



Boletín de la Sociedad Geológica del Perú

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

Automatización para la generación de mapas PGA con Python en estudios de fallas activas: Caso Falla Activa Parina

Briant García ¹, Enoch Aguirre ¹, Carlos Benavente ¹, Gonzalo Romero ¹, Anderson Palomino ¹

¹Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), Av. Canadá 1470, San Borja, Lima, Perú.

¹bgacia@ingemmet.gob.pe

RESUMEN

El Perú actualmente cuenta con la norma técnica E30, elaborado por el Ministerio de Vivienda. Según esta reglamentación, en la zona sureste del país se estima que los valores de PGA (Peak Ground Acceleration) se encuentren entre 0.25 y 0.35g, valores relacionados a la ocurrencia de sismos interplaca. Sin embargo, los sismos intraplaca, producidos por la reactivación de fallas activas no fueron considerados en esta norma útil para la construcción de obras civiles.

Justamente a fines del año 2016 ocurrió un sismo de 6.2 Mw originado por la reactivación de la falla activa Parina, el cual tuvo un hipocentro de <10 km de profundidad, generando rupturas superficiales de escarpes de hasta 30 cm de alto a lo largo de ~12km. Estudios realizados a partir del sismo generado por esta falla muestran que los valores de PGA superan el valor de 0.35. Por otro lado, nuestros estudios geológicos y geomorfológicos en la falla Parina demuestran que esta estructura podría generar peores escenarios en caso ocurran futuras reactivaciones, afectando así a las poblaciones cercanas. En este contexto, se utilizó la implementación en lenguaje de programación Python del modelo de Abrahamson y Silva para la estimación del PGA sobre tres escenarios, en los que se consideró como parámetros de entrada; la magnitud registrada en el año 2016, los valores de velocidades de onda Vs30 en las unidades litoestratigráficas, diferentes profundidades para

el hipocentro (5, 8 y 10 km), la geometría de la falla y el estilo de deformación, ambos derivados de la caracterización geológica. Para validar los resultados, los escenarios se contrastaron con la ubicación y dimensión de los efectos co-sísmicos registrados. Finalmente, se muestra la importancia de la elaboración de mapas de peligro sísmico generados a partir de los estudios de fallas activas, los cuales son importantes para la Gestión de Riesgo de Desastres y los Planes de Ordenamiento Territorial.

Palabras clave: Fallas activas, mapas PGA, Norma técnica E-30, Python

ABSTRACT

Peru currently has the technical standard E30, made by the Ministry of Housing. According to this regulation, in the southeast of Perú it is estimated that PGA (Peak Ground Acceleration) values are between 0.25 and 0.35, values related to the occurrence of interplate earthquakes. However, intraplate earthquakes, produced by active faults reactivation, were not considered in this standard, which aims to provide basic information for civil constructions.

Exactly at the end of 2016, a 6.2 Mw earthquake occurred, caused by the reactivation of the Parina active fault, with <10 km deep hypocenter, generating surface ruptures of up to 30 cm along ~12 km. Studies carried out from the earthquake generated by this fault show that PGA values exceed

0.35g. On the other hand, our geological and geomorphological studies in Parina fault show that this structure could generate worse scenarios in future reactivations, thus affecting nearby populations. In this context, we use the Abrahamson and Silva model with Python programming language, to estimate PGA on three scenarios, in which it was considered as input parameters; the magnitude recorded in 2016, wave velocities values (V_{s30}) in lithostratigraphic units, different hypocenters (5, 8 & 10 km), fault geometry and deformation style, both derived from the geological characterization. To validate our results, the scenarios were contrasted with location and dimension of the recorded co-seismic effects. Finally, the importance of preparing seismic hazard maps generated from active fault studies is shown, which are important for Disaster Risk Management and Land Use Plans.

Keywords: Active faults, PGA maps, technical standard E-30, Python.

INTRODUCCIÓN

La estimación de la aceleración de terreno es un parámetro que permite definir zonas de riesgo sísmico, a su vez, es una variable importante a considerar en los proyectos de edificaciones civiles y por ende contribuye a una mejor planificación territorial.

