

Estimación de desplazamientos ocasionados por deslizamientos de tierra en la ciudad de Huancabamba, Piura, mediante análisis de imágenes satelitales para el periodo 2017 – 2019

J.T Alayo *¹ y J.C Villegas-Lanza²

¹Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

²Instituto Geofísico del Perú, Geodesia Espacial, Lima, Perú

Recibido 17 Jul 2021 – Aceptado 09 Dic 2021 – Publicado 16 Dic 2021

Resumen

En este estudio se ha estimado y analizado los desplazamientos producidos por remociones en masa en la ciudad de Huancabamba y sus alrededores, aplicando procesos de correlación subpíxel, basado en transformadas de Fourier, a imágenes ópticas satelitales (SPOT 6 y Sentinel 2). Los resultados han permitido identificar 14 zonas de mayor deformación superficial, distribuidas en toda el área de estudio. Once de estas zonas comprenden magnitudes de desplazamientos entre 0.17 m a 0.83 m, con velocidades de propagación entre 0.2×10^{-5} mm/s y 2.8×10^{-5} mm/s. Mientras que 3 zonas específicas dentro de la ciudad, presentan tasas de desplazamiento lento pero continuo con magnitudes de 0.10 m hasta 0.25 m y con velocidades 1.6×10^{-6} mm/s y 4.9×10^{-6} mm/s. Para validar y correlacionar los resultados, se analizan desplazamientos GPS medidos en una red de puntos geodésicos y se correlacionan aspectos morfodinámicos; asimismo se evalúa la ocurrencia de sismicidad local y regional y niveles de precipitación como posibles detonantes. Esta investigación ha permitido generar información técnica de base sobre la identificación de zonas de peligro en la ciudad de Huancabamba y alrededores, que sirve de insumo para la caracterización de las zonas inestables y propensas a deslizamientos de tierra, de esta manera, aportando a la gestión de riesgo de desastres en dicha localidad.

Palabras clave: Deslizamiento de tierra, correlación subpíxel de imágenes satelitales, desplazamientos superficiales.

Estimation of surface displacements caused by landslides in Huancabamba, Piura, using satellite images during the period 2017-2019

Abstract

In this study we analyze and estimate the surface displacements produced by landslides in the Huancabamba city and surroundings, applying subpixel correlation processes (based on Fourier transforms) to satellite optical images (SPOT 6 and Sentinel 2) for the period 2017-2019. The results show 14 areas of greater surface deformation, distributed in the study area. Eleven zones show displacement magnitudes between 0.17 m and 0.83 m, with propagation velocities between 0.2×10^{-5} mm/s and 2.8×10^{-5} mm/s. While 3 zones located within urban area show some instability depicted by slow but continuous displacements with magnitudes ranging from 0.10 m to 0.25 m and velocities of 1.6×10^{-6} mm/s and 4.9×10^{-6} mm/s. To validate and correlate the results, we analyze GPS displacements measured at campaign sites and morphodynamic aspects; as well as the occurrence of local and regional seismicity and precipitation rates. This study allowed to generate and provide technical information useful to identify hazardous zones in and around Huancabamba, which serves as input for the characterization of unstable and prone to landslides, contributing to disaster risk management in that locality.

Keywords: Landslide, satellite images subpixel correlation, surface displacements.

*joel.alayo@unmsm.edu.pe

© Los autores. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.



En la ecuación 2 la secuencia de Fourier de una imagen principal f se correlaciona con la secuencia de Fourier de la segunda imagen (secundaria) g . Las secuencias se desplazan en n pasos entre sí para encontrar el desplazamiento correlativo y esta misma variable determinará la precisión de dicho proceso [6].

2.1.1 Correlación por frecuencia

La correlación por frecuencia consta de dos subprocesos basados en el uso de la Transformación Rápida de Fourier (TRF) bidimensional, lo cual permite correlacionar ventanas iniciales y finales en el dominio de la frecuencia, basándose en sus diferencias de fases. El primer subproceso es la estimación aproximada de desplazamientos a nivel de píxeles por parte de la ventana inicial, mientras que en el segundo mide los desplazamientos a nivel subpíxel, a través de un movimiento de barrido por parte de la ventana TRF final sobre la ventana TRF inicial (Figura 2). Este tipo de correlación es más precisa, pero tiene la desventaja de ser más sensible al ruido [5]. COSI-Corr ofrece dos tipos de correlación: estadística y de frecuencia, siendo este último el utilizado para el desarrollo de esta investigación.

