



Boletín de la Sociedad Geológica del Perú

journal homepage: www.sgp.org.pe ISSN 0079-1091

MONITOREO GEODÉSICO Y FOTOGRAMÉTRICO DEL DESLIZAMIENTO DE ALTO SIGUAS

Joseph HUANCA, Domingo RAMOS¹, Luis ALBINEZ², Gael ARAUJO
, Dulio GOMEZ²

RESUMEN

El deslizamiento rotacional de Alto Siguan, es uno de los deslizamientos más activos y perjudiciales presentes en el Valle de Siguan, Arequipa. Desde su activación en el año 2005 viene ocasionando la pérdida de varias hectáreas de terrenos de cultivo e infraestructura agrícola. Actualmente amenaza con causar el colapso de un tramo de la carretera Panamericana Sur y represar el río Siguan.

Este trabajo presenta los resultados obtenidos del monitoreo de 26 puntos de control GNSS durante 17 campañas de medición entre noviembre de 2015 y abril de 2021. Así mismo, se presentan los resultados de la comparación entre dos nubes de puntos 3D obtenidas a partir de fotogrametría aérea con drones durante las campañas de agosto de 2018 y abril de 2021.

A partir del monitoreo geodésico se determinó la cinemática del deslizamiento. Por su parte, el monitoreo fotogramétrico nos permitió conocer la variabilidad espacial de la masa deslizante. La combinación de estos métodos ha puesto en evidencia la alta actividad de este deslizamiento.

Palabras Clave: monitoreo GNSS, cinemática de un deslizamiento, dron, fotogrametría, nube de puntos, M3C2

ABSTRACT

Alto Siguan rotational landslide is one of the most active and damaging landslides present in the Siguan Valley, Arequipa. Since its activation in 2005, it has caused the loss of several hectares of farmland, agricultural infrastructure and threatens to cause the collapse of a section of the Panamericana Sur highway and cause the damming of the Siguan River.

This work presents the results obtained from the monitoring of 26 GNSS control points during 17 measurement campaigns between November 2015 and April 2021. Likewise, the results of the comparison between two 3D point clouds obtained from aerial photogrammetry are presented during the August 2018 and April 2021 campaigns.

From the geodetic monitoring the kinematics of the landslide was determined. On the other hand, photogrammetric monitoring allowed us to know the spatial variability of the sliding mass. The combination of these methods has highlighted the high activity of this landslide.

Keywords: GNSS monitoring, landslide kinematics, UAV, photogrammetry, cloudpoints, M3C2

1. INTRODUCCIÓN

La irrigación de las pampas de Majes (Arequipa), una de las áreas agrícolas más grandes del sur de Perú y cuyo inicio se remonta al año 1983, viene desencadenando una serie de deslizamientos en el Valle de Siguan desde la década de los 90 hasta la actualidad. Se ha comprobado que el principal factor desencadenante de estos deslizamientos es la infiltración de agua proveniente de la irrigación Majes (Lacroix et al., 2020). Esto es debido a que el volumen de agua utilizada para el riego de cultivos supera el módulo de riego aprobado por la Autoridad Nacional del Agua (0.750 l/s x ha); siendo el módulo de diseño incluso aún menor (0.577 l/s x ha) (Martínez, 2016).

Este exceso de riego, sumado al tipo de litología (materiales conglomeráticos y areno-arcillosos pobremente competentes) y laderas de fuertes pendientes desencadenó varios deslizamientos en la margen derecha del valle, en los sectores de Pachaqui (1999, 2003 y 2004), Alto Siguan

(2005), La Ramada (2014) y Santa Ana (2005 y 2020). Esto afectó severamente la calidad de vida socio-económica, cultural y ambiental de los sectores involucrados.

El deslizamiento rotacional de Alto Sigwas (Figura 1), en el que se enfoca el presente estudio, presenta una escarpa principal de 1.5 kilómetros de longitud y abarca un área de 0.9 km² aproximadamente. En la actualidad se encuentra comprometiendo el cauce del río Sigwas e infraestructura agrícola y vial de gran importancia. Los objetivos de este estudio son cuantificar su desplazamiento y velocidad y determinar la variabilidad espacial de la masa deslizante.

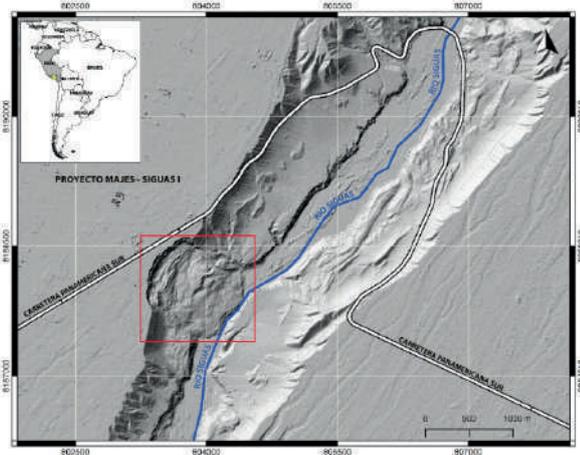


Figura 1. El deslizamiento de Alto Sigwas (remarcado en rojo) se ubica en la margen derecha del río del valle de Sigwas, entre los distritos de Majes y San Juan de Sigwas, en Arequipa, Perú.

