

Análisis multivariable del trazado de la carretera experimental construida sobre coladas calientes de lava. El caso del volcán de Tajogaite (2021) en la isla de La Palma

Multivariate analysis of the layout of the experimental road built on hot lava flows. The case of the Tajogaite volcano (2021) on the island of La Palma. Canary Islands

Amílcar José CABRERA GARCÍA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ingeniero Civil e Ingeniero Técnico de Obras Públicas. Funcionario de Carrera del Cabildo Insular de La Palma.

Víctor Manuel CABRERA GARCÍA

Dr. Arquitecto. Docente e investigador del Departamento de Construcción Arquitectónica. Escuela de Arquitectura. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

RESUMEN

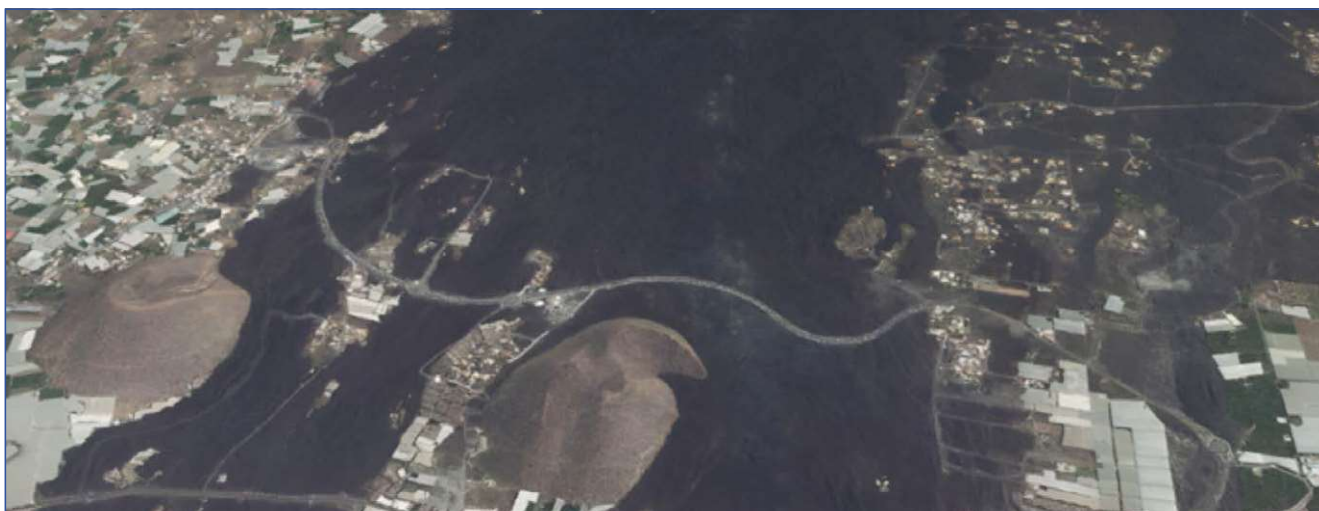
La carretera experimental construida sobre un campo de lavas calientes entre las localidades de La Laguna y Las Norias en la isla de La Palma se ha llevado a cabo con materiales procedentes del reciclaje y machaqueo de las coladas de lava, ceniza volcánica, cal y salmuera. La metodología empleada en el diseño, la optimización, la evaluación del impacto y la toma de decisiones en la redacción del proyecto del trazado de la infraestructura ha consistido en realizar un estudio de regresión multivariable y un estudio calorimétrico de los materiales de los suelos que conforman la plataforma. A la vista de los buenos resultados que se han obtenido en los ensayos, se demuestra que la evaporación de la dotación de salmuera debido a las elevadas temperaturas resulta ser un estabilizante natural que modifica la estructura interna de los suelos de las diferentes capas de la infraestructura viaria.

PALABRAS CLAVE: Carretera experimental, Ecomateriales, Suelos, Conductividad térmica.