La aceleración máxima de terreno o PGA Peak Ground Acceleration (PGA) en sus siglas en inglés es la medida natural para tal propósito. De acuerdo al autor que se considere, este valor corresponde al máximo de las componentes horizontales, al máximo de la norma L2 de las formas de onda o el máximo obtenido por la rotación de registros horizontales. Por esta razón, es que los ingenieros civiles han impulsado la necesidad de conocimiento y estimación de este parámetro, ya que este parámetro contribuye a determinar el diseño estructural de las obras civiles.

Los modelos de movimiento de terreno son representaciones que muestran el rango de valores PGA modelados a partir de la ocurrencia de un evento sísmico, sobre la base de un análisis que puede ser probabilístico o determinista. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que el modelo probabilístico cae en la subestimación del peligro sísmico, además que hasta la fecha no hay ningún evento que compruebe su validez, todo lo contrario, cada vez se incrementan los eventos que

comprueban que el análisis probabilístico no debería ser tomado en cuenta para la estimación del peligro sísmico (e.g Bommer, 2002; Krinitzsky, 1995).

En este entender, para el presente trabajo se consideró realizar un análisis determinista, dentro del cual se tuvo en cuenta a la reactivación de la falla activa como origen del evento sísmico. Se utilizó la caracterización geológica y paleosismológica de la falla para determinar la magnitud máxima del que esta falla en una reactivación es capaz de generar. En cuanto a las condiciones de sitio se consideró las características geológicas de la zona a evaluar. Con esto en cuenta se consideró como ejemplo la reactivación de la falla Parina en el 2016 (Figura 1), para lo que además se tuvo en cuenta las diferentes profundidades de hipocentro consideradas por Xu et al., (2019); Aguirre et al., (2021) y Benavente et al., (2013).

Finalmente, se utilizó la implementación en lenguaje de programación Python del modelo de Abrahamson y Silva (2008) para la estimación del PGA en donde se muestra que los resultados dependen principalmente de la magnitud máxima posible y las características geométricas de la falla.

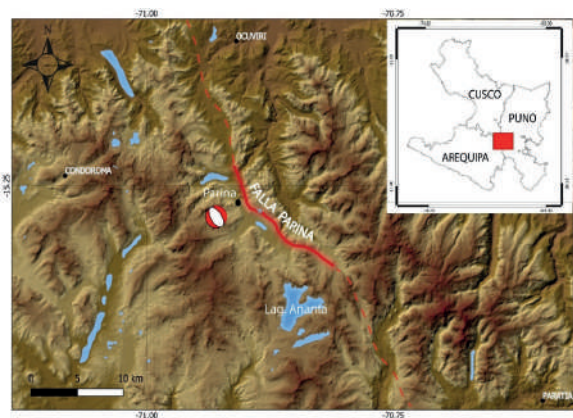


Figura 1. Mapa de ubicación de la Falla Parina (línea roja) y el epicentro (mecanismo focal). La línea roja intensa marca el trazo de falla reactivado.

METODOLOGÍA

Para la construcción del mapa PGA, se utilizó la implementación en lenguaje Python del modelo propuesto por Abrahamson & Silva (2008), implementación realizada por el proyecto de Neotectónica de la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico del INGEMMET. El modelo Abrahamson & Silva (2008) se puede resumir en

la siguiente ecuación:

$$+ F_{HW} f_4(R_{jb}, R_{rup}, R_x, W, dip, Z_{top}, M) + F_{RV} f_6(Z_{top}) + (1 - F_{RV}) f_7(Z_{top}) + F_8(R_{rup}) + f_{10}(Z_{1,0}, V_{s30})$$

Ecuación que básicamente considera como parámetros de entrada la magnitud y profundidad del evento sísmico, geometría, estilo de deformación y cinemática de la falla, y las condiciones de sitio que se representan mediante los valores de VS30 (velocidad de onda de corte a 30 m de profundidad) mismos que están correlacionados a la geología local de la zona a evaluar.

Como el presente caso trata de reproducir la reactivación de la falla Parina ocurrida en diciembre del 2016, se consideró para la magnitud un valor de 6.2 Mw (Xu et al., 2019), en cuanto al hipocentro se consideraron tres profundidades diferentes de 5.3 km (Xu et al., 2019), 8 km (Aguirre et al., 2021) y 10 km (Benavente et al., 2013). En cuanto a las características de geometría, estilo de deformación y cinemática se obtuvieron a partir del análisis geológico y paleosismológico. Finalmente, de acuerdo a la Norma técnica E.030 de diseño sismorresistente del Perú (2014), usamos los mismos rangos de valores de aceleraciones (0.1 - 0.45 g) para la jerarquización del peligro en nuestros modelos.

