	255	241	29,55	0,16
<b>Otros movimientos</b>							
Escarpe principal	226,74	254	1	255	254	33,74	0,15
Cabecera	206,77	218	65	255	190	23,12	0,11
Escarpes secundarios	123,35	154	1	254	253	42,09	0,34
Cuerpos	203,11	193	1	255	254	29,07	0,14
Pies	182,28	195	42	255	213	29,36	0,16
<b>Área estable</b>							
Área estable	180,02	181	1	255	254	39,09	0,22

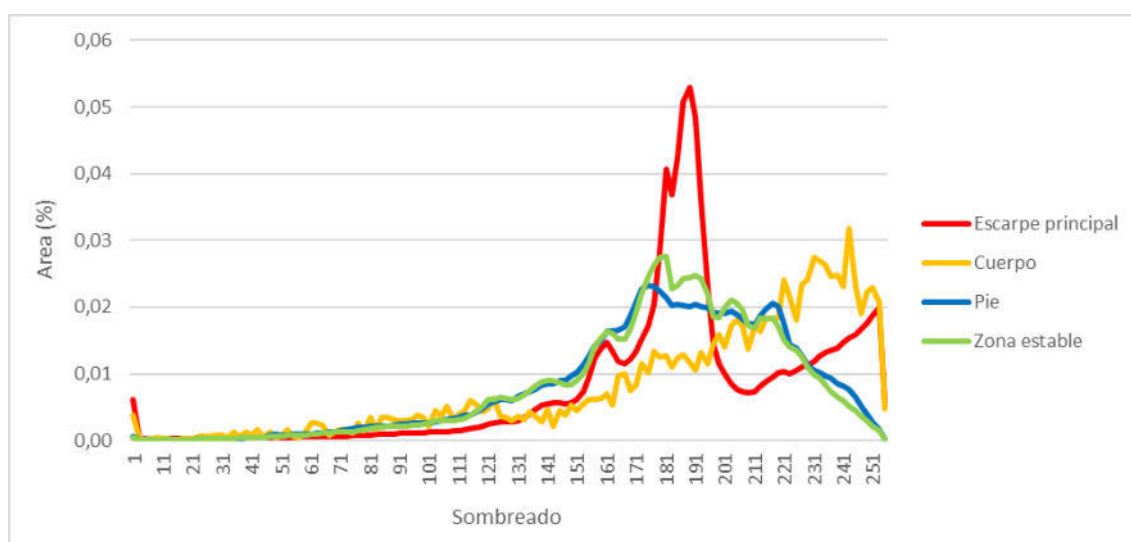


Figura 97. Distribución del sombreado en diferentes partes de la ladera.



El análisis de los datos estadísticos que se presentan en la Tabla 40 y el diagrama de frecuencias de la Figura 97 permite observar de forma cuantitativa la mayor iluminación media del pie y cuerpo secundario (189 y 180) respecto al cuerpo principal del movimiento (158). Dentro del cuerpo, los escarpes secundarios (179) y contrapendiente (195) destacan moderadamente. Con menor iluminación en términos medio aparecen los escarpes laterales (160), la cabecera (154) y sobre todo el escarpe principal (142). Fuera del movimiento principal, el área estable aparece mejor iluminada que el cuerpo del movimiento principal (180), lo que permite distinguirlo. Respecto a los elementos de otros movimientos, estos aparecen en general bien iluminados (180-227), salvo los escarpes secundarios que se muestran más oscuros (123).

La evolución del sombreado muestra muy gráficamente la evolución del movimiento principal ladera abajo en los dos primeros periodos analizados, a partir de la observación de la distinta configuración del sombreado, sobre todo en el sector del cuerpo y del pie. Las bandas de más o menos iluminación producto de los escarpes secundarios, escarpes contrapendientes y rellanos permiten observar el desplazamiento de la masa ladera abajo y la deformación de la misma con el desarrollo de los escarpes, la formación de escalones y grietas. La forma lobulada del flujo también ayuda a la sensación pseudo-3D de la masa y su movimiento hacia abajo. Los escarpes principal y laterales se marcan más (por más o menos iluminación que el entorno) e incluso se puede observar de forma clara la retracción en algún caso. Los cambios del sombreado en el pie y el lóbulo secundario en relación con la uniformidad de la carretera permiten observar con bastante claridad la invasión de la misma por el movimiento. Sin embargo, en el tercer periodo, la iluminación aumenta de forma clara como consecuencia del aplanamiento que producen las obras de estabilización de la ladera, perdiéndose además la forma lobulada del cuerpo del flujo.

Por su parte, en el sector de la inestabilidad bajo la carretera, se puede observar su desarrollo, en el que se van marcando los escarpes de forma progresiva en los dos periodos, la formación de escalones y el avance del terreno hacia abajo en la ladera, en los tres periodos, especialmente en el tercero. En el resto de la zona, los cambios están asociados fundamentalmente a la vegetación de árboles y arbustos, y la irregularidad del sombreado que introducen los cultivos.

#### 4.3.3.4. Distribución y evolución del TPI

En la Figura 98 se muestran los mapas del índice de posición topográfico (TPI) para la resolución de 1 m, en las cuatro fechas consideradas.

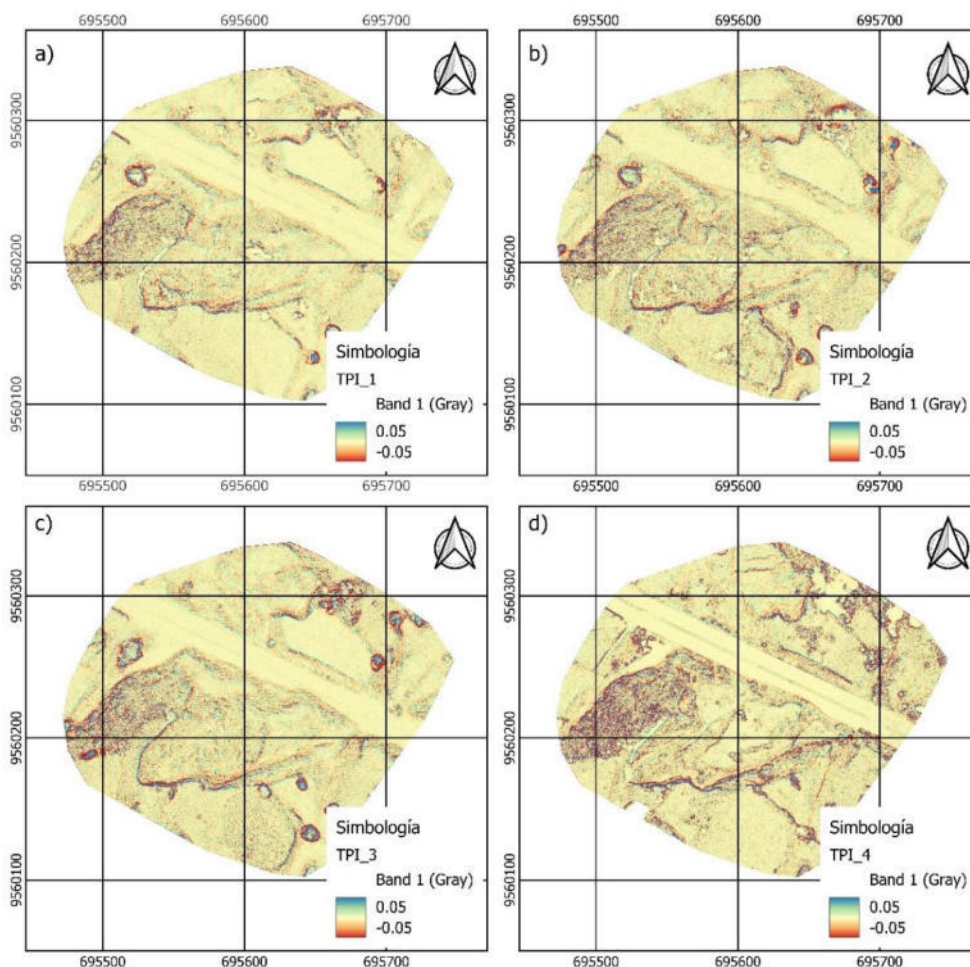


Figura 98. Mapas del Índice Topográfico de Posición (TPI) de la zona de estudio del Plateado a resolución de 0,10 m para las cuatro fechas de monitoreo a) 24/01/2017, b) 09/06/2017, c) 08/06/2018 y c) 12/03/2020.

En estos mapas se aprecia un predominio general de valores del índice cercanos a 0 por toda el área, aun empleando una escala color muy ajustada. Los valores más elevados en valor absoluto, tanto positivos (en rojo-naranja) como negativos (en azul-verde), se tienden a disponer en líneas alternantes de ruptura de la pendiente que se corresponden con los límites superior e inferior de los escarpes, tanto del principal como de los laterales y secundarios. En esta zona y con esta resolución, a pesar de que la mayor parte de ellas corresponden con vegetación (árboles o arbustos), se llega a apreciar que algunas de estas líneas corresponden con rupturas bruscas de la superficie del terreno como sucede en el escarpe principal, los escarpes laterales, algunos de los escarpes secundarios y contrapendientes e incluso con los escarpes de la inestabilidad bajo la carretera.

En el análisis por elementos para la primera fecha de control, que se muestra en la Tabla 41 y la Figura 99, se aprecia que todos los elementos y zonas presentan valores medios cercanos a 0. En este caso, los estadísticos más significativos son el rango y sobre todo la desviación típica que es superior en los escarpes (0.05-0.08), especialmente en el principal (0,13), y menor en el cuerpo, la cabecera y el pie del deslizamiento, (0,02) así como en la zona estable (0,01), donde se encuentra la menor variabilidad de todas las partes analizadas. En los otros movimientos, la desviación típica alcanza un valor de 0.04-0.05 para los escarpes, mayor que los que se calculan para las cabeceras, cuerpos y pies (0.02).

Tabla 41. Detalle del valor del TPI por elementos del deslizamiento.

Elemento	Media	Moda	Mínimo	Máximo	Rango	Desv.T.
Movimiento principal						
Escarpe principal	0,00	-0,02	-1,04	0,88	1,92	0,13
Cabecera	0,00	0,00	-0,35	0,36	0,70	0,02
Escarpes laterales	0,01	0,00	-0,63	0,40	1,03	0,06
Escarpes secundarios	0,00	0,00	-0,52	0,56	1,09	0,05
Escarpes contrapend.	0,00	-0,03	-0,26	0,31	0,57	0,08
Cuerpo	0,00	0,00	-0,28	0,35	0,63	0,02
Cuerpo secundario	0,00	0,00	-0,40	0,39	0,79	0,02
Pie	0,00	0,00	-0,19	0,21	0,40	0,02
Otros movimientos						
Escarpe	0,00	0,00	-0,54	0,81	1,35	0,05
Cabecera	0,00	0,00	-0,17	0,43	0,60	0,02
Escarpes secundarios	0,00	0,00	-0,22	0,17	0,39	0,04
Cuerpos	0,00	0,00	-0,25	0,24	0,49	0,02
Pies	0,00	0,00	-0,20	0,20	0,39	0,02
Área estable						
Área estable	0,00	0,00	-0,68	0,53	1,21	0,01

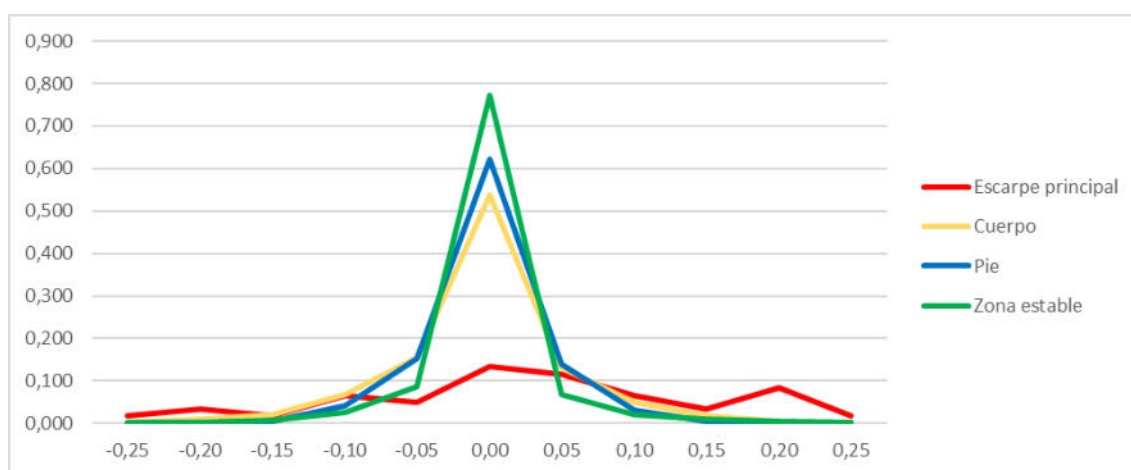


Figura 99. Mapas del Índice Topográfico de Posición (TPI) de la zona de estudio para los cuatro periodos de monitoreo a) 24/01/2017, b) 09/06/2017, c) 08/06/2018 y c) 12/03/2020.

La evolución del TPI en los tres periodos analizados se observa en los cambios que se producen en sectores con vegetación, de forma muy notoria en árboles y más difusa (irregularidad) en los cultivos, pero también en relación con el terreno. Así, las líneas de ruptura de la pendiente correspondientes a los escarpes parecen desplazarse, lo que ahora se analizará con más detenimiento; pero, además, tienden a marcarse más claramente en los distintos modelos, especialmente los relacionados con los escarpes principal y laterales del movimiento principal, mientras que los secundarios y contrapendientes tiende a ir remitiendo. En el resto de la zona, los escarpes del movimiento por debajo de la carretera también tienden a moverse y marcarse más claramente.

En relación con lo anterior, en la Figura 100 se muestran los resultados de la aplicación de la herramienta skeletonization en las cuatro fechas de medición, con las correspondientes líneas extraídas. Se puede apreciar las líneas del borde superior (azul) y borde inferior (rojo), asociadas tanto a zonas con vegetación como líneas de ruptura de la pendiente del terreno. Focalizando en estas últimas, se aprecian claramente los escarpes, especialmente los principal y laterales, y en menor medida todos los demás, incluyendo los correspondientes a la zona de inestabilidad bajo la carretera. En las sucesivas fechas, las líneas van moviendo ligeramente su posición, pero la complejidad de las mismas a esta resolución dificulta su comparación.

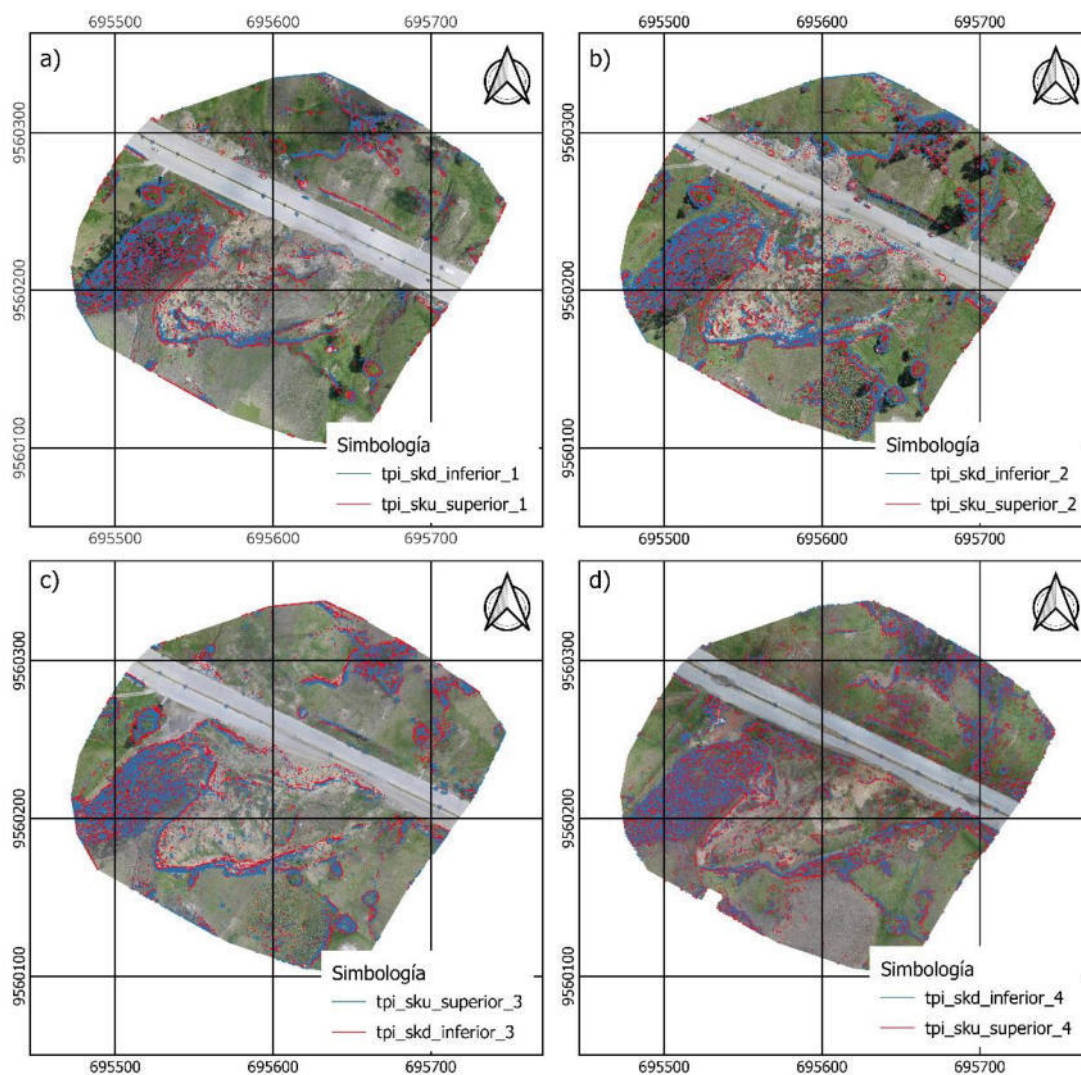


Figura 100. Detección de bordes de escarpes superior (azul) e inferior (rojo) para los cuatros periodos de medición. Resolución del MDE igual a 0,05 m. a) 24/01/2017, b) 09/06/2017, c) 08/06/2018 y c) 12/03/2020.

Como en las zonas anteriores, aquí también se han obtenido los modelos TPI a partir de los MDE de resolución de 1 m. Los resultados se muestran en la Figura 101. En general y al margen de los sectores de altos valores absolutos del TPI relacionados con la vegetación, se observa una mayor claridad en la definición de los escarpes, sobre todo del principal y los laterales, pero también de los demás escarpes del movimiento principal y de las inestabilidades menores. Además de los escarpes, a esta resolución se hacen visibles las rupturas de la pendiente en otras superficies menos inclinadas como la terminación o punta del pie del movimiento.



A la vista de los mapas, también se hace patente la evolución del movimiento con una mejor definición y continuidad de las líneas de ruptura relacionadas con el escarpe y el pie, pero sobre todo su desplazamiento, tanto de retracción en el caso del escarpe principal como de avance en las los escarpes secundarios y el pie.

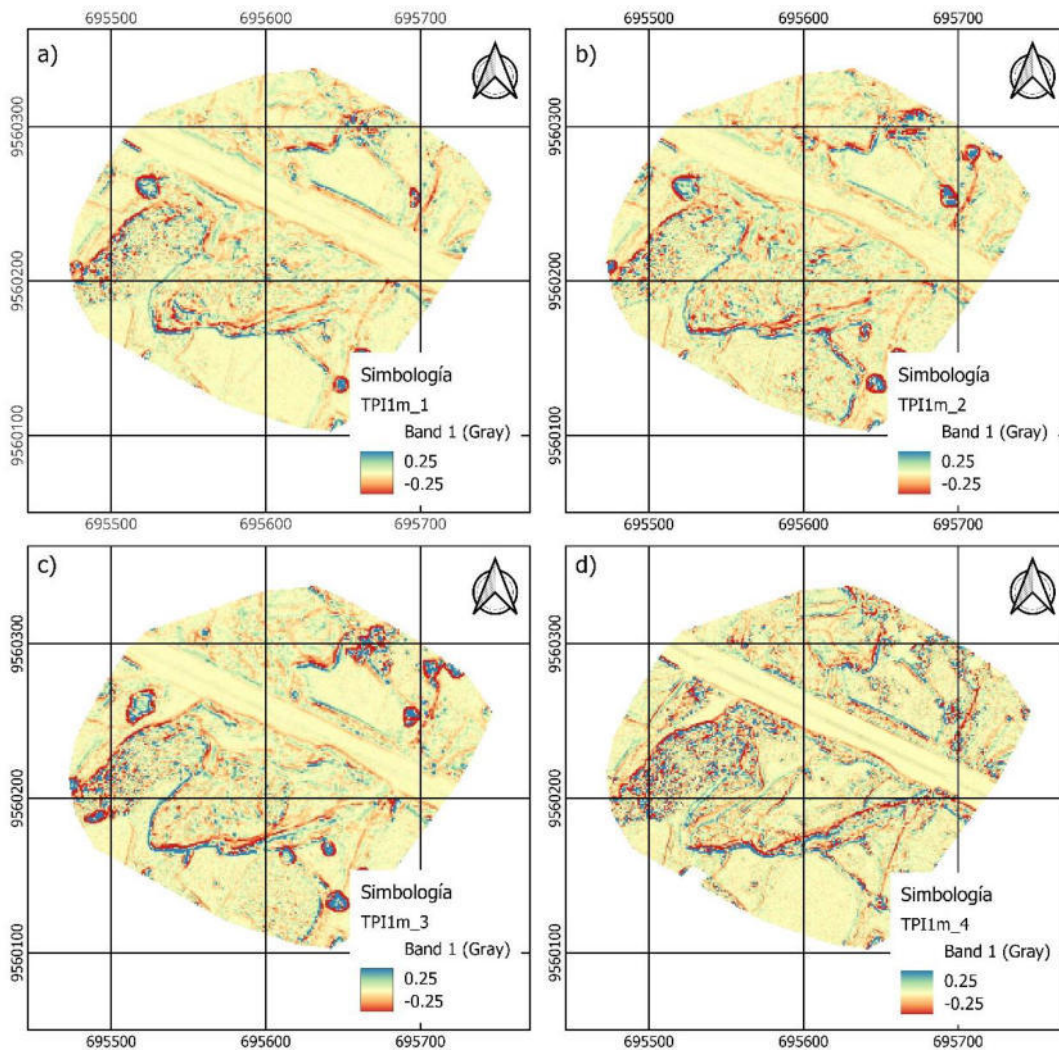


Figura 101. Mapas del Índice Topográfico de Posición (TPI) de la zona de estudio del Plateado a resolución de 1 m para las cuatro fechas de monitoreo a) 24/01/2017, b) 09/06/2017, c) 08/06/2018 y c) 12/03/2020.

Sin embargo, este análisis se realiza de forma más clara a partir de las líneas de ruptura de la pendiente superiores e inferiores extraídas del modelo TPI, que se muestran en la Figura 102. A lo largo de las distintas fechas analizadas, descartando las zonas donde hay cambios en la vegetación, se observan cambios en la posición de las líneas del borde

superior e inferior de los escarpes, especialmente las líneas del borde superior del escarpe principal y los escarpes laterales, que muestran un retroceso hacia la parte superior de la ladera de 2-3 m, fundamentalmente entre la primera y la segunda fecha; y de algo menos de 1 m entre la tercera y la cuarta. Mientras tanto, las líneas inferiores de estos escarpes presentan un comportamiento menos cambiante y las líneas de otros escarpes son más discontinuas y se distribuyen de forma irregular por toda el área del deslizamiento. En cuanto al sector del pie, la línea definida por la punta se identifica mediante la línea de borde inferior en el TPI de 1m de resolución. En este caso, se observan avances de las líneas de unos 4 m hacia la dirección ladera abajo, ocupando la zona de la carretera en la segunda y tercera fecha, con cierto un retroceso en la cuarta fecha, como consecuencia de las obras de reparación de la ladera y limpieza de la carretera.



