



UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

La Universidad Católica de Loja

ÁREA TÉCNICA

TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

Aplicación de técnicas de GPS y UAV al análisis de la dinámica de movimientos de ladera. Caso de estudio: vía Loja – Malacatos

TRABAJO DE TITULACIÓN

AUTORA: Ojeda Carrión, Soraya Vanessa.

DIRECTOR: Zárate Torres, Belizario Amador, M.Sc.

LOJA – ECUADOR

2018



Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

2018

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Magister.

Belizario Amador Zárate Torres.

DOCENTE DE LA TITULACIÓN

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación “Aplicación de técnicas de GPS y UAV al análisis de la dinámica de movimientos de ladera. Caso de estudio: vía Loja – Malacatos” realizado por Ojeda Carrión Soraya Vanessa, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, octubre de 2018

f)

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Yo, **Ojeda Carrión Soraya Vanessa** declaro ser autora del presente trabajo de titulación: Aplicación de técnicas de GPS y UAV al análisis de la dinámica de movimientos de ladera. Caso de estudio: vía Loja – Malacatos, de la Titulación de Ingeniería Civil, siendo el M.Sc. Belizario Amador Zárate Torres director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f.....

Autora: Ojeda Carrión Soraya Vanessa

Cédula: 1105146870

DEDICATORIA

Con inmenso cariño dedico este trabajo de fin de titulación:

A Dios, por ser mi guía, protección y fortaleza en cada etapa de mi vida.

A mis padres, Fabricio e Inés, quienes con inmenso cariño y comprensión han estado junto a mí en los buenos y malos momentos enseñándome a ser una mejor persona cada día, por todos sus sacrificios y velar siempre por el bienestar familiar, para ustedes papitos es que dedico todos mis logros, son mi mayor ejemplo de superación y fortaleza.

A mis hermanos, Fabricio Xavier y Karla Daniela, por ser mis compañeros de vida y mis mejores amigos, gracias por compartir mis triunfos, alegrías, tristezas y problemas, y por dejarme ser parte de los suyos, por su cariño y apoyo incondicional.

A mi abuelito, Manuel Adán, ejemplo de trabajo duro, constancia y entereza, gracias por todo su cariño, consejos y hacer de mis logros parte de su felicidad.

A mis abuelitas, mis angelitos en el cielo, Martha Elvira y Rosa Herminia, por enseñarme que los imposibles no existen, que se debe luchar con perseverancia y fuerza de carácter para salir adelante, por su amor, sus cuidados y enseñanzas, porque sin duda alguna siguen a mi lado cuidándome y bendiciéndome todos los días, las amo y extraño demasiado.

Con amor, Soraya Vanessa.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por otorgarme salud, vida y una grandiosa familia, por rodearme de buenas personas y oportunidades, convirtiendo siempre las adversidades en nuevas y grandiosas experiencias, fortaleciéndome e inspirándome continuamente.

Al Msc. Belizario Zárate Torres, director del presente trabajo de fin de titulación, por brindarme su confianza, paciencia y valioso asesoramiento durante el desarrollo este proyecto.

A la estimada Msc. María Soledad Segarra, coordinadora de la titulación de Ingeniería Civil de la UTPL, por concederme su apoyo, apertura y confianza a lo largo de mi formación profesional.

A mis queridos padres: a mi padre, Fabricio, mi fortaleza y mejor amigo, gracias por enseñarme a consolidar y desarrollar el carácter para resistir las dificultades. A mi madre, Inés, por educarme para afrontar la vida con entereza, amor y perdón. Gracias papitos por su amor, sus consejos, preocupación y apoyo incondicional, ayudándome siempre a cumplir con mis metas y sueños, la vida no me alcanzaría para retribuirles todos sus sacrificios y cariño.

A mis hermanos, Fabricio Xavier y Karla Daniela, gracias por motivarme y enseñarme a ser constante y decidida, alentándome siempre a ser una mejor persona y acompañándome incondicionalmente en mis alegrías y tristezas.

A mis abuelitos, Martha Carrión, Manuel Ojeda y Rosa Sarango, gracias por ser mi ejemplo de trabajo duro, responsabilidad y perseverancia, por todas sus enseñanzas, consejos, afecto y cuidados.

Con mucho cariño, a Cristian John, por su preciado apoyo en el desarrollo de este trabajo, por acompañarme a lo largo de toda mi carrera universitaria, gracias por estar presente en los buenos y malos momentos, por tu amor y motivación, espero que logremos continuar siempre como un gran equipo.

A los señores propietarios del terreno en análisis, por la apertura y facilidades otorgadas para la ejecución del proyecto.

Finalmente, a todos los amigos que me han respaldado a lo largo de esta etapa, de manera especial a María del Socorro Muñoz, quién se convirtió en mi mejor amiga, gracias por dejarme ser parte de tu familia, por tu cariño y preocupación a pesar de la distancia.

Soraya Vanessa Ojeda Carrión.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PORTADA.....	i
APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3

CAPÍTULO 1

ESTADO DEL ARTE

1.1. Introducción.....	6
1.2. Clasificación de los movimientos de ladera.....	6
1.3. Factores influyentes en el comportamiento e inestabilidad de laderas	7
1.3.1. Factores intrínsecos o condicionantes.....	8
1.3.2. Factores externos o desencadenantes.....	9
1.4. Técnicas empleadas en el monitoreo y control superficial de laderas	9
1.4.1. Técnicas geodésicas.....	10
1.4.1.1. Sistemas de posicionamiento global (GPS).....	10
1.4.2. Telemetría Láser por Scanner (SLR).....	10
1.4.3. Técnicas fotogramétricas	10
1.4.3.1. Vehículos aéreos no tripulados (UAV).....	11
1.5. Estudios previos sobre inestabilidad de laderas con técnicas GPS y UAV.....	11

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio	14
2.2. Geología local	15

2.3.	Materiales	15
2.3.1.	Puntos de control GPS y de apoyo fotogramétrico	15
2.3.2.	GPS doble frecuencia (DGPS).....	15
2.3.3.	Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV).....	16
2.4.	Metodología.....	17
2.4.1.	Instalación de red de puntos de control y monitoreo GPS	17
2.4.2.	Aplicación de técnicas fotogramétricas.....	18
2.4.3.	Caracterización geotécnica de los suelos.....	18

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1.	Caracterización geotécnica de los suelos	22
3.1.1.	Clasificación SUCS	22
3.1.2.	Ensayo Triaxial	22
3.1.3.	Permeabilidad in situ, método de Lefranc.....	23
3.2.	Monitoreo GPS.....	23
3.2.1.	Velocidad del desplazamiento	23
3.2.2.	Variación de las coordenadas a través del tiempo.....	26
3.3.	Monitoreo fotogramétrico con UAV.....	34
	CONCLUSIONES	41
	RECOMENDACIONES.....	42
	BIBLIOGRAFÍA.....	43
	ANEXOS	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de movimientos de ladera.	6
Tabla 2. Escala de velocidades de los deslizamientos de laderas. (Adaptado de Cruden & Varnes de 1996).....	7
Tabla 3. Factores intrínsecos o condicionantes.	8
Tabla 4. Valores de coeficiente de permeabilidad (cm/s). (Adaptado de Terzaghi & Peck, 1973)	8
Tabla 5. Factores externos o desencadenantes.....	9
Tabla 6. Precisión del Sistema de Posición Global (GPS).....	10
Tabla 7. Investigaciones sobre inestabilidad de laderas con técnicas GPS y UAV.	11
Tabla 8. Coordenadas de ubicación de la zona de estudio.	14
Tabla 9. Períodos de monitoreo GPS	17
Tabla 10. Coordenadas de ubicación de cada punto de muestreo.....	19
Tabla 11. Clasificación SUCS de los suelos.....	22
Tabla 12. Resultados ensayo Triaxial.....	23
Tabla 13. Resultados de los ensayos de permeabilidad in situ.	23
Tabla 14. Velocidad del deslizamiento de acuerdo al monitoreo GPS.....	24
Tabla 15. Variación de las coordenadas Este (X) de cada punto de control a través del tiempo.	26
Tabla 16. Variación de las coordenadas Norte (Y) de cada punto de control a través del tiempo.	28
Tabla 17. Variación de las coordenadas de Altitud (Z) de cada punto de control a través del tiempo.....	30
Tabla 18. Error total en el procesamiento de el MDS y la ortofoto de enero 2018.....	34
Tabla 19. Error total en el procesamiento de el MDS y la ortofoto de septiembre 2018.....	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio.	14
Figura 2. Puntos de control GPS y de apoyo fotogramétrico.	15
Figura 3. GPS doble frecuencia Trimble R6.	16
Figura 4. Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV) Phantom 2.	16
Figura 5. Distribución de los puntos de control GPS y de apoyo fotogramétrico en el área en estudio.	17
Figura 6. Puntos de apoyo fotogramétrico.	18
Figura 7. Puntos de muestreo en la zona en estudio.	19
Figura 8. Ensayo de permeabilidad in situ por el método de Lefranc.	20
Figura 9. Vectores de desplazamiento.	25
Figura 10. Variación de la coordenada este de cada punto de control a través del tiempo.	27
Figura 11. Desplazamiento efectivo de cada punto de control hacia el este.	27
Figura 12. Variación de la coordenada norte de cada punto de control a través del tiempo.	29
Figura 13. Desplazamiento efectivo de cada punto de control hacia el norte.	29
Figura 14. Variación de la coordenada de altitud en cada punto de control a través del tiempo.	31
Figura 15. Desplazamiento efectivo de cada punto de control en altitud.	31
Figura 16. Curva de interpolación (color rojo) y curva de predicción (color azul) para los datos de Pc14 en su coordenada de altitud.	32
Figura 17. Modelación del polígono en estudio.	33
Figura 18. Distribución de los puntos de apoyo fotogramétrico en el segundo monitoreo con UAV.	35
Figura 19. Ortofotos de la zona en estudio. Izquierda: Ortofoto de enero 2018. Derecha: Ortofoto de septiembre 2018.	36
Figura 20. Modelos Digitales de Superficie de la zona en estudio. Izquierda: MDS de enero 2018. Derecha: MDS de septiembre 2018.	37
Figura 21. Diferencia entre Modelos Digitales de Superficie.	38
Figura 22 A. Comparación entre zonas del mapa de diferencia de elevación y las ortofotos del sector.	39
Figura 22 B. Comparación entre zonas del mapa de diferencia de elevación y las ortofotos del sector.	40

RESUMEN

Los movimientos de ladera se constituyen en un fenómeno de alto riesgo natural y destructivo para las diferentes localidades, convirtiéndose en una amenaza para la vida y los bienes materiales de las poblaciones, Ecuador no posee los datos necesarios para predecir el comportamiento de este fenómeno con el tiempo.

La finalidad del presente proyecto de investigación es el análisis del comportamiento dinámico de un movimiento de ladera ubicada en la vía Loja – Malacatos, mediante la aplicación de productos fotogramétricos y técnicas GPS para determinar los vectores de desplazamiento y velocidad, así mismo, mediante un software SIG obtener los modelos digitales de las zonas de afectación (MDS) y la predicción del comportamiento del área en estudio a través del tiempo. Para cumplir con este objetivo se establecieron las características físicas y mecánicas de los suelos mediante ensayos de laboratorio, siete campañas de medición GPS y dos campañas fotogramétricas con UAV en un período de seis meses.

Esto ayudará a determinar la dinámica del terreno y sus cambios geomorfológicos para mantener y preservar la vía en estudio.

Palabras clave: Movimientos de ladera, Sistema de Posicionamiento Global (GPS), Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV), Modelo Digital de Superficie (MDS), SIG (Sistemas de Información Geográfica).

ABSTRACT

Hillside movements constitute a phenomenon of high natural and destructive risk for the different localities, becoming a threat to the life and material goods of the populations; Ecuador does not have the necessary data to predict the behavior of this phenomenon over time.

The purpose of this research is the analysis of the dynamic behavior of hillside movements located on Loja - Malacatos road. By the application of photogrammetric products and GPS techniques to determine displacement and velocity vectors, as well as, through software GIS obtain the digital models of the affected areas (MDS) and the prediction of the behavior of the space under study over time. To achieve this objective, physical and mechanical characteristics of soils were established by laboratory tests, seven measurement campaigns with GPS and two photogrammetric campaigns with UAV over a period of six months.

It will help to determine the dynamics and geomorphological changes of terrain, with the purpose of maintaining the road under study.

Keywords: Hillside movements, Global Positioning System (GPS), Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Digital Surface Model (MDS), GIS (Geographic Information Systems).

INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos de laderas ocasionan graves efectos en el medio ambiente y la sociedad, estos fenómenos alteran el ecosistema al destruir la vegetación y de manera análoga el hábitat de la vida silvestre existente en el sector. Hay que mencionar además que estos movimientos de masas inhabilitan las vías de comunicación, viviendas o cualquier infraestructura aledaña a la zona afectada y se constituyen en una gran amenaza para la vida humana. Considerando la ubicación geográfica del Ecuador y de acuerdo a la Secretaría de Gestión de Riesgos (2014), son diversas las amenazas naturales que han ocasionado un elevado impacto socio-económico al país, entre las de alta incidencia se encuentran los movimientos de laderas con mayores reportes de daños o afectaciones en las provincias de: Loja, Azuay, Esmeraldas, Manabí, Pichincha, Cañar y Napo. Por consiguiente, es fundamental e importante monitorear el medio ambiente.

El presente trabajo de investigación determina el comportamiento dinámico de un movimiento de ladera, ubicada en un tramo de la vía Loja – Malacatos, al sur del Ecuador, empleando técnicas referentes al sistema de posicionamiento global (GPS) y de vehículos aéreos no tripulados (UAV), a través del registro de los cambios superficiales y medidas de coordenadas de diferentes puntos de control, así mismo, con el propósito de complementar este estudio, se establece la relación de los cambios geomorfológicos presentados en el sector en análisis con las características del suelo. La vía Loja – Malacatos, es una de las rutas en el sur del país que presenta mayores problemas en épocas de lluvias por movimientos de laderas, como lo establece uno de los artículos pertenecientes a Diario La Hora (2017), del mes de febrero, en el cual se evidencia el mal estado de la vía durante la época invernal, presentando algunos derrumbes que dificultan el tráfico vehicular.

