

Retos geológicos y soluciones geotécnicas para la reconstrucción de La Palma bajo condiciones extremas post la erupción de 2021

Luis González de Vallejo
Instituto Volcanológico de Canarias
Universidad Complutense de Madrid

Resumen: El 19 de septiembre de 2021 se produjo una erupción volcánica estromboliana en la isla de La Palma, Canarias, que causó la destrucción de 73 km de carreteras, infraestructuras urbanas, numerosas viviendas y cultivos agrícolas, afectando a unas 7.200 personas, con pérdidas superiores a 1.200 M€. 12 km² fueron cubiertos por coladas de lava aa y pahoehoe que alcanzaron más de 70 m de espesor. Tras el fin de la erupción, se llevaron a cabo análisis térmicos, geológicos y geotécnicos del terreno para la reconstrucción y la planificación territorial y urbana, con los principales objetivos centrados en la apertura de carreteras a través de las lavas calientes, la construcción de nuevos asentamientos urbanos en las zonas cubiertas por las coladas de lava y la recuperación agrícola. Los principales condicionantes para la reconstrucción fueron las altas temperaturas de las lavas, que alcanzaron más de 500°C, la lentísima velocidad de enfriamiento de las coladas de lava, el comportamiento geotécnico altamente heterogéneo, con numerosas cavidades y tubos volcánicos, y la presencia de gases tóxicos. Los análisis sobre el terreno incluyeron sondeos geotécnicos, geofísica sísmica y radar de penetración, así como la medición de las temperaturas de las coladas de lava mediante drones y en el interior con sondeos. Se desarrollaron dos modelos físicos de refrigeración de los flujos de lava, basados en el comportamiento térmico y los datos geológico-geotécnicos, así como dos soluciones técnicas para la excavación y la construcción en flujos de lava caliente. Los análisis de estabilidad del cono volcánico de 200 m de altura formado durante la erupción indicaron la posibilidad de fallo en caso de fuertes lluvias y, por consiguiente, de peligro de lahar. Los resultados de estas investigaciones y sus aplicaciones a la reconstrucción post-desastre y a la planificación territorial pueden ser también útiles para otras regiones volcánicas, contribuyendo a minimizar el riesgo en infraestructuras y asentamientos urbanos.

Palabras clave: erupción volcánica, reconstrucción tras erupción, condicionantes geológicos y geotécnicos, modelos de enfriamiento de la lava, soluciones para la excavación y construcción sobre lava caliente.

Abstract: On September 19, 2021, a strombolian volcanic eruption occurred on the island of La Palma, Canary Islands, causing the destruction of 73 km of roads, urban infrastructures, many houses and agricultural crops, affecting about 7,200 people, with losses exceeding 1,200 M euros. 12 km² were covered by aa and pahoehoe lava flows reaching over 70 m thick. After the end of the eruption, thermal, geological and geotechnical site investigations were carried out for the reconstruction and territorial and urban planning, with the main objectives focused on the opening of roads through the hot lavas, the construction of new urban settlements in areas covered by the lava flows and agricultural recovery. The main conditioning factors for the reconstruction were the high temperatures of the lavas, reaching more than 500°C, the very slow rate of cooling of the lava flows, the highly heterogeneous geotechnical behaviour, with many cavities and volcanic tubes, and the presence of toxic gases. Site investigations included geotechnical boreholes, seismic geophysics and ground penetration radar,

and measurement of lava flows temperatures by drones and inside boreholes. Two cooling physical models of the lava flows were developed, based on thermal behaviour and geological-geotechnical data, as well as two technical solutions for excavation and construction purposes on hot lava flows. Stability analyses of the 200 m high volcanic cone formed during the eruption, indicated the possibility of failure in the event of heavy rains and consequently lahar hazards. The results of these investigations and their applications to post-disaster reconstruction and territorial planning may be also useful to other volcanic regions, contributing to minimize risk in infrastructures and urban settlements.

Keywords: volcanic eruption, post-eruption reconstruction, geological and geotechnical conditions, lava cooling models, solutions for excavation and construction on hot lava.