3. METODOLOGÍA

Monitoreo Geodésico

Para el monitoreo geodésico se utilizó el método GNSS diferencial RTK (cinemático en tiempo real). Este método utiliza dos receptores GNSS operando de manera simultánea (Figura 2). Uno de los receptores ocupa el mismo punto de coordenadas conocidas al cual se denomina estación base ubicado en una zona estable, mientras que el otro es el receptor en movimiento del cual se determinarán las coordenadas en tiempo real. La rapidez y la facilidad de adquisición y procesamiento de datos hacen que el uso de este método sea valioso para monitorear la deformación del terreno.

Se realizaron un total de 17 campañas de campo, entre noviembre de 2015 y abril de 2021. En cada campaña se midió la posición de 26 puntos de control (hitos de concreto empotrados en el suelo) ubicados dentro del cuerpo del

deslizamiento.

La información obtenida comparando la posición de los puntos de control en diferentes campañas de medición permitió determinar los desplazamientos horizontales y verticales de los movimientos de la superficie del deslizamiento. Así mismo, la velocidad anual de desplazamiento se calculó a partir de la relación entre el desplazamiento y el tiempo transcurridos entre la primera y la última campaña con la finalidad de obtener una idea global de la cinemática del fenómeno.

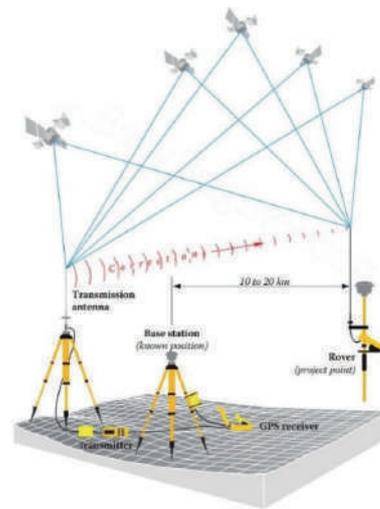
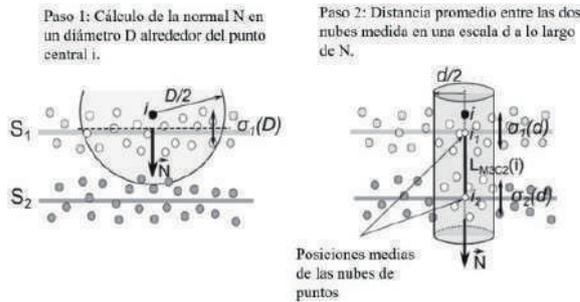


Figura 2. Instalación de Equipos para Levantamiento GNSS RTK (Van Sickle, 2015). Los valores de corrección se envían directamente por radio desde la estación base al receptor móvil. De esta manera, este último "conoce" continuamente su posición relativa al punto de referencia con una precisión por debajo del decímetro.

Monitoreo Fotogramétrico

La captura de fotografías se llevó a cabo con un dron de ala fija. En este estudio se consideró el primer y último sobrevuelo realizado en el área de estudio en agosto de 2018 y abril de 2021. Para el proceso fotogramétrico se utilizó la técnica *SfM* (*structure from motion*) a través del software Agisoft Metashape 1.7, obteniéndose una nube de puntos 3D de alta resolución, considerando 10 puntos de fotocontrol con precisión centimétrica. Así mismo, se realizó la diferencia entre las nubes de puntos 3D (remuestreadas a 20 cm) mediante el algoritmo *M3C2* (*comparación multiescala de nube a nube*) implementado por Lague et al. (2013) a través del software CloudCompare V.2.11.3 (2021). La técnica M3C2 agrupa conjuntos de puntos en cilindros bajo un diámetro de búsqueda definido y calcula la distancia media que hay entre planos generados con los puntos que se encuentran dentro del cilindro, estableciéndose

así una comparación entre la nube de puntos en análisis y la nube de puntos de referencia (Figura 3) (Lague, et al., 2013).



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A lo largo de todo el periodo en análisis, a partir de la pendiente de la gráfica de desplazamiento acumulado horizontal de cada una de las 26 estaciones GNSS durante las 17 campañas de medición (Figura 4), se puede distinguir que la velocidad de desplazamiento horizontal no ha permanecido constante. Se observa un periodo donde la velocidad ha tenido una tendencia a disminuir (2015-2019) y otro donde muestra una tendencia a aumentar (2020-2021).