Las vías terrestres contribuyen al avance socio-económico de las poblaciones e indiscutiblemente existe una estrecha relación entre el estado del medio ambiente y el progreso de las naciones, por consiguiente, la contaminación de los recursos naturales, el aumento en la densidad demográfica y el cambio climático instauran elementos de vulnerabilidad en las diferentes localidades. Se debe hacer frente a estas amenazas con una acción anticipada de prevención, que permita tomar decisiones oportunas, formular normas de regulación de los recursos, promover alternativas de mitigación y todo aquello que contribuya a la conservación del entorno. Para cumplir con este fin es prioritario la utilización de nuevos instrumentos, medios y equipos tecnológicos de punta, como el GPS y los UAV.

El sistema GPS permite determinar información de posicionamiento con una alta confiabilidad, y bajo cualquier condición meteorológica, funciona mediante las señales transmitidas por los satélites en órbita alrededor del planeta tierra y la trilateración con ellos (Carranco et al., 2016). Este sistema creado para fines militares por el Departamento de Defensa de los EE. UU, entre 1970 y 1980 apertura su disponibilidad para usos civiles (Rutter, 2007). Actualmente el GPS Diferencial (DGPS) es el sistema que alcanza mayores precisiones en tiempo real en comparación al convencional y es una de las tecnologías aplicadas satisfactoriamente en proyectos de monitoreo y control de deslizamientos de laderas (Acar, 2010; Tomás, Delgado, & López, 2005).

Los UAV o drones, que inicialmente se empleaban en tareas militares, se han desarrollado ampliamente en el ámbito civil y las primeras experiencias dentro del campo de la ingeniería geomática fueron realizadas por Przybilla y Wester-Ebbinghaus en 1979 (Fernández et al., 2014; Gong et al., 2010; Niethammer, James, Rothmund, Travelletti, & Joswig, 2012; Remondino, Barazzetti, Nex, Scaioni, & Sarazzi, 2011) . Hay que destacar que, en los últimos años, su tecnología se ha desarrollado considerablemente, permitiendo la obtención en 3D y alta resolución de modelos digitales del terreno, mediante el uso de técnicas de fotogrametría y softwares de sistemas de información geográfica (GIS) (Ruiz, Corominas, & Hürlimann, 2017).

Para el desarrollo de este proyecto de investigación se efectuó un reconocimiento en la zona de estudio para instalar una red de puntos de control GPS y de apoyo fotogramétrico, los mismos se establecieron fijando en el terreno una varilla de acero con hormigón simple. Con los datos de las campañas de medición GPS, se efectuó una modelación del polígono en estudio y su cambio a través del tiempo, por otra parte, la información recolectada por el dron se procesó para obtener las ortofotos y los modelos digitales de superficie (MDS), adicionalmente, se realizaron ensayos de laboratorio de suelo: pruebas para su caracterización, triaxial y permeabilidad in situ.

El presente informe está estructurado por tres capítulos: el primer capítulo contiene todo lo referente al estado del arte, el segundo se enmarca en lo concerniente a materiales y métodos, el tercero al análisis de resultados y finalmente se establecen las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO 1

ESTADO DEL ARTE

1.1. Introducción

En este apartado se efectúa una revisión de la literatura con respecto a las diversas técnicas y factores involucrados en el análisis y monitoreo de movimientos de ladera. El objetivo de este capítulo es valorar diferentes investigaciones en las que se empleen técnicas fotogramétricas con vehículos aéreos no tripulados (UAV) y sistemas de posicionamiento global (GPS). Este capítulo se encuentra estructurado en tres partes: para empezar se efectúa la clasificación de los movimientos de ladera, luego se definen los factores influyentes en su comportamiento e inestabilidad, seguidamente se describen las técnicas empleadas para su monitoreo y control superficial, finalmente se realiza un análisis de los estudios elaborados en algunos países sobre esta temática.

1.2. Clasificación de los movimientos de ladera

Son diversos los factores y perspectivas que influyen en las múltiples clasificaciones existentes de movimientos de ladera, entre los cuáles se puede mencionar los siguientes: características morfológicas, mecanismo, velocidad y causas del deslizamiento, además del tamaño y naturaleza de los materiales implicados. Sin embargo, la clasificación ampliamente aceptada a nivel internacional es la desarrollada por Varnes (1978) (Tabla 1) y se fundamenta en el mecanismo del movimiento existente tanto en rocas y suelos en los que predominan partículas gruesas o finas (Alcántara Ayala, 2000).

Tabla 1. Clasificación de movimientos de ladera.

Tipo de movimiento	Tipo de material
Caídas o Desprendimientos (<i>falls</i>)	
Basculamientos o Vuelcos (<i>topples</i>)	• Roca
Deslizamientos	
(slides)	Rotacional
	Translacional
Desplazamientos o derivas laterales (<i>lateral spreads</i>)	• Suelos en los que:
	✓ Predominan partículas gruesas.
	✓ Predominan partículas finas.
Flujos (<i>flows</i>)	
Complejos (<i>complex</i>)	
Combinación de dos o más tipos de movimientos.	

Fuente: Varnes (1978).

Elaboración: El autor.

En la Tabla 2, se describe la escala de velocidades para deslizamientos de laderas y su impacto en la sociedad e infraestructuras aledañas a las zonas afectadas.

Tabla 2. Escala de velocidades de los deslizamientos de laderas. (Adaptado de Cruden & Varnes de 1996).

Clasificación de la velocidad	Velocidad	Límites de velocidad	Descripción	Impacto
7	3 m/s	5 m/s	Extremadamente rápido	Catástrofe de gran violencia, edificios totalmente destrozados y deceso de la población por el impacto del material desplazado o por su disgregación.
6	0.3 m/min	3 m/min	Muy rápido	Gran destrucción y pérdidas de algunas vidas porque la velocidad del movimiento no permite la evacuación de todas las personas.
5	1.5 m/día	1.8 m/hora	Rápido	Destrucción de las infraestructuras del sector y posible escape y evacuación de la población.
4	1.5 m/mes	13 m/mes	Moderado	Las estructuras localizadas en la masa desplazada son dañadas en gran medida, mientras que, las estructuras poco sensibles pueden ser mantenidas.
3	1.5 m/año	1.6 m/año	Lento	Carreteras y estructuras poco sensibles pueden ser mantenidas a través de frecuentes trabajos de mantenimiento.
2	0.06 m/año	0.016 m/año	Muy lento	Las estructuras permanentes no son dañadas y si son agrietadas por el movimiento, pueden ser reparadas.
1	Extremadamente lento	Imperceptible, no hay daño a las estructuras construidas con precaución.

Fuente: Alcántara Ayala (2000).

Elaboración: El autor.

1.3. Factores influyentes en el comportamiento e inestabilidad de laderas

Existen dos grupos de factores que intervienen en el movimiento e inestabilidad de laderas: los intrínsecos al material o condicionantes y los factores externos o desencadenantes. El primer grupo, depende de las tipologías propias de la ladera en estudio y los factores

desencadenantes, son todos aquellos que al actuar sobre la zona en análisis modifican sus características iniciales. (Cuanalo, Oliva, & Gallardo, 2011; Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1995)

1.3.1. Factores intrínsecos o condicionantes

Los factores intrínsecos o condicionantes, son los que establecen el mecanismo y modelo de rotura en la zona, estos factores se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3. Factores intrínsecos o condicionantes.

Factor	Descripción
Relieve	El efecto gravitacional aumenta con la pendiente.
Caracterización geotécnica de los suelos	Propiedades físicas y mecánicas, de acuerdo a su granulometría, límites de Atterberg, cohesión, ángulo de fricción, permeabilidad, etc.
Comportamiento hidrogeológico	El agua subterránea, aumenta el peso volumétrico del sector y disminuye definitivamente su resistencia al cortante.
Vegetación	Previene la erosión, al reducir el impacto de las gotas de lluvia y la velocidad de la escorrentía superficial.

Fuente: Cuanalo Campos et al. (2011).

Elaboración: El autor.

En la Tabla 4 se muestran los valores de los diferentes coeficientes de permeabilidad K (cm/s) y su relación con el tipo de drenaje y suelo.

Tabla 4. Valores de coeficiente de permeabilidad (cm/s). (Adaptado de Terzaghi & Peck, 1973)

	100	10	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹
Drenaje	Bueno					Pobre			Prácticamente impermeable			
Tipo de suelo	Grava limpia	Arenas limpias y mezclas limpias de arena y grava			Arenas muy finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezcla de arena, limo y arcilla, morenas glaciares, depósitos de arcilla estratificada.				Suelos impermeables, es decir arcillas homogéneas situadas por debajo de la zona de descomposición.			

Fuente: Angelone, Garibay, & Cauhapé Casaux (2006).

Elaboración: El autor.

1.3.2. Factores externos o desencadenantes

Los factores externos o desencadenantes son responsables de las variaciones en el estado de equilibrio y de la magnitud del movimiento, estos factores se describen en la Tabla 5.

Tabla 5. Factores externos o desencadenantes.

Factor	Descripción
Lluvias	Aumenta el nivel freático y grado de meteorización de la zona, las lluvias de mayor intensidad y duración son el principal factor desencadenante de deslizamiento.
Terremotos	De acuerdo a su magnitud, las vibraciones sísmicas producen oscilaciones en el estado de esfuerzos al interior del talud.
Erupciones volcánicas	Ocasionan flujos rápidos o avalanchas de derrubios de gran magnitud.
Congelación y deshielo	Este fenómeno climático causa contracciones y expansiones en el terreno.
Erosión y socavación	Los ríos originan socavación del material al pie de la ladera, modificando su estabilidad.
Actividad humana	Promueve la inestabilidad de laderas por excavaciones, apertura de vías, sobrecargas debido a diversas construcciones, deforestación, modificación del drenaje superficial afectando directamente el nivel freático.

Fuente: Cuanalo Campos et al. (2011).

Elaboración: El autor.

1.4. Técnicas empleadas en el monitoreo y control superficial de laderas

Las técnicas empleadas para el monitoreo de desplazamientos en laderas proporcionan y describen las características del movimiento, como la velocidad, extensión del área afectada y mecanismo que rige el fenómeno, por consiguiente, permiten evaluar la eficiencia de sistemas de regulación y medidas de mitigación. Considerando el avance tecnológico, surgen nuevas metodologías de control superficial como el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), la Telemetría Láser por Scanner (SLR) y la fotogrametría (Tomás et al., 2005; Zárate, 2011).

1.4.1. Técnicas geodésicas

1.4.1.1. Sistemas de posicionamiento global (GPS)

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es una técnica utilizada principalmente en investigaciones geofísicas, de manera específica en la medición de deformaciones activas de la superficie terrestre (Dixon, 1991; Malet, Maquaire, & Calais, 2002). Este sistema se basa en las señales transmitidas por 24 satélites activos que giran alrededor de la Tierra emitiendo ondas especiales para suministrar información tridimensional de posición durante las 24 horas del día y bajo cualquier condición meteorológica. Los beneficios de emplear esta técnica comparados a los métodos topográficos convencionales se encuentran relacionados al costo de mano de obra, ahorro de tiempo y mayor precisión (Czerniak & Reilly, 1998 ; Tomás et al., 2005). En la Tabla 6 se muestran las técnicas empleadas con el uso de GPS y el grado de precisión en cada uno de ellos.

Tabla 6. Precisión del Sistema de Posición Global (GPS).

Método		Precisión
GPS convencional (CGPS)		1 – 2 mm
GPS diferencial (DGPS)		1 mm
GPS	Método	Error planimétrico
diferencial (DGPS)	Estático Rápido (Fast Static) (FS)	5 mm + 1 ppm
	Cinématico en tiempo real (Real Time Kinematic) (RTK)	10 mm + 2 ppm

Fuente: Gili et al. (2000) ; Tomás et al. (2005).

Elaboración: El autor.

1.4.2. Telemetría Láser por Scanner (SLR)

La Telemetría Láser por Scanner (SLR), emplea estaciones láser terrestres y satélites en órbita con retro reflectores para calcular el tiempo y distancia de vuelo bidireccional. Los datos obtenidos con esta técnica durante un período de varios años, brinda una precisión milimétrica en el análisis de los desplazamientos o deformaciones en la corteza del planeta Tierra (Tomás et al., 2005).

1.4.3. Técnicas fotogramétricas

La fotogrametría radica en la obtención de un panorama tridimensional a partir de pares de fotogramas tomadas desde distintos ángulos. En cuanto a su clasificación, se distinguen tres métodos. *La fotogrametría terrestre*, provee una precisión de 40mm y es apropiada en investigaciones en áreas reducidas. *La fotogrametría aérea*, permite la creación de modelos digitales de superficie (MDS) mediante el procesamiento de las imágenes obtenidas, por lo cual, es idónea para comparar los cambios superficiales de la zona en estudio a través del

tiempo; esta metodología cuenta con una precisión de 100mm. *La fotogrametría satelital*, es la técnica con menor precisión hasta el momento, las imágenes estereoscópicas para su aplicación son adquiridas desde una plataforma espacial (Tomás et al., 2005).

1.4.3.1. Vehículos aéreos no tripulados (UAV)

Actualmente los UAV, son una alternativa de bajo costo y una valiosa fuente de datos para resolver problemas de inspección, vigilancia, mapeo y modelado 3D. En las investigaciones relacionadas a riesgos naturales, la obtención de imágenes desde UAV tiene considerables ventajas, como por ejemplo en el estudio de deslizamientos de laderas que por lo general ocurren en lugares de difícil acceso y de gran pendiente, factores de alto riesgo para los investigadores y de limitación en la obtención de datos representativos de la zona, al realizar coberturas fotogramétricas de varias campañas con estos dispositivos y obtener los MDT, se pueden analizar los cambios de volumen en el terreno, caracterizar las fisuras o determinar la evolución de los movimientos de masa a través del tiempo (Bull, Núñez, Lantada, & Prades, 2016; Remondino et al., 2011).

1.5. Estudios previos sobre inestabilidad de laderas con técnicas GPS y UAV

En la primera sección se especificaron los diversos factores influyentes en el comportamiento e inestabilidad de laderas, en esta sección se detallan algunas investigaciones previas sobre esta temática en las que se apliquen técnicas de sistema de posicionamiento global (GPS) y fotogramétricas con vehículos aéreos no tripulados (UAV), las mismas que se detallan en la Tabla 7.