RESULTADOS

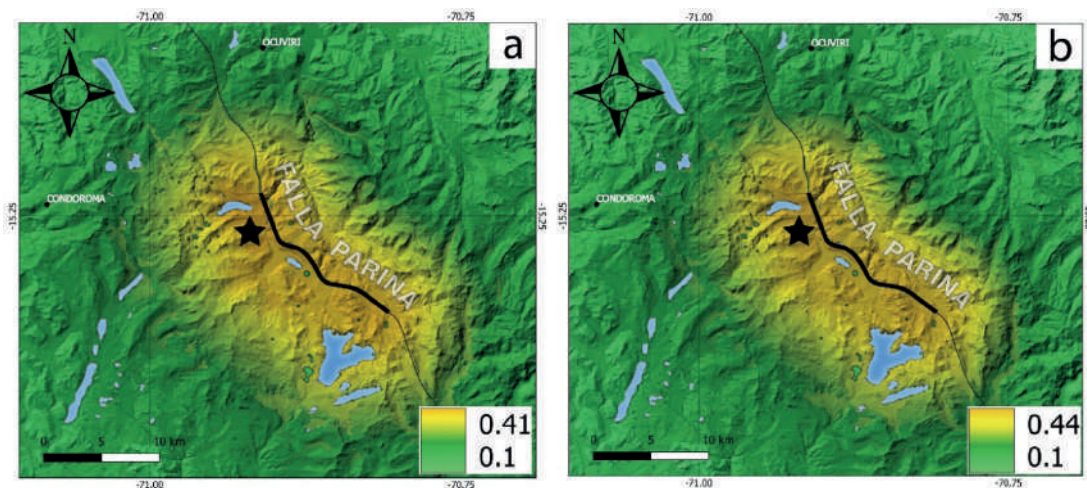
Considerando los diferentes hipocentros se obtuvieron tres escenarios. El primer escenario (hipocentro a 10 km) muestra aceleraciones que varían de 0.1 a 0.41g (Figura 2a). El segundo (hipocentro a 8 km) muestra aceleraciones entre 0.1 y 0.44g (Figura 2b). Finalmente, el tercer modelo (hipocentro a 5 km) muestra aceleraciones entre 0.1 y 0.465g. Estos valores máximos se muestran principalmente al este de Parina y la Laguna Saguanani y al sureste de Lunini (Figuras 2c y 2d).

DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

Contrastando los tres escenarios representados en los mapas PGA con el registro de efectos co-sísmicos (Aguirre et al., 2021), se encuentra que el tercer escenario que considera un hipocentro de 5km muestra una mejor relación con los efectos co-sísmicos adquiridos en campo, considerando que entre estos efectos se registraron “jumping stones”, fenómenos donde bloques de rocas saltaron de su posición original en dirección suroeste, demostrando así una aceleración vertical en el suelo que supera la gravedad (> 0.98 g) (Aguirre et al., 2021) (Figura 2d).

Al observar los resultados modelados, junto con los efectos co-sísmicos obtenidos en campo por Aguirre et al. (2021), se observa que el evento sísmico superó ampliamente a los valores considerados en la Norma Técnica E30 del Ministerio de Vivienda. En este entender, se da evidencia de la importancia de la elaboración de mapas de peligro sísmico a partir de la reactivación de fallas activas teniendo en cuenta un análisis determinístico, ya que como es de amplio conocimiento, los sismos no se pueden predecir, sin embargo, se puede caracterizar el peor escenario y tomar decisiones a partir de esta información. De ahí también la importancia del estudio de las fallas activas, así como las magnitudes máximas que pueden generar estas estructuras, lo cual se puede lograr realizando trabajos de neotectónica y paleosismología.

Finalmente, mediante el presente estudio proponemos una metodología para generar los mapas PGA. Mapas que permiten a las autoridades y tomadores de decisiones realizar planes de prevención y planificación en el marco de la Gestión de Riesgo de Desastres y los Planes de Ordenamiento Territorial.



