



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

COLEGIO DE GEOGRAFÍA

**TELEDETECCIÓN APLICADA A LOS PROCESOS GRAVITACIONALES:
PRINCIPIOS BÁSICOS DEL ESCÁNER LÁSER TERRESTRE Y SU APLICACIÓN
EN LA INESTABILIDAD DE LADERAS DE TEZIUTLÁN, PUEBLA.**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE

LICENCIADO EN GEOGRAFÍA

PRESENTA

ALEJANDRO ROGELIO ESCALANTE GONZÁLEZ

ASESORA

DRA. IRASEMA ALCÁNTARA AYALA

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO, D.F., 2015.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

De todo corazón agradezco a quienes contribuyeron para la culminación de este trabajo: *mi Madre, mi Padre, mis hermanos, familiares, amigos, la musa de mi inspiración, profesores y personas que me han brindado su ayuda y confían en mí.*

También al proyecto CONACyT, 156 242 MISTLI: Monitoreo, Instrumentación y Sistematización Temprana de Laderas Inestables.

Índice

	Página
Resumen.....	3-4
Introducción.....	4-8
Estructura de la tesis.....	8-9
I. Principios Básicos del LiDAR.....	10
1.1. Antecedentes del LiDAR: teledetección y fotogrametría.....	10-13
1.2. Sensores láser.....	13-17
1.3. Calidad de medición: precisión, resolución.....	17-24
1.4. Adquisición de datos.....	24-27
1.5. Nubes de puntos.....	27-31
1.6. Modelos digitales de elevación.....	31-35
1.7. Reflectividad.....	35-37
II. Resumen General del LiDAR-TLS.....	38
2.1. Retrospectiva y estado de arte.....	38-43
2.2. Escaneo Láser Terrestre.....	44-46
2.3. Principio de medición.....	46-49
2.4. Clasificaciones.....	50-53
III. Aplicaciones del LiDAR-TLS en temáticas Geo-ambientales.....	54
3.1. Aplicaciones en procesos gravitacionales.....	55-64
3.2. Aplicación de metodologías.....	64-75
IV. Aplicación del uso del TLS en el Análisis de Laderas Potencialmente Inestables.....	76
4.1. Zona de estudio: acontecimientos de 1999.....	77-87
4.2. Aplicación de la metodología en el sitio de prueba.....	87-101
Resultados y Conclusiones.....	102-103
Recomendaciones.....	103-105
Bibliografía.....	105

Resumen

La Percepción Remota o Teledetección como también se le conoce, consiste en obtener información de un objeto a través de algún *dispositivo* que no esté en contacto físico con dicho objeto. Algunos ejemplos de la observación de las propiedades de objetos y su posterior tratamiento y uso de la información obtenida son las *imágenes aéreas* y *satelitales*.

El sistema *Light Detection and Ranging* (LiDAR) es una tecnología alternativa de percepción remota en sustitución a las tradicionales técnicas fotogramétricas y topográficas; tiene como fundamento determinar la distancia desde un *emisor láser* a un objeto o superficie al utilizar un haz láser pulsado. La distancia al objeto se determina al medir el tiempo de retraso entre la emisión del pulso y su detección a través de la señal reflejada.

El desarrollo previo de los láseres para numerosas aplicaciones en diferentes estudios de campo ha culminado en la creación de una nueva serie de escáneres láser terrestres (TLS) que ahora se utilizan ampliamente para aplicaciones topográficas, ya sea desde posiciones estacionarias (montaje en trípodes) o en un modo móvil (plataformas de vehículos).

La creciente disponibilidad de los sistemas de TLS y la facilidad de adquisición de datos han permitido que se generen de manera eficiente información detallada de entornos complejos.

Los estudios de escaneo láser son de gran valor para la topografía a detalle; a través de enormes cantidades de información (nubes de puntos) se pueden crear *modelos digitales del terreno* en 3D con alta resolución y gran formato. En el ámbito de la inestabilidad de laderas, la información derivada del uso del LiDAR-TLS puede contribuir al análisis de la frecuencia y comportamiento de los deslizamientos en el espacio-tiempo, lo cual a su vez puede ser utilizado para prevenir y mitigar la afectación a poblaciones vulnerables.

Estudios sobre el LiDAR han abordado diferentes aspectos y aplicaciones, entre ellos destacan: los modelos digitales de terreno o modelos digitales de elevación (DEM, por sus siglas en inglés) como insumos para estudiar los deslizamientos; la comparación entre tecnologías, sistemas, aparatos y técnicas para abordar y solucionar problemáticas respecto a los deslizamientos (TLS vs ALS; LiDAR vs SAR; Imágenes de Satélite vs Fotografías Aéreas, etc.); las limitantes y dificultades de las tecnologías y sus atributos (el acceso a ellas por parte de países e investigadores); el gran énfasis en la precisión técnica; la aspiración a una cartografía actual con gran definición y el manejo de los datos. También los diferentes autores proponen en sus escritos trabajar la información integralmente, con enfoques multidisciplinarios y con tecnologías complementarias.

Investigaciones recientes en la temática de inestabilidad de laderas incluyen el escaneo láser y modelos digitales de elevación de alta definición (HRDEM) como herramientas importantes para el seguimiento de los deslizamientos. Gran cantidad de nueva información se puede extraer de los modelos digitales de elevación (DEM). Aún no se ha definido el límite de las técnicas de escaneo

láser. La modelación es un gran apoyo no sólo para el mapeo de deslizamientos, sino para la evaluación de riesgos.

Palabras clave: LiDAR, teledetección, inestabilidad de laderas, deslizamientos, modelos digitales de elevación.

Introducción

Los inventos tecnológicos que han surgido en el curso de la historia humana se han sofisticado cada vez más. Estos logros han servido para facilitar tareas industriales y domésticas, así como ampliar el conocimiento sobre el cosmos y el planeta que habitamos (interpretación de la naturaleza); aunque también se han empleado ciertas tecnologías como *armas de destrucción masiva*, en detrimento de la condición humana y su entorno.

Para este trabajo, se considera el lado satisfactorio de la tecnología en favor de las investigaciones científicas como herramienta de apoyo. Ejemplo de esto, es la teledetección y sus atributos tecnológicos, como los sistemas satelitales, el escaneo láser y la generación de imágenes y modelos digitales del terreno como alternativa y complemento a los estudios sobre procesos gravitacionales.

Las distintas posibilidades de las técnicas LiDAR y su aplicación a diferentes campos de investigación, como los *Procesos de Remoción en Masa* (PRM), es de interés para todos los estudiosos de las ciencias de la Tierra, y público interesado en temas ambientales en general. En México, ha sido escasa la utilización del *escaneo láser* en cuanto a investigación, proyecto, o estudio de caso. Por ello es de gran relevancia; explicar los fundamentos de la tecnología LiDAR-TLS y su aplicabilidad en la inestabilidad de laderas.

Para una mejor comprensión del relieve, existe el creciente interés por los elementos que atañen a la configuración de la superficie terrestre —observación y medición precisa—. Por ende, en este trabajo se da especial atención a la tecnología LiDAR-TLS y su aplicación en los estudios sobre procesos de remoción en masa en Teziutlán, Puebla, uno de los municipios que ha tenido serios problemas de inestabilidad, cuyas consecuencias se han traducido en desastre.

Existe gran cantidad de terminologías empleadas para el LiDAR, las cuales se emplean con frecuencia como sinónimos, entre ellas destacan: *altimetría láser*, *radar láser*, *escáner láser*, etc. Gran parte de éstos términos son considerados como sistemas, métodos, técnicas o tecnologías de la Percepción Remota (se parte de la idea del funcionamiento del ojo humano y se implementa en sensores ópticos artificiales para medir objetos a distancia). Los conceptos se vuelven más explícitos, al hacer la diferencia entre Escáner Láser Aerotransportado o en inglés *Airborner Laser Scanning* (ALS) y Escáner Láser Terrestre o *Terrestrial Laser Scanning* (TLS).

En la actualidad hay gran variedad de métodos de teledetección; uno de los más útiles son los escáneres láser, que tienen la premisa de obtener información según sea el tipo de estudio, con gran exactitud y precisión. Algunas veces el acceso a la tecnología LiDAR es limitado sobre todo por su alto costo, de esta manera su uso se restringe para casos de gran relevancia, proyectos de grandes dimensiones y para situaciones en que el tiempo es limitado.

Los *procesos geomorfológicos*, involucran la transformación de la superficie de la Tierra; entre ellos destacan los *movimientos de ladera* de diversas características, magnitudes y velocidades. Dichos movimientos también son conocidos como: procesos de *remoción en masa* (PRM), *procesos gravitacionales* o *movimientos del terreno*. La interacción de los factores ambientales y sociales juega un papel muy importante en el control de los deslizamientos, por esta razón su entendimiento es fundamental para la identificación de zonas susceptibles, lo cual permite la elaboración de estrategias específicas y adecuadas para su prevención.

La Sierra Norte de Puebla (SNP), ha estado históricamente expuesta a precipitaciones de gran magnitud derivadas de tormentas tropicales y huracanes que han influido en su dinámica morfológica; con frecuencia se generan o reactivan PRM, y en particular deslizamientos. La ocurrencia de PRM en poblaciones vulnerables ha provocado pérdida de vidas humanas, reubicaciones y cuantiosos daños materiales (Alcántara-Ayala, 2004).

Los acontecimientos de 1999 en la SNP fueron un caso de gran relevancia para las experiencias de los estudios geomorfológicos que hasta ese entonces se habían realizado en México. Teziutlán junto con otros lugares de dicha región, han sido objeto de estudio en años recientes, sobre todo desde la perspectiva de la inestabilidad de laderas y la evaluación del riesgo. Algunos trabajos se han enfocado en la *percepción del riesgo* de la población, o bien en la instrumentación y monitoreo de laderas. La tecnología LiDAR-TLS es una opción de gran potencial para detectar zonas susceptibles en las laderas o propensas a deslizamientos, por lo que es importante aprender a interpretar su información.

Si bien, son escasas las investigaciones sobre LiDAR-TLS y su relación con algún tipo de proceso geomorfológico en México, existen gran cantidad de estudios a nivel internacional que abordan dicha temática: Prokop y Panholzer (2009).

LiDAR y los métodos para el tratamiento de desastres, son revisados en diferentes entornos terrestres (McKean y Roering, 2004; Glenn, 2006, Schultz, 2007 y Van Den Eeckhaut, 2007).

Abellan (2006), utilizó TLS para estudiar desprendimientos de rocas; Dunning (2009) obtuvo características geomorfológicas y estructuras de deslizamientos; Froese (2009) caracterizó la superficie de falla de un gran desprendimiento de rocas; Metzger y Jaboyedoff (2008) atribuyeron un solo color (RGB) para cada orientación espacial en grandes deslizamientos.

El número de publicaciones sobre el uso del LiDAR en estudios ambientales ha aumentado durante la última década; estas incluyen: una recopilación de los principios y fundamentos de las tecnologías

LiDAR; sus capítulos son básicos para la comprensión de las cuestiones instrumentales (Shan and Toth, 2008); numerosas aplicaciones LiDAR a las ciencias ambientales, con gran valor en las investigaciones en el campo de la geomorfología, la geoestadística, la teledetección y sistemas de información geográfica (Heritage and Large, 2009). Las contribuciones fueron principalmente en la cartografía (zonas de inundación, vegetación), aspectos geométricos (estudio de afloramientos geológicos) y la supervisión (erosión costera rocosa y arenosa; la dinámica de los ríos, etc.). A pesar de la aportación de estos escritos, la revisión de los avances de las aplicaciones del escaneo láser en deslizamientos es lenta (Jaboyedoff, 2012).

Gran parte de los estudios LiDAR en México, se han centrado en aspectos cartográficos y han sido realizados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI).

Las técnicas de escaneo láser son relevantes para el análisis de diversos tipos de procesos gravitacionales; se pueden identificar deslizamientos, predecir su ocurrencia y mitigar sus efectos sobre la población y su entorno. De manera adicional, el sistema LiDAR es aplicable en gran cantidad de ámbitos, entre los que destacan, los siguientes:

- Modelos digitales de elevación del terreno
- Recursos forestales
- Generación de modelos tridimensionales urbanos
- Cartografía de riesgos
- Cartografía de elementos lineales
- Cartografía de zonas de difícil acceso
- Cartografía de zonas costeras
- Planificación de ayuda en caso de desastres

El *radar láser* como también se le conoce al LiDAR ha resultado muy útil en elaborar Modelos Digitales de Elevación (DEM). Esta tecnología puede aplicarse en sitios de difícil acceso (relieve accidentado, humedales, etc.), además por medio de emisiones láser con diferente longitud de onda (color) se puede estudiar el fondo de lagos o zonas inundadas. Este tipo de dispositivos (activos) emiten radiación y pueden tener actividad sin importar el grado de iluminación de la zona de interés; pueden ser utilizados de noche (Venegas, 2005).

En épocas anteriores se medían distancias y se tomaban fotografías mediante aparatos ópticos que captaban la radiación electromagnética del sol y que era reflejada por los objetos. Dicha radiación podía estar en el espectro visible, infrarrojo y ultravioleta. Estos dispositivos se conocen como pasivos (POS), ya que no emiten radiación. El radar y el LiDAR son algunos ejemplos de los equipos “activos”, los cuales se han utilizado para reducir tiempos y costos (Venegas, 2005).

En lo que concierne al *LASER* (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), se trata de una tecnología con gran área de investigación y rápido desarrollo, como ya lo ha denotado la observación de la Tierra basada en el láser desde aviones y satélites, así como en aplicaciones militares. A su vez, el registro y explotación de la información con respecto a las propiedades de la señal, como amplitud, polarización, fase, cambios de frecuencia, y perfil vertical, pueden mejorar en gran medida las capacidades de clasificación e identificación de objetos.

El reciente crecimiento tecnológico en el campo de almacenamiento y transmisión de datos, así como las mediciones de los movimientos, han coadyuvado en gran medida, en el conocimiento de la dinámica de los deslizamientos. Es importante señalar asimismo que la integración de diferentes técnicas como la fotogrametría, permite una mayor comprensión de este tipo de fenómenos, por lo tanto una mejor protección de los asentamientos humanos y la infraestructura.

El potencial de reconstrucción de superficies a través de mediciones del TLS, presenta grandes ventajas para utilizar de esta tecnología como una herramienta para evaluar la inestabilidad de laderas.

Objetivo general

Explicar los fundamentos del escáner láser terrestre (TLS) como parte de las técnicas de teledetección terrestres (TTT) y su aplicación a la inestabilidad de laderas de Teziutlán, Puebla.

Objetivos particulares

- Revisar la bibliografía que se ha hecho en referencia a LiDAR-TLS en los estudios sobre deslizamientos.
- Resaltar los atributos más importantes del escaneo láser terrestre (reflectividad, precisión y exactitud, resolución, nubes de puntos, modelación y mapeo).
- Presentar un estudio de caso con los primeros pasos de la metodología o flujo de trabajo (lugar de estudio y limitaciones topográficas, tipo de escáner utilizado, nivel de resolución y precisión, escala espacial, etc.).
- Destacar los alcances y limitaciones del TLS, en particular con los estudios sobre deslizamientos.

Hipótesis

El TLS aplicado a la inestabilidad de laderas de Teziutlán, permitirá interpretar la dinámica de los deslizamientos que se suscitan en el lugar, y de esta forma poder monitorear sus movimientos y elaborar una planificación encaminada al tratamiento de los riesgos.

Metodología

La implementación del escaneo láser al estudio de deslizamientos requiere de una combinación e integración de técnicas y métodos procedentes, tanto del ámbito de la teledetección (sensores, RADAR, LiDAR), como de la geomorfología y otras ciencias de la Tierra. La metodología se puede estructurar en una serie de actividades o flujo de trabajo, las cuales aplican de forma simultánea y complementaria enfoques de interpretación y síntesis, así como métodos de adquisición de datos en campo y métodos de tratamiento y análisis en gabinete.

Para el estudio de inestabilidad de laderas en Xoloateno, Teziutlán, se utilizará la metodología propuesta por Nagalli (2012) y Sturzenegger (2010), en la cual se definen los principales parámetros a considerar en la planificación y desarrollo de un estudio TLS:

- Flujo de trabajo de la investigación
- Definición del área de mapeo
- Colocación de los instrumentos
- Resolución del terreno
- Escala
- Precisión y exactitud
- Reflectividad
- Validación de la técnica
- Resultados de campo y limitaciones del método

Estructura de la tesis

En el primer capítulo se aborda el surgimiento del escaneo láser y las tecnologías que fueron sus predecesoras e impulsoras, además se incluyen sus características técnicas, su funcionamiento y ventajas respecto a otras tecnologías de medición. También se describe la calidad de sus mediciones, la adquisición de datos y los productos derivados de esta recopilación de información

como lo son las nubes de puntos y los modelos digitales, así como la influencia que tiene la reflectancia en la optimización de las imágenes. Todo esto para conformar información práctica que se pueda aplicar al problema de inestabilidad de laderas en Teziutlán, Puebla.

En el segundo capítulo, se realiza una sinopsis sobre la historia y el estado de arte del escaneo láser terrestre (TLS), su definición, principios de medición, tipologías o clasificaciones, así como sus potencialidades y limitaciones. Esta evolución de los TLS ofrece nuevas formas de investigar los deslizamientos, en este caso, la situación particular que presenta Teziutlán.

En el tercer capítulo se menciona una amplia variedad de aplicaciones del TLS en temáticas geo-ambientales, en especial sobre inestabilidad de laderas donde se presentan algunos ejemplos en que fue empleado el escaneo láser para el monitoreo y evaluación del riesgo por deslizamientos. También se describen distintas metodologías que se han utilizado para investigar la actividad de deslizamientos. La combinación de precisión, velocidad y alcance en un solo instrumento ha llevado a la utilización del TLS en campos tan variados. El TLS se ha vuelto más popular en los estudios geomorfológicos relacionados con el análisis de laderas, por lo que la aplicación del escaneo láser terrestre es de gran importancia para la interpretación de la dinámica de deslizamientos de Teziutlán.

En el cuarto capítulo se desarrolla la aplicación del TLS en laderas potencialmente inestables en Teziutlán (Xoloateno). En esta sección se describe la historiografía de la zona de estudio con especial alusión de los acontecimientos del desastre de 1999, así como un contexto regional de la Sierra Norte de Puebla y la complejidad de la relación clima e inestabilidad de laderas. En este capítulo se definen las características y atributos del TLS utilizado, y también se muestra la metodología aplicada al sitio de prueba.

En los apartados finales de recomendaciones y conclusiones se vierten opiniones explícitas sobre la aplicación del escaneo láser en la inestabilidad de laderas de Teziutlán.

CAPÍTULO I. PRINCIPIOS BÁSICOS DEL LIDAR

La tecnología del escáner láser esta basada en la transmisión/recepción de señales de luz infrarroja de muy baja dispersión espacial y alta precisión temporal. El tiempo de vuelo del haz láser permite mediciones de varios cientos de metros, con exactitud de centímetros. Debido a la alta precisión del sensor, la frecuencia de muestreo y el largo alcance del TLS en combinación con dispositivos mecánicos precisos (espejos o prismas) permiten una densa medición 3D en un determinado campo de visión.

1.1 Antecedentes del LiDAR: teledetección y fotogrametría

La teledetección es el sistema integral de adquisición de información territorial, a partir de la radiación electromagnética captada por el sensor. El desarrollo de la teledetección se debe en parte a las técnicas de tratamiento digital de imágenes y al acceso a la información digital proporcionada por sensores, en su aspecto espacial, radiométrico, espectral y temporal.

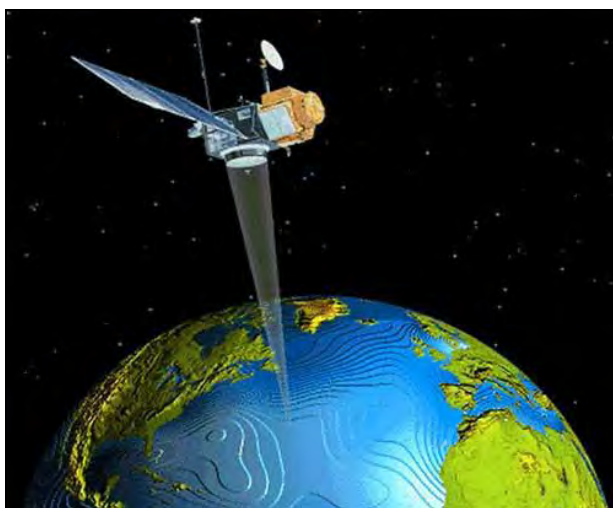


Fig. 1. Ejemplo de teledetección satelital.

Según Chuvieco (1995), la fotogrametría se puede considerar la tecnología precursora de la teledetección.

La teledetección surge a finales del siglo XIX y alcanza su máximo desarrollo en el siglo XXI. En su etapa inicial se utiliza el avión como plataforma y sus aplicaciones fueron con propósitos militares; los ejércitos alemanes y franceses usaban cámaras en sus aviones.

Durante el periodo de entreguerras (1920-1939) tienen lugar las primeras aplicaciones científicas de la fotografía aérea; se editaron trabajos sobre prospección geológica y minera, realización de inventarios forestales y levantamientos topográficos.



Fig. 2. Foto aérea de Rabenov. Photo L. Svacek.

En la Segunda Guerra Mundial las investigaciones sobre percepción remota fueron controladas por los ejércitos; en esta época se desarrollaron lentes, películas, nuevos sensores y mejoras en la estabilidad de los aviones.

En el periodo de 1945-1960 se generaliza la aplicación de la fotografía aérea y técnicas fotogramétricas para la cartografía. En 1951 se crea el *International Training Center for Aerial Survey* (ITC) en Holanda. Después de 1960, la teledetección aérea alcanza su madurez con prácticas como la restitución fotogramétrica e interpretación de pares estereoscópicos de fotografías aéreas. En esta misma época surgen los satélites como una nueva forma de observar la Tierra.

La observación remota de la superficie terrestre derivada de la teledetección, no solo incluye los procesos de obtención de la imagen, sino también su posterior tratamiento para una determinada aplicación.

Los sensores remotos permiten recoger la información por medio de equipos que no están en contacto directo con el objeto de la investigación. Estos aparatos varían desde cámaras, radares y radiómetros, que trabajan dentro del espectro electromagnético (representado en la figura 3) que puede abarcar desde las ondas de radio hasta las de rayos gamma y las ondas de radiación cósmica (Suárez, 2009).

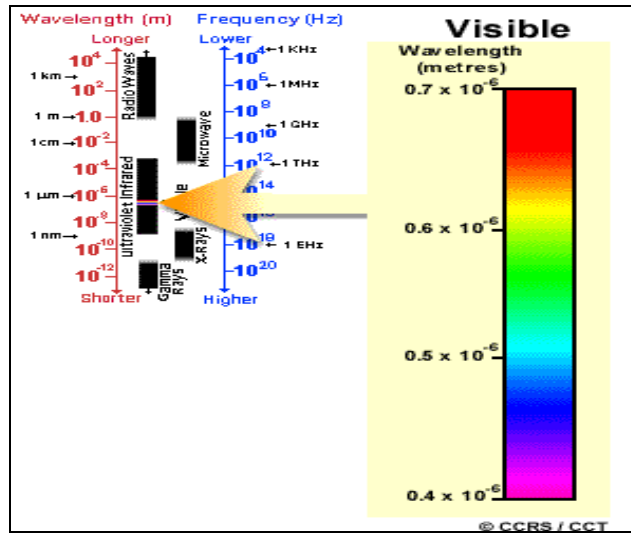


Fig. 3. Espectro electromagnético (Heritage and Large, 2009).

La *fotogrametría* ha jugado un papel importante en la explotación y desarrollo de la telemetría por láser para la generación de modelos digitales de elevación (DEM). Por lo tanto, el LiDAR no debe considerarse como su competencia, sino como una herramienta versátil adicional. Las dos tecnologías son complementarias y su integración puede conducir a productos más precisos y completos, y abrir nuevos campos de aplicación.

Como parte del desarrollo del escaneo láser, la evolución de los métodos fotogramétricos (estereocomparador y estereorestituidor) y la transición de la fotogrametría analógica a la analítica, ha simplificado los cálculos tediosos por la programación de algoritmos en computadoras.

El avance de la fotogrametría digital ha proporcionado a los científicos una herramienta automatizada para generar DEM a muy altas densidades (fig. 4).

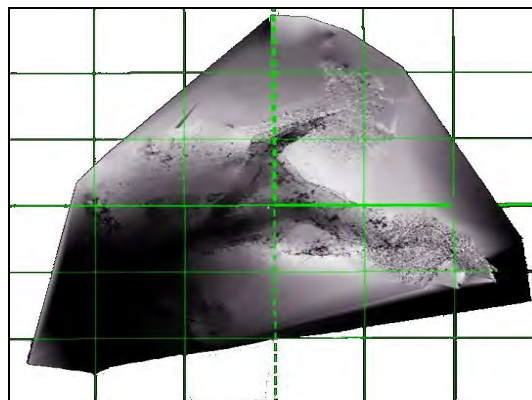


Fig. 4. Modelo 3D de Cucuteni Ravine (Romanescu, 2012).

La fotogrametría se basa en algoritmos maduros, desarrollados y probados durante décadas. Anteriormente el LiDAR era un servicio prestado, no había un sistema único para el tratamiento de datos láser. Tampoco existían normas o directrices aceptadas sobre como realizar operaciones críticas como la calibración, ajustes, el número y distribución de los puntos de control, etc., por lo que los usuarios no podían estar seguros de la calidad y fiabilidad de los datos proporcionados.

Durante la segunda guerra mundial se dio un gran impulso a la fotografía aérea y a otras formas de percepción remota. Tiempo después las plataformas satelitales reemplazaron a las aéreas, y los sensores electrónicos multiespectrales acoplados a computadoras, sustituyeron a las cámaras fotográficas (Venegas, 2005).

La contribución de la teledetección a la cartografía, monitoreo, análisis espacial y predicción del riesgo de fenómenos gravitacionales, se ha dado en gran medida a través de imágenes de satélite, fotografías aéreas y modelos digitales del terreno.

En la actualidad, aparte de los instrumentos tradicionales (inclinómetros, etc.), otras tecnologías están disponibles, como las estaciones geodésicas automáticas, dispositivos de fotogrametría digital, radar y escáneres láser. Estos nuevos instrumentos basados en el principio de operación "remota", aumenta las opciones de representación del terreno y el monitoreo de deslizamientos (Mazzanti, 2013).

El TLS, es una poderosa herramienta de teledetección. Los datos proporcionados por este sistema de escaneo permiten la generación de modelos geométricos precisos, así como la detección de desplazamientos relativos de zonas inestables mediante el uso de imágenes multi-temporales (Viero, 2008).

1.2 Sensores láser

El desarrollo de sensores capaces de recoger rápidamente información de superficies 3D ha permitido que mediciones de alta densidad se realicen en terrenos y condiciones complicadas. Los sistemas LiDAR utilizan un escáner láser que emite un pulso de luz hacia el terreno que es detectado y almacenado por un sensor después de reflejarse al tocar un objetivo o superficie de interés; la velocidad de la luz es tal que el receptor capta el retorno antes de que el próximo pulso sea emitido (como en la figura 5). El tiempo que le toma a la señal viajar de ida y vuelta multiplicado por la velocidad de la luz y dividido entre dos, es la distancia desde el escáner hasta el objeto que golpeo el pulso (Venegas, 2005).

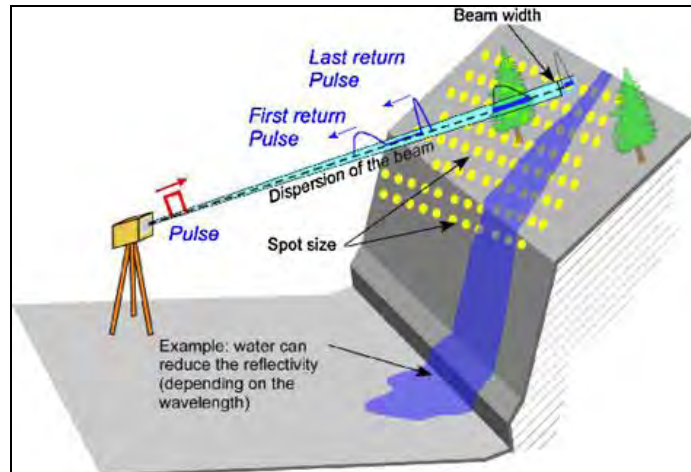


Fig. 5. Adquisición de datos de un escáner láser terrestre (Jaboyedoff, 2010).

Desde su introducción en la década de 1960, el láser es de gran importancia en la medición precisa de los ambientes naturales. Los antecedentes históricos del escaneo láser comenzaron en 1958 cuando Charles Townes y Arthur Schawlow, sugirieron la posibilidad de que un haz estrecho de muy intensa radiación podría viajar sobre grandes distancias y ser dirigido con precisión (Heritage and Large, 2009).

En el periodo de 1962 a 1968 se desarrolló la base de la tecnología láser, y fue seguido en la década de 1970 por un periodo de mejoría en la fiabilidad de la técnica. Los instrumentos topográficos tempranos fueron desarrollados para su uso en laboratorio. El primer instrumento láser de medición de distancia surgió en 1966 y se comercializó en 1971. A pesar de algunos problemas de credibilidad el éxito comercial continuó y en la década de 1970 el uso del láser tuvo una gran aceptación en la ingeniería civil. Los científicos ambientalistas también hicieron uso de la nueva tecnología, y se produjo una gran gama de aplicaciones (Heritage and Large, 2009).

El láser se introdujo en la comunidad científica a través de las actividades de investigación del Instituto de Fotogrametría (Prof. F. Ackermann), Universidad de Stuttgart en 1988. A partir de entonces aumentó el interés por el escaneo láser aerotransportado (ALS). Casi todos los sistemas hacen uso del *Global Positioning Systems* (GPS) e *Inercial Nadir System* (INS) para la orientación del sensor. La frecuencia del láser está en el rango 500 – 1500 nm, con valores típicos de 1040 – 1060 nm. Algunos sistemas permiten la grabación de múltiples ecos de un pulso de láser, y también ofrecen información de intensidad (Venegas, 2005).

Hoy en día, la instrumentación basada en láser ofrece variadas aplicaciones. El Teodolito y la Medición de Distancia Electromagnética (EDM) antes del desarrollo del escaneo láser, fueron instrumentos muy versátiles y ampliamente utilizados. Hasta la fecha, los teodolitos permanecen como herramientas estándar debido a su precisión y facilidad de operación (Heritage and Large, 2009).

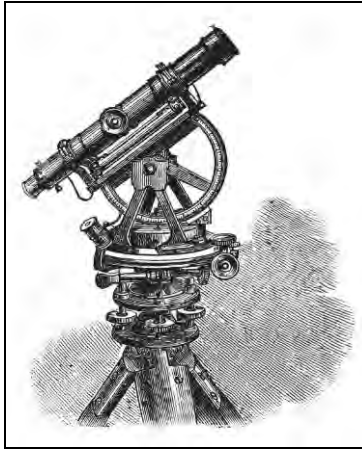


Fig. 6. Teodolito clásico (123rf.com).

Los escáneres láser pertenecen a la familia de los sensores activos al igual que los radares, ya que el objetivo o punto de interés es iluminado por el propio sensor. De esta manera, la medición es independiente de la iluminación externa (Wher, 2008).

El LiDAR utiliza la energía electromagnética en longitudes de onda visible e infrarrojo cercano. La mayoría de estos sensores están a bordo de aeronaves, y pueden subdividirse en “pequeña huella” (5 – 30 cm), comúnmente utilizados para la asignación de detalles locales y mapeo de superficies de elevación; y “grande huella” (10 – 25 m) para recoger un valor promedio en una superficie mayor (Metternicht, 2005).

Un láser tiene la peculiaridad de tener una divergencia baja, es decir, que conserva el ancho de pulso de manera constante y por más tiempo que la luz tradicional (fig. 7). Esto permite que la potencia del rayo sea perdurable (Venegas, 2005).

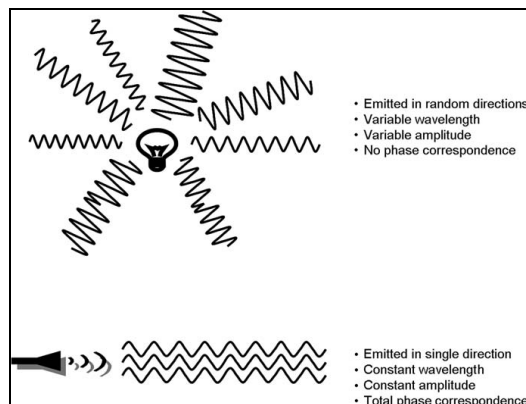


Fig. 7. Características de la luz natural y el LASER (Heritage and Large, 2009).

La potencia de salida de un láser se expresa en vatios (W) o milivatios (mW). La salida de los láseres pulsados se expresa a menudo como la exposición radiante, es decir, la concentración de la energía láser en un área determinada expresada en términos de Joules por centímetro cuadrado (J/cm^2). Diferentes niveles de potencia de salida se encuentran en función del tipo de láser; en un extremo del espectro están los TLS que utilizan láser CW como los fabricados por Zoller y Faro, para la medición de distancias cortas (70 m). El uso de la técnica de medición de fase emplea láseres semiconductores con relativa baja potencia (Petrie and Toth, 2008).

En términos generales, los láseres se clasifican de acuerdo con el tipo de material que se utiliza como fuente de radiación. Los tipos más comunes son los láseres de gas, de estado sólido y semiconductores. En menor cantidad se encuentran los de tipo líquido y los de color. Para propósitos de cartografía, en que los niveles de energía son necesarios para realizar mediciones de distancias, solo ciertos tipos de láseres de estado sólido y semiconductores tienen la intensidad requerida para llevar a cabo dichas acciones (Petrie and Toth, 2008).

En un TLS la posición de la plataforma se fija, por lo tanto se necesita el movimiento en dos direcciones para escanear un área del terreno. Además del movimiento vertical del espejo giratorio se agrega el movimiento controlado en el acimut a través del uso de un motor de accionamiento que permite la medición de una serie de perfiles de todo el eje vertical del dispositivo láser. Esto proporciona la posición y datos de elevación para construir un modelo 3D del terreno (Petrie and Toth, 2008).



Fig. 8. Ejemplo de un escáner terrestre Riegl LMSZ420i (Hodgetts, 2009).

Aunque la invención del láser data de la década de 1960, la falta de varias tecnologías de apoyo retrasó la aplicación del escaneo láser. La introducción de la tecnología de georreferenciación directa en la década de 1990 y los avances generales en informática han sido las tecnologías facilitadoras para el desarrollo de los sistemas LiDAR y sus aplicaciones topográficas (Petrie and Toth, 2008).

Actualmente gran cantidad de sensores remotos y software de topografía se encuentran disponibles en el mercado, la mayoría de ellos trabaja con datos procesados ya que aún no dominan la edición de las nubes de puntos.

El escaneo láser tiene grandes atractivos para los geocientíficos; recientemente se ha visto una rápida adopción de este tipo de tecnología, además de la introducción de instrumentos más pequeños, resistentes y veloces, capaces de detectar niveles muy bajos de radiación de retorno para generar datos de alta definición, registrar la información sobre la posición espacial y de las propiedades físicas de las superficies estudiadas de forma remota. Como resultado el LiDAR-TLS ofrece grandes oportunidades para investigar características del terreno y su dinámica en rangos espaciales y temporales, lo que facilita una mejor comprensión de la superficie terrestre y el cambio de paradigmas en las disciplinas que trabajan previamente con escasa información e interpolación de sus modelos (Heritage and Large, 2009).