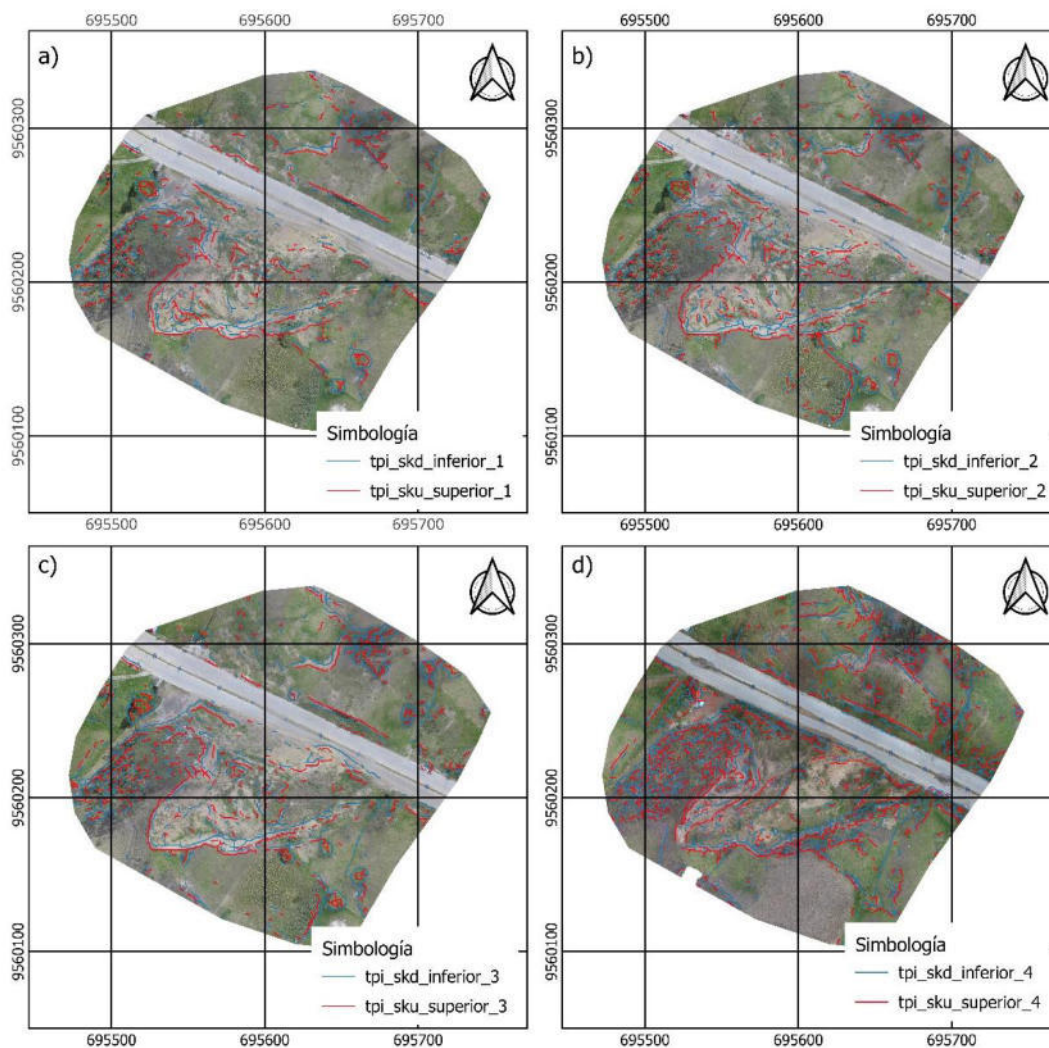


Figura 102. Detección de bordes de escarpes superior (azul) e inferior (rojo) para los cuatros periodos de medición. Resolución del MDE igual a 1 m. a) 24/01/2017, b) 09/06/2017, c) 08/06/2018 y c) 12/03/2020.

#### 4.3.3.5. Distribución y evolución del TRI

En la Figura 103 se muestran los mapas del TRI para las cuatro fechas consideradas, a la misma resolución que los MDS originales. En ellos, descartando los sectores con vegetación, tanto arbórea (valores altos de rugosidad) como cultivos (rugosidad variable), se aprecian sectores de alta rugosidad en relación con los escarpes sobre todo en el principal y laterales, y en menor medida en los escarpes secundarios y el pie del deslizamiento principal. También se observan sectores de alta rugosidad en los escarpes de otros deslizamientos menores, mientras que el cuerpo del deslizamiento y especialmente la zona estable muestran baja rugosidad.

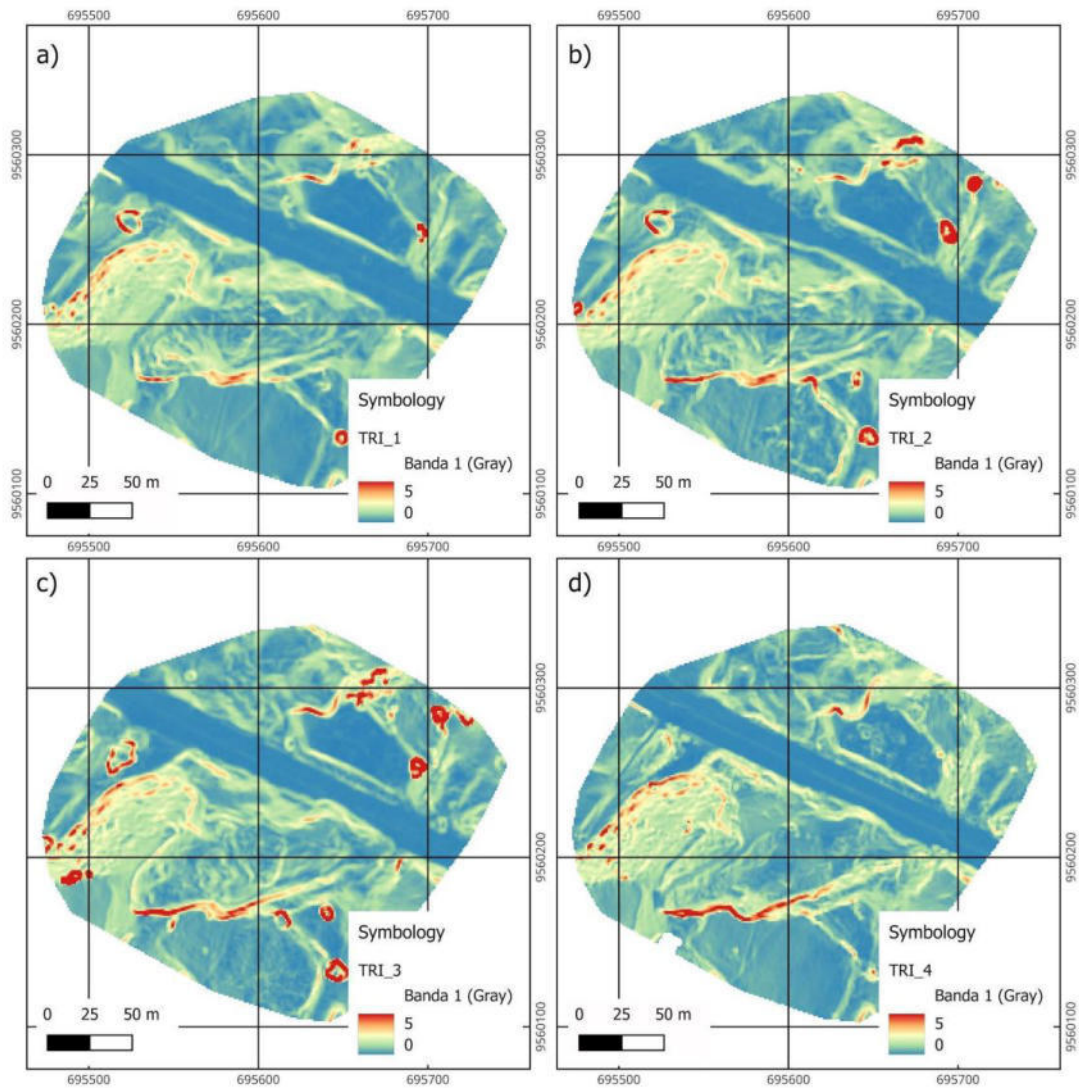


Figura 103. Distribución de la rugosidad en diferentes partes de la ladera en los cuatro periodos de control. a) 24/01/2017, b) 09/06/2017, c) 08/06/2018 y d) 12/03/2020.

Los valores de rugosidad media por elementos del deslizamiento se muestran en la Tabla 42 y la Figura 104. En ella se observa que las zonas de escarpe presentan una rugosidad media de 0,14, siendo algo mayor en el escarpe principal (0,22), que en los demás (0,13-0,16). Por su parte, la cabecera muestra un valor medio de la rugosidad de 0,06, ligeramente superior al cuerpo (0,05) e inferior al pie (0,07). Las otras zonas de inestabilidad muestran valores equivalentes pero menores en general, aunque siempre superiores a la zona estable (0,04).

Tabla 42. Detalle del valor de la rugosidad por elementos del movimiento..

Elemento	Media	Moda	Min	Max	Rango	Std-D.	C.Var.
<b>Movimiento principal</b>							
Escarpe principal	0,22	0,05	0,00	1,60	1,59	0,16	0,71
Cabecera	0,06	0,05	0,00	0,52	0,52	0,04	0,65
Escarpes laterales	0,13	0,04	0,00	1,03	1,03	0,09	0,68
Escarpes secundario	0,13	0,06	0,00	0,90	0,90	0,07	0,55
Escarpes contrapend.	0,16	0,03	0,01	0,44	0,43	0,09	0,52
Cuerpo	0,05	0,02	0,00	0,56	0,56	0,03	0,61
Cuerpo secundario	0,07	0,03	0,00	0,78	0,78	0,04	0,58
Pie	0,07	0,06	0,00	0,34	0,34	0,04	0,53
<b>Otros movimientos</b>							
Escarpe	0,12	0,08	0,00	1,00	1,00	0,08	0,65
Cabecera	0,04	0,03	0,00	0,45	0,45	0,03	0,64
Escarpes secundarios	0,10	0,03	0,00	0,27	0,27	0,05	0,50
Cuerpos	0,05	0,03	0,00	0,47	0,47	0,03	0,69
Pies	0,07	0,07	0,00	0,24	0,24	0,03	0,37
<b>Área estable</b>							
Área estable	0,04	0,02	0,00	1,22	1,22	0,03	0,76

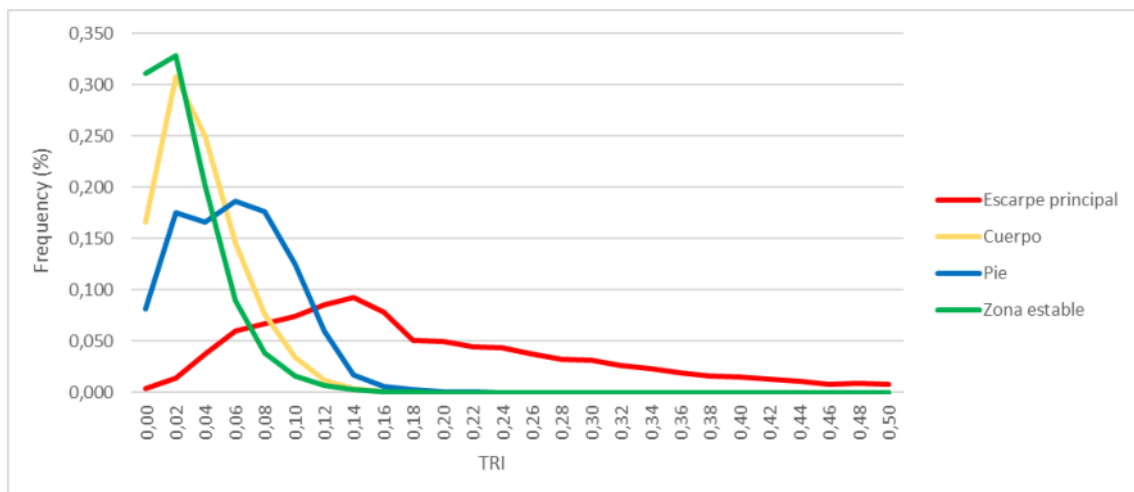


Figura 104. Distribución de la rugosidad en diferente.s partes de la ladera.

La evolución de la rugosidad, según se observa en los mapas, está se observa sobre todo en relación con los cambios en la vegetación de árboles y cultivos; aunque también se aprecian cambios en el terreno en el área del movimiento principal y la inestabilidad

menor bajo la carretera. Así, en el movimiento principal, se observa una mejor definición por el valor elevado del TRI en los escarpes principal y laterales, sobre todo en la tercera fecha, y una cierta retracción de los mismos a medida que evolucionan. En el cuerpo del movimiento los sectores con mayor TRI van cambiando su configuración a medida que el movimiento se va desarrollando y los escarpes van cambiando de posición, lo mismo que sucede en el pie y en su punta; la rugosidad del pie, contrasta con la muy baja rugosidad de la carretera, lo que permite advertir el avance del movimiento sobre la misma. En el caso del movimiento bajo la carretera, se observa el desplazamiento de los escarpes ladera abajo, a partir de la observación de los sectores con mayor rugosidad.

Al igual que en los casos anteriores, siendo el TRI un factor muy sensible a la resolución, se han calculado los modelos también a una resolución de 1 m, cuyos resultados se muestran en la Figura 105. En estos mapas, y prescindiendo de la vegetación, se observan sectores de alta rugosidad relacionados con los escarpes y de rugosidad media relacionados con el cuerpo del movimiento principal. También se observa, una mayor rugosidad en el movimiento bajo la carretera.

Los cambios de la rugosidad que se observa en los mapas de TRI a resolución de 1 m se focalizan en los escarpes, sobre todo el principal y los laterales, en los que la rugosidad aumenta en la segunda y la tercera fecha, hasta definir de forma más clara el escarpe completo. En el pie y en el cuerpo se observan cambios de posición de las zonas de alta rugosidad como consecuencia de los desplazamientos del movimiento. Sin embargo, en la cuarta fecha se observa una disminución general de la rugosidad en estas zonas del cuerpo y el pie. También se observan algunos cambios en otras zonas inestables, especialmente la que se produce bajo la carretera, a lo largo de todo el periodo analizado.

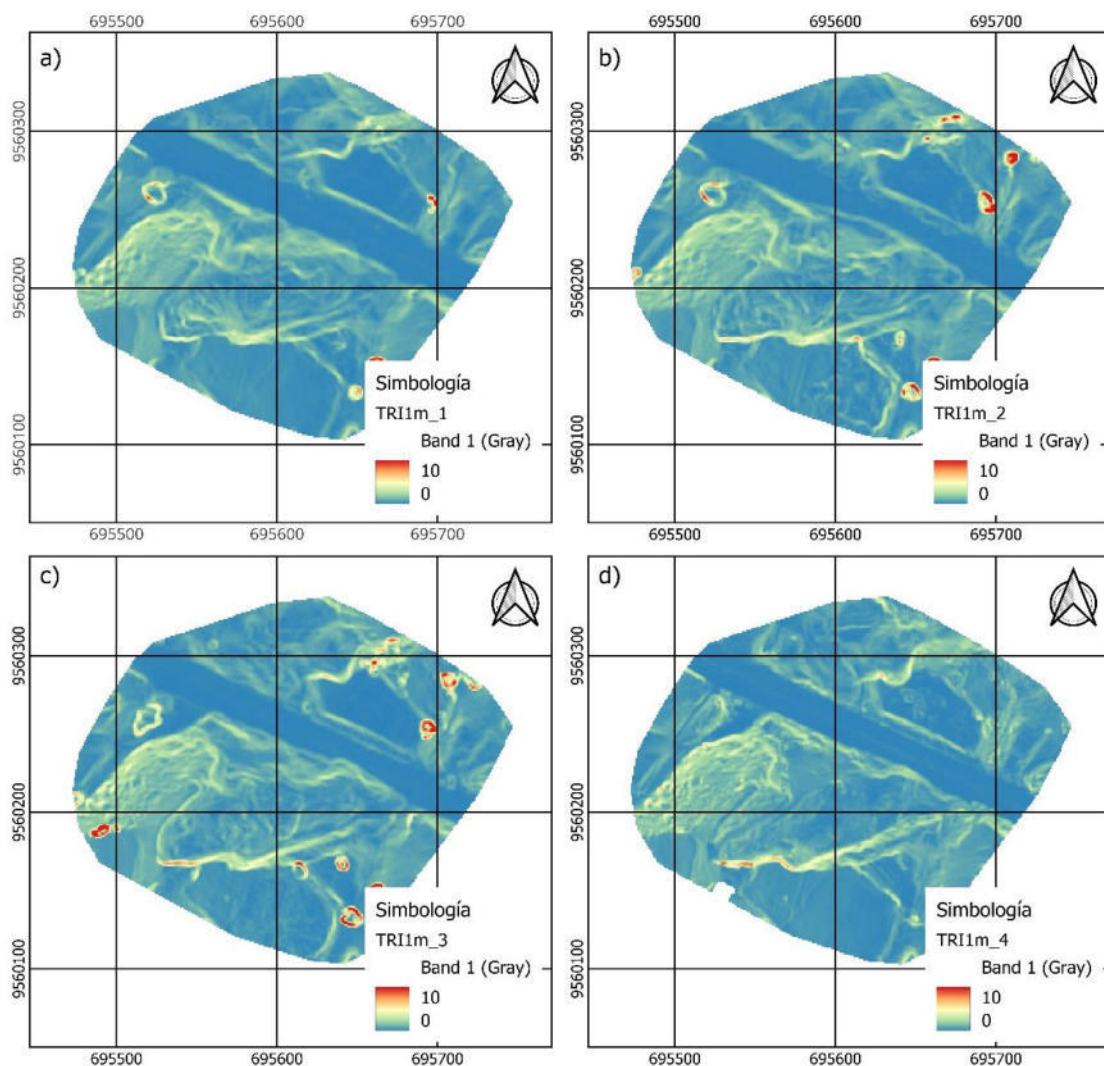


Figura 105. Distribución de la rugosidad en diferentes partes de la ladera en los cuatro periodos de control a resolución de 1m. a) 24/01/2017, b) 09/06/2017, c) 08/06/2018 y c) 12/03/2020.

#### 4.3.3.6. Distribución y evolución del TWI

En la Figura 106 se muestran para cada periodo de control la distribución de TWI en la zona del Plateado, con una escala de color en azul, de tal forma que en tonalidades más oscuras se representan los valores más elevados de TWI. Se marcan así las zonas donde existe gran potencial para acumular agua de escorrentía superficial, reflejando así la red de drenaje de la ladera. Valores negativos corresponden a zonas donde no se puede acumular agua, coincidentes generalmente con las partes altas de la ladera.



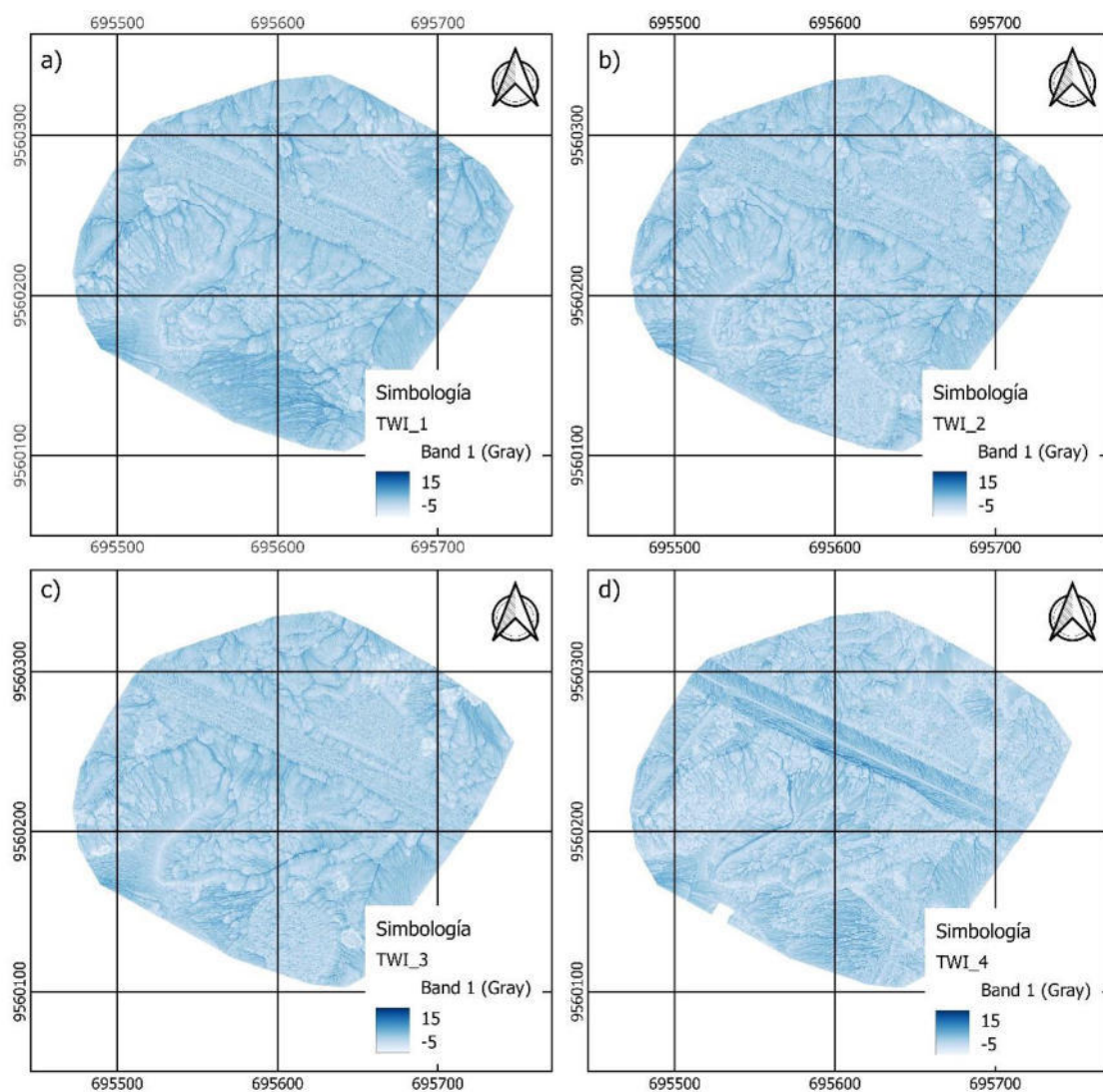


Figura 106. Mapas del Índice Topográfico de Humedad (TWI) de la zona de estudio para los cuatro controles. a) 24/01/2017, b) 09/06/2017, c) 08/06/2018 y c) 12/03/2020.

En las figuras se observa como en la parte superior, en las cercanías del escarpe principal y escarpes laterales los valores son bajos, van aumentando en la cabecera y a lo largo del cuerpo donde se forma redes de drenaje internas en el movimiento. Destacan dos líneas de drenaje a ambos lados del cuerpo, entre este mismo y los escarpes, formados a partir de las grietas formadas por la fricción y desplazamiento de la masa. Asimismo, hay que señalar cómo las distintas redes van desembocando en la zona del pie y la carretera, donde se alcanzan los mayores valores del índice. El resto de la zona de estudio externos al

movimiento, muestran zonas de drenaje bien jerarquizadas, destacando las correspondientes a los barrancos o vaguadas laterales al este y oeste; excepto en los sectores de cultivos y vegetación donde las redes son más irregulares y no muy bien jerarquizadas.

Estas observaciones son corroboradas por los resultados del análisis por elementos que se muestran en la Tabla 43 y la Figura 107. Así, los escarpes tienen valores bajos del índice TWI, especialmente el escarpe principal que incluso presenta valores negativos (-0,69). El resto de las partes del deslizamiento presentan valores crecientes desde la cabecera (1,74), cuerpo (1,88) y pie, donde se alcanzan los valores más altos (2,22). Las otras áreas inestables presentan valores igualmente crecientes desde los escarpes (1,35) hasta los pies (2,07). Sin embargo, el área estable presenta valores medios incluso más elevados (2,38), lo que implican una red más jerarquizada que las redes internas del movimiento que quedan modificadas e interrumpidas en ocasiones por el desarrollo del movimiento.

Tabla 43. Detalle del valor del TWI por elementos del deslizamiento.