1. Introducción

La erupción del volcán Tajogaite, Cumbre Vieja (La Palma 2021) tuvo una duración de 85 días, finalizando el 2021/12/13, emitiendo un volumen de lavas aproximado de 200 M de metros cúbicos y cubriendo unas 1.220 Ha, con lavas tipo Aa (Figura 1) y tipo Pahoe-hoe (Figura 2), siendo las primeras las más abundantes, alrededor del 90%, con espesores variables hasta de más de 70 m (67% ≤ 15 m de espesor, 24% ≤ 30 m, y el 9% > 30 m de espesor) (Figura 3), con un volumen total estimado de lavas subáreas de 146 M de metros cúbicos. La temperatura de las lavas al finalizar la erupción alcanzó los 1.100°C, tomándose este valor como dato inicial en el estudio del proceso de enfriamiento de las coladas.

La temperatura de las lavas al finalizar la erupción alcanzó los 1.100°C, tomándose este valor como dato inicial en el estudio del proceso de enfriamiento de las coladas.

Las temperaturas en las capas superficiales de las coladas se mantuvieron durante el primer y segundo año con valores muy elevados, lo que supuso un grave problema para restablecer las comunicaciones por carretera, dejando prácticamente aisladas varias poblaciones, al haberse destruido más de 70 km de carreteras. Además, hubo 1.700 viviendas sepultadas y 7.200 personas desplazadas. Las pérdidas económicas estimadas superaron los 1.200 M €.

Ante la necesidad urgente de reconstruir carreteras y otras infraestructuras, se desarrollaron una serie de investigaciones geológicas, geotérmicas y geomecánicas con el fin de aportar criterios geotécnicos y soluciones constructivas para la planificación urbana, construcción de carreteras y la recuperación agrícola. Dichos criterios requerían determinar las temperaturas de las coladas a lo largo del proceso de enfriamiento, tanto en su superficie como a distintas profundidades, y evaluar la resistencia de los materiales lávicos, la incidencia de cavidades volcánicas y gases en la viabilidad de excavaciones, tipos de cimentaciones y, en general, en la reconstrucción y planificación territorial, incluyendo las infraestructuras, asentamientos urbanos y la recuperación agrícola.

2. Métodos

Las limitaciones del territorio disponible para la edificación en la zona afectada por la erupción y zonas próximas impulsaron la opción de intentar ocupar las

Figura 1. Lavas tipo aa mostrando las distintas capas escoriáceas y basálticas.

Fuente: Elaboración propia. INVOLCAN



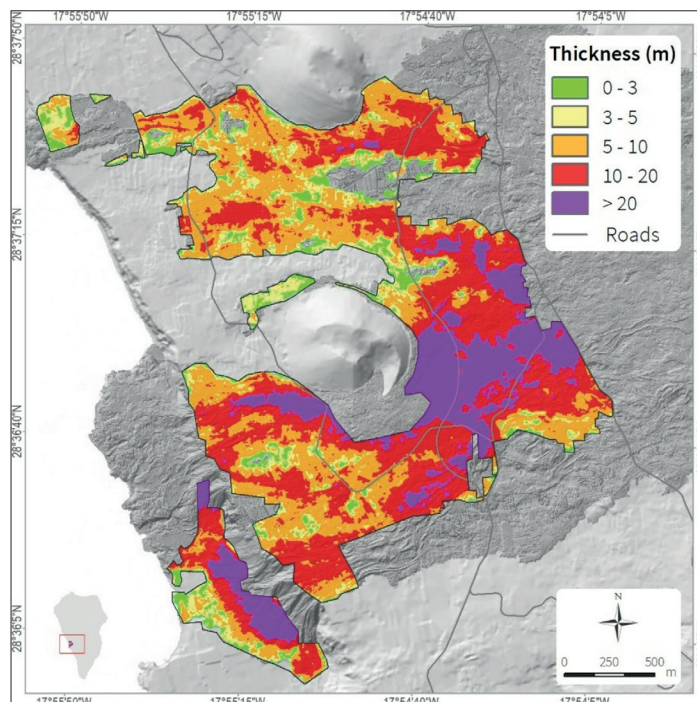
Figura 2. Lavas tipo pahoe-hoe mostrando estructuras cordadas.