Tabla 7. Investigaciones sobre inestabilidad de laderas con técnicas GPS y UAV.

Autores	Lugar		Técnica	Factores analizados	Área de estudio	Período de monitoreo
	País	Sector				
Araujo, Huarez, Taípe, & Miranda (2017)	Perú	Deslizamiento Madrigal, ubicado en la provincia Caylloma, departamento de Arequipa.	Sistema de Posicionamiento Global, (DGPS). Método RTK.	<ul style="list-style-type: none"> • Dinámica del deslizamiento • Precipitación • Hidrogeológicos • Sísmicos. 	4 340 m ²	4 meses durante el año 2016.
Gili et al. (2000)	España	Deslizamiento de Vallcebre, Pirineos Orientales	Sistema de Posicionamiento Global, (DGPS). Método FS y método RTK.	<ul style="list-style-type: none"> • Dinámica del deslizamiento. 	0.8 Km ²	26 meses durante los años 1996/1997.

Ramos, Gil, & Feito (s. f.)	España	Atalayuela, en el municipio de Andújar.	Sistema de Posicionamiento Global, (DGPS). Método FS y método Stop and Go.	<ul style="list-style-type: none"> • Dinámica del deslizamiento • Precipitación 	53000 m ² = 5.3 ha	NE
Carranco et al. (2016)	México	Deslizamiento en el Municipio de Celaya, estado de Guanajuato	Sistema de Posicionamiento Global, (DGPS). Método FS y método RTK.	<ul style="list-style-type: none"> • Dinámica del deslizamiento 	24 km ²	3 mediciones durante los años 2001, 2012 y 2015.
Martínez-Yáñez et al. (2009)	México	Cerro de Chiquihuite, ubicado en Ciudad de México	Sistema de Posicionamiento Global, (DGPS). Método FS.	<ul style="list-style-type: none"> • Dinámica del deslizamiento • Precipitación • Pendiente y relieve topográfico. 	600 m ²	Mayor a 5 años, desde octubre del 2000 a enero del 2006.
Ruiz et al. (2017)	España	Cuenca de <i>El Rebaixader</i> , en el pirineo catalán.	Fotogrametría de alta resolución UAV	<ul style="list-style-type: none"> • Dinámica del deslizamiento 	NE	Una serie de vuelos en 2016 y 2017
Fernández-Chacón et al. (2015)	España	Talud de la carretera A-348 Torvizcón-Cádiar en Alpujarra. Provincia de Granada	Fotogrametría de alta resolución UAV	<ul style="list-style-type: none"> • Dinámica del deslizamiento 	1.5 km ²	2 años durante el 2014 y 2015.

NE = No Especificado

Fuente: Araujo et al. (2017) ; Carranco et al. (2016) ; Fernández-Chacón et al. (2015) ; Gili et al. (2000) ; Martínez-Yáñez et al. (2009) ; Ramos Galán et al. (s. f.) ; Ruiz et al. (2017).

Elaboración: El Autor.

Las investigaciones analizadas, por lo general realizan un monitoreo de la dinámica del deslizamiento con el sistema de posicionamiento global DGPS en varias modalidades entre ellas Fast Static (FS), Real Time Kinematic (RTK) y Stop and Go, siendo la modalidad FS en comparación a la RTK la de mejor precisión milimétrica en áreas pequeñas de estudio y la fase Stop and Go de mayor eficiencia en áreas de mayor tamaño. Dentro de los elementos desencadenantes de movimiento se analizan los factores hidrogeológicos, sísmicos y la precipitación.

Por otra parte, la fotogrametría de alta resolución empleando UAV es eficaz en el análisis cinemático de taludes individuales o en aéreas pequeñas, es un dispositivo útil para el estudio de sectores críticos garantizando de mejor manera la detección temprana y post-eventos con la creación de modelos digitales de elevación de superficie (MDS).

CAPÍTULO 2
MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La zona en estudio se encuentra en el kilómetro 12 + 500 de la vía Loja – Malacatos, al sur del Ecuador, en la falla hidrogeológica del sector Pueblo Nuevo (Figura 1), se cubre un área de 2.4 ha aproximadamente, con coordenadas de ubicación establecidas en la Tabla 8.

Tabla 8. Coordenadas de ubicación de la zona de estudio.

Coordenadas UTM / DATUM WGS84		
Norte	Este	Elevación
9545626.996	699348.054	2169.776

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.



Figura 1. Área de estudio.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor

2.2. Geología local

De acuerdo a la hoja geológica de Gonzanamá del año 2017, publicada en escala 1: 100 000 por el Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico, del Ecuador (INIGEMM), el área en estudio se encuentra ubicada dentro de la Unidad Chigüinda, que forma el basamento de las cuencas de Loja y Vilcabamba, con edad paleozoica, en el que se incluyen cuarcitas, secuencias de rocas metamórficas de bajo grado con pizarras y filitas, esquistos pelíticos y esquistos grafitosos (Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico, 2017).

2.3. Materiales

2.3.1. Puntos de control GPS y de apoyo fotogramétrico

Los puntos de control GPS y de apoyo fotogramétrico se construyen in situ, para lo cual, se excavan orificios de 40 cm de profundidad y 20 cm de diámetro, posteriormente se fijan en el centro varillas corrugadas de 12 mm x 50 cm con hormigón simple, finalmente en la parte superior de las varillas se ranura en forma de cruz con 3mm de profundidad para sujetar el bastón del equipo móvil del GPS doble frecuencia. (Figura 2).



Figura 2. Puntos de control GPS y de apoyo fotogramétrico.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

2.3.2. GPS doble frecuencia (DGPS)

Para el monitoreo de la zona en estudio, se empleó receptores GPS doble frecuencia Trimble R6 (Figura 3), en su modalidad Fast Static (FS). La precisión de este método es: horizontal $\pm 3 \text{ mm} + 0.1 \text{ ppm}$ y vertical $\pm 3.5 \text{ mm} + 0.4 \text{ ppm}$ (Runco S.A, 2010).



Figura 3. GPS doble frecuencia Trimble R6.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

2.3.3. Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV)

Para aplicar las técnicas fotogramétricas, se empleó un vehículo aéreo no tripulado (UAV) modelo Phantom 2 (Figura 4), desarrollado por la empresa DJI, esta aeronave pesa 1000 gr incluyendo sus baterías y propulsores, el tiempo de autonomía de vuelo es de 25 minutos por cada batería, sus velocidades máximas son: de ascenso 6 m/s, de descenso 2 m/s y velocidad máxima de vuelo 15 m/s. Posee una precisión de desplazamiento vertical de 0.8 metros y horizontal de 2.5 metros (Bañón et al., 2014 ; DJI, 2018 ; Gomila, Arancibia, & Veloso, 2015).



Figura 4. Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV) Phantom 2.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

2.4. Metodología

2.4.1. Instalación de red de puntos de control y monitoreo GPS

Se instaló una red de 14 puntos de control y de apoyo fotogramétrico distribuidos en toda el área de estudio (Figura 5). Los monitoreos con receptores GPS Trimble R6 de doble frecuencia, en su modalidad Fast Static, se realizaron durante un período de 7 meses (Tabla 9), estabilizando el equipo móvil en cada punto de control durante 10 minutos, la estación base se situó en una vivienda aledaña al sector, con distancias entre los 62 y 264 metros entre la base y los puntos de control.



Figura 5. Distribución de los puntos de control GPS y de apoyo fotogramétrico en el área en estudio.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

Tabla 9. Períodos de monitoreo GPS

Monitoreo	Fecha
1	Jueves, 18 de enero del 2018.
2	Martes, 30 de enero del 2018.
3	Sábado, 21 de abril del 2018.
4	Sábado, 19 de mayo del 2018.
5	Sábado, 02 de junio del 2018.
6	Martes, 26 de junio del 2018.
7	Sábado, 14 de julio del 2018.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

2.4.2. Aplicación de técnicas fotogramétricas

Para obtener las ortofotos y modelos digitales de superficie (MDS) de la zona en estudio, se empleó un UAV Phantom 2 provisto de una cámara Mapir Survey 2 de 16 megapíxeles, para realizar el vuelo con el dron se emplearon marcas en color blanco y negro de 1.20m x 1.20m (Figura 6) como puntos de apoyo fotogramétricos.

Se ejecutaron dos monitoreos fotogramétricos en el sector, en el mes de enero y septiembre del 2018, en el primer monitoreo se comprendió un área total de 0.239 km² con una altura de vuelo de 88 m, mientras que, en el segundo período de medición, una altura de vuelo de 94.40 m y cobertura de 0.281 km².



Figura 6. Puntos de apoyo fotogramétrico.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

2.4.3. Caracterización geotécnica de los suelos

Con el propósito de obtener las propiedades físicas y mecánicas de los suelos existentes en la zona en análisis, se extraen muestras alteradas a una profundidad de 1.5 m (Figura 7), las coordenadas de ubicación de cada punto de muestreo se exponen en la Tabla 10.



Figura 7. Puntos de muestreo en la zona en estudio.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

Tabla 10. Coordenadas de ubicación de cada punto de muestreo

Coordenadas UTM/DATUM WGS 84			
	Norte	Este	Elevación
Corona	9545621.63	699350.952	2164.40
Media ladera 1	9545560.59	699440.709	2143.50
Media ladera 2	9545703.47	699402.263	2153.20
Pie	9545668.69	699504.058	2121.30

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

La clasificación de los suelos se determinó mediante el sistema SUCS, para lo cual se realizaron ensayos de granulometría y límites de Atterberg, para obtener la cohesión y ángulo de fricción se desarrollaron ensayos triaxial con probetas remoldeadas. Hay que mencionar, además que se efectuaron ensayos de permeabilidad in situ por el método de Lefranc (Figura 8) en cada punto de muestro, empleando tubos PVC de 3 pulgadas de diámetro y 50cm de longitud, para la ejecución de esta prueba se deben establecer lecturas de descenso del flujo de agua cada 10 minutos hasta obtener 3 lecturas con valores constantes.

El coeficiente de permeabilidad K, se estableció en base a la Ecuación 1:

$$K = \frac{V * L}{H * A * t}$$

Ecuación 1

Dónde:

K = Coeficiente de permeabilidad en cm/s.

V= H * A, volumen promedio drenado en cm³.

L = Longitud del tubo PVC en cm.

H = Altura promedio de descenso del flujo del agua en cm.

A = Área transversal del tubo PVC empleado para el ensayo en cm².

t = tiempo de saturación del suelo en minutos.



Figura 8. Ensayo de permeabilidad in situ por el método de Lefranc.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

CAPÍTULO 3
ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Caracterización geotécnica de los suelos

3.1.1. Clasificación SUCS

Se determinaron puntos de muestreo a nivel de corona, media ladera y pie de talud, de los cuales se obtuvieron muestras alteradas a una profundidad de 1.5 m para desarrollar los ensayos de laboratorio necesarios para su clasificación, cuyos resultados se detallan en la Tabla 11.

Tabla 11. Clasificación SUCS de los suelos.

Puntos de muestreo	Corona	Media Ladera 1	Media Ladera 2	Pie	
Contenido de Humedad.					
W (%)	15.74	11.80	10.32	18.68	
Granulometría	% Grava	26.79	39.96	31.31	18.74
	% Arena	21.27	25.33	32.14	23.36
	% Finos	51.94	34.71	36.54	57.90
Límite Líquido					
LL (%)	25.36	24.39	24.90	25.91	
Límites de Atterbeg	Límite Plástico				
	LP (%)	17.63	20.78	18.59	17.84
Índice de Plasticidad (%)					
	7.73	3.61	6.31	8.08	
Clasificación SUCS	CL	SC	SC	CL	
	Arcilla de baja plasticidad	Arena arcillosa	Arena arcillosa	Arcilla de baja plasticidad	

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

3.1.2. Ensayo Triaxial

Los ensayos triaxial se realizaron con probetas remoldeadas, a fin de establecer la relación esfuerzo/deformación del suelo. En la Tabla 12 se especifican los parámetros de cohesión y ángulo de fricción derivados de los círculos de Mohr de esta prueba.

Tabla 12. Resultados ensayo Triaxial

Puntos de muestreo		Corona	Media Ladera 1	Media Ladera 2	Pie
Ensayo Triaxial	Cohesión (kg/cm ²)	0.15	0.25	0.16	0.24
	Ángulo de fricción (θ)	30.75	31.04	30.39	31.66

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

3.1.3. Permeabilidad in situ, método de Lefranc

Se ejecutaron ensayos in situ en cada punto de muestreo para determinar el coeficiente de permeabilidad K, parámetro que describe la velocidad de infiltración del agua a través del estrato de suelo. (Tabla 13)

Tabla 13. Resultados de los ensayos de permeabilidad in situ.

Puntos de muestreo	Corona	Media Ladera 1	Media Ladera 2	Pie	
	H (cm)	H (cm)	H (cm)	H (cm)	
40	31	36	38.70	19.9	
10	29.50	28	37.30	14.2	
10	29.50	22.50	34.70	11.9	
Tiempo (min)	10	29	20	31	10.8
	10	18	17.50	28.80	9.8
	10	18	17.50	28.80	9.8
	10	18	17.50	28.80	9.8
K (cm/s)	8.33 x 10 ⁻³				
Drenaje	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

3.2. Monitoreo GPS

3.2.1. Velocidad del desplazamiento

Se establece la velocidad de desplazamiento de cada punto de control en m/año al obtener el vector resultante de la variación de la coordenada este y norte durante un período de monitoreo de 178 días (Tabla 14).

El vector resultante (VR) se obtiene con la siguiente expresión:

$$VR = \sqrt{\Delta E^2 + \Delta N^2}$$

Ecuación 2

Dónde:

ΔE = Variación de la coordenada este a través del tiempo.

ΔN = Variación de la coordenada norte a través del tiempo.

La velocidad se obtiene al dividir el vector resultante para el tiempo de monitoreo en años.

Tabla 14. Velocidad del deslizamiento de acuerdo al monitoreo GPS.