1.3 Calidad de medición: precisión y resolución

La garantía de la calidad abarca las actividades de gestión que se llevan a cabo antes de la recolección de datos para asegurar que la información en bruto y la derivada sean de la calidad requerida por el usuario. Estos controles de gestión cubren la calibración, la planificación, la ejecución, y revisión de las actividades de recopilación de datos para determinar si la calidad deseada se ha logrado. Se trata de rutinas y controles constantes para garantizar la integridad, exactitud, y exhaustividad de los datos en bruto y derivados (Habib, 2008).

Un escáner láser consiste en un transmisor y receptor de haz de láser, además de un dispositivo de exploración. Se pueden aplicar dos métodos para determinar el alcance: fase y pulso. El primero permite un alcance más preciso, pero es limitado; el segundo permite un mejor alcance, y por lo tanto se aplica en la mayoría de escáneres aerotransportados (fig. 9).

La posición absoluta del sensor ALS se define por un GPS, y su orientación se registra por un sistema inercial. Finalmente, las coordenadas de la nube de puntos se calculan con una precisión de 15 cm a través del uso de puntos de control terrestre (Habib, 2008). En contraste, la posición y orientación del sensor de TLS no están definidas con precisión en el campo, ya que el dispositivo necesita estar acoplado con un sistema inercial y un GPS; esto hace necesaria una georreferenciación adicional de las nubes de puntos del TLS. Dicho proceso se lleva a cabo mediante la alineación de la nube de puntos TLS a través de un conjunto de puntos de control terrestre o con otra nube de puntos ya georreferenciada.



Fig. 9. Principio de funcionamiento del LIDAR aerotransportado (Heritage and Large, 2009).

La mayoría de ALS y algunos de los sistemas TLS usan la forma de onda completa de la señal láser. La forma de onda completa de pulso retro-dispersado incluye información sobre las propiedades de los objetos reflexivos dentro de la zona del rayo. Esto permite la eliminación de parte del efecto de la vegetación (Heritage and Large, 2009).

Según Harding (2008), una de las cuestiones principales en el escaneo láser es la eliminación de la vegetación, ya sea por métodos automáticos o manualmente. La vegetación tiene el potencial de influir en la calidad de las mediciones y en la estabilidad de las laderas. Según Lim (2009), se requiere una mayor investigación de los tipos y escalas de movimientos que de forma fiable podrían ser detectados por TLS y otros métodos de estudio en diferentes entornos vegetativos.

Precisión

Las innovaciones tecnológicas actuales han tenido un gran impacto en los métodos de estudios geodésicos. Además de los sistemas de medición por satélite que proporcionan al usuario coordenadas en 3D, las herramientas de medición de última generación son capaces de llevar a cabo estudios más precisos y rápidos. Además, puesto que los datos son en gran parte independientes de la iluminación ambiental es posible escanear en la noche o en condiciones de oscuridad (Alkan, 2012).

La precisión típica del instrumento láser es de ± 1.5 cm, en distancias máximas de 800 a 1000 m (Manetti y Steinmann, 2007). Sin embargo, la precisión instrumental es generalmente menor en las aplicaciones prácticas debido a las condiciones desfavorables, como: poca reflectividad, superficies

muy rugosas, condiciones de mal tiempo (lluvia o niebla), demasiada luminosidad en el ambiente, etc.

Algunos de los estudios sobre precisión fueron realizados por Lichti (2000), Gordon (2001), Balzani (2001), Tucker (2002), y Johansson (2002). Estas investigaciones se centraron en el rendimiento comparativo de varios escáneres láser. La investigación y el análisis de los errores que se producen en las mediciones con TLS fueron discutidos por Reshetyuk (2006) en (Alkan, 2012).

Teóricamente algunas técnicas remotas tienen una gran precisión en comparación con las técnicas tradicionales. Sin embargo, según Mazzanti (2003) la precisión de los equipos de teledetección esta fuertemente influenciada por la variación atmosférica que puede conducir a la reducción de hasta 100 veces o más la precisión nominal del equipo (precisión alcanzable en condiciones controlables de laboratorio).

Las diversas limitaciones prácticas que existen en el desarrollo de los TLS significan que hay ventajas y desventajas en la potencia del láser, alcance, precisión y resolución. Schultz e Ingensand (2004) explican que los pros y contras de los escáneres se deben a las leyes físicas relativas a la conducta del láser que define la funcionalidad entre la precisión y la intensidad. Dicha situación ha llevado al desarrollo de numerosos sistemas de escaneo láser con diferentes atributos (fig. 10). Esta variación considera que en ningún TLS existe un sistema que se pueda utilizar para todas las aplicaciones concebibles.



Fig. 10. Escáner montado en lancha para el mapeo de procesos fluviales (Kukko, 2013).

Al igual que otros instrumentos de medición, pueden ocurrir errores en los resultados de TLS, ya sea por factores ambientales, permeabilidad y rugosidad de la superficie del objeto inspeccionado, etc. En estas circunstancias es de gran valor identificar el rango de precisión de todos los sistemas de

medición incluyendo el TLS con el propósito de asegurar que los datos del estudio son de la mejor calidad (Alkan, 2012).

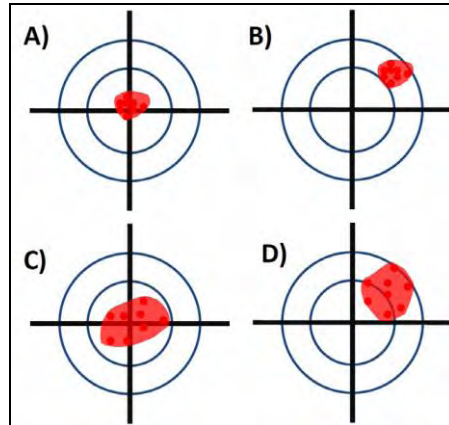
De acuerdo con Pirotti (2013), se pueden minimizar los errores con una mejor comprensión de las características de los sensores y de sus implicaciones (fig. 11).

Un conjunto de datos procedentes de un estudio de escaneo láser se define por la resolución y la precisión de los elementos en la nube de puntos. Estos dos valores no son constantes en el espacio, y varían en diferentes grados dependiendo de varios factores. La densidad de puntos depende de la Tasa de Repetición de Pulsos (PRR, que se informa por lo general en miles de pulsos por segundo, es decir, kHz), de la distancia desde el objeto, y en el caso de una plataforma en movimiento, de la velocidad del vehículo. El rendimiento de un sensor está estrechamente relacionado con su capacidad de tener una elevada PRR manteniendo un alto estándar de precisión/exactitud (Pirotti, 2013).



Fig. 11. Escáner montado en vehículo todo terreno con exploración vertical (Kukko, 2013).

Los actuales sensores disponibles en el mercado han aumentado la precisión, la exactitud y la proporción rango/PRR. El rango es la distancia máxima que se puede alcanzar por un pulso que puede proporcionar una señal de retorno. El rango depende de la PRR ya que la energía de un pulso emitido disminuye a medida que aumenta la PRR. Los sensores pueden proporcionar muy alta PRR, pero los límites del rango tienen que ser considerados en términos de la composición de la superficie que va a ser impactada (Pirotti, 2013).



- A) High precision ~ 1 , high accuracy ~ 1 bias (μ) ~ 0
 B) High precision ~ 1 , very low accuracy ~ 15 bias (μ) ~ 15
 C) Low precision ~ 4 , low accuracy ~ 4 bias (μ) $= 0$
 D) Low precision ~ 4 , very low accuracy ~ 16 bias (μ) ~ 15

Fig. 12. Representación esquemática de la calidad de medición (Pirotti, 2013).

Según Pirotti (2013), un aumento en la resolución significa más puntos, pero también requiere una mayor precisión y más calidad en general, esto es importante para evaluar que componentes son significativos para la calidad. Otro aspecto importante es que un conjunto de datos del escáner láser no tiene una calidad constante en el dominio espacial, debido a que la densidad de puntos, la exactitud posicional, la geometría y la morfología de la superficie de escaneo varían constantemente durante las mediciones.

Para ALS, la densidad de puntos por lo general oscila 0.5 y 100 pts/m², mientras que para TLS es de 50 a 10,000 pts/m². Además de la posición, se adquiere la intensidad de la señal reflejada. Este parámetro depende principalmente de la longitud de onda del haz, el tipo de material (colores y rugosidad de la superficie reflectante), la humedad del suelo y el ángulo de incidencia (Voegtle, 2008). Para TLS, la gama de adquisición aumenta generalmente con longitudes de onda más largas, desde unos pocos metros a 2,000 m si la reflectividad de la superficie es alta (Jaboyedoff, 2012).

De acuerdo con Pirotti (2013), un aspecto más importante que la densidad de puntos es la precisión en el posicionamiento absoluto de los puntos. Una fase de planificación que tenga en cuenta factores que afectan la calidad y una medición combinada de TLS y ALS podría ser una gran estrategia para cubrir las respectivas limitaciones debido a las geometrías escaneadas (por ejemplo oclusiones debido a la morfología compleja en zonas de montaña). Podría darse el caso de que una resolución de escaneo menor disminuya el tiempo de estudio, sin afectar el producto final.

Resolución

La resolución del escáner láser es un parámetro que determina el nivel de detalle que se puede observar en una nube de puntos. Se divide en resolución de alcance y resolución angular o espacial

(Lichti y Jamtsho, 2006). La primera es la capacidad para resolver dos objetos en una visibilidad directa; la segunda es la capacidad de resolver dos objetos en una visibilidad adyacente. Este parámetro se rige por dos variables: intervalo de muestreo (también llamado punto de separación) y anchura del rayo láser (que depende de la distancia y el instrumento). La estimación de la resolución TLS generalmente se mal entiende y se interpreta como equivalente al intervalo de muestreo. Sin embargo, cuando el punto de separación es menor que la anchura del rayo láser, los detalles finos se vuelven borrosos.

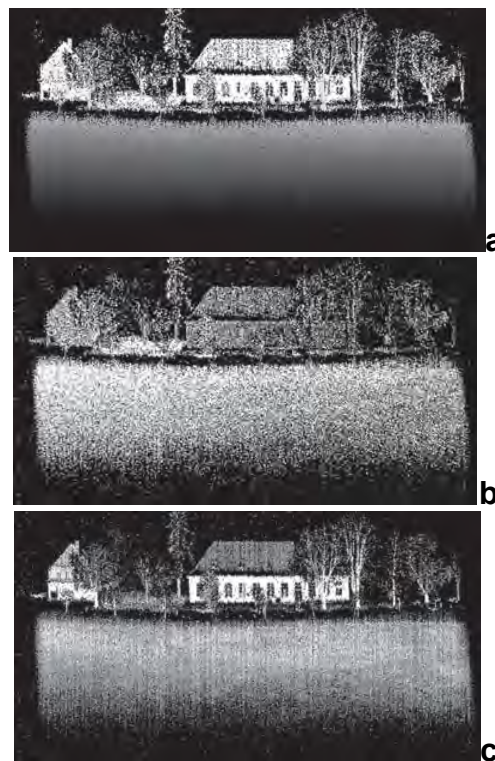


Fig. 13. Atributos extraídos de pulsos: (a) rango, (b) ancho de pulso, e (c) intensidad (Stilla, 2008).

Lichti y Jamtsho (2006), propusieron el uso del campo instantáneo de visión (EIFOV) como una medida de la resolución del TLS. El intervalo de muestreo mínimo propuesto por estos autores es del 86% de la anchura del rayo láser.

La aplicación creciente de los sistemas TLS y la facilidad de recolecta de datos también conlleva algunos problemas (fig. 13). El TLS tiene la menor práctica de control estandarizado, así como evaluaciones de error. Esto se debe a lo relativamente nuevo del TLS como una herramienta de medición (Large, 2009).

Fröhlich y Mettenleiter (2004), mencionan que a diferencia de los aparatos de geodesia tradicional (estaciones totales, GPS), los escáneres láser más comerciales no están bien especificados en

términos de precisión, resolución y rendimiento. Solo pocos sistemas son comprobados por organismos independientes con respecto a su desempeño en relación con las especificaciones del fabricante. Estos detalles se han revisado en los estudios de Boehler (2003), Johansson (2003), entre otros. En estos documentos se enfatiza la importancia de la incertidumbre en la ubicación angular de las mediciones basadas en láser debido al diámetro del haz (huella). De hecho, la posición aparente del rango de observación es lo largo de la línea central del haz emitido, pero la ubicación del punto real no se puede predecir, ya que podría estar en cualquier lugar dentro de la huella del haz proyectado (fig. 14). Esta incertidumbre puede conducir a un "Efecto de borde", que también está relacionado con la huella. Cuando el haz de láser se mueve sobre un borde, sólo una parte del punto láser es reflejada, el escáner, sin embargo, interpreta la luz recibida como un punto entero. El punto de la huella que ha producido efectivamente la reflexión no necesariamente coincide con el centro de la huella, aunque la coordenada angular asignada al reflector sea la del centro. Como resultado, muchos puntos erróneos son producidos, los cuales son cambiados en la dirección del láser. Al escanear laderas rocosas, el *efecto borde* puede impedir estudios precisos de irregularidades y asperezas a pequeña escala (Sturzenegger, 2010).

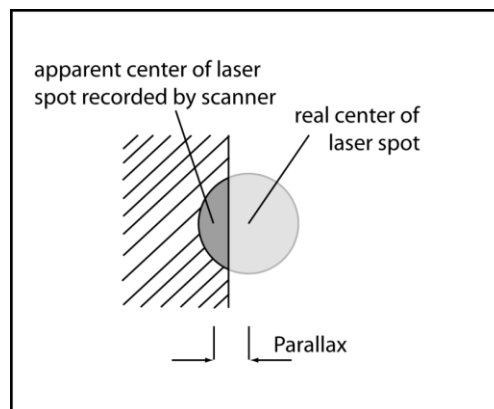


Fig. 14. Cambio en la ubicación de puntos en el borde de los objetos escaneados (Boehler, 2003).

Boehler (2003) también explica que cada nube de puntos producida por un escáner láser contiene un número considerable de puntos que muestran grandes errores.

Cabe destacar que el punto de espaciamiento del terreno utilizado en mediciones de escaneo láser es un valor promedio. Debido a la topografía del objeto, las zonas más próximas al escáner tienen un punto de espaciamiento más cercano que el valor promedio, mientras que los objetos distantes tienen un punto de espaciamiento más amplio. Las variaciones en resolución del terreno en un solo modelo 3D por teledetección también son el resultado de otros parámetros, incluyendo el ángulo de incidencia, la reflectividad, entre otros (Sturzenegger, 2010).

Como una regla general, Giussani y Scaioni (2004) sugieren utilizar una resolución del terreno ligeramente mayor que la requerida, de modo que haya suficiente redundancia para garantizar la interpolación adecuada de un modelo de superficie 3D (Sturzenegger, 2010).

Para la mayoría de instrumentos disponibles comercialmente, el láser en el infrarrojo cercano (0.75 – 3 μm de longitud de onda) permite una resolución de escaneo del rango de sub-cm a intervalos de 1 a 2 km (Gordon y Lichti, 2007).

El TLS es utilizado en la detección remota de fenómenos de inestabilidad de laderas, gracias a su capacidad de adquirir un muestreo espacial muy denso. La precisión en la adquisición de un solo punto puede ser de 1-1.5 cm a 100 m de distancia, y la resolución a la misma distancia es de aproximadamente 2-3 cm (Lichti y Jamtsho, 2006).

1.4 Adquisición de datos

De acuerdo con Hetherington (2009), antes de comenzar la recolección de datos, se debe considerar el modo apropiado de adquirir la información. Esto está relacionado con tamaño del área de interés, la pregunta de investigación y el equipo disponible.

La obtención de las habilidades requeridas en el uso del escáner, el registro y la edición de todos los procesos que conlleva requieren familiaridad y mucha práctica. Asimismo, los proveedores deben proporcionar una demostración completa de los equipos, como por ejemplo algunas exploraciones de prueba o una demostración del software adjunto. De esta manera se vislumbrarán las características físicas de los instrumentos, su calibración, el tiempo de recopilación de datos, las maniobras en campo y el desarrollo del software (Hetherington, 2009).

Relacionado a lo anterior, la Sociedad Internacional de Fotogrametría y Teledetección (ISPRS) realiza talleres sobre el escaneo láser. Cada taller proporciona un foro para el intercambio de experiencias, así como la discusión de nuevas técnicas y enfoques (Hodgetts, 2009).

El escaneo láser es una gama de técnicas de adquisición de datos. Los escáneres aéreos y terrestres operan a diferentes escalas. El TLS ofrece gran detalle sobre áreas pequeñas (Hodgetts, 2009).

De gran importancia es la cuestión de cómo se recopilan, procesan y administran los datos (fig. 15). Los datos LiDAR ofrecen un mejor acceso a las propiedades geométricas de las superficies, cuya característica sirve para hacer distinción de los objetos hechos por el hombre. Sin embargo, el escaneo láser solo proporciona información limitada acerca de las propiedades de reflectancia de las superficies de los objetos, mientras que las cámaras aéreas modernas ofrecen imágenes multispectrales (Large, 2009). Algunos escáneres vienen con una cámara incorporada para la adquisición de información de la imagen en el espectro visible, que se puede integrar con los datos

del propio escáner. Otros accesorios pueden incluir montajes de vehículos, incorporación de GPS para proporcionar georreferenciación en tiempo real, etc.

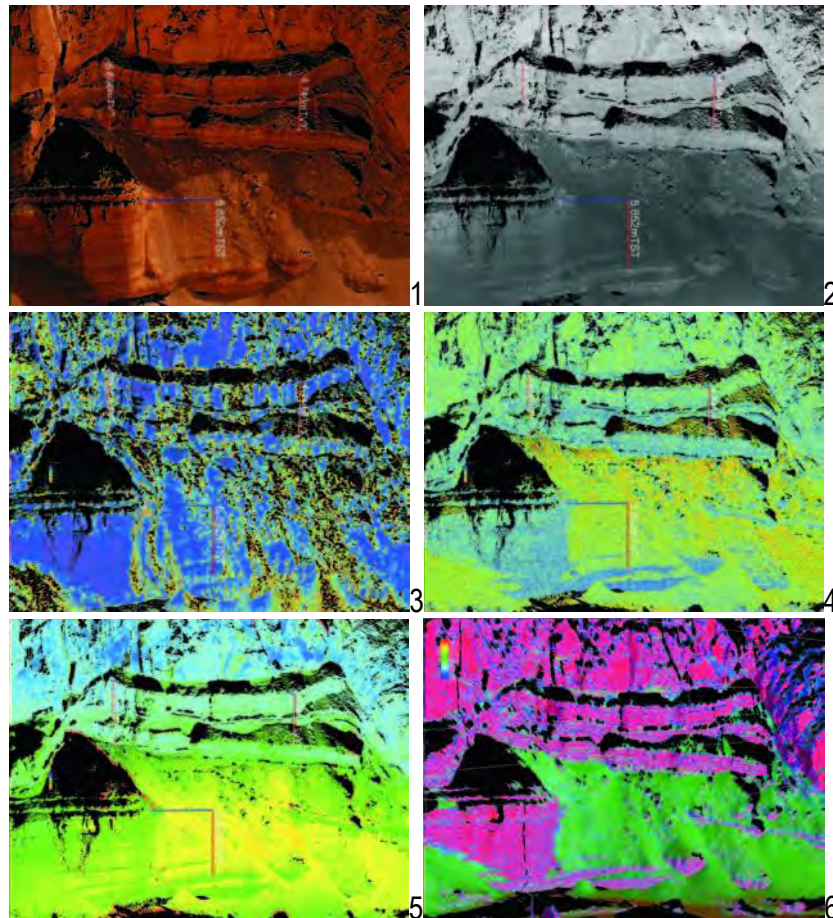


Fig. 15. Análisis de atributos de datos LiDAR. Los Parámetros son (1) color RGB, (2) Intensidad de Reflexión, (3) Correlación entre líneas de exploración adyacentes basadas en el rango del escáner, (4) Rugosidad de la superficie, (5) Falso color e intensidad (6) Dip de la superficie de afloramiento (Heritage and Large, 2009).

La integración de datos de diferentes plataformas de escaneo láser ha servido para complementar la representación holística de una escena (Lim, 2009). Sin embargo, a pesar del progreso que se ha hecho con dicha integración, el tratamiento automático de los conjuntos de datos resultantes esta en una fase de investigación muy temprana.

Según Lim (2009), el enfoque de adquisición de datos para objetivos o superficies de interés debe ser impulsado por el tamaño y complejidad de la escena, el nivel de detalle de medición y la representatividad requerida. También describe que es responsabilidad de los que recogen y manipulan los datos asegurarse de tomar las decisiones correctas en términos de selección de técnicas de medición apropiadas. Por ejemplo, uno de los principales impulsores en el desarrollo del

escaneo láser en aplicaciones geológicas ha sido la industria petrolera, debido a la necesidad de mejorar la comprensión y modelización de yacimientos de hidrocarburos. Los TLS han permitido mejorar la adquisición de datos y la capacidad de producir modelos sobre afloramientos pétreos con relativa facilidad (Hodgetts, 2009).

De acuerdo con Hodgetts (2009), la fase de recogida de datos es muy sencilla en los escáneres modernos, sin embargo, el software LiDAR para ciencias de la Tierra es inmaduro en comparación con el desarrollo del hardware. De esta manera, ante la falta de un programa específico, el post-procesamiento y la interpretación de datos, son las partes más lentas del flujo de trabajo en las geociencias. El software debería permitir la visualización y edición de la nube de puntos (eliminación del ruido), así como proporcionar alguna medida de ajuste (mallado), una modelización de la superficie y la exportación de datos en diversos formatos (Hetherington, 2009).

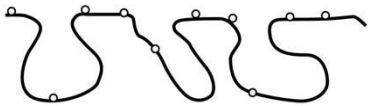


Un aspecto clave de los datos LiDAR es la diferencia entre el error de medición y la tergiversación de la superficie, por ejemplo los datos pueden ser de gran precisión pero si se adquieren sobre una escena estructuralmente compleja no se pueden representar digitalmente los detalles en la realidad. Esta situación puede surgir ya sea por la falta de resolución espacial de las mediciones o debido a una escena de múltiples capas que es demasiado compleja para medir desde cualquier perspectiva o plataforma (Hetherington, 2009).

Lane (1998), describe que la evaluación del terreno o calidad de la superficie es difícil de concebir debido a que “la verdadera superficie” rara vez se conoce, por lo tanto se tiene que basar en una superficie existente o en parámetros de superficies derivadas. El mismo autor, afirma que tres cuestiones relacionadas con la calidad de la superficie deben ser estudiadas:

- (1) La calidad de la superficie apta para los datos.
- (2) Los efectos de la densidad de puntos de calidad en los DEM.
- (3) Los efectos en la distribución de puntos de calidad en los DEM.

La complejidad para la elección de una superficie de calidad deriva del hecho de que diferentes técnicas de interpolación funcionan mejor que otras, ya que dependen de la naturaleza de la superficie medida y los datos espaciales obtenidos de esa superficie (tabla 1).

Tabla 1. Ejemplo de una representación esquemática que muestra los posibles escenarios de calidad de la medición en una superficie compleja (los círculos abiertos representan los puntos de medición). El último escenario tiene una representación exacta y precisa, además de una calidad de datos buena.

SURFACE MEASUREMENT SCENARIO	DESCRIPTION	DATA QUALITY
	Accurate	Poor
	Accurate and precise (allowing high resolution)	Moderate (normal)
	Accurate, precise and representative	Good

Fuente: Hetherington (2009).

Según Metternicht (2005), el uso de datos de percepción remota, ya sea aéreo, satelital o terrestre, varía en función de tres etapas principales en un estudio de deslizamientos: a) Detección e identificación, b) Seguimiento, c) Análisis espacial y prevención de riesgos.

De acuerdo con Hodgetts (2009), se deben tomar adecuadas provisiones para lograr el éxito en las exploraciones y evitar contratiempos que dificulten la adquisición de datos y el trabajo en campo, por ejemplo revisar las conexiones de cableado, el estado de las baterías, la fijación correcta de los objetivos (puntos de apoyo en campo). Es importante que cuando el equipo no se utilice, se mantenga almacenado en un lugar limpio y seco a una temperatura adecuada, ya que diferentes condiciones pueden conducir a la condensación en los espejos y superficies internas (Hetherington, 2009).

1.5 Nubes de puntos

Los sensores aéreos (ALS) y terrestres (TLS) envían pulsos de láser que regresan dispersos ya sea por la superficie del suelo, la vegetación o las construcciones, y registran la señal de retorno. Los lectores láser producen millones de puntos X, Y, Z, conocidos como nubes de puntos. Estos datos tridimensionales no están organizados en una cuadrícula o malla y tienen fronteras mal definidas similares a una nube de vapor de agua (Graham, 2008).

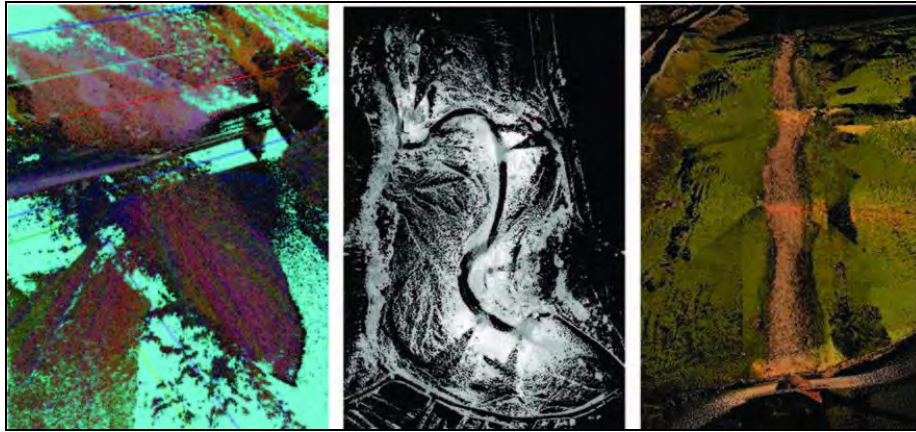


Fig. 16. Combinación de nubes de puntos (Heritage and Large, 2009).

Las nubes de puntos derivadas del escaneo láser representan la construcción de modelos digitales del terreno, con información precisa, detallada, y con una gran resolución (fig. 17). La reconstrucción visual de los objetos y la recreación matemática del terreno se llevan a cabo con software y equipo de cómputo especializados.

De acuerdo con Corsetti (2013), los escáneres láser pueden estar conectados a una PC portátil y a través de un software establecer la adquisición, archivo y pre-procesamiento de los datos recogidos. Sobre la base de los parámetros de ajuste, principalmente relacionados con el área de escaneado y la resolución espacial requerida, el instrumento adquiere la nube de puntos 3D en un lapso de tiempo y a una densidad de acuerdo con las características técnicas del instrumento utilizado. El software de adquisición crea un proyecto para cada conjunto de datos, que contiene información en bruto de cada escaneo, imágenes digitales, etc. También permite una etapa de pre-procesamiento para la eliminación del ruido y filtrado de datos erróneos. Después se lleva a cabo, la creación de un modelo sólido y la integración con otra información (mapeo de imágenes digitales).

Las nubes de puntos tienen la ventaja de ser capaces de codificar con precisión los datos desde un sensor que recoge información en un patrón no uniforme. La organización de nubes de puntos es muy común en los sistemas de información geográfica cuando los puntos individuales están conectados a través de puentes con puntos vecinos en una conformación triangular. Dicho formato se denomina Red Irregular de Triángulos (TIN) y puede ser capaz de representar con precisión el relieve (Graham, 2008).

Generalmente, la codificación contiene información acerca de los propios datos y por lo tanto se denominan *metadatos*. De esta manera, no es necesario especificar los valores individuales de cada posición x, y, puesto que se infiere a partir de la ubicación del punto en el archivo de datos (Graham, 2008).

Las nubes de puntos han hecho que sea muy eficiente y rentable el escaneo láser para recopilar una gran cantidad de datos sin tener que enviar tripulaciones al campo a recoger unos pocos puntos. A pesar de ello muchos sitios requieren varias exploraciones para un estudio más completo. Además, si las posiciones del escáner son planificadas con anticipación, se puede ahorrar tiempo en la adquisición de datos. Cuando varias exploraciones son necesarias, los análisis deben ser tratados en un sistema de coordenadas común (Hetherington, 2009).

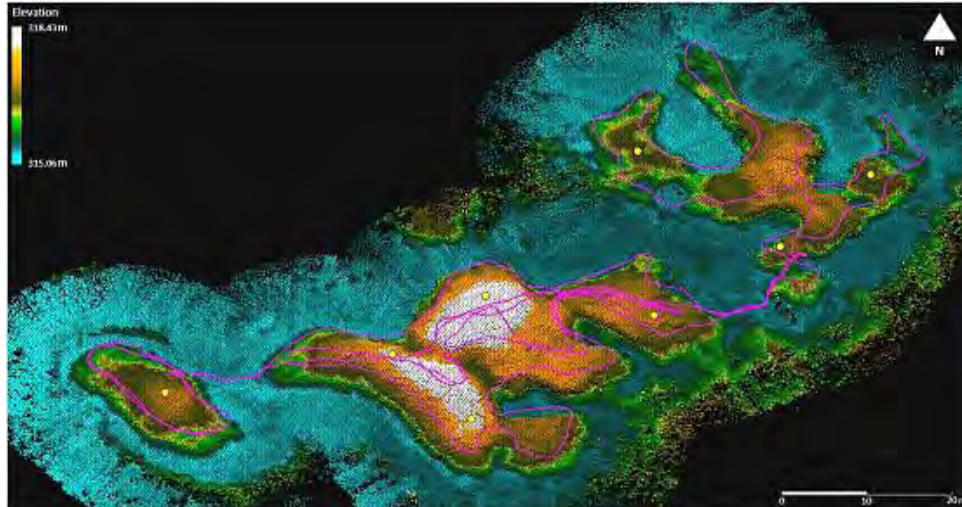


Fig. 17. Un modelo de elevación. La trayectoria del estudio esta representada por líneas purpura y las esferas de control por puntos amarillos (Kukko, 2013).

Según Chen y Medioni (1992), el registro de las nubes de puntos 3D a partir de la tecnología TLS contiene una serie de enfoques, cada uno con ventajas y desventajas. Como parte del tratamiento que requiere esta información se encuentra la alineación de nubes de puntos la cual consiste en un registro preliminar de puntos homólogos y una optimización de la alineación mediante un procedimiento Iterativo de Puntos Cercanos (ICP). También existe la alternativa de realizar un registro con TLS basado en características extraídas de una imagen generada a través de valores de reflectancia y que puede llegar a suplir el paso de la alineación por una grabación automática sin la ayuda de sensores externos y sin la necesidad de colocar marcadores en la escena (Makreshanski, 2010).

Una nube de puntos contiene una representación 3D de las superficies de los objetos muestreados en intervalos regulares fijos. Conjuntos de datos similares (2D o 2.5D) se adquirieron anteriormente por varios métodos, como RADAR (Radio Detection and Ranging), SONAR (Sound Navigation and Ranging) y sistemas de fotogrametría (Belton, 2008).

Los conjuntos de datos LiDAR tienen un alto grado de cobertura y se pueden reutilizar en una etapa posterior para buscar otras características que hayan quedado inconclusas en campo (Hodgetts, 2009).

Mientras que diferentes estrategias de muestreo pueden potenciar el efecto de redundancia de datos en la generación de DEM, es importante considerar que entre más datos utilizados puede ser mejor la representación del terreno u objetos (Heritage, 2009).

El diseño de un esquema de gestión de datos LiDAR depende del procesamiento de la información y el área de aplicación. La elección del formato de datos durante el procesamiento esta en función de las herramientas que han sido empleadas (Graham, 2008).

El post-procesamiento implica el control básico de los datos, la eliminación de puntos defectuosos, comprobación de la calibración, entre otros procedimientos. Por ejemplo, los procesos de filtrado se aplican comúnmente a los datos de ALS con el propósito de extraer retornos de onda del terreno. Por el contrario, la mayoría de los TLS solo adquieren una devolución por cada pulso emitido. Esta reducción de la forma de onda de la señal de retorno en un punto único, simplifica el registro de los datos de los TLS. En muchos casos, la medición de un punto puede estar relacionada con los objetos de la superficie que producen un retorno más prolongado que cualquiera de las señales que llegan al suelo. Sin embargo, aunque existe una menor probabilidad de derivar información del suelo a través de un pulso que primero golpeo a la vegetación, la resolución del TLS es en general más fina que los datos producidos por ALS (Graham, 2008).

La información del escaneo láser continúa creciendo en tamaño de conjunto de datos, cada vez se recogen datos a más altas densidades. Las nuevas tendencias, la recogida y el tratamiento de los datos de la forma de onda completa han contribuido al aumento del tamaño del conjunto de datos LiDAR, así como la disminución en el costo de la capacidad de memoria (Graham, 2008).

El análisis de la forma de onda completa permite la extracción de más información en comparación con los métodos clásicos de detección de pulsos análoga. Otras mejoras en la fiabilidad y la precisión pueden ser derivadas por métodos de procesamiento de las señales de forma de onda transmitida y recibida. Además, los atributos de la superficie se pueden derivar de una descripción paramétrica de la forma de onda; la amplitud máxima y la anchura del pulso pueden apoyar en la discriminación de la vegetación y los objetos hechos por el hombre (fig. 18). Sin embargo, la forma de onda de retorno se rige por la densidad relativa del objeto impactado y puede dar lugar a datos erróneos, en especial para el último retorno usado para detectar el nivel del suelo, ya que los umbrales pueden cruzar varias superficies antes de alcanzar la superficie sólida.