ABSTRACT

The experimental road built over a hot lava field between the towns of La Laguna and Las Norias on the island of La Palma has been constructed with materials from the recycling and crushing of lava flows, volcanic ash, lime and brine. The methodology used in the design, optimisation, impact assessment and decision-making in the drafting of the infrastructure layout project consisted of carrying out a multivariate regression study and a calorimetric study of the soil materials that make up the platform. In view of the good results obtained in the tests, it has been demonstrated that the evaporation of the brine supply due to the high temperatures is a natural stabiliser which modifies the internal structure of the soils of the different layers of the road infrastructure.

KEY WORDS: Experimental road, Ecomaterials, Soils, Thermal conductivity.



1. Introducción

El 19 de septiembre de 2021 entró en erupción el Volcán “Tajogaite” en un paraje denominado Cabeza de Vaca, en la cordillera de Cumbre Vieja, en el municipio de El Paso, en la isla de La Palma. El tremor volcánico cesó el 13 de diciembre de 2021 y el 25 de diciembre de 2021 las autoridades del Gobierno de Canarias anunciaron la finalización de la erupción tras 85 días de actividad. La extensión de las coladas lávicas procedentes del volcán afectó a 1.219 hectáreas de terreno (Figura 1), que provocaron la destrucción de gran parte de las infraestructuras del Valle de Aridane, como es el caso de las infraestructuras de suministro agua potable, de electricidad y telecomunicaciones, así como las 2.988 edificaciones y los 73,8 km. de carreteras⁽¹⁾.

La situación generada por el fenómeno volcánico ocasionó una crisis en las comunicaciones viarias, así como importantes problemas de accesibilidad en la vertiente oeste de la isla de La Palma. En concreto, las carreteras más afectadas fueron la LP-2 “CIRCUNVALACIÓN SUR”, LP-213 “PUERTO NAOS - EL REMO” y LP-215 “TAZACORTE-LA LAGUNA”. En este sentido, el Cabildo Insular de La Palma ha puesto en marcha un Plan de Recuperación de la isla donde se recogen, de manera global, las principales líneas de actuación que deben desarrollarse. Dicho Plan establece que las obras de reconstrucción de infraestructuras deben de tener presentes las directrices de la Red Mundial de Reservas de la Biosfera de la UNESCO, ya que la isla está reconocida como tal desde el 6 de noviembre de 2002.

Con la finalidad de restablecer las infraestructuras dañadas por la erupción volcánica, el Plan de Emergencias Volcánicas de Canarias (PEVOLCA) encarga un informe técnico al coordinador del Grupo de Servicios Esenciales, donde se indica que la viabilidad de trazar una carrete-

ra de nueva creación sobre las coladas calientes de lava que comuniquen, con la máxima urgencia, el barrio de La Laguna y Las Norias, en el Valle de Aridane, con el objetivo de garantizar la movilidad viaria en la zona afectada, así como la instalación de los servicios esenciales afectados (agua, electricidad y telecomunicaciones). En este contexto, ¿sería posible diseñar y construir una infraestructura viaria *ex novo* sobre un entorno hostil como son las coladas calientes de lava atendiendo a criterios de seguridad?

Las infraestructuras viarias se conciben para dar servicios de comunicación a las sociedades garantizando el crecimiento social y cultural entre los territorios, sin perder los condicionantes de funcionalidad y seguridad, así como la integración paisajística. La condición lineal de las carreteras, así como el trazado y la sección transversal de las mismas, juegan un papel importante para con el paisaje. En líneas generales, la estética de una carretera es de aspecto simple y de carácter funcional con elementos estandarizados⁽²⁾.