	Media	Moda	Min	Max	Rango	Desv.T.	C.V.
<b>Movimiento principal</b>							
Escarpe principal	-0,69	-2,65	-5,25	7,95	13,19	1,28	-1,85
Cabecera	1,74	2,83	-4,55	12,18	16,72	1,51	0,87
Escarpes laterales	1,02	-1,03	-4,73	8,43	13,16	1,55	1,52
Escarpe secundario	1,04	-2,76	-5,34	7,11	12,44	1,39	1,33
Escarpes contrapend.	-0,24	-4,15	-4,15	5,11	9,26	1,44	-6,00
Cuerpo	1,88	2,83	-4,46	13,57	18,03	1,59	0,85
Cuerpo secundario	2,06	0,59	-4,98	13,74	18,72	1,53	0,74
Pie	2,22	2,83	-3,56	11,50	15,05	1,21	0,54
<b>Otros deslizamientos</b>							
Escarpe	1,35	-1,34	-5,24	7,31	12,55	1,32	0,98
Cabecera	2,01	0,75	-4,72	11,71	16,44	1,39	0,70
Escarpes secundarios	0,77	2,68	-3,40	6,78	10,18	1,04	1,35
Cuerpos	2,35	2,83	-4,17	14,15	18,32	1,56	0,67
Pies	2,07	0,62	-3,86	8,54	12,41	1,23	0,59
<b>Área estable</b>							
Area estable	2,38	2,83	-5,02	15,26	20,28	1,66	0,70

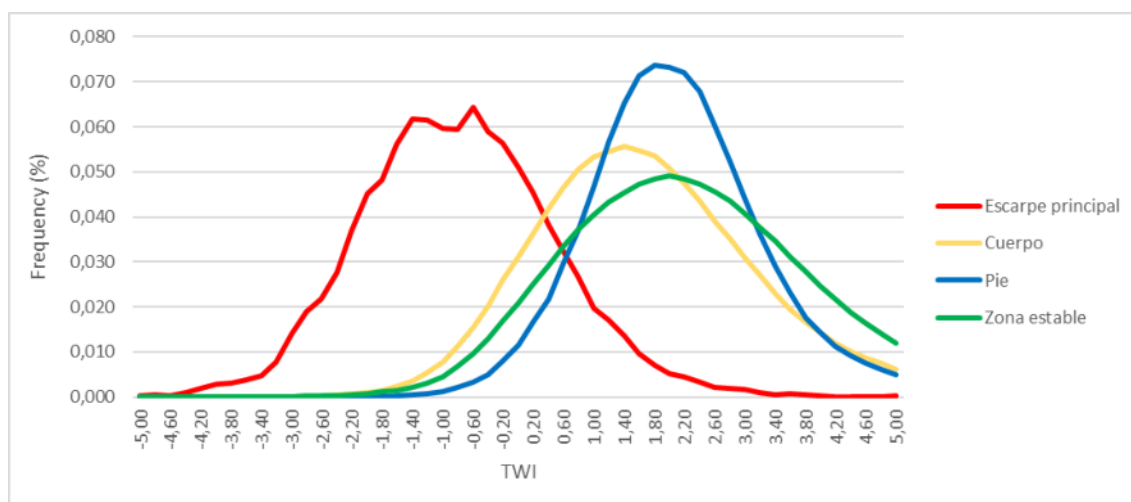


Figura 107. Distribución del TWI en diferentes partes de la ladera.



La configuración del índice TWI en la ladera y las redes de drenaje internas al movimiento va cambiando a lo largo de las fechas analizadas, con tendencia a acumular valores más altos del índice en la zona del pie en torno a la carretera desde la primera a la tercera fecha, mientras que en la última fecha lo que se observa es un estructura menos jerarquizada y más irregular del drenaje. En el resto de la zona, las redes son más estables, como las vaguadas del este y oeste del movimiento, salvo en las zonas donde hay cambios de la vegetación, en especial los cultivos, donde se producen redes muy irregulares; o en la zona de la inestabilidad bajo la carretera, donde la red se va adaptando a la nueva geometría.

#### **4.3.4. Desplazamientos en puntos significativos extraídos a partir de los vuelos VANT**

Los desplazamientos en los puntos de monitorización extraídos a partir de los MDS y ortoimágenes obtenidas con los vuelos VANT se muestran en los mapas de vectores correspondientes a los periodos considerados para la zona de Colinas Lojanas en la Figura 108, y se resumen en las Tablas 44, 45 y 46.

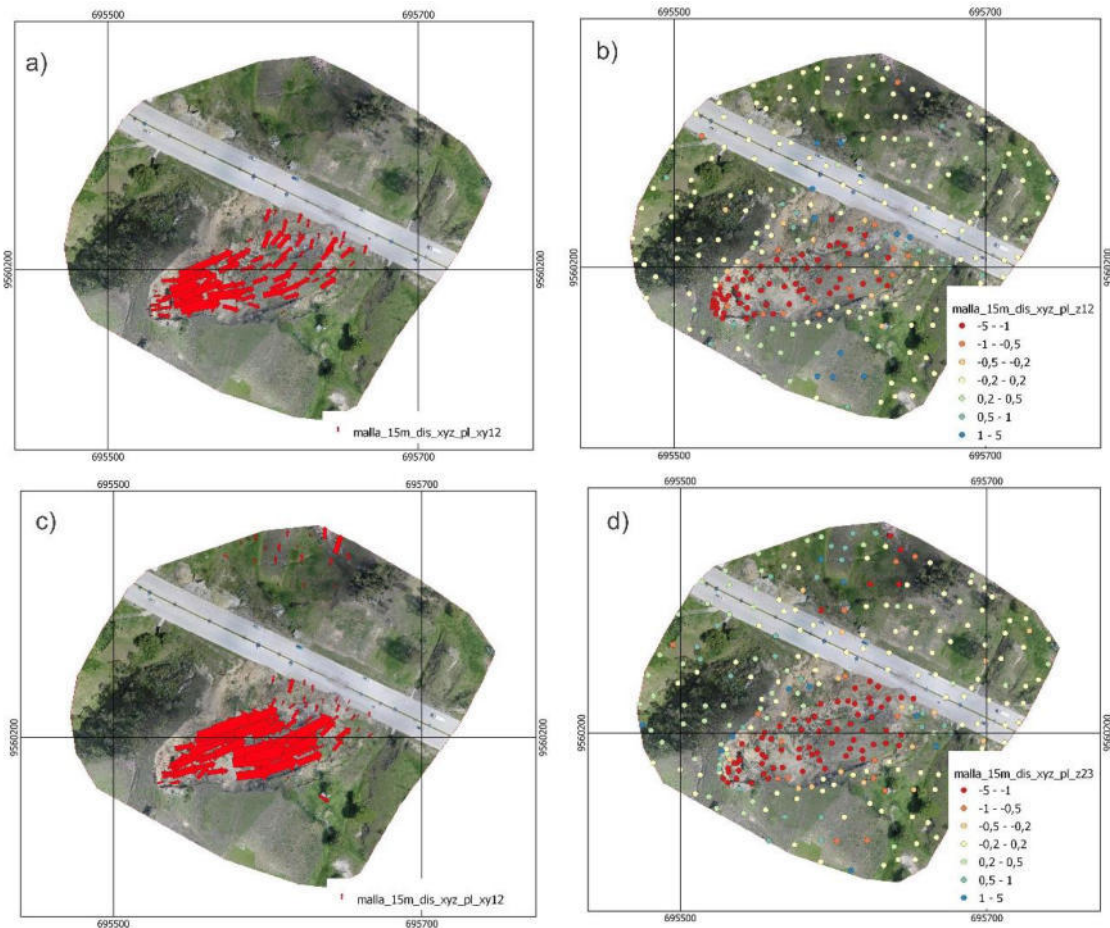


Figura 108. Mapa de vectores de dirección y velocidad del movimiento de ladera del Plateado. a) y b) corresponden al periodo enero – julio 2017; c) y d) corresponden al periodo julio 2017 – julio 2018; e) y f) corresponden al periodo julio 2018 – marzo 2020.

En el mapa de vectores de desplazamientos horizontales correspondiente al primer periodo analizado entre enero y junio de 2017 (Figura 108 a) se observan desplazamientos restringidos casi exclusivamente al área del movimiento principal. En la parte de los escarpes, cabecera y la mayor parte del cuerpo los desplazamientos horizontales son bastante uniformes hacia el ENE mientras que hacia el pie giran al NNE o incluso N, probablemente por la presencia de la carretera. En cuanto a la magnitud, en la cabecera son moderados, entre 2 y 4 m; en la parte alta del cuerpo alcanzan valores bastante más elevados, de entre 5 y 10 m e incluso superiores en algunos puntos, para ir reduciéndose progresivamente hasta el sector del pie, donde los valores son de nuevo inferiores a 4-5 m. En el lóbulo secundario del cuerpo, así como en la inestabilidad bajo la carretera, los

desplazamientos horizontales son muy reducidos aún en este primer periodo, mientras que en el área inestable son prácticamente inexistentes. En cuanto a los desplazamientos verticales, estos son mucho más destacados en el área del movimiento principal que el resto de la zona. En general, en todo este área son negativos o de descenso, algo mayores en los escarpes, cabecera, y parte superior del cuerpo, en torno a 1 m en términos absolutos; y menores hacia la parte inferior del cuerpo y el pie, casi siempre por debajo de 0.5 m en este último sector, donde incluso hay desplazamientos positivos o ascensos del terreno en algunos puntos en las inmediaciones de la carretera. En el resto de la zona, incluyendo el firme de carretera y el movimiento ladera debajo de la misma, los movimientos son casi imperceptibles. Lo mismo sucede en el área estable, donde sin embargo se encuentra algún sector con ascensos de la superficie como consecuencia del crecimiento de cultivo (maíz).

En el segundo periodo, vuelven a destacar los desplazamientos horizontales del área del movimiento, donde llegan a ser bastante grandes respecto al resto de la zona de estudio. La dirección prácticamente se mantiene con desplazamientos hacia el ENE en los escarpes, cabecera y la mayor parte del cuerpo, girando hacia el NNE en el pie. La magnitud es similar a la del periodo anterior en el sector de los escarpes y cabecera, en torno a 2-5 m; a continuación, en prácticamente todo el cuerpo se alcanzan desplazamientos muy destacables, superiores generalmente a 5 m y en muchos casos a 10 m; finalmente en el sector del pie, los desplazamientos se encuentran entre 3 y 5 m, hasta llegar a la punta sobre la carretera, donde se atenúan. Se puede decir que la deformación se desplaza algo hacia la parte más baja del movimiento con mayores desplazamientos horizontales en la parte baja del cuerpo, el pie y el lóbulo secundario que en el periodo anterior. Además, se produce un desarrollo más claro del movimiento bajo la carretera, en el que se alcanzan desplazamientos horizontales de 2 a 5 m. En cuanto a los

desplazamientos verticales, igualmente se observa que son negativos (descensos) y centrados en el movimiento principal. En el sector más alto de los escarpes y la cabecera, los descensos alcanzan 2-3, mientras que en el cuerpo están entre 3 y 5 m, y en el pie entre 1 y 2 m, sin que haya prácticamente puntos con ascensos del terreno. Todo ello es indicativo de un movimiento de tipo flujo con una fuerte deformación en la que el material desciende hacia abajo, sin que se produzcan empujes laterales que provoquen ascenso del material. Por su parte, en el movimiento bajo la carretera se llegan a observar descensos de más de 1-2 m. En el área estable, incluyendo la carretera, los desplazamientos verticales son muy limitados, aunque en el sector del cultivo de maíz en este caso se observa un descenso de la superficie, por la desaparición del mismo.

En el tercer periodo, la situación cambia completamente y los desplazamientos tanto horizontales como verticales se reducen bruscamente, como consecuencia de la estabilización de la ladera sobre la carretera. De hecho, hay muchos puntos que no son localizables en la cuarta fecha por lo que descartan en este cálculo. Así, solamente se observan desplazamientos horizontales en algunos puntos del cuerpo hacia el barranco o cárcava que se forma en el flanco derecho del movimiento o en el sector del pie donde hay un movimiento residual con desplazamientos de 2-3 m en el entorno de la carretera (punta). La dirección es más errática en el cuerpo, entre el E y el NE, y más uniforme en el pie, hacia el NNE. En el sector alto de los escarpes y la cabecera apenas hay algún desplazamiento aislado por el desplome de algún sector de los escarpes principal y laterales. Por el contrario, en el sector del movimiento bajo la carretera aún se observa bastante actividad con desplazamientos horizontales de 2-4 m, al contrario que en la zona estable donde los desplazamientos son poco significativos. Los desplazamientos verticales donde se observan suelen ser negativos, aunque no muy grandes en magnitud, como en algunos sectores de los escarpes y la cabecera (descensos de 1-2 m), del cuerpo

el pie (2-4 m). En el resto de la zona, en el movimiento bajo la carretera siguen apareciendo puntos con un descenso notable, entre 1-2 m; mientras tanto, el área estable y la carretera apenas experimentan desplazamientos.

En la Tabla 44, se muestran los estadísticos de los desplazamientos horizontales, verticales y totales de los tres periodos analizados. En el primer y segundo periodo hay un buen número de puntos descartados por su localización en áreas con vegetación, mientras que en el tercero, se descartan adicionalmente un mayor número de puntos al no ser reconocibles tras la obras de estabilización de la ladera.

Tabla 44. Desplazamientos y tasas horizontales y verticales en los puntos extraídos en el área del Plateado en el primer periodo analizado (enero-junio de 2017). Desplazamientos expresados en m y velocidades expresadas en m/mes. Dirección de desplazamiento expresada en grados desde el N. Radio Vector Medio es adimensional (0-1).

Desplazamientos horizontales								
Elemento	Nº P	Media	Mín.	Máx.	D.Típ	Tasa M	Dir M	Rad.V
Escarpes y cabecera	27/25	2,066	0,036	9,588	2,277	0,462	69,98	0,65
Cuerpo	54/45	6,487	0,000	14,165	3,123	1,450	61,12	0,91
Pie	27/26	1,590	0,000	5,028	1,040	0,355	41,23	0,80
Otros movimientos	21/20	0,414	0,023	0,861	0,180	0,093	355,13	0,85
Estable	168/141	0,132	0,000	1,476	0,126	0,030	45,59	0,31
Total zona	297/257	1,753	0,000	14,165	2,958	0,392	46,35	0,52
Desplazamientos verticales							Desp. Totales	
Elemento	Nº P	Media	Mín.	Máx.	D.Típ	Tasa M	Desp	TasaM
Escarpes y cabecera	27/25	-1,030	-3,622	0,416	0,779	-0,230	2,309	0,516
Cuerpo	54/45	-1,556	-5,238	0,850	1,359	-0,348	6,671	1,491
Pie	27/26	-0,103	-3,327	1,510	0,986	0,023	1,593	0,356
Otros movimientos	21/20	0,036	-0,562	0,466	0,209	0,008	0,416	0,093
Estable	168/141	0,033	-1,591	1,574	0,198	0,007	0,136	0,030
Total zona	297/257	-0,387	-5,238	1,574	1,113	-0,087	1,795	0,401

Tabla 45. Desplazamientos y tasas horizontales y verticales en los puntos extraídos en el área del Plateado en el segundo periodo analizado (junio de 2017-junio de 2018). Desplazamientos expresados en m y velocidades expresadas en m/mes. Dirección de desplazamiento expresada en grados desde el N. Radio Vector Medio es adimensional (0-1).

<b>Desplazamientos horizontales</b>								
Elemento	N° P	Media	Mín.	Máx.	D.Típ .	Tasa M	Dir M	Rad.V
Escarpes y cabecera	27/25	3,096	0,041	16,293	4,076	0,259	52,72	0,61
Cuerpo	54/45	8,246	0,042	16,525	4,834	0,689	55,53	0,89
Pie	27/26	1,191	0,000	5,199	0,773	0,099	36,20	0,80
Otros movimientos	21/20	2,066	0,094	7,029	1,281	0,173	352,90	0,74
Estable	168/141	0,151	0,000	1,825	0,166	0,013	87,41	0,14
Total zona	297/257	2,331	0,000	16,525	4,117	0,195	46,97	0,40
<b>Desplazamientos verticales</b>							<b>Desp. Totales</b>	
Elemento	N° P	Media	Mín.	Máx.	D.Típ .	Tasa M	Desp	TasaM
Escarpes y cabecera	27/25	-1,617	-4,692	0,368	1,444	-0,135	3,493	0,292
Cuerpo	54/45	-2,750	-5,453	1,021	1,465	-0,230	8,692	0,726
Pie	27/26	-0,241	-3,768	1,976	1,033	-0,020	1,215	0,101
Otros movimientos	21/20	-0,061	-2,506	3,625	0,989	-0,005	2,067	0,173
Estable	168/141	0,072	-1,025	1,587	0,178	0,006	0,167	0,014
Total zona	297/257	-0,658	-5,453	3,625	1,521	-0,055	2,422	0,202

Tabla 46. Desplazamientos y tasas horizontales y verticales en los puntos extraídos en el área del Plateado en el tercer periodo analizado (junio de 2018-marzo de 2020). Desplazamientos expresados en m y velocidades expresadas en m/mes. Dirección de desplazamiento expresada en grados desde el N. Radio Vector Medio es adimensional (0-1).

<b>Desplazamientos horizontales</b>									
<b>Elemento</b>	<b>N° P</b>	<b>Media</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>D.Típ .</b>	<b>Tasa M</b>	<b>Dir M</b>	<b>Rad.V</b>	
Escarpes y cabecera	27/25	0,419	0,000	1,294	0,336	0,020	51,83	0,66	
Cuerpo	54/45	0,800	0,000	3,302	0,648	0,038	55,52	0,83	
Pie	27/26	0,757	0,000	2,185	0,462	0,036	39,99	0,86	
Otros movimientos	21/20	1,664	0,046	4,277	0,785	0,079	355,71	0,83	
Estable	168/141	0,139	0,000	1,215	0,123	0,011	25,59	0,53	
Total zona	297/257	0,514	0,000	4,277	0,648	0,024	33,21	0,65	
		<b>Desplazamientos verticales</b>					<b>Desp. Totales</b>		
<b>Elemento</b>	<b>N° P</b>	<b>Media</b>	<b>Mín.</b>	<b>Máx.</b>	<b>D.Típ .</b>	<b>Tasa M</b>	<b>Desp</b>	<b>Tasa M</b>	
Escarpes y cabecera	27/25	-1,073	-4,611	0,226	1,164	-0,051	1,152	0,054	
Cuerpo	54/45	-0,897	-3,102	0,225	0,739	-0,042	1,202	0,057	
Pie	27/26	-0,525	-2,547	0,345	0,602	-0,025	0,921	0,044	
Otros movimientos	21/20	-0,543	-1,969	0,295	0,615	-0,026	1,750	0,083	
Estable	168/141	-0,131	-1,812	1,247	0,234	-0,016	0,191	0,009	
Total zona	297/257	-0,907	-3,102	1,247	0,880	-0,043	1,042	0,049	

A la vista de las tablas anteriores, el primer aspecto a destacar son los puntos localizados en el área estable en los tres periodos analizados. Así, los desplazamientos horizontales tienen un valor medio de 0.13 m y una desviación típica de 0.13 m en el primer periodo; de 0.15 y 0.17 m, respectivamente, en el segundo periodo; y de 0.14 y 0.12 m, en el



tercero. En todos los casos, tomando como valor más representativo la desviación típica, apenas se supera los 0.15 m, que no obstante es superior a la incertidumbre horizontal establecida en 0.10 m. Los desplazamientos verticales en esta área estable presentan un valor medio de 0.33 m y una desviación típica de 0.20 m en el primer periodo analizado; de 0.07 m y 0.18 m, respectivamente en el segundo periodo; y de -0.131 y 0.234 m en el tercero. Tomando la desviación típica como valor representativo, esta es superior a la incertidumbre vertical establecida en 0.15 m. Por todo ello, y de la misma forma que en los casos anteriores, se redefine la incertidumbre horizontal que pasa a ser de 0.15 m y la vertical que pasa a ser de 0.25 m.

Por su parte, el análisis por sectores del movimiento principal y otras inestabilidades de la zona produce los resultados que se resume a continuación. En los desplazamientos horizontales calculados para el primer periodo, destacan los elevados valores medios en el área de la cabecera, con 2,1 m y una tasa de 0.46 m/mes; pero sobre todo en el cuerpo donde la media llega a ser de 6.5 m, con una tasa de 1.45 m/mes. En el pie los desplazamientos son más reducidos, de 1.6 m, con una tasa de 0.36 m/mes. La dirección media es al ENE en la cabecera y el cuerpo, siendo en este último caso muy uniforme (RVM de 0.91); en el pie la dirección es NE también bastante uniforme. Por su parte, el movimiento bajo la carretera presenta un desplazamiento horizontal medio de 0.4 m, lo que da una tasa más baja de 0.10 m/mes; la dirección media es hacia el N y bastante uniforme. Los desplazamientos verticales medios para este primer periodo son siempre negativos (descenso), de -1.0 m con una tasa de -0.23 m/mes en la cabecera; de 1.6 m con una tasa de -0.35 m/mes en el cuerpo; y de 0.1 m, con una tasa de 0.02 m/mes en el pie. El movimiento bajo la carretera presenta un desplazamiento vertical positivo, aunque muy bajo (0.03 m), con una tasa inferior a 0.01 m/mes. Los desplazamientos totales son de 2,3 m en la cabecera, con una tasa de 0,52 m/mes; 6,7 m en el cuerpo, con una tasa de

1,49 m/mes; y 1,6 m, con una tasa de 0,36 m/mes. La relación entre los desplazamientos verticales/horizontales (V/H) es mucho más elevada en la cabecera (0,50) y se reduce en el cuerpo (0,24) y sobre todo en el pie (0,06), como sucede habitualmente en los movimientos de tipo flujo. En el área inestable bajo la carretera, los desplazamientos totales son más bajos, de 0,46 m, con una tasa de 0,09 m/mes y una relación V/H de 0,09.

En el segundo periodo, los desplazamientos horizontales aumentan en la mayor parte del movimiento principal, no así las tasas, debido a la mayor amplitud de este periodo. Así, llegan a alcanzar valores medios de 3,1 m y una tasa de 0,26 m/mes en la cabecera; hasta 8,2 m y una tasa de 0,69 m/mes en el cuerpo; y de 1,2 m y una tasa de 0,1 m/mes en el pie, donde los valores y sobre todo la tasa son más bajos que en el periodo anterior. La dirección se comporta como en el caso anterior, hacia el ENE en la cabecera y el cuerpo hacia el NNE en el pie, con una mayor concentración en el cuerpo y el pie (RVM de 0,89 y 0,80, respectivamente) y mayor dispersión en la cabecera (RVM de 0,61). Por su parte, el movimiento bajo la carretera alcanza un desplazamiento medio de 2,1 m y una tasa de 0,17 m/mes, ambos sensiblemente mayores que en el primer periodo. Los desplazamientos verticales muestran un comportamiento similar con mayores valores absolutos, en este caso negativos (descensos del terreno), y menores tasas. Así, los desplazamientos medios son de -1,6 m, con una tasa de -0,13 m/mes en la cabecera; de -2,7 m y una tasa de -0,23 m/mes en el cuerpo; y de -0,2 m y una tasa de -0,02 en el pie. En el movimiento bajo la carretera los desplazamientos verticales medios son ahora de descenso, de -0,06 m, con una tasa muy baja aún, inferior a -0,01 m/mes. Finalmente, los desplazamientos totales alcanzan valores y tasas similares a los desplazamientos horizontales, más elevados que los verticales: de 3,5 m, con una tasa de 0,29 m/mes en la cabecera; de 8,7 m y una tasa de 0,73 m/mes en el cuerpo; y de 1,2 m y una tasa de 0,1 m/mes en el pie. La relación V/H se mantiene respecto al periodo anterior en la cabecera

(0,52), pero aumenta en el cuerpo (0,33) y sobre todo en el pie (0,20), lo que parece indicar una cierta contención horizontal del movimiento ya en este periodo, sobre todo en la parte más baja. En el movimiento bajo la carretera, los desplazamientos totales medios son de 2,1 m, con una tasa de 0,17 m, casi el doble que en el periodo anterior; mientras que la relación V/H disminuye (0,03), lo que indica un mayor desarrollo del movimiento en horizontal en este periodo.