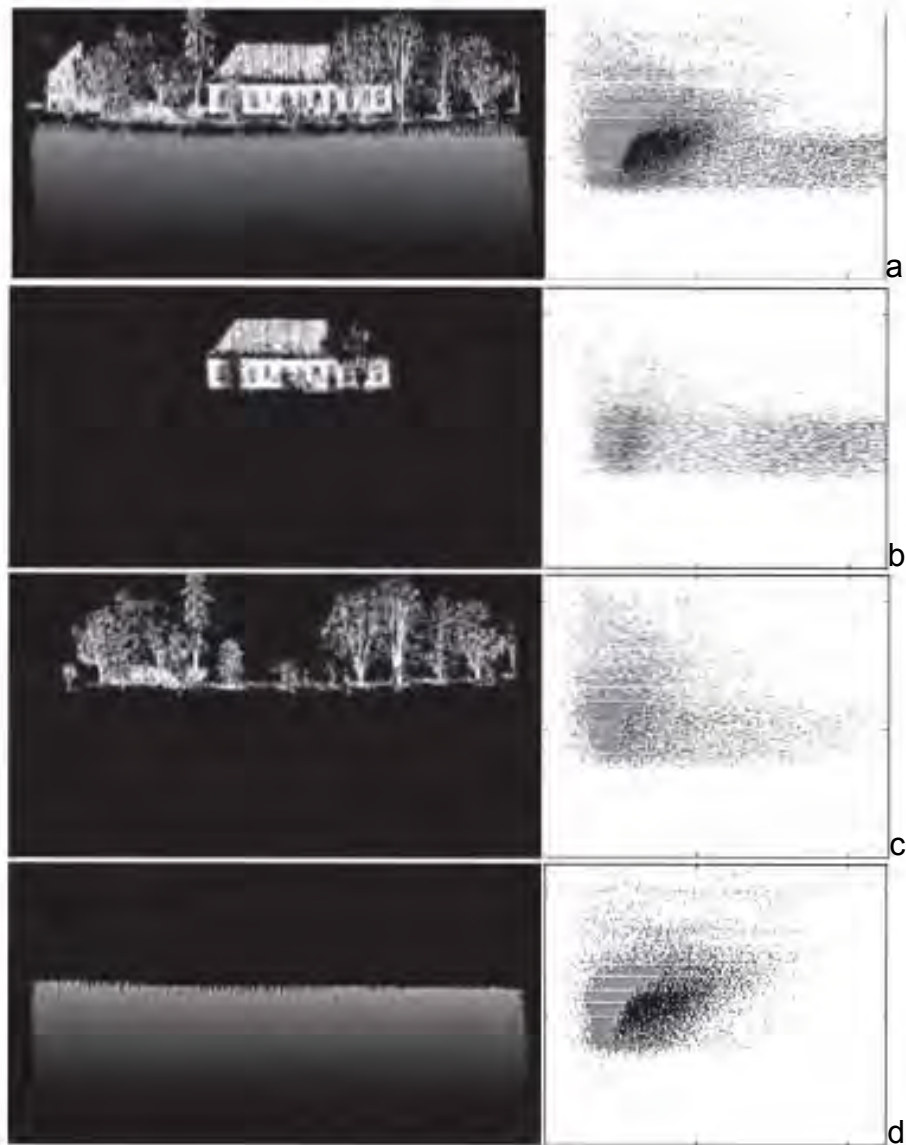


Fig. 18. Comparación de máxima amplitud con el ancho de pulso de los objetos seleccionados de la escena medida. (a) escena, (b) casa, (c) árboles, and (d) el prado (Stilla 2008).

1.6 Modelos Digitales de Elevación del Terreno (DEM)

El escaneo láser posee ventajas como las de construir Modelos Digitales de Elevación (DEM) o también conocidos como Modelos Digitales del Terreno (DTM), sin embargo, este tipo de información detallada requiere de equipos de cómputo de gran capacidad de memoria para poder manipular y realizar cálculos con los distintos tipos de mallas obtenidas durante la metodología.

La fotogrametría aérea y ALS son de los dos métodos más utilizados para la generación de DEM, incluidos los modelos digitales de superficie (DSM) que representan la altura, las estructuras y la cubierta vegetal (Stilla, 2008).

Según Pfeifer (2008), mientras los DEM pueden ser construidos a partir de datos del TLS con una descripción más detallada y precisa, solo se pueden aplicar en áreas pequeñas (1 km²), el ALS se ha utilizado para recoger la información topográfica en áreas de más de 10 000 km².

Una vez que los datos LiDAR han sido interpretados y analizados, se comienza el proceso de modelización (fig. 19). Las interpretaciones de los datos son exportadas a los sistemas de modelado donde las superficies son construidas en 3D (Hodgetts, 2009).

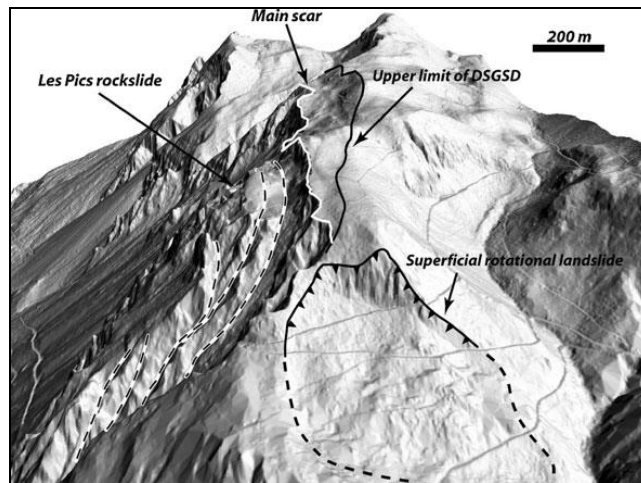


Fig. 19. Ejemplo de un Modelo Digital de Elevación derivado de LiDAR (Jaboyedoff , 2012).

Un modelo 3D se define como una nube de puntos que contiene cientos de miles de datos tridimensionales (coordenadas independientes x, y, z). Cada dato puede contener información acerca de la reflectividad de la superficie del objeto y/o color. Los modelos 3D no siempre representan al terreno desnudo, ya que la vegetación y otros objetos a veces solo en parte pueden ser filtrados (Sturzenegger, 2010).

La construcción de modelos es un proceso iterativo donde se muestran errores en los datos o se relevan vacíos de información importante. Según Hodgetts (2009), se pueden volver a revisar los datos LiDAR para comprobar las interpretaciones y llenar los huecos de información o utilizar un modelo para mejorar la comprensión de la superficie bajo estudio.

Para la construcción de un DEM, el primer paso es la generación de *datos secuenciales raster*. Los datos láser son clasificados dentro de células raster (mapa de bits o píxeles) que se definen por una rejilla o malla. Sofisticados algoritmos se aplican para obtener la información deseada debido a que la salida final de información debe tener solo un valor de píxel. La clasificación se lleva a cabo de

forma automática o semiautomática a través del software. Sin embargo, es necesaria la creación de parámetros de filtro para lograr un resultado óptimo (Wher, 2008).

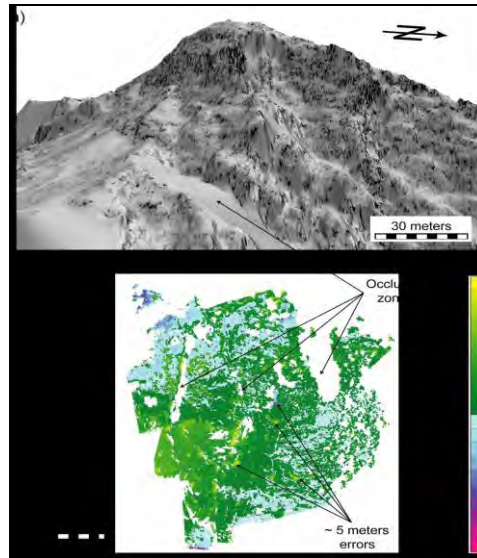
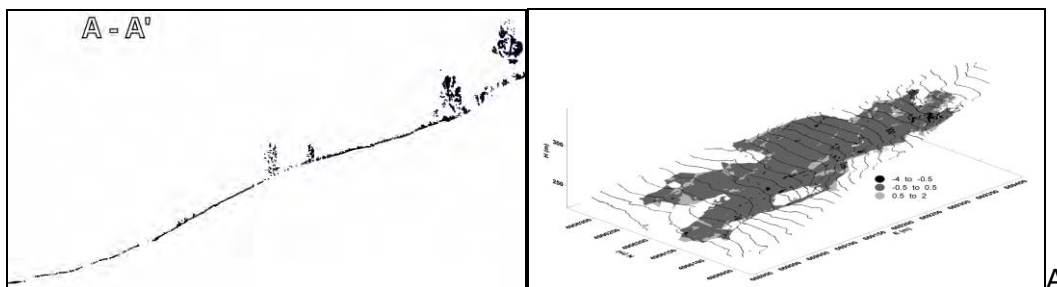


Fig. 20. Ejemplo de modelo compuesto 3D (Sturzenegger, 2010).

Una de las fases más importante para la construcción de modelos digitales es la capacidad de discriminar puntos del terreno (fig. 21). Estas tareas de edición oportunas (segmentación de datos) requieren de una parametrización explícita de la clasificación de algoritmos proporcionados por el software, siguiendo algunos criterios relacionados con el objeto y la superficie (Bitelli, 2002).

La definición de un conjunto de parámetros óptimos para la segmentación de datos necesita de un examen cuidadoso de las áreas de muestreo y algunas pruebas en diferentes situaciones morfológicas, diferentes materiales y distancias. Normalmente, esta elección es más general y reproducible para el escaneo aerotransportado (Bitelli, 2002).



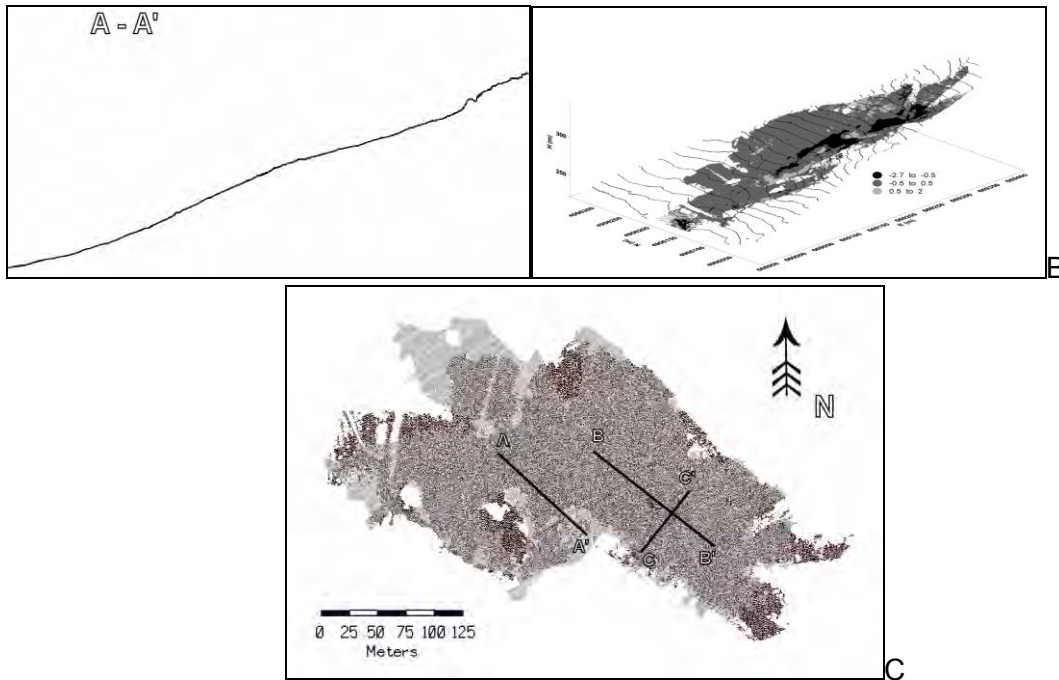


Fig. 21. Ejemplo de filtrado de datos de escaneo láser: A) Sección transversal A-A' antes de la filtración de datos; B) El mismo perfil después de la eliminación de la vegetación. C) Nube de puntos original con la ubicación de los perfiles (Bitelli, 2002).

Según Wher (2008), la parte que más tiempo consume en la producción de los DEM es la validación, ya que se tiene que comprobar la precisión.

La calidad de los modelos digitales del terreno depende de la altura y densidad de la vegetación dentro del margen de la huella. Para áreas bajo la cubierta forestal la calidad de filtrado no se ha investigado extensivamente (Pfeifer, 2008).

Según Pfeifer (2008), la calidad de un DEM derivado de escaneo láser tiene tres principales factores de impacto:

- (1) Calidad de las nubes de puntos
- (2) Calidad de la filtración
- (3) Calidad de la interpolación

La reconstrucción 3D del terreno con métodos de escaneo láser terrestre es una forma moderna de reproducir la superficie con alta precisión y automatización. A pesar de que los DEM son escasamente utilizados como herramienta para la investigación de deslizamientos, la morfología detallada proporcionada por estos, junto con información geológica puede permitir la predicción de zonas sensibles (Schulz, 2007).

El uso de DEM de ALS o TLS en los estudios de deslizamientos, se inició en el año 2000, a pesar de que algunos desarrollos surgieron en la década de 1960, los TLS se utilizaron más tarde debido a la falta de software para el procesamiento de datos en 3D y para el manejo de nubes de puntos (Jaboyedoff, 2012).

Estudios previos han utilizado geomorfometría basada en DEM para la delimitación de deslizamientos, evaluación del riesgo, interpretaciones estructurales y el análisis regional (Gritzner, 2001).

1.7 Reflectividad

La reflectancia o reflectividad de un objeto terrestre es una cuestión importante en términos de rendimiento de los sistemas de escaneo láser (fig. 22). Los valores de reflectancia se utilizan para generar una imagen panorámica de cada exploración (Makreshanski, 2010).

La reflectancia se define como la relación de la radiación incidente sobre una superficie particular y la radiación reflejada de ese mismo terreno, es decir, la cantidad de energía que regresa del rayo láser. Si la fuerza de las señales reflejadas es débil, el rango de las mediciones requeridas se reducirá ya que ninguna señal de retorno detectable llegará al receptor (Petrie y Toth, 2008).

Las propiedades reflectantes del objetivo o superficie de interés varían de acuerdo con la longitud de onda de la radiación que es emitida por el láser. La reflexión de la señal para un láser de medición de fase (CW) es similar a la del láser basado en pulsos, excepto que es continua. El haz transmitido golpea el objeto a medir y una pequeña parte de la señal se refleja de nuevo al instrumento donde la detecta un fotodiodo de silicio (Petrie y Toth, 2008).

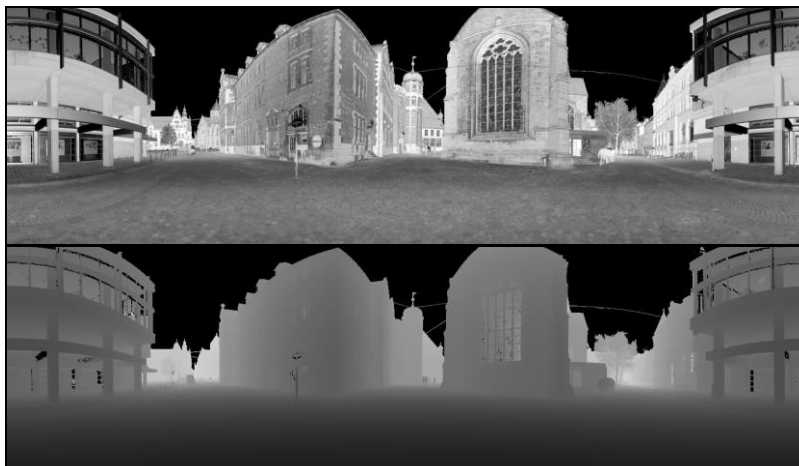


Fig. 22. Ejemplo de un par de reflectancias (Makreshanski, 2010).

Las superficies absorben ciertas partes del espectro electromagnético mientras que al mismo tiempo lo reflejan en diferentes longitudes de onda. El resultado de esta absorción y reflectancia son los colores de la luz visible (Heritage and Large, 2009).

Wher y Lohr (1999), han publicado una tabla basada en información de dispositivos láseres aéreos y terrestres, donde muestran la reflectividad típica (tabla 2). También se puede obtener más información sobre los efectos de las variaciones en la reflexión por parte de los diversos fabricantes de TLS, en particular con respecto a los rangos sobre los cuales se pueden hacer mediciones (Petrie and Toth, 2008).

TABLA 2. Reflectividad típica de varios materiales reflejantes en una longitud de onda de 900 nm.

Material	Reflectividad (%)
Lumber (pine, clean, dry)	94
Snow	80-90
White masonry	85
Limestone, clay	Up to 75
Deciduous tres	Typ. 60
Coniferous tres	Typ. 30
Carbonate sand (dry)	57
Carbonate sand (wet)	41
Beach sand; bare areas in desert	Typ. 50
Rough wood pallet (clean)	25
Concrete, smooth	24
Asphalt with pebbles	17
Lava	8
Black neoprene (synthetic rubber)	5

Source: From Wehr, A. and Lohr, U., *ISPRS J. Photogram. Rem. Sens.*, 54, 68, 1990. With permission.

De acuerdo con Heritage y Large (2009), es importante conocer el carácter emitido de la luz láser, ya que permite que las propiedades de objetos distantes se determinen a partir de los cambios de la energía de retorno del objeto de retrodispersión (fig. 23). Esto último se refiere a la reflexión de partículas o las ondas en la dirección de la emisión. Los dispositivos de retrodispersión son de los más utilizados en cuestiones ambientales.

Según Heritage y Large (2009) a la superficie que refleja radiación incidente en una sola dirección y cuyo ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia, se le nombra *especular*.

Las superficies especulares no regresan radiación en absoluto en la dirección de la fuente. Este tipo de reflexión se produce cuando la rugosidad de la superficie es más pequeña que la longitud de onda de la radiación incidente. En ambientes naturales dicha reflexión se encuentra en zonas acuosas sin gas y en terrenos vítreos (Heritage and Large, 2009).

Un segundo tipo de reflexión que es muy común en el entorno es la *lambertiana o difusa*, la cual es una variación de la reflexión especular cuya reflectividad es dependiente del ángulo de incidencia y la disposición de rugosidad en la superficie iluminada (Heritage and Large, 2009).

La reflexión difusa se produce cuando la superficie de rugosidad es mayor que la longitud de onda de la radiación incidente. De esta forma la luz es reflejada en todas direcciones (Heritage and Large, 2009).

En realidad, la mayoría de las superficies en ambientes naturales exhiben una combinación de los dos tipos de reflexión.

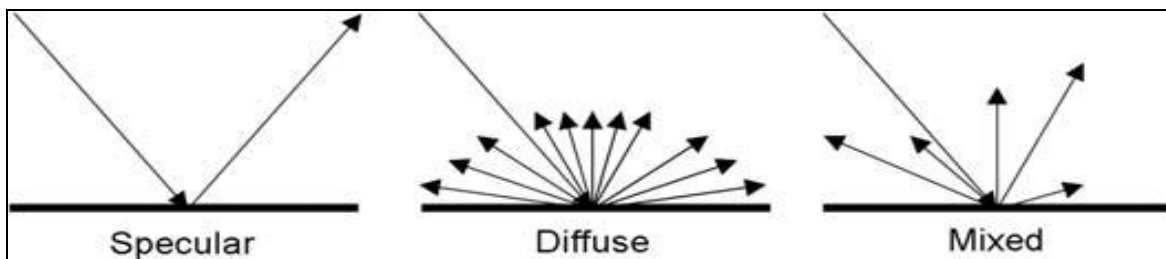


Fig. 23. Tipos de superficie de reflexión (Heritage and Large, 2009).

El pulso del láser es afectado por los objetos que golpea después de la emisión, una parte es absorbida y otra es dispersada en todas direcciones. Es el carácter de este pulso de energía devuelto, el que se utiliza para determinar ciertas propiedades del objeto reflejado, como por ejemplo el color, la textura y la distancia desde el escáner (Heritage and Large, 2009).

Con el propósito de examinar los efectos de superficies Boehler (2003), diseñó varias pruebas de reflectividad en base a la teoría de que los escáneres láser dependen de una señal reflejada por el objeto o superficie a la unidad receptora. Sus conclusiones fueron, que la fuerza de la señal devuelta es influenciada (además de la distancia, las condiciones atmosféricas y el ángulo de incidencia) por las capacidades reflectantes de la superficie (albedo); las superficies blancas producen fuertes reflejos mientras que las superficies oscuras tienen una débil reflexión. Además, las superficies brillantes no son fáciles de medir debido a que sus características no se difunden (Hetherington, 2009).

Boehler (2003), observó que las superficies de diferentes reflectividades resultan en errores sistemáticos en la medición. También sugirió, que otros errores se pueden esperar cuando un solo

objeto esta formado de diferentes materiales o su superficie esta revestida, y que esto puede evitarse si el objeto es recubierto temporalmente con un material único y consistente (Hetherington, 2009).

CAPÍTULO II. RESUMEN GENERAL DE LOS SISTEMAS LiDAR-TLS

LiDAR – Luz, Imagen, Detección y Alcance. A veces es deletreado como LiDAR (“i” minúscula) o LIDAR (“I” mayúscula) o lidar (todo en minúsculas). De manera resumida, es el radar láser.

El LiDAR es el término más común en las publicaciones. Se trata de un equipo de percepción remota utilizado para generar Modelos Digitales de Elevación (DEM) con gran precisión y alta densidad de puntos (Venegas, 2005).

La tecnología LiDAR se relaciona directamente con su capacidad para apoyar la ingeniería durante la planificación, el diseño, la construcción, y las fases de gestión de un proyecto.

El escaneo láser terrestre (TLS) es definido por Lichti (2008), como un sistema de imagen activa que recoge mediciones en una serie de incrementos horizontales y verticales del arco sobre un alcance de distancia que va desde un metro a un km.

2.1. Retrospectiva y estado de arte

El desarrollo de instrumentación láser, surgió del marco teórico establecido por Einstein (1917) derivado de la ley de Plank sobre radiación (Heritage and Large, 2009).

De acuerdo con Jaboyedoff (2012), el escaneo láser se ha desarrollado en dos formas basadas en la posición del sensor: aerotransportado (ALS) y terrestre (TLS).

Los primeros intentos de adquirir un conjunto de datos de la superficie terrestre por ALS se realizaron con solo un sistema inercial y otra técnica de posicionamiento para cartografía topográfica para la medición de la profundidad del agua y con fines de altimetría. Una de las primeras aplicaciones de ALS en ciencias de la tierra fue evaluar los cambios topográficos de la superficie congelada de Groenlandia (Krabill, 1999).

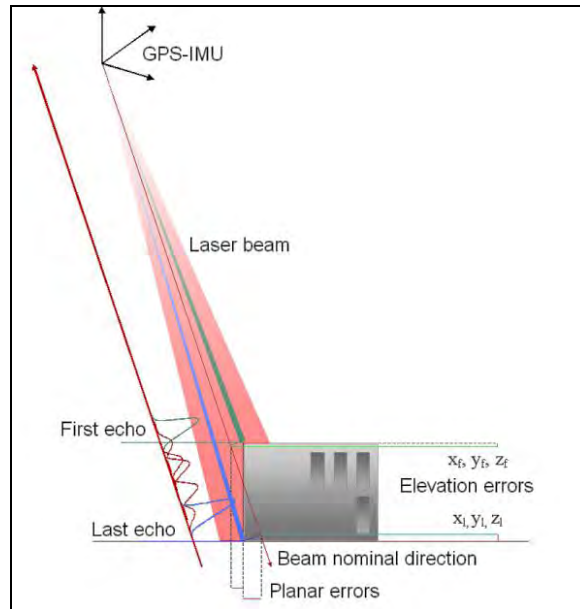


Fig. 24. Principio de la observación LiDAR (Kukko, 2013).

El TLS apareció más tarde que ALS a finales de la década de 1990. Éste instrumento es una evolución del medidor electrónico de distancia (EDM) y de la estación total, que se benefició de los desarrollos anteriores de ALS (Large, 2009).

El EDM se desarrolló durante la década de 1950 y comienzos de 1960 (Dallaire, 1974). Estos instrumentos permitieron una medición de distancias muy exacta. Sin embargo, estas mediciones de una sola dimensión no eran adecuadas para medir coordenadas 3D de los puntos individuales, además de que se requerían reflectores.

Las mediciones TLS incluyen información real 3D (coordenadas x , y , z), además de la intensidad y en algunos casos, formas de onda completa. En general, los equipos TLS son menos reflectores, lo que permite una amplia cobertura de la zona estudiada. Las primeras pruebas con aplicaciones en el ambiente se hicieron a finales de 1990 y a principios del siglo XXI (Lichti, 2000).

Se han realizado muchos estudios y aplicaciones sobre LiDAR. Estas recopilaciones han implicado que se describan los principios básicos y los fundamentos de telemetría por escaneo láser, su estado de arte, así como su tipología y métodos de recolección de datos. También han resaltado los métodos de procesamiento de datos y la información reciente registrada en diferentes áreas temáticas (Petrie and Toth, 2008).

Los principios básicos y el procesamiento de datos son temas de finales de la década de 1990. Una revisión completa de ALS se puede encontrar en Wehr y Lohr (1999). Una referencia actualizada es la de Shan y Toth (2008). En lo que corresponde a TLS se han realizado escritos para la

comprensión de los principios básicos en la última década. Por su parte Hiremagalur (2007), proporciona información útil sobre las normas y especificaciones para el control de calidad de diferentes equipos de TLS. También se encuentra una breve descripción de LiDAR y otras técnicas de teledetección convencionales aplicadas a la vigilancia de deslizamientos en Prokop y Panholzer (2009) y en Safeland (2010).

Derron y Jaboyedoff (2010), revisaron las bases de datos ISI Web of Knowledge and GEOREF, con la finalidad de analizar el crecimiento de la producción anual de publicaciones y citas relacionadas con LiDAR y ciencias de la tierra. El principal resultado fue que la comunidad de geocientíficos que han trabajado con técnicas de escaneo láser aporta un conocimiento innovador y práctico con gran potencial para los años subsecuentes al inicio de la investigación.

Uno de los estudios con mayor éxito sobre la evaluación de riesgos por deslizamientos a través del escaneo láser, fue realizado por el Servicio Geológico de EE.UU (USGS por sus siglas en inglés) en el Estado de Washington (Baum, 2005).

La posibilidad de adquirir información 3D del terreno con alta precisión y resolución espacial, ofrece nuevas opciones para investigar los fenómenos de deslizamientos. Sobre la aplicabilidad del escaneo láser en dichos procesos gravitacionales destacan autores como Carter (2001); Slob (2002); Haugerud (2003); y Hack (2004).

En la investigación de LiDAR-TLS sobre la inestabilidad de laderas, Jaboyedoff (2012) documentó una breve historia de las tecnologías de escáner láser en ciencias de la Tierra; una visión general de las técnicas de escaneo láser aplicadas a deslizamientos, caída de rocas y flujo de escombros. Estas aplicaciones las clasificó en: 1) detección y caracterización de los movimientos de masas, 2) evaluación del peligro y mapeo de la susceptibilidad, 3) modelado, 4) monitoreo.

Esta clasificación no solo se ha basado en el tipo de movimiento de masas descrito por Cruden y Varnes (1996), sino también en los procesos vinculados a estos fenómenos. El enfoque elegido para estudiar la inestabilidad de laderas depende en gran medida del objeto escaneado: desprendimientos, deslizamientos, flujo de escombros, etc.

Las aplicaciones en ciencias de la tierra y la geotecnia han sido propuestas por varios autores; Rosser (2005) resalta los beneficios de la información topográfica proporcionada por los estudios con TLS en comparación con la vista plana proporcionada por estudios aéreos tradicionales. Se enfatiza la importancia de estas técnicas en la cuantificación de la distribución espacial y magnitud de los eventos de caída de rocas asociadas con la erosión de acantilados costeros; Pesci (2007) hizo una demostración de la idoneidad de escaneo láser para el monitoreo de variaciones morfológicas rápidas y cambios físicos de los volcanes; Nagihara (2004) aplicó el TLS para caracterizar la morfología de las dunas de arena; Teza (2007, 2008); Monserrat y Crosetto (2007) detallaron metodologías para medir desplazamientos de deslizamientos y campos de deformación, en base a la gran cantidad de información espacial densa y precisa proporcionada por las técnicas de teledetección terrestre; Bellian (2005) utilizó el TLS para el modelado estratigráfico y Enge (2007)

para la construcción de modelos acerca de depósitos de petróleo. Abellán (2006) integró el TLS en el proceso de evaluación del riesgo de caída de rocas, haciendo hincapié en la recopilación de información más exacta sobre la geometría de juntas, ubicación y volumen de bloques, y la trayectoria de la caída de rocas, etc.

Las técnicas de teledetección ofrecen nuevas formas de investigar los deslizamientos a través de información 3D del terreno, alta resolución espacial, avances en electrónica de sensores y procesamiento de datos (fig. 25). Antes de la existencia de técnicas de teledetección como el LiDAR, RADAR y Fotogrametría, el monitoreo de deslizamientos se basaba en las mediciones de un solo punto a través de GPS o estaciones totales.

La forma tradicional de estudiar el territorio con fines de detección de deslizamientos, se ha realizado con fotogrametría aérea y en algunos casos con fotogrametría terrestre, que permiten realizar modelos 3D del terreno y por medio de comparaciones de modelos digitales se llevan a cabo estudios multi-temporales.

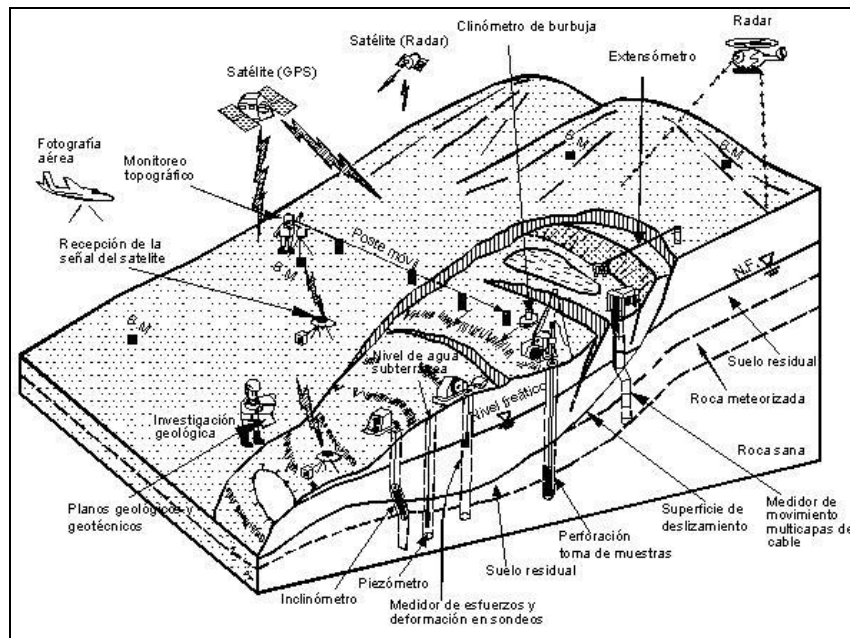


Fig. 25. Instrumentación y monitoreo de deslizamientos (Suárez, 1998).

La Interferometría (InSAR) y LiDAR, han sido de las principales técnicas de teledetección en la investigación de deslizamientos. La primera es principalmente terrestre y satelital y se ha centrado en la detección y cuantificación de pequeños desplazamientos. La segunda proporciona nubes de puntos de alta resolución sobre la topografía del lugar y se aplica en la cartografía de la dinámica de los procesos gravitacionales (Jaboyedoff, 2012).

Los estudios de deslizamientos, tradicionalmente se habían hecho con métodos fotogramétricos, que requerían instrumentos caros (cámaras aéreas métricas, escáneres fotogramétricos, estaciones digitales de trabajo o plotters) y un marco de organización complejo (Bitelli, 2002).

Las técnicas de teledetección terrestres incluyendo la fotogrametría digital y el escaneo láser, representan complementos útiles para el mapeo de campos convencionales y caracterización de discontinuidades de masas rocosas. En consecuencia, su incorporación en investigaciones de estabilidad de laderas y proyectos de diseño ha sido relevante los últimos años (Sturzenegger, 2010).

Hetherington (2007) ha documentado como un TLS se puede utilizar para mapear y monitorear procesos geomorfológicos complejos.

Los escáneres láser han aumentado su eficiencia de manera exponencial en comparación con el estado de arte de la técnica hace más de una década. Más datos se pueden adquirir y una mayor precisión se puede lograr. En el presente, algunos campos de investigación, como la geomorfología han creado sus propias metodologías (Romanescu, 2012).

El potencial del TLS ha sido demostrado por Feng (2004), Trinks (2006) y Redfern (2007). La integración de datos de teledetección terrestre en el análisis de estabilidad de laderas rocosas y diseño de pendiente se han llevado a cabo por Strouth (2006), Mathis (2007), entre otros.

Una visión general de los diferentes métodos con sus limitaciones y beneficios se describe en Schulz e Ingensand (2004). Otras discusiones sobre el escaneo láser se pueden encontrar en Gordon (2005) y Mechelke (2007).

En México ha sido escasa la utilización de la tecnología LiDAR, sólo algunas empresas e instituciones académicas y de gobierno la trabajan. Entre ellas destaca el INEGI, que la emplea por su exactitud y versatilidad en infraestructura de comunicaciones, procesos de urbanización y áreas de riesgo, así como, en proyectos que tienen que ver con los recursos naturales.

Los diferentes escáneres láser ofrecen niveles variables de precisión y fiabilidad. Hasta ahora hay mayor cantidad de textos sobre ALS o vuelos LiDAR. No obstante el escaneo láser terrestre (TLS) ha tenido gran relevancia en la última década y cada vez se escriben más artículos sobre sus características y aplicaciones, por ejemplo: comprensión de los principios básicos de TLS, de Petrie and Toth (2008); uso de TLS en los proyectos del departamento de transporte de California, de Hiremagalur (2007), por citar algunos.

Los TLS fueron desarrollados originalmente por la compañía IQvolution, con sede en Alemania, que posteriormente compró a la empresa FARO en 2005.

2.2 Escáner Láser Terrestre (TLS)

Los instrumentos LiDAR se basan en los principios de luz láser, la cual se genera a través de la excitación de átomos y su posterior emisión de energía en forma de fotones. Mientras que la luz natural se emite a lo largo de trayectorias aleatorias en distintas longitudes de onda y sin ninguna fase de correspondencia, la luz láser es coherente debido a que se emite en una sola dirección como miles de millones de fotones individuales con una frecuencia de energía y fase bien definida (Heritage and Large, 2009).

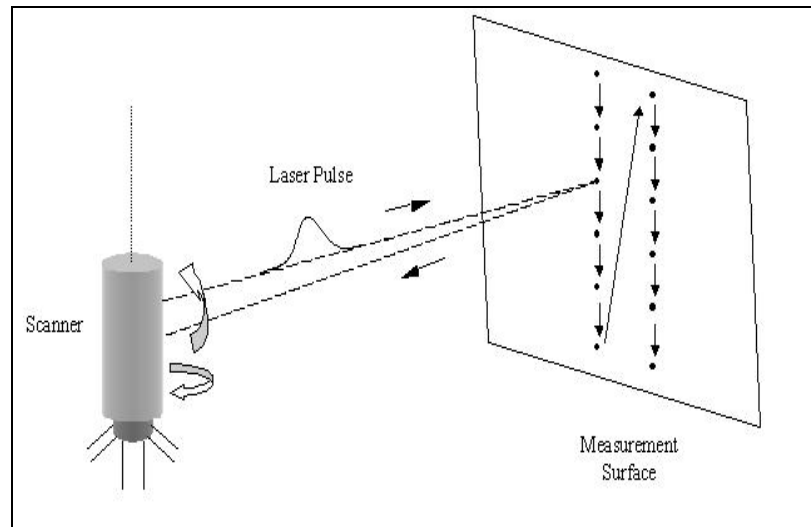


Fig. 26. Diagrama de un escáner láser muestreando una superficie a través de pulsos (Belton, 2008).

El escáner láser terrestre es un instrumento relativamente nuevo que recopila de forma masiva puntos de la superficie terrestre en 3D con alta velocidad y precisión. El TLS comenzó a ser utilizado en la década de 1990 para la navegación del robot móvil (Hancock, 1998), en la construcción de modelos 3D de esculturas (Beraldin, 2000) y aplicaciones industriales (Sequeira, 2003). Dado el rápido desarrollo de la tecnología, se ha mejorado continuamente la distancia máxima del láser. Esto se ha visto acompañado por un aumento en las solicitudes del TLS, para el cálculo de los modelos 3D de grandes superficies (arquitectónicas, arqueológicas y topográficas) y, recientemente, la caracterización y el control de las amenazas naturales, por ejemplo, volcanes (Hunter, 2003), y en deslizamientos (Rowlands, 2003 y Bitelli, 2004).