Punto	ΔE	ΔN	ΔZ	VR	Vel (m/año)
Pc1	0.037	0.023	0.028	0.044	0.089
Pc2	0.041	-0.032	0.011	0.052	0.106
Pc3	0.084	0.015	0.024	0.085	0.175
Pc4	0.082	0.004	0.040	0.082	0.168
Pc5	0.083	0.049	0.061	0.096	0.198
Pc6	0.116	0.024	0.073	0.118	0.243
Pc7	0.103	0.032	0.080	0.108	0.221
Pc8	0.086	-0.012	0.073	0.087	0.178
Pc9	0.333	0.068	-0.022	0.340	0.697
Pc10	0.058	-0.020	-0.010	0.061	0.126
Pc11	0.030	0.082	0.013	0.087	0.375
Pc12	0.233	-0.038	-0.043	0.236	0.484
Pc13	0.055	0.003	0.028	0.055	0.113
Pc14	0.031	0.096	0.024	0.101	0.433
				Vel. Med.	0.258

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

Los puntos que presentan mayores velocidades de deslizamiento se encuentran ubicados a nivel de media ladera y pie: Pc 9 (0.697 m/año), Pc 12 (0.484 m/año), Pc 14 (0.433 m/año) y Pc 11 (0.37 m/año). La velocidad promedio de todos los puntos de control es de 0.258 m/año.

La Figura 9, detalla los vectores de dirección del desplazamiento presentado en cada punto de control de la red de monitoreo y la dinámica del movimiento, siendo los puntos Pc 9 y Pc 12 los que presentan mayor módulo o magnitud.



Figura 9. Vectores de desplazamiento.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

3.2.2. Variación de las coordenadas a través del tiempo

Se determinaron las variaciones en las mediciones de las coordenadas Este (X), Norte (Y) y Altitud (Z) de cada punto de control durante los diferentes períodos de monitoreo (Tabla 15, Tabla 16 y Tabla 17) respectivamente, describiendo de esta manera la trayectoria de cada punto durante los 178 días de registro (Figura 10,

Figura 12 y Figura 14). Finalmente, por cada coordenada analizada se obtienen los desplazamientos efectivos de los diferentes puntos de control, al sumar algebraicamente las variaciones en sus mediciones a través del tiempo (Figura 11, Figura 13 y Figura 15).

Tabla 15. Variación de las coordenadas Este (X) de cada punto de control a través del tiempo.

Tiempo acumulado en días	Δ ESTE (m)							Desplazamiento efectivo (m)
	M2 -M1	M3 - M2	M4 - M3	M5 - M6	M6 - M7	M7 - M8		
	0	12	93	121	135	159	178	
Pc 1	0.000	-0.001	0.066	0.082	-0.048	-0.114	0.052	0.037
Pc 2	0.000	-0.037	0.042	0.159	-0.066	-0.113	0.056	0.041
Pc 3	0.000	0.013	0.028	0.156	-0.064	-0.095	0.046	0.084
Pc 4	0.000	0.051	0.024	0.151	-0.074	-0.129	0.059	0.082
Pc 5	0.000	0.045	0.096	0.066	-0.063	-0.115	0.054	0.083
Pc 6	0.000	0.054	0.079	0.089	-0.052	-0.120	0.066	0.116
Pc 7	0.000	0.042	0.037	0.137	-0.044	-0.120	0.051	0.103
Pc 8	0.000	0.043	0.032	0.099	0.018	-0.170	0.064	0.086
Pc 9	0.000	0.125	0.240	0.059	-0.063	-0.125	0.097	0.333
Pc 10	0.000	0.040	0.037	0.114	-0.058	-0.133	0.058	0.058
Pc 11	0.000	0.000	-0.043	0.144	-0.059	-0.118	0.063	-0.013
Pc 12	0.000	0.078	0.135	0.117	-0.025	-0.140	0.068	0.233
Pc 13	0.000	0.009	0.051	0.108	-0.061	-0.098	0.046	0.055
Pc 14	0.000	-0.001	-0.031	0.139	-0.080	-0.090	0.062	-0.001

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

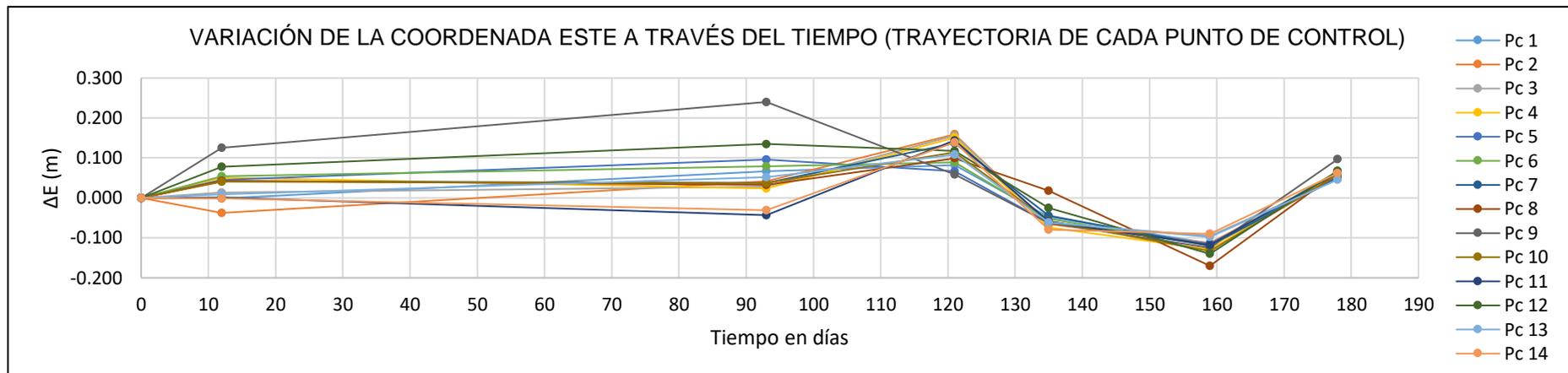


Figura 10. Variación de la coordenada este de cada punto de control a través del tiempo.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

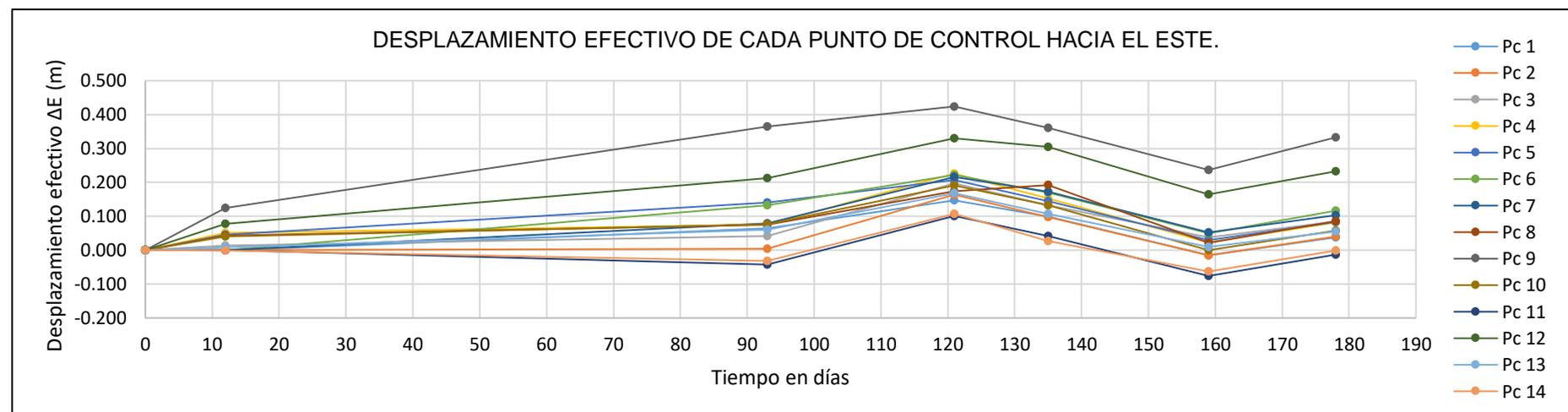


Figura 11. Desplazamiento efectivo de cada punto de control hacia el este.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

Tabla 16. Variación de las coordenadas Norte (Y) de cada punto de control a través del tiempo.

Tiempo acumulado en días	Δ NORTE (m)							Desplazamiento efectivo (m)
	M2 -M1	M3 - M2	M4 - M3	M5 - M6	M6 - M7	M7 - M8		
	0	12	93	121	135	159	178	
Pc 1	0.000	0.033	-0.103	-0.010	0.103	-0.086	0.086	0.023
Pc 2	0.000	-0.036	-0.084	0.037	0.050	-0.095	0.096	-0.032
Pc 3	0.000	-0.034	-0.037	0.025	0.064	-0.091	0.088	0.015
Pc 4	0.000	0.005	-0.076	0.027	0.054	-0.098	0.092	0.004
Pc 5	0.000	0.040	-0.084	-0.053	0.108	-0.077	0.115	0.049
Pc 6	0.000	-0.016	-0.066	0.043	0.051	-0.090	0.102	0.024
Pc 7	0.000	-0.011	-0.025	-0.034	0.108	-0.097	0.091	0.032
Pc 8	0.000	-0.029	-0.024	-0.052	0.035	-0.035	0.093	-0.012
Pc 9	0.000	0.025	-0.067	0.044	0.075	-0.076	0.067	0.068
Pc 10	0.000	-0.011	-0.024	-0.034	0.064	-0.087	0.072	-0.020
Pc 11	0.000	-0.001	-0.033	0.021	0.065	-0.110	0.106	0.048
Pc 12	0.000	-0.044	-0.067	-0.015	0.120	-0.085	0.053	-0.038
Pc 13	0.000	-0.007	-0.026	-0.061	0.105	-0.094	0.085	0.003
Pc 14	0.000	-0.001	-0.034	-0.011	0.098	-0.093	0.102	0.061

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

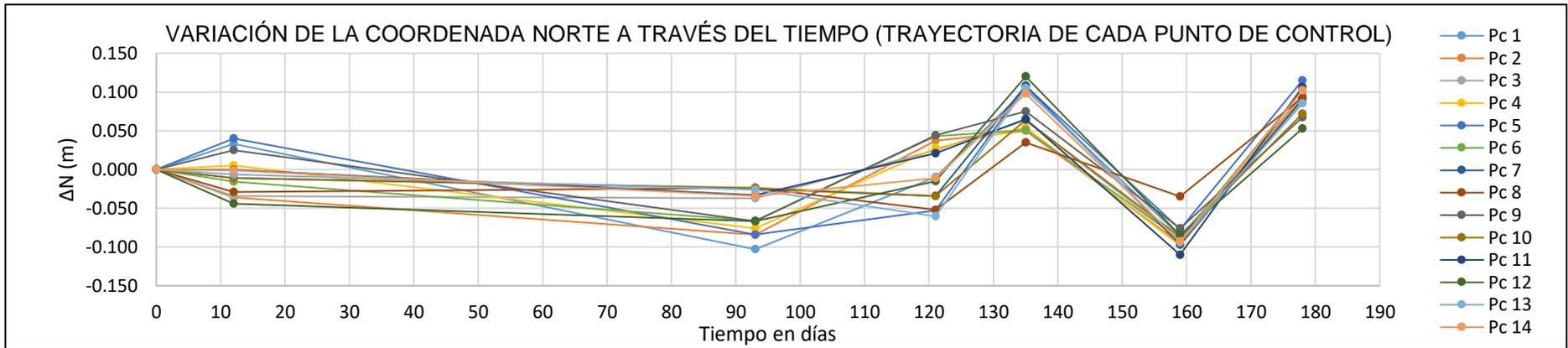


Figura 12. Variación de la coordenada norte de cada punto de control a través del tiempo.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

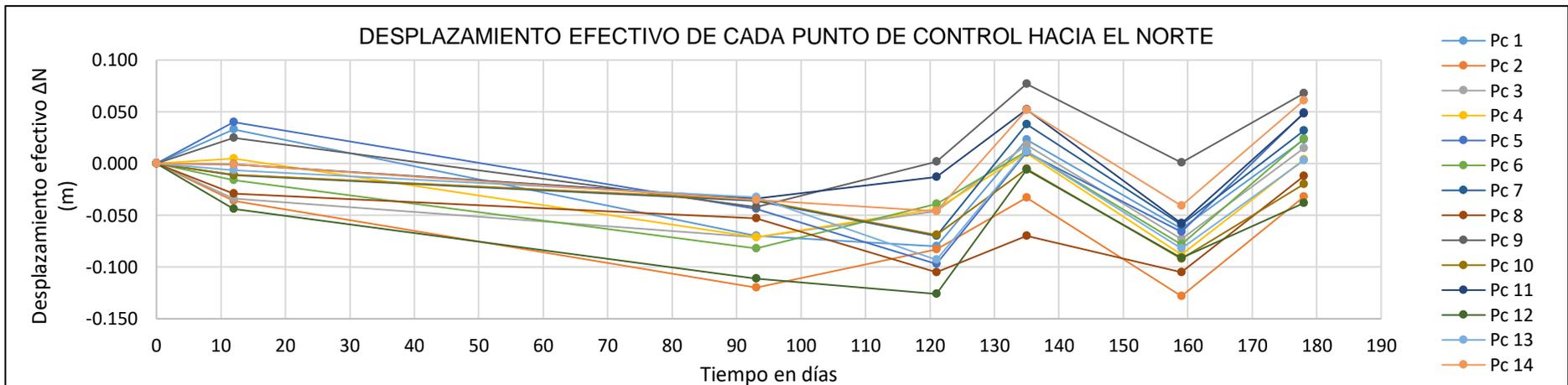


Figura 13. Desplazamiento efectivo de cada punto de control hacia el norte.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

Tabla 17. Variación de las coordenadas de Altitud (Z) de cada punto de control a través del tiempo.