Fuente: Elaboración propia. INVOLCAN



Figura 3. Mapa de espesores de coladas.

Fuente: Elaboración propia. INVOLCAN



zonas cubiertas por las coladas, para lo cual resultaba decisivo conocer el tiempo de enfriamiento necesario para que la temperatura de las lavas en una zona determinada y a una profundidad prefijada, alcanzaran valores compatibles con la recuperación territorial. Para ello, se realizaron una serie de investigaciones in situ, consistentes en la toma sistemática de medidas de temperatura en superficie y en profundidad. En el caso de las medidas en superficie se utilizaron cámaras termográficas, con el apoyo de drones, y en el caso de las medidas en el interior de las coladas se utilizaron *dataloggers* instalados en el interior de los sondeos realizados. El registro sistemático de temperaturas se inició en 2022, continuando en 2023. Además, se obtuvieron datos geológicos y geomecánicos a partir de los sondeos realizados, y se utilizaron métodos sísmicos *Seismic Analysis of Surface Waves* (SASW) y georradar, para identificar posibles cavidades y obtener datos de interés geotécnico. A partir de estas investigaciones se ha estimado el espesor de las coladas, su composición litológica, estructura geológica y presencia de cavidades.

Dado que el principal condicionante para la reconstrucción de las zonas cubiertas por coladas de lava ha sido la elevada temperatura de las mismas, uno de los principales objetivos se ha centrado en la estimación de los tiempos de enfriamiento de las coladas, y en la aportación de soluciones geotécnicas para las distintas actividades constructivas. Con estos fines se han desarrollado dos modelos de enfriamiento, denominados homogéneo y heterogéneo. En el primero, se considera al conjunto de las coladas como un único medio constituido por el mismo material y formado por lavas basálticas, isotrópicas y homogéneas y, por tanto, con mismas propiedades físico-químicas, sin tenerse en cuenta el espesor total de la colada. En el segundo modelo se considera un medio heterogéneo y anisotrópico, caracterizado por distintos tipos de litologías, y se tienen en cuenta las distintas capas de las coladas, su espesor, composición y conductividad térmica, así como el espesor total del conjunto de la colada. Los dos modelos de enfriamiento citados, homogéneo y heterogéneo, se han basado en la modelos físico-matemáticos de enfriamiento, que permiten relacionar el tiempo que tarda un cuerpo en enfriarse desde una temperatura inicial a otra más baja.

3. Resultados

Los resultados de modelos de enfriamiento desarrollados han sido comparados con las medidas de temperaturas registradas a lo largo de 2022 y 2023, tanto en la superficie de las coladas como a distintas profundidades en el interior de los sondeos. Las diferencias entre dichas medidas in situ y las estimadas por los modelos han variado entre el 12 % y el 16% dependiendo del modelo de enfriamiento utilizado. Estos resultados validan la aplicabilidad de los modelos, cuyo uso estaría condicionados a los parámetros de medida; por ejemplo, los modelos han partido de datos de sondeos cuya profundidad máxima ha sido de 10,5 m. Por debajo de esta profundidad los modelos podrían aplicarse, pero no se dispone de datos para su verificación.

Uno de los principales objetivos se ha centrado en la estimación de los tiempos de enfriamiento de las coladas, y en la aportación de soluciones geotécnicas para las distintas actividades constructivas

Los resultados de modelos de enfriamiento desarrollados han sido comparados con las medidas de temperaturas registradas a lo largo de 2022 y 2023, tanto en la superficie de las coladas como a distintas profundidades en el interior de los sondeos. Las diferencias entre dichas medidas in situ y las estimadas por los modelos han variado entre el 12 % y el 16% dependiendo del modelo de enfriamiento utilizado.

Por otro lado, el análisis del comportamiento térmico de las coladas ha permitido desarrollar dos tipos de soluciones geotécnicas aplicadas a la excavación de carreteras, cimentación de edificaciones y recuperación agrícola, que permitirían iniciar las obras de reconstrucción y recuperación en menores plazos a los estimados por los modelos de enfriamiento, y en condiciones térmicas compatibles con las distintas actividades, como carreteras, infraestructuras urbanas y agricultura.