Bornaz y Rinaudo (2004) documentaron como los TLS pueden ser considerados como estaciones totales motorizadas altamente automatizadas. A diferencia de las estaciones totales cuyo usuario elige los puntos a ser analizados, los TLS adquieren aleatoriamente un conjunto denso de puntos.

Según Large (2009), esta surgiendo una segunda revolución en la investigación y supervisión del entorno físico. La primera revolución tuvo que ver con el desarrollo del láser rubí en la década de

1960. En las décadas posteriores se introdujeron equipos portátiles precisos y resistentes (instrumentos EDM), lo que permitió la representación de grandes extensiones de terreno.

Los escáneres láser son capaces de determinar las coordenadas 3D de objetos complejos con alta precisión y densidad de puntos. Sin embargo, el uso de la tecnología se mantiene en un nivel relativamente bajo debido al costo del instrumento y el software asociado (Heritage and Large, 2009).

Según Petrie y Toth (2008), el pleno aprovechamiento de las potencialidades y capacidades del LiDAR se encuentra en los métodos de procesamiento de datos. Durante la última década han tenido lugar muchos acontecimientos importantes sobre el escaneo láser, resultado de la investigación multidisciplinaria, que incluye a la computación, la infografía, ingeniería eléctrica, fotogrametría, entre otras.

De acuerdo con Lim (2009) un resumen de importantes estudios que han empleado el TLS en entornos naturales (se muestra en la tabla 3).

Tabla 3. Lista no-exhaustiva de aplicaciones de las técnicas de teledetección terrestres sobre rasgos naturales o ingenieriles.

Publication reference	Technique used	Brief description of the application
Hunter et al. (2003)	TLS	Volcano activity monitoring
Nagihara, et al. (2004)	TLS	Characterization of the morphology of sand dunes
Rosser et al. (2005)	TLS/TDP	Quantification of rock fall volume and distribution on coastal cliffs
Bellian et al. (2005)	TLS	Creation of stratigraphic models
Tannant et al. (2006)	TDP	Surveys in open-pit mine environment
Milan et al. (2007)	TLS	Channel morphological change assessment in a proglacial river
Enge et al. (2007)	TLS	Generation of petroleum reservoir models
Pesci et al. (2007a and 2007b)	TLS	Generation of integrated TLS and airborne digital photogrammetry DEM of a volcano; volcano deformation monitoring
Deline et al. (2008)	TLS	Monitoring of permafrost-related rockfall activity
Jaboyedoff et al. (2009)	TLS	Characterization of retrogressive landslides in sensitive clay and rotational landslides in river banks
Franceschi et al. (2009)	TLS	Discrimination between marls and limestones using intensity data from TLS
Armesto et al. (2009)	TLS	Determination of the geometry of a granite boulder
Lato et al. (2009)	TLS	Monitoring of rockfall hazards using mobile terrestrial LiDAR

Existe una divergencia entre el uso del TLS en gran variedad de aplicaciones y la manera en que se aplican nuevos enfoques de medición. Los TLS están continuamente en evolución en busca de

convertirse en una práctica estándar para la grabación de topografía compleja (fig. 27). Según Lim (2009), se necesita un cambio de énfasis del TLS como método de adquisición de datos. Lo ideal sería su uso dentro de un protocolo de estudios con el propósito de lograr su máximo potencial, en particular con el procesamiento de la información.



Fig. 27. Comparación de varios escáneres laser en Mechelke (2007). De izquierda a derecha: Trimble GX (Trimble, 2008), Leica ScanStation (Leica Geosystems HDS, 2008), FARO LS 880 (FARO, 2008) and Z+F IMAGER 5006 (Zoller+Frohlich, 2008).

Es evidente que el TLS no proporciona una respuesta completa a las necesidades de los proyectos topográficos, ya que para reforzar su eficiencia se requiere la combinación con otras tecnologías.

En los últimos años el TLS se ha convertido en un método estándar de adquisición de datos 3D, junto con métodos ya establecidos, como taquimetría, fotogrametría y GPS (Alkan, 2012).

2.3 Principio de medición

El TLS es una tecnología relativamente nueva, mediante la cual la geometría de un objeto o superficie se puede medir de forma automática, sin la ayuda de un reflector, con velocidad y precisión muy por encima de las soluciones clásicas. El TLS registra los puntos tridimensionales a través de la medición de ángulos verticales y horizontales, así como la distancia a cada punto. El uso del escáner 3D utiliza elementos de la metodología de la estación total. En caso de que la morfología del objeto escaneado sea compleja, se utilizará más de un punto. En caso de que las superficies sombreadas no fueran alcanzadas por el rayo láser, el software adquiere automáticamente tales áreas y luego las integra al objeto analizado. El proceso se basa en el registro de distancias y ángulos, y los datos producidos de este modo se utilizan para calcular las coordenadas de los puntos (Romanescu, 2012).

El escaneo láser ha sido concebido para adquirir directamente y con gran precisión superficies digitales. La información de posición derivada de los sistemas LiDAR se basa en el cálculo de alcance de la unidad láser al espacio de objetos. Además de los datos de posición, también se registra la intensidad de la señal de eco por la mayoría de los escáneres láser. Sin embargo, todavía

es difícil que puedan derivar información semántica con respecto a las superficies extraídas (tipo de material y estructuras observadas). Se espera que la integración de datos de fotogrametría y LiDAR mejoren el contenido semántico y darán un plus para el control de calidad de las superficies escaneadas (Habib, 2008).

Los instrumentos LiDAR constan de 3 componentes básicos: la unidad láser que incorpora un transmisor, un mecanismo reflector opto-mecánico y una unidad receptora/grabadora (fig. 28). En el caso de ALS y algunos escáneres terrestres móviles también son necesarios sistemas de posición/navegación (Heritage and Large, 2009). Adicionalmente, los sistemas LiDAR modernos pueden adquirir imágenes de intensidad sobre el área escaneada.

Los pulsos de luz láser emitidos desde la unidad láser a través del mecanismo reflector opto-mecánico viajan desde el instrumento a un objeto lejano. Parte de la energía puede reflejarse de vuelta a la unidad de grabación para que se analice la forma de onda y se puedan determinar las características del objeto y la ubicación (Heritage and Large, 2009).

Los escáneres terrestres generalmente tienen un láser que gira en el plano vertical mientras que un espejo sobre el láser oscila en el plano horizontal para proporcionar mediciones en un campo de vista definido. La salida de información es en general un conjunto de tres mediciones de la posición de un punto en relación al escáner. La velocidad de exploración varía entre los modelos de escáneres. Una consideración principal es que los datos derivados del escaneo láser son una serie de observaciones no estructuradas, un gran número de mediciones individuales que forman una nube de puntos en tres dimensiones (Charlton, 2009).

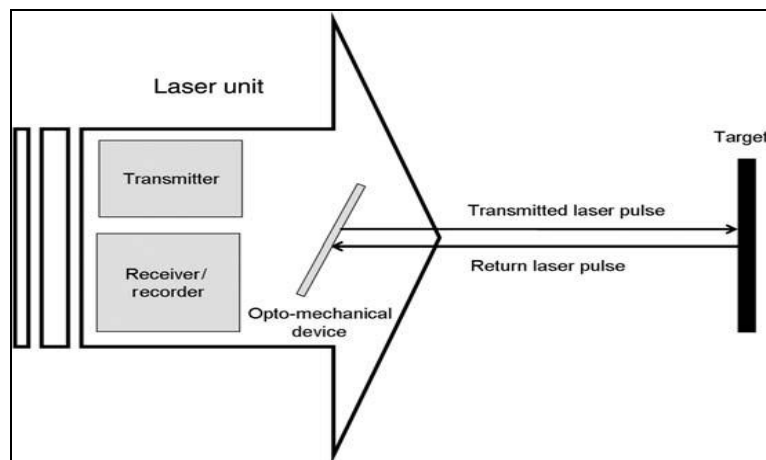


Fig. 28. Componentes básicos de un instrumento LiDAR (Heritage and Large, 2009).

Según Wher (2008), para realizar un estudio fiable, se debe considerar todo un sistema LiDAR más no un dispositivo aislado, ya que el resultado de la campaña de escaneo son las mediciones láser geo-codificadas.

El TLS genera varias nubes de puntos, con coordenadas locales e información adicional (intensidad de luz en el haz reflejado, y los valores RGB obtenidos de una cámara externa o interna). Las nubes de puntos, después de haber sido registradas desde diferentes posiciones, pueden ser fusionadas para obtener un modelo completo del objeto analizado (fig. 29). Este procedimiento se llama registro y consiste en la fusión de nubes de puntos a través del uso de puntos de amarre-reflexión, especialmente contruidos y entregados por el fabricante, y que son reconocidos automáticamente por el escáner cuando se realiza un análisis muy fino (Romanescu, 2012).

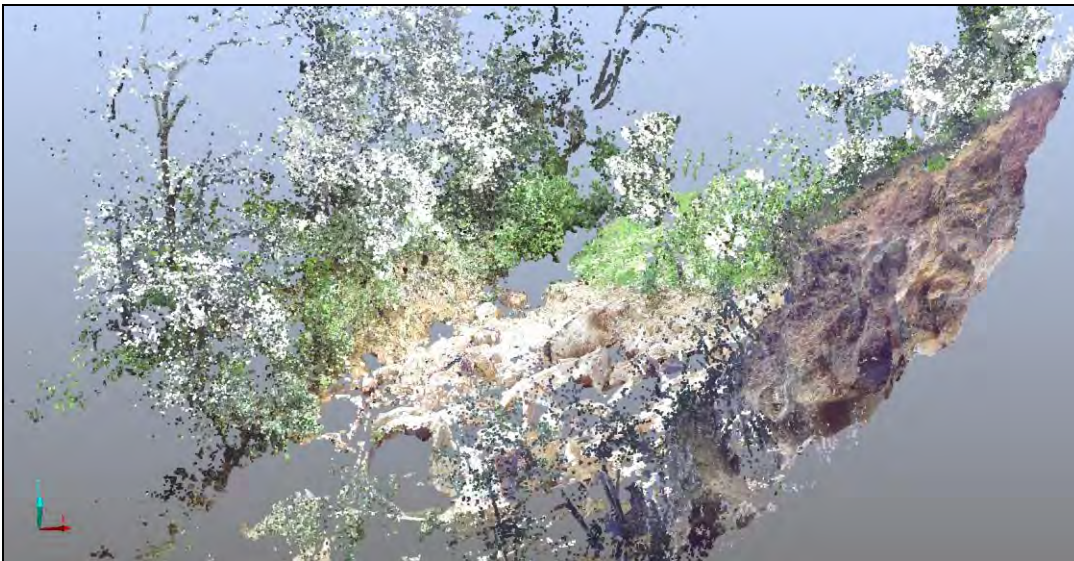


Fig. 29. Fusión de varias nubes de puntos.

El TLS está limitado físicamente por la naturaleza del objeto escaneado y su orientación relativa al escáner. El proceso de medida se basa en la suposición de que toda luz emitida se refleja de la superficie del objeto al sensor. En realidad, el haz de láser estará sujeto a la dispersión y absorción. Los parámetros que controlan la dispersión son la orientación de los objetos, en relación con la línea de visión del escáner (ángulo de incidencia), y la rugosidad del objeto. Si el objetivo no es completamente liso y perpendicular al sensor, parte de la luz emitida se pierde, es decir, que no se refleja en el sensor (Sturzenegger, 2010).

La calibración de LiDAR está limitada por el criterio del fabricante. Los sistemas de escaneo láser son generalmente vistos como cajas negras que carecen de procedimientos de calidad bien

definidos. Según Habib (2008), la actividad más importante en la garantía de la calidad es la calibración del escáner.

La metodología de escaneo tradicional es utilizar mediciones en cierto número de objetivos en común (reflectores). Esto permite que varias campañas de escaneo puedan ser relacionadas entre sí (engranaje).

Maquinas más modernas (Optech ICRIS-3D) no requieren objetivos reflectores, ya que memorizan las características comunes para permitir el engranaje de los escaneos.

Tabla 4. Muestra de la maquinaria láser sobre la evolución de los escáneres terrestres desde 1998.

Date	Machine	Emphasis	Data collection rate
Pulse scanning			
1998	Leica Cyrax 2400	Long range, high precisión	100 points sec ⁻¹
2001	Leica Cyrax 2500	Long range, high precision	1000 points sec ⁻¹
2005	Trimble GX	Short range	5000 points sec ⁻¹
2004	Leica HDS3000	Long range, high precisión	2000 points sec ⁻¹
2006	Leica ScanStation	Long range, high precision	4000 points sec ⁻¹
2006	Optech ICRIS – 3D	Long range (up to 1 500 m)	2500 points sec ⁻¹
2006	Optech CMS	Short range	100, 000 points
2007	Leica ScanStation 2	Long range, high precisión	50,000 points sec ⁻¹
2007	Riegl LMSZ390i	Short range	Up to 11,000 points
2007	Riegl LMSZ420i	Long-range	11,000 points sec ⁻¹
2007	Riegl LMSZ210ii	Short-range	Up to 10,000 points
Phase scanning			
2004	Leica HDS4500	Short range, high speed	250,000 sec ⁻¹
2006	Leica HDS6000	Short range, high speed	500,000 points sec ⁻¹

Source: Large and Heritage (2009).

El método de fase produce una serie de mediciones sucesivas de distancia a una velocidad muy alta y con gran exactitud, aunque solo en algunas decenas de metros. En cambio, el tiempo de vuelo (TOF) basado en el método de pulso de ALS permite medir distancias mucho más largas (cientos de metros) pero a una menor precisión en comparación al método de medición de fase (fig. 30 y 31).

Los TLS ya sea montados en vehículos o trípodes, tienen la gran ventaja de proporcionar los detalles para la producción de modelos realistas en 3D. Los datos derivados de los TLS complementan la información obtenida por ALS. Esta combinación de métodos aéreos y terrestres es cada vez más común, por ejemplo para producir modelos 3D de ciudades (Bohm y Haala, 2005).

2.4 Clasificaciones

Existen diferentes tipos de escáneres láser que pueden distinguirse en base a su aplicación. Los escáneres láseres terrestres se llevan a cabo en rangos de entre 0 y 200 m, y son típicamente realizados desde una ubicación fija en el suelo.

La disponibilidad y variedad de los TLS se ha incrementado notablemente desde su empleo generalizado en la década de 1990. Lemmens (2007) informó sobre los resultados de una revisión de una gran gama de TLS disponibles en el mercado; los clasificó y los definió según sus atributos. El mismo autor, sugirió que una de las más importantes características de los TLS son sus respectivos rangos, ya que controlan en gran medida la aplicación de un escáner.



Fig. 30. Fotografía de una estación maestra de un sistema de monitoreo. Se muestra un TLS de largo alcance (Bertacchini, 2012).

Independientemente del potencial de medición (corto, mediano y largo alcance), los TLS también pueden ser clasificados en base a la forma en que funcionan técnicamente.

Fröhlich y Mettenleiter (2004) consideraron que la clasificación de propiedades y especificaciones técnicas de los TLS son de gran utilidad ya que indican sus posibilidades de rentabilidad. Como por ejemplo:

- La velocidad de exploración y frecuencia de muestreo
- Campo de visión
- Resolución espacial, es decir, el número de puntos escaneados en el campo de visión

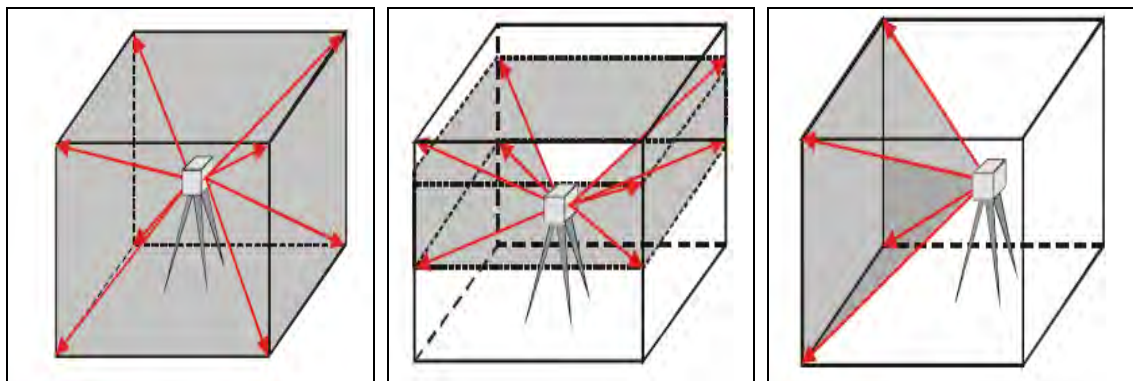
- Precisión del punto
- Posibilidades de combinación con otros dispositivos que se puedan montar en el escáner (cámaras digitales, GPS).

Desde el desarrollo del primer escáner láser terrestre en 1999, la tecnología de escaneo ha tenido una fase continua de desarrollo de productos (Large and Heritage, 2009).

Los primeros escáneres de pulso se enfocaron en la larga distancia, mientras que las generaciones posteriores se concentraron en la velocidad de la adquisición de datos y las distancias cortas. La capacidad de posicionar objetos con precisión a gran velocidad implica la producción de una gran cantidad de datos, los cuales son referidos comúnmente como “nubes de puntos” y que pueden proporcionar una visualización 3D del objeto de interés (Large and Heritage, 2009).

Los TLS se pueden clasificar en función de sus principios de medición, que incluyen la triangulación, medición de fase o tiempo de retardo. Sin embargo esta clasificación de los TLS que se utiliza para determinar distancias no toma en cuenta la acción de escaneo angular que se utiliza para garantizar la cobertura requerida de los objetivos o puntos de interés. Según Petrie y Toth (2008) es importante contar con una clasificación secundaria que cuente con el mecanismo de exploración y el patrón o cobertura que este produce sobre la superficie.

De acuerdo a la clasificación de Staiger (2003), se pueden distinguir tres tipos de escáneres terrestres: 1) los escáneres de tipo panorámico; 2) escáneres híbridos y; 3) escáneres con cámara.



Panoramic scanner Hybrid scanner Camera-scanner
Fig. 31. Tipos de unidades de deflexión del haz de láser utilizados en los TLS (Reshetnyuk, 2009).

Los principios de medición de pulso y fase se llevan a cabo en los TLS de corto alcance con un máximo de rangos de 50-100 m. Estos instrumentos pertenecen a la categoría de escáneres panorámicos y pueden ser utilizados en espacios interiores y exteriores.

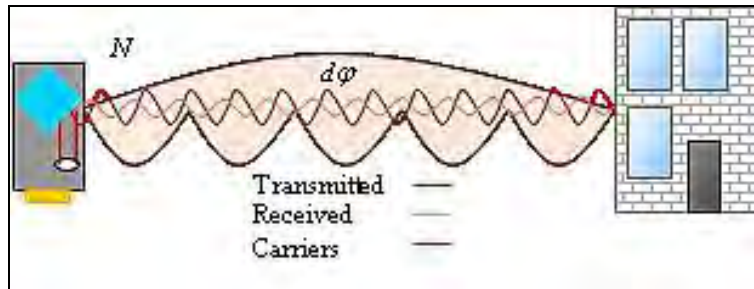


Fig. 32. Método de fase (Kukko, 2013).

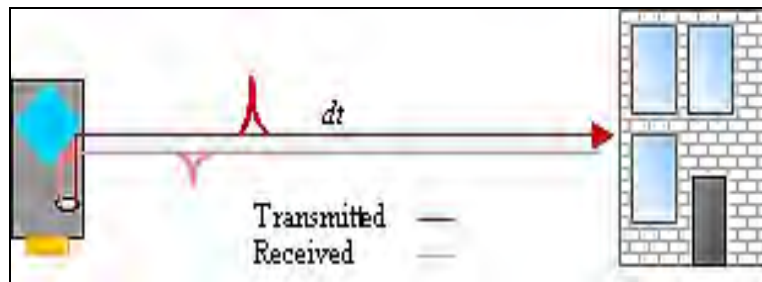


Fig. 33. Método de pulso (Kukko, 2013).

El escáner panorámico realiza mediciones angulares y de distancia en un patrón sistemático que da un total de 360° de cobertura angular en el plano horizontal y una cobertura mínima de 180° en el plano vertical.

Un mayor campo de visión vertical (FOV) de 270° significa que la cobertura de la superficie situada por debajo del instrumento en el plano horizontal se puede lograr. De hecho, el único hueco o vacío en la cobertura se encuentra en la base del escáner y su trípode. Este patrón de escaneo panorámico es muy útil en el contexto de la cartografía y en el estudio de instalaciones industriales complejas como minas a cielo abierto y fachadas de edificios en zonas urbanas, interiores de iglesias, entre otros.

Los escáneres híbridos, son aquellos cuya acción de exploración no tiene restricciones en torno a su eje de rotación. Sin embargo, el movimiento de escaneo vertical y angular es limitado $50-60^\circ$. Esto refleja la situación que comúnmente se encuentra en el escaneo láser de mediano y largo alcance realizado para mapas topográficos donde no hay requisito para medir objetos en ángulos pronunciados.

Los escáneres de tipo cámara llevan a cabo su medición angular y de distancia en un rango más limitado y con un campo de visión vertical muy específico. Normalmente las limitaciones en el rango de estos instrumentos (50-60 m) son compensadas por las muy altas precisiones que alcanzan sus mediciones, a menudo de pocos milímetros, esto en el caso de los escáneres que utilizan el principio de medición de fase. En cambio, otro grupo de escáneres basado en pulsos puede medir mayores rangos (150-350 m) aunque con reducida precisión. Por lo tanto, la ganancia en el rango esta acompañada por una reducción en la precisión.

También existen equipos de TLS de mediano y largo alcance, además de escáneres que son montados en vehículos y los escáneres terrestres dinámicos.

CAPÍTULO III. APLICACIONES DEL LiDAR-TLS EN TEMÁTICAS GEO-AMBIENTALES

El escaneo láser ha sido aplicado a una amplia variedad de ámbitos: gestión forestal, cartografía de llanuras de inundación, monitoreo de deslizamientos, identificación de peligros, entre otras. Esta tecnología funciona a través de la triangulación láser, cambio de fase o tiempo de vuelo y se puede utilizar desde una unidad aérea o terrestre. Ambos enfoques tienen limitaciones geométricas dependiendo de la ubicación del escáner. Pero en general, ALS se ha utilizado para recoger conjuntos de datos de baja densidad para áreas grandes como el modelado topográfico, mientras que el TLS se ha aplicado para la adquisición de objetos de corto y mediano alcance (hasta 250m) en los cuales se necesita una mayor precisión.

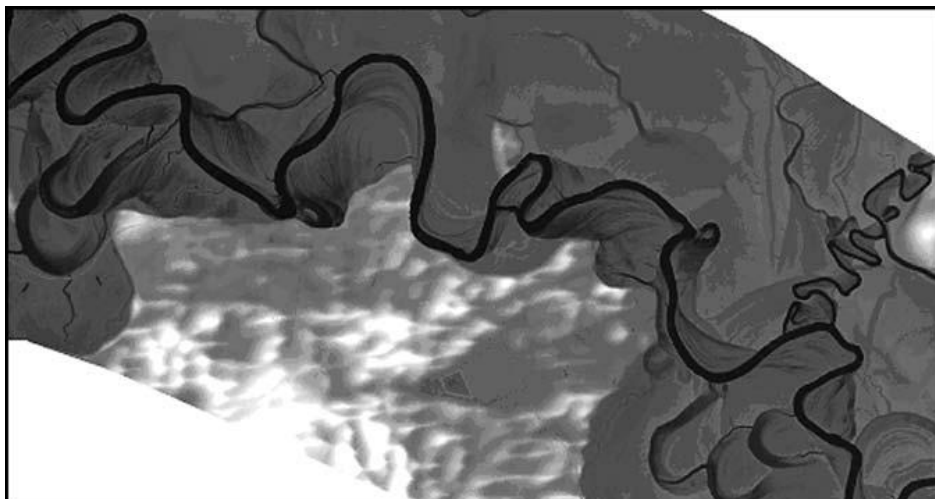


Fig. 34. Elevaciones LiDAR (oscura = baja, brillante = alta) cerca del empalme de los ríos Murray y Murrumbidgee (Overton, 2009).

El desarrollo tecnológico ha reducido considerablemente las limitaciones de los sistemas TLS en cuestiones como la velocidad de adquisición de datos, resolución espacial y angular, errores en el rango y medidas angulares, y el volumen de datos. Esto también ha llevado a reducir los costos generales de TLS que se ven reflejados en nuevas aplicaciones.

Algunas de las aplicaciones incluyen: deformación estructural (Gordon, 2003), modelado de plantas industriales (Staiger, 2002), arquitectura marítima (Bishop, 2007), grabación y catalogación de sitios con patrimonio cultural e histórico (Abmayr, 2005), mapeo de deslizamientos (Ono, 200), construcción de fachadas y ciudades virtuales (Boulaassal, 2007), etc.

El escáner láser es una gran opción para problemas de complejidad, velocidad, seguridad o la reducción del acceso y visibilidad. Los datos recogidos proporcionan un registro permanente que puede ser utilizado en futuros proyectos. El uso del escáner láser terrestre (TLS) y LiDAR

aerotransportado (ALS) se pueden fusionar con datos CAD y de SIG, para crear un conjunto de datos muy detallado y exhaustivo.

Existen innovadoras formas en que se implementa la tecnología de escaneo láser (www.topconpositioning.com). A continuación algunos ejemplos:

1. Documentación digital de la ciudad más poblada de Virginia Occidental.
2. Modernización de instalaciones de alimentos y bebidas.
3. La mejora de las capacidades forenses.
4. Construcción de animaciones forenses.
5. Reparaciones en túneles ferroviarios.
6. Reconstrucción de fósiles de dinosaurios

3.1 Aplicaciones en procesos gravitacionales

En los últimos años las técnicas de TLS y ALS se han convertido en herramientas fundamentales en la evaluación de inestabilidad de laderas, ya que proporcionan datos detallados, homogéneos y precisos de forma remota, lo que permite rápidas y seguras mediciones (Viero, 2010).

Los procesos gravitacionales o de remoción en masa cobraron mayor importancia a nivel mundial en las tres últimas décadas del siglo XX, debido al considerable incremento en los daños y desastres relacionados con el avance de los asentamientos humanos hacia zonas peligrosas (Hubp, 2005).

El fenómeno de inestabilidad de laderas es uno de los más recurrentes en varias regiones del país sobretodo en las zonas montañosas, en época de lluvias y cuando ocurren sismos. Sin embargo, las estadísticas de su ocurrencia, su estudio y la difusión de medidas preventivas no son aún las más adecuadas.

Los conceptos teóricos que explican a los procesos gravitacionales han sido tratados principalmente por autores como Sharpe (1938), Varnes (1958,1978), Záruba y Mencl (1969), Crozier (1986), y Dikau (1996), quienes consideran entre los factores principales, la influencia del agua superficial y subterránea, la litología, la estructura geológica y el relieve, además de la sismicidad y la actividad humana. Es muy importante la obra coordinada por Dikau (1996), en la cual numerosos autores sintetizan el conocimiento sobre el tema y definen con detalle cada uno de los tipos de procesos de

remoción en masa y sus subdivisiones, además se intenta unificar una terminología acerca de 25 tipos y subtipos de procesos (Hubp, 2005). Muchos son los términos que hacen referencia a este tipo de fenómenos naturales, entre los que encontramos: *deslizamientos*, el termino más difundido pero que solo es uno, de todo un conjunto de procesos; *movimientos de masa* dado por Hutchinson (1968); *movimientos de ladera*, *procesos gravitacionales*, y *procesos de remoción en masa* (PRM) aplicados por Varnes (1958, 1978), en cuyo trabajo se hace diferencia entre movimiento de masas y masas transportadas determinada por Brundsdén (1984). Todas las anteriores expresiones se refieren básicamente a los procesos que ocurren debido a la inestabilidad de las laderas, y solo difieren, entre algunas cosas, en la inclusión o exclusión de algún tipo de proceso en particular, el medio de transporte, algún atributo o factor, la velocidad de movimiento, tamaño de las partículas movidas o simplemente en la objetividad del autor.

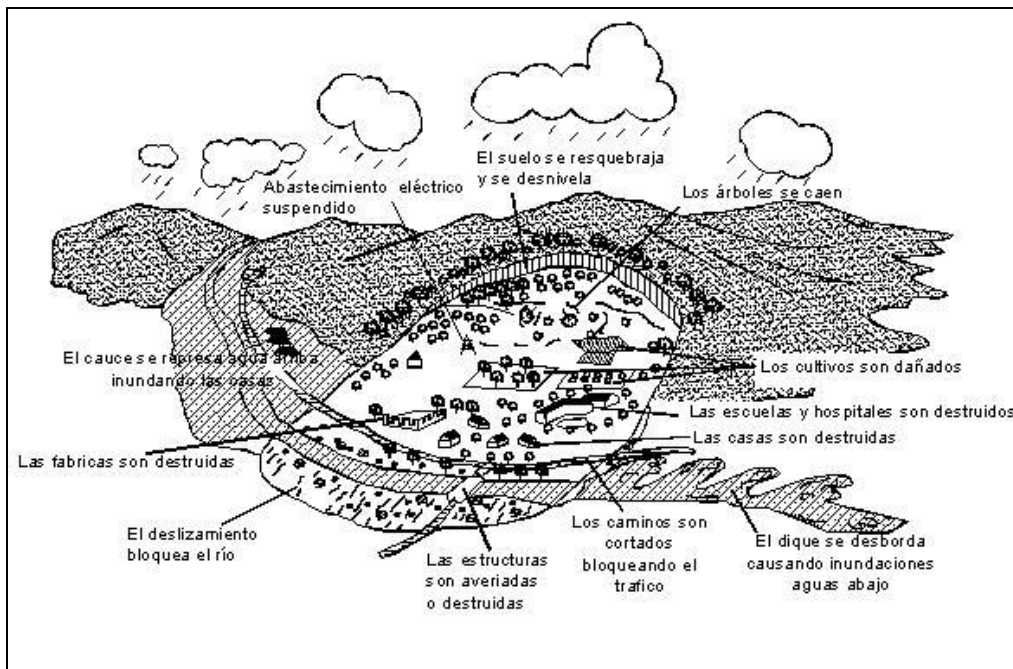


Fig. 35. Representación de un deslizamiento y sus efectos (Suarez, 1998).

Los deslizamientos, son un proceso geológico que se presenta en una amplia variedad de escalas espaciales y temporales en muchos de los paisajes montañosos; tienen una amplia gama de efectos que depende en gran medida de su patrón espacial de ocurrencia y la frecuencia y magnitud del movimiento (Densmore y Hovius, 2000).

Algunos estudios (por ejemplo, Fukao, 1995) sostienen que los deslizamientos de tierra son a menudo descritos como dislocaciones debido a la potencial energía gravitatoria representado por una sola fuerza, en contraste con los terremotos tectónicos descritos como dislocaciones debido a la

liberación de energía representado como fuerzas de doble par (fig. 36). El modelo de una sola fuerza esta limitado por la superficie deslizante, por lo que el deslizamiento se encuentra en la fase de avance en comparación con el modelo de dislocación.

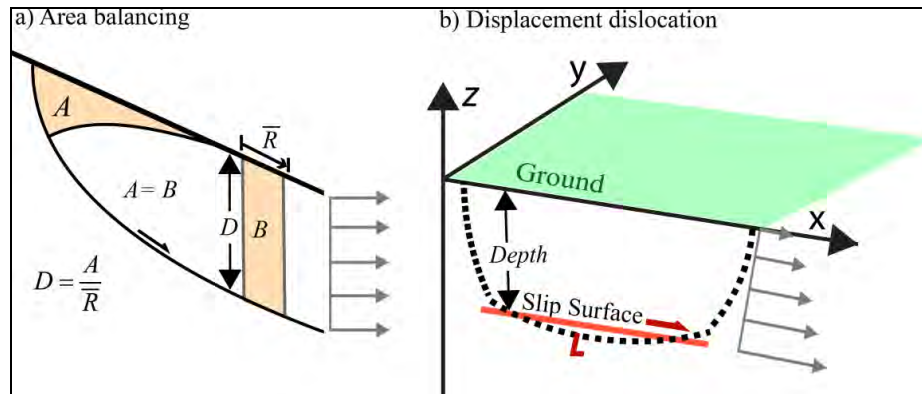


Fig. 36. Esbozo de dos modelos usados para inferior superficies de deslizamiento (Aryal, 2013).

La mejora a lo largo de los años de los sensores de medición en 3D y el progreso de los algoritmos de procesamiento de datos han tenido una fuerte repercusión en la reconstrucción de superficies. Los sistemas de medición geodésica basados en láser están mejorando constantemente. Esto trae una tendencia positiva a las disciplinas que requieren de modelos digitales del terreno. Esta notable mejora en los últimos años ha llevado a un aumento en el uso de los datos del escáner láser para aplicaciones topográficas (Pirotti, 2013).

Hoy en día ALS es una técnica bien establecida. Es de los enfoques más adecuados para el estudio de una amplia zona, ya que ofrece la medición de millones de puntos en un tiempo relativamente corto, para después crear un Modelo Digital del Terreno (DTM). Sin embargo, ALS no siempre es adecuado para proporcionar resultados fiables; por ejemplo cuando existen densas coberturas de vegetación o cuando fuertes discontinuidades morfológicas esconden características naturales a la línea de vista del escáner. Este segundo aspecto puede ser solucionado por la elección de la tecnología TLS, para colocar el instrumento en la línea de visión mas adecuada (frontal en vez de vertical). Varios ejemplos de este enfoque pueden ser encontrados en los artículos, sin embargo, la mayoría de ellos se centra en el uso de TLS para la mejora de la descripción de la morfología (Travelletti, 2008). En cambio, son pocos los esfuerzos que han sido dedicados a identificar los movimientos por estudios múltiples de TLS, principalmente en distancias cortas (Abellan, 2011).

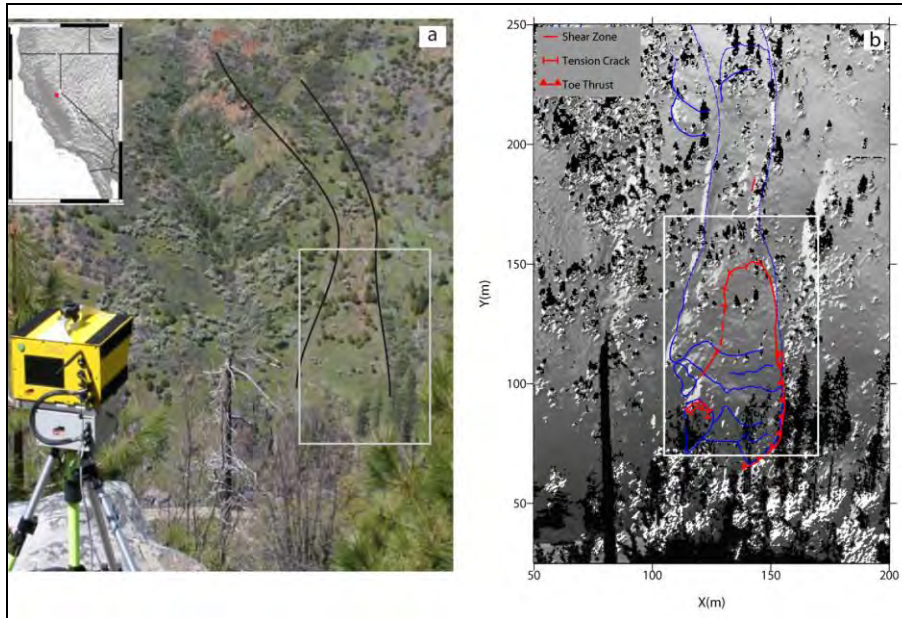


Fig. 37. (a) Fotografía que muestra el campo de escaneo del deslizamiento de Corral Cleveland en la Sierra Nevada; b) Muestra el relieve usando un modelo digital derivado de datos del TLS (Aryal, 2013).