Δ ALTITUD (m)								
	M2 -M1	M3 - M2	M4 - M3	M5 - M6	M6 - M7	M7 - M8		
Tiempo acumulado en días	0	12	93	121	135	159	178	Desplazamiento efectivo (m)
Pc 1	0.000	-0.017	0.002	0.096	0.008	0.006	-0.067	0.028
Pc 2	0.000	-0.027	-0.019	0.114	0.005	0.002	-0.064	0.011
Pc 3	0.000	-0.015	0.061	0.031	0.006	0.004	-0.063	0.024
Pc 4	0.000	-0.010	0.064	0.049	-0.005	-0.008	-0.050	0.040
Pc 5	0.000	0.007	0.033	0.053	0.023	0.025	-0.080	0.061
Pc 6	0.000	-0.016	0.094	0.059	-0.001	-0.002	-0.061	0.073
Pc 7	0.000	-0.002	0.067	0.071	0.002	0.002	-0.060	0.080
Pc 8	0.000	0.055	-0.003	0.049	0.011	-0.012	-0.027	0.073
Pc 9	0.000	-0.032	-0.003	0.039	0.023	0.000	-0.049	-0.022
Pc 10	0.000	0.010	0.066	0.027	0.028	-0.017	-0.124	-0.010
Pc 11	0.000	0.079	0.345	0.054	-0.005	-0.001	-0.035	0.437
Pc 12	0.000	-0.037	-0.034	0.071	0.003	0.000	-0.046	-0.043
Pc 13	0.000	0.012	0.050	0.038	0.011	-0.008	-0.075	0.028
Pc 14	0.000	0.137	0.596	0.082	-0.006	-0.004	-0.048	0.757

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

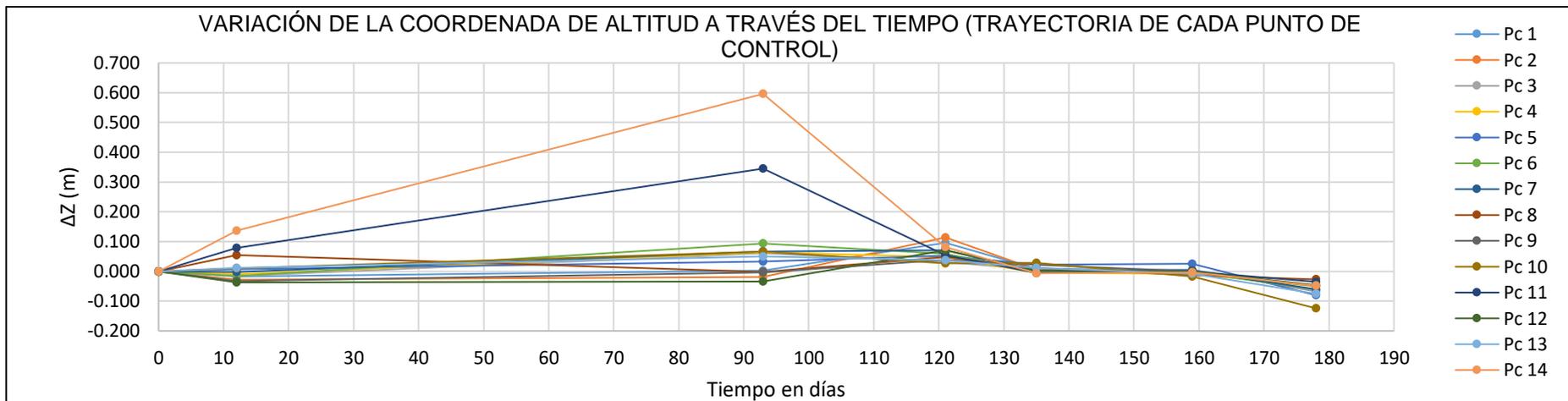


Figura 14. Variación de la coordenada de altitud en cada punto de control a través del tiempo.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

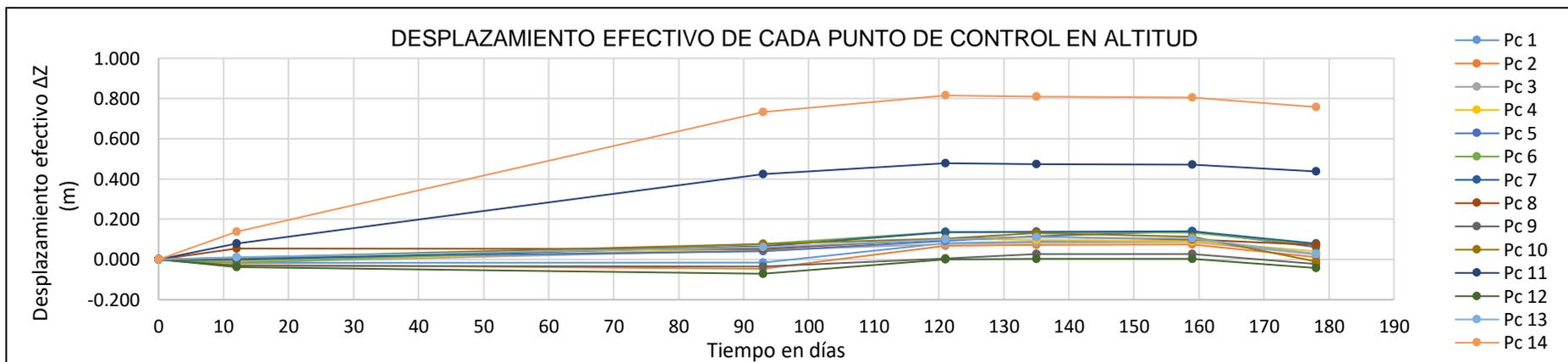


Figura 15. Desplazamiento efectivo de cada punto de control en altitud.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

Los puntos de control que presentaron mayor deslizamiento efectivo durante los 178 días de registro hacia el este fueron: Pc 9 y Pc 12; hacia el norte los puntos: Pc 9 y Pc 14 y en altitud los puntos: Pc 14 y Pc 11. Todos estos puntos de control se encuentran ubicados a nivel de media ladera y pie.

Empleando el software MATLAB y su herramienta de construcción de curvas (*Curve Fitting Tool*) se efectúa la interpolación de los siete monitoreos GPS ejecutados en el sector a lo largo de 178 días, con coeficientes de determinación que varían entre 0.9 y 1 correspondientes a las coordenadas de cada punto de control (Figura 16). Posteriormente, empleando la herramienta Regression Learner se realizan modelos de predicción para cada punto, siendo Fine Gaussian Support Vector Machines el mejor proceso de aprendizaje, debido a que los coeficientes de determinación varían de 0.98 a 1 para cada análisis, de esta manera, se obtiene la modelación del área en estudio, definiendo su estado inicial en el mes de enero del 2018 y la proyección de su cambio con el tiempo para un período de 365 días. (Figura 17)

La modelación del área en estudio mediante el software MATLAB, permite predecir los cambios superficiales del sector en base a datos reales medidos por GPS, para anticipar acciones de prevención y mitigación ante este fenómeno.

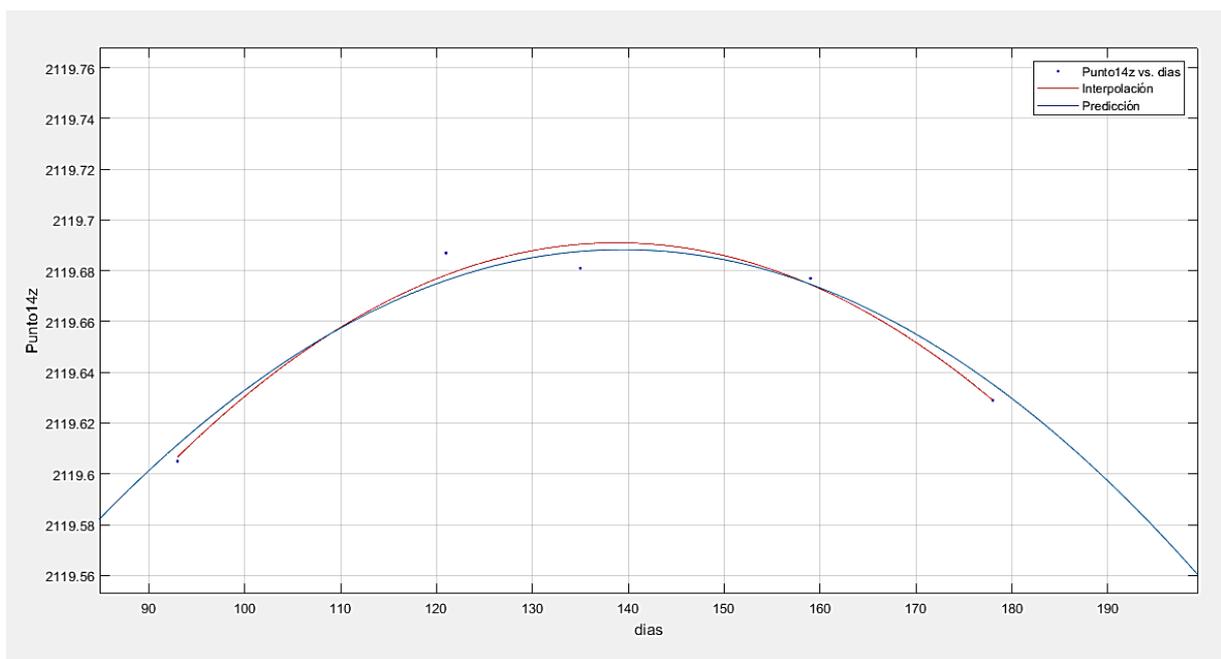


Figura 16. Curva de interpolación (color rojo) y curva de predicción (color azul) para los datos de Pc14 en su coordenada de altitud.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

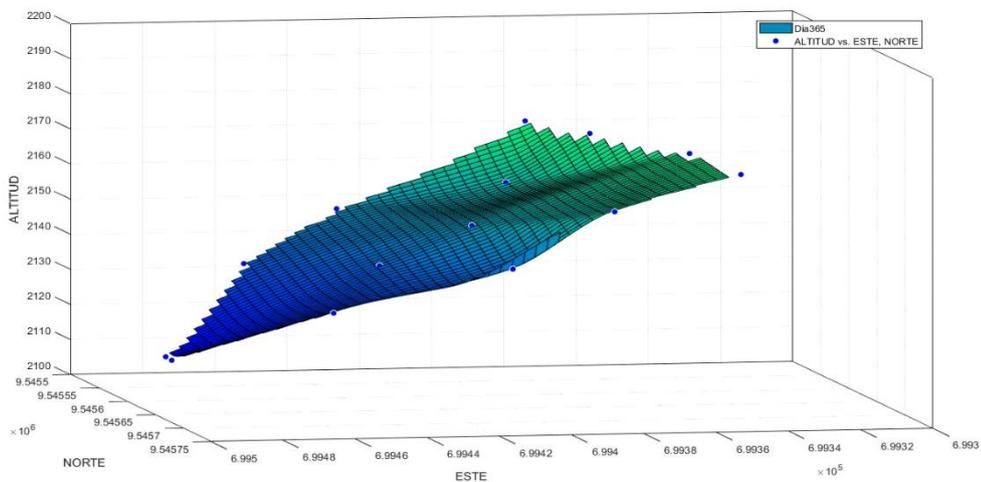
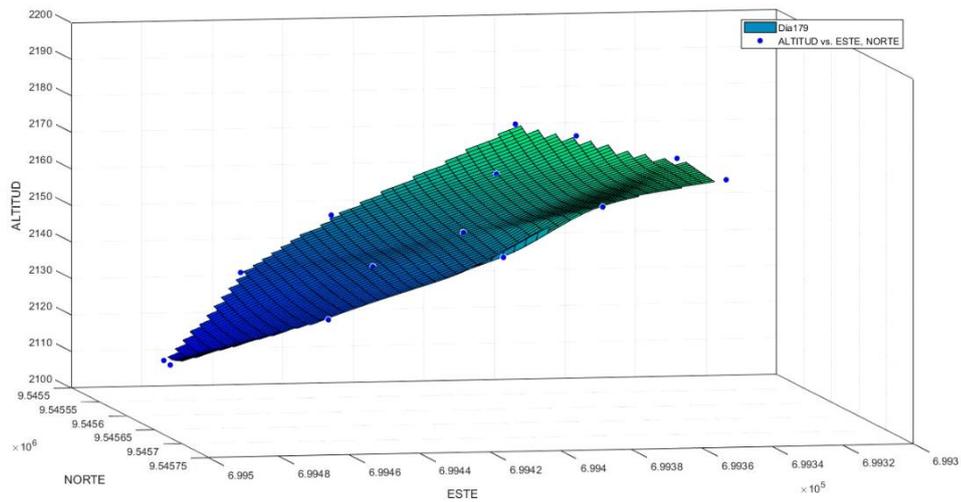
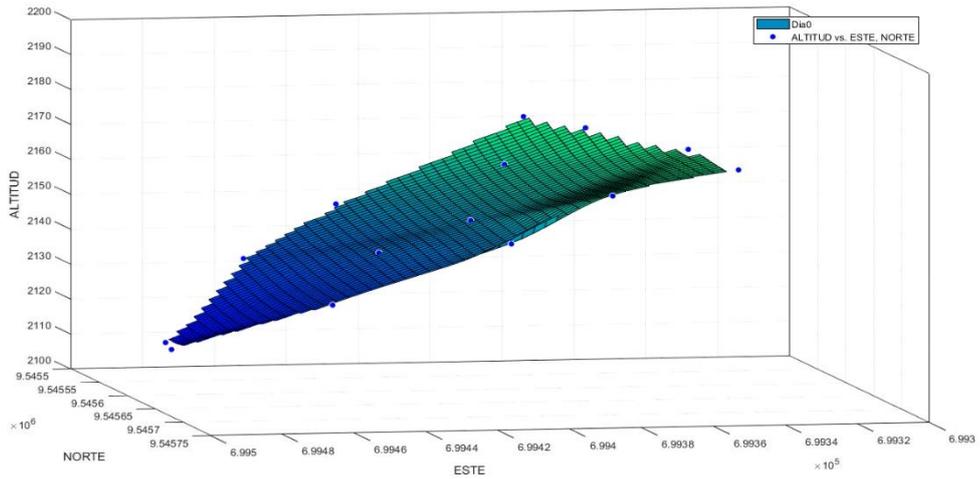


Figura 17. Modelación del polígono en estudio.

Figura superior: Modelación del polígono en estudio al inicio del período de monitoreo GPS.