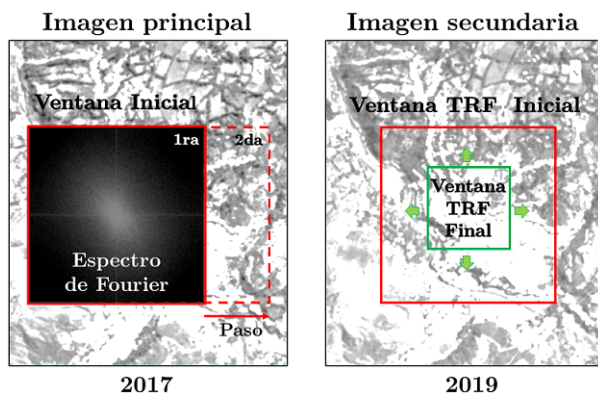


Figura 2: Esquema representativo del proceso de correlación por frecuencia. Se calcula la TRF bidimensional a partir de las ventanas iniciales y finales para calcular los desplazamientos a nivel de píxeles y subpíxeles, respectivamente. Adaptado de [6].

3. Datos y Metodología

Para el desarrollo de esta investigación, se utilizó imágenes satelitales ópticas pancromáticas de la plataforma SPOT 6 (14 de julio del 2017 y 3 de julio del 2014) con resolución espacial de 1.5 m y de la plataforma Sentinel 2 (18 de noviembre del 2017 y 12 de enero de 2019), con resolución espacial de 10 m.

El flujo de trabajo está compuesto por 4 fases: preprocesamiento, procesamiento con COSI-Corr, salidas iniciales y posprocesamiento (Figura 3). De las cuales las tres

primeras fueron desarrolladas con el software ENVI 5.3 y la última con ArcGIS 10.5.

En la primera fase se adquirieron las imágenes satelitales y se aplica opcionalmente correcciones geométricas, radiométricas y/o atmosféricas. Para esta investigación se utilizó dos imágenes satelitales ópticas pancromáticas de la plataforma SPOT 6 (14 de julio del 2017 y 3 de julio del 2014) con resolución espacial de 1.5 m y dos de la plataforma Sentinel 2 (18 de noviembre del 2017 y 12 de enero de 2019) con resolución espacial de 10 m.

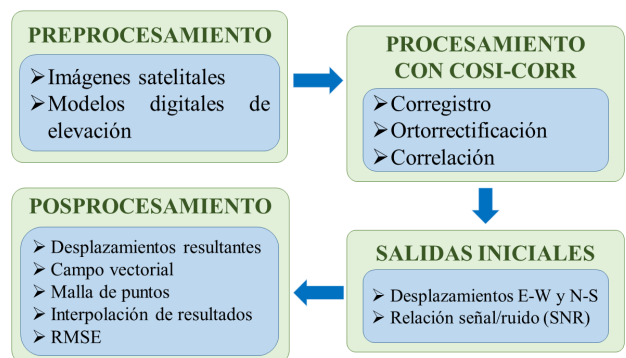


Figura 3: Diagrama de flujo de trabajo que muestra las 4 principales fases del desarrollo de esta investigación.

Por otro lado, la segunda fase es la más importante, ya que en ella se lleva a cabo el procesamiento con COSI-Corr y consta de tres subprocesos: corregistro, ortorectificación y correlación. Los primeros dos subprocesos no fueron necesariamente desarrollados, debido a que las imágenes satelitales usadas ya contaban con un buen nivel de ortorectificación y por ende corregistro. En consecuencia, se procedió directamente a aplicar la correlación de las imágenes satelitales donde previamente se seleccionan los parámetros de correlación, como el tipo de correlación, tamaño del paso (cambio entre dos ventanas deslizantes) y el tamaño de la ventana inicial y final. Ambas pruebas correspondieron a ventanas cuadradas iniciales y finales de dimensión de 8×8 píxeles, paso de 2 píxeles y umbral de enmascaramiento de 0.90, este último parámetro permite enmascarar las frecuencias de acuerdo con la amplitud del espectro cruzado logarítmico.

En la tercera fase, luego de la correlación de imágenes satelitales, se obtiene una imagen compuesta de dos bandas que contienen los desplazamientos horizontales este-oeste y norte-sur, y una tercera banda que contiene datos de la relación señal-ruido que sirve como un indicador de la calidad de las medidas.