El TLS proporciona nubes de puntos muy detalladas que se pueden utilizar para caracterizar pendientes inestables desde el punto de vista geo-mecánico a través de la medición de la ubicación, la geometría y el volumen de los bloques más inestables (Corsetti, 2013).

El avance en computación, ha permitido la recogida y tratamiento simultáneo de una cantidad cada vez mayor de datos, que a su vez permite análisis estadísticos más precisos y, por consiguiente, mejores resultados (Nagalli, 2012).

Por otra parte, la inestabilidad debido a la fractura de las rocas y sus movimientos ocurren en los planos verticales o sub-verticales justo donde los resultados obtenidos a través de TLS son los mejores. Según Nagalli (2012), el uso potencial del TLS puede involucrar las siguientes actividades:

1. Definición de las propiedades geométricas (área de superficie, volumen, centro de gravedad, etc.) y la relación de superficies geológicas expuestas (rocas).
2. El reconocimiento de las características estratigráficas y estructurales;
3. Evaluación de la rugosidad de la superficie;
4. El reconocimiento de los tipos de roca, entre otros.

Como parte de los análisis geotécnicos y geomorfológicos, la principal aplicación del TLS es el monitoreo de los deslizamientos, la obtención de modelos digitales del terreno, los estudios del

lugar subordinado para el reconocimiento de formas y las características estructurales para efectos geomecánicos (Nagalli, 2012).

El monitoreo de los parámetros de deslizamiento es de gran ayuda para la evaluación y el control de las condiciones de estabilidad de una ladera y para predecir su evolución. Sin embargo, debido a la gran variedad de condiciones geomorfológicas, geológicas, geomecánicas y geotécnicas la identificación de los parámetros más adecuados y las mejores soluciones instrumentales, son un gran desafío. Hasta hace pocos años los equipos de “contacto” como extensómetros, inclinómetros, y piezómetros, han sido utilizados para el monitoreo de deslizamientos. Aún en estos días dichas herramientas siguen siendo capaces de medir la superficie y algunos parámetros como la tensión, desplazamiento, inclinación, nivel de agua, presión de poros, etc. Estas técnicas y sus herramientas son esenciales para proporcionar mediciones precisas en lugares específicos (Mazzanti, 2013).

Un nuevo enfoque de monitoreo de deslizamientos basado en medición remota a través de técnicas como: DGPS (Differential Global Positioning System), Estaciones Totales, Fotogrametría Aérea y Terrestre, Escaneo Láser, SAR terrestre y satelital, tiene el objetivo proporcionar criterios de diseño y control tomando en cuenta la amplia gama de técnicas disponibles en relación con los problemas específicos de los deslizamientos (monitoreo de puntos críticos, precisión requerida, velocidad de cambio de las cantidades monitoreadas, duración del periodo de seguimiento, mediciones superficiales o de profundidad, frecuencia de medición, límites y condiciones ambientales, situación de la zona, etc.), sin dejar de lado el factor económico (Mazzanti, 2013).

Según Mazzanti (2013), el cambio de paradigma de monitoreo tradicional se puede llevar a cabo después de la instalación de un sensor. También menciona que la disponibilidad de nuevas oportunidades de monitoreo de ingeniería estructural para la estabilización de laderas no son las únicas soluciones para la reducción del riesgo de deslizamientos. Ha sido demostrado que un proyecto de monitoreo adecuado puede apoyar el diseño de un proyecto de estabilización y, cuando las intervenciones estructurales no son factibles o convenientes, puede ser la solución para la mitigación del riesgo. Varios ejemplos de monitoreo están disponibles desde finales de los años ochenta para flujos de escombros, desprendimientos de rocas y grandes deslizamientos (Bozzano, 2013).

El movimiento es la consecuencia más evidente de una actividad inducida por la gravedad de una ladera, además de que es el parámetro utilizado para monitoreo y predicción de deslizamientos (Mazzanti, 2013).

De acuerdo con Mazzanti (2013), el monitoreo de deslizamientos incluye las siguientes categorías:

- a) Investigación de los deslizamientos; cuyo objetivo es proporcionar un apoyo al conocimiento integral de las características de los deslizamientos con respecto a su comportamiento en el pasado y el presente. El monitoreo a corto y largo plazo puede ser eficaz si se realiza bajo diferentes condiciones externas. El monitoreo de los parámetros de causa y efecto es fundamental para tal propósito.

- b) Control temporal; cuyos objetivos son la mejora de los conocimientos de un proceso y la verificación de la correspondencia entre la evolución real y la hipotética. La definición de protocolos estándar de monitoreo deben ser adoptados por la actividad de monitoreo que debe realizarse por largo tiempo. Algunas veces, un simple instrumento puede ser utilizado y un solo parámetro puede ser monitoreado y el muestreo de datos es compatible con la recogida de datos manual.
- c) Sistemas de alerta temprana; cuyo objetivo es proporcionar señales de alarma para garantizar la seguridad de la población y las infraestructuras. Se requiere un alto grado de conocimiento geológico y geotécnico de los procesos, un sistema de monitoreo en tiempo real y a largo plazo con un alto índice de muestreo de datos (a calibrar en base a los rasgos del deslizamiento). También es importante considerar el sistema que será conectado al plan de intervención para responder a los fenómenos (difusión de la alerta, conciencia pública y planes de respuesta).
- d) Pruebas de ingeniería de obras de estabilización; cuyo objetivo es comprobar el comportamiento de una estructura durante o después de su realización y/o para verificar la corrección del diseño e implementación de obras de ingeniería. El control periódico es utilizado, además de que es obligatorio para iniciar el monitoreo antes de que comiencen las obras de ingeniería. Instrumentos de alta precisión son necesarios para tal propósito.
- e) Seguridad de áreas de trabajo: cuyo objetivo es garantizar la integridad de los trabajadores y de las poblaciones en las fases críticas de construcción. Se requiere un sistema de monitoreo continuo y una gran estabilidad operacional.

La clasificación presentada anteriormente no tiene que ser considerada de manera estricta, en varios casos prácticos se necesita más de un propósito, ya que con el tiempo se pueden modificar las condiciones de un deslizamiento.

De acuerdo con el propósito del programa de monitoreo, las soluciones aplicables se han centrado en aspectos específicos como las cuestiones técnicas. También en esta vigilancia, se puede incluir más de uno de los efectos y, por lo tanto deberá ser diseñado teniendo en cuenta los diferentes aspectos y la flexibilidad de estos (Mazzanti, 2013).

La información recogida por el sistema de monitoreo puede hacer cumplir la capacidad de las herramientas de modelado para la evaluación de la estabilidad y la evaluación de riesgos. Un elemento importante de las estrategias para reducir el riesgo vinculado a los deslizamientos es el monitoreo sistemático de los sitios que están sujetos a inestabilidad potencial con el fin de identificar y controlar los movimientos de pre-falla (Corsetti, 2013).

El TLS puede representar una solución más flexible para los pequeños y medianos deslizamientos que tienen que estar monitoreados de manera frecuente para detectar movimientos. También deben ser considerados, los altos costos para la adquisición de software y hardware, junto con algunos

problemas para el funcionamiento en campo: el peso del instrumento puede plantear algunas dificultades en el desplazamiento en áreas agrestes. La fuente de alimentación es otra cuestión importante (Bitelli, 2002).

El monitoreo de deslizamientos, ha sido probado en la práctica, con el uso de estaciones totales y GPS junto con mediciones de alta precisión a través de instrumentos de sondeo. Este concepto se ha extendido a través de los resultados de dos proyectos de investigación: el mapeo con dirigible (AMA), junto con mediciones de fibra óptica.

En el trabajo de Sturzenegger (2010) se informa de recientes investigaciones de campo realizadas con TLS y ALS para mapear el deslizamiento Frank en la montaña Tortuga. Dicho estudio, además de mostrar a este relieve como un sitio ideal para probar gran variedad de técnicas de escaneo láser relacionadas con la caracterización y monitoreo de deslizamientos hace hincapié a las diferentes escalas de observación y la información que pueden proporcionar. Los resultados obtenidos son la base para una discusión sobre la aplicabilidad del TLS para la caracterización de grandes deslizamientos.

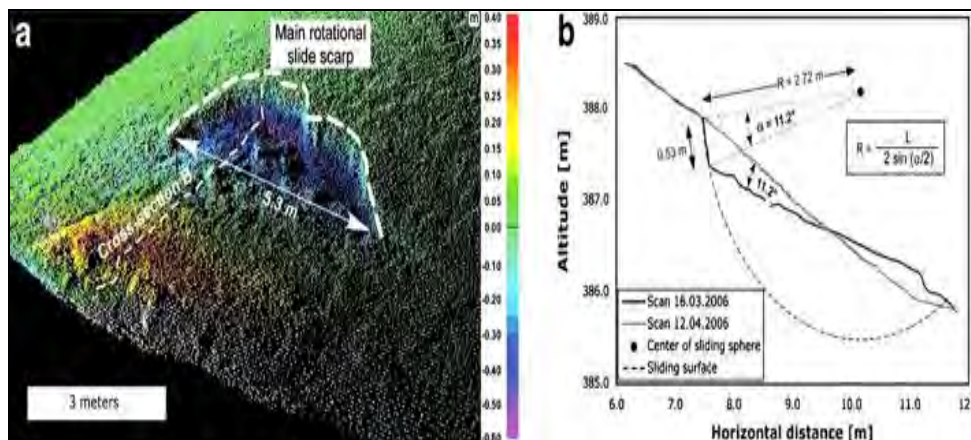


Fig. 38. Ejemplo de interpretación de un deslizamiento usando sucesivamente dos TLS-DEMs (Jaboyedoff, 2012).

El TLS es una técnica emergente para detectar desplazamientos superficiales de pequeña extensión espacial (metros a sub-kilómetros) con mayor precisión (sub-centímetros a centímetros) y a una alta resolución espacial y temporal. En el estudio de Aryal (2013) se aplicó la velocimetría de imagen de partículas (PIV) y el método iterativo punto más cercano (ICP) a los datos de escaneo láser terrestre (TLS) de la punta del deslizamiento Cleveland Corral (CCL) y se han construido de esta manera campos de desplazamiento en 3D.

La adquisición generalizada de datos del TLS en deslizamientos activos ofrece opciones para desarrollar métodos cuantitativos que puedan inferir deformación del subsuelo en desplazamientos superficiales (Aryal, 2013).

Numerosos estudios han tratado a los deslizamientos de movimiento lento como dislocaciones. Por ejemplo, Fleming y Johnson (1989) consideran a los deslizamientos como una fractura en su modelo conceptual. La utilidad de los métodos para inferir subsuelo de carácter deslizante en desplazamientos superficiales ha sido limitado, en gran parte, debido a la complejidad de la recogida de datos necesarios: precisión y estimaciones espaciales completas de desplazamientos superficiales (Aryal, 2013).

El análisis de desplazamiento de la superficie y el subsuelo deslizable puede conducir a una mejor comprensión de la dinámica de deslizamientos y sus riesgos concomitantes. El conocimiento de la profundidad y velocidad deslizable no solo ayuda a cuantificar el papel que los deslizamientos desempeñan en el equilibrio dinámico de los procesos de ladera, sino también su importancia en las operaciones de muestreo geotécnico, para colocar correctamente la instrumentación y el diseño de sistemas de mitigación de deslizamientos (Aryal, 2013).

En el estudio de Barbarella (2012) se utilizó un TLS para controlar un gran deslizamiento que causo interrupciones en importantes vías de comunicación de Italia. Se utilizaron tres diferentes modelos de TLS, como el de *forma de onda completa*. La producción de cada campaña de medición fue un Modelo Digital de Superficie con un sistema de referencia único.

El uso de diferentes modelos de TLS junto con los paquetes de software recomendados por las compañías para procesar los datos, permitió en dicho estudio comparar las mediciones y evaluar la fiabilidad y la exactitud de los resultados. La comparación de los datos fue útil para identificar y analizar en el tiempo las áreas de mayor deformación, la dirección de los movimientos del deslizamiento y para validar la técnica en este tipo de aplicaciones (Barbarella, 2012).

Para el análisis de deslizamientos (predicción, monitoreo, alerta temprana, detección de cambios, etc.) se puede utilizar una variedad de técnicas geomáticas que van desde clásicas (RT GNSS receptores, estación total, y mediciones de nivelación) hasta las más innovadoras como la interferometría SAR, teledetección y escáneres láser (Barbarella, 2012).

Todos ellos presentan algunos puntos críticos y puntos favorables en cuanto a aplicaciones de monitoreo de deslizamientos. Algunas dificultades en el estudio de estos procesos gravitacionales pueden deberse a la orientación de la zona, la pendiente del terreno, la presencia de vegetación (dosel), y la visibilidad desde los puntos estables (Barbarella, 2012).

Hasta la fecha, los datos LiDAR se utilizan comúnmente para crear mapas geomorfológicos detallados, imágenes para detectar y clasificar formas del relieve, así como en geomorfología glacial, fluvial y costera (Schultz, 2007). En las superficies complejas, el análisis adicional, como la cuantificación de las características superficiales propias de ciertos tipos de morfologías puede ser

necesario, ya que pueden proporcionar pistas objetivas en la interpretación de los paisajes; es el caso de áreas inestables antiguas, en las cuales los deslizamientos son a menudo representados como las superficies más degradadas y más suaves que las partes recientemente activas, lo que sugiere que los filtros de rugosidad se pueden utilizar, no solo para localizar posiciones, sino también para estimar la actividad y edad potencial.

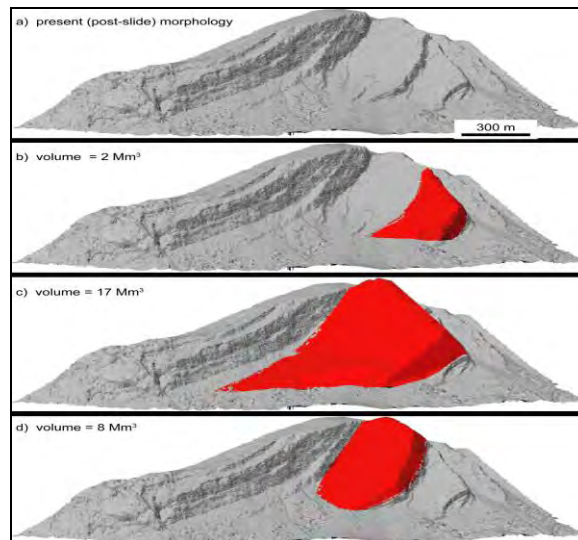


Fig. 39. Ejemplo de la reconstrucción de la morfología pre-deslizamiento (Sturzenegger, 2010).

El TLS se ha vuelto más popular en los estudios geomorfológicos relacionados con el análisis de laderas y rocas. En comparación con otras técnicas, los sistemas TLS ofrecen una serie de ventajas, tales como la adquisición de la geometría tridimensional (3D) para toda la superficie de un objeto, la obtención de datos de alta densidad (nubes de millones de puntos), mediciones de gran exactitud y una tasa de adquisición rápida, además de facilidad de configuración y portabilidad (Armesto, 2009).

En las aplicaciones de TLS sobre inestabilidad de laderas Abellan (2006), describió la generación detallada de un DEM en un área de prueba en los pirineos españoles, para la creación de un inventario, simulación de trayectorias y velocidades de deslizamientos; Ghirotti y Genevois (2007) utilizaron los datos del TLS para adquirir una imagen topográfica detallada de una ladera en los Apeninos italianos, y analizar su estabilidad por medio de simulaciones; Bauer (2005) empleó una metodología para medir pendientes a través del TLS y así detectar cambios en superficies inestables; Runqiu y Xiujun (2008) y, Feng y Roshoff (2004) realizaron trabajos en los que describen a largo plazo los procesos de recolección de datos TLS, el registro de las nubes de puntos y la creación de modelos en 3D, todos ellos destinados a la determinación de los parámetros geomorfológicos tales como ángulos de fractura, direcciones, espaciado, texturas de la superficie, etc.

Según Rowlands (2003), existen pocas aplicaciones del escaneo láser en la caracterización de deslizamientos, solo en algunas situaciones el TLS es una herramienta muy útil para interpretar la dinámica de deslizamientos, delinear los límites y estimar volúmenes. Experimentos basados en datos TLS destacan la importancia de un enfoque sobre definición de campos de deformación para caracterizar áreas de deslizamientos con diferentes cinemáticas; el análisis de la deformación de un deslizamiento puede resaltar la presencia de discontinuidades y/o condiciones tensionales peculiares. Dicho enfoque puede ser útil para el análisis de comportamiento de deslizamientos (Teza, 2008).

El TLS se utiliza sobre todo para el monitoreo de los deslizamientos, no obstante puede mejorar en gran medida el modelado de una área específica. Sin embargo, es necesario un cuidado especial en la adquisición y procesamiento de datos, para proporcionar modelos cuya georreferencia sea exacta (Teza, 2008).

Al considerar la dinámica de deslizamientos, el estudio de Kasai (2009), muestra como los análisis superficiales de los DEM pueden mejorar la comprensión de los deslizamientos profundos y dar estimaciones de sus comportamientos futuros.

El monitoreo de deslizamientos en tiempo real es muy adecuado para la integración de un sistema de alerta para la gestión de riesgo, y para el seguimiento del fenómeno en zonas urbanizadas y sitios de alto valor para la sociedad, (Mora, 2002). El principio básico es el mismo para ALS y TLS, requiere al menos dos épocas de adquisición de modelos digitales de elevación. Sin embargo, el monitoreo necesita conjuntos de datos de gran precisión y en alta resolución. La mayoría de los trabajos se han hecho hasta ahora con DEM derivados de TLS.

3.3 Aplicación de metodologías

Varias metodologías de medición se han utilizado para investigar la actividad de deslizamientos. Por ejemplo, la técnica basada en puntos (estación total, GPS) y la que consiste en áreas (fotogrametría, escaneo láser e interferometría radar).

En la siguiente sección, se muestran algunos ejemplos de metodologías basadas en el escaneo láser terrestre.

En el estudio de Viero (2010), se propone un nuevo método para investigar componentes de rotación de los movimientos gravitacionales a través del análisis de las discontinuidades de las rocas. La combinación de técnicas de escaneo láser, un análisis semi-automatizado estructural y una secuencia de comandos de MATLAB para la validación, promueve la exactitud, el ahorro de tiempo y una explicación más completa de los procesos gravitacionales presentes en el área de estudio.

Respecto a los métodos topográficos y la tradicional "línea de escaneo", este enfoque muestra una mayor precisión y su adquisición a distancia permite mediciones rápidas y seguras. Los datos

adquiridos están representados por una nube de puntos, compuesta por millones de puntos, cada uno caracterizado por valores X, Y, Z y por escalas de intensidad o asignación de colores RGB a través del acoplamiento de fotos (Viero, 2010).

Para dicho estudio se combinaron datos de los sistemas de TLS y ALS para obtener información sobre superficies inclinadas y planas, respectivamente (fig. 40). De esta manera una imagen geométrica completa se pudo conseguir. Asimismo con el fin de obtener una distribución espacial de las discontinuidades, se aplicó el software Coltop-3D, capaz de realizar un análisis estructural detallado de la superficie grabada a partir de la nube de puntos original (Viero, 2010).

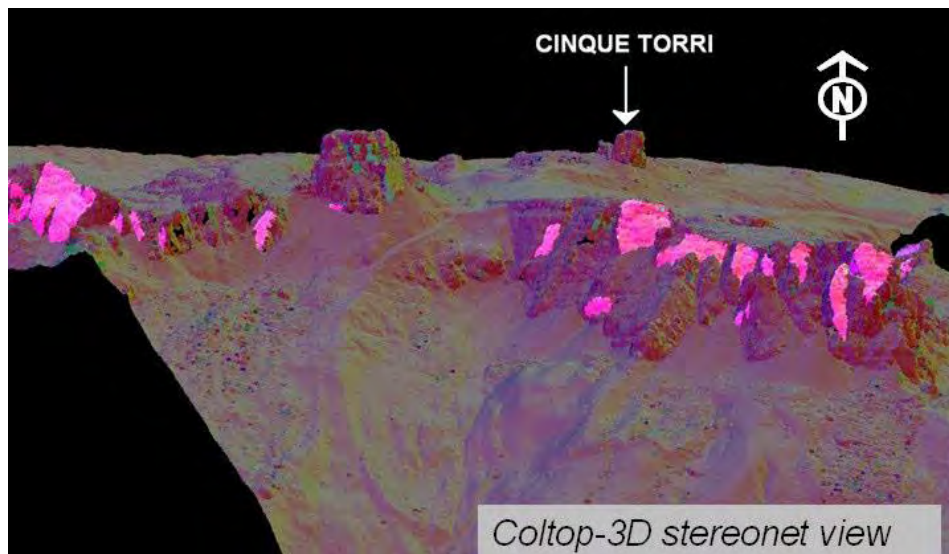


Fig. 40. Una serie de discontinuidades son resaltadas por medio de esta vista (Viero, 2010).

En el estudio de Goshorn-Maroney (2012), se compararon puntos de un escaneo con puntos de una siguiente exploración a través de la herramienta de comparación Imsurvey. El programa compara los puntos de referencia sobre la antigua exploración para el punto más cercano en la superposición de la exploración. Además, se procesaron y analizaron los datos TLS con los software Optech Parser, Matchview y Polyworks v11 e Innovmetrics. En este mismo estudio se le da mucha importancia a la colocación del escáner láser, por ejemplo, el equipo utilizado se colocó en un punto alto, lo que permitió una visión amplia de todo el glaciar.

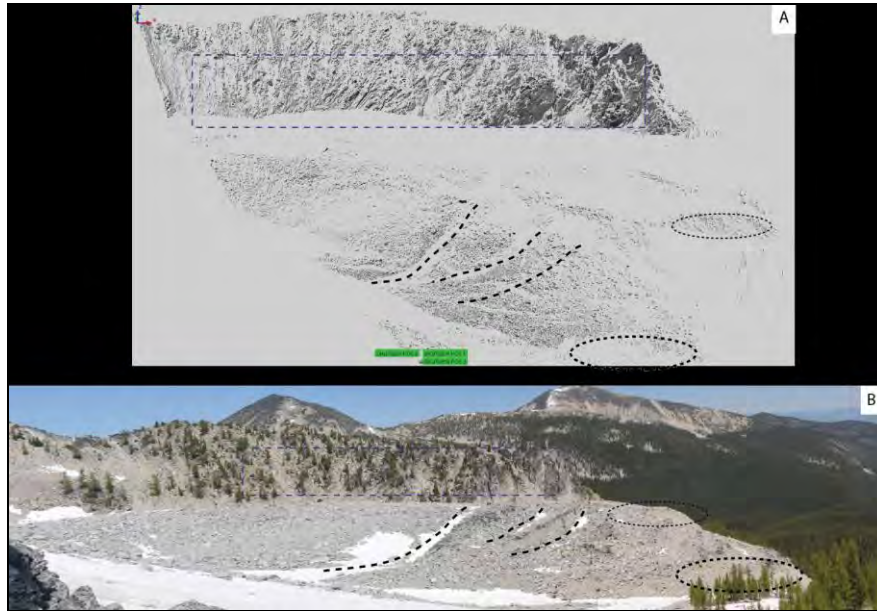


Fig. 41. Imagen LiDAR procesada de Star Peak (A) y una fotografía del sitio de escaneo (Goshorn-Maroney, 2012).

El aumento de las tecnologías disponibles no ha sido congruente con un adecuado desarrollo de profesionales en la materia. Mazzanti (2013) hace la crítica de algunos enfoques de investigación que se utilizan comúnmente para deslizamientos: a) investigación estática; b) el monitoreo temporal.

La investigación estática incluye el análisis para derivar características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas de las laderas que incluyen, la interpretación del estudio de campo, la interpretación de fotografías aéreas, perforaciones, pruebas con penetrómetro, estudios geofísicos, análisis de laboratorio, etc. Estos enfoques generales de caracterización son necesarios para obtener los rasgos más importantes de una ladera y para predecir su evolución. Sin embargo, esta información se recoge en un tiempo específico (bajo condiciones invariables), por lo tanto, no son lo suficiente para la comprensión de un de un proceso de deslizamiento (Mazzanti, 2013).

El monitoreo temporal incluye la mayoría de análisis realizados alguna vez, cuyo propósito es medir la modificación de parámetros predefinidos en el tiempo. Este enfoque no se centra en la comprensión de la dinámica de los deslizamientos (Mazzanti, 2013).

En el trabajo de Mazzanti (2013), se demostró la importancia de un especial diseño antes de realizar un proyecto de monitoreo de deslizamientos y, también se sugirieron algunos criterios preliminares para los especialistas. En dicho estudio se fusionan métodos tradicionales geotécnicos e innovadoras soluciones de teledetección para una evaluación exhaustiva del monitoreo de deslizamientos.

Según Mazzanti (2013) los parámetros más comunes que son monitoreados son las lluvias, el nivel freático, la acción sísmica, la tensión, la deformación y el desplazamiento. Algunos de estos

parámetros miden las “causas” que dan lugar a un deslizamiento (lluvias, nivel freático, acción sísmica), mientras que otros miden los “efectos” de un deslizamiento (deformación, tensión, desplazamiento).

El monitoreo de las causas de un deslizamiento, es en teoría de las mejores soluciones ya que podría permitir, sobre la base de modelos evolutivos específicos, pronosticar los efectos y estimar su evolución. Sin embargo, en lugar de numerosos estudios, varias interrogantes siguen presentes sobre la correlación entre causas y efectos (Mazzanti, 2013).

Por otro lado, los efectos (desplazamientos) son fáciles de identificar. Además, la predicción simple y eficaz de modelos basados en la evolución temporal de deslizamientos esta disponible. Por esta razón, la vigilancia de los efectos es de las soluciones más utilizadas (Mazzanti, 2013)

Algunos otros aspectos pueden ser considerados en la descripción de deslizamientos tales como la cobertura de la vegetación, las condiciones climáticas y la ubicación geográfica. Estos aspectos no son tan relevantes en una caracterización tradicional de deslizamientos, pero son muy importantes para un diseño de monitoreo, ya que pueden condicionar la eficacia de las técnicas e instrumentos utilizados (Mazzanti, 2013).

Según Mazzanti (2013), se debe considerar la complejidad de cada sistema de monitoreo de deslizamientos. La selección de los instrumentos más adecuados representa uno de los pasos clave del proceso. Una correcta elección de la técnica y de los equipos es necesaria para proporcionar información útil a los usuarios y para optimizar los costos.

Las técnicas de teledetección presentan la gran ventaja de cubrir áreas amplias y medir los movimientos en muchos puntos con alta precisión.

De acuerdo con Mazzanti (2013), para la elección de un equipo de escaneo adecuado, se pueden considerar las siguientes fases:

- 1) Implementación del sistema (instalación y puesta en marcha).
- 2) La gestión del sistema de monitoreo y difusión de datos.

La implementación de un sistema basado en instrumentos tradicionales requiere menores costos de equipo, pero mayores gastos de operación sobre el terreno y que a menudo se ve afectado por fallas mecánicas o eléctricas. Los equipos de teledetección son más caros que los tradicionales, pero que pueden ser instalados en lugares seguros y cómodos, reduciendo así los costos de instalación y la ocurrencia de fallas. La administración del sistema es la siguiente fase de operación y donde la recolección de datos ordinarios es activa y eficaz (Mazzanti, 2013).

La gestión de un sistema significa poner en marcha una serie de procedimientos que describen lo que se tiene que hacer y en que dirección, que es responsable de recibir los resultados de la actividad, que se encarga del análisis e interpretación de datos y la toma de decisiones (Mazzanti, 2013).

El mantenimiento significa asegurar que el sistema este funcionando según las especificaciones de diseño. Una especial atención se le debe prestar al correcto accionar de los instrumentos y su calibración, además de la constante cooperación con los responsables del análisis de datos para disipar dudas e incertidumbres (Mazzanti, 2013).

Los instrumentos tradicionales requieren un mantenimiento más costoso debido a la necesidad de la presencia humana en los puntos de medición, mientras que los equipos remotos pueden ser instalados en lugares más accesibles y cómodos, reducir el tiempo de operación, los riesgos para el operador y por lo tanto, los costos generales (Mazzanti, 2013).

Por otra parte, la gestión del equipo de teledetección requiere de un software complejo para el procesamiento de datos, personas capacitadas en la validación e interpretación de la información. Es evidente que los criterios para la elección no pueden ser solo el tipo de equipo o la técnica (remota o de contacto), ya que sus respectivas ventajas y desventajas pueden ser más relevantes dependiendo del caso (Mazzanti, 2013).

Mazzanti (2013) abunda más sobre el tema del monitoreo y propone algunos criterios para tomar una decisión correcta en la fase de diseño. Los puntos de partida son:

- 1) El marco de monitoreo, que incluye también las características de los deslizamientos.
- 2) El propósito del monitoreo. Una evaluación correcta del marco de monitoreo que toma ventaja de la siguiente información:
 - Datos bibliográficos
 - Análisis de información geológica y geotécnica disponible (derivada de investigaciones del sitio, pruebas de laboratorio, etc.
 - Análisis de la información meteorológica y condiciones ambientales (temperatura, humedad, niebla, lluvia, nieve, visibilidad de las áreas, distancia de posicionamiento o dispositivos remotos)
 - Análisis de las características específicas del sitio (accesibilidad, visibilidad, pozos de perforación, suministro de energía, trayectoria del cableado, protecciones, presencia de vegetación, etc.

Para Mazzanti (2013), la comprensión del propósito de monitoreo puede derivar de la siguiente información:

- 1) Principales parámetros que deben medirse;
- 2) Expectativa en términos de gestión, difusión de datos, predicciones, frecuencia temporal, etc.
- 3) Presupuesto disponible.

Una vez que los anteriores puntos han concluido, se evaluarán los siguientes requisitos de monitoreo para una correcta elección de los equipos a utilizar:

- a) Información de la profundidad
- b) Información de la densidad. Se refiere al número de puntos monitoreados desde el punto de vista de la distribución espacial
- c) Tiempo de monitoreo, es decir, la duración y la fecha de la medición requerida
- d) Frecuencia de muestreo de datos
- e) Rango de variación de los parámetros
- f) Precisión
- g) Gastos

En el monitoreo de deslizamientos, existen varias razones que pueden conducir a la elección del equipo de seguimiento, tales como: 1) confianza en cierto equipo porque ya está probado; 2) un precio menos caro; 3) sugerencias de expertos; 4) por la precisión del equipo; y 5) por su eficacia (Mazzanti, 2013).

Mazzanti (2013) sigue abundando en el tema y argumenta que antes de decidir acerca de un sistema de monitoreo de deslizamientos se requiere un diseño que debe ser impulsado por criterios específicos, como un conocimiento amplio del fenómeno que incluya sus características físicas y mecánicas, así como las razones de su monitoreo.

Una vez que el marco de monitoreo y los propósitos son definidos, la elección de las técnicas de monitoreo pueden ser impulsadas por varios criterios tales como: el tiempo de monitoreo; tasa de muestreo de datos, etc. Además, al tener en cuenta el tipo de deslizamiento y el propósito de monitoreo, se puede identificar la técnica más adecuada (Mazzanti, 2013).

La retroalimentación de campo debe ser considerada y tenida en cuenta ya que es difícil prever lo que va a suceder en cierto lugar, especialmente en deslizamientos complejos (Mazzanti, 2013).

La puesta en marcha de un sistema de monitoreo no puede ser visto como el paso final, el seguimiento es inútil si los datos no se utilizan adecuadamente. Esto implica el análisis de los datos recogidos por expertos que conocen el contexto, los alcances, los criterios de diseño y las condiciones geotécnicas y geológicas, así como criterios de alerta/alarma (Mazzanti, 2013).

En el trabajo de Zalesky (2012), se realizó la combinación de métodos de medición de topografía y monitoreo geotécnico para obtener un mejor conocimiento sobre el desarrollo de los deslizamientos. Los métodos topográficos pueden describir el área de interés con gran amplitud; los signos de los movimientos de pendiente que aparecen en la superficie, pueden ser adquiridos. El monitoreo geotécnico de deformaciones en el subsuelo es utilizado para determinar y, en algunos casos para explicar las alteraciones de pendiente, que podrían estar ocultas para las mediciones geodésicas.

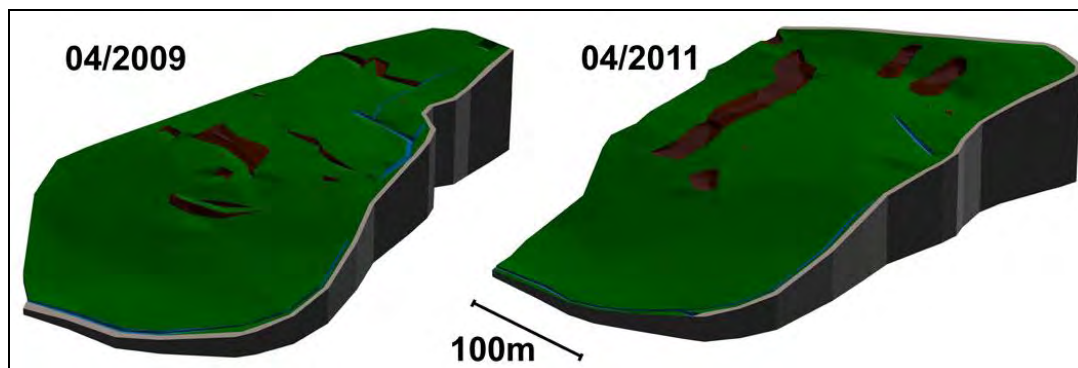


Fig. 42. Ejemplo de cambios en la morfología obtenidos por un Modelo Digital de Superficie (Zalesky, 2012).

En el estudio de Bertacchini (2012), se construyó una metodología para la adquisición fiable y la interpretación de datos de TLS, es decir, una propuesta metodológica basada en el escaneo láser para la identificación de desplazamientos y cambios morfológicos. El enfoque se basó en un análisis multi-temporal a través de varias repeticiones de mediciones de TLS realizadas en el área de interés. Para lograr mejores resultados y optimizar la estrategia de procesamiento, los diferentes métodos sobre alineación de nubes de puntos fueron probados, junto con algoritmos para el filtrado y procesamiento posterior.

Para el trabajo de Aryal (2013), se utilizó el método *Velocimetría de Imágenes de Partículas* (PIV), basado en la sección-cruzada para derivar campos de deformación de superficies 3D utilizando nubes de puntos de TLS. El método se aplicó al deslizamiento activo de *Corral Cleveland* en el Norte de California con seis diferentes exploraciones de TLS. Los errores asociados se estimaron a través

de la función de correlación cruzada y se probó el rendimiento del método con desplazamientos sintéticos aplicados a nubes de puntos de TLS (fig. 43).