Figura central: Modelación del polígono en estudio, proyección de su cambio después de 178 días

Figura inferior: Modelación del polígono en estudio, proyección de su cambio después de 365 días.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

3.3. Monitoreo fotogramétrico con UAV

Se efectuaron dos monitoreos fotogramétricos con UAV en la zona en estudio, el primero en el mes de enero y el segundo en septiembre del 2018. Las Tabla 18 y Tabla 19, muestran el error total y los puntos de apoyo fotogramétricos con los que se validaron y generaron las ortofotos y MDS en cada período de medición.

Tabla 18. Error total en el procesamiento de el MDS y la ortofoto de enero 2018.

Puntos	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Proyecciones	Error (pix)
Pc 1	-0.187678	0.135363	-0.134294	0.267546	4	0.011
Pc 3	4.3728	0.706801	-4.9279	6.6261	10	0.786
Pc 4	-3.78623	0.164268	6.53437	7.55384	10	1.256
Pc 11	-2.48803	1.81423	-1.11652	3.27542	28	1.420
Pc 12	2.11806	-2.86199	-0.334113	3.57614	17	1.321
Error Total				4.99108		1.252

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

Tabla 19. Error total en el procesamiento de el MDS y la ortofoto de septiembre 2018.

Puntos	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Proyecciones	Error (pix)
Pc 1.1	1.03768	-0.852615	0.00725241	1.34305	9	0.348
Pc 1.3	0.772912	0.171954	0.0934905	0.797309	13	0.654
Pc 1.5	-2.92213	1.75339	-0.399824	3.43119	20	0.475
Pc 1.14	0.954509	-0.708079	-1.35306	1.8009	22	0.715
Pc 2.5	1.75107	0.472301	1.05215	2.09675	24	0.752
Pc 2.6	0.630615	0.192167	-0.42371	0.783667	3	0.132
Pc 2.7	0.602931	1.02616	-0.129413	1.1972	3	0.079
Pc 2.10	-3.18058	-1.56874	2.24194	4.19563	8	0.113
Pc 2.12	0.338859	-0.473049	-1.14956	1.28844	16	0.375
Error Total				2.18995		0.571

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

Con estos errores se establece el grado de ajuste o exactitud de los puntos de apoyo fotogramétricos con respecto a las posiciones horizontal y vertical de las imágenes obtenidas mediante UAV, es primordial usar las coordenadas de los puntos de control fotogramétrico con la finalidad de obtener presiones altas en el procesamiento de la información. Los modelos son aceptables para poder realizar mapeos estándar, trabajos en softwares SIG y mediciones

sobre ellos cuando el error total fluctúa entre 1 cm y 6 cm y el error de píxeles no sea superior a 1.5 (Popescu, Iordan, & Păunescu, 2016).

Para el procesamiento de las imágenes de enero del 2018, se emplearon cinco puntos de apoyo fotogramétrico de ocho puntos de control establecidos inicialmente en toda el área del polígono 1, obteniendo de esta manera un error total de 4.99 cm y 1.25 en error de píxeles. En cambio, en el segundo monitoreo, efectuado en septiembre del 2018, se establecieron diez puntos de control, la mitad de ellos distribuidos a lo largo de todo el polígono 1 y el resto de ellos fuera del área en estudio (Figura 18), para el análisis de la información se emplearon nueve de ellos con lo cual se obtiene un error total de 2.18 cm y un error de píxeles de 0.57. Por consiguiente, de esta forma se valida la precisión requerida en ambos modelos.

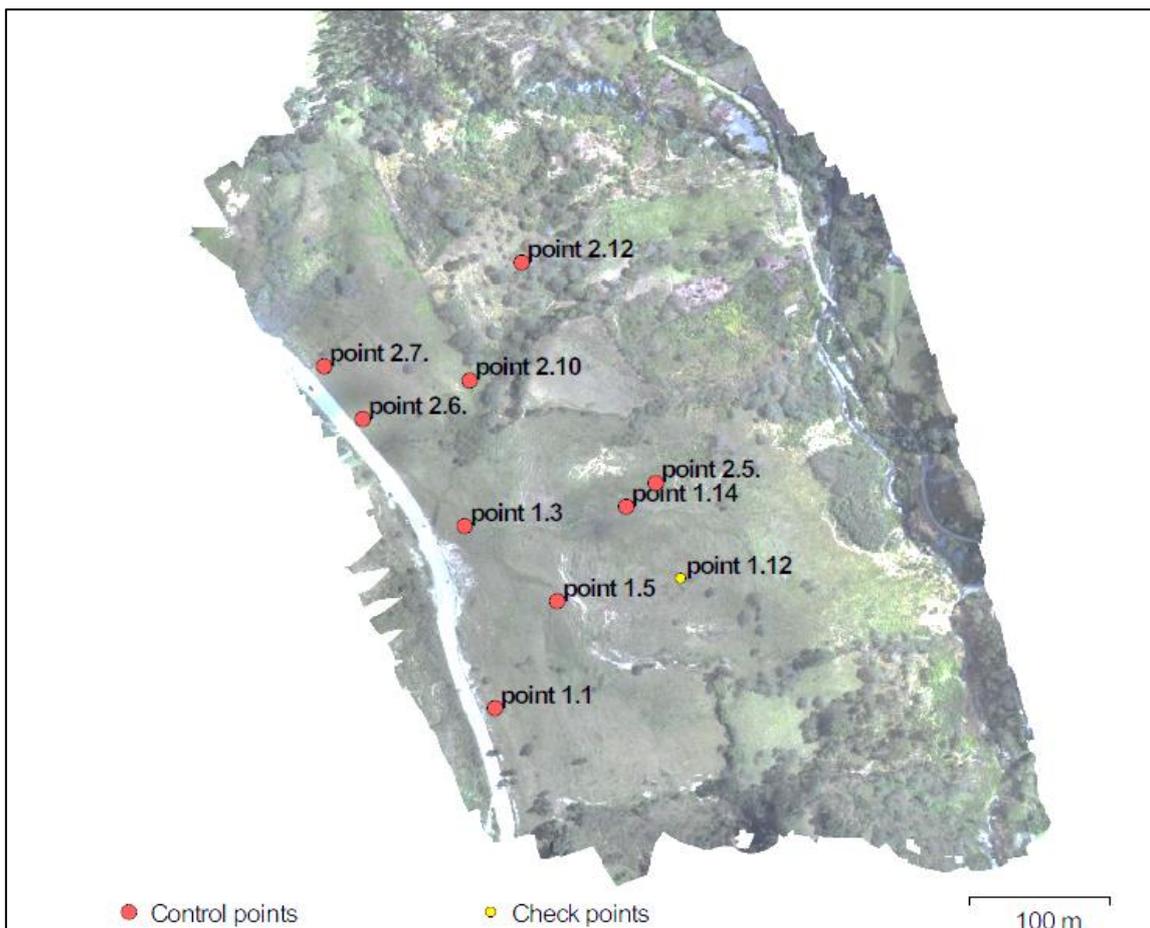


Figura 18. Distribución de los puntos de apoyo fotogramétrico en el segundo monitoreo con UAV.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

Las ortofotos (Figura 19) y MDS (Figura 20), se analizaron en un software SIG a fin de obtener las zonas de afectación y evidenciar desplazamientos mediante la diferencia entre los dos modelos de superficie.

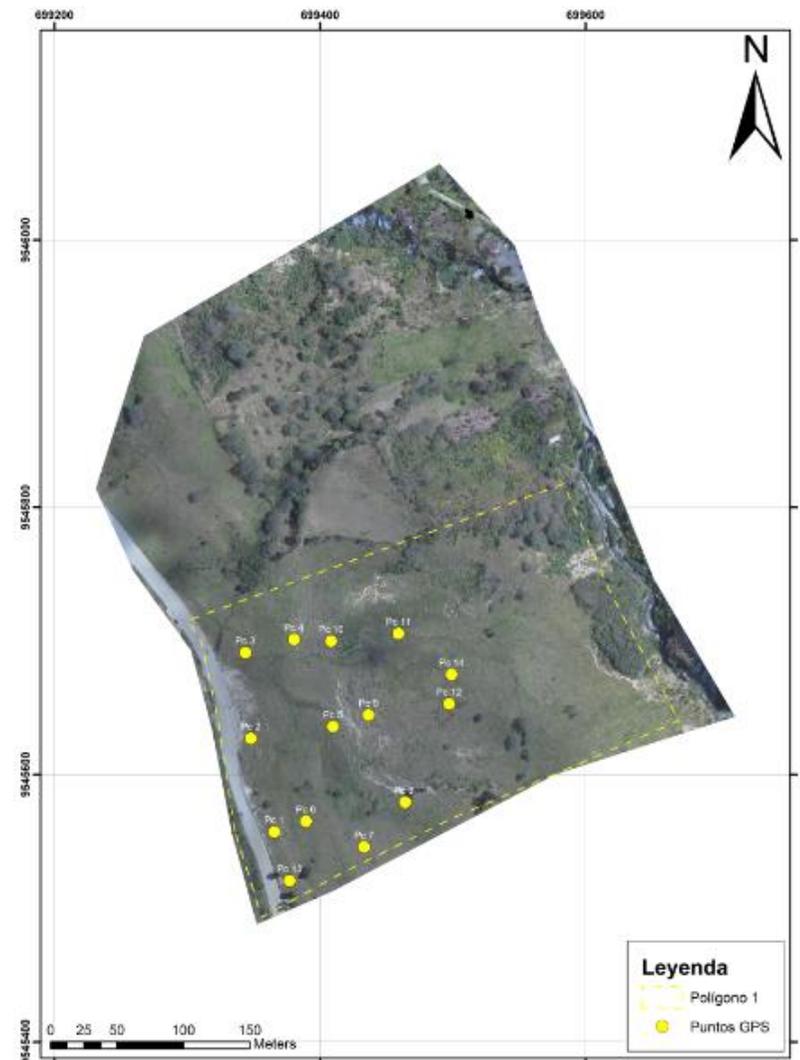
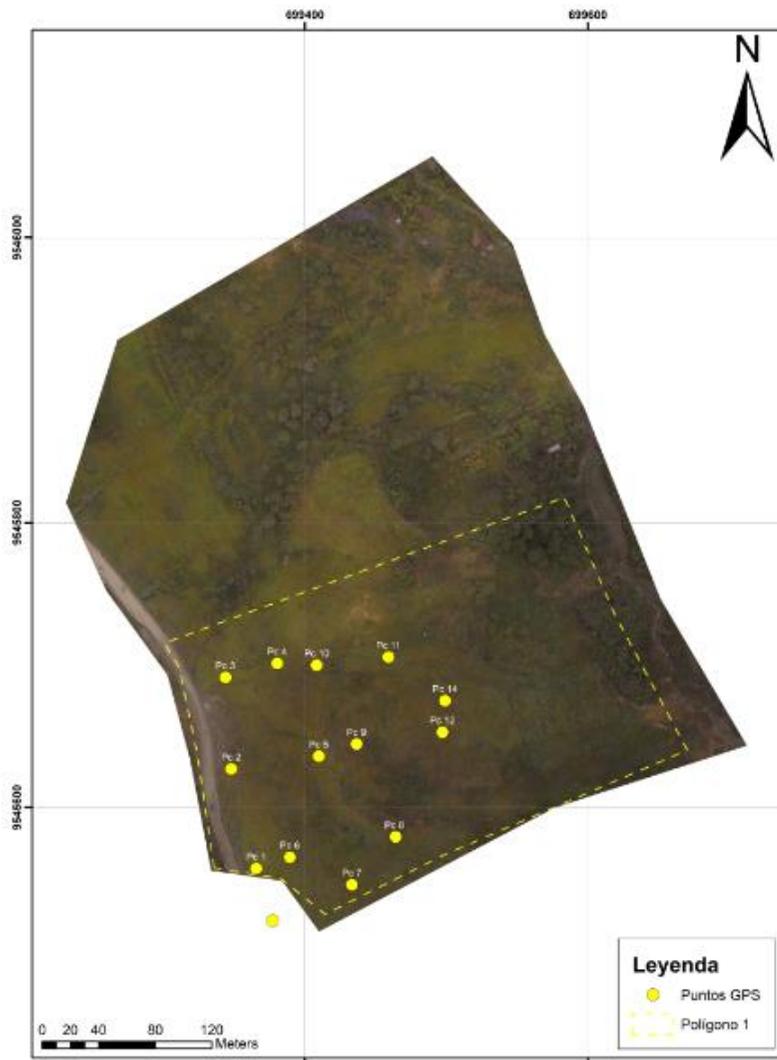


Figura 19. Ortofotos de la zona en estudio. Izquierda: Ortofoto de enero 2018. Derecha: Ortofoto de septiembre 2018.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