4. Riesgos geológicos post-eruptivos condicionantes de la reconstrucción y medidas para su mitigación

Como consecuencia de la erupción volcánica de La Palma 2021 han surgido los siguientes peligros geológicos:

- Altas temperaturas en las coladas de lava condicionando cualquier tipo de actividad sobre ellas.
- Emisiones de gases tóxicos que han afectado a dos núcleos urbanos, obligando a la evacuación de parte de sus habitantes.
- Acumulación de cenizas con espesores de varios metros que han cubierto a numerosas viviendas, causando daños en zonas urbanas, carreteras, infraestructuras y suelo agrícola.
- Posibilidad de formación de lahares ante intensas precipitaciones en zonas de acumulación de cenizas y lapillis.
- Posibilidad de inestabilidad de las laderas del nuevo cono volcánico ante lluvias muy intensas.
- Posibilidad de colapsos del terreno por hundimientos de cavidades y tubos volcánicos ante sobrecargas estructurales, o por causas naturales.

Los tiempos de enfriamiento para alcanzar temperaturas inferiores a 50°C para espesores de 10 m de coladas podrían superar los 4 a 5 años, dependiendo del espesor total de la colada, condicionando los proyectos de reconstrucción.

Riesgos por altas temperaturas de las coladas de lava

Al finalizar la erupción la temperatura de las coladas de lava era de 1.100°C, iniciándose entonces el proceso de enfriamiento. Los tiempos de enfriamiento para alcanzar temperaturas inferiores a 50°C para espesores de 10 m de coladas podrían superar los 4 a 5 años, dependiendo del espesor total de la colada, condicionando los proyectos de reconstrucción.

Riesgos por gases tóxicos

Después de la erupción volcánica de diciembre 2021, algunas zonas que no habían sido dañadas por las coladas de lava fueron afectadas por emanaciones de gases de dióxido de carbono (CO₂).

Después de la erupción volcánica de diciembre 2021, algunas zonas que no habían sido dañadas por las coladas de lava fueron afectadas por emanaciones de gases de dióxido de carbono (CO₂) procedentes del subsuelo, gas tóxico que en altas concentraciones por encima del 15 V% puede ser letal. Esta circunstancia obligó a evacuar gran parte de la población de Puerto Naos y La Bombilla, situadas a pocos kilómetros del campo de coladas de lavas. La base del pequeño acantilado donde se ubica La Bombilla y varias zonas con garajes de Puerto Naos, parecen corresponder a una zona de emisión de gases asociados a la

actividad volcano-hidrotermal, que se manifiesta en superficie ocasionando altas concentraciones de CO_2 en las zonas habitadas. Recientemente se está desarrollando el proyecto “Alerta CO_2 IGN-INVOLCAN” instalándose más de 1.200 sensores para tratar de implantar soluciones efectivas y seguras a la población afectada.

Riesgos por inestabilidad de los taludes del cono volcánico y formación de lahares

Se analizaron las condiciones de estabilidad del nuevo edificio volcánico de Tajogaite para determinar su peligrosidad. El cono volcánico está formado por materiales piroclásticos, principalmente de lapillis y escorias, con intercalaciones de capas de cenizas y precipitados encostrados de sulfatos y carbonatos. La altura estimada del cono alcanza 200 m, con taludes de 30-35° de pendiente, que presentan fracturas que favorecen la emisión de gases.

Los resultados de los análisis de estabilidad en condiciones no saturadas daban un factor de seguridad de 1,2; lo que en términos geotécnicos equivaldría a condiciones estables; sin embargo, en condiciones saturadas el factor de seguridad sería inferior a 1,00; indicando condiciones de inestabilidad o rotura bajo lluvias muy intensas.

De acuerdo con los registros de precipitaciones y datos históricos, en esta región podrían ocurrir lluvias intensas de más de 100 mm en varias horas, con posible frecuencia de cada 10 años, y de forma excepcional podrían darse precipitaciones acumuladas de más de 400 mm en varios días en un intervalo de 50 años. Si se dieran estas condiciones es posible que se saturen los materiales piroclásticos del cono y se alcance la inestabilidad del mismo, así como la ocurrencia de lahares. Ante el riesgo de lahares, cuya probabilidad es baja o muy baja, e inestabilidad de los taludes del cono volcánico, se han propuesto las siguientes medidas preventivas:

- Instalación de un sistema de observación y vigilancia de las pendientes de las laderas del volcán.
- Instalación de estaciones meteorológicas en la zona, para la detección temprana de lluvias muy intensas.
- Incluir en los proyectos de obras de canalización y drenaje en carreteras y zonas urbanas la posibilidad de lluvias intensas con arrastre de cenizas y otros materiales sólidos.