La última fase corresponde al posprocesamiento de los resultados obtenidos en la tercera fase. Dentro de esta fase se estiman los desplazamientos resultantes o acumulativos en base a aplicación de la ecuación

$$D_R = \sqrt{(D_{EW})^2 + (D_{NS})^2} \quad (3)$$

Donde D_R es el desplazamiento resultante o acumulativo y las componentes D_{EW} y D_{NS} son los desplazamientos horizontales este-oeste y norte-sur, respectivamente. De acuerdo a los desplazamientos resultantes se puede extraer sus campos vectoriales, generar mallas de puntos y aplicar la interpolación de Kriging para representar los desplazamientos acumulativos de cada punto en un mapa en escala de colores. Paralelamente a estos subprocesos, en base a estimaciones geodésicas, se calcula la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) la cual mide la cantidad de error que hay entre dos conjuntos de datos y compara un valor simulado y un valor observado [7].

4. Resultados

Los desplazamientos resultantes se obtuvieron por la combinación de las bandas que contienen los desplazamientos horizontales E-W y N-S, obteniendo una imagen y datos con los desplazamientos acumulativos y ocurridos durante los intervalos de tiempo para cada prueba. En total se realizaron 23 pruebas, de las cuales se seleccionaron los resultados de las dos mejores (NQ1 y NP12), debido a que las imágenes utilizadas en dichas pruebas presentan resultados con menor valor de RMSE, correlatividad con resultados de estudios geodésicos y geodinámicos, tienen nivel y tipo de ortorrectificación muy alta, menor porcentaje de distorsiones atmosféricas y cuentan con baja resolución espacial. De lo cual también en base a estos criterios se determinó que las imágenes de la plataforma SPOT 6 (prueba NQ1) fueron destinadas para el estudio de la ciudad misma, mientras que las imágenes Sentinel 2 fueron destinadas para el estudio de las zonas externas a la ciudad de Huancabamba (prueba NP12).

4.1 Prueba NQ1

En la Figura 4a se muestra el mapa con los desplazamientos resultantes de la prueba NQ1. Se identificaron 3 zonas de mayor deformación superficial (ZR1, ZR2 y ZR3), ubicadas en la ciudad. Estas tres zonas representan el 44% del área total de la ciudad. es decir que la seguridad física de 0.69 km² del área propuesta perteneciente al polígono con perímetro de color rojo, están comprometidos con desplazamientos de magnitudes oscilantes entre 0.10 m a 0.25 m. Con estos resultados, se confirma lo reportado por otros autores, quienes indican que la ciudad de Huancabamba presenta muchas áreas de alta inestabilidad [8–10].

4.2 Prueba NP12

Se identificaron 11 zonas de mayor deformación superficial (Figura 4b). Estas 11 zonas representan el 29.2% del área total de la ciudad. Esto quiere decir que la seguridad física de 9.38 km² del área propuesta perteneciente al polígono con perímetro de color rojo, están comprometidos con desplazamientos de magnitudes oscilantes entre 0.17 m a 0.83 m. Cabe precisar que antes del análisis de los resultados de esta prueba, se identificaron y excluyeron dos zonas (AR1 y AR2), las cuales presentan falsos desplazamientos generados por nubes y sombras.