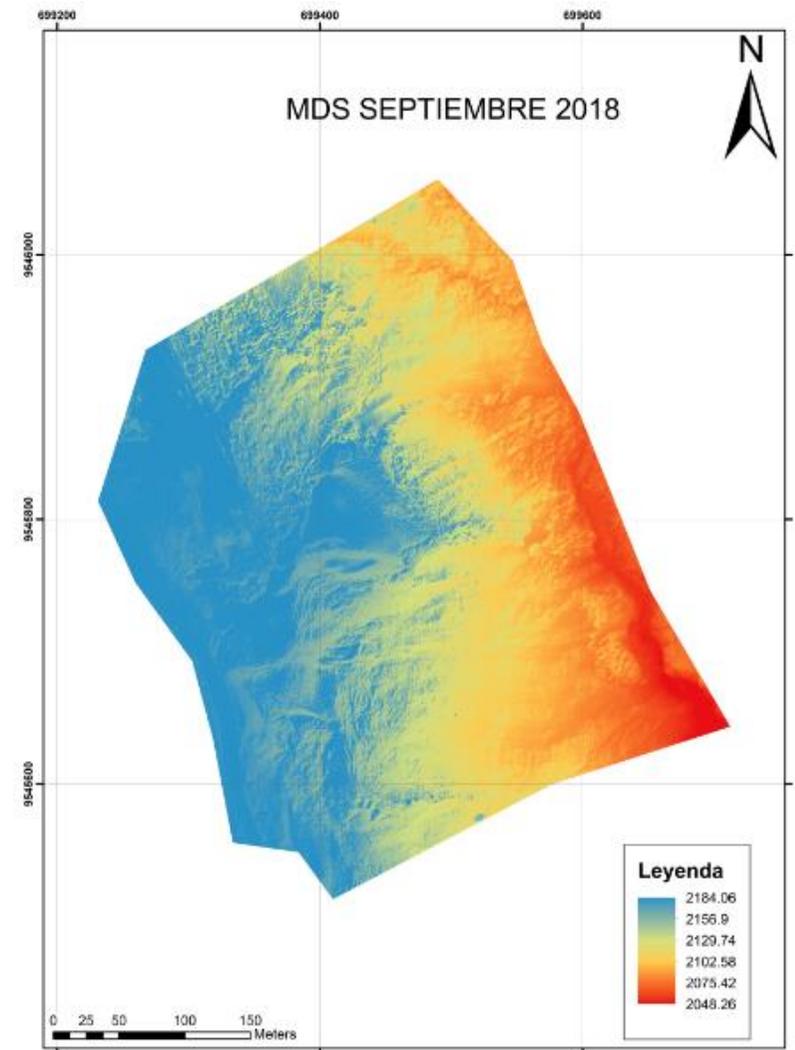
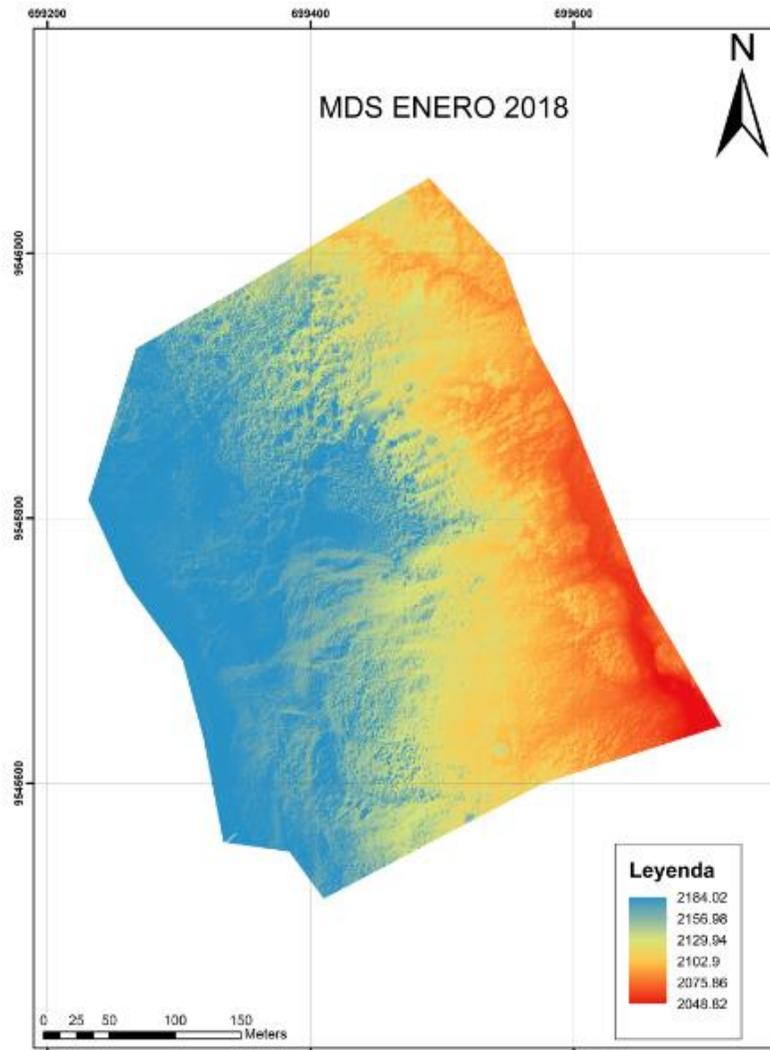


Figura 20. Modelos Digitales de Superficie de la zona en estudio. Izquierda: MDS de enero 2018. Derecha: MDS de septiembre 2018.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor

Se determinó el mapa de diferencia de elevación entre modelos digitales de superficie: MDS enero 2018 – MDS septiembre 2018 (Figura 21), en este período de tiempo se pueden observar descensos de hasta 13.35 m (color rojo) y elevaciones hasta los 11.35 m (color verde).

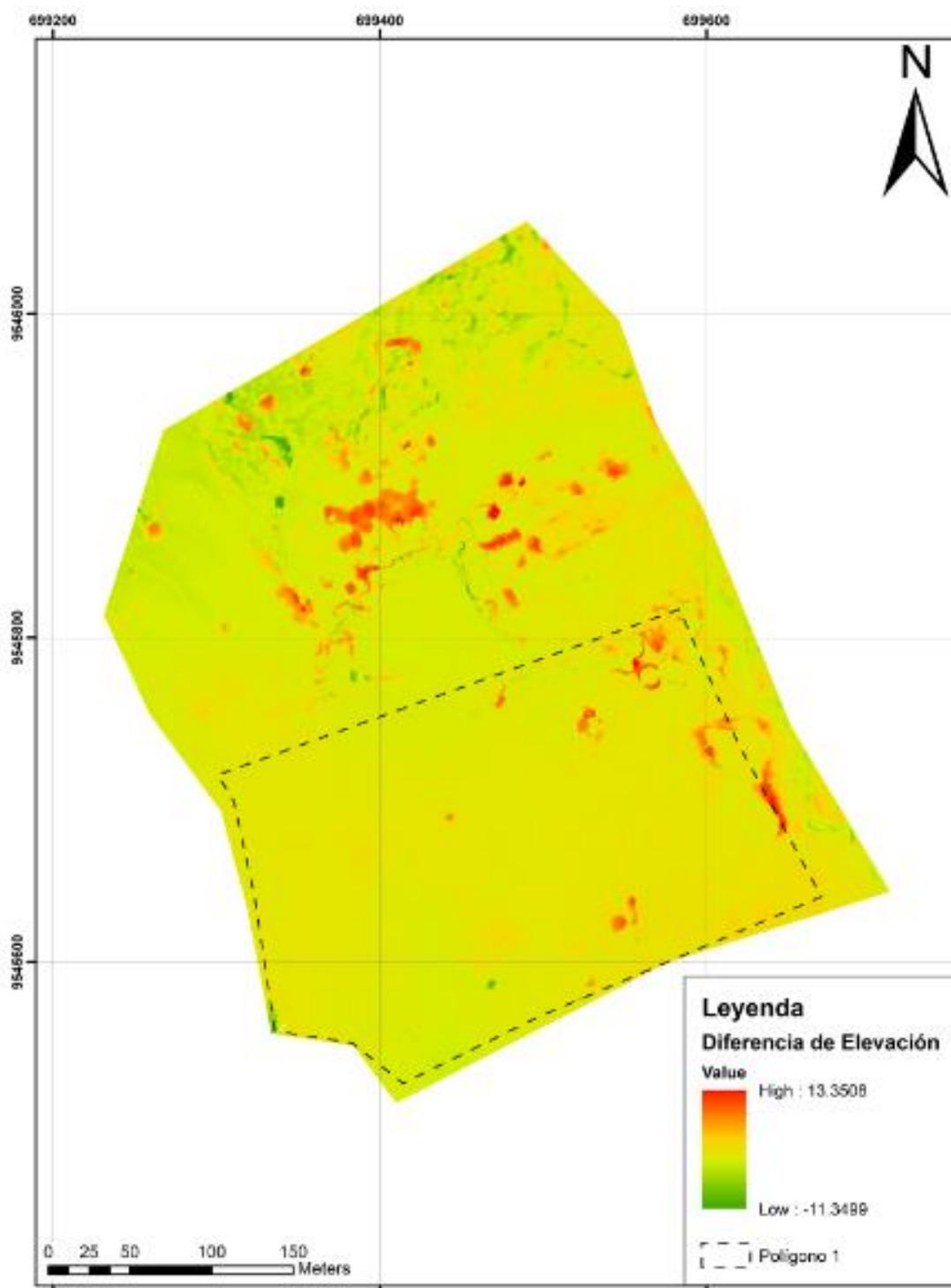


Figura 21. Diferencia entre Modelos Digitales de Superficie.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

Sin embargo, es importante señalar que estos MDS consideran la vegetación, viviendas u objetos presentes durante el monitoreo fotogramétrico, por esta razón las variaciones de mayor magnitud en elevación son ocasionadas por este factor (Figura 22 A y Figura 22 B).

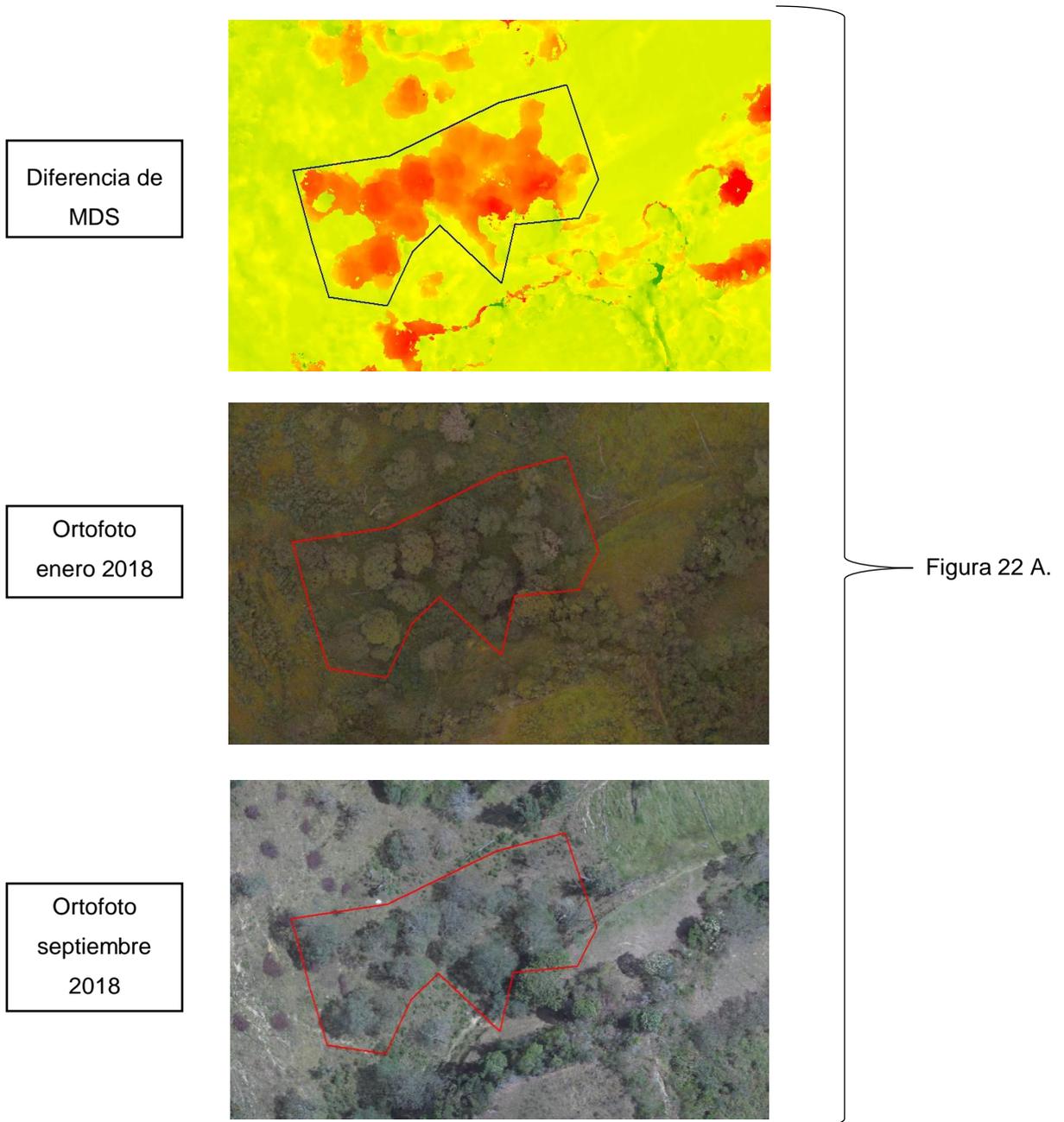


Figura 22 A. Comparación entre zonas del mapa de diferencia de elevación y las ortofotos del sector.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

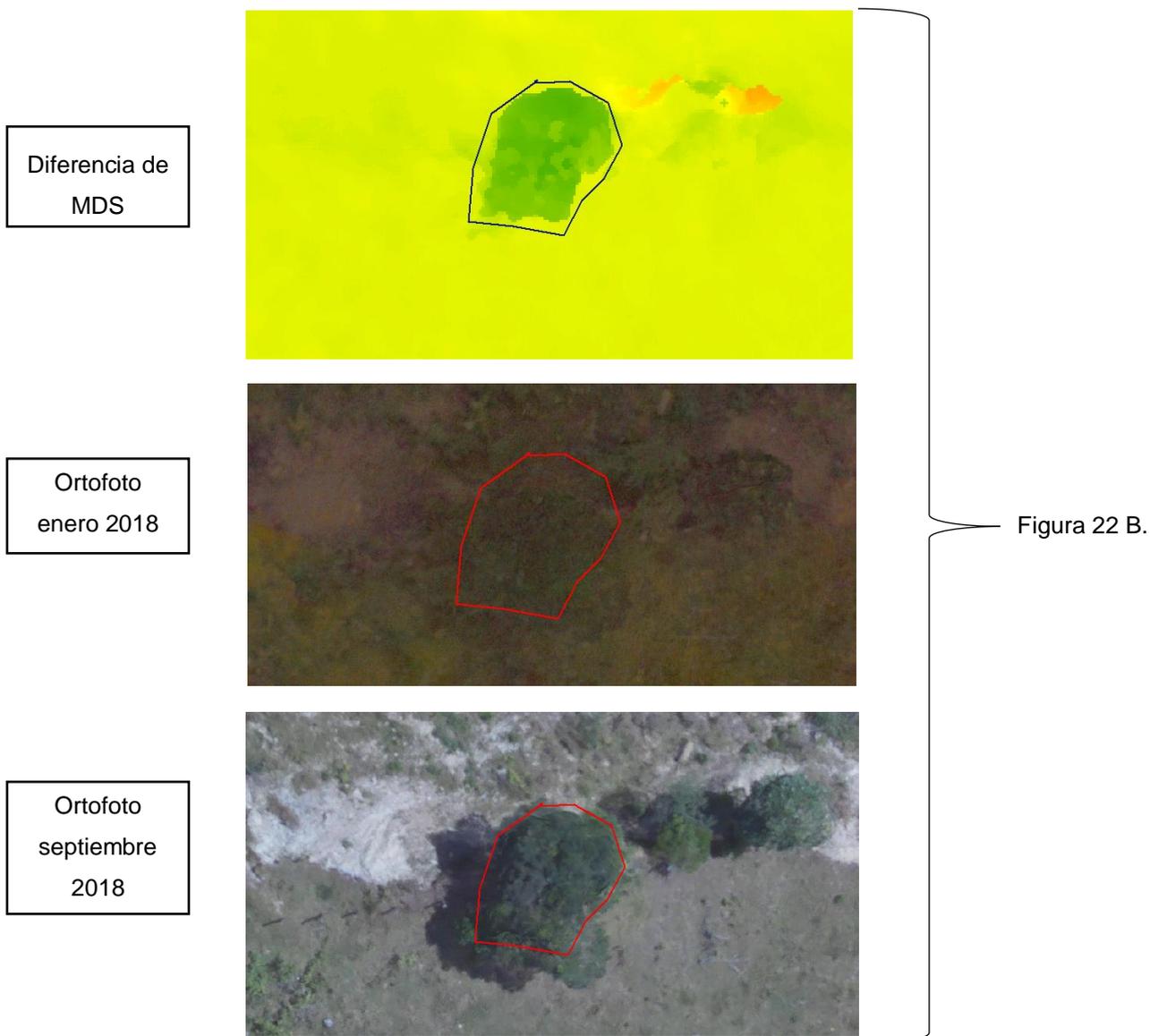


Figura 22 B. Comparación entre zonas del mapa de diferencia de elevación y las ortofotos del sector.