Riesgos por colapsos del terreno

La presencia de numerosas cavidades y tubos volcánicos en el interior de las coladas de lava, principalmente en las lavas pahoe-hoe, constituye un importante riesgo de colapso del terreno, especialmente por sobrecargas de infraestructuras, cimentaciones o excavaciones, que pudieran afectar a la estabilidad de las cavidades situadas a poca profundidad y debajo del terreno excavado, o sobre

Los resultados de los análisis de estabilidad en condiciones no saturadas daban un factor de seguridad de 1,2, lo que en términos geotécnicos equivaldría a condiciones estables; sin embargo, en condiciones saturadas el factor de seguridad sería inferior a 1,00, indicando condiciones de inestabilidad o rotura bajo lluvias muy intensas.

La presencia de numerosas cavidades y tubos volcánicos en el interior de las coladas de lava, principalmente en las lavas pahoe-hoe, constituye un importante riesgo de colapso del terreno, especialmente por sobrecargas de infraestructuras, cimentaciones o excavaciones.

el que se asienten las infraestructuras o cimentaciones. Ante dicho riesgo de colapso se han propuesto las siguientes medidas preventivas:

- Disponer de mapas detallados donde se sitúen los tubos volcánicos y cavidades.
- Realización de sondeos geotécnicos y perfiles geofísicos con georadar para la detección de cavidades en las zonas susceptibles, o donde se proyecten obras de infraestructuras, excavaciones o cimentaciones.
- Las coladas tipo pahoe-hoe presentan mayor riesgo de colapso ante cargas importantes.

Debe tenerse en cuenta que los riesgos geológicos previamente descritos corresponden a los generados por la propia erupción de 2021, a los que habría que añadir los riesgos geológicos regionales de la vertiente occidental de Cumbre Vieja, en particular: el riesgo volcánico de la región, que ha sufrido 4 erupciones en los últimos 75 años (1949-2024), lo que supone peligrosidad alta y, con ello, una sismicidad asociada al vulcanismo. En este contexto se disponía de mapas de peligrosidad sísmica de la región elaborados con anterioridad a la erupción de 2021.

Dentro de los estudios realizados para la reconstrucción se han incluido mapas de peligrosidad sísmica y volcánica del ámbito territorial del Valle de Aridane, los cuales están disponibles en la web del Gobierno de Canarias.

5. Aplicaciones a la reconstrucción territorial

5.1 Condicionantes geotérmicos y geológicos

Los proyectos de reconstrucción de infraestructuras han estado condicionados por la necesidad de iniciar lo antes posible las obras bajo condiciones geológicas extremas debidas a las elevadas temperaturas de las coladas y los largos tiempos de enfriamiento, que hacían prácticamente inviable la reconstrucción a corto o medio plazo. Bajo estos condicionantes se estudiaron posibles soluciones basadas en las experiencias en otras regiones y, principalmente, en el desarrollo de nuevas soluciones alternativas. A partir de los modelos de enfriamiento de las coladas se han estimado los tiempos de enfriamiento para alcanzar temperaturas compatibles con cada tipo de actividad de reconstrucción, y contrastar estos datos con los previstos en los planes de reconstrucción, y en caso de incompatibilidad entre temperaturas y tiempos de enfriamiento, desarrollar soluciones alternativas.