Por otro lado, los resultados del monitoreo considerando la primera y la última campaña de medición de los puntos de control GNSS (Tabla 1) muestran un desplazamiento horizontal entre 74 y 144 m. con una velocidad promedio de 21 m/año, y un desplazamiento vertical desde -3 m hasta -32 m con una velocidad promedio de -2.5 m/año.

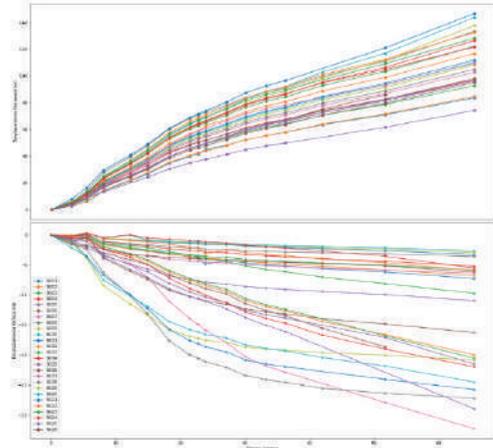


Figura 4. Desplazamiento acumulado horizontal (arriba) y vertical (abajo) considerando las 17 campañas de medición. Periodo 11.2015 – 04.2021 (≈5.4 años)

Puntos de Control	Desplazamiento por Componentes E-N-Z			Desplazamiento Horizontal	Desplazamiento Vertical	Velocidad Horizontal	Velocidad Vertical
	δ_E (m)	δ_N (m)	δ_Z (m)				
GNSS				δ_{E-N} (m)	δ_z (m)	m/año	m/año
SG01	56.72	-59.77	-7.27	82.39	-7.27	15.31	-1.35
SG02	57.91	-61.79	-6.80	84.68	-6.80	15.74	-1.26
SG03	61.02	-69.91	-5.79	92.79	-5.79	17.25	-1.08
SG04	62.25	-74.66	-5.19	97.20	-5.19	18.06	-0.96
SG05	60.88	-74.67	-10.93	96.35	-10.93	17.91	-2.03
SG06	60.57	-76.64	-16.24	97.69	-16.24	18.16	-3.02
SG07	69.91	-75.32	-6.39	102.76	-6.39	19.10	-1.19
SG08	73.25	-75.09	-3.59	104.91	-3.59	19.50	-0.67
SG09	77.31	-75.84	-2.90	108.30	-2.90	20.13	-0.54
SG10	79.39	-76.19	-2.60	110.03	-2.60	20.45	-0.48
SG11	80.96	-77.18	-3.25	111.85	-3.25	20.79	-0.60
SG12	83.93	-79.69	-5.90	115.73	-5.90	21.51	-1.10
SG13	95.52	-76.00	-9.69	122.06	-9.69	22.69	-1.80
SG14	103.98	-71.92	-5.52	126.43	-5.52	23.50	-1.03
SG15	71.57	-19.28	-21.49	74.12	-21.49	13.77	-3.99
SG17	82.49	-71.15	-32.27	108.94	-32.27	20.25	-6.00
SG18	100.86	-87.12	-27.21	133.28	-27.21	24.77	-5.06
SG19	106.22	-87.57	-20.87	137.66	-20.87	25.58	-3.88
SG20	106.06	-97.10	-24.50	143.80	-24.50	26.72	-4.55
SG21	114.12	-83.88	-25.77	141.63	-25.77	26.32	-4.79
SG22	104.83	-81.04	-19.95	132.50	-19.95	24.62	-3.71
SG23	100.31	-79.60	-20.53	128.06	-20.53	23.80	-3.82
SG24	94.06	-77.14	-21.96	121.64	-21.96	22.61	-4.08
SG25	75.40	-59.78	-28.95	96.22	-28.95	17.88	-5.38
SG26	45.37	-83.22	-6.16	94.78	-6.16	17.61	-1.15

Nota: El punto de control SG16 no se encontró en la última campaña de campo ya que fue enterrado por el deslizamiento.

Para una mejor comprensión de la magnitud y dirección del desplazamiento horizontal mostrado en la tabla 1, se ha graficado un mapa de vectores (Figura 5) donde se observa claramente un empuje de material en dirección al sureste con patrones similares de desplazamiento en cada punto monitoreado. Los desplazamientos más altos se midieron en la parte central del deslizamiento, mientras que las de menor desplazamiento cerca de los flancos.

Por otro lado, el resultado obtenido de la diferencia entre las nubes de puntos 3D entre agosto de 2018 y abril de 2021 (Figura 6), nos muestra cambios importantes en la morfología del deslizamiento de Alto Siguas. Las zonas de pérdida de material (colores rojos) se presentan principalmente en la escarpa principal y en la zona próxima a esta. Por otro lado, las zonas de ganancia de material se concentran en la zona de acumulación del deslizamiento (colores azules) que limita con el flanco izquierdo del valle.