En el tercer periodo, los desplazamientos horizontales y sus tasas experimentan una reducción drástica, alcanzando valores medios de 0,4 m, con una tasa de 0,02 m/mes en la cabecera; y de 0,8 m y tasas de 0,04 m/mes en el cuerpo y el pie. Como se puede observar quedan solo movimientos residuales en todas las partes del movimiento como consecuencia de las obras de estabilización y aplanamiento de la ladera, que hace que muchos puntos, sobre todo del cuerpo y del pie no se puedan reconocer en este periodo. La dirección sigue siendo la misma hacia el ENE en el escarpe y el cuerpo y al NE en el pie. Por su parte, los desplazamientos verticales sufren una cierta disminución, pero no tan drástica como en los horizontales. Así, en la cabecera el descenso es de -1,1 m, del mismo orden de magnitud que en los periodos anteriores, con una tasa de -0,05 m/mes; en el cuerpo, el descenso medio es de -0,8 m, claramente inferior al de los periodos anteriores, con una tasa de -0,04 m/mes; por el contrario, en el pie, el descenso es de 0,5 m, incluso superior en valor absoluto a los periodos anteriores, con una tasa de 0,03 m/mes. En el movimiento bajo la carretera, el descenso es de 0,5 m y la tasa de 0,03 m/mes, muy superiores a los de los periodos anteriores. Finalmente, los desplazamientos totales alcanzan más condicionados en este caso por los desplazamientos verticales que igualan o incluso superan a los verticales en algunos casos y en general bastante más reducidos que en los periodos anteriores. Así, los valores medios son de 1,1 m, con una tasa de 0,05 m/mes en la cabecera; de 1,2 m y una tasa de 0,06 m/mes en el cuerpo; y de

0,9 m y una tasa de 0,04 m/mes en el pie. La relación V/H aumenta de forma considerable respecto al periodo anterior en la cabecera (2,56), en el cuerpo (1,12) y en el pie (0,69), lo que parece indicar una cierta contención horizontal del movimiento en este periodo, por las obras de estabilización, y el desplome del terreno en sectores con mayor pendiente como los escarpes y cabecera. En el movimiento bajo la carretera, los desplazamientos totales medios son de 1,7 m, con una tasa de 0,09 m, menor que en el periodo anterior. La relación V/H aumenta en este caso (0,33), lo que indica un mayor desarrollo vertical del movimiento en este periodo.

En resumen, el movimiento principal experimenta un alto nivel de desarrollo en los dos primeros periodos analizados, con una mayor deformación en el cuerpo, respecto a la cabecera y el pie. En el segundo periodo los desplazamientos son mayores, pero no así las tasas, lo que indica una cierta ralentización del movimiento ya en esta fase. En el tercer periodo lo que se observan son desplazamientos residuales en algunos sectores de las distintas partes, como consecuencia de la estabilización del movimiento que tuvo lugar en este periodo. En general los desplazamientos horizontales y sus tasas correspondientes son mayores que las verticales, excepto en el último periodo debido a la contención horizontal que se produce por las labores de estabilización. La cabecera y los escarpes, ya formados en la primera fecha considerada, tienen una evolución más o menos constante en todo el periodo analizado; sin embargo, esta no es tan grande como en el cuerpo, ya que la deformación se ha transmitido ya esta parte; y, además, presenta una mayor componente vertical, debido al desplome o colapso de algunos sectores de los escarpes, especialmente en el último periodo. El cuerpo y el pie presentan un mayor grado de deformación, especialmente en el primero, con desplazamientos horizontales que llegan a superar los 10 m y tasas del orden de 1 m/mes en los dos primeros periodos, siendo los verticales más reducidos, lo que es característico de movimientos de tipo flujo.

A pesar de que en el mapa de vectores se aprecia una cierta transmisión relativa del movimiento de la parte alta del cuerpo a la parte baja, que es muy clara en el cuerpo, al calcular los valores, y sobre todo las tasas, lo que se constata más claramente es una ralentización general del movimiento en el segundo periodo, sobre todo en el sector del pie, probablemente por las actuaciones de contención y retirada de material de la carretera que se inician en este periodo. Esta ralentización se acentúa en el tercer periodo, donde se produce una reducción drástica de la deformación en el cuerpo y el pie, donde solo quedan sectores con una actividad residual.

#### **4.3.5. Desplazamientos medidos a partir de correlación digital de imágenes**

En este apartado se presentan los resultados de la aplicación de las técnicas de correlación digital de imágenes para la estimación de desplazamientos horizontales (y verticales en el caso del método basado en SfM).

##### **4.3.5.1. Software Cosi-Corr**

Los resultados obtenidos en la aplicación de este software para la detección de desplazamientos horizontales se muestran en los mapas de las Figura 109. En este caso se han aplicado solo al primer y segundo periodo, ya que los cambios ocurridos en el tercer periodo (obras de estabilización de la ladera) impiden encontrar patrones reconocibles entre la tercera y la cuarta imagen.

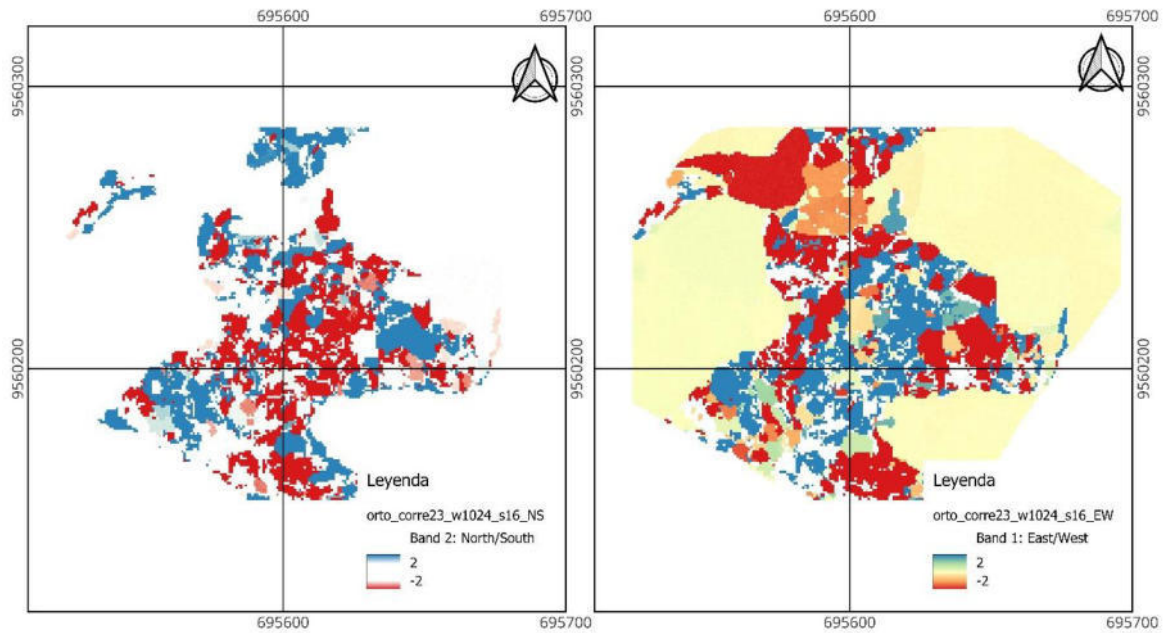


Figura 109. Mapa de desplazamientos horizontal en la dirección N-S a) y E-W b) correspondientes al sector del Plateado.

Para el primer periodo de análisis donde ya cabe esperar desplazamientos muy importantes se ha utilizado nuevamente la banda 3 (rojo) de las ortoimágenes como imágenes de partida, remuestreadas a 0.25 m con una ventana de 256 pixeles de inicio y 32 pixeles de final y un paso de 16 pixeles. Las pruebas realizadas con la imagen original solo empezaban a presentar resultados con una cierta coherencia con ventanas iniciales de 1024 pixeles, lo que producía una gran pérdida de pixeles resultante en la periferia de la zona. Como en las zonas anteriores, se han realizado muchas otras pruebas con otras imágenes (sombreados, pendientes...), tamaños de ventana y paso, y en este caso, con resoluciones de la imagen de ventana. La combinación antes indicada es la que da resultados más satisfactorios, dentro de la dificultad que ofrece el análisis en esta zona con grandes cambios y menor coherencia entre las imágenes de partida. Como se puede observar, la combinación es similar a las utilizadas finalmente en las otras zonas, una vez

remuestreada la resolución de las ortoimágenes de la banda 3 a 0,25 m. Se han encontrados sectores con alto coeficiente SNR, en el área del movimiento principal, con desplazamientos más o menos coherentes, de unos 2-5 m (positivos) en la componente N-S y unos 5-10 (positivos) en la componente E-W, lo que conduce a desplazamientos bastante notables al ENE. Secundariamente se observa otro sector de cierta coherencia en el área de la inestabilidad menor con desplazamientos menores en ambas direcciones.

En el segundo periodo, en el que también cabe esperar grandes desplazamientos, se ha partido también de la banda 3 (rojo) de las ortoimágenes remuestreada a 0,25 m, igualmente con una ventana de 256 píxeles de inicio y 32 píxeles de final y un paso de 16 píxeles. Aquí vuelve a aparecer el sector con buena coherencia (bajo SNR) en área del movimiento principal, con desplazamientos muy similares al periodo anterior, de 2-5 m (positivos) en la componente N-S; y algo mayores, de 5-10 en la componente E-W; lo que indica desplazamientos moderados hacia el ENE, como anteriormente.

#### **4.3.5.2. Método basado en SfM**

La aplicación de este método prácticamente no proporciona resultados fiables en la zona del Plateado, debido fundamentalmente a la escasa correlación que presentan las imágenes, debido a los importantes cambios y desplazamientos producidos; no solo en el tercer periodo, sino también los dos primeros.

#### **4.3.6. Caracterización geotécnica de los materiales afectados**

En la Tabla 47 se muestran los resultados de los ensayos realizados a las muestras de suelo. A nivel de cabecera se ha determinado suelos arcillosos de alta plasticidad (CH) y a nivel de cuerpo y pie, limos inorgánicos (MH-OH).

Tabla 47. Resumen de los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas a las muestras de suelo obtenidas en la ladera.

Ubicación	Muestra	W (%) <sup>+</sup>	LL	W (%)*	LP	SUCS	φ	C (kg/cm <sup>2</sup> )
Corona	1	28.55	59.7	27.6	5.86	CH	27°	1.65
	2	28.00	59.4	27.3	6.04	CH		
	3	28.26	60.1	27.4	6.17	CH		
Cuerpo	1	34.22	67.9	33.8	38.3	MH-OH	22°	0.37
	2	34.12	67.0	33.8	37.6	MH-OH		
	3	34.31	66.3	33.6	37.4	MH-OH		
Pie	1	40.51	86.2	39.9	37.6	MH-OH	11°	0.34
	2	41.02	84.6	39.9	37.1	MH-OH		
	3	40.74	86.0	39.1	38.7	MH-OH		

<sup>+</sup> Contenido de humedad obtenido en laboratorio. <sup>\*</sup> Humedad registrada en campo con el sensor SM300.



### **4.3.7. Discusión de la zona de estudio de El Plateado**

En este apartado, se presenta en primer lugar una discusión sobre la precisión e incertidumbre de los datos obtenidos; en segundo lugar, se discute sobre la caracterización de la zona y el movimiento de ladera a partir de las ortoimágenes, los modelos y sus derivados; en tercer lugar, se resumen y comparan los resultados de las medidas de desplazamientos con vistas a conocer la evolución y cinemática del movimiento diferenciado.

#### **4.3.7.1. Precisión de MDE y ortoimágenes**

La precisión de los modelos y ortoimágenes se estableció a priori en el proceso de orientación fotogramétrica a partir de los errores en los puntos de control y chequeo. Así, los errores en la componente XY están en el rango de 0.035-0.053 m para los primeros y entre 0.025-0.041 m para los segundos. Por su parte, los errores en la componente vertical están respectivamente en el rango de 0.023-0.034 m y de 0.025-0.041 m. Estos errores se encuentran como es lógico dentro de las incertidumbres establecidas para todas las zonas de trabajo, ya que se consideraron en su momento para fijarlas: 0.10 m para la componente horizontal de las ortoimágenes y 0.15 m para la comparación entre puntos de dos ortoimágenes; e igualmente 0.10 m para los MDS y 0.15 m para los MdD. En este caso, están particularmente por debajo, siendo los errores inferiores a los de las otras zonas.

Sin embargo, como en las zonas previas, la extracción de los puntos significativos en las ortoimágenes y MDS entre cada dos vuelos consecutivos y el cálculo de los desplazamientos horizontales y verticales en la zona considerada estable permiten testear la precisión. Así, los desplazamientos horizontales tienen una media de 0.132-0.151 m y una desviación típica de 0.123-0.166 m, en general por debajo de la incertidumbre horizontal a priori, aunque el segundo periodo lo sobrepasan ligeramente. Por su parte,

los desplazamientos verticales presentan un valor medio entre -0.131 y 0,072 m y una desviación típica entre 0.178 y 0.234 m, las últimas algo por encima de la incertidumbre vertical a priori. Sin embargo, si como ya se hiciera en las zonas anteriores las incertidumbres se elevarán hasta 0.20 m para la componente horizontal y 0.25 m para la vertical, los errores encontrados en esta zona estarían también dentro del umbral.

#### **4.3.7.2. Caracterización de los movimientos**

La caracterización general del movimiento de ladera y el área de inestabilidad general, sus elementos y otras inestabilidades presentes en la zona se realiza fundamentalmente a partir del análisis de la ortoimagen, el MDS, perfil y modelos derivados de la primera fecha considerada.

Así, la fotointerpretación de las ortoimágenes, la representación pseudo-3D de la nube de puntos y el mapa de sombreado han permitido reconocer un movimiento de ladera principal en la zona de estudio y otras inestabilidades menores, así como identificar, delimitar y digitalizar en el SIG sus distintos elementos como los diversos tipos de escarpes. Esta identificación de elementos y objetos ha seguido las pautas clásicas de la fotointerpretación, como son fundamentalmente el análisis del color (imágenes RGB), incluyendo las sombras, y el análisis textural.

El movimiento de ladera principal presenta una morfología característica de un flujo de tierras que, a diferencia de las zonas anteriores, alcanza un alto grado de desarrollo ya desde la primera fecha, y que avanza hacia un grado avanzado a lo largo del periodo de monitorización. Así, el movimiento tiene varios escarpes bien formados (principal, laterales, secundarios e incluso contrapendiente), una corona y cabecera, así como un cuerpo bien diferenciado con un lóbulo lateral y el pie. La descomposición de la masa por su intensa deformación, con formación de abundantes grietas y escalones (escarpes en

algunos casos) en la cabecera, el cuerpo y el pie conduce a una tipología de tipo flujo de tierras, como corresponde al material predominante, una arcilla laminada con vetas de yeso, junto areniscas y conglomerados. Además del escarpe trasero principal de unos 3-4 m se desarrollan escarpes laterales en la parte alta de los flancos, especialmente en el derecho. La coronación sobre el escarpe principal muestra también grietas como preludio de la retracción de este en las fechas subsiguientes y la cabecera está muy descompuesta sin que llegue a formar una plataforma clara ni llegue a presentar signos de rotación. Sin embargo, en el cuerpo, que está muy bien diferenciado de otros elementos, sí se observan escarpes secundarios, alguno de los cuales es contrapendiente por el hundimiento de algunos sectores frente a otros que quedan más elevados. En la parte baja, sobre la carretera se forma un cuerpo secundario y sobre todo un pie que invade claramente la misma por lo que tiene que ser continuamente retirado, excavando un talud bastante pronunciado y desestabilizando aún más la masa. De cualquier manera, el movimiento observado se encuentra en una zona inestable como ya se indicó, y prueba de ello son las otras inestabilidades menores encontradas a favor de vaguadas, sobre todo la que se inicia bajo la carretera con un pequeño escarpe y un cuerpo que luego se desarrollan mucho más a lo largo del periodo de monitoreo. La vegetación de la zona responde a la presencia de algunos sectores con arbolado en torno a las vaguadas y con cultivos, como el de maíz en la parte superior de la ladera; el resto es vegetación herbácea y matorral que en sector del movimiento se pierde en buena medida.

La observación detallada del MDS y los modelos derivados, junto al análisis correspondiente, permite la caracterización general de la ladera y el movimiento. Así, prescindiendo de las distorsiones que introducen árboles aislados y los cultivos, se observa una secuencia de laderas orientadas alternativamente al NW y al E, separadas por vaguadas y divisorias de dirección NNE. La pendiente general del área estable es

moderada, de unos  $15.6^\circ$ , con una buena iluminación media (las laderas al NW están muy bien iluminadas y las al E menos), un TPI próximo a 0 (desviación típica de 0,1), rugosidad baja (0,04) y TWI moderado como corresponde a un conjunto de laderas bien drenadas por las vaguadas correspondientes.

El movimiento cambia esta disposición de forma clara en su conjunto (cuerpo y pie) y de forma más drástica en los escarpes. Así la cabecera y el cuerpo interrumpen la secuencia de la orientación de las laderas, ya que, dentro de una ladera orientada al E, presentan una orientación media al ENE ( $56-66^\circ$ ), aunque la forma lobulada del cuerpo (ligeramente convexa con eje ENE) deja una parte sur orientada al NNE y una parte norte orientada al ESE. Esto se refleja de forma clara en el sombreado cuyo valor medio es inferior al de la ladera (154-158), pero que claramente presenta un parte sur con alta iluminación y una parte alta poco iluminada; la cabecera aparece menos iluminada que la ladera por su orientación media al ENE. La pendiente y la rugosidad de ambos elementos son algo más elevadas que el área estable (23,3 y 0,06, respectivamente, para la cabecera, y 19,8 y 0,05 para el cuerpo). El TPI a resolución de 0,05 m muestra todavía un valor muy bajo de la desviación típica (0,02 en ambos casos), pero el de resolución 1 m permite extraer numerosas líneas de ruptura de la pendiente en relación a los escarpes, escalones y rellanos que se forman en estas áreas. El TWI medio es ligeramente más bajo en ambas áreas (1,74 y 1,88); hay que tener en cuenta que el movimiento interrumpe la red hidrográfica de la ladera y forma una nueva internamente, estando estas áreas en la parte alta y media de las mismas. Por lo tanto, la cabecera y el cuerpo presentan como factores diferenciales respecto al cuerpo prácticamente todos, es decir, la orientación y el sombreado, una pendiente y rugosidad media superiores, junto al TPI y el TWI. Entre ellos, solo la orientación-sombreado y la pendiente permiten establecer algunas diferencias.

Hacia la parte baja se desarrolla un pie y un lóbulo secundario del cuerpo, que muestran algunos factores diferenciales respecto al cuerpo del movimiento y el área estable. Así, la orientación está más virada al N en ambos casos probablemente por la presencia de la carretera, que modifica la orientación del terreno y, por lo tanto, tiene incidencia en la generación y desarrollo del movimiento. Como consecuencia, el sombreado también es distinto, presentando estos sectores mayor iluminación que el cuerpo e incluso que el área estable (189). La pendiente es también claramente superior, en torno a 27-28°, lo mismo que la rugosidad (0.07), especialmente si se considera la de 1 m. El TPI a resolución de 0,05 m no muestra diferencias con el cuerpo, siendo los valores próximos a 0 (desviación típica de 0.02); pero a resolución de 1 m permite extraer líneas de ruptura superiores e inferiores en relación con escarpes y escalones, y además la línea inferior que coincide con la punta o terminación del pie, sobre la carretera. El TWI muestra valores superiores al pie y similares ya a los del área estable (2,06-2,22) como corresponde a la parte más baja del movimiento, donde confluyen los flujos de escorrentía internos del mismo. Nuevamente prácticamente todos los factores, pendiente y rugosidad, orientación y sombreado, TPI y TWI actúan como diferenciadores, en este caso respecto al cuerpo de movimiento, pero también respecto al área estable.

De forma más clara aún se pueden diferenciar los escarpes. Los valores de orientación media de todos ellos indica una inclinación más tendente al NNE, especialmente de los secundarios (N) que se sitúan preferentemente en la parte sur del cuerpo que como se indicó anteriormente tenía esta orientación, por lo que en realidad no se distinguen bien de su entorno con este factor. Por su parte, el escarpe principal, con su forma semicircular; y sobre todo los laterales, el izquierdo orientado al E y el derecho al N, tienen una orientación cambiante que a veces permite distinguirlos de su entorno, como el escarpe del flanco derecho (N) que contrasta fuertemente con el cuerpo orientado al SE, y otras

no tanto. Los escarpes que mejor se distinguen con la orientación son lógicamente los contrapendientes cuya orientación general al W contrasta con la orientación general del cuerpo al ENE. En cuanto a la pendiente, todos los tipos de escarpe se caracterizan por una mayor pendiente media que el resto de elementos, especialmente el principal ( $53.5^\circ$ ), y en menor medida los contrapendientes ( $48^\circ$ ), los secundarios ( $43.7^\circ$ ) y los laterales ( $41^\circ$ ). Los dos factores anteriores tienen su reflejo en el sombreado, muy cambiante respecto al entorno por su orientación, aunque la pendiente tiende a que presenten una menor iluminación general, sobre todo en el caso del escarpe principal (142), pero no así en el de los contrapendiente (195). El TPI a resolución de 0,05 m ya muestra valores diferenciales con respecto a los demás elementos con valores de la desviación típica entre 0.05 y 0.08, pero especialmente en el escarpe principal que se dispara hasta 0.13. Además el TPI de resolución 1 m permite extraer las líneas de ruptura de la pendiente superiores e inferiores de cada uno de ellos, siendo estas especialmente continuas y claras en el escarpe principal y los laterales. El TRI a 0.05 m muestra igualmente valores sensiblemente superiores (0.13-0.16) al resto de elementos, de nuevo más destacadamente en el escarpe principal (0.22). Finalmente, el TWI muestra valores bajos, ya que los escarpes están en la parte alta de las líneas de flujo de escorrentía; especialmente en el caso de los escarpes contrapendiente y principal que supone una ruptura en los flujos, presentando valores negativos (-0.24 y -0.69, respectivamente). Como se puede observar, de nuevo prácticamente todos los factores son diferenciadores, tanto la pendiente y la rugosidad como el TPI y TWI; y con variaciones para los distintos tipos de escarpes, también la orientación y el sombreado.

En cuanto a las otras áreas de inestabilidad, el movimiento de carácter incipiente bajo la carretera también presenta diferencias en los factores que permiten diferenciarlos. Así, en una ladera orientada al NE, la orientación general del movimiento es al NNW y por lo

tanto su cuerpo, cabecera y el incipiente pie están más iluminados, no tanto su escarpe. La pendiente del cuerpo, cabecera y pie son algo mayores (19, 20 y 30°, respectivamente) que la del área estable, en la misma línea que las partes equivalentes del movimiento principal; mientras que la de los escarpes principal y secundarios lo son más aún (41 y 36°), aunque no tanto como la de sus homólogos en el movimiento principal, como corresponde a su menor grado de desarrollo y magnitud. La rugosidad apunta en la misma línea, algo mayor que en el área estable (0.04-0.07) y mucho mayor en los escarpes (0.10-0.12). El TPI a resolución de 0,05 m muestra valores algo más altos que el área estable (0.02-0.05), pero lo más interesante es la extracción de líneas de ruptura de la pendiente, especialmente las superiores, en los escarpes y escalones del terreno. En cuanto al TWI, este muestra nuevamente valores similares al área estable en el cuerpo (2.35), y mucho menores en los escarpes (0.77 y 1.35). De nuevo, prácticamente todos los factores, pero especialmente la pendiente y el TPI, actúan como factores diferenciadores.

Los datos resumidos de los factores diferenciales se muestran en la Tabla XX.

Tabla 48. Resumen de los factores diferenciales en la zona de El Plateado.