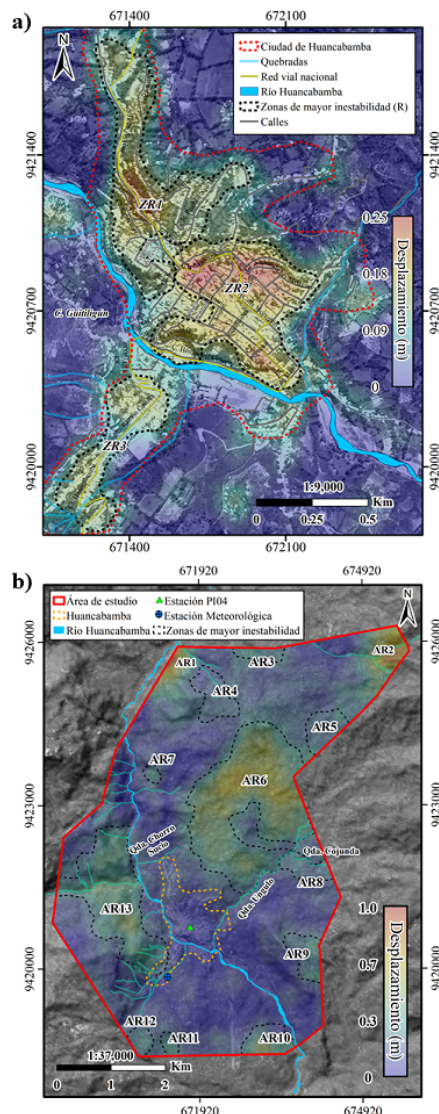


Figura 4: Mapa de desplazamientos horizontales resultantes a) en la ciudad de Huancabamba y alrededores (Prueba NQ1) y b) en toda el área de estudio (Prueba NP12).

4.3 Correlatividad entre desplazamientos

Para validar los resultados anteriores, se realizó un análisis correlativo basado en la diferenciación de los registros de las mediciones geodésicas y las medidas obtenidas con COSI-Corr; en otras palabras, con ello se estima cuán lejano son los resultados de la correlación subpíxel en base a los datos medidos por las estaciones GPS. Para lograr este objetivo, se recurrió a la determinación de la RMSE, la cual indica el ajuste absoluto del modelo (estimaciones GPS) a los datos y muestra cuán cerca están las estimaciones observadas de los valores simulados con el modelo (resultados COSI-Corr). Para ello, se utilizaron datos de un total de 31 estaciones geodésicas las cuales fueron realizadas en dos campañas, la primera del 10 de julio hasta el 29 de julio del 2018 (19 días), mientras que la segunda desde el 3 al 26 de agosto del 2019 (23 días). De esta manera las medidas RMSE de las 23 pruebas de correlación subpíxel, abarcaron magnitudes desde 0.19 m hasta 5.41 m. Donde las menores medidas 0.197 m y 0.191 m correspondientes a las pruebas NQ1 y NP12, respectivamente. Siendo los mejores resultados para análisis posteriores y por lo cual, el resto de pruebas no presentan resultados adecuados para posterior análisis.

Para tener otra perspectiva de lo planteado anteriormente, se puede observar en la Figura 5 la comparación de las mediciones GPS (línea roja) los resultados de los resultados de diferentes pruebas, donde los resultados de las pruebas NQ1 y NP12 son los más cercanos a las estimaciones geodésicas y oscilan entre 0.0009 m y 0.067 m. Mientras que el resto de líneas, pertenecientes a los resultados de otras pruebas, se alejan de las medidas geodésicas.

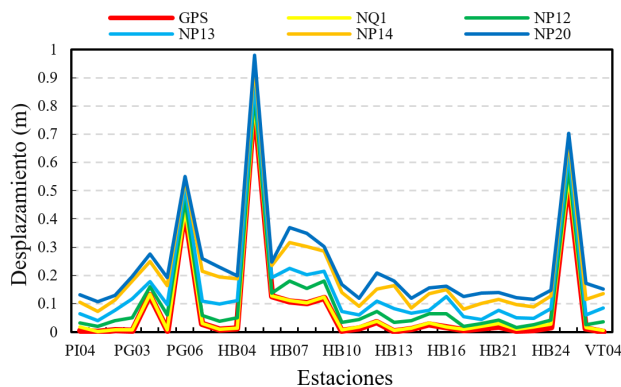


Figura 5: Estimaciones de desplazamientos resultantes a través de 5 pruebas de correlación subpíxel, en 31 posiciones referenciales a las ubicaciones de estaciones GPS. Los resultados de las pruebas NQ1 (línea amarilla) y NP12 (línea verde), son las más cercanas a las mediciones geodésicas.