Sobre la base de los resultados obtenidos a través del monitoreo geodésico y fotogramétrico se pone de manifiesto que el deslizamiento de Alto Siguas al presentar un comportamiento muy activo constituye un riesgo geológico latente tanto para el Valle de Siguas como para el distrito de Majes. Por lo tanto, estos resultados se ponen a disposición de los tomadores de decisiones, autoridades e instituciones que de acuerdo con sus competencias puedan emprender las acciones necesarias para prevenir y mitigar los efectos negativos que

este fenómeno geológico viene generando.

5. CONCLUSIONES

A partir de las mediciones GNSS se determinó la cinemática del deslizamiento de Alto Siguas. En un periodo comprendido entre noviembre de 2015 y abril de 2021 (≈ 5.4 años) se calculó un desplazamiento horizontal entre 74 y 144 m. con una velocidad horizontal promedio de 21 m/año, y un desplazamiento vertical desde -3 m hasta -32 m con una velocidad vertical promedio de -2.5 m/año.

En este estudio, se aplicó el algoritmo SfM para generar las nubes de puntos 3D obtenidas a partir de fotografías tomadas con un dron en agosto de 2018 y abril de 2021. La comparación de estas nubes de puntos con el algoritmo M3C2 permitió conocer los cambios morfológicos producto del avance retrogresivo de la escarpa principal y de la deformación de la masa deslizante.

La aplicación del método de monitoreo GNSS diferencial RTK demostró ser una herramienta eficiente para estudiar la cinemática de un deslizamiento activo. Por otro lado, el monitoreo fotogramétrico aéreo con drones, mediante la comparación de nubes de puntos 3D, permitió conocer la variabilidad espacial de toda la masa deslizante, incluyendo zonas de difícil acceso. Ambos métodos se complementan y aportan información valiosa para conocer el comportamiento del deslizamiento de Alto Siguas a lo largo del tiempo.

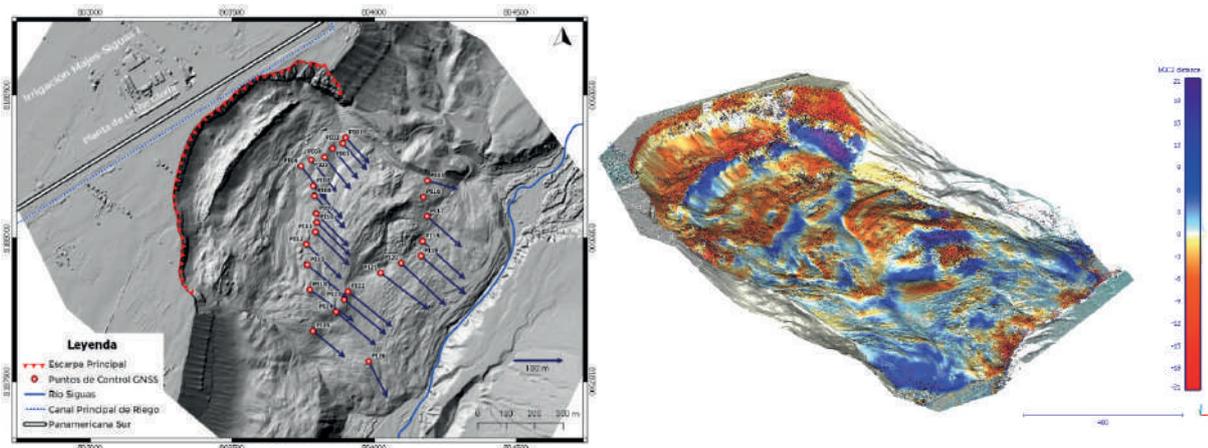


Figura 6. Diferencia entre dos nubes de puntos 3D del deslizamiento de Siguas (periodo agosto 2018 – abril 2021). Basado en el algoritmo M3C2 implementado por Lague et al. (2013) a través del software CloudCompare V.2.11.3 (2021).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Lague, D., Brodu, N., Leroux, J. 2013. Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z), ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 82, Pages 10-26, ISSN 0924-2716, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009>.
- Cloud Compare software, version 2.11.3, 2021. <https://www.cloudcompare.org/>
- Martínez, I. (2016). Los deslizamientos en el Valle de Siguanay y el exceso de riego en la Pampa de Majes (Arequipa). Agua y más. Revista de la Autoridad Nacional del Agua.
- Van Sickel, J. (2015). GPS for Land Surveyors (4th ed.). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/b18480>
- Lacroix, P., Dehecq, A., & Taipei, E. (2020). Irrigation-triggered landslides in a Peruvian desert caused by modern intensive farming. Nature Geoscience, 13(1), 56-60. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0500-x>