	<b>Rang/A</b>	<b>Pend.</b>	<b>Orient.</b>	<b>Somb.</b>	<b>TPI-DT</b>	<b>TRI</b>	<b>TWI</b>
<b>Movimiento principal</b>							
Escarpe principal	8,14	53,53	24,00	142,10	0,13	0,22	-0,69
Cabecera	2,32	23,25	56,06	153,75	0,02	0,06	1,74
Escarpes laterales	4,20	40,97	31,13	159,69	0,06	0,13	1,02
Escarpe secundario	8,72	43,65	9,98	178,85	0,05	0,13	1,04
Escarpes contrapend.	5,69	48,02	267,08	195,06	0,08	0,16	-0,24
Cuerpo	0,69	19,84	65,60	157,98	0,02	0,05	1,88
Cuerpo secundario	1,61	26,75	23,80	180,52	0,02	0,07	2,06
Pie	1,29	27,76	21,35	188,91	0,02	0,07	2,22
<b>Otros deslizamientos</b>							
Escarpe	2,06	40,95	321,54	226,74	0,05	0,12	1,35
Cabecera	1,91	18,83	314,97	206,77	0,02	0,04	2,01
Escarpes secundarios	1,84	35,99	99,77	123,35	0,04	0,10	0,77
Cuerpos	0,67	20,21	348,10	203,11	0,02	0,05	2,35
Pies	0,99	29,98	22,26	182,28	0,02	0,07	2,07
<b>Área estable</b>							
Área estable	0,32	15,61	15,22	180,02	0,01	0,04	2,38

Los perfiles corroboran la interpretación y el análisis realizado. Así, el perfil longitudinal general (A), que coincide con la dirección general de avance del movimiento, permite apreciar la forma irregular que presentan el movimiento de ladera desde su coronación hasta el pie sobre la carretera. Así desde una pendiente que en la coronación del escarpe principal es moderada hacia el W, aparece de forma clara el escarpe principal con una pendiente muy fuerte y líneas de ruptura muy acusadas. Este termina en el área de la cabecera inclinada moderadamente en el mismo sentido que el movimiento general hacia el ENE, sin evidencias de rotación. A partir de ahí comienza el cuerpo, inclinado en general hacia el ENE, pero interrumpido constantemente por escalones, grietas y escarpes pronunciados, algunos de ellos contrapendiente como el que aparece cerrando la



cabecera. El movimiento desarrolla un pie muy bien formado, donde se siguen observando escalones y rellanos, con un talud sobre la carretera, en parte de carácter artificial, que termina en la punta que invade parcialmente la propia carretera.

En el perfil transversal de la parte central se observa la forma lobular, es decir, convexa que se detecta con los modelos de orientación y sombreado. Dentro de ella se observan también escalones y escarpes, que en muchos casos se forman en estas direcciones oblicuas y no tanto perpendicularmente a la dirección principal del movimiento, por la presencia del talud de la carretera, que en este perfil se observa muy bien con su notable pendiente ya que es transversal a él. En el otro extremo se observa el escarpe lateral izquierdo que produce un resalte importante y acaba en un sector deprimido, como consecuencia de la fricción lateral del movimiento con su flanco-escarpe y la propia forma lobular del cuerpo. En este sector terminan concentrándose las aguas de escorrentía formando una línea de flujo, que junto con otra línea similar en el otro flanco y otras más pequeñas que se forman en el centro del cuerpo y el pie, drenan el área del movimiento.

#### **4.3.7.3. Cinemática y evolución del movimiento de ladera**

En este apartado, en primer lugar se analizarán la coherencia entre los distintos métodos de medida de los desplazamientos, tanto automáticos como los manuales y sobre el terreno. Una vez hecho esto, se examinarán las observaciones realizadas en los perfiles y los modelos derivados en relación con los desplazamientos medidos. Finalmente se hará una reconstrucción de la evolución del movimiento.

Los MdD y las correspondientes proyecciones sobre el plano de las distancias entre las superficies 3D muestran una coincidencia bastante grande en la comparación visual en los tres periodos analizados. Así, en el primero, se aprecian en ambos casos descensos en la parte de la cabecera y parte alta del cuerpo, más concretamente en el escarpe principal,

laterales y secundarios, que son mucho más acusados en el MdD; por el contrario, se aprecian ascensos en algunos sectores del cuerpo y el pie, que invade de forma importante la carretera, de nuevo mayores en el MdD. De esta forma, se observan diferencias positivas bastante importantes (3-4 m) entre el mapa de distancias 3D y los MdD en el escarpe principal y más moderados en otros como los laterales y secundarios; las diferencias pasan a ser negativas si se restan los valores absolutos, lo que indica que las distancias 3D son mucho menores que los MdD, lo que es lógico en una superficie inclinada que experimenta una retracción, que en este caso son de 0.5-1 m en el escarpe principal. En realidad, más que en el escarpe, las diferencias se producen en la coronación contigua al escarpe, es decir, que este sector que en la primera fecha era coronación pasa a ser escarpe en la segunda. En la cabecera y el cuerpo, a pesar de los desplazamientos que se producen, las diferencias entre el mapa de distancias 3D y el MdD suelen ser pequeñas como corresponde a una superficie poco inclinada; solo alcanzan valores moderados en relación con los escarpes, siendo positivos en la parte alta de los mismos y negativa en la parte baja; y siempre negativas cuando se comparan los valores absolutos. En el sector del pie, que presenta pendientes elevadas en esta zona, se observan diferencias negativas de 1-2 m en la punta tanto cuando se restan los totales como los valores absolutos; es decir, que los ascensos observados en el mapa de distancias 3D son inferiores al MdD como cabe esperar. En conjunto, las diferencias en valor absoluto son nulas o negativas en todo el movimiento, y solo se observan diferencias positivas en sectores con vegetación o en sectores muy irregulares como la transición entre el cuerpo y la cabecera, donde aparecen escarpes y rellanos, escarpes contrapendiente, etc. En la inestabilidad bajo la carretera, donde los cambios en las distancias 3D y los MdD son muchos más moderadas, con suaves descensos en la parte alta y suaves ascensos en la parte baja, las diferencias entre los mapas de uno y otro método son muy sutiles.

En el segundo periodo, los escarpes principal y lateral son bastante estables en las distancias 3D e incluso el MdD, y los mayores cambios se desplazan ladera abajo, hacia la cabecera y sectores del cuerpo más avanzados, en lo que parece una transmisión del movimiento de la parte más alta a la más baja. Sin embargo, en el pie y la punta se observa un descenso claro de la superficie, que debe estar relacionado con las obras de limpieza de la carretera que invadió previamente el trazado de la carretera. Las diferencias entre el mapa de distancias 3D y los MdD son ahora más reducidas, de apenas 1-1,5 m y están relacionadas con los escalones, escarpes y rellanos de la cabecera y el cuerpo; las diferencias positivas se producen en los escarpes y las negativas en los rellanos, siendo en ambos casos negativas si se consideran los valores absolutos. En el pie se produce se aprecian diferencias positivas entre el mapa de distancias 3D y el MdD, negativas en la resta de valores absolutos, como corresponde a un sector de cierta pendiente donde se produce un descenso de la superficie, en este caso como consecuencia de la retirada de material de la carretera. En el movimiento bajo la carretera donde se produce una intensificación de los descensos en la parte alta y los ascensos en la baja, las diferencias entre el mapa de distancias 3D y los MdD son algo mayores que en el period anterior y negativas si se consideran los valores absolutos.

En el tercer periodo, lo que se produce es un descenso importante en sectores amplios del cuerpo y del pie, como consecuencia del aplanamiento de la ladera en las obras de estabilización del movimiento y la retirada de material; en algunos sectores de los escarpes principal y laterales se aprecian descensos por el desplome o caída de bloques de material. Así, prescindiendo de las diferencias que se observan en los sectores con vegetación que ahora son muy llamativos, lo que se observan son diferencias generalmente moderadas y negativas en amplias áreas del cuerpo y en la punta del pie del movimiento, como corresponde a sectores de pendiente moderada que experimentan

descensos; estas diferencias son positivas si se restan los valores absolutos. Sin embargo, en algunos tramos de los escarpes principal y secundarios, las diferencias negativas, positivas para los valores absolutos, son mucho más acusadas, al ser sectores de pendiente fuerte. El movimiento bajo la carretera continúa su evolución, aumentando los valores de las diferencias positivas entre los valores absolutos del mapa de distancias 3D y el MdD, sobre todo en el escarpe principal, que cada vez es más pronunciado.

Por lo que respecta a los mapas de desplazamientos horizontales obtenidos con Cosi-Corr, se han analizado solo los correspondientes a los dos primeros periodos, ya que los cambios que se producen en el tercero son tan importantes que impiden la correlación entre imágenes. Así, en el primer periodo se estiman desplazamientos más o menos coherentes, de unos 2-5 m (positivos) en la componente N-S y unos 5-10 (positivos) en la componente E-W, que en conjunto producen desplazamientos de 6-12 m al ENE en el sector del cuerpo y 5-8 m el pie. A grandes rasgos coinciden con sectores de mayores desplazamientos en el MdD y el mapa de distancias 3D. Secundariamente se observa otro sector de cierta coherencia en el área de la inestabilidad bajo la carretera con desplazamientos mucho menores, de 1-2 m hacia el N. En el segundo periodo, los desplazamientos estimados con Cosi-Corr son algo menos coherentes que los del primer periodo, por la menor correlación entre las imágenes, al producirse una mayor deformación. Aun así, se observan sectores en el cuerpo, no tanto en el pie, de parecidas magnitudes a las del periodo anterior, es decir, unos 2-3 m al N y 5-8 m al E, lo que conduce a desplazamientos horizontales totales de 5-10 m al ENE. Estos desplazamientos coinciden a grandes rasgos con los observados en los MdD y los mapas de distancias 3D, más destacados en este periodo en el cuerpo que en el pie.

Por lo que respecta a los desplazamientos medidos en puntos extraídos de los productos VANT, en primer lugar se van a analizar los desplazamientos horizontales en relación

con los estimados con el análisis de correlación de imágenes; y en segundo lugar, se analizarán los desplazamientos verticales en los MdD. Hay que tener en cuenta que en esta zona no se realizó monitorización con GNSS.

En cuanto a los desplazamientos horizontales, en el primer periodo se aprecian magnitudes y direcciones con una cierta uniformidad, tanto en la cabecera como en el cuerpo y el pie. En la cabecera los desplazamientos son moderados, entre 2 y 4 m en dirección ENE; en esta área no se observan desplazamientos coherentes en la estimación realizada con Cosi-Corr. En el cuerpo se alcanzan valores bastante más elevados, de entre 5 y 10 m, e incluso superiores en algunos puntos, también hacia el ENE; estos desplazamientos se reducen progresivamente hasta el sector del pie, donde los valores son de nuevo inferiores a 4-5 m en dirección NNE. Estos desplazamientos son compatibles con los estimados con Cosi-Corr en algunos sectores del cuerpo donde se alcanzan desplazamientos horizontales coherentes hacia el NE con magnitudes entre 5-10 m. Finalmente, en el área inestable bajo la carretera, se aprecia un desplazamiento horizontal medio inferior 0.5 m hacia el N, igualmente compatible con los estimados para esta área con Cosi-Corr. En el segundo periodo, los desplazamientos horizontales llegan a alcanzar valores de unos 3 en la cabecera y hasta 8 m en el cuerpo, ambos hacia el ENE; y de 1-2 m en el pie, hacia el NNE. Estos desplazamientos son compatibles en términos generales con los estimados con Cosi-Corr en algunos sectores del cuerpo, que son de unos 5-10 m al ENE; y en el movimiento bajo la carretera que es de unos 2 m hacia el N. En el tercer periodo, los desplazamientos horizontales no superan 1 m en ningún sector del movimiento, alcanzado valores más altos en puntos aislados de la cabecera, el cuerpo o el pie, hacia el NE. En este periodo, debido al cambio que experimenta el área del movimiento por las obras de estabilización, no se han podido estimar los desplazamientos por métodos de correlación de imágenes.

Por lo que respecta a los desplazamientos verticales, en el primer periodo se observan descensos en torno a -2-4 m en el escarpe, -1-2 m en el área de cabecera y hasta -2-5 m en la parte superior del cuerpo; lo que coincide en términos generales con el MdD, que muestra descensos -3-4 m en el escarpe y de -1-2 m en la cabecera y hasta -4-5 m en la parte superior del cuerpo, aunque en el detalle la coincidencia no sea total por los desplazamientos horizontales de la masa. Los descensos observados en los puntos son menores hacia la parte inferior del cuerpo (-1-2 m) y sobre todo en el pie, donde incluso se producen ascensos del terreno en algunos puntos en las inmediaciones de la carretera. El MdD presenta valores netos de descenso en diversos sectores del cuerpo de hasta -2 y -3 m, pero también ascensos en otros de hasta 1-2 m, lo que es compatible con un descenso generalizado de los puntos, debido al avance horizontal de la masa del deslizamiento que produce estos ascensos aparentes. Esta alternancia de valores positivos y negativos en el MdD se produce por la morfología escalonada del movimiento. Lo mismo sucede en el pie donde descensos y ascensos moderados de los puntos, por debajo de 1 m en términos absolutos, se observan como ascensos mucho más intensos, de hasta 3-4 m en el MdD, por el avance de la masa y la ocupación del terreno de más abajo e incluso de la carretera. En el resto de la zona, incluido la inestabilidad debajo de la carretera, los desplazamientos verticales son casi imperceptibles tanto en los puntos como en el MdD.

En el segundo periodo, los desplazamientos verticales de los puntos alcanzan descensos de -2-4 m en la cabecera, mientras que los escarpes se mantienen más estables y solo en algunos puntos se producen descensos leves; esto coincide bastante fielmente con los descensos observados en el MdD en este sector. En el cuerpo se observan descensos de -4-6 m, algo superiores en valor absoluto a los del periodo anterior, pero también suaves ascensos; sin embargo, en el MdD alternan sectores con descensos importantes de hasta -5 m y ascensos de hasta 1-2 m como consecuencia del desplazamiento de la superficie

de morfología escalonada; en general estas bandas de valores negativos y positivos del MdD aparece desplazada hacia debajo de la ladera. En el pie se producen descensos entre -1 y -2 m, sin que haya prácticamente puntos con ascensos del terreno, lo que también se observa en este caso en el MdD. Por su parte, en el movimiento bajo la carretera se llegan a observar descensos de más de 1-2 m en los puntos del escarpe y la cabecera que coinciden con descensos en el MdD de esa misma magnitud; y suaves ascensos en los puntos de la parte baja, inferiores a 1 m, que también se observan en el MdD.

En el tercer periodo, los desplazamientos verticales en los puntos que se pueden observar suelen ser negativos, en algunos sectores de los escarpes y la cabecera (descensos de 1-2 m), así como del cuerpo y el pie (2-4 m). Esto coincide en general con los descensos observados en estos sectores en el MdD; pero los cambios más importantes, con descensos de hasta 7-8 m en algunos sectores del cuerpo, coinciden con los puntos que no han podido ser reconocidos en la última fecha por los cambios del terreno como consecuencias de las obras de estabilización del movimiento. En el resto de la zona, en el movimiento bajo la carretera siguen apareciendo puntos con un descenso notable, entre 1-2 m en la cabecera y ascensos moderados en la parte, que coinciden con lo observado en el MdD.

El análisis de la evolución del movimiento a partir de los modelos derivados muestra, en este caso, bastantes aspectos de interés por los importantes cambios que se producen en la morfología del terreno con el desarrollo avanzado del movimiento. Así, de un movimiento ya formado en la primera fecha, con unas líneas claras de ruptura de pendiente extraídas a partir de los mapas de TPI, tanto en los escarpes principal y laterales como en los distintos escarpes secundarios observados a lo largo del cuerpo de la masa. El cuerpo aparece individualizado con una forma lobulada con un eje de dirección ENE según se desprende del mapa de orientación y termina en un pie que presenta una

orientación más hacia el norte, debido a la presencia de la carretera. El TWI permite observar la formación de dos canales de drenaje en el entorno de los dos flancos laterales y una red más irregular en general en el interior del deslizamiento. La pendiente inicial media en la zona del deslizamiento es de  $24^\circ$  calculada a partir del área total y de  $18-22^\circ$  en los dos perfiles más significativos (longitudinal y oblicuo-centrado), lo que se explica por qué el trazado de los perfiles incluye parte de terreno sobre la coronación y de la carretera bajo el pie.

En las dos siguientes fechas (vuelos de 09/06/2017 y 08/06/2018), que completan el primer y segundo periodo analizados, se aprecia un avance de la masa del deslizamiento, que se puede estimar a partir de los escarpes secundarios y contrapendiente observados en los modelos derivados de orientación, pero también de la pendiente, TPI y TRI. Las franjas de orientación al WSW de los escarpes contrapendiente frente a la orientación general al ENE permite estimar desplazamientos de 5-8 m en ambos periodos, compatibles con los detectados en los puntos extraídos desde los productos VANT. De la misma forma las bandas con mayor pendiente y rugosidad correspondientes a los escarpes secundarios y contrapendiente, respecto a los rellanos, permiten hacer estimaciones similares; en el caso del escarpe principal y laterales, en estos modelos se aprecia la retracción de 1-2 m. Sin embargo, las observaciones más interesantes se hacen sobre las bandas de valores positivos y negativos del TPI, y más específicamente, sobre las líneas de ruptura de la pendiente. Así, se puede observar el retroceso del escarpe principal y laterales de 1-2 m entre la primera y la segunda fecha (Figura 110 a); en el caso del pie se observan avances de unos 3 m en el primer periodo (primera y segunda fecha) y 2 m en el segundo periodo (segundo periodo; Figura 110 b). En cuanto al TWI, la configuración va cambiando en las tres primeras fechas, pero no de forma importante; es



decir, se mantienen los dos drenajes laterales en los flancos y la red interna del movimiento que tiende a acumular agua en el pie.

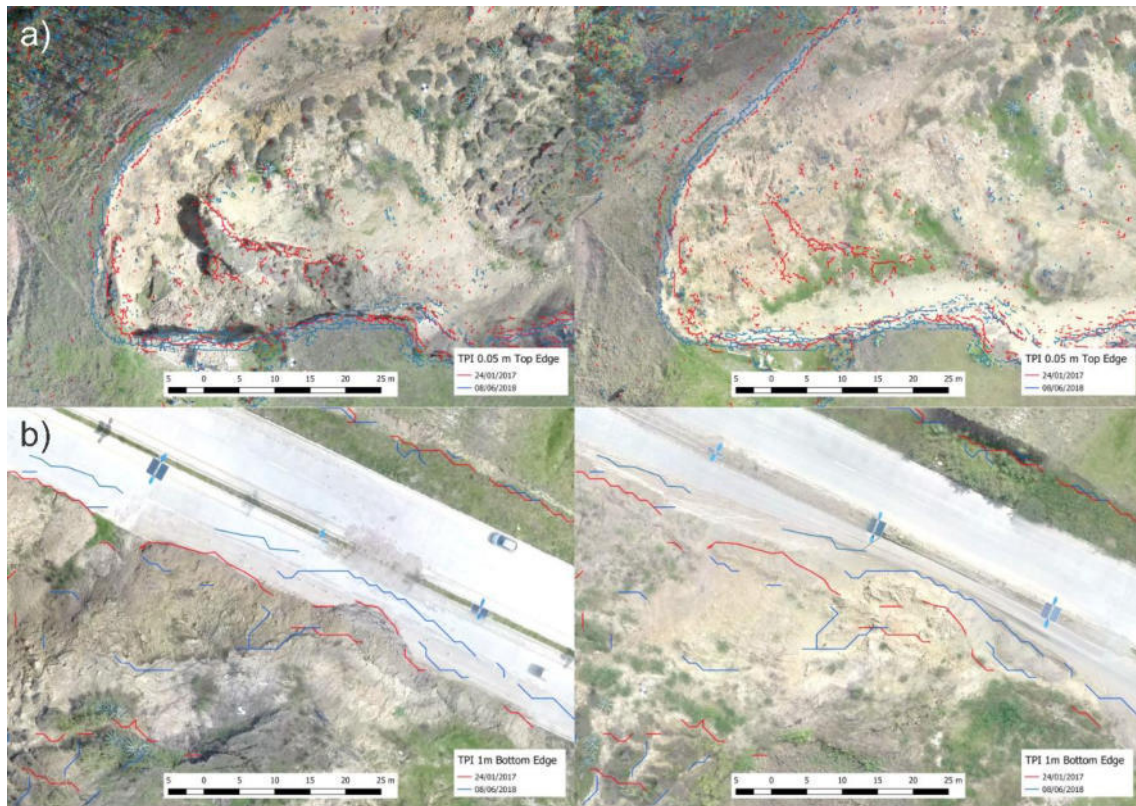


Figura 110. Detalle de la evolución del deslizamiento en base a líneas de rotura de talud: (a) retroceso del escarpe principal con bordes superiores extraídos de TPI 0.05 m sobre la imagen del 24/01/2017 (izquierda) y la imagen del 08/06/2018 (derecha); (b): avance de la puntera con bordes inferiores extraídos de TPI 1 m sobre la imagen del 24/01/2017 (izquierda) y la imagen del 08/06/2018 (derecha).

En la última fecha (12/03/2020) se producen cambios importantes con la desaparición de los escarpes secundarios y contrapendiente, como se observa sobre todo en los modelos de orientación; y en general se suaviza la morfología del cuerpo, con una reducción de la pendiente y la rugosidad, todo ello como consecuencia del aplanamiento de la ladera. Igualmente se dejan de observar los valores elevados en el TPI relacionados con los escarpes y rellanos en el sector del cuerpo, pero se mantiene e incluso se intensifican algo en el escarpe principal y laterales; en estos además se observa una nueva retracción de 0.5-1 m por el desplome de algunos tramos. En el pie también se observa un nuevo

retroceso de la línea que marca la punta de la masa, de aproximadamente 2,5 m, por la retirada de material de la carretera. El TWI de la última fecha presenta una estructura menos jerarquizada y más irregular del drenaje, al modificar la forma del terreno natural.

En conjunto, a partir de todo lo expuesto, considerando la visión sinóptica que posibilitan los perfiles, se puede reconstruir bastante bien la evolución del movimiento principal y la ladera en general.

El movimiento ya estaba desarrollado antes de comenzar las campañas de monitorización con vuelos RPAS (24/01/2017); así, se aprecia ya un escarpe principal bien formado y distintos escarpes secundarios a lo largo del cuerpo del movimiento. El cuerpo aparece individualizado con una forma lobulada y termina en un pie que deja un talud sobre la carretera. La pendiente inicial media del deslizamiento es fuerte, superior a  $20^\circ$ , pero presenta bastantes rupturas, dando lugar a una sucesión escalonada con escarpes, rellanos y grietas, en algunos casos con contrapendientes, como la que se observa en el escarpe situado a continuación de la cabecera. En las dos siguientes fechas se aprecia un avance significativo de la masa del deslizamiento, que se puede observar por el avance de las formas (escarpes secundarios, contrapendiente, rellanos, pie) ladera abajo. Así, en el perfil longitudinal (A) se estiman descensos de la masa de unos 3-5 m y avances en torno a 10-20 m, en la zona de cabecera y el cuerpo, repartida prácticamente por igual en cada uno de los periodos, lo que hace que la velocidad media sea aproximadamente el doble en el primer periodo (descenso en torno a 0,3-0,5 m/mes y avance de unos 1-2 m/mes) que en el segundo (0,2-0,3 m/mes y 0,5-1 m/mes, respectivamente). En el pie, el avance de la masa es de unos 2-3 m, que mayoritariamente se producen en el primer periodo con una velocidad estimada de en torno a 0,5-1 m/mes, aunque puede estar subestimada por la retirada de material en la zona de la carretera. En la última fecha (12/03/2020) se aprecia claramente una forma mucho más aplanada de la ladera con retirada del material

del cuerpo y del pie, aunque se sigue conservando el talud sobre la carretera. En esta fecha se observa un descenso de la superficie que se va haciendo progresivamente mayor hacia la parte baja del cuerpo y el pie, donde llega a ser de unos 5 m respecto a la tercera fecha y de unos 8 m respecto a la primera.

La evolución de ladera es compatible con un flujo de tierras en estado desarrollado que evoluciona a avanzado a lo largo de la monitorización y termina siendo estabilizado a final de la misma. Los desplazamientos observados son similares en los dos primeros periodos, aunque las tasas son prácticamente el doble en el primero, más corto, que en el segundo; en ambos casos el movimiento se puede catalogar como lento, siendo difícil que se llegue a una velocidad moderada, aunque todo el desplazamiento se acumulara en un evento más corto. Mientras tanto, en el tercer periodo se producen solamente movimientos residuales, con tasas muy lentas, en algunos sectores aislados, tras el aplanamiento y estabilización de la ladera. Las causas del movimiento y su tipología hay que buscarlas en la litología de arcillas y areniscas con lentejones de conglomerados en una zona de pendientes moderadas y fuertes, y probablemente en relación con la carretera que modifican las pendientes y la red hidrográfica. Los datos del análisis geotécnico establecen que la cabecera del movimiento está compuesta por arcillas de alta plasticidad, mientras que el cuerpo y pie están formados por limos de alta plasticidad. En presencia de agua estas litologías pueden llegar a ser altamente inestables, sobre todo cuando aparecen determinadas condiciones que favorezcan la infiltración del agua subterránea, como la presencia de lentejones de areniscas o conglomerados que hace acumular agua en las capas más impermeables de arcillas, incrementando las presiones intersticiales y, en consecuencia, reduciendo las presiones efectivas. Por otra parte, la acumulación de agua superficial por la modificación de los drenajes naturales debido a la presencia de la carretera puede también contribuir a estos procesos. Así, en el mapa de TWI se observan

las obras de drenaje transversal de los barrancos o vaguadas a ambos lados del movimiento; sin embargo, probablemente la red hidrográfica intermedia de la ladera que se concentra en algunos puntos no esté bien solucionada y produzca la acumulación de agua en algunos puntos del pie. Una vez que se produce la desestabilización de la ladera, la formación de grietas por el desplazamiento de material y por los procesos de hinchamiento-contracción de las arcillas de alta plasticidad favorece la infiltración de aguas, lo que acelera más el proceso. A ello se une la excavación del talud formado en el pie del movimiento que aún lo desestabiliza más.