El método de Sección-Cruzada Equilibrada 2D (BC) proporciona la profundidad del deslizamiento; el modelo de Dislocación Elástica (ED) determina la profundidad, orientación y magnitud del deslizamiento. Estos dos enfoques pueden ofrecer medios a distancia más eficaces y menos costosos de inferir la geometría y comportamiento de los deslizamientos. En dicho estudio, se examinó la hipótesis de que la profundidad y orientación de la superficie de deslizamiento enterrada y el grado de deslizamiento del subsuelo puede ser estimado utilizando los desplazamientos de la superficie del suelo medido por los datos del TLS. En su enfoque se adapta una técnica utilizada en la geodesia para terremotos, junto con velocimetría de imagen de partículas para estimar un campo de suelo de desplazamiento en un deslizamiento con movimiento lento (Aryal, 2013).

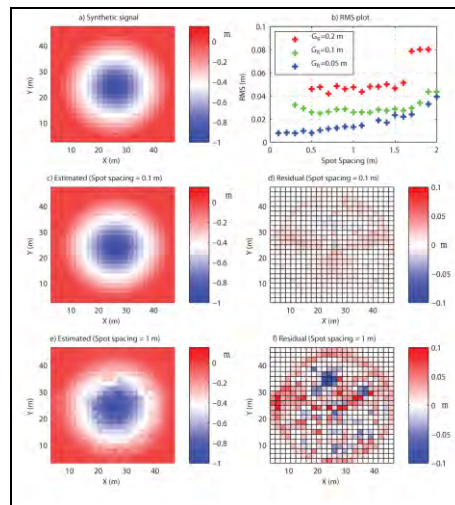


Fig. 43. Ilustración del método PIV aplicado para producir sintéticamente datos de nube de puntos (Aryal, 2013).

En el estudio de Barbarella (2012) la metodología consistió en el uso de dos tipos de TLS (forma de onda completa y eco mono) en la misma parte del deslizamiento. La modelización numérica de un deslizamiento obtenido con un TLS puede ser difícil con la presencia de vegetación. La morfología del terreno (pendiente, ondulaciones) limita las áreas donde se puede poner el TLS.

Según Barbarella (2012) para monitorear deformaciones de la superficie, es esencial identificar un conjunto de puntos que sean estables en el tiempo y puedan formar un sistema de referencia fijo en el que una serie de mediciones repetidas realizadas en diferentes momentos se puedan enmarcar. Estos puntos fijos (referencia cercana) deben ser colocados fuera de la zona de vigilancia, lo suficientemente distantes para que no tengan influencia de los fenómenos gravitacionales, pero lo suficientemente cerca para hacer fácil y precisa la conexión entre ellos y la estación láser con los objetivos (puntos). La conexión con todos o algunos de los objetivos y la estación se puede realizar a

través de receptores GPS. Si algunos de los objetivos están en una posición que no permita la medición con GPS (cerca de una pendiente pronunciada) su posición se puede medir por medio de una estación total a partir de los puntos colocados orientados en la dirección de los otros puntos medidos con el GPS.

De acuerdo con Barbarella (2012) la conexión entre los puntos de referencia cercana y los deslizamientos también se puede hacer utilizando la metodología *Cinemática en Tiempo Real* (RTK), que asegura una mayor velocidad de ejecución y precisión.

En dicho estudio todas las exploraciones fueron editadas y alineadas con el fin de producir una sola exploración. Para la edición, el registro y la georreferenciación fue utilizada la herramienta Poliworks. Una vez que estos pasos fueron hechos gran número de modelos digitales de elevación (DEM) estuvieron disponibles. Además, al estar enmarcadas las mediciones en un mismo sistema de referencia, fue posible comparar los DEM obtenidos en diferentes momentos, interpolando las nubes de puntos en una cuadrícula para analizar e identificar la evolución de las zonas de deformación, y para estimar los movimientos de los deslizamientos.

Para el estudio de Vežočník (2009), se presentó una metodología para el seguimiento a alta precisión de las deformaciones con una perspectiva a largo plazo a través de TLS. El flujo de trabajo general consistió en los siguientes pasos:

- 1) Una red de puntos de referencia debe ser establecida
- 2) Una red geodésica debe ser diseñada cerca del objeto de estudio
- 3) El TLS debe ser utilizado con mucho cuidado para cubrir el objeto
- 4) La forma del objeto debe ser modelada con superficies adecuadas
- 5) El modelo de objetos se va a reducir a solo puntos representativos
- 6) Sobre la base de puntos representativos, diferentes enfoques de análisis de deformación pueden ser aplicados. *Para mas información de los anteriores puntos, se puede consultar la pag.4 de dicho estudio.

Las diversas etapas en el flujo de trabajo del TLS desde la adquisición de nubes de puntos 3D, su proseguir a través de la calibración, registro, clasificación y segmentación de las características. Según Belton (2008), las fases de clasificación y segmentación son las que acoplan la mayoría de la investigación ya que los objetivos de diversas aplicaciones conducen a un gran número de características distintas que necesitan ser aisladas. Dado que las características varían y a menudo son complejas, con frecuencia se requiere de procesamiento manual. Combinado con el gran

volumen de datos de nubes de puntos adquiridas, esto se traduce en una dedicación significativa de tiempo y recursos en el flujo de trabajo asignado a la clasificación y segmentación.

En el trabajo de McKean (2004), se resalta la importancia de un mapa de fallas, como un elemento básico en la evaluación de deslizamientos. Sin embargo, los inventarios de deslizamientos son muy laboriosos, difíciles de hacer en terrenos con vegetación por medio de técnicas convencionales; la mayoría de los inventarios solo delimitan los límites de los deslizamientos y no ofrecen información acerca de la mecánica del desplazamiento. En cambio a través del escaneo láser se pueden mejorar los inventarios de deslizamientos, a través del aumento de la resolución, lo que permite identificar escarpes y material desplazado. Según Jaboyedoff (2012), las características morfológicas de los deslizamientos son fáciles de definir en base al relieve sombreado producido por los modelos digitales de elevación en alta resolución (HRDEM). Este enfoque no sustituye a las investigaciones de campo, pero si cambia los métodos de trabajo, que se convierten en parte de los procesos de validación de un inventario de deslizamientos producidos a través del análisis de los modelos digitales.

Para la mitigación de desastres, es importante conocer la ubicación de los sitios potenciales a desarrollar deslizamientos. Las fotografías aéreas y mapas de delimitación que tradicionalmente se han utilizado para la localización y la creación de inventarios de deslizamientos, a pesar de su resolución espacial, no pueden extraer los detalles clave que indican la presencia de deslizamientos, tales como cicatrices internas y grietas. En contraste, el escaneo láser puede identificar características ocultas debajo de la vegetación con un alto grado de precisión, además de mejorar la calidad de los inventarios mediante la producción de mapas detallados de contorno e imágenes visualizadas (Chigira, 2004). Sin embargo, la interpretación de imágenes contiene un cierto grado de subjetividad, y depende de las habilidades, la experiencia y la familiaridad de los investigadores con los sitios de estudio (Malamud, 2004).

De acuerdo con Roering (2005), la teledetección y las investigaciones de campo se pueden combinar para examinar las relaciones de los principales procesos que conducen a la ocurrencia de deslizamientos. Estas relaciones se utilizan para localizar los sitios potenciales de deslizamientos activos. Al cuantificar las características de la superficie de deslizamientos profundos, la información se compara con la de las áreas circundantes, esto permite una evaluación de la modificación que los deslizamientos hacen del paisaje.

El monitoreo multi-temporal de un deslizamiento es una herramienta fundamental para el conocimiento y la posible predicción de su evolución temporal o espacial de dicho fenómeno (Bitelli, 2002).



Fig. 44. Instrumentos adaptados para los estudios de escaneo láser: A) Riegl LMS-Z210; B) Riegl LMS-Z420i; C) Retroreflector cilíndrico; D) Retroreflector de prisma (Bitelli, 2002).

En el trabajo de Bitelli (2012), se realizaron mediciones con el TLS y fotogrametría sobre un pequeño deslizamiento en los Apeninos del Norte en Italia, se describe un caso interesante para poner a prueba las capacidades del escaneo láser y el procesamiento de datos láser (filtrado, fusión, detección de valores atípicos. Además de evaluar similares metodologías para monitorear otros deslizamiento. Se realizaron tres escaneos, a partir de diferentes posiciones para reducir al mínimo la falta de datos en las nubes de puntos debido a la vista en perspectiva de las exploraciones.

Los datos adquiridos fueron conectados entre sí con el fin de reconstruir la superficie continua del deslizamiento, por lo que fueron alineados de forma automática durante el escaneo y fusionados por el RISCAN PRO el nuevo software para imágenes de láser RIEGL, que incluso permite crear superficies poligonales y superficies con texturas a través de fotografías digitales obtenidas por el escaneo de una cámara digital semi-métrica colocada sobre el instrumento láser (Bitelli, 2002).

Para llevar a cabo un análisis de TLS multi-temporal y proporcionar mapas de desplazamientos semi-continuos, la comparación entre una malla de referencia y una nube de puntos se puede lograr a través de una herramienta de inspección. En estos mapas los desplazamientos están representados por un color, con lo cual se puede detectar la ubicación de zonas inestables (fig. 45 y 46).

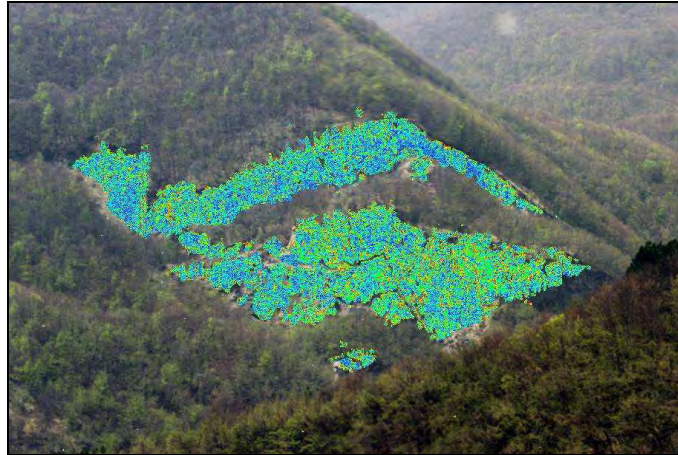


Fig. 45. Ejemplo de una imagen resultante del análisis multi-temporal (Bertacchini, 2012).

Para el estudio de Bertacchini (2012), se instaló una estación maestra en una zona geológicamente estable respecto a un deslizamiento. Esta incluye un TLS, una estación meteorológica, un pilar estable para la comprobación periódica de estabilidad de la zona, por medio de un GPS de doble frecuencia y una estación automática total (ATS). Para el procesamiento de datos o tratamiento de la información, los mapas obtenidos por análisis multi-temporal fueron filtrados para resaltar las áreas caracterizadas por movimientos y mejorar su legibilidad. Un algoritmo específico fue creado por los autores en lenguaje Matlab para suavizar los resultados con el fin de hacerlos coherentes con las características geomorfológicas y las discontinuidades. La cartografía obtenida fue el resultado de un largo procesamiento de datos del TLS y extracción de productos, pero también es el punto de partida con el cual los investigadores (geólogos, geomorfólogos) pueden hacer su análisis e interpretación de los procesos de superficie. Aunque también los resultados deben ser verificados y validados a través de una técnica independiente.

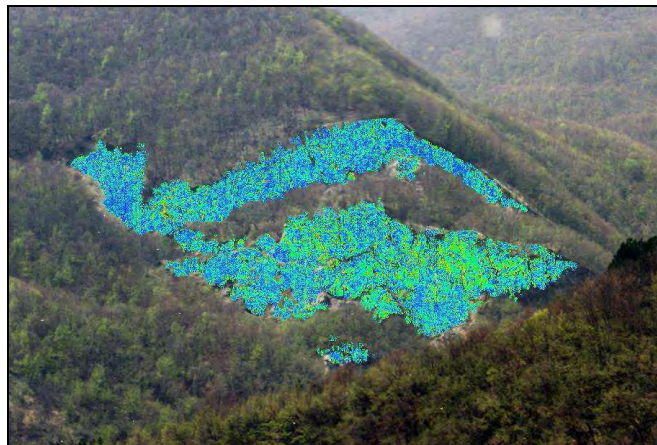


Fig. 46. Ejemplo de una imagen procesada obtenida de la filtración basada en el promedio móvil (Bertacchini, 2012).

CAPÍTULO IV. APLICACIÓN DEL USO DEL TLS EN EL ANÁLISIS DE LADERAS POTENCIALMENTE INESTABLES

La investigación de una ladera, consiste en obtener toda la información posible sobre las características topográficas, geológicas, geotécnicas y ambientales que permitan realizar un diagnóstico preciso de los problemas que presenta y un diseño efectivo de su solución Suárez (1998). La magnitud y profundidad de las investigaciones depende del tamaño y complejidad del fenómeno gravitacional bajo estudio.

De acuerdo con Lim (2009), el potencial de una pendiente para mover materiales esta determinado por la interacción entre las características *in situ* (ubicación, geometría, cubierta vegetal, geología subyacente, drenaje, materiales constitutivos) y factores externos (precipitaciones, aguas subterráneas, viento e insolación). Cada elemento puede acrecentar o reducir la inestabilidad de las laderas en diversos grados, además esta relación se puede alterar con el tiempo (fig. 47).

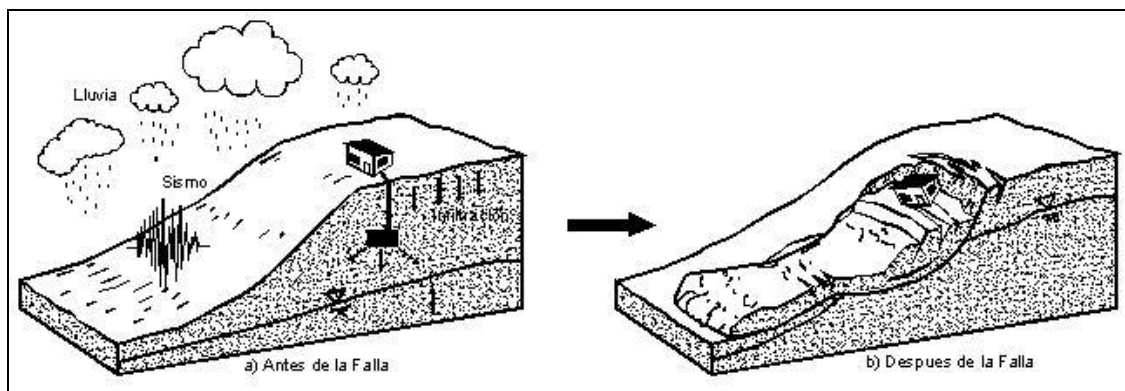


Fig. 47. Mecanismos de falla (Suárez, 1998).

Debido a la gran variedad de influencias en el comportamiento de las pendientes, algunos investigadores se limitan a la identificación de indicadores de movimiento con el fin de evaluar la estabilidad. Ciertos rasgos como terrazas, abombamiento y grietas de la superficie son signos de movimiento. Por lo tanto, la capacidad de obtener medidas y cuantificar pendientes degradadas, es de gran importancia para estimar el riesgo (Lim, 2009).

Según Large (2009), una preocupación para la aplicación del TLS en la evaluación de procesos gravitacionales, es la capacidad de generar modelos de la pendiente con suficiente consistencia y precisión para detectar movimientos. Además de los desafíos de la optimización de la calidad de las mediciones con TLS, esta el problema de la cubierta forestal, debido a que puede obstaculizar la visión desde el láser a la pendiente; una vegetación densa puede desdibujar la división física entre la pendiente y la cobertura vegetal. Estos efectos han impuesto durante mucho tiempo una

considerable restricción en los TLS para monitorear las laderas, ya que la aplicación se reduce a las superficies libres de la influencia de la vegetación.

La aplicación de los datos de TLS para la evaluación de deslizamientos demuestra su adecuación para proporcionar una representación detallada de las condiciones de las pendientes (Lim, 2009).

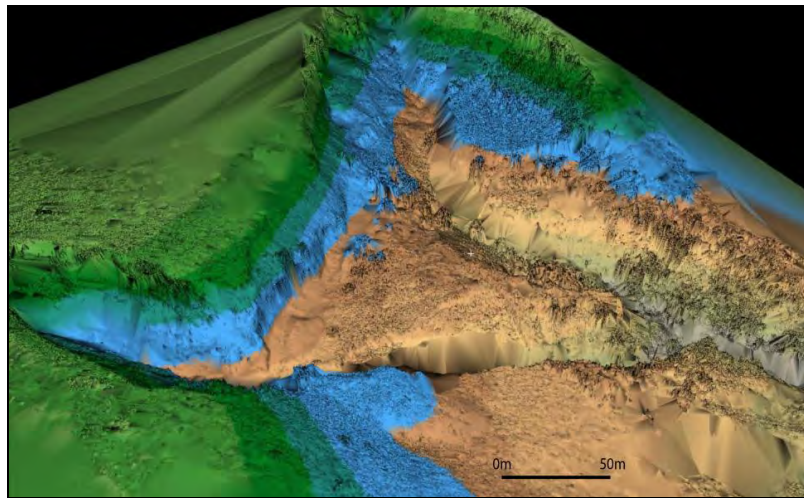


Fig. 48. Representación cartográfica detallada (Romanescu, 2012).

El escáner láser terrestre (TLS) ha demostrado que tiene importantes ventajas sobre las técnicas de medición tradicionales, tales como los métodos directos basados en el uso de cintas métricas o métodos indirectos como la topografía o fotogrametría.

El TLS utilizado para este trabajo (FARO), puede alcanzar una precisión de 2 mm a una distancia de 300 metros y es capaz de adquirir hasta 976 mil puntos/segundo. Esta adquisición rápida de datos permite las coordenadas 3D de millones de puntos en solo 15 minutos. Estos puntos pueden ser transferidos a programas de CAD o SIG para su posterior visualización y tratamiento de datos.

4.1 Zona de estudio

Teziutlán se ubica al SE de la Sierra Norte de Puebla, es un municipio cuya importancia reside en ser centro de servicios y equipamiento a nivel salud, educación y comercio, aunado a su ubicación en principales ejes carreteros, lo convierten en una zona concentradora de empleo respecto al sector industrial (textil) y comercio; tiene gran influencia a nivel regional. Además del gran crecimiento poblacional en las últimas décadas y de las transformaciones espaciales derivadas de las actividades económicas, sociales y políticas del municipio: contaminación ambiental y la

construcción de *espacios de riesgo*, la historia de Teziutlán ha tenido episodios trágicos en cuanto a riesgo y desastre, en particular con el fenómeno de inestabilidad de laderas y su relación con lluvias extraordinarias. Fechas como la de octubre de 1999 deben estar grabadas en la memoria colectiva de los pobladores por la magnitud de los acontecimientos. De los anteriores hechos surge la importancia de este lugar para la aplicación del escaneo láser y de esta forma poder inferir superficies susceptibles a deslizamientos, así como una evaluación del riesgo y el posible monitoreo sistemático.

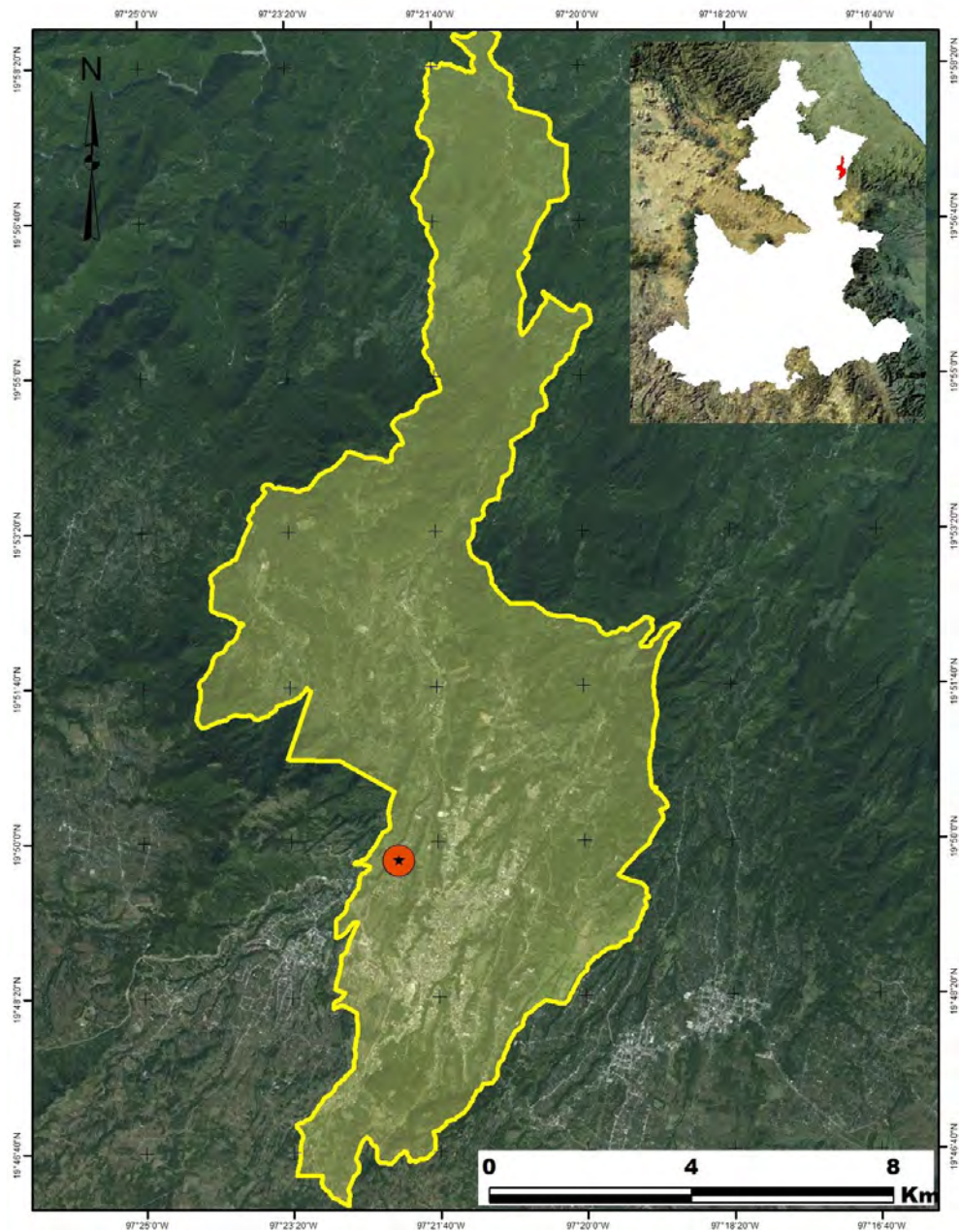


Fig. 49. Ubicación de Teziutlán, Puebla.

Acontecimientos de 1999

A finales del mes de septiembre y los primeros días de octubre de 1999, la Sierra Norte de Puebla (SNP) fue escenario de la combinación de eventos meteorológicos excepcionales; la depresión tropical número 11 provocó precipitaciones intensas, en particular el 4 y el 5 de octubre. En gran cantidad de lugares de dicha región se produjeron distintos procesos gravitacionales, en especial de deslizamientos, cuya incidencia contribuyó en afectaciones a la población expuesta (Alcántara-Ayala, 2004).

Según Hubp (2005), el comportamiento de la depresión número 11 y el frente frío número 5 durante los días que se mantuvieron semi-estacionarios en la zona, aunado a la humedad acumulada con anterioridad por días lluviosos produjeron gran saturación en el suelo. Otros eventos meteorológicos parecidos tuvieron lugar en 1944 por tormentas tropicales, en 1955 por el huracán Hilda, en 1967 por el huracán Beulah, en 1974 por el huracán Fifi, en 1990 por el huracán Diana y, en 1993 por el huracán Gert (Alcántara-Ayala, 2004).

Según Capra (2003), se produjeron alrededor de 3,000 procesos gravitacionales distintos por el tipo de movimiento, volumen de material removido y número de población afectada.

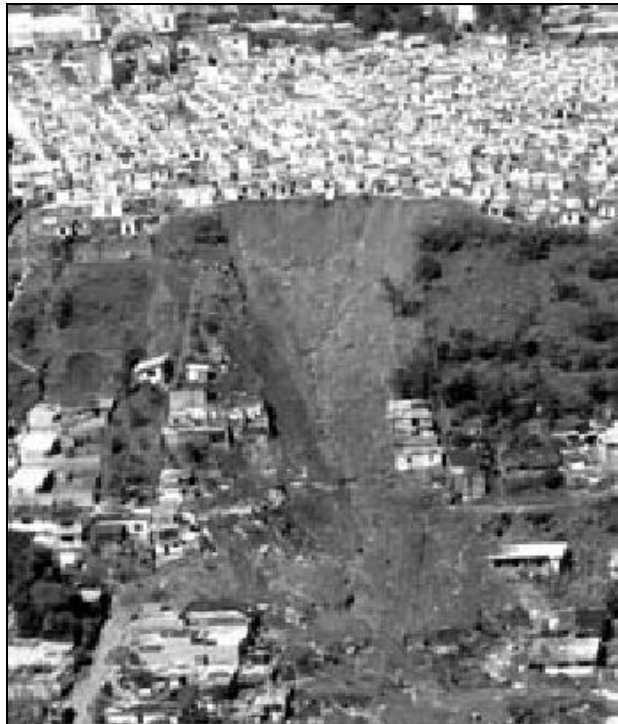


Fig. 50. Deslizamiento en la colonia La Aurora (foto: La Jornada).

El acontecimiento ocurrido en octubre de 1999 se determinó como “desastre” por las víctimas y los daños causados. Aunque desde otra perspectiva, fue considerado como un fenómeno natural que dejó aprendizajes en cuanto a la comprensión del relieve montañoso en un clima húmedo y en relación con la vulnerabilidad y los riesgos (Hubp, 2005).

Según, Miramontes (2011), los estragos en la infraestructura eléctrica, las vías de comunicación, y el drenaje de la ciudad de Teziutlán fueron parte de la influencia de los procesos gravitacionales desencadenados en octubre de 1999. Uno de los momentos más críticos aconteció en día 5 de octubre en la colonia La Aurora, cuya ladera que albergaba viviendas y demás asentamientos humanos se derrumbó, lo que provocó la muerte de más de cien personas, otros más desaparecidos y cuantiosos daños materiales. Las labores de rescate por parte de la población y las autoridades se complicaron por el mal tiempo y la acumulación de lodo y escombros.



Fig. 51. Afectaciones del fenómeno en la colonia La Aurora (foto: SEDENA).

El día 6 de octubre la noticia cobro importancia nacional y el Estado decidió aplicar el plan DN3 y declarar a Teziutlán como zona de desastre (Miramontes, 2011). El ejército se hizo cargo del espacio devastado delimitando las zonas de trabajo post-desastre y ejecutando decisiones desde su particular visión.

Tabla 5. Resumen de daños totales (millones de pesos)

Sector/Concepto:	Daños Directos	Daños Indirectos	Total	Porcentaje
SECTORES SOCIALES	505.0	15.0	520.0	22.4
Vivienda	486.1		486.1	20.9
Educación	16.4	15.0	31.4	1.3
Salud	2.5		2.5	0.1
INFRAESTRUCTURA Y SERVICIOS	1540.0	1.0	1541.0	66.3
Agua y saneamiento	84.6	1.8	86.4	3.7
Energía (CFE)	481.1		481.1	20.7
Transporte y comunicaciones	974.3		974.3	41.9
SECTORES PRODUCTIVOS	190.7	35.0	225.7	9.7
Agropecuaria, pesca y forestal	190.7	35.0	225.7	9.7
<i>Agricultura</i>	132.5	35.0	167.0	7.2
<i>Ganadería</i>	15.4		15.4	0.7
<i>Forestal</i>	35.0		35.0	1.5
<i>Pesca (acuicultura)</i>	7.8		7.8	0.3
ATENCIÓN A LA EMERGENCIA		38.6	38.6	1.6
TOTAL	2 235.7	89.6	2 325.3	100.0

Fuente: Bitrán (2001).

Según Dávila (2003), en la cabecera municipal de Teziutlán, las colonias afectadas fueron La Gloria, Siete Sabios, Campo Verde, Juárez, Xoloco y La Aurora. En esta última, se produjeron deslizamientos cuyo material sepultó decenas de casas y por consecuencia perecieron muchas personas. Otras investigaciones como la de Flores (2002), mencionan otros lugares que fueron influenciados por los procesos gravitacionales, tales como las colonias Aire Libre, Atoluca, Francia, Mexcalcuautla, San Sebastián, Xoloateno y Xoloatl. En cuanto a cifras de protección civil municipal, se contabilizaron alrededor de 1000 viviendas afectadas, y cerca de 500 casas fueron destruidas totalmente.

En el estudio de Miramontes (2011), se argumenta que a más de diez años del desastre en Teziutlán, la zona que tuvo afectaciones en particular la colonia La Aurora se ha vuelto a habitar, en su mayoría por personas que fueron reubicadas en otras colonias pero que siguieron conservando la propiedad de su terreno con la condición de que su uso no fuera habitacional.

En el trabajo de Juárez (2012), se menciona sobre la experiencia que tuvieron los habitantes con el desastre de 1999, la cual no ha logrado fomentar una conciencia crítica sobre los riesgos a los que están expuestos, debido al poco interés o falta de participación en las recomendaciones hechas por los científicos y las instituciones correspondientes.

Las precipitaciones extraordinarias de 1999 actuaron como el principal factor externo de inestabilidad. En esa ocasión se alcanzaron niveles históricos, que influyeron en la infiltración y acumulación de una gran cantidad de agua en el suelo. Sin embargo, según Flores (2002) días antes del desastre se presentó un sismo que también pudo haber influido como detonador de procesos de remoción en masa.



Fig. 52. Imagen derivada del TLS-FARO en el sitio de prueba.

Ámbito regional

La inestabilidad de laderas es un tema de interés por su significado en la comprensión de la dinámica del relieve montañoso en determinadas condiciones geológicas y climáticas. Además, es importante por su relación con la vulnerabilidad y el riesgo. Los acontecimientos de 1999, fueron por cientos de procesos de caída, deslizamientos y flujos sin precedentes en la historia geomorfológica de México.

De acuerdo con Hubp (2005), en el relieve de la zona estudiada se combinan procesos creadores del mismo (tectónica y vulcanismo) y niveladores como la erosión y la acumulación. El fenómeno de octubre de 1999 es un ejemplo de la potente acción erosiva de los procesos gravitacionales y fluviales en un corto tiempo.

La SNP es una de las varias subprovincias de la Sierra Madre Oriental, limita con dos grandes provincias fisiográficas: el Eje Neovolcánico y la Planicie Costera del Golfo de México. Esta región ubicada en la parte NE del estado de Puebla, comprende las sierras de Zacapoaxtla, Huauchinango, Teziutlán, Tétela de Ocampo, Chignahuapan, y Zacatlán. La zona es caracterizada por la erosión intensa y el desarrollo de cárcavas, principalmente en rocas sedimentarias que están cubiertas por rocas volcánicas. Los procesos de remoción en masa son comunes en esta zona montañosa debido a los materiales frágiles y el tectonismo de la zona (Alcántara-Ayala, 2004). El clima de la región es templado cálido, las temperaturas medias fluctúan entre 22 y 26 centígrados. En gran parte de su territorio llueve durante todo el año.

Según Hubp (2005), diferentes factores fueron determinantes para que ocurrieran y puedan seguir activándose procesos de remoción en masa en la SNP. Entre ellos, cabe destacar:

- 1) La estructura geológica. Los procesos de remoción en masa ocurrieron principalmente en la capa superior de suelos volcánicos jóvenes poco consolidados y materiales intemperizados. Estos procesos se presentaron principalmente en laderas de valles fluviales y en circos de erosión. Los procesos de mayor magnitud fueron aquellos que incluyeron al sustrato rocoso, favorecidos por la presencia de rocas sedimentarias plegadas, particularmente las del conjunto del Triásico-Jurásico, así como por los contactos entre rocas volcánicas y sedimentarias plegadas.
- 2) Influencia del relieve. El relieve ha mostrado algunos rasgos que son testigos de antiguos procesos gravitacionales. La influencia del relieve en los procesos actuales radica principalmente en la altura de las laderas y su gradiente, mismos que al conjugarse con el factor geología (litología, estructura), condicionan los procesos en cuanto a su tipo y magnitud.
- 3) Influencia del agua. Las condiciones climáticas han permitido la presencia de agua en abundancia en la Sierra Norte de Puebla, cuyos valores de precipitación son muy altos. La vegetación tropical de esta región, protege al suelo de los efectos de la lluvia y reduce su erosión.
- 4) La influencia de la actividad humana. La deforestación ha desprotegido a gran parte de la Sierra Norte antes cubierta por densos bosques, los cuales se han transformados en tierras de cultivo que no permanecen mucho tiempo, ya que se erosionan por el proceso común de desarrollo de cárcavas y deslizamientos. Muchos de los procesos ocurrieron en laderas deforestadas, en la capa de suelo y la roca subyacente. Así mismo, las carreteras que atraviesan la región favorecieron los procesos gravitacionales.

Los problemas sociales también son de gran importancia, como lo es el abandono de cultivos. Las construcciones urbanas en laderas empinadas de cerros y valles montañosos, además del riesgo, contribuyen al desarrollo de la remoción en masa. Las construcciones que se sitúan en zonas peligrosas favorecen o aceleran los procesos gravitacionales por la deforestación, el peso de las construcciones, el drenaje, la modificación del perfil de las laderas y el régimen hidrológico.

- 5) Efectos socioeconómicos. Los daños fueron calculados en más de 2, 300 millones de pesos, murieron 263 personas y 45 desaparecidas. En 41 municipios los daños fueron mayores, en 28 fueron menores y 12 presentaron

solo afectación a la agricultura. En total fueron afectadas 16, 511 viviendas, 199 escuelas, 50 inmuebles de patrimonio cultural, 59 edificios públicos federales, ocho centros de salud, y se produjeron grandes daños a carreteras.

El acontecimiento ya citado no ha sido un hecho aislado sino continuo en el tiempo, que aumenta sus dimensiones por la mayor presencia de población, la cual ejerce un fuerte impacto en el paisaje a través del aumento de las construcciones urbanas, las vías de comunicación, la deforestación, y la transformación de bosques en campos de cultivo (Hubp, 2005).

De acuerdo con Hubp, (2005), el relieve de esta región ha sido testigo de una historia prolongada de procesos gravitacionales que han modelado el relieve a lo largo del Cuaternario. Los cambios derivados de los acontecimientos de 1999 no ocurrieron de manera lenta y gradual, sino en un breve lapso de días en que se removieron millones de metros cúbicos de material rocoso en una superficie de unos 4,000km².

Debido a que la precipitación fue el mecanismo detonador, la mayoría de los procesos fueron de caída o deslizamiento que se convirtieron en flujos lodosos. Muchos son la repetición en una misma localidad de procesos semejantes ocurridos con anterioridad, mientras un gran número de ellos ocurren por primera vez, como las corrientes de derrubios.