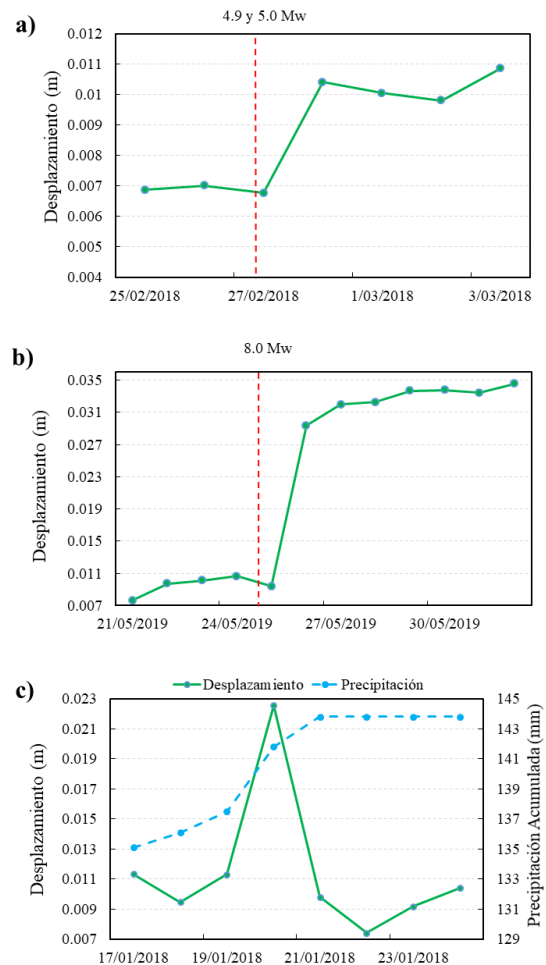


Figura 6: Series de tiempo de la estación geodésica PI04 para los periodos del a) 25 de febrero del 2018 al 3 de marzo del 2018, b) 21 al 26 de mayo del 2018 y c) del 17 y 24 de enero del 2018. La línea roja discontinua indica la fecha correspondiente a la ocurrencia de los sismos, la línea verde la evolución de los desplazamientos resultantes y la línea celeste la precipitación acumulada a través de los días.

4.4 Correlación entre desplazamientos, precipitación y sismicidad

En base a las estimaciones de los desplazamientos de la estación geodésica permanente PI04, se realizó la correlatividad de 54 eventos sísmicos, desde el 19 de julio del 2017 hasta el 26 de mayo del 2019, ocurridos en un radio de 600 km y desplazamientos, a través del desarrollo de series de tiempo (Figuras 6a, 6b y 6c). Se determinó que probablemente 12 sismos causaron desplazamientos cosísmicos entre 4 mm a 10 mm, a excepción de un desplazamiento de 1.9 cm, que fue producto del sismo de

magnitud M_w de 8.0 ocurrido el 26 de mayo del 2019 [11] a 470 km de la zona de estudio, en Lagunas, Loreto. Estos sismos habrían influenciado en el avance de los desplazamientos ocurridos en la ciudad y sus alrededores. Los datos de desplazamiento de la estación PI04 pertenecientes al Instituto Geográfico Nacional (IGN), fueron procesados por el Instituto Geofísico del Perú (IGP).

Por otro lado, en la figura 6c se presenta la serie de tiempo con la evolución temporal de los desplazamientos estimados entre los días 17 y 24 de enero del 2018 y las mediciones de precipitación acumulada en esos días. Las pendientes de ambas curvas se elevan desde el 19 al 20 de enero y corresponden a un aumento aproximado de 1.1 cm para la curva verde (desplazamientos) y de 4.3 mm para la curva celeste (precipitación acumulada). En general se observan incrementos milimétricos (>2 mm), siendo los meses de marzo y abril los más propensos a presentar desplazamientos correspondientes a precipitación acumulada.

5. Análisis y discusión de resultados

Luego de obtener las estimaciones de los desplazamientos resultantes y establecer las zonas de mayor deformación superficial, mediante la herramienta *Vector Field* de COSI-Corr, se generaron los campos vectoriales para cada zona. Los vectores muestran la orientación de propagación de los desplazamientos, pero no representan en escala dichos desplazamientos, debido a esto se debe usar la barra de colores de la interpolación para interpretar la magnitud de dichos movimientos.

De esta manera se analiza si las orientaciones de dichos vectores concuerdan con las orientaciones naturales de las pendientes presentes en las 14 zonas de mayor deformación superficial establecidas con los resultados de las pruebas NQ1 y NP12. Paralelamente también se distribuyó dichos campos vectoriales en mapas con grados de pendientes y sobre las magnitudes de las velocidades de los desplazamientos, lo cual permitió establecer la correlatividad entre ambos parámetros y definir qué tipo de movimientos en masa está presente en cada zona, según la clasificación por velocidades, propuesta por [12]. De forma general en base a los resultados de ambas pruebas se determinó que los movimientos en masa presentes en todas estas zonas son del tipo extremadamente lento y muy lento ($>0.5 \times 10^{-6}$ mm/s.).