Los movimientos de ladera se producen cuando, además de los factores intrínsecos de la ladera o factores determinantes de la inestabilidad (litología, pendiente, morfología, cubierta vegetal, etc.), actúan otros factores externos desencadenantes entre ellos la lluvia (Baldi et al., 2008; Fernández et al., 2015; Finlay et al., 1997; Galeandro et al., 2013; Guzzetti, 2003; Ram et al., 2019), sismos (De Blasio, 2011; Lari et al., 2014; Van Den Eeckhaut et al., 2007; Zeng et al., 2015), factores antrópicos (Dall'Asta et al., 2015), etc. Sin embargo, en este caso, la lluvia constituye el principal factor que incide en procesos de movimiento de ladera, como ha sido establecido en el entorno de la región de estudio donde se han podido determinar los umbrales de lluvia a partir de los cuales se originan los deslizamientos (Palenzuela et al., 2020). Al realizar una exploración superficial del terreno se pueden evidenciar la presencia de grietas y saltos en cabecera bien identificados (Figuras 11 b y c).

## **CAPITULO 5. CONCLUSIONES**

## **5. DISCUSIÓN GENERAL Y CONCLUSIONES**

Como en las discusiones particulares de cada zona, aquí se seguirá un esquema similar: primero se hará una reflexión general sobre las precisiones e incertidumbres de los datos; en segundo lugar, una discusión comparada sobre la caracterización de los movimientos y áreas inestables en las zonas de estudio; y tercero, una discusión sobre la cinemática de los movimientos estudiados en las distintas zonas.

### **5.1. Precisión e incertidumbre de los datos**

La precisión de las ortoimágenes y los modelos se estableció a priori en el proceso de orientación fotogramétrica a partir de los errores en los puntos de control y chequeo. Estos errores permiten establecer las incertidumbres de los desplazamientos, tanto horizontales como verticales.

Con respecto a las primeras, prácticamente en todos los casos, los errores horizontales son inferiores a 0.05 m, lo que de acuerdo a los criterios menos conservadores (Fernández et al., 2016) permitiría fijar la incertidumbre de las ortoimágenes en este valor; y de acuerdo a los más conservadores, que consideran la resolución de las imágenes (Tahar et al., 2013; Liu et al., 2015), lo haría en 0.15 m. Como ya se indicó en el apartado de metodología, se toma un valor intermedio, de 0.10 m, para la incertidumbre horizontal de las ortoimágenes, que es del mismo orden que la considerada en otros trabajos (Fernández et al., 2016) con similares características en la toma de datos (GNSS y VANT). A partir de aquí, la incertidumbre en la medida de desplazamientos horizontales a partir de los puntos extraídos de los productos VANT podría fijarse en 0.15 m, siguiendo el mismo procedimiento que seguido en los MdD (Brasington et al., 2000; Tarolli, 2014; Fernández et al., 2016; 2017).

Por lo que respecta a las incertidumbres verticales a priori, los errores verticales encontrados en los puntos de control y chequeo son más variables que los horizontales, pero en ningún caso se supera los 0.10 m, siendo en la mayoría de los casos inferiores a 0.05 m. De ahí que, empleando los criterios generalmente seguidos (DeWitte et al., 2008; Prokesova et al., 2010), se establezca la incertidumbre vertical de los MDS en 0.10 m y la de la medida de los desplazamientos verticales, incluidos los MdD, en 0.15 m (Brasington et al., 2000; Tarolli, 2014; Fernández et al., 2016; 2017).

Estas son las incertidumbres teóricas, establecidas a priori a partir de los errores estimados en el proceso de orientación fotogramétrica. Sin embargo, resulta conveniente comprobarlas sobre los productos VANT y los puntos extraídos de ellos en áreas estables, donde en principio los desplazamientos calculados deberían ser iguales a 0. Se ha tenido especial cuidado en seleccionar aquellos puntos que no estén situados sobre el terreno, eliminando los que se encuentren en sectores con vegetación o construcciones, sujetos por lo tanto a cambios durante el periodo de monitorización. Este procedimiento se ha seguido ya en trabajos previos (Fernández et al., 2016; Cardenal et al., 2019; Zárate et al., 2021).

Los resultados en todas las zonas muestran que los desplazamientos horizontales, tanto la media como la desviación típica, no exceden el umbral de 0.15 m de forma clara en ningún caso, por lo que esta incertidumbre es la que se considera finalmente para las medidas de desplazamientos horizontales. Por el contrario, en los desplazamientos verticales, aunque la media suele ser próxima a 0, lo que indica un buen ajuste general (los modelos están compensados verticalmente); la desviación típica sí superan en algunos casos el umbral de 0.15 m, lo que indica desajustes locales. Por ello, la incertidumbre para la medida de los desplazamientos verticales se termina fijando en 0.25 m.

No obstante, hay que considerar que las precisiones e incertidumbres responden al empleo de una tecnología que está en constante evolución y mejora. Así, la utilización de equipos provistos de GNSS-RTK que permiten determinar con mucha más precisión la posición de la cámara en el momento de disparo, posibilitan a su vez la mejora de la precisión de la orientación fotogramétrica y, por lo tanto, de los modelos; incluso reduciendo de forma drástica el número de puntos de control (Peppia et al., 2017; 2018; Fernández et al., 2022). Además, la reducción, o incluso la supresión, de los puntos de apoyo o control permite agilizar la captura de datos y posibilita la realización de un número mayor de campañas, especialmente en las fases de mayor actividad de los movimientos.

## **5.2. Caracterización de los movimientos y áreas inestables**

En las zonas de estudio se han identificado varios movimientos que por la observación inicial de la ortofotografía, los MDS y sus distintos derivados corresponden a:

- Zona de Victoria: Un área inestable de tipo reptación dentro de una ladera de orientación NE, en la que se distingue un sector más activo en la parte alta y otro menos activo en la parte baja. Se identifican un escarpe principal (activo) en su interior y unos escarpes traseros y laterales que la delimitan de forma discontinua. Adicionalmente, se observan una serie de inestabilidades menores correspondientes a pequeños deslizamientos y colapsos, a favor de un barranco. Afecta a pequeñas construcciones y cultivos diseminados por la zona, mientras que la carretera de la parte superior no parece sufrir mucha deformación.
- Zona de Colinas Lojanas: Un movimiento de tipo flujo de tierras en estado incipiente, en el que se distinguen algunos escarpes y cuerpo principal poco desarrollados, así como un pie con algunos rasgos (escarpes, frente y punta) algo más formados. El área correspondiente al flujo queda delimitada parcialmente por



los escarpes y fuera de ella se diferencia un área inestable, probablemente con procesos de reptación, en la que se forman algunos escarpes. Afecta a una carretera que discurre por la parte inferior; básicamente lo que ocurre es una invasión de la misma sin que se produzcan gran deformación. Asimismo afecta a varias construcciones, algunas de las cuales resultan completamente arruinadas.

- Zona de El Plateado: Un flujo de tierras en estado desarrollado-avanzado que consta de todos los elementos característicos de este tipo de movimientos. En la parte alta hay un escarpe principal y unos escarpes laterales que forman una corona semicircular, en la que se aprecian grietas de tracción. A continuación, aparecen una cabecera y un cuerpo bien formados, con escalones, grietas, rellanos y escarpes secundarios, algunos de ellos contrapendiente. Hacia la parte de abajo hay un pie bien desarrollado y muy deformado que invade y, probablemente empuja a la carretera que aparece en la parte inferior. Bajo ella se identifica otra inestabilidad más pequeña, con bastante probabilidad otro flujo de tierras en estado incipiente, donde se comienza a diferenciar un escarpe, cabecera y cuerpo.

El análisis visual y sobre todo cuantitativo (SIG) de los factores derivados del MDS permite, además de la identificación, la caracterización de los movimientos y de sus elementos. En este trabajo, se han evaluado la pendiente, orientación, sombreado, curvatura (TPI), la rugosidad (TRI) y un índice de humedad (TWI). Todos ellos aportan información para la caracterización y diferenciación de los elementos de los movimientos de ladera, aunque los que mejor comportamiento tienen son la pendiente y el TPI (curvatura), lo que coincide en términos generales con lo encontrado en las referencias (Kasai et al., 2009; Al-Rawabdeh et al., 2016; Chudy et al., 2019; Mauri et al., 2021). Otros factores como la rugosidad (TRI) también permiten diferenciar bastante bien los elementos, como se observa en las referencias (Kasai et al., 2009; Rozycka et al., 2017;

Pawluszek and Borkowski, 2017; Pawluszek, 2019), pero no mejoran los resultados de la pendiente, con la que está muy relacionada. La orientación y el sombreado, muy relacionados entre sí, son también útiles en el análisis visual, no tanto en el cuantitativo, y además solo permite caracterizar movimientos y diferenciar elementos a nivel local. Con respecto a la relación entre ambos, hay que hacer notar que el sombreado se ha modelizado solamente a nivel visual (fuente de luz al NW), no es realmente un modelo de iluminación que en el caso de Ecuador supondría a mediodía una fuente cenital, que lo relacionaría más con el modelo de pendientes que con el de orientación. En cuanto al TWI, resulta más útil para establecer consideraciones sobre su actuación como factor activador del movimiento que como factor diferenciador entre sus partes.

La pendiente es sin duda el factor más importante junto con la litología en la generación de movimientos de ladera y otros procesos en las laderas (Felicísimo, 1994; Vorphal et al., 2012), de tal forma que su aumento induce a una mayor inestabilidad. Las zonas de estudio se caracterizan por ser laderas orientadas hacia el N y NE, con una pendiente moderada; de hecho, las áreas estables presentan una pendiente bastante similar entre 12° (Colinas Lojanas) y 16° (El Plateado). Sin embargo, el cuerpo de los movimientos y áreas inestables presentan un amplio rango de pendientes entre 7.5° del cuerpo del flujo de Colinas Lojanas hasta los casi 20° del cuerpo de los dos flujos (principal y menor) de El Plateado. Salvo en Colinas Lojanas, en el resto de las zonas la pendiente del cuerpo o las áreas inestables es mayor que las de las áreas estables. Puede deberse a que en Colinas Lojanas se trata de un movimiento incipiente en una litología fundamentalmente arcillosa, mientras que en El Plateado se trata de un movimiento mucho más desarrollado en una litología igualmente lutítica pero con intercalaciones de areniscas y conglomerados; y en Victoria, se trata de una reptación pero en una zona de areniscas, probablemente un movimiento residual de flujos más antiguos. En esta última zona el área más activa

presenta una mayor pendiente que la menos activa, no así en Colinas Lojanas, lo que responde a razones topográficas (presencia de vaguadas y barrancos) y probablemente litológicas.

Sin embargo, donde es más diferencial la pendiente es en la detección de escarpes de distinto tipo; así la pendiente más elevada de todas las zonas aparece donde los escarpes están más claramente formados como el principal y en menor medida el resto de los escarpes de El Plateado (entre 40 y más de 50°), incluido el escarpe del movimiento menor en estado incipiente. En Victoria, los escarpes presentan pendientes entre 20 y 35°, mayores cuanto más activos son; mientras que en Colinas Lojanas hay algunos escarpes mucho más sutiles, con pendientes inferiores a 20°, como corresponde a un movimiento más en estado preparatorio que incipiente, excepto en el sector del pie donde muestra una mayor actividad.

El TPI, como expresión de la curvatura del perfil, es como cabe esperar un factor que proporciona muy buenos resultados a la hora de detectar algunos elementos dentro de los movimientos, especialmente cuando estos están más desarrollados y sus rasgos son más acusados. Aunque el TPI a la resolución original del MDS de 0.1 m, proporciona ya algunos resultados cuando la morfología está más desarrollada (El Plateado), la mejor detección se produce cuando se utiliza una resolución más baja (1 m), incluso para los movimientos más incipientes (Victoria y Colinas Lojanas). Un procedimiento especialmente útil es la extracción de líneas de ruptura de la pendiente que permite la detección de escarpes (Al-Rawabdeh et al., 2016; Chudy et al., 2019; Mauri et al., 2021) y otros elementos como la punta o frente del pie. De nuevo, la extracción es mucho más ventajosa en la resolución de 1 m, ya que posibilita la extracción de escarpes menos abruptos y de la punta, que no se extraen claramente a la resolución de 0.1 m. La detección de escarpes y de la punta son muy útiles a la hora de delimitar el movimiento, pero

también para ver la distribución de escalones y rellanos en el movimiento; sin embargo, no han sido capaces de detectar grietas, ni a alta resolución, salvo cuando estas vayan acompañadas de un salto vertical. Además, será luego muy útiles a la hora de estudiar la evolución de los movimientos, tanto en la retracción de escarpes traseros, el avance del pie y la formación y desplazamiento de escalones.

En cuanto a la orientación y el sombreado, estos pueden ser útiles a la hora de identificar algunos elementos, como los escarpes, sobre todo cuando estos son acusados como en El Plateado o en algunos casos de Victoria, o se desarrollan contra la pendiente en sectores de fuerte deformación. Sin embargo, no son tan determinantes a la hora de caracterizarlos, ya que responden a variaciones locales del relieve; por ejemplo, un escarpe contrapendiente con orientación al W como en El Plateado, cuyo cuerpo se orienta al NE, se diferencia bien en la zona de estudio, pero su orientación no es significativa para definir un escarpe contrapendiente, que en otras zonas puede tener otra orientación. También pueden resultar útiles para identificar sectores escalonados, con escarpes y rellanos, que dan lugar a bandeados. Tanto en el caso de los escarpes contrapendientes como en los relieves escalonados pueden servir para determinar el avance del movimiento. Finalmente, tanto la orientación como el sombreado, permiten apreciar formas lobuladas como la de los cuerpos bien desarrollados como en el caso de El Plateado.

Por último, el TWI proporciona buena información en cuanto a cómo se acumula el agua de escorrentía en el terreno (Sorensen et al., 2006; (Vorpal et al., 2012; Rozycka et al., 2017; Liao et al., 2022) y cómo se configuran las redes hidrográficas externas e internas a los movimientos (Zárate et al., 2023). Normalmente adquieren valores más altos en los pies que en los escarpes, por la posición topográficamente más deprimida de los primeros que favorece la acumulación de agua de escorrentía, y más elevada de los segundos, que la dificulta. Pero, lo más interesante es la configuración de las redes, que ha permitido

identificar algunos aspectos de interés como la acumulación de agua en la parte baja de la ladera de Victoria, que se configura como una vaguada; la interrupción de las líneas de flujo de escorrentía en el pie del flujo de Colinas Lojanas, a favor de las grietas de este sector con alta deformación, lo que puede haber favorecido la infiltración y la circulación de aguas subterráneas; o la formación de corrientes en los flancos del flujo de El Plateado y la reorganización de la red hidrográfica interna dentro de él.

Los perfiles, aunque parciales, permiten constatar los parámetros morfométricos en relación con los elementos como los escarpes, cuerpos y pies. Así, los escarpes se identifican por su fuerte pendiente en los escarpes longitudinales (traseros y secundarios) y transversales (escarpes laterales); asimismo se observan las líneas de ruptura de la pendiente. Los cuerpos reflejan sus formas más o menos tendidas y más o menos escalonadas, en los perfiles longitudinales; y sus morfologías convexas, cuando están más desarrollados, en los transversales. Por último, los pies expresan su terminación con una mayor o menor pendiente en la punta, y la formación de escarpes en su seno en los longitudinales; y sus formas generalmente convexas en los transversales.

Como resumen, se ha indicado que el análisis detallado de los factores derivados del MDS resulta muy adecuado para la caracterización de movimiento de ladera y áreas inestables, permitiendo además la identificación y en su caso la extracción semiautomática de algunos de ellos. Lógicamente esto será posible en la medida que los rasgos y elementos presenten formas acusadas, como en los escarpes, y sean suficientemente extensos, aunque dada la elevada resolución de los modelos, incluso pequeños escarpes pueden ser detectados. En otros casos, es más conveniente reducir la resolución, como en el TPI y TRI, que en el caso del primero permite extraer otros elementos como la punta o frente del pie, así como relieves escalonados. No obstante, hay que hacer notar que la obtención de modelos de alta resolución es importante para la detección de estos detalles, aunque

luego haya que remuestrearla; ya que la captura de datos a resolución más baja puede hacer perder información valiosa y así impedir su detección. En pruebas hechas en una misma zona con imágenes de buena resolución (0.20-0.50 m) capturadas con sensores aéreos y VANT (Fernández et al., 2016; 2021 a), la resolución de los modelos resulta crucial a la hora de detectar la morfología de movimientos de ladera.

Enlazando con el apartado siguiente, la detección de elementos y rasgos del relieve a partir de los modelos derivados resulta también muy útil en los estudios evolutivos de movimientos de ladera y la estimación de desplazamientos, fundamentalmente horizontales. En este sentido, incluso los elementos ajenos al relieve, como la vegetación arbórea o las construcciones, que dificultan la identificación y caracterización de los elementos naturales, en este caso puede ayudar al seguimiento de los desplazamientos. Así, en algunas zonas con cultivos como el olivar, los modelos permiten estimar desplazamientos (Fernández et al., 2016); sin embargo, en este caso, en ninguna de las zonas se puede plantear esta posibilidad. En Victoria, los desplazamientos son muy sutiles y quedan ocultos en los cambios propios de la vegetación; en El Plateado apenas hay vegetación arbórea o arbustiva en el cuerpo y pie del movimiento. En Colinas Lojanas, tampoco hay apenas vegetación, pero en este caso las construcciones que no resultan del todo arruinadas si lo permiten, y así se constatará en las técnicas de estimación automática.

### **5.3. Evolución y cinemática de los movimientos**

Para el análisis de la evolución se han aplicado distintas técnicas: cálculo de diferencias entre modelos, tanto en vertical (MdD) como perpendicularmente a la superficie 3D; análisis de correlación de imágenes para estimar desplazamientos horizontales; cálculo

de desplazamientos en puntos medidos sobre el terreno con GNSS y extraídos desde los modelos; y comparación de los modelos y perfiles.

Los MdD, utilizados en multitud de trabajos (DeWitte et al., 2008; Prokesova et al., 2010; Niethammer et al., 2012; Stumpf et al., 2013; Turner et al., 2015; Fernández et al., 2016; 2017; Zárate et al., 2021; 2023) y los mapas de distancias 3D (Gojic et al., 2021; Teo et al., 2023) son dos métodos para estimar las distancias o desplazamientos entre las superficies de distintas fechas, que proporcionan información en parte coincidente y en parte complementaria. De esta manera, los resultados de aplicar ambos métodos muestran una correlación bastante evidente, pero también algunas diferencias interesantes. Las coincidencias muestran en la zona de Victoria una ladera con poca actividad en general, algo mayor en la parte media alta donde se ha delimitado el área activa (con desplazamientos negativos o descensos de la superficie que no suelen superar 1 m) y menor hacia la partida donde se localiza el área menos activa (desplazamientos próximos a 0). En la zona de Colinas Lojanas, la ladera muestra poca actividad en el primer periodo; y algo mayor en el segundo, localizada sobre todo en la parte baja o pie, donde se observan descensos del terreno por formación de escarpes y ascensos aparentes como consecuencia del avance del movimiento más que por un ascensos vertederos del mismo. En la zona de el Plateado se observa un flujo bien desarrollado, que presenta descensos relacionados con formación de escarpes y escalones y ascensos, relacionados con el avance de la masa tanto en el cuerpo como sobre todo en el pie, en los dos primeros periodos; mientras que en el tercer periodo, se observan descensos importante como consecuencia de la retirada de materia por las obras de la carretera. Un punto interesante es que los descensos en la superficie se suelen producir como consecuencia de formación de escarpes (retracción del escarpe y descenso del material de cabecera), mientras que los ascensos suelen ser más fruto del avance de la masa sobre la superficie original (Fernández et al., 2016; Cardenal

et al., 2019; Zárate et al., 2021; 2023), aunque puntualmente se puedan producir ascensos por empuje lateral en estructuras rígidas como las carreteras, lo que se observa en algunos sectores del Plateado; o a rotaciones de la superficie en cabecera (no hay constancia en las zonas de trabajo).

Por su parte, las diferencias son mínimas entre los desplazamientos calculados con ambos métodos, cuando se comparan los valores absolutos de los MdD y las distancias en sectores de baja pendiente, ya que en ese caso los desplazamientos verticales y perpendiculares a las superficies prácticamente coinciden. Las diferencias entre valores absolutos van aumentando a medida que lo hace la pendiente, como en los escarpes o en los frentes de los pies de los movimientos; si se calcula la resta entre distancias 3D y MdD, las diferencias son negativas, ya que el MdD suele ser mayor que la distancia 3D, que suele ser la mínima. En estos casos, resulta necesario calcular la distancia perpendicular a las superficies 3D, que va a permitir estimar de forma más adecuada la retracción de escarpes o el avance de los frentes de los movimientos. Así se observa de forma bastante clara en los escarpes principal, lateral y secundarios de El Plateado, y en menor medida en el escarpe principal de Victoria, que presentan pendientes elevadas, y por lo tanto la diferencia entre valores absolutos es mayor; en este caso, la diferencia neta es positiva, puesto que se trata de un sector con descensos (desplazamientos negativos). En los pies del flujo de El Plateado y en menor medida de Colinas Lojanas, se observan igualmente estas diferencias negativas entre los valores absolutos, siendo en este caso también negativas las distancias netas (desplazamientos positivos entre las superficies). Valores positivos de las diferencias en valor absoluto, que implican que el desplazamiento 3D es mayor que el vertical (MdD), sólo se producen en superficies cambiantes e irregulares como en los sectores con vegetación.



Los métodos de correlación de imágenes resultan muy adecuados para detectar movimientos horizontales en movimientos de ladera donde se pueda establecerse correlación entre las imágenes comparadas (Delacourt et al., 2007, Travelletti et al., 2012; Lucieer et al., 2014; Stumpf et al., 2014; Turner et al., 2015; Fernandez and Whitworth 2016; Yang et al., 2020; Mugnai et al., 2023; Yao et al., 2022; Zhang et al., 2022). Normalmente se detectan desplazamientos hacia delante como consecuencia del avance general del movimiento y no tanto hacia atrás (retracciones). Las imágenes pueden ser ortoimágenes de distinta resolución u otras, como modelos de sombreado, pendiente, etc.). En este caso, se han empleado dos algoritmos, uno de ellos es Cosi-Corr (Delacourt et al., 2007), que se ha aplicado sobre las ortoimágenes de la banda 3 (rojo), con distintas resoluciones y parámetros de entrada en función de los desplazamientos esperados. El otro está basado en las técnicas de SfM, más concretamente en el reconocimiento de puntos por correlación de imágenes, similar al que se emplea en la detección automática de puntos de paso en los procesos de orientación; se ha aplicado sobre las ortoimágenes originales. En la zona de Victoria ambos algoritmos detectan sectores o puntos con pequeños desplazamientos (inferiores a 1 m) normalmente entre el N y el E, en los sectores con mayor actividad detectada en los MdD y mapa de distancias 3D. Lo mismo sucede en Colinas Lojanas, donde se detecta desplazamientos al N, muy reducidos (inferiores a 0.5 m) en el primer periodo y restringidos al sector de mayor deformación en el pie; y bastante mayores (2-3) en el pie e incluso algunos sectores del cuerpo, en el segundo; en este caso, ha habido que hacer un tratamiento previo de la ortoimagen para normalizar su radiometría respecto a las primeras. En la zona de El Plateado, sin embargo, la fuerte deformación en los dos primeros periodos y el cambio drástico de la imagen en el tercero, impiden un buen reconocimiento de los puntos y coherencia de los resultados. Por lo tanto, se puede deducir que estos métodos son muy adecuados para detectar

desplazamientos horizontales de avance de movimientos de ladera, pero solo son aplicables en movimientos en los que las imágenes presenten una cierta correlación. Aunque reconocen objetos cambiantes en cuanto a la forma (la propia traslación, rotación, deformación, etc.) y la radiometría (cierto crecimiento de vegetación de tipo herbáceo, cambios en la insolación, etc.), los algoritmos no trabajan adecuadamente en imágenes con una fuerte deformación o con cambios muy importantes en la radiometría. En las zonas de trabajo han impedido hacer las estimaciones en El Plateado y han obligado a hacer un tratamiento previo en la última imagen de Colinas Lojanas.