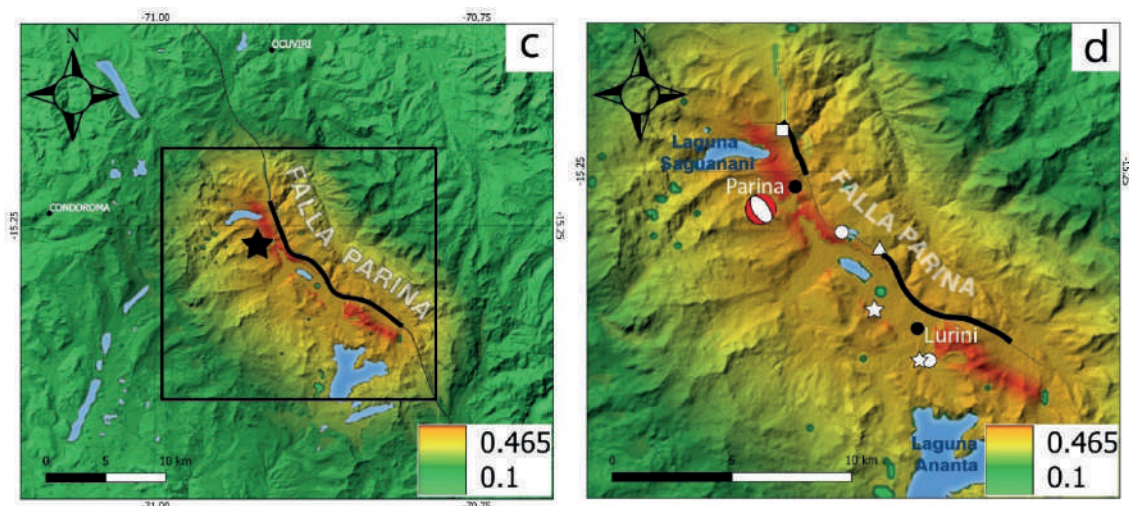


Figura 2. a) Mapa de PGA con hipocentro de 10km. b) Mapa de PGA con hipocentro de 8km. c) Mapa de PGA con hipocentro de 5km. El recuadro negro representa el detalle de la figura d. d) Detalle del mapa de PGA con hipocentro de 5km. La línea negra representa el trazo con evidencias de ruptura superficial, deslizamientos (cuadrado blanco), licuación de suelos (círculo blanco), jumping stones (triángulo) y grietas (estrella blanca).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abrahamson N, Silva W. (2008). Summary of the Abrahamson & Silva NGA Ground-Motion Relations. *Earthquake Spectra*. 2008;24(1):67-97. doi:10.1193/1.2924360

Aguirre E., Benavente C., Audin L., Wimpenny S., Baize S., Rosell L., Delgado F., García B., Palomino A. (2021). Earthquake surface ruptures on the altiplano and geomorphological evidence of normal faulting in the December 2016 (Mw 6.1) Parina earthquake, Peru. *Journal of South American Earth Sciences*. Volume 106.

Benavente, C.; Delgado, F.; Taipe, E.; Audin, L. & Pari, W. (2013) - Neotectónica y peligro sísmico en la región del Cusco. INGEMMET. Boletín, Serie C: Geología Ambiental y Riesgo Geológico, 55.

Benavente, C., Delgado, G., García, B., Aguirre, E. & Audin, L. (2017) - Neotectónica, evolución del relieve y peligro sísmico en la región Arequipa. INGEMMET, Boletín Geodinámica, Ingeniería Geológica, 64, 370 p.

Bommer, J.J. (2002) Deterministic vs. Probabilistic seismic hazard assessment: an exaggerated and dichotomy. *Journal of Earthquake Engineering*, 6:S1, 43-73. DOI: 10.1080/13632460209350432

Krinitzsky, E.L. (1995). Deterministic versus

probabilistic seismic hazard analysis for critical structures. *Engineering Geology*, Volume 40, Issues 1–2, Pages 1-7.

Wells, D., Coppersmith, K. (1994) New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America* 84(4):974.

Xu, G., Xu, C., Wen, Y., & Yin, Z. (2019). Coseismic and postseismic deformation of the 2016 MW 6.2 Lampa earthquake, southern Peru, constrained by interferometric synthetic aperture radar. *Journal of Geophysical Research: SolidEarth*, 124.