Los deslizamientos inducidos por precipitación han ocurrido en diferentes partes del mundo. Sin embargo, en lugares donde los fenómenos meteorológicos como los huracanes, son recurrentes, los estragos son mayores. Es importante considerar que la relación entre el clima y la inestabilidad de laderas es compleja debido a la gran variedad de mecanismos de falla. Según Corominas (2006), los temporales de gran intensidad y corta duración producen de manera generalizada deslizamientos superficiales, corrientes de derrubios y desprendimientos; eventos lluviosos de intensidad baja a moderada prolongados durante algunos días o semanas reactivan deslizamientos y coladas de barro. Los grandes deslizamientos tienen un comportamiento muy dependiente del contexto geológico-geomorfológico en el que se encuentran, pero con frecuencia sus reactivaciones están asociadas a periodos anormalmente húmedos estacionales. También las modificaciones antrópicas (talas) contribuyen en la aparición de nuevas roturas, aparentemente espontáneas.

Diversas catástrofes han generado la discusión no solo sobre el cambio climático sino también sobre las consecuencias de las transformaciones del uso del suelo y degradación del bosque en la estabilidad de las laderas. En el caso de la SNP históricamente ha estado en contacto con diversos fenómenos meteorológicos de gran magnitud como los huracanes debido a su cercanía con el Golfo de México, así como a la influencia de frentes fríos. Los procesos de remoción de masa son comunes en esta zona montañosa debido a los materiales frágiles y el tectonismo de la zona. La Sierra Norte de Puebla fue a nivel nacional una de las regiones más afectadas con deslizamientos e inundaciones provocados por las lluvias de octubre de 1999.

Según Hubp (2005), las zonas más vulnerables a los procesos de remoción en masa son las porciones central y meridional de la ladera superior de la Sierra Norte de Puebla. La primera conformada de montañas de rocas sedimentarias mesozoicas plegadas, y la segunda con una cobertura de más de 30 m de rocas volcánicas con poca o nula consolidación y en proceso de dismantelamiento.

Complejidad de la relación entre inestabilidad de laderas y precipitación

De acuerdo con Corominas (2006), la rotura de la ladera en un instante preciso requiere de la presencia de una acción externa cuyo efecto es aumentar las tensiones desestabilizadoras o reducir la resistencia del terreno. Los mecanismos desencadenantes más frecuentes son la lluvia, la fusión de nieve, las sacudidas sísmicas, las erupciones volcánicas, y la erosión fluvial. Los movimientos de ladera también pueden ocurrir de forma espontánea sin ningún desencadenante aparente como resultado, por ejemplo de la relajación, de tensiones provocadas por un rápido encajamiento fluvial o por la pérdida progresiva de la resistencia de los materiales que componen la ladera, como resultado de la meteorización. Es necesario tener presente, además, que las modificaciones de las laderas por la acción del hombre alteran la distribución de esfuerzos y favorecen la desestabilización. Sin embargo, el establecimiento de la relación causa-efecto para la actividad humana no siempre es posible por que la inestabilidad puede tener lugar mucho tiempo después de producirse la modificación.

La infiltración del agua de lluvia en las laderas aumenta las presiones en los poros y en las fisuras del terreno, debido a esto, reduce su resistencia. La relación entre la cantidad de agua infiltrada y la que fluye de la ladera regula los cambios en la presión del agua subterránea (fig. 53). El ritmo de infiltración lo regula la pendiente topográfica, el recubrimiento vegetal, la permeabilidad del terreno y el grado de saturación.

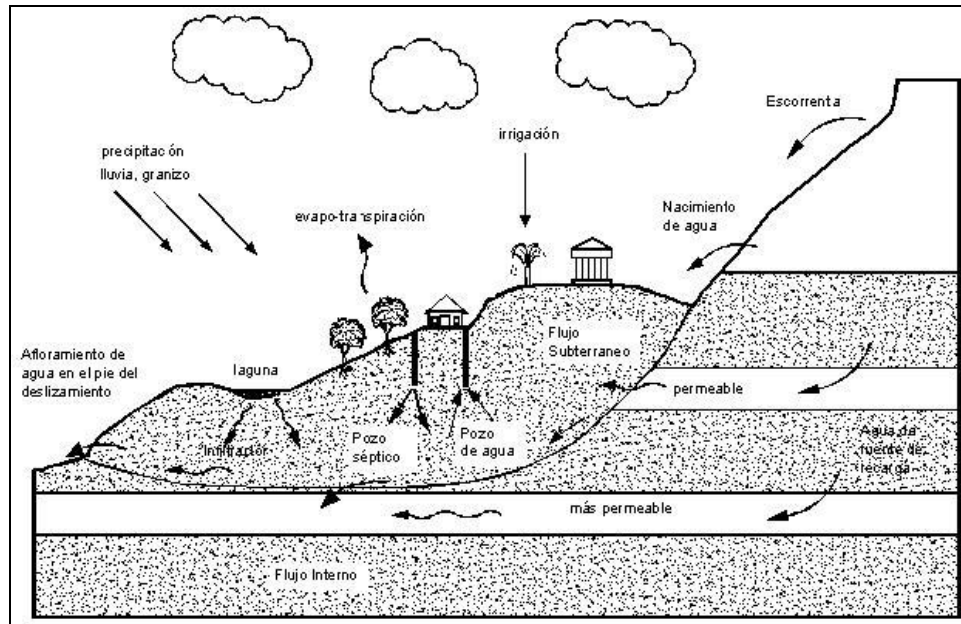


Fig. 53. Efecto del agua en los deslizamientos (Suárez, 1998).

Por otro lado, la estabilidad está condicionada por la resistencia del terreno, que varía en función de la naturaleza de los materiales, la estructura geológica y la geometría de la ladera. Por todo lo anterior, la lluvia crítica para producir la rotura varía de una ladera a otra y los umbrales regionales de lluvia capaces de provocar deslizamientos solo se pueden estimar de manera aproximada. A pesar de estas limitaciones, el establecimiento de umbrales de lluvia constituye una herramienta de inestimable valor para poner a punto sistemas de alerta y gestionar el riesgo (Corominas, 2006).

La complejidad de la relación entre la lluvia y los deslizamientos se puede distinguir en algunos ejemplos documentados en los Alpes franceses que puso en evidencia que el vínculo entre las condiciones meteorológicas y las deformaciones de la ladera es débil. Los cambios geométricos en la masa rocosa desplazada pueden modificar las propiedades hidrológicas y mecanismos de la ladera. La apertura o cierre de grietas por la distorsión de la masa rocosa abre nuevas vías para el flujo subterráneo y produce cambios importantes en la generación de presiones de agua. En algunas laderas, la aceleración de los desplazamientos conduce a una rotura fácil, en otras, el avance del pie del deslizamiento sobre el fondo del valle actúa de soporte, lo que lleva a la deceleración progresiva y estabilización del movimiento.

Muchas primeras roturas son más bien el resultado de un proceso evolutivo de la ladera a largo plazo que la respuesta a un desencadenante concreto. Los episodios de lluvias excepcionales no siempre son una condición necesaria para la rotura.

Por el contrario, la lluvia es la causa más frecuente de la reactivación de deslizamientos latentes y de la aceleración de los ya activos. La relación entre la lluvia y la respuesta de los grandes

deslizamientos no se puede establecer fácilmente; ya que su comportamiento hidrológico no se conoce suficientemente. El avance en este campo requiere de la modelación mecánico-hidrológica y de una gran cantidad de datos sobre las propiedades del terreno e instrumentales, raramente disponibles.

En general, los periodos húmedos de larga duración (a escala estacional, anual o decenal) parecen tener cierta influencia en la reactivación de los grandes deslizamientos, aunque esta relación solo puede establecerse de manera cualitativa.

En estudios de caso en Europa, se encontró también que, si bien algunas reactivaciones estuvieron precedidas por periodos lluviosos estacionales muy por encima del promedio, hubo periodos incluso más húmedos sin que se detectaran aceleraciones en los movimientos. Estos ejemplos sugieren que el análisis de los grandes deslizamientos necesita tener en cuenta otros factores. Algunos grandes deslizamientos responden a lluvias intensas de corta duración. Esto se da en contextos geológicos muy particulares que favorecen la inestabilidad (aporte extraordinario de agua subterránea y su contacto con calizas o cambios geométricos bruscos).

Sorprendentemente, lluvias de unas pocas decenas de milímetros en un día, inducen aceleraciones al momento. La explicación está en la presencia de grietas en el terreno que permiten la entrada directa del agua de lluvia al deslizamiento y la presencia de un torrente que erosiona y produce la aceleración del movimiento en pocas horas (Corominas, 2006).

A continuación se presenta un estudio de caso en Xoloateno, Teziutlán con la aplicación del escáner láser terrestre FARO.

4.2. Aplicación de la metodología en el sitio de prueba

Para este estudio, el TLS FARO se aplicó a la inestabilidad de laderas de Xoloateno, Teziutlán a través de la metodología de Nagalli (2012) que consistió en las siguientes etapas:

- 1) Flujo de trabajo de la investigación, que se desglosa en los siguientes puntos:
 - a) Alcance. Definición del área en estudio

El estudio se centra en el proceso gravitacional de caída que ocurrió el sábado 10 de julio del presente año aproximadamente a las 11:30 am en el barrio de Xoloateno en Teziutlán, Puebla. Los materiales geológicos que presenta esta zona son ignimbrita y andesita basáltica; en la parte superior del cerro abundan las riolitas y en la parte inferior las andesitas.

De acuerdo con los residentes, un día anterior al acontecimiento llovió en abundancia. La parte que se colapso fue anteriormente un relleno sanitario; hace tres meses se construyeron casas y se descargaron los escombros en este sitio. En la parte superior del escarpe se encuentran unos establos que se desocuparon después del desastre de 1999. Sin embargo, el drenaje de casas arriba se conduce hacia esta parte.

Como resultado de este movimiento de ladera se formó una oquedad con un diámetro aproximado de 28 metros.

En el informe de protección civil local se menciona que dos familias fueron desalojadas y se les ofreció un refugio temporal. También se señala que se desprendieron cerca de 600 toneladas de suelo y roca, además de que el derrumbe ocupó una extensión de 40 metros de largo y 30 metros de ancho.



Fig. 55. Proceso Gravitacional de Caída en Xoloateno.

De acuerdo con Flores (2002), Teziutlán presenta características geomorfológicas donde el peligro por inestabilidad de laderas ha sido recurrente. El relieve de esta zona se caracteriza por un descenso constante en forma de rampa, en dirección de Sur a Norte.

En la geología predominan los flujos piroclásticos de pómez provenientes de la caldera de Los Humeros, material de origen volcánico del Cuaternario, pertenecientes al Cinturón Volcánico Transversal. El intemperismo de estos materiales rocosos, poco consolidados y con alto contenido de arcilla, ha originado la formación de suelos residuales.

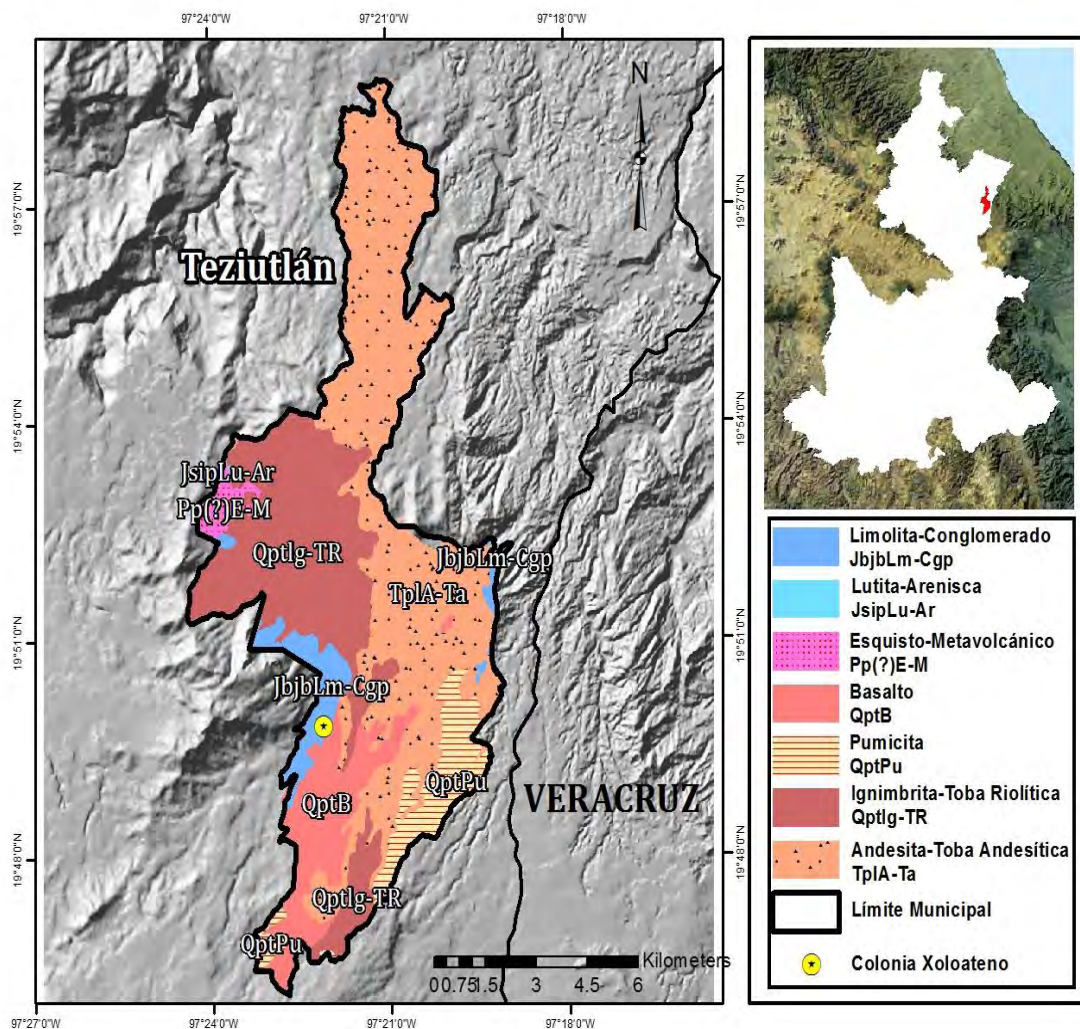


Fig. 56. Mapa geológico de Teziutlán.

El suelo que abunda es el andosol, derivado de los materiales volcánicos depositados durante la actividad volcánica de la zona; este tipo de suelo es muy ligero y con alta capacidad de retención de agua.

Los procesos de ladera que han ocurrido en esta zona, han sido principalmente movimientos complejos, los cuales se iniciaron como deslizamientos y, posteriormente, se convirtieron en flujos de lodo en laderas con pendientes mayores a 15°. También han tenido lugar derrumbes o caídas, en pendientes casi verticales.

Los factores internos que han causado inestabilidad están relacionados principalmente con las características geológicas de Teziutlán. Según Capra (2002), los movimientos complejos se presentaron en paleosuelos ricos en arcillas intercalados con una secuencia de pómez/escoria, resultado de las erupciones plinianas de la caldera de Los Húmeros, con una capa removida de entre 1-2 m. Mientras que, en el caso de los flujos, la capa del material removido fue muy superficial, ya que éstos se originaron en pendientes pronunciadas, constituidos por depósitos ignimbríticos de poca consolidación y con un alto contenido de arenas. Estos materiales volcánicos se localizan en morfologías de rampa y taludes; en los principales valles erosivos se concentraron la mayor parte de los procesos de remoción en masa, como consecuencia de una mayor erosión lateral.

- b) Investigación de campo. Se definen los atributos del equipo (malla, contraste, distancia, etc.); imagen del área de estudio; generación de nube de puntos; adquisición de datos reales y virtuales.

Se realizaron cuatro campañas de escaneo en cuatro lugares diferentes de la ladera de Xoloateno (bases) en un solo día, después de ocurrido el fenómeno. Estos son los principales atributos del escáner láser FARO Focus 3D X 330 utilizado:

El FARO Láser Scanner, es un dispositivo terrestre en 3D de alta velocidad para el levantamiento y documentación a detalle (fig. 54). El escáner utiliza la tecnología láser para generar replicas tridimensionales muy detalladas de los entornos y geometrías complejas en cuestión de minutos. Al recrear el mundo real dentro de un espacio virtual, el escáner láser puede crear una imagen que es en realidad una colección de millones de puntos de medición en 3D que se traduce en una representación digital precisa.

El escáner FARO tiene un alcance de 330 metros. Sin embargo, a 800 metros suele ser el límite práctico para la digitalización de paredes rocosas. La toma de imágenes se realizó a una velocidad de 976.000 puntos por segundo con variedad de precisión y posición. Este equipo láser contiene una cámara a color (70 mega píxeles), posee un láser clase 1, su peso es de 5.2 kg. Presenta un tamaño

de 240 x 200 x 100 mm. El control del escáner se realiza por medio de una pantalla táctil, su precisión es de hasta ± 2 mm. Tiene una reducción del ruido del 50% entre otras características.



Fig. 54. Escáner Láser Faro (redrawn by M. Shand).

El FARO SCENE, es un software diseñado específicamente para FARO Láser Scanner, combina la facilidad de uso y una experiencia 3D para formar una solución completa de procesamiento de escaneo. Este programa también gestiona los datos escaneados de forma fácil y eficiente con reconocimiento automático de objetos, registro de exploración, y el posicionamiento.

Las exploraciones FARO son capaces de complementar los equipos de campo de topografía, además de que documentan las características del terreno, también lo hacen con paredes, conductos y otras infraestructuras existentes. También se pueden realizar varias exploraciones desde diferentes posiciones y luego se puede colocar de forma automática para crear una nube de puntos de cohesión.

El FARO Focus 3D puede ser operado de forma sencilla a través de una pantalla táctil integrada. Además de que permite ahorrar tiempo de análisis en comparación con los escáneres laser convencionales. Debido a su peso y tamaño portátil, el Focus 3D puede ser manejado por una sola persona sin la necesidad de equipo adicional.

El FARO Focus 3D X 330 está diseñado para aplicaciones al aire libre debido a su pequeño tamaño, peso ligero, largo alcance, posibilidades de exploración prolongadas.

Si bien, con el TLS se puede obtener la topografía a detalle de la zona de estudio, también existen algunos problemas con la refracción (puntos de ventana) y falsa reflectancia.

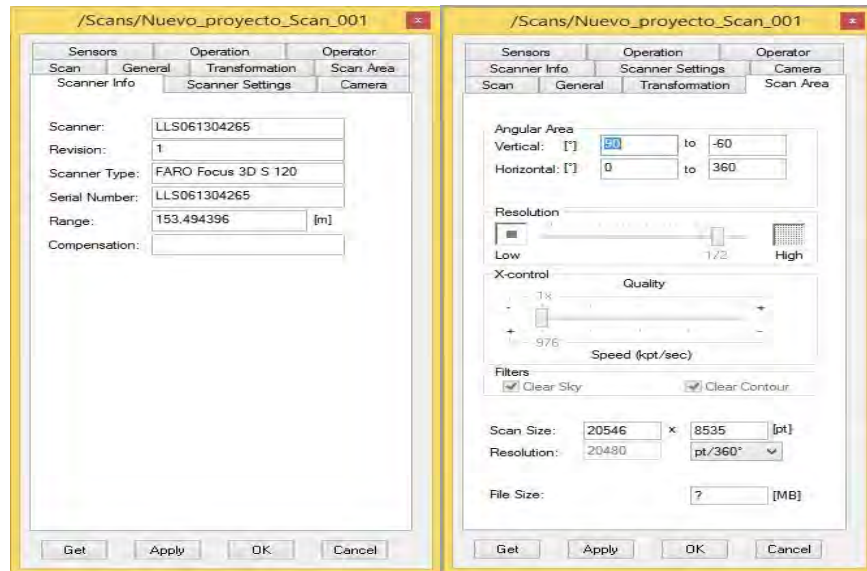


Fig. 57. Ventanas con información del escáner y del área escaneada.

En estas ventanas destaca la información de la distancia en la que fue tomada la primera campaña de muestreo que fue de 153 metros respecto al objetivo. Por lo abrupto del terreno se salió un poco de los estándares recomendados por la metodología a pesar de restar precisión y calidad, la imagen obtenida tiene una alta resolución.

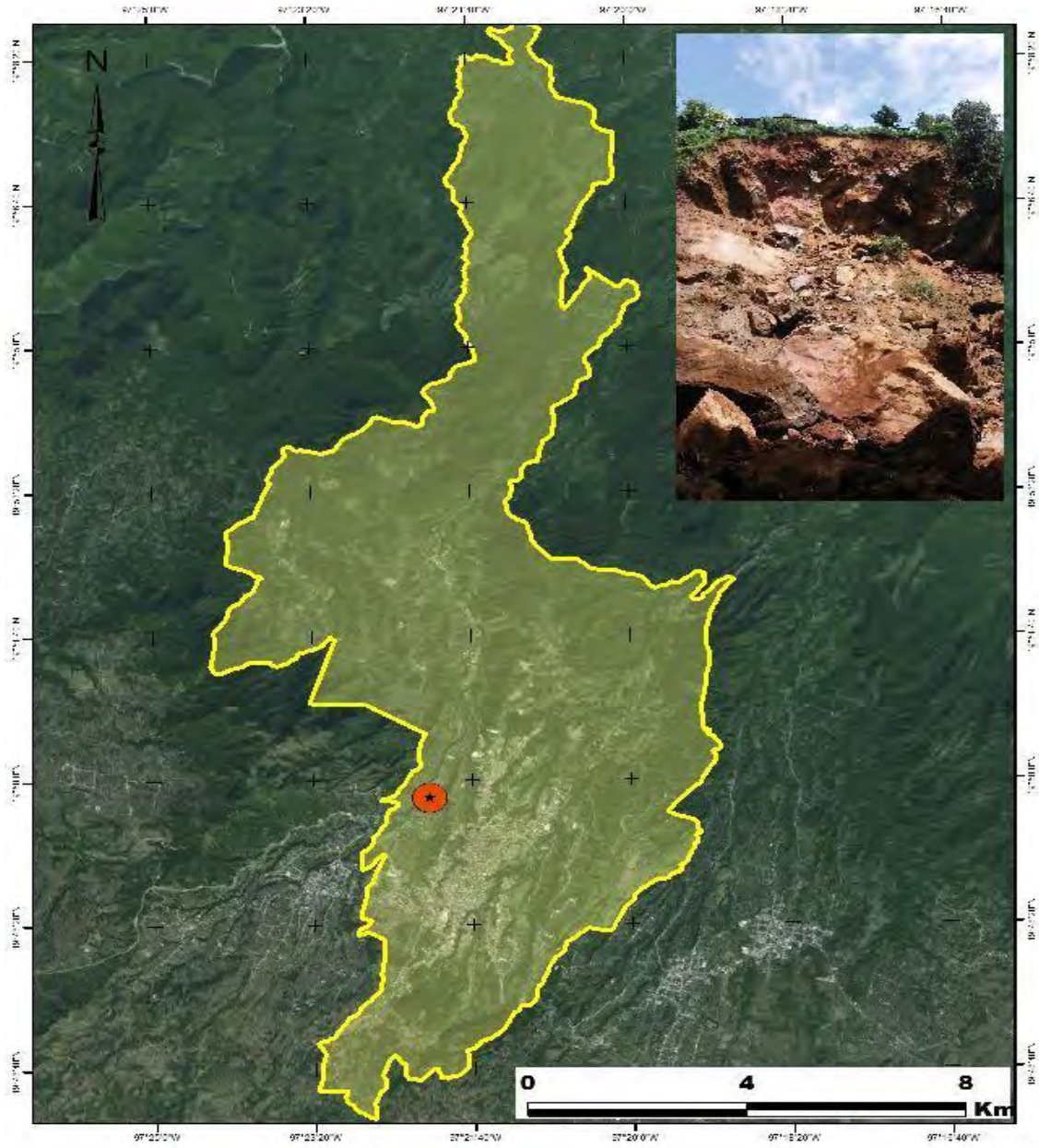


Fig. 58. Zona en estudio.

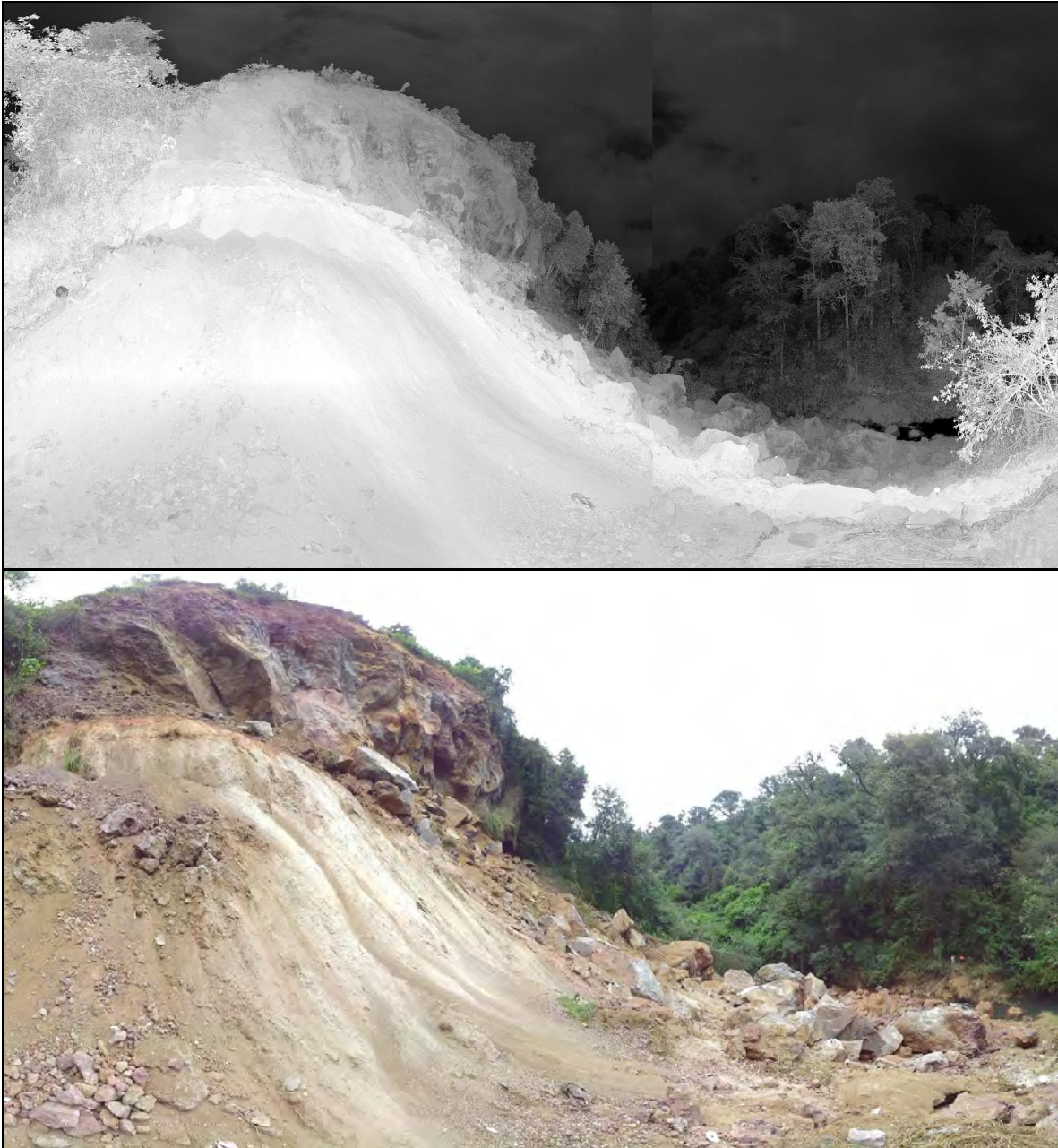


Fig. 59. Vista planar en blanco y negro y a color del área en estudio.

Las anteriores imágenes o nubes de puntos son parte del primer escaneo, tomadas desde una base al Oriente del proceso gravitacional de caída. Estas ubicaciones de análisis deben cumplir dos criterios importantes: una base estable/ una vista hacia el objetivo sin obstáculos. En este caso se dificulta el establecimiento de estas, por las limitaciones topográficas de la zona. A pesar de ello la ubicación de las bases para realizar el escaneo fue muy cercana al objetivo, sacando ventaja de una vista panorámica por ser un deslizamiento pequeño.



Fig. 60. Vista del área en estudio con las esferas de control.

Los escaneos se tomaron desde una posición casi perpendicular al deslizamiento. Faltaría realizar un estudio multi-temporal para detectar cambios significativos en este sitio.

Un conjunto de datos del escáner láser no tiene una calidad constante en el dominio espacial, como la densidad de puntos, la exactitud posicional, la geometría y la morfología de la superficie de escaneo varían constantemente durante la campaña.

Se editaron las imágenes obtenidas con el software FARO SCENE. Estas nubes de puntos tienen diferentes vistas (3D, planar), originalmente aparecen en blanco y negro, pero se les puede aplicar color.

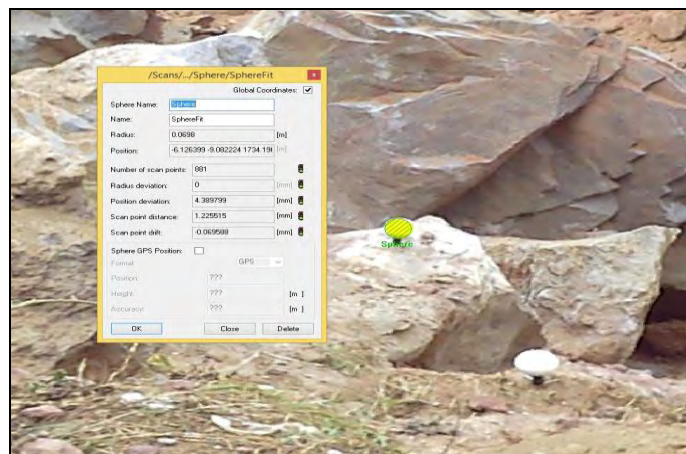


Fig. 61. Propiedades de la esfera de control.

Esta ventana ofrece los datos de radio y posición de las esferas, la distancia del punto escaneado y el número de puntos escaneados. Para una medición mas precisa es recomendable que el radio de la esfera se encuentre en los valores de 0.0690 m.

Los puntos de control del terreno (esferas) deben distribuirse teniendo en cuenta las áreas que son propensas a tener menor precisión, aunque la poca accesibilidad no permite una fácil medición. Por esta razón, una fase de planificación que tenga en cuenta factores que afectan la calidad puede ser muy útil.

Un escaneo de muy alta resolución que carece de precisión solo conduce a productos de baja calidad que son propensos a una mala interpretación.

Un aumento en la resolución significa más puntos, pero también requiere una mayor precisión y más calidad en general. Una mayor exactitud se puede lograr si se tiene cuidado de la planificación del escaneo.

- c) Investigación de gabinete. Se procesan los datos derivados del TLS; se identifican estructuras geológicas y geotécnicas; se miden los parámetros geométricos de las estructuras identificadas; se agrupan estructuras similares; se comparan datos reales y virtuales; y se evalúan los errores y limitaciones del método.
- d) Análisis de estabilidad de laderas. Se generan diagramas estructurales; se le da tratamiento a los datos estructurales; y se hace análisis cinemático de deslizamientos y otros procesos gravitacionales.

Cabe destacar que para los propósitos de este trabajo, solo se llevaron a cabo los dos primeros incisos.

- 2) Validación de la técnica. En esta etapa se verifica la aplicabilidad de la herramienta propuesta, se establecen las directrices y limitaciones de los equipos.

El uso al aire libre del equipo láser requiere de buenas condiciones meteorológicas (días soleados o medio nublados), ya que las gotas de agua actúan como escudos a los rayos del sol, impidiendo la adquisición de datos.



Fig. 62. Condiciones atmosféricas idóneas para realizar campañas de escaneo.

Ya definida el área a escanear, una consideración importante que facilita la georreferenciación de los datos y minimiza los efectos de distorsión de la imagen se refiere a la colocación y enrutamiento del equipo para el objeto que va ser escaneado.

En cuanto a la colocación de los equipos, no debe estar a una distancia mayor a 100 m del objeto a ser fotografiado (rango limitado del dispositivo).

En lo que respecta a la dirección del equipo, este debe ser dirigido apuntando al norte verdadero, por la brújula. Esto evita la necesidad de un pre-tratamiento de los datos, la rotación de coordenadas a un nuevo sistema de ejes, y los errores asociados. El dispositivo, adjuntado a un trípode se fija en el suelo y es calibrado por nivelación de burbuja. Los cables de alimentación son conectados a las baterías y se conecta la red de cables en las computadoras para el almacenamiento de datos.

Para la resolución de la imagen, antes del comienzo de las mediciones, fue necesario parametrizar el escáner láser con la adquisición de datos de malla (distancia entre puntos).

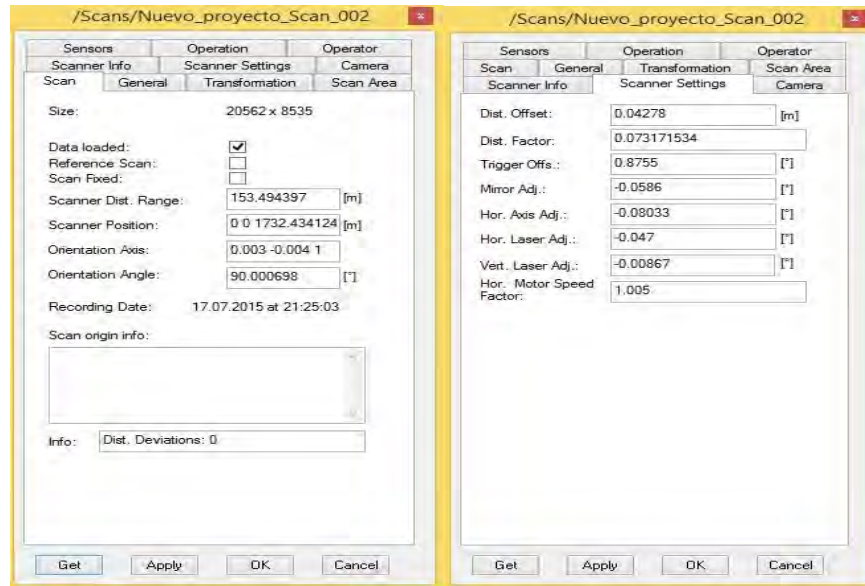


Fig. 63. Configuración del escaner.

En el caso del escáner FARO utilizado su principal desventaja es que no cuenta con el accesorio de GPS, de esta manera se dificulta la georreferenciación de los datos.

Con el uso del TLS, se puede adquirir de manera eficiente una escena (nube de puntos 3D). El problema de la utilización de esta tecnología es que, la nube de puntos obtenida es muy densa, por lo que el procesamiento de los datos puede ser muy laborioso. Esto es debido al gran volumen de datos que se deben examinar para identificar las características de la muestra y para eliminar la información superflua. Además, cuando se aplica la técnica a un caso real algunas dificultades pueden surgir, debido a la naturaleza de los sitios, a la distancia entre la estación y los objetivos, a la presencia de vegetación, a la necesidad de establecer un marco de referencia para las mediciones que se mantenga estable en el tiempo, entre otras cuestiones.

Un conjunto de datos de un escáner láser tiene una serie de características que definen su calidad general. Este valor define un umbral de tolerancia para decidir la idoneidad/aceptación del producto final para un determinado usuario.