La extracción y medida de puntos sobre los productos VANT (Fernández et al., 2016; Cardenal et al., 2019; Zárate et al., 2021) y la medida de puntos sobre el terreno con GNSS (Gili et al., 2000; Bruckl et al., 2006; Baldi et al., 2008; Rawat et al., 2011; Zárate, 2011) son técnicas habitualmente empleadas para monitorizar movimientos de ladera. Como ventaja presentan que se miden realmente desplazamientos de puntos del terreno o de objetos situados sobre él, frente a otros métodos que comparan superficies que no siempre corresponden al desplazamiento real de los puntos. Como inconveniente, que se trata de métodos que consumen tiempo, de gabinete o de campo; y que se restringen a una serie de puntos discretos, sobre todo en el caso del GNSS, lo que en general no permite monitorizar una muestra suficientemente penetrativa de puntos. En las zonas de trabajo se ha empleado ambos métodos, excepto en la zona de El Plateado donde solo se ha empleado la extracción sobre productos VANT.

Tanto en el área activa de Victoria como en el cuerpo y el pie del flujo de Colinas Lojanas, en esta última en dos periodos, se han medido tasas de desplazamiento bastante reducidas a partir de los puntos extraídos desde los productos VANT (Zárate et al., 2021). Así las tasas medias de desplazamiento horizontal son del orden de 0.06 m/mes a 0.13 m/mes, algo mayores en Colinas Lojanas y especialmente en el segundo periodo. Por su parte, las

tasas verticales son negativas en ambas zonas, algo mayores en valor absoluto en el área activa de Victoria (0.12 m/mes) que en el cuerpo y el pie de Colinas Lojanas (0.01-0.03 m/mes). En ambos casos se trata de movimientos muy lentos (WP-WLI, 1995), suponiendo que la tasa media es mantenida a lo largo de los periodo de monitorización, lo que es bastante probable dada la naturaleza de los movimientos, un área de reptación en Victoria y un flujo de tierras en estado incipiente en Colinas Lojanas. En ambos casos, la medida de los desplazamientos tanto horizontales como verticales es bastante coincidente en términos relativos con la medida en los puntos GNSS, lo que permite validar las medidas a partir de los productos VANT; sin embargo, las medidas sobre VANT en Colinas Lojanas, son superiores a las GNSS, lo que se puede explicar porque las medidas GNSS probablemente estén sesgadas hacia puntos con menor deformación.

En el Plateado, donde se ha identificado un flujo de tierras en estado desarrollado, la situación es diferente y las tasas horizontales son sensiblemente superiores en la cabecera, cuerpo y pie: de 0.46, 1.45 y 0.36 m/mes en el primer periodo y algo menores, de 0.26, 0.69 y 0.1 m/mes en el segundo. Las tasas verticales son inferiores en general y negativas, es decir, de descenso en la cabecera y el cuerpo (0.23-0.35 m/mes en el primer periodo y 0.13-0.23 m/mes en el segundo); y de suave ascenso en el primer periodo y suave descenso en el segundo periodo, en el pie. Todo ello indica una cierta ralentización del movimiento en el segundo periodo sobre todo en el pie, probablemente por las obras de estabilización del movimiento, que se acentúan en el tercer periodo con el aplanamiento de la ladera y la retirada de material, que impiden la extracción y medida de puntos en la mayor parte del movimiento en este periodo. En cualquier caso, la tasa corresponde en este caso con un movimiento lento (WP-WLI, 1995).

En general, los desplazamientos son hacia delante y hacia abajo, es decir, descensos, en la inmensa mayoría de los puntos, salvo unos pocos situados en la carretera donde se

pueden medir leves ascensos (Fernández et al., 2016). Esto es corroborado en términos generales en la estimación semiautomática de los desplazamientos horizontales con las técnicas de correlación de imágenes y en la estimación de los verticales con los MdD, aun con alguna cuestión más compleja. La correlación de imágenes, tanto en la zona de Victoria como en Colinas Lojanas, permite estimar desplazamientos horizontales en la dirección de avance de los movimientos compatibles con los estimados en los puntos VANT y GNSS, en los sectores donde se ha logrado tener coherencia. Por su parte, los MdD en todas las zonas y partes de los movimientos coinciden en general con los desplazamientos medios en puntos en términos relativos. Así, en los escarpes y cabecera se aprecia descensos tanto en los puntos como en los MdD, fruto del descenso del terreno y de la retracción de los escarpes. Sin embargo, en la zona de los pies o en los rellanos de escarpes secundarios, el descenso de los puntos puede corresponderse con ascensos en el MdD como consecuencia del mayor avance horizontal de la masa.

Por otra parte, la observación de las bandas de pendiente, orientación, sombreado, rugosidad, pero sobre todo del TPI y las líneas extraídas de estos modelos a resolución de 1 m, también permiten analizar la evolución de determinados rasgos y estimar sus desplazamientos (Zárate et al., 2023). Así, particularmente en Colinas Lojanas y en El Plateado se observan desplazamientos de la línea que marca la punta del frente del movimiento de unos 2-4 m compatibles con los desplazamientos estimados con otras técnicas. De la misma forma, en la línea superior o coronación de los escarpes trasero y lateral del flujo de El Plateado, se pueden medir retracciones de aproximadamente 1 m, debidas a desplomes o colapsos del material que forma dicho escarpe (Zárate et al., 2023). Esto prueba la utilidad de la extracción de elementos a partir de los modelos derivados, que permite la medida de retracción de los escarpes, que en el caso de El Plateado

ocasionan la destrucción de una construcción; o de avance del frente que, en dos de las zonas, ocupa una carretera.

De la observación combinada de todo lo dicho, junto con la visión sinóptica que aportan los perfiles, se puede reconstruir bastante fielmente la evolución de los movimientos de ladera, en base a las técnicas empleadas, lo que justifica su empleo. Así, en la zona de Victoria, se aprecia una ladera con una cierta inclinación hacia el N, con algunos escarpes más o menos activos y una morfología cóncava hacia la parte central, que concentra las líneas de flujo. La evolución de la misma es muy sutil, como corresponde a una zona de reptación probablemente residual de movimientos anteriores, en la que se aprecia un cierto descenso y desplazamiento hacia abajo, muy lento, de la superficie en la parte más activa y una acentuación del escarpe principal y reactivación de los laterales. En Colinas Lojanas se observa una ladera de pendiente suave pero ligeramente convexa en el perfil, en la que se produce inicialmente un cierto abombamiento de la parte del cuerpo y una cierta actividad en el pie, todo ello con una tasa lenta de desplazamientos, propia de la fase preparatoria de un movimiento de tipo flujo. Esta actividad continúa prácticamente igual en el segundo periodo, en el que se termina deformando en mucha mayor medida el pie y la parte inferior del cuerpo, formándose escalones, escarpes y grietas; ambos descienden hacia abajo y hacia adelante, arruinando algunas construcciones y ocupando la carretera que discurre por debajo del pie. En el Plateado se observa un flujo en estado de desarrollado a avanzado en una ladera con una pendiente moderada; el movimiento presenta una morfología lobular en el cuerpo y un pie bien desarrollado que ocupa la carretera y llega probablemente a empujarla y deformarla. La evolución se mantiene en los dos periodos analizados con una tasa de movimiento lento y una gran deformación que da lugar a escarpes secundarios bastante importantes, escalones y grietas. El

movimiento es finalmente estabilizado, mediante el aplanamiento de la ladera y la retirada del material del cuerpo y el pie.

#### **5.4. Conclusiones generales**

1. En este trabajo se ha empleado una metodología multidisciplinar, en la que destacan la aplicación de **técnicas geomáticas**, incluyendo procedimientos de **captura de imágenes mediante VANT**, medida de puntos de control y de monitorización GNSS, procesado de imágenes y obtención de productos fotogramétrico, fotointerpretación, **análisis y modelización SIG**, y análisis de correlación de imágenes. Además, se realiza análisis geomorfológico cuantitativo y ensayos geotécnicos para la caracterización de los materiales.
2. La captura de imágenes desde VANT equipados con cámaras adecuadas y su procesamiento fotogramétrico con apoyo de medidas GNSS en puntos de control ha permitido la obtención de modelos digitales de superficies (MDS) precisos y fiables, tanto MDS como ortoimágenes. Los errores estimados en los puntos de control y chequeo en todos los vuelos y zonas han permitido a su vez la estimación de las **incertidumbres de las ortoimágenes y los MDS** (0.10 m), así como de los desplazamientos horizontales y verticales (0.15 m). Estos son equivalentes a los encontrados en trabajos previos con características similares de la captura y tratamiento de datos.
3. Estas incertidumbres han sido testeadas a partir de los desplazamientos estimados en puntos de las áreas consideradas estables. Los desplazamientos verticales en ningún caso superan en términos de media y desviación típica a la incertidumbre a priori, por lo que la incertidumbre y el **límite de detección horizontal** se fija finalmente en 0.15 m. Por su parte, los desplazamientos verticales medios son igualmente muy reducidos (lo que indica un buen ajuste general), pero la

desviación típica llega a rebasar el umbral de incertidumbre, aunque no superando el valor de 0.25 m. Esto hace que se eleve **el límite de detección vertical** hasta 0.25 m, algo mayor que en otros trabajos, pero dentro de lo que se pueden considerar los modelos como fiables. Con lo dicho en estos dos puntos se puede dar por cumplido el **primer objetivo de la Tesis**.

4. A partir de las ortoimágenes, los modelos derivados y los perfiles se realiza una **caracterización geomorfológica de los movimientos de ladera y sus elementos constitutivos**. Así, la observación e interpretación de las imágenes permite identificar un área inestable con sectores más y menos activos, un flujo de tierras de carácter incipiente, y un flujo de tierras en estado desarrollado-avanzado, así como una serie de inestabilidades menores. Además, se pueden identificar, diferenciar y delimitar sus elementos: escarpes, cabeceras, cuerpos, pies, frente, etc.
5. El análisis zonal de los modelos derivados del MDS indica que **los factores que permiten diferenciar mejor los elementos son la pendiente y el TPI**, aunque el resto de los factores (orientación, sombreado y rugosidad) también posibilitan su diferenciación en algunos de ellos como los escarpes o el pie. La pendiente permite distinguir generalmente los sectores más activos de los menos activos, pero especialmente diferenciar los escarpes y los pies de los movimientos. El TPI y particularmente las líneas de ruptura de la pendiente son decisivas a la hora de identificar las líneas que delimitan los escarpes en la parte superior (coronación) e inferior, así como el frente o punta de los pies de los movimientos, sobre todo cuando se remuestran los modelos a una menor resolución (1 m en este trabajo). El TWI, por su parte, aporta información relevante en cuanto a cómo se acumula el agua de escorrentía en el terreno y cómo se configuran las redes hidrográficas

externas e internas a los movimientos, lo que tiene gran importancia en la estabilidad y dinámica de las laderas. Con estos dos puntos, se puede considerar como cumplido **el segundo objetivo de la tesis doctoral**.

6. Al hilo del punto anterior, la resolución de los modelos es un aspecto a considerar. Como se ha indicado, la extracción de líneas de ruptura de la pendiente cuando no son tan abruptas como en los escarpes bien desarrollados, por ejemplo, en escarpes más suaves, escalones o en la punta del movimiento, una resolución más baja (1 m) puede ser más efectiva que la resolución original de los modelos VANT (en torno a 0.1 m). No obstante, hay que hacer notar que la obtención de modelos de alta resolución es importante para la detección de estos detalles, aunque luego haya que remuestrearla; ya que la captura de datos a resolución más baja puede hacer perder información valiosa y así impedir su detección.
7. **La detección de cambios en la superficie del terreno y la estimación de desplazamientos** se lleva a cabo mediante diversos métodos: cálculo de diferencias entre modelos, tanto en vertical (M<sub>d</sub>D) como perpendicularmente a la superficie 3D; análisis de correlación de imágenes para estimar desplazamientos horizontales; cálculo de desplazamientos en puntos medidos sobre el terreno con GNSS y extraídos desde los modelos; y finalmente, la propia comparación de los modelos derivados y los perfiles.
8. En general las **distintas técnicas empleadas demuestran bastante compatibilidad entre ellas**. Así, los M<sub>d</sub>D coinciden en general con los modelos de distancias 3D, aunque los últimos suelen ser menores en valor absoluto como corresponde a su estimación como mínima distancia entre superficies. Los métodos de correlación de imágenes y basados en SfM son un buen procedimiento automático para la medida de desplazamientos, pero necesitan imágenes con una



cierta semejanza que proporcionan coherencia, por lo que no se pueden utilizar en aquellos casos con grandes deformaciones o cambios en las ortoimágenes; en las zonas de trabajo muestran bastante compatibilidad con los desplazamientos horizontales medidos en puntos extraídos de los productos VANT. Por su parte, las medidas de desplazamientos sobre los productos VANT y los puntos GNSS sobre el terreno muestran coincidencias en términos relativos; pero los desplazamientos en los puntos GNSS, tanto horizontales como verticales, son menores que en los extraídos de los productos VANT, lo que puede deberse a que los primeros se miden en sectores de menor deformación. Por último, los MdD presentan una buena coincidencia con los desplazamientos verticales medidos en los productos VANT, por ejemplo, en los descensos observados en los escarpes; pero también algunas diferencias, como los desplazamientos aparentes de ascenso en los MdD que en realidad son suaves descensos acompañados de avances horizontales de la masa movilizada, como, por ejemplo, en los ics de los movimientos. Todo ellos conducen a la utilización preferente de los **métodos automáticos de medida de desplazamientos**, como el cálculo de los MdD para los verticales o la aplicación de técnicas de correlación de imágenes para los horizontales, cuando sea posible.

9. Por otra parte, la detección de elementos y rasgos del relieve desde los modelos derivados es además muy útil en los estudios evolutivos de movimientos de ladera y la estimación de desplazamientos. Dejando aparte la posibilidad de detectar elementos ajenos al terreno (árboles, construcciones, etc.) que permita estimar los desplazamientos a partir ellos, la observación de franjas de pendientes, orientaciones, sombreado o rugosidad, que se desplacen en los modelos de distinta época puede resultar muy útil. Sin embargo, lo más destacable es la observación

de líneas como las de ruptura de la pendiente, que ha permitido en este trabajo detectar retracciones en los escarpes y avances en los frentes de los pies de los movimientos. **Con estas tres últimas conclusiones se considera cumplido el objetivo 3.**

10. Finalmente, todas las técnicas empleadas permiten el **conocimiento de la actividad, la evolución y la cinemática de los movimientos de ladera**. Así, se han podido reconstruir con bastante fiabilidad la evolución de los movimientos y áreas inestables estudiadas, con el punto de partida en una situación inicial que va cambiando a través de las fechas analizadas. Esto ha permitido definir los procesos existentes en las zonas de estudio: un área de reptación con deformación lenta de la superficie y cambios suaves en la morfología de la ladera en sus sectores más activo y menos activo; un flujo de tierras en estado preparatorio-incipiente con tasa muy lenta de desplazamiento, más activo en el pie y afectando a una carretera y arruinando varias construcciones; y un flujo de tierras en estado avanzado con un escarpe, cuerpo y pie bien desarrollados, tasa de desplazamiento lenta (mayor que los otros casos), que afecta a una carretera y probablemente la deforma. La observación de todos los elementos, la organización de la red hidrográfica mediante el TWI y algunos datos geotécnicos, permiten aventurar algunas observaciones sobre la estabilidad y dinámica de los movimientos estudiados, lo que permite dar por cumplido **el objetivo 4 de la tesis doctoral**.

### **5.5. Limitaciones y futuras líneas de investigación**

El presente trabajo cuenta con una serie de limitaciones en cuanto a la captura de datos y los análisis realizados, que deben ser superadas en futuros trabajos de investigación

Así, en primer lugar, se han considerar las limitaciones de las técnicas de captura de datos mediante VANT. Por un lado, los equipos no están provistos de sistemas de posicionamiento en tiempo real (GNSS-RTK) que permitan la precisa georreferenciación de la cámara en el momento de disparo. Contar con un sistema de este tipo permitiría mejorar la precisión de los modelos obtenidos, al tiempo que reduciría el número de puntos de control o apoyo sobre el terreno y, por lo tanto, los tiempos de trabajo de campo. Adicionalmente, como futura línea de investigación, se podrían realizar pruebas para establecer las mejores configuraciones de puntos de control y chequeo para la toma de datos, optimizando la precisión y el tiempo de trabajo.

La reducción de los tiempos de captura y proceso podría invertirse en una verdadera monitorización de las áreas inestables, más completa y de mayor resolución temporal, que permitiera la adopción de medidas de control en los periodos de mayor actividad de los movimientos y el análisis de la actuación de los factores activadores (lluvias, sismos, acción humana, etc.). Esta puede ser otra línea de investigación, que entraría en aspectos de control y reducción de los riesgos asociados a estas zonas, en tiempo real y no sólo a posteriori.

Por otro lado, el empleo de otros sensores a bordo de VANT, en especial de instrumentación LiDAR, podría mejorar las prestaciones de los datos y las posibilidades de análisis. Los sistemas LiDAR permiten la penetración de los rayos láser en la vegetación, siempre que esta no sea demasiado densa y, por lo tanto, capturar la señal del terreno con el multirrebote; esto posibilitaría la obtención de modelos digitales del terreno (MDT) con técnicas de clasificación y filtrados, con lo que mejoraría en buena medida el análisis de los mismos, sin las interferencias que producen los elementos situados sobre él. La aplicación de distintas técnicas de filtrado y clasificación de las nubes de puntos para determinar en cada caso las mejores condiciones para obtener MDT precisos y

realistas podría constituir otra línea de investigación futura. Adicionalmente, el empleo de otros sensores, como los multispectrales y ópticos, también podría aportar mayor información sobre otras propiedades del terreno (cubierta vegetal, humedad, litología, fracturación, etc.).

En cuanto a las técnicas de análisis para la caracterización y zonificación de las áreas inestables, en ese trabajo se han aplicado fotointerpretación y un análisis zonal básico, que, no obstante, ha proporcionado buenos resultados. Sin embargo, sería de interés introducir nuevos parámetros del terreno y, sobre todo, ensayar con diferentes resoluciones para encontrar las mejores soluciones para la zonificación y caracterización de los movimientos, sus tipologías y sus rasgos. Adicionalmente, la aplicación de las nuevas técnicas de clasificación y segmentación a partir de imágenes (incluyendo los propios MDE, derivados, índices de vegetación y humedad desde imágenes, etc.), como las basadas en el aprendizaje automático o profundo (redes neuronales) pueden ser otra línea de investigación en la detección automática de los rasgos considerados en este trabajo; pero también de otros, como las grietas, en las que no se han obtenido resultados. Por otro lado, la aplicación de estas técnicas a las nubes de puntos fotogramétricas o, mejor aún LiDAR, pueden resultar muy eficaces a la hora de extraer formas del relieve características como escarpes, líneas de ruptura de la pendiente, frentes, e incluso grietas.

Finalmente, por lo que respecta a la medida de desplazamientos en las áreas inestables con vistas al análisis evolutivo de los movimientos, en este trabajo se han ensayado con técnicas más clásicas (MdD, medidas en puntos GNSS y extraídos de productos VANT) y más innovadoras (distancias 3D y análisis de correlación de imágenes). Las primeras, salvo el MdD, son consumidoras de tiempo de campo y de gabinete, especialmente si se trata de que sean representativas; por lo que los trabajos futuros deben apostar por las otras líneas, especialmente por las de análisis de correlación de imágenes. En este sentido,

la realización de un mayor número de pruebas con imágenes y modelos, con distintas resoluciones y nivel de preprocesado, puede posibilitar la obtención de mejores resultados. Pero especialmente interesante como línea de investigación, puede ser el desarrollo de algoritmos de reconocimiento automático de puntos y objetos característicos, como en el método basado en SfM, apoyados en técnicas de aprendizaje automático y redes neuronales.

## BIBLIOGRAFÍA

Abernethy, B., & Rutherford, I. D. (2000). Monitoring and modelling morphological change in a braided gravel-bed river using high resolution GPS-based survey. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(9), 973–990. [https://doi.org/10.1002/1096-9837\(200008\)25:9<973::AID-ESP111>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/1096-9837(200008)25:9<973::AID-ESP111>3.0.CO;2-Y)

Agisoft. (2018). Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition. *Copyright © 2018 Agisoft LLC, Version 1.4*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.bjps.2011.05.024>

Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., & Martínez-Carricondo, P. (2017). Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 98, 221–227. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.002>

Ajayi, O. G., Salubi, A. A., Angbas, A. F., & Odigure, M. G. (2017). Generation of accurate digital elevation models from UAV acquired low percentage overlapping images. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8–10), 3113–3134. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1285085>

Akbarimehr, M., Motagh, M., & Haghshenas-Haghighi, M. (2013). Slope stability assessment of the sarcheshmeh landslide, northeast Iran, investigated using InSAR and GPS observations. *Remote Sensing*, 5(8), 3681–3700. <https://doi.org/10.3390/rs5083681>

Alcántara-Ayala, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Investigaciones Geográficas*, 41, 7–25. <https://doi.org/http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188->

46112000000100002&script=sci\_arttext

Alcántara-Ayala, I., Esteban-Chávez, O., & Parrot, J. F. (2006). Landsliding related to land-cover change: A diachronic analysis of hillslope instability distribution in the Sierra Norte, Puebla, Mexico. *Catena*, 65(2), 152–165. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.11.006>

Artese, G., Perrelli, M., Artese, S., & Manieri, F. (2015). Geomatics activities for monitoring the large landslide of Maierato, Italy. *Applied Geomatics*, 7(3), 171–188. <https://doi.org/10.1007/s12518-014-0146-8>

Baldi, P., Cenni, N., Fabris, M., & Zanutta, A. (2008). Kinematics of a landslide derived from archival photogrammetry and GPS data. *Geomorphology*, 102(3–4), 435–444. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.04.027>

Bellone, T., Dabove, P., Manzano, A. M., & Taglioretti, C. (2014). Real-time monitoring for fast deformations using GNSS low-cost receivers. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(2), 458–470. <https://doi.org/10.1080/19475705.2014.966867>

Bhattacharya, A., Mukherjee, K., Kuri, M., Vöge, M., Sharma, M. L., Arora, M. K., & Bhasin, R. K. (2015). Potential of SAR intensity tracking technique to estimate displacement rate in a landslide-prone area in Haridwar region, India. *Natural Hazards*, 79(3), 2101–2121. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1949-6>

Bossi, G., Cavalli, M., Crema, S., Frigerio, S., Quan Luna, B., Mantovani, M., Marcato, G., Schenato, L., & Pasuto, A. (2015). Multi-temporal LiDAR-DTMs as a tool for modelling a complex landslide: A case study in the Rotolon catchment (eastern Italian Alps). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(4), 715–722.

<https://doi.org/10.5194/nhess-15-715-2015>

Calcaterra, S., Cesi, C., Di Maio, C., Gambino, P., Merli, K., Vallario, M., & Vassallo, R. (2012). Surface displacements of two landslides evaluated by GPS and inclinometer systems: A case study in Southern Apennines, Italy. *Natural Hazards*, 61(1), 257–266. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9633-3>

Car, M., Kaćunić, D. J., & Kovačević, M.-S. (2016). Application of Unmanned Aerial Vehicle for Landslide Mapping. *International Symposium on Engineering Geodesy*, 549–560.