Para la prueba NQ1 no se encontraron zonas con vectores que muestren dirección de propagación contraria a las orientaciones naturales de pendientes presentes en dichas zonas. Como se observa en la figura 7a, en general los vectores en las zonas ZR1, ZR2 y ZR3 muestran dirección de propagación de los desplazamientos hacia el sur y este. Cabe notar que la aglomeración de vectores de desplazamientos en ciertas regiones, significa la presencia de grandes magnitudes de desplazamientos

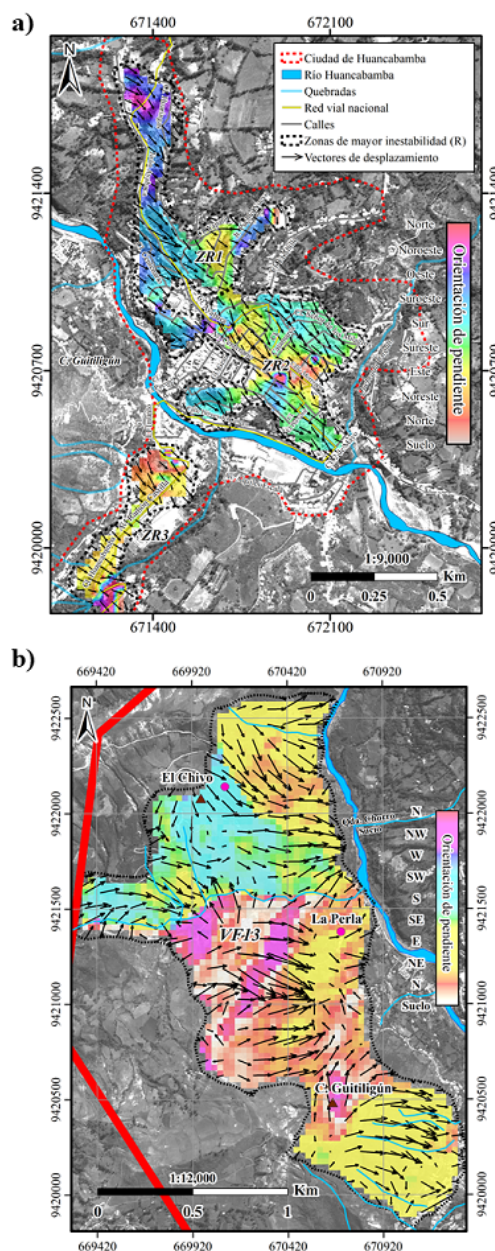


Figura 7: Distribución de los vectores de desplazamientos resultantes sobre las orientaciones de pendientes en a) las zonas ZR1, ZR2 y ZR3 (Prueba NQ1) y de la zona VF13 (Prueba NP12).

Con respecto a los resultados de la prueba NP12, se analizó de forma similar las 11 zonas de mayor deformación superficial, determinado que todas presentan propagación en diversas direcciones, no encontrando una dirección de propagación en particular para todas ellas. En la (Figura 7b) se observa la distribución de los vectores de desplazamientos sobre una de las 11 zonas, VF13.

Cabe recalcar que, en la mayoría de zonas identificadas correspondientes a ambas pruebas, los vectores indican propagación de desplazamientos en dirección a quebradas o al río Huancabamba.

6. Conclusiones

El análisis y correlación de imágenes satelitales permitió identificar un total de 14 zonas de mayor deformación superficial. Según el tipo de imágenes utilizadas (Sentinel 2 y SPOT 6), el análisis contempla ventanas temporales de 719 y 420 días, con tasas de desplazamiento con rangos entre 0.10 m hasta 0.25 m y 0.17 m hasta 0.83 m, respectivamente.

La mayor cantidad de zonas que presentan deformaciones superficiales notables (>0.30 m), se encuentran al norte de la ciudad de Huancabamba, mientras que en el área urbana de la ciudad se observa mayor inestabilidad en casi toda su extensión, a excepción de la parte central y parte del barrio Ramón Castilla, donde los desplazamientos son inferiores a 0.10 m en el lapso de tiempo estudiado (23 meses).

El análisis correlativo de datos permitió determinar que algunos de los factores que contribuyeron al avance y/o detonación de los deslizamientos, son la sismicidad y la precipitación acumulada. Siendo las tasas de 3 mm a 19 mm para desplazamientos cosísmicos y de 2 mm a 11 mm para desplazamientos por precipitación acumulada. Estos resultados permitieron evidenciar que Huancabamba está situado sobre deslizamientos activos, los cuales, pueden acelerarse de manera súbita ante la ocurrencia de agentes detonantes.