La densidad de los puntos se correlaciona directamente con la calidad de los modelos digitales finales ya que las áreas muestreadas con menos puntos degradan la exactitud de interpolación debido a la falta de información.

Para los propósitos de una evaluación preliminar, se considera útil, dependiendo de la zona de estudio y las limitaciones del método, una resolución de imagen que cubra grandes zonas, sin perder la calidad de datos.



Fig. 64. Imagen con gran cobertura del proceso gravitacional.

Las nubes de puntos obtenidas en campo por el equipo láser aun no están listas para su aplicación, lo que requiere de un tratamiento previo de los datos. El primer paso de este tratamiento es la eliminación de los puntos de captación de imagen que no pertenecen al objeto de interés (deslizamiento). Esta cuestión es positiva, ya que evita una no visualización de los puntos que constituyen al deslizamiento y sus estructuras. Además, el post-tratamiento de la nube, se compone de un menor número de puntos, y se hace más ligero con el procesamiento por computadora (girar imagen, zoom, elección de atributos, etc.).

- 3) Resultados de campo y limitaciones del método. Las pruebas de campo mostraron que algunas cosas pueden interferir en los resultados, como el posicionamiento y el número de estaciones (lugares donde se ha instalado el equipo), la presencia de deflectores y áreas de sombreado, resolución de puntos de malla y el sistema de referencia adoptado.

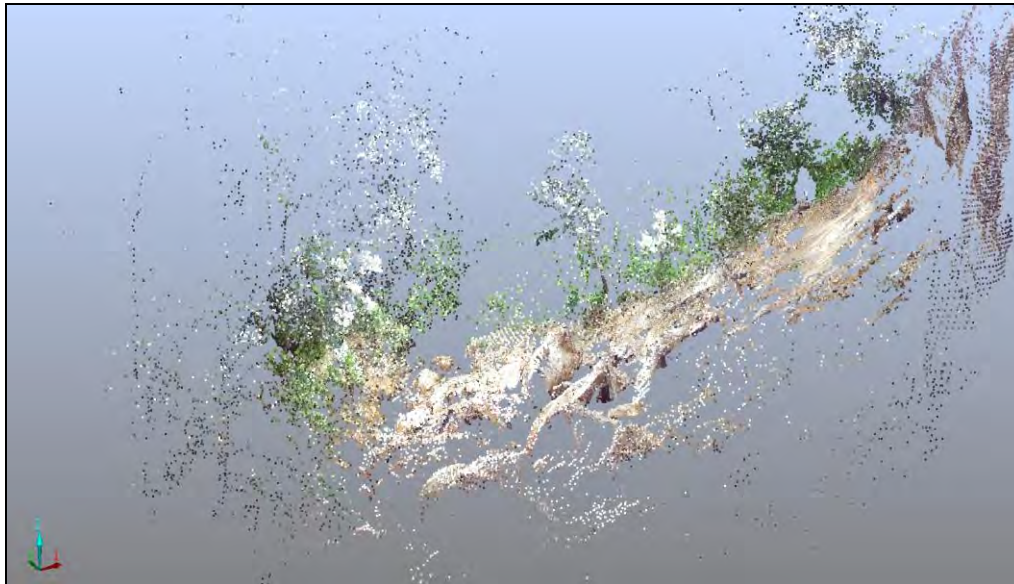


Fig. 65. Empalme de las nubes de puntos de los cuatro escaneos.

La colocación de las estaciones deben tener en cuenta algunas especificaciones técnicas de los equipos, tales como la distancia desde el equipo para el objeto que se explora, la incidencia de la luz del objeto, la disponibilidad de tiempo y gama de equipos, la resolución de malla, entre otros. El número de estaciones debe ser lo suficientemente amplio para que no existan fallas significativas en la imagen obtenida. El uso de sólo dos ubicaciones distintas de equipos (estaciones) es suficiente para los usos de la tecnología en la geomorfología.

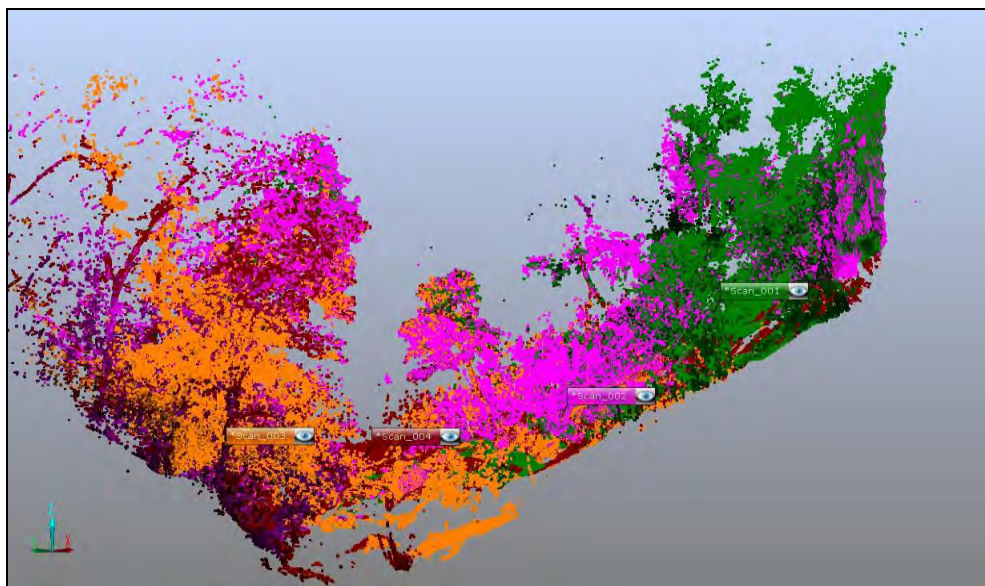


Fig. 66. Vista 3D de los cuatro escaneos juntos.

La presencia de deflectores (árboles, personas) entre el escáner y el objeto impiden la consecución de los datos del objeto. Del mismo modo áreas de sombreado causadas por el objeto, dificultan el logro de una red continua de puntos. Este efecto se puede minimizar mediante el uso de más de un dispositivo de funcionamiento. La incidencia de la luz en el equipo se puede ajustar internamente en el software.

La resolución de la malla se puede obtener de acuerdo a las características de cada escáner. En general la mayoría de equipos comerciales de uso externo permiten una exactitud milimétrica, dependiendo de la distancia escáner-objeto.

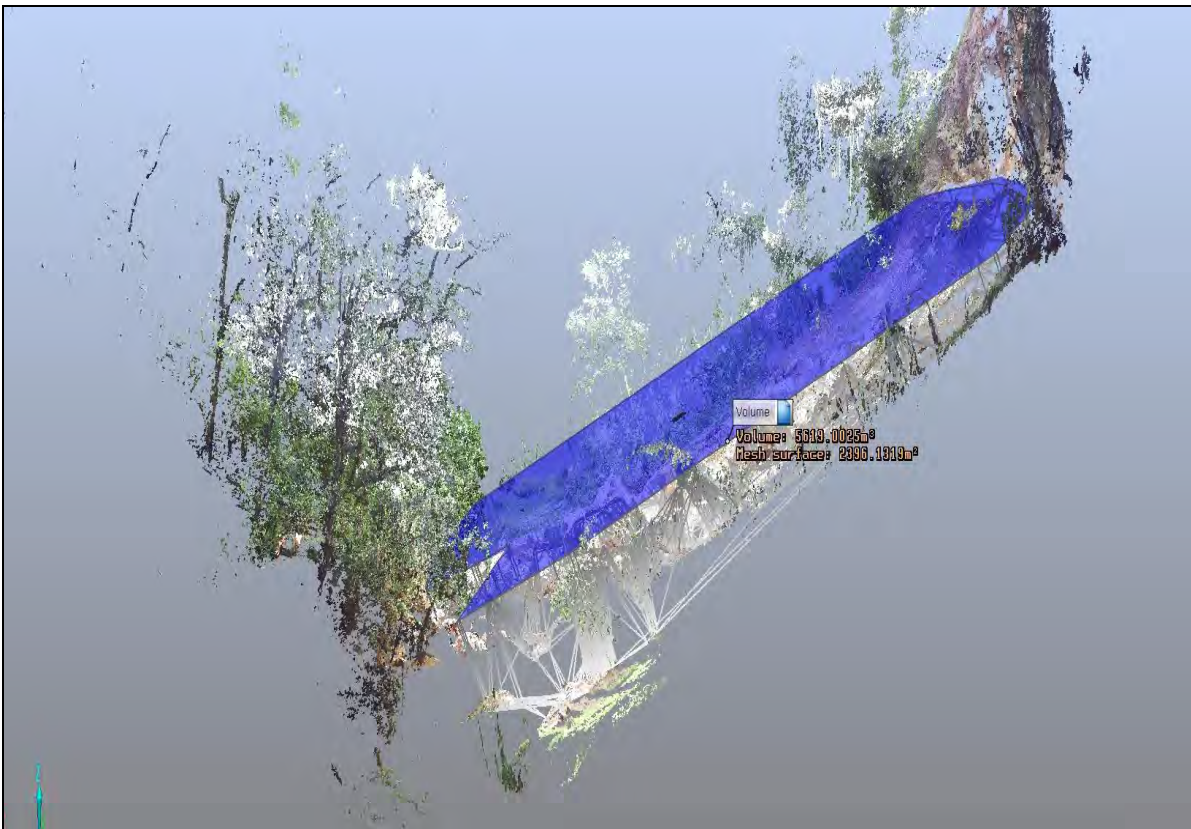


Fig. 67. Cálculo aproximado de la masa colapsada.

Resultados y conclusiones

Se ha llevado a cabo una investigación de campo en un proceso gravitacional (caída) en el barrio de Xoloateno, Teziutlán a través del escaneo láser terrestre. El objetivo fue poner en funcionamiento el aparato y obtener escenas detalladas del fenómeno, además de una aproximación del volumen de la masa colapsada. Se muestra que el TLS es útil para registrar una cantidad masiva de información 3D en un tiempo relativamente corto. Para estudios más complejos se necesita una mayor experiencia con el escáner y el dominio del software en este caso el FARO SCENE. Para el sitio de Xoloateno se obtuvieron imágenes después de ocurrido el evento. Sin embargo, sería importante realizar escaneos en más sitios de riesgo para detectar movimientos del terreno activos y de esta manera poder precisar información como la velocidad de desplazamiento y, así diagnosticar laderas susceptibles con antelación y construir modelos digitales de gran calidad que coadyuven a la prevención de riesgos hacia la población.

Esta investigación ha sido un buen preámbulo para el entendimiento de los aspectos básicos del escaneo láser y su aplicabilidad en gran cantidad de ámbitos científicos y de la sociedad, no obstante que la accesibilidad a esta tecnología sigue estando distante para un uso más popular.

Es importante destacar la validez de la aplicación del escaneo láser en los estudios de inestabilidad de laderas, ya que se pueden definir los parámetros a utilizar como la predicción, el monitoreo, la modelización, entre otros.

La inestabilidad de laderas representa un problema importante para la evaluación del riesgo, se requiere capacidad científica y técnicas exigentes, tanto para la vigilancia y para los aspectos de modelado. Los métodos para apoyar las acciones de mitigación del riesgo puede ser un sistema integrado que incluya mediciones de escaneo láser y otras técnicas geotécnicas- topográficas in-situ.

La adquisición de información precisa del terreno ha sido fundamental en la mejora del conocimiento y la comprensión sobre el medio físico. Los numerosos datos que se pueden obtener a través del escaneo láser aumentan la fiabilidad de las interpretaciones del terreno.

Las ventajas principales del escaneo láser sobre otros métodos de topografía son su medición precisa, su alto nivel de automatización, rapidez y cobertura.

Además de la aplicación de tecnologías geo-espaciales y técnicas avanzadas de modelado, un aspecto crucial para el análisis de riesgos y la predicción de deslizamientos depende de reunir mayor conocimiento sobre el fenómeno. Por ejemplo, hace falta mayor reconocimiento de superficies susceptibles a deslizamientos y comprensión de las condiciones que dan lugar a deslizamientos. Algunas observaciones de campo indican que las áreas de pendiente desnudas probablemente carecen de deslizamientos perceptibles, ya que son demasiado pequeños o delgados para el escaneo láser, y sus depósitos a menudo se han eliminado o modificado por la erosión, la pérdida de masa y por la actividad humana.

Se debe resaltar la importancia de los estudios multidisciplinarios sobre deslizamientos y riesgos a través de la combinación de temas como la teledetección, ciencias de la tierra y la cuestión social.

Los sensores y software de las técnicas tradicionales son menos caros que los equipos de teledetección. Sin embargo, los instrumentos de contacto son afectados por los altos costos de instalación. En cambio, un solo equipo de teledetección puede ser utilizado durante un deslizamiento con gran cobertura espacial.

El TLS es todavía una tecnología en desarrollo en términos de hardware, software y aplicaciones potenciales. Si bien este escáner puede detallar rasgos morfológicos, su uso está limitado por la distancia y las líneas de vista oblicuas (debido a la resolución y la inclinación).

Las principales limitaciones del TLS son la existencia de zonas de sombra por la topografía accidentada, la enorme cantidad de información adquirida, y las técnicas de post-procesamiento necesarias para el filtrado y la alineación de los conjuntos de datos. En una gran superficie escaneada, varios conjuntos de datos deben fusionarse y, debido a los errores de alineación se requiere mucho tiempo para obtener resultados fiables.

Se debe destacar que las limitaciones de la aplicación de esta técnica es que las mediciones deben realizarse en condiciones de buen tiempo, y que el equipo láser utilizado no debe estar situado a una distancia de más de 100 metros respecto al objeto que va ser escaneado. También es evidente que no puede haber barreras (árboles u otros objetos) entre el escáner y el objeto. Por esta razón, se recomienda el uso de por lo menos dos estaciones de escaneado, no necesariamente al mismo tiempo.

Es importante combinar diversas técnicas de imagen. Esto permite la caracterización de deslizamientos a diferentes escalas y las limitaciones de un método pueden ser compensadas por las ventajas de otro. La combinación de ALS y TLS puede aplicarse para obtener un producto de mejor calidad. Sin embargo, se debe tener mucho cuidado, pues un problema en la comparación de las técnicas es la variación de la escala de medición.

Una campaña de escaneo combinada entre TLS y ALS podría ser una buena estrategia para cubrir las respectivas limitaciones debido a la geometría (morfología compleja). Minimizar los errores se puede hacer con una mejor comprensión de las características de los sensores y de sus implicaciones.

Recomendaciones

De manera complementaria a la propuesta metodológica de Nagalli (2012), se deben tomar en cuenta las recomendaciones de Sturzenegger (2010) encaminadas a una óptima planificación del trabajo de campo.

Antes de emprender una campaña de campo utilizando técnicas de teledetección terrestres, algunos componentes esenciales de planificación deben ser considerados. Estos incluyen:

- a) Definir la resolución requerida. El espaciado del punto terrestre (EIFOV) de nubes de puntos creados con el escáner láser depende de la distancia de la medición.
- b) Especificar la exactitud y la precisión requerida, así como el enfoque de registro.
- c) Definir el área a ser mapeada, tomando en cuenta las limitaciones físicas/topográficas. Se debe seleccionar la ubicación del escáner con el fin de minimizar la oclusión.
- d) Analizar la pendiente y completar la Tabla 5. Esto puede ser útil para dibujar un boceto de la escena con las ubicaciones de las posiciones del escáner y los puntos de control. Se debe tomar una fotografía de la escena.

Especial atención merece lo referente al área de mapeo y las limitaciones físicas/topográficas. Según sea el tamaño del área a ser mapeada cierta cantidad de exploraciones tendrán que realizarse. Por ejemplo, al haber grandes cambios de perspectiva, el área debe dividirse en ventanas más pequeñas.

Una observación cuidadosa de la geometría de las laderas y la geología estructural se recomienda antes de aplicar las técnicas de teledetección terrestre para reducir al mínimo la oclusión y el sesgo de orientación. Ambos fenómenos de oclusión/sesgo de orientación pueden ocurrir horizontal y verticalmente.

Idealmente, la posición de la cámara/escáner debe ser elegida para alcanzar la resolución y precisión esperada. En realidad, las limitaciones topográficas en el campo con frecuencia obstaculizan el grado de flexibilidad en la creación de una red de monitoreo.

La caracterización de laderas de alta montaña es a menudo limitada por los problemas de accesibilidad y seguridad. En consecuencia, las técnicas de teledetección terrestre representan alternativas prometedoras (suplementos) a los métodos de mapeo tradicionales.

Las consideraciones generales adicionales para la aplicación de las técnicas de teledetección terrestre a investigaciones de ciencias de la tierra se pueden encontrar en Buckley (2008).

Bibliografía

Abellan A., 2006. *Application of a long-range Terrestrial Laser Scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria* (Eastern Pyrenees, Spain). *Engineering Geology* 88, Science Direct.

Alcántara-Ayala I., 2004. *Hazard assessment of rainfall-induced landsliding in México*. *Geomorphology* 61, 19-40.

Alkan R., 2012. *Analysis of The Accuracy of Terrestrial Laser Scanning Measurements*. FIG Working Week, Rome, Italy.

Aryal A., 2013. *Landslide Deformation Character Inferred from Terrestrial Laser Scanner Data*. A dissertation submitted to the graduate division of the University of Hawai i at mānoa in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Geology and Geophysics.

Armesto J., 2009. *Terrestrial laser scanning used to determine the geometry of a granite boulder for stability analysis purposes*. *Geomorphology* 106.

Baldo M., 2009. *LIDAR monitoring of mass wasting processes: The Radicofani landslide, Province of Siena, Central Italy*. *Geomorphology* 105.

Baltsavias E., 1999. *A comparison between photogrammetry and laser scanning*. *Phyogrammetry & Remote Sensing* 54.

Barbarella F., 2012. *Landslide Monitoring Using Terrestrial Laser Scanner: georeferencing and canopy filtering issues in a case study*. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXIX-B5.

Belton D., 2008. *Classification and Segmentation of 3D Terrestrial Laser Scanner Point Clouds*. Department of Spatial Sciences Cooperative Research Centre for Spatial Information.

Bertacchini E., 2012. *Investigating an active rockslide by long-range laser scanner: alignment strategy and displacements identification*. *Knowing to manage the territory, protect the environment, evaluate the cultural heritage*, Rome, Italy.

Bitelli G., 2002. *Terrestrial Laser Scanning and Digital Photogrammetry Techniques to Monitor Landslide Bodies*. University of Bologna, Viale Risorgimento 2 – 40136 Bologna, Italy.

Bitrán D., 2001. *Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el periodo 1980-99*. Coordinación de Investigación, CENAPRED.

Bretar F., 2008. *Feature Extraction from LiDAR Data in Urban Areas* en *Topographic Laser Ranging and Scanning; principles and processing* 14. Taylor & Francis Group, LLC.

Brunsdon C., 2009. *Geostatistical Analysis of LiDAR Data*. Laser scanning for the environmental sciences 5. Wiley-Blackwell, London.

Corominas J., 2006. *El clima y sus consecuencias sobre la actividad de los movimientos de ladera en España*. Revista C&G.

Corsetti M., 2013. *Application of Laser Scanning Surveying to Rock Slopes Risk Assessment Analysis*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W3, Padua, Italy.

Charlton M., 2009. *Issues in Laser Scanning*. Laser scanning for the environmental sciences 3. Wiley-Blackwell, London.

Chuvieco E., 1995. *Fundamentos de teledetección espacial*. Segunda edición. Editorial Rialp. Madrid.

Danson F., 2009. *Airborne and Terrestrial Laser Scanning for Measuring Vegetation Canopy Structure*. Laser scanning for the environmental sciences 13. Wiley-Blackwell, London.

Debra L., 2011. *Processing of terrestrial laser scanning point cloud data for computational modelling of building facades*. Research Repository USD.

Dikau., 1996. *Landslide recognition identificación, movement and causes*, Jhon Wiley & Sons, 251pp.

El-Sheimy N., 2008. *Georeferencing Component of LiDAR System* en *Topographic Laser Ranging and Scanning; principles and processing* 6. Taylor & Francis Group, LLC.

Entwistle N., 2009. *Terrestrial Laser Scanning to Derive Surface Grain Size Facies Character of Gravel Bars*. Laser scanning for the environmental sciences 7. Wiley-Blackwell, London.

Flores P., 2002. *Cartografía morfogenética e identificación de procesos de ladera en Teziutlán, Puebla*. Instituto de Geografía, UNAM.

Glenn N., 2006. *Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity*. *Geomorphology* 73, Science Direct.

Goshorn-Maroney J., 2012. *Thermal Conditions and Movement of Rock Glaciers in the North Cascades, Washington*. Thesis Presented to The Faculty of Western Washington University.

Graham L., 2008. *Management of LiDAR Data en Topographic Laser Ranging and Scanning; principles and processing* 10. Taylor & Francis Group, LLC.

Habib A., 2008. *Accuracy Quality Assurance, and Quality Control of LiDAR Data en Topographic Laser Ranging and Scanning; principles and processing* 9, Taylor & Francis Group, LLC.

Harding D., 2008. *Pulsed Laser Altimeter Ranging Techniques and Implications for Terrain Mapping en Topographic Laser Ranging and Scanning; principles and processing* 5, Taylor & Francis Group, LLC.

Harvey B., 2004. *Registration and Transformation of Multiple Site Terrestrial Laser Scanning*, Geomatics Research Aust.

Heritage G., and Large A. 2009: *Laser scanning for the environmental sciences*. Wiley-Blackwell, London.

Heritage G., 2009. *Principles of 3D Laser Scanning*. Laser scanning for the environmental sciences 2. Wiley-Blackwell, London.

Hetherington D., 2009. *Laser Scanning: Data Quality, Protocols and General Issues*. Laser scanning for the environmental sciences 6. Wiley-Blackwell, London.

Hodgetts D., 2009. *LiDAR in the Environmental Sciences: Geological Applications*. Laser scanning for the environmental sciences 11. Wiley-Blackwell, London.

Hunter G., 2003. *The application of a long-range laser scanner for monitoring volcanic activity on Mount Etna*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 123, Science Direct.

Jaboyedoff M., 2009. *Use of terrestrial laser scanning for the characterization of the retrogressive landslides in sensitive clay and rotational landslides in river banks*. Can Geotech. J. Vol. 46.

Jaboyedoff, M. 2012: *Use of LIDAR in landslide investigations; a review*. Natural Hazards 61.

Kasai M., 2009. *LiDAR-derived DEM evaluation of deep-seated landslides in a steep and rocky region of Japan*. Geomorphology 113.

Kukko A., *Mobile Laser Scanning-System Development, Performance and Applications*. Department of Real Estate, Planning and Geoinformatics, Finnish Geodetic Institute.

Large A., 2009. *Laser Scanning – Evolution of the Discipline*. Laser scanning for the environmental sciences 1. Wiley-Blackwell, London.

Large A., 2009. *Laser Scanning: The Future*. Laser scanning for the environmental sciences 16, Wiley-Blackwell, London.

Lim M., 2009. *Laser Scanning Surveying of Linear Features: Considerations and Applications*. Laser scanning for the environmental sciences 15, Wiley-Blackwell, London.

Lugo-Hubp., 2005. *Los procesos de Remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla. Octubre 1999: Causas y efectos*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 22(2).

Makreshanski D., 2010. *Automatic marker-free registration of terrestrial laser scans based on SIFT features from reflectance images*. School of Engineering and Science, Jacobs University.

Mazzanti P., 2013. *Traditional and Innovative Techniques for Landslide Monitoring; dissertation on design criteria*. Tagung für Ingenieurgeologie mit Forum für junge Ingenieurgeologen München.

McKean J., 2004. *Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry*. Geomorphology 57, Science Direct.

Metternicht G., 2005. *Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geospatial systems for hazard assessment in mountainous environments*. ScienceDirect, Remote Sensing of Environment.

Millan D., 2009. *Terrestrial Laser Scan-derived Topographic and Roughness Data for Hydraulic Modelling of Gravel-bed Rivers*. Laser scanning for the environmental sciences 9, Wiley-Blackwell, London.

Mora P., 2002. *Global Positioning Systems and digital photogrammetry for the monitoring of mass movements: application to the Ca' di Malta landslide (northern Apennines, Italy)*. Engineering Geology 68. Science Direct.

Nagalli A., 2012. *Terrestrial Laser Scanning on Rock Mass Stability Analysis*. EJGE.

Olsoy P., 2013. *Determination of aboveground biomass using terrestrial laser scanning*. Master of Science in the Department of Geosciences Idaho State University.

Petrie G., 2008. *Airborne and Spaceborne Laser Profilers and Scanner* en *Topographic Laser Ranging and Scanning; principles and processing 2*. Taylor & Francis Group, LLC.

Petrie G., 2008. *Introduction to Laser Ranging, Profiling, and Scanning* en *Topographic Laser Ranging and Scanning; principles and processing 1*. Taylor & Francis Group, LLC.

Petrie, G., and Toth., 2008. *Terrestrial Laser Scanners* en *Topographic Laser Ranging and Scanning; principles and processing*. Taylor & Francis Group, LLC.

Pfeifer N., 2008. *LiDAR Data Filtering and DTM Generation* en *Topographic Laser Ranging and Scanning; principles and processing 11*. Taylor & Francis Group, LLC.

Pirotti F., 2013. *State of the Art of Ground and Aerial Laser Scanning Technologies for High-Resolution Topography of the Earth Surface*. *European Journal of Remote Sensing* 46.

Prokop, A. Panholzer, H. 2009: *Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1921 -1928.

Ravanel L., 2010: *Caractérisation, facteurs et dynamiques des écroulements dans les parois rocheuses à permafrost du massif du Mont Blanc*. PhD Thesis, Université de Savoie, 322 p.

Razak K., 2014. *Airborne Laser Scanning for Forested Landslides Investigation in Temperate and Tropical environments*. Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation. University of Twente, The Netherlands.

Reshetyuk Y., 2009. *Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning*. Universitetsservice US AB Stockholm, Sweden.

Romanescu G., 2012. *Use of Terrestrial 3D Laser Scanner in Cartographing and Monitoring Relief Dynamics and Habitation Space from Various Historical Periods*, INTECH.

Rottensteiner F., 2008. *Building and Road Extraction by LiDAR and Imagery* en *Topographic Laser Ranging and Scanning; principles and processing 16*. Taylor & Francis Group, LLC.

Shan J., 2008. *Building Extraction from LiDAR Point Clouds Based on Clustering Techniques* en *Topographic Laser Ranging and Scanning; principles and processing 15*. Taylor & Francis Group, LLC.

Shan J., and Toth C., 2008: *Topographic Laser Ranging and Scanning; principles and processing*. Taylor & Francis Group, LLC.

Schulz W., 2006. *Landslide susceptibility revealed by LIDAR imagery and historical records*, Seattle, Washington. Engineering Geology 89. Science Direct.

Sohn G., 2008. *A Data-Driven Method for Modeling 3D Building Objects Using a Binary Space Partitioning Tree* en Topographic Laser Ranging and Scanning; principles and processing 17. Taylor & Francis Group, LLC.

Stilla U., 2008. *Waveform Analysis for Small-Footprint Pulsed Laser System* en Topographic Laser Ranging and Scanning; principles and processing 7. Taylor & Francis Group, LLC.

Sturzenegger M., 2007. *Ground-based and airborne LiDAR for structural mapping of a large landslide: the Frank Slide*, Simon Fraser University.

Sturzenegger, M. 2010: *Multi-scale characterization of rock mass discontinuities and rock slope geometry using terrestrial remote sensing techniques*, Simon Fraser University.

Suárez J., 1998. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Geotecnología S.A.S. Colombia.

Teza G., 2008. *Characterization of landslide ground surface kinematics from terrestrial laser scanning and strain field computation*. Geomorphology 97. Science Direct.

Toth C., 2008. *Strip Adjustment and Registration Terrestrial Laser Scanners* en Topographic Laser Ranging and Scanning; principles and processing 8. Taylor & Francis Group, LLC.

Venegas L., 2005. *Diseño de un sistema LIDAR de bajo costo para generación de mapas topográficos*. Tesis de Ingeniero Eléctrico – Electrónico, Facultad de Ingeniería. UNAM.

Ventura G., 2011. *Tracking and evolution of complex active landslides by multi-temporal airborne LiDAR data: The Montaguto landslide (Southern Italy)*. Remote Sensing of Environment 115.

Vežočník R., 2009. *Use of Terrestrial Laser Scanning Technology for Long Term High Precision Deformation Monitoring*, Sensors, ISSN 1424-8220.

Viero A., 2008. *The analysis of the gravitational phenomena of the Cinque Torri group – Cortina d'Ampezzo (BI)*. Scuola di Dottorato in Scienze della Terra, Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova.

Viero A., 2010. *Laser scanning-based recognition of rotational movements on a deep seated gravitational instability: The Cinque Torri case (North-Eastern Italian Alps)*. Geomorphology 122.

Wehr A., 2008. *LiDAR Systems and Calibration enTopographic Laser Ranging and Scanning; principles and processing*. Taylor & Francis Group, LLC.

Zalesky J., 2012. *Landslide Mapping and Monitoring Concept*. Technology Agency of the Czech Republic.

Paginas web

allacronyms.com

www.topconpositioning.com

www.schlueter-baumaschinen.de

Índice de imágenes

Fig. 1. Ejemplo de teledetección satelital.

Fig. 2. Foto aérea de Rabenov.

Fig. 3. Espectro Electromagnético.

Fig. 4. Modelo 3D de Cucuteni Ravine.

Fig. 5. Adquisición de datos de un escáner laser terrestre.

Fig. 6. Teodolito clásico.

Fig. 7. Características de la luz natural y el LASER.

Fig. 8. Ejemplo de un escáner terrestre Riegl LMSZ420i.

Fig. 9. Principio de funcionamiento del LiDAR aerotransportado.

Fig. 10. Escáner montado en lancha para el mapeo de procesos fluviales.

Fig. 11. Escáner montado en vehículo todo terreno con exploración vertical.

Fig. 12. Representación esquemática de la calidad de medición.

Fig. 13. Atributos extraídos de pulsos: (a) rango, (b) ancho de pulso, e (c) intensidad.

Fig. 14. Cambio en la ubicación de puntos en el borde de los objetos escaneados.

Fig. 15. Análisis de atributos de datos LiDAR. Los Parámetros son (1) color RGB, (2) Intensidad de Reflexión, (3) Correlación entre líneas de exploración adyacentes basadas en el rango del escáner, (4) Rugosidad de la superficie, (5) Falso color e intensidad (6) Dip de la superficie de afloramiento.

Fig. 16. Combinación de nubes de puntos.

Fig. 17. Un modelo de elevación. La trayectoria del estudio esta representada por líneas purpura y las esferas de control por puntos amarillos.

Fig. 18. Comparación de máxima amplitud con el ancho de pulso de los objetos seleccionados de la escena medida. (a) escena, (b) casa, (c) árboles, and (d) el prado.

Fig. 19. Ejemplo de un Modelo Digital de Elevación derivado de LiDAR.

Fig. 20. Ejemplo de modelo compuesto 3D.

Fig. 21. Ejemplo de filtrado de datos de escaneo láser: A) Sección transversal A-A' antes de la filtración de datos; B) El mismo perfil después de la eliminación de la vegetación. C) Nube de puntos original con la ubicación de los perfiles.

Fig. 22. Ejemplo de un par de reflectancias.

Fig. 23. Tipos de superficie de reflexión.

Fig. 24. Principio de la observación LiDAR.

Fig. 25. Instrumentación y monitoreo de deslizamientos.

Fig. 26. Diagrama de un escáner láser muestreando una superficie a través de pulsos.

Fig. 27. Comparación de varios escáneres láser.

Fig. 28. Componentes básicos de un instrumento LiDAR.

Fig. 29. Fusión de varias nubes de puntos.

Fig. 30. Fotografía de una estación maestra de un sistema de monitoreo.

Fig. 31. Tipos de unidades de deflexión del haz de láser utilizados en los TLS.

Fig. 32. Método de fase.

Fig. 33. Método de pulso.

Fig. 34. Elevaciones LiDAR cerca del empalme de los ríos Murray y Murrumbidgee.

Fig. 35. Representación de un deslizamiento y sus efectos.

Fig. 36. Esbozo de dos modelos usados para inferir superficies de deslizamiento.

Fig. 37. (a) Fotografía que muestra el campo de escaneo del deslizamiento de Corral Cleveland en la Sierra Nevada; b) Muestra el relieve usando un modelo digital derivado de datos del TLS.

Fig. 38. Ejemplo de interpretación de un deslizamiento usando sucesivamente dos TLS-DEMs.

Fig. 39. Ejemplo de la reconstrucción de la morfología pre-deslizamiento.

Fig. 40. Una serie de discontinuidades son resaltadas por medio de esta vista.

Fig. 41. Imagen LiDAR procesada de Star Peak (A) y una fotografía del sitio de escaneo.

Fig. 42. Ejemplo de cambios en la morfología obtenidos por un Modelo Digital de Superficie.

Fig. 43. Ilustración del método PIV aplicado para producir sintéticamente datos de nube de puntos.

Fig. 44. Instrumentos adaptados para los estudios de escaneo laser: A) Riegl LMS-Z210; B) Riegl LMS-Z420i; C) Retroreflector cilíndrico; D) Retroreflector de prisma.

Fig. 45. Ejemplo de una imagen resultante del análisis multi-temporal.

Fig. 46. Ejemplo de una imagen procesada obtenida de la filtración basada en el promedio móvil.

Fig. 47. Mecanismos de falla.

Fig. 48. Representación cartográfica detallada.

Fig. 49. Ubicación de Teziutlán Puebla.

Fig. 50. Deslizamiento en la colonia La Aurora.

Fig. 51. Afectaciones del fenómeno en la colonia La Aurora.

Fig. 52. Imagen derivada del TLS-FARO en el sitio de prueba.

Fig. 53. Efecto del agua.

- Fig. 54. Escáner láser Faro LS 420.
- Fig. 55. Proceso Gravitacional de Caída en Xoloateno.
- Fig. 56. Mapa geológico de Teziutlán.
- Fig. 57. Ventanas con información del escáner y del área escaneada.
- Fig. 58. Zona de estudio.
- Fig. 59. Vista planar en blanco y negro y a color del área de estudio.
- Fig. 60. Vista del área de estudio con las esferas de control.
- Fig. 61. Propiedades de la esfera de control.
- Fig. 62. Condiciones atmosféricas idóneas para llevar a cabo campañas de escaneo.
- Fig. 63. Configuración del escáner.
- Fig. 64. Imagen con gran cobertura del proceso gravitacional.
- Fig. 65. Empalme de las nubes de puntos de los cuatro escaneos.
- Fig. 66. Vista 3D de los cuatro escaneos juntos.
- Fig. 67. Cálculo aproximado de la masa colapsada.

Índice de tablas

Tabla 1. Ejemplo de una representación esquemática que muestra los posibles escenarios de calidad de la medición en una superficie compleja.

Tabla 2. Reflectividad típica de varios materiales reflejantes.

Tabla 3. Lista no-exhaustiva de aplicaciones de las técnicas de teledetección terrestres sobre rasgos naturales o ingenieriles.

Tabla 4. Muestra de la maquinaria láser sobre la evolución de los escáneres terrestres desde 1998.

Tabla 5. Resumen de daños totales.