Fuente: El Autor.

Elaboración: El Autor.

En la Figura 22 A y 22 B, se realiza la comparación entre dos zonas establecidas en el mapa de diferencia de elevación con las ortofotos que muestran el estado inicial y final del sector, demostrando de esta manera que la presencia de factores externos afectan en el cálculo de diferencia de alturas mostrado en el mapa de la Figura 21.

En la zona marcada de la Figura 22 A, se presentan descensos de hasta 13 m debido a la disminución de la vegetación, por otra parte, en la Figura 22 B, se evidencia elevaciones de hasta 9 m, por el crecimiento de árboles en el sector.

CONCLUSIONES

Analizando el comportamiento de las mediciones GPS con el tiempo, se establece una velocidad media de 0.258 m/año, que según Cruden y Varnes (1996) corresponde a un movimiento tipo 3 con velocidad lenta.

Los productos fotogramétricos obtenidos mediante el empleo de UAV o drones permiten detectar cambios superficiales del terreno que por otros procedimientos no es factible de realizar. Tales cambios inherentes a la propia actividad del movimiento de ladera se catalogan en grietas y escarpes. Al comparar temporalmente los modelos digitales de superficie (MDS) se midió los cambios altitudinales empleando para ello la diferencia de los MDS que tienen un error medio de 0.04 m lo que garantiza la suficiente precisión para este tipo de investigaciones.

El modelo de diferencia de elevación obtenido no necesariamente representa el verdadero desplazamiento del movimiento de ladera ya que existen aspectos como la vegetación y presencia de objetos detectados en los períodos de monitoreo que alteran la medición. Cabe recalcar que esto ocurre debido a que se ha trabajado con modelos digitales de superficie y no modelos digitales del terreno, estos últimos más precisos por considerar solamente el terreno.

Las pruebas de laboratorio realizadas a las muestras de suelo de la ladera determinan que está conformado por arcilla de baja plasticidad (CL) y arena arcillosa (SC), con permeabilidad buena.

Conforme al análisis efectuado, se determinó que la zona de estudio presenta deslizamiento de tipo rotacional combinado, con la presencia de escarpes y grietas de tracción a nivel de corona y cuerpo de la ladera.

Las mediciones GPS permiten determinar variaciones temporales y espaciales de las coordenadas de los puntos de monitoreo en la ladera con precisión subcentimétrica, sin embargo, pese a la precisión de los MDS, no es posible detectar cambios de posición en lugares donde existe vegetación principalmente por el crecimiento natural y que no necesariamente corresponde a cambios del terreno. La técnica UAV es eficiente para determinar mediante ortofotos los cambios de la superficie en el tiempo.

RECOMENDACIONES

Por la morfología que presenta el sector en estudio, se recomienda emplear la modalidad Fast Static en los monitoreos con DGPS, con un tiempo de permanencia del equipo móvil en cada punto de control de 10 minutos, garantizando de esta manera una correcta precisión y la ausencia de coordenadas flotantes.

Considerar las condiciones climáticas al momento de realizar el monitoreo fotogramétrico con UAV, debido a que la presencia de lluvia, neblina o vientos a velocidades muy altas, son factores que imposibilitan ejecutar esta actividad por el riesgo a daños o pérdida del equipo.

Establecer la planificación de vuelo fotogramétrico considerando la duración de las baterías del equipo, es factible realizarlo en dos fases, con períodos de vuelo no superiores a los 20 minutos por cada batería.

La altura de vuelo del UAV debe tomar en cuenta la presencia y cercanía de vegetación, objetos como postes y cables de electricidad, además a mayor altura, mayor superficie del terreno cubierta, pero con un menor detalle o resolución de las imágenes.

BIBLIOGRAFÍA

- Acar, M. (2010). Determination of strain accumulation in landslide areas with GPS measurements. *Scientific Research and Essays*, 5(8), 763-768.
- Alcántara Ayala, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 41, 7-25. Recuperado a partir de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112000000100002&script=sci_arttext
- Angelone, S., Garibay, M. T., & Cauhapé Casaux, M. (2006). *Geología y Geotecnia - Permeabilidad de suelos. Universidad Nacional de Rosario; Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura.*
- Araujo, G., Huarez, C., Taipe, E., & Miranda, R. (2017). *ESTUDIO GEOLÓGICO, GEODINÁMICO Y MONITOREO GEODÉSICO EN EL DESLIZAMIENTO DE MADRIGAL.* Recuperado a partir de <http://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/ingemmet/792>
- Bañón Blázquez, L., Ivorra Chorro, S., Aragonés Pomares, L., Varona Moya, F. de B., Cano González, M., & Tomás Jover, R. (2014). Empleo de drones (RPAS) para la elaboración de material audiovisual docente en asignaturas de Ingeniería Civil. En Universidad de Alicante & Vicerrectorado de Estudios Formación y Calidad. Instituto de Ciencias de la Educación (ICE) (Eds.), *XII JORNADAS DE REDES DE INVESTIGACIÓN EN DOCENCIA UNIVERSITARIA.* (pp. 96-108). Universidad de Alicante. Recuperado a partir de <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/41701>
- Buill Pozuelo, F., Núñez Andrés, M. A., Lantada Zarzosa, M. de L. N., & Prades Valls, A. (2016). Fotogrametría y videogrametría desde UAV para la captura de geoinformación en estudios. En *Topografía y cartografía* (pp. 47-53). Ilustre Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos en Topografía. Recuperado a partir de <http://hdl.handle.net/2117/102388>
- Carranco, S., Tuxpan, J., Ramos, J., Yutis, V., Torres, S., Moran, J., ... López, B. (2016). Aplicación de GPS diferencial para el monitoreo de movimientos en el terreno. *UD y la Geomática*, (11), 60-65. Recuperado a partir de <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/UDGeo/index>
- Cuanalo Campos, O. A., Oliva González, A. O., & Gallardo Amaya, R. (2011). Inestabilidad de las laderas influencia de la actividad humana. *Elementos* 84, 84, 39-46. Recuperado a partir de <http://www.elementos.buap.mx/num84/pdf/39.pdf>

- Czerniak, R. J., & Reilly, J. P. (1998). *Applications of GPS for Surveying and Other Positioning Needs in Departments of Transportation*. National Academy Series, Washington, D.C.
- Diario La Hora. (2017, febrero 28). Derrumbes se hacen presentes por lluvias. *La Hora*. Recuperado a partir de <https://lahora.com.ec/noticia/1102034656/derrumbes-se-hacen-presentes-por-lluvias>
- Dixon, T. H. (1991). AN INTRODUCTION TO THE GLOBAL POSITIONING SOME GEOLOGICAL APPLICATIONS. *Reviews of Geophysics*, (91), 249-276. <https://doi.org/10.1029/91RG00152>
- DJI. (2018). PHANTOM 2. Recuperado 20 de julio de 2018, a partir de https://www.dji.com/phantom-2?site=brandsite&from=landing_page
- Fernández-Chacón, F., Notti, D., Galve, J. P., Pérez-Peña, J. V, Azañón, J. M., Mateos, R. M., ... Gómez-López, J. M. (2015). Técnicas remotas para el análisis multiescala y multitemporal de fenómenos superficiales. En *Una visión global del Cuaternario. El Hombre como condicionante de los procesos geológicos* (pp. 231-234). XIV Reunión Nacional de Cuaternario, Granada 2015.
- 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.
- Gili, J. A., Corominas, J., & Rius, J. (2000). Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring. *Engineering Geology*, 55(3), 167-192. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00127-1](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00127-1)
- Gomila, R., Arancibia, G., & Veloso, E. (2015). Mapeo en detalle de estructuras geológicas mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados (drones): un ejemplo en el Sistema de Falla de Atacama, norte de Chile. *XIV CONGRESO GEOLÓGICO CHILENO.*, 89-91.
- Gong, J., Wang, D., Li, Y., Zhang, L., Yue, Y., Zhou, J., & Song, Y. (2010). Earthquake-induced geological hazards detection under hierarchical stripping classification framework in the Beichuan area. *Landslides*, 7(2), 181-189. <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0201-4>
- Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico. (2017). Mapas Geológicos 2017 – 2018 – Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico. Recuperado a partir de <https://www.geoinvestigacion.gob.ec/mapas-geologicos-2017/>
- Instituto Tecnológico GeoMinero de España. (1995). *Reducción de riesgos geológicos en España*. (IGME, Ed.). Instituto Tecnológico Geominero de España.

- Malet, J. P., Maquaire, O., & Calais, E. (2002). The use of global positioning system techniques for the continuous monitoring of landslides: Application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Geomorphology*, 43(1-2), 33-54. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00098-8](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00098-8)
- Martínez-Yáñez, M., Cabral-Cano, E., Correa-Mora, F., Díaz-Molina, O., Cifuentes-Nava, G., Hernández-Quintero, E., & Delgado-Granados, H. (2009). Estudio de la ladera occidental del Cerro del Chiquihuite, Ciudad de México mediante SIG y GPS. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 10(2), 99-112.
- Niethammer, U., James, M. R., Rothmund, S., Travelletti, J., & Joswig, M. (2012). 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>
- Popescu, G., Iordan, D., & Păunescu, V. (2016). The resultant positional accuracy for the orthophotos obtained with Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 10, 458-464. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2016.09.016>
- Ramos Galán, M., Gil Cruz, A. ., & Feito Higuera, F. . (s. f.). ESTUDIO DE DESLIZAMIENTO DE LADERA EN OLIVAR CON PENDIENTE. *Foro de Olivar y Medio Ambiente*, 11(May 2014).
- Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., & Sarazzi, D. (2011). UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling—current status and future perspectives. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38-1/C22, 25-31. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-25-2011>
- Ruiz, R., Corominas, J., & Hürlimann, M. (2017). Experiencias Con Drones Para El Estudio De Laderas, 581-592.
- Runco S.A. (2010). Trimble R6 GNSS. Recuperado 18 de julio de 2018, a partir de <http://test.runco.com.ar/Trimble-R6-GNSS.html>
- Rutter, S. M. (2007). The integration of GPS, vegetation mapping and GIS in ecological and behavioural studies. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 36, 63-70. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982007001000007>
- Secretaría de Gestión de Riesgos, 2014. (2014). PROGRAMA DE PREVENCIÓN Y MITIGACIÓN PARA REDUCIR EL RIESGO POR DIFERENTES AMENAZAS. Recuperado a partir de <http://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/04/ProyectoPrevencion.pdf>

- Tomás Jover, R., Delgado Marchal, J., & López Sánchez, J. M. (2005). Técnicas de Ingeniería Cartográfica empleadas en el estudio de subsidencia y movimientos de ladera: Principales características y análisis comparativo. *Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica (INGEGRAF), Sevilla, España.*, 3(1). Recuperado a partir de <http://hdl.handle.net/10045/21684>
- Varnes, D. J. (1978). Slope Movement Types and Processes. *Transportation Research Board Special Report*, (176), 11-33. <https://doi.org/10.1701/176>: Landslides: Analysis and Control, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Zárate, B. (2011). Monitoreo de movimientos de ladera en el sector de San Pedro de Vilcabamba mediante procedimientos GPS. *Maskana*, 2(Diciembre), 17-25. Recuperado a partir de <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/view/380>

ANEXOS



Anexo 1. Zona en estudio, presencia de grietas, escarpes y lobulaciones.

Fuente: El Autor.



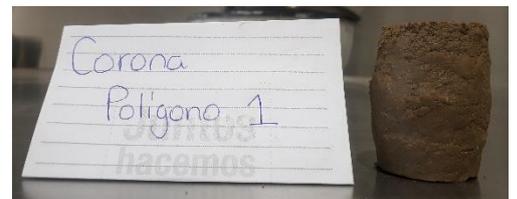
Anexo 2. Ensayo granulométrico.

Fuente: El Autor.



Anexo 3. Ensayo de Límites de Atterberg.

Fuente: El Autor.



Anexo 4. Ensayo Triaxial con probetas remoldeadas.

Fuente: El Autor.



Anexo 5. Ensayo de permeabilidad in situ, método de Lefranc.

Fuente: El Autor.



Anexo 6. Campañas de medición GPS en la zona en estudio.

Fuente: El Autor.



Anexo 7. Campañas de medición fotogramétrica en la zona en análisis.

Fuente: El Autor.