7. Recomendaciones

La distribución de mayor cantidad de estaciones geodésicas, funcionando de forma permanente durante un gran lapso de tiempo, podría ayudar a estimar y comparar con mucha más precisión las deformaciones superficiales.

El uso de imágenes en crudo y su respectiva metadatos, conducen a una nueva ortorrectificación más precisa con el software Cosis-Corr y a la obtención de mejores resultados.

La Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR) representa una técnica de análisis de imágenes de radar más precisa y con una alta sensibilidad para medir distancia, rugosidad, humedad, etc; que de las que usan imágenes ópticas, pero con ciertas limitaciones como la no operatividad continua y el registro distorsionado por presencia de densa vegetación y nieve en la superficie terrestre.

Agradecimientos

Al Mg. Octavio Fashé Raymundo, por el apoyo, recomendaciones y tiempo brindado para el inicio, desarrollo y culminación del presente trabajo de investigación.

Al Instituto Geofísico del Perú (IGP) y al convenio 166-2017 FONDECYT del proyecto ejecutado por el IGP denominado Evaluación geodinámica, geofísica y geológica de los deslizamientos de tierra que afectan la seguridad física de la ciudad Huancabamba (Piura), cofinanciado por el FONDECYT e IGP, dentro del cual se desarrolló el presente estudio.

Referencias

- [1] L. Chang y J. Hurtado. Deslizamientos y Aluviones en el Perú. CISMID, <http://www.cismid.uni.edu.pe/deslizamiento-y-aluviones-en-el-peru> (1991).
- [2] M. Ramirez. *Huancabamba: su historia, su geografía, su folklore*. Ministerio de Hacienda y Comercio, (1996).
- [3] UNP-INDECI. *Huancabamba: Mapa de Peligros, Plan de Usos del Suelo y propuesta Medidas de Mitigación de Efectos de Desastres Naturales*. Lima, p.17. <http://repo.floodalliance.net/jspui/handle/44111/2045> (2000).
- [4] COSI-Corr. *Measuring ground deformation using optical satellite and aerial images*. Recuperado de http://www.tectonics.caltech.edu/slip_history/spot_coseis/index.html (2020).
- [5] S. Leprince, S. Barbot, F. Ayoub y J. Avouac. Automatic and precise orthorectification, coregistration, and subpixel correlation of satellite images, application to ground deformation measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(6), 1529–1558. Doi: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.888937> (2007).
- [6] S. Meijer. Surface displacement of a Himalayan debris-covered glacier derived from automated cross-correlations using imagery acquired with unmanned aerial vehicles [Master's thesis]. <http://dspace.library.uu.nl/handle/1874/320669> (2015).
- [7] J. Camarillo-Peñaranda, A. Saavedra-Montes y C. Ramos-Paja. Recomendaciones para Seleccionar Índices para la Validación de Modelos. *Tecnológicas*, 109. Doi: <https://doi.org/10.22430/22565337.372> (2013).

- [8] A. Córdova. Estudio morfodinámico del ámbito de la ciudad de Huancabamba y alrededores comprendiendo las zonas con afectación originada por el movimiento desplazatorio del terreno, provincia de Huancabamba, Piura. Instituto Geofísico del Perú (2018).
- [9] N. Córdova. Evolución morfodinámica de las laderas montañosas de la ciudad de Huancabamba y su relación con el desplazamiento del terreno, Piura-Perú. [Trabajo de investigación de bachiller, Universidad Nacional de Piura] (2018).
- [10] J.C. Villegas-Lanza, R. Pamo, M. Berduzco y W. Quiroz. Mediciones Geodésicas en los deslizamientos que afectan a la ciudad de Huancabamba (2da campaña de medición). Instituto Geofísico del Perú (2019).
- [11] C. Jiménez, N. Luna, N. Moreno y M. Saavedra. Seismic source characteristics of the intermediate-depth and intraslab 2019 northern Peru earthquake (Mw 8.0). *Journal of Seismology*, 25(3), 863–874, doi: <https://doi.org/10.1007/s10950-021-09996-x> (2021).
- [12] D. Varnes y D. Cruden. *Landslide types and processes. Landslides: Investigation and Mitigation, Transportation Research Board Special Report*, 247 (1996).