Car, M., Kaćunić, D. J., Kovačević, M.-S., Jensen, J. L. R., Mathews, A. J., Linder, W., Koschitzki, R., Schwalbe, E., Cardenas, C., Maas, H.-G., Fang, L., Wang, Y. Y. T., Du, Y., Qui, J. W., Shen, Z. J., Chen, Y. C., Kuo, C. H., Kuo, C. H., Tariq, A., ... De Jong, S. M. (2014). High-resolution monitoring of Himalayan glacier dynamics using unmanned aerial vehicles. *Remote Sensing*, 5(1), 5344–5347. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7327042>

Carrera-Hernández, J. J., Levresse, G., & Lacan, P. (2020). Is UAV-SfM surveying ready to replace traditional surveying techniques? *International Journal of Remote Sensing*, 41(12), 4818–4835. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1727049>

Carvajal, F., Agüera, F., & Pérez, M. (2012). Surveying a Landslide in a Road Embankment Using Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-1/(September), 201–206. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-201-2011>

Cavalli, M., & Marchi, L. (2008). Characterisation of the surface morphology of an



alpine alluvial fan using airborne LiDAR. *Natural Hazards and Earth System Science*, 8, 323–333. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-323-2008>

Chadwick, J., Dorsch, S., Glenn, N., Thackray, G., & Shilling, K. (2005). *Application of multi-temporal high-resolution imagery and GPS in a study of the motion of a canyon rim landslide*. 59, 212–221. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2005.02.001>

Choi, K. Y., & Cheung, R. W. M. (2013). Landslide disaster prevention and mitigation through works in Hong Kong. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 5(5), 354–365. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.07.007>

Colesanti, C., & Wasowski, J. (2006). Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering Geology*, 88(3–4), 173–199. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.013>

Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3-Landslide types and processes. *Special Report*, 247(August), 36–75. <https://doi.org/10.1007/s10346-009-0175-2>

Dahal, R. K., Hasegawa, S., Yamanaka, M., Dhakal, S., Bhandary, N. P., & Yatabe, R. (2009). Comparative analysis of contributing parameters for rainfall-triggered landslides in the Lesser Himalaya of Nepal. *Environmental Geology*, 58(3), 567–586. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1531-6>

Dai, F. C., Lee, C. F., Li, J., & Xu, Z. W. (2001). Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environmental Geology*, 40(3), 381–391. <https://doi.org/10.1007/s002540000163>

Dall'Asta, E., Delaloye, R., Diotri, F., Forlani, G., Fornari, M., Di Cella, U. M., Pogliotti, P., Roncella, R., & Santise, M. (2015). Use of uas in a high mountain landscape: The case of gran sommetta rock glacier (AO). *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(3W3), 391–397. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-W3-391-2015>

Damm, A., Eberhard, K., Sendzimir, J., & Patt, A. (2013). Perception of landslides risk and responsibility: A case study in eastern Styria, Austria. *Natural Hazards*, 69(1), 165–183. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0694-y>

De Blasio, F. V. (2011). Introduction to the physics of landslides: Lecture Notes. In *Springer Science*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14382-8>

Dewitte, O., Jasselette, J. C., Cornet, Y., Van Den Eeckhaut, M., Collignon, A., Poesen, J., & Demoulin, A. (2008). Tracking landslide displacements by multi-temporal DTMs: A combined aerial stereophotogrammetric and LIDAR approach in western Belgium. *Engineering Geology*, 99(1–2), 11–22. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.02.006>

Di Maio, C., & Vassallo, R. (2011). Geotechnical characterization of a landslide in a Blue Clay slope. *Landslides*, 8(1), 17–32. <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0218-8>

Echeverria, A., Khazaradze, G., Asensio, E., Gárate, J., Dávila, J. M., & Suriñach, E. (2013). Crustal deformation in eastern Betics from CuaTeNeo GPS network. *Tectonophysics*, 608, 600–612. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.08.020>

Eltner, A., Kaiser, A., Castillo, C., Rock, G., Neugirg, F., & Abellán, A. (2016).

Image-based surface reconstruction in geomorphometry-merits, limits and developments. *Earth Surface Dynamics*, 4(2), 359–389.  
<https://doi.org/10.5194/esurf-4-359-2016>

Fernández, T., Pérez, J., Colomo, C., Cardenal, J., Delgado, J., Palenzuela, J., Irigaray, C., & Chacón, J. (2017a). Assessment of the Evolution of a Landslide Using Digital Photogrammetry and LiDAR Techniques in the Alpujarras Region (Granada, Southeastern Spain). *Geosciences*, 7(2), 32.  
<https://doi.org/10.3390/geosciences7020032>

Fernández, T., Pérez, J. L., Cardenal, F. J., López, A., Gómez, J. M., Colomo, C., Delgado, J., & Sánchez, M. (2015). Use of a light UAV and photogrammetric techniques to study the evolution of a landslide in Jaén (Southern Spain). *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(3W3), 241–248.  
<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-W3-241-2015>

Fernández, T., Pérez, J. L., Cardenal, J., Gómez, J. M., Colomo, C., & Delgado, J. (2016). Analysis of landslide evolution affecting olive groves using UAV and photogrammetric techniques. *Remote Sensing*, 8(10).  
<https://doi.org/10.3390/rs8100837>

Fernández, T., Pérez, J. L., Colomo, C., Cardenal, J., Delgado, J., Palenzuela, J. A., Irigaray, C., & Chacón, J. (2017b). Assessment of the evolution of a landslide using digital photogrammetry and LiDAR techniques in the alpujarras region (Granada, Southeastern Spain). *Geosciences (Switzerland)*, 7(2).  
<https://doi.org/10.3390/geosciences7020032>

Fernández, T., Pérez, J. L., López, A., Gómez, J. M., Cardenal, J., & Delgado, J. (2014). *Monitorización de laderas inestables mediante técnicas fotogramétricas a partir de vuelos UAV e históricos.*

Galeandro, A., Simunek, J., & Simeone, V. (2013). Simulating infiltration processes into fractured and swelling soils as triggering factors of landslides. *Landslide Science and Practice: Spatial Analysis and Modelling*, 3, 135–141. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-31310-3-19>

Gandor, F., Rehak, M., & Skaloud, J. (2015). Photogrammetric mission planner for RPAS. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 40(1W4), 61–65. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W4-61-2015>

Gaprindashvili, G., & Van Westen, C. J. (2016). Generation of a national landslide hazard and risk map for the country of Georgia. *Natural Hazards*, 80(1), 69–101. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1958-5>

Giordan, D., Manconi, A., Remondino, F., & Nex, F. (2017). Use of unmanned aerial vehicles in monitoring application and management of natural hazards. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(1), 1–4. <https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1315619>

Glastonbury, J., & Fell, R. (2008). Geotechnical characteristics of large slow, very slow, and extremely slow landslides. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(7), 984–1005. <https://doi.org/10.1139/T08-021>

Hackney, C., & Clayton, A. I. (2015). Unmanned Aerial Vehicles ( UAVs ) and their application in geomorphic mapping. *Geomorphological Techniques*, 7, 1–12.

[http://www.geomorphology.org.uk/sites/default/files/geom\\_tech\\_chapters/2.1.7\\_UAV.pdf](http://www.geomorphology.org.uk/sites/default/files/geom_tech_chapters/2.1.7_UAV.pdf)

Henn, B., Cao, Q., Lettenmaier, D. P., Magirl, C. S., Mass, C., Bower, J. B., St Laurent, M., Mao, Y. X., & Perica, S. (2015). Hydroclimatic Conditions Preceding the March 2014 Oso Landslide\*. *Journal of Hydrometeorology*, *16*(3), 1243–1249. <https://doi.org/10.1175/jhm-d-15-0008.1>

Hong, H., Naghibi, S. A., Pourghasemi, H. R., & Pradhan, B. (2016). GIS-based landslide spatial modeling in Ganzhou City, China. *Arabian Journal of Geosciences*, *9*(2), 1–26. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2094-y>

Hsieh, Y. C., Chan, Y. C., & Hu, J. C. (2016). Digital elevation model differencing and error estimation from multiple sources: A case study from the Meiyuan Shan landslide in Taiwan. *Remote Sensing*, *8*(3). <https://doi.org/10.3390/rs8030199>

Hu, S., Qiu, H., Wang, X., Gao, Y., Wang, N., Wu, J., Yang, D., & Cao, M. (2018). Acquiring high-resolution topography and performing spatial analysis of loess landslides by using low-cost UAVs. *Landslides*, *15*(3), 593–612. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0922-8>

Huang, H., Long, J., Lin, H., Zhang, L., Yi, W., & Lei, B. (2017). Unmanned aerial vehicle based remote sensing method for monitoring a steep mountainous slope in the Three Gorges Reservoir, China. *Earth Science Informatics*, *10*(3), 287–301. <https://doi.org/10.1007/s12145-017-0291-9>

Hungerbühler, D., Steinmann, M., Winkler, W., Seward, D., Egüez, A., Peterson, D. E., Helg, U., & Hammer, C. (2002). Neogene stratigraphy and Andean geodynamics of southern Ecuador. *Earth-Science Reviews*, *57*(1–2), 75–124.

[https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00071-X](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00071-X)

Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, *11*(2), 167–194. <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>

Irigaray, C., & Palenzuela, J. A. (2013). *Análisis de la actividad de movimientos de ladera mediante láser escáner terrestre en el suroeste de la Cordillera Bética ( España )* *Landslide activity analysis using terrestrial laser scanning at southwest of the Betic Cordillera ( Spain ) Copia personal*. *31*(October 2014), 53–67.

Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., Abellán, A., Derron, M. H., Loye, A., Metzger, R., & Pedrazzini, A. (2012). Use of LIDAR in landslide investigations: A review. *Natural Hazards*, *61*(1), 5–28. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9634-2>

Jaiswal, P., & van Westen, C. J. (2013). Use of quantitative landslide hazard and risk information for local disaster risk reduction along a transportation corridor: A case study from Nilgiri district, India. *Natural Hazards*, *65*(1), 887–913. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0404-1>

Javernick, L., Brasington, J., & Caruso, B. (2014). Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology*, *213*, 166–182. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.01.006>

Jensen, J. L. R., & Mathews, A. J. (2016). Assessment of image-based point cloud products to generate a bare earth surface and estimate canopy heights in a woodland ecosystem. *Remote Sensing*, *8*(1). <https://doi.org/10.3390/rs8010050>

Johnson, K., Nissen, E., Saripalli, S., Arrowsmith, J. R., McGarey, P., Scharer, K.,

Williams, P., & Blisniuk, K. (2014). Rapid mapping of ultrafine fault zone topography with structure from motion. *Geosphere*, *10*(5), 969–986. <https://doi.org/10.1130/GES01017.1>

Kasai, M., Ikeda, M., Asahina, T., & Fujisawa, K. (2009). LiDAR-derived DEM evaluation of deep-seated landslides in a steep and rocky region of Japan. *Geomorphology*, *113*(1–2), 57–69. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.06.004>

Keqiang, H., Xiangran, L., Xueqing, Y., & Dong, G. (2008). The landslides in the Three Gorges Reservoir Region, China and the effects of water storage and rain on their stability. *Environmental Geology*, *55*(1), 55–63. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0964-7>

Kiseleva, E., Mikhailov, V., Smolyaninova, E., Dmitriev, P., Golubev, V., Timoshkina, E., Hooper, A., Samiei-Esfahany, S., & Hanssen, R. (2014). PS-InSAR Monitoring of Landslide Activity in the Black Sea Coast of the Caucasus. *Procedia Technology*, *16*(October 2015), 404–413. <https://doi.org/10.1016/j.protecy.2014.10.106>

Kršák, B., Blišťan, P., Pauliková, A., Puškárová, P., Kovanič, L., Palková, J., & Zelizňaková, V. (2016). Use of low-cost UAV photogrammetry to analyze the accuracy of a digital elevation model in a case study. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *91*, 276–287. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.05.028>

Lari, S., Frattini, P., & Crosta, G. B. (2014). A probabilistic approach for landslide hazard analysis. *Engineering Geology*, *182*(PA), 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.07.015>

Leung, A. K., & Ng, C. W. W. (2016). Field investigation of deformation characteristics and stress mobilisation of a soil slope. *Landslides*, *13*(2), 229–240. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0561-x>

Lindner, G., Schraml, K., Mansberger, R., & Hübl, J. (2016). UAV monitoring and documentation of a large landslide. *Applied Geomatics*, *8*(1), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s12518-015-0165-0>

Liu, N., Dai, W., Santerre, R., Hu, J., Shi, Q., & Yang, C. (2018). High Spatio-Temporal Resolution Deformation Time Series With the Fusion of InSAR and GNSS Data Using Spatio-Temporal Random Effect Model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *57*(1), 364–380. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2854736>

Liu, N., Dai, W., Santerre, R., Hu, J., Shi, Q., & Yang, C. (2019). High Spatio-Temporal Resolution Deformation Time Series with the Fusion of InSAR and GNSS Data Using Spatio-Temporal Random Effect Model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *57*(1), 364–680. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2854736>

Ma, S., Qiu, H., Hu, S., Yang, D., & Liu, Z. (2021). Characteristics and geomorphology change detection analysis of the Jiangdingya landslide on July 12, 2018, China. *Landslides*, *18*(1), 383–396. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01530-3>

Martínez-Carricondo, P., Agüera-Vega, F., Carvajal-Ramírez, F., Mesas-Carrascosa, F. J., García-Ferrer, A., & Pérez-Porras, F. J. (2018). Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control



points. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 72(February), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.015>

Mendes, R. M., Roberto, M., Andrade, M. De, Tomasella, J., & De, M. A. E. (2017). *Understanding shallow landslides in Campos do Jordão Municipality – Brazil: disentangle the anthropic effects from natural causes in the disaster of 2000*. July.

Metternicht, G., Hurni, L., & Gogu, R. (2005). Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments. *Remote Sensing of Environment*, 98(2–3), 284–303. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.08.004>

Mokhtar, M. R. M., Matori, A. N., Yusof, K. W., Embong, A. M., & Jamaludin, M. I. (2014). Assessing UAV Landslide Mapping Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Landslide Mapping Activity. *Applied Mechanics and Materials*, 567, 669–674. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.567.669>

Mozas-Calvache, A. T., Pérez-García, J. L., Cardenal-Escarcena, F. J., Mata-Castro, E., & Delgado-García, J. (2012). Method for photogrammetric surveying of archaeological sites with light aerial platforms. *Journal of Archaeological Science*, 39(2), 521–530. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2011.10.007>

Niedzielski, T., Spallek, W., & Witek-Kasprzak, M. (2018). *Automated Snow Extent Mapping Based on Orthophoto Images from Unmanned Aerial Vehicles*. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1843-8>

Niethammer, U., James, M., Rothmund, S., Travelletti, J., & Joswig, M. (2011). UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. *Engineering Geology*, 128, 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.03.012>

Niethammer, U., Rothmund, S., Schwaderer, U., Zeman, J., & Joswig, M. (2012). Open Source Image-Processing Tools for Low-Cost Uav-Based Landslide Investigations. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-1/(February 2016), 161–166. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-161-2011>

Ortuño, M., Guinau, M., Calvet, J., Furdada, G., Bordonau, J., Ruiz, A., & Camafort, M. (2017). Geomorphology Potential of airborne LiDAR data analysis to detect subtle landforms of slope failure : Portainé , Central Pyrenees. *Geomorphology*, 295(July), 364–382. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.07.015>

Osipov, V. I., Larionov, V. I., Burova, V. N., Frolova, N. I., & Sushchev, S. P. (2017). Methodology of natural risk assessment in Russia. *Natural Hazards*, 88(s1), 17–41. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2780-z>

Peng, L., Tang, F. F., Zhou, Z. Y., Liu, X., & Ruan, Z. M. (2015). Applying Lightweight UAV in Landslide Monitoring. *Applied Mechanics and Materials*, 738–739, 738–745. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.738-739.738>

Penna, D., Brocca, L., Borga, M., & Dalla Fontana, G. (2013). Soil moisture temporal stability at different depths on two alpine hillslopes during wet and dry periods. *Journal of Hydrology*, 477, 55–71. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.10.052>

Peppas, M. V., Mills, J. P., Moore, P., Miller, P. E., & Chambers, J. E. (2016a). Accuracy assessment of a uav-based landslide monitoring system. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 41, 895–902. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-895->

2016

Peppas, M. V., Mills, J. P., Moore, P., Miller, P. E., & Chambers, J. E. (2016b). Accuracy assessment of a uav-based landslide monitoring system. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 41(July), 895–902. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-895-2016>

Pesci, A., Teza, G., Casula, G., Fabris, M., & Bonforte, A. (2013). Remote sensing and geodetic measurements for volcanic slope monitoring: Surface variations measured at Northern Flank of La Fossa cone (Vulcano Island, Italy). *Remote Sensing*, 5(5), 2238–2256. <https://doi.org/10.3390/rs5052238>

Piras, M., Taddia, G., Forno, M. G., Gattiglio, M., Aicardi, I., Dabove, P., Russo, S. Lo, & Lingua, A. (2017). Detailed geological mapping in mountain areas using an unmanned aerial vehicle: application to the Rodoretto Valley, NW Italian Alps. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(1), 137–149. <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1225228>

Pollock, W., & Wartman, J. (2020). Human Vulnerability to Landslides. *GeoHealth*, 4(10), 1–17. <https://doi.org/10.1029/2020GH000287>

Possoch, M., Bieker, S., Hoffmeister, D., Bolten, A. A., Schellberg, J., & Bareth, G. (2016). Multi-Temporal crop surface models combined with the rgb vegetation index from UAV-based images for forage monitoring in grassland. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences ISPRS Archives*, 2016-Janua(July), 991–998. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B1-991-2016>

Prucksakorn, T., Wachirarattanakornkul, K., & Nilkhamhang, I. (2013). Unmanned aerial vehicle for observing landslide with iterative feedback tuning. *2013 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2013*. <https://doi.org/10.1109/ECTICon.2013.6559623>

Psimoulis, P. A., Houlié, N., Habboub, M., Michel, C., & Rothacher, M. (2018). Detection of ground motions using high-rate GPS time-series. *Geophysical Journal International*, *214*(2), 1237–1251. <https://doi.org/10.1093/gji/ggy198>

Ram, A. R., Brook, M. S., & Cronin, S. J. (2019). Engineering geomorphological investigation of the Kasavu landslide, Viti Levu, Fiji. *Landslides*, *16*(7), 1341–1351. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01191-x>

Rawat, M. S., Joshi, V., Rawat, B. S., & Kumar, K. (2011). Landslide movement monitoring using GPS technology : A case study of Bakthang landslide , Gangtok , East Sikkim , India. *Journal of Development and Agricultural Economics*, *3*(May), 194–200.

Rossini, M., Di Mauro, B., Garzonio, R., Baccolo, G., Cavallini, G., Mattavelli, M., De Amicis, M., & Colombo, R. (2018). Rapid melting dynamics of an alpine glacier with repeated UAV photogrammetry. *Geomorphology*, *304*, 159–172. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.12.039>

Růžičková, K., & Inspektor, T. (2015). Surface models for geosciences. In *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography* (Vol. 211). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-18407-4>

Samodra, G., Ramadhan, M. F., Sartohadi, J., Setiawan, M. A., Christanto, N., &

Sukmawijaya, A. (2020). Characterization of displacement and internal structure of landslides from multitemporal UAV and ERT imaging. *Landslides*, *17*(10), 2455–2468. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01428-0>

Tagliavini, F., Mantovani, M., Marcato, G., Pasuto, A., & Silvano, S. (2007). Validation of landslide hazard assessment by means of GPS monitoring technique – a case study in the Dolomites (Eastern Alps, Italy). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci*, *7*, 185–193. <https://doi.org/10.5194/nhess-7-185-2007>

Thomas, A. F., Frazier, A. E., Mathews, A. J., & Cordova, C. E. (2020). Impacts of Abrupt Terrain Changes and Grass Cover on Vertical Accuracy of UAS-SfM Derived Elevation Models. *Papers in Applied Geography*, *6*(4), 336–351. <https://doi.org/10.1080/23754931.2020.1782254>

Tiwari, A., Narayan, A. B., Devara, M., Dwivedi, R., Dikshit, O., Assessment, D., Reduction, R., Navigation, G., & Total, R. (2018). *Multi-Sensor Geodetic Approach for Landslide Detection and. IV*(November), 20–23. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-5-287-2018>

Tofani, V., Bicocchi, G., Rossi, G., Segoni, S., D'Ambrosio, M., Casagli, N., & Catani, F. (2017). Soil characterization for shallow landslides modeling: a case study in the Northern Apennines (Central Italy). *Landslides*, *14*(2), 755–770. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0809-8>

Turner, D., Lucieer, A., & de Jong, S. M. (2015). Time series analysis of landslide dynamics using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Remote Sensing*, *7*(2), 1736–1757. <https://doi.org/10.3390/rs70201736>

Ueyama, J., Freitas, H., Faical, B. S., Filho, G. P. R., Fini, P., Pessin, G., Gomes,

P. H., & Villas, L. A. (2014). Exploiting the use of unmanned aerial vehicles to provide resilience in wireless sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 52(12), 81–87. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2014.6979956>

Uhlemann, S., Smith, A., Chambers, J., Dixon, N., Dijkstra, T., Haslam, E., Meldrum, P., Merritt, A., Gunn, D., & Mackay, J. (2016). Assessment of ground-based monitoring techniques applied to landslide investigations. *Geomorphology*, 253, 438–451. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.10.027>

Uysal, M., Toprak, A. S., & Polat, N. (2015). DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 73, 539–543. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.06.010>

Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Govers, G., Verstraeten, G., & Demoulin, A. (2007). Characteristics of the size distribution of recent and historical landslides in a populated hilly region. *Earth and Planetary Science Letters*, 256(3–4), 588–603. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.01.040>

Ventura, G., Vilardo, G., & Terranova, C. (2013). Landslide Science and Practice. In *Landslide Science and Practice* (Vol. 2). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-31445-2>

Vrublová, D., Kapica, R., Jiráňková, E., & Struś, A. (2015). *Documentation od landslides and inaccessible parts of a mine using a unmanned UAV system and methods of digital terrestrial photogrammetry*. *LXI*(3), 8–19. <https://doi.org/10.1515/gse-2015-0018>

Wang, G. Q. (2013). Millimeter-accuracy GPS landslide monitoring using Precise

Point Positioning with Single Receiver Phase Ambiguity (PPP-SRPA) resolution: a case study in Puerto Rico. *Journal of Geodetic Science*, 3(1), 22–31. <https://doi.org/10.2478/jogs-2013-0001>

Wheaton, J. M., Brasington, J., Darby, S. E., & Sear, D. A. (2010). Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: Improved sediment budgets. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(2), 136–156. <https://doi.org/10.1002/esp.1886>

Wojciech, G., Wojciech, M., & Paweł, C. (2017). Comparison of low-altitude UAV photogrammetry with terrestrial laser scanning as data-source methods for terrain covered in low vegetation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 126, 168–179. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.02.015>

WP/WLI. (1993). *Describing landslides in several languages; the Multilingual Landslide Glossary* (p. 59).

Yang, D., Qiu, H., Hu, S., Pei, Y., Wang, X., Du, C., Long, Y., & Cao, M. (2021). Influence of successive landslides on topographic changes revealed by multitemporal high-resolution UAS-based DEM. *Catena*, 202(August 2020), 105229. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105229>

Yeh, C. H., Lin, M. L., Chan, Y. C., Chang, K. J., & Hsieh, Y. C. (2017). Dip-slope mapping of sedimentary terrain using polygon auto-tracing and airborne LiDAR topographic data. *Engineering Geology*, 222(November 2016), 236–249. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.04.009>

Zárate, B. (2011). Monitoreo de movimientos de ladera en el sector de San Pedro de Vilcabamba mediante procedimientos GPS. *Maskana*, 2(2), 17–25.

<https://doi.org/https://doi.org/10.18537/mskn.02.02.02>

Zárate, B., El Hamdouni, R., & Fernández, T. (2021a). Gnss and rpas integration techniques for studying landslide dynamics: Application to the areas of victoria and colinas lojanas, (loja, ecuador). *Remote Sensing*, 13(17). <https://doi.org/10.3390/rs13173496>

Zárate, B., El Hamdouni, R., & Fernández, T. (2021b). GNSS and RPAS Integration Techniques for Studying Landslide Dynamics: Application to the Areas of Victoria and Colinas Lojanas, (Loja, Ecuador). *Remote Sensing*, 13(17). <https://doi.org/10.3390/rs13173496>

Zeng, T., Ghulam, A., Yang, W. N., Grzovic, M., & Maimaitiyiming, M. (2015). Estimating the contribution of loose deposits to potential landslides over Wenchuan earthquake zone, China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(2), 750–762. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2349953>

Zeybek, M., & Şanlıoğlu, İ. (2019). Point cloud filtering on UAV based point cloud. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 133, 99–111. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.10.013>

Zhao, C., & Lu, Z. (2018). Remote sensing of landslides-A review. *Remote Sensing*, 10(2), 8–13. <https://doi.org/10.3390/rs10020279>