La construcción de carreteras se pudo iniciar antes de los 6 meses después de la erupción, y las experiencias obtenidas durante su construcción han confirmado la viabilidad de la solución propuesta

5.2. Construcción de carreteras sobre lavas aun calientes

Varios meses después de la erupción, las temperaturas de las coladas superaban los 500°C en numerosas zonas, tanto en superficie como a pocos metros de profundidad, lo cual imposibilitaba empezar las obras de construcción

de carreteras a corto o medio plazo. En consecuencia, se propuso una posible solución basada en el comportamiento térmico de las coladas y las diferencias de conductividad térmica de los distintos materiales que conforman la colada lávica, que permitiría iniciar las construcciones en las lavas a partir de 6 meses a 1 año después de la erupción, en función de las temperaturas de la superficie de las coladas y de los tiempos de enfriamiento. Este tipo de solución sería recomendable en carreteras convencionales o provisionales, siendo su principal ventaja el corto plazo requerido para iniciar las obras y la menor complejidad en la ejecución.

La construcción de carreteras se pudo iniciar antes de los 6 meses después de la erupción, y las experiencias obtenidas durante su construcción han confirmado la viabilidad de la solución propuesta.

5.3. Recuperación agrícola

Uno de los principales recursos económicos de la isla de La Palma procede de la agricultura y particularmente del cultivo del plátano. Las coladas de lava de la erupción de 2021 destruyeron más de 7 km² de cultivos en la zona de mayor productividad. En 2023 se iniciaron las investigaciones térmicas y geotécnicas para la recuperación agrícola de las áreas afectadas por las coladas de lava. Dichas investigaciones consistieron en la medida de temperaturas mediante vuelos de dron.

Los resultados de las medidas en superficie han sido en su mayoría inferiores a 30°C; sin embargo, se han identificado varias zonas con valores más elevados, frecuentemente entre 60°C y 100°C, atribuidos a anomalías térmicas, siendo más frecuentes en las coladas tipo pahohoe que en las de tipo aa. De acuerdo con estos resultados y la presencia de zonas de anomalías térmicas, se han propuesto soluciones basadas en la colocación de rellenos naturales de baja conductividad que permitirían alcanzar temperaturas compatibles con la actividad agrícola.

5.4. Planificación urbana

Los proyectos de ordenación territorial y urbana planteados han incluido tres posibles zonas destinadas a nuevos emplazamientos poblacionales sobre coladas de lava, donde se han realizado investigaciones geotérmicas y geotécnicas para estimar la viabilidad de dichos emplazamientos para usos urbanísticos.

Los resultados de las temperaturas medidas en la superficie de las coladas superaron los 50°C en noviembre de 2022, y los tiempos de enfriamiento requeridos para alcanzar temperaturas iguales o menores de 30°C, como valor de referencia compatible con las actividades urbanísticas, eran de más de 3 años después de la erupción (2021), es decir después de 2024.

Los criterios de viabilidad térmica y geotécnica recomendados con fines urbanísticos, han sido los siguientes:

De acuerdo con estos resultados y la presencia de zonas de anomalías térmicas, se han propuesto soluciones basadas en la colocación de rellenos naturales de baja conductividad que permitirían alcanzar temperaturas compatibles con la actividad agrícola.

Los tiempos de enfriamiento requeridos para alcanzar temperaturas iguales o menores de 30°C, como valor de referencia compatible con las actividades urbanísticas, eran de más de 3 años después de la erupción (2021), es decir después de 2024.

- Se ha recomendado iniciar los proyectos a partir de 2025 para coladas de menos de 10 m de espesor, previa verificación de conformidad con las condiciones geotécnicas del emplazamiento, particularmente a partir de 5 m de espesor de colada.
- La máxima temperatura en la superficie de las coladas, compatible con las actividades constructivas, se ha establecido en 30°C, o la temperatura ambiente.
- Ausencia de cavidades y tubos volcánicos en el subsuelo donde se apoyen las infraestructuras.
- Priorizar como zonas más favorables las situadas sobre coladas aa cuyo espesor no supere 10 m.
- Evitar construir sobre coladas pahoehoe dado su desfavorable comportamiento térmico y geotécnico, con frecuentes anomalías térmicas por altas temperaturas y presencia de cavidades.
- Limitar la altura de las edificaciones a 1 planta sin excavación de sótanos, o hasta 2 alturas siempre que se justifique geotécnicamente.

6. Conclusiones

1. La erupción volcánica de Cumbre Vieja 2021 ha producido una gran transformación geomorfológica del relieve, con la emisión de grandes volúmenes de coladas de lavas y materiales piroclásticos, además de la formación de un gran cono volcánico, que bajo determinadas circunstancias podrían originar posibles peligros geológicos y geotécnicos, entre ellos: hundimientos del terreno por colapsos de cavidades o tubos volcánicos, inestabilidad de laderas del cono volcánico, lahares por arrastre de cenizas y piroclastos ante lluvias muy intensas, y la emisión de gases tóxicos. Algunos de estos riesgos están condicionados a precipitaciones muy intensas cuya probabilidad es baja, pero hay registros históricos que confirman esta posibilidad, ante lo cual se han propuesto determinadas medidas de prevención, para evitar los riesgos y mitigar las posibles consecuencias.
2. Se han desarrollado dos modelos de enfriamiento de coladas de lava para condiciones homogéneas y heterogéneas. Dichos modelos se han aplicado a las coladas de lava de la erupción volcánica de La Palma 2021 a partir de las temperaturas medidas a distintas profundidades, y de las propiedades térmicas, composición litológica y espesores de coladas. Ambos modelos han permitido calcular los tiempos de enfriamiento de las coladas y sus resultados han sido verificados comparando las temperaturas estimadas por los modelos de enfriamiento y las temperaturas registradas instrumentalmente.
3. Se han propuesto dos tipos de soluciones basadas en el comportamiento térmico de las coladas de lava, que permitirían iniciar la reconstrucción de las zonas afectadas en plazos significativamente más cortos que los estimados mediante los modelos de enfriamiento, y a temperaturas compatibles con la reconstrucción de infraestructuras y recuperación agrícola.

la. Dichas soluciones han sido verificadas experimentalmente y podrían ser aplicables a futuras erupciones en las islas Canarias, lo que permitiría abordar de forma más eficaz, y en menor plazo de tiempo, la reconstrucción y recuperación de las zonas afectadas.

4. El conocimiento geológico-térmico-geotécnico es una cuestión muy importante para la reconstrucción y ordenación territorial y urbana en zonas afectadas por erupciones destructivas, minimizando las consecuencias del desastre y los posibles peligros asociados.
5. El conocimiento científico y las soluciones ingenieriles basadas en dicho conocimiento aportan un impacto positivo en la población afectada.
6. Las experiencias de La Palma 2021, en lo que se refiere a los aspectos tratados en este trabajo, pueden ser aplicables no solo a futuras erupciones en el Archipiélago, sino a otras regiones volcánicas con erupciones del mismo tipo y condiciones socio-demográficas semejantes.

El conocimiento geológico-térmico-geotécnico es una cuestión clave para la reconstrucción y ordenación territorial y urbana en zonas afectadas por erupciones destructivas, minimizando las consecuencias del desastre y los posibles peligros asociados

Bibliografía

- Dai, F. C., C. F. Lee y X.H. Zhang (2001). GIS-based geo-environmental evaluation for urban land-use planning: a case study. *Engineering Geology* 61 (4): 257–271.
- González de Vallejo, L.I. (2012). Design with Geohazards: An integrated approach from engineering geological methods. *Soils & Rocks*, Int. J. Geotech. Geoenviron. Eng. 35(1), 1-28.
- González García, L (ed) (2009): *Mapas de riesgos naturales en la ordenación territorial y urbanística*, Ilustre Colegio Oficial de Geólogos.
- McHarg, I.L. (1971). *Design with Nature*. Wiley& Sons, Ed.
- Pérez Rodríguez N.M., Hernández Péres P.A. (2008). La vigilancia volcánica en España: una apuesta crucial para la reducción del riesgo volcánico. En I. Galindo Jiménez, L. Lain Huerta, y M. Llorente Isidro (editores): *El estudio y la gestión de los riesgos geológicos*, Instituto Geológico y Minero de España, pp.159-174.
- Sharma, J., Upgupta, S., Jayaraman, M., Chaturvedi, R. K., Bala, G., & Ravindranath, N. H. (2017). Vulnerability of forests in India: a national scale assessment. *Environmental management*, 60(3), 544-553.
- Yang, S., HE, S., Du, J., y Sun, X. (2015). Screening of social vulnerability to natural hazards in China. *Natural Hazards*, 76(1), 1-18.