El diseño geométrico de una carretera en el territorio debe de atender a varios condicionantes: visibilidad, topografía, geología, urbanismo, densidad de tráfico actual y futuro, seguridad, medio

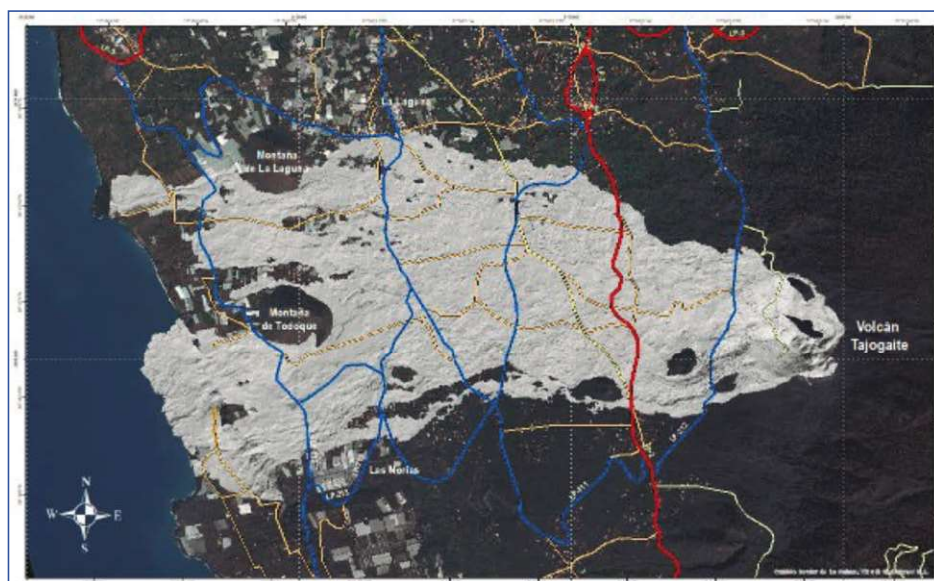


Figura 1. Infraestructura viaria afectada por las coladas de lava del Volcán de Tajogaite. Valle de Aridane. La Palma. Islas Canarias. Fuente: Elaboración propia.

ambiente y rentabilidad económica. En este sentido, generalmente la opción socioeconómica más ventajosa suele ser la ruta más corta entre dos puntos (origen y destino), lo que origina en ocasiones efectos negativos para el paisaje y la falta de integración con el entorno. El trazado en planta estará siempre representado por un eje que se corresponde con el centro de la calzada y está compuesto por alineaciones rectas, curvas circulares y curvas de transición. La norma 3.1-I.C “Trazado de Carreteras” del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible del Gobierno de España^(III) establece unos valores de longitud máxima y mínima que se deben de respetar por comodidad de conducción y evitar problemas relacionados principalmente tanto con el exceso de velocidad como por el cansancio.

En marzo de 2022 se presenta, a petición de la dirección del Plan de Emergencia Insular (PEINPAL), una propuesta de tres alternativas de trazado de una infraestructura viaria capaz de garantizar la movilidad vehicular y albergar los servicios esenciales (agua potable, agua de riego, electricidad y telecomunicaciones), dado que concurren circunstancias de extraordinaria y urgente necesidad que habilitan al Cabildo Insular de La Palma a la declaración de las mismas por el procedimiento de emergencia, de conformidad con lo previsto en el Art. 120 de la Ley 9/2017, de 8 de noviembre, de Contratos del Sector Público, por la que se transponen al ordenamiento jurídico español las Directivas del Parlamento Europeo y del Consejo 2014/23/UE y 2014/24/UE, de 26 de febrero de 2014.

Los diversos parámetros que condicionan el diseño y el trazado de las tres alternativas de la nueva infraestructura viaria sobre un campo de lavas calientes son el resultado de un análisis multivariante: Hitos en el paisaje del Valle de Aridane (Paraje Natural de los Volcanes de Aridane: montañas de La Laguna, Todoque, Triana y Argual, Volcán

de Tajogaite y campos de lava de nueva creación) y dar accesibilidad a las diferentes kipukas, con numerosas viviendas y parcelas de uso agrícola, que han quedado aisladas en el campo de coladas; así como de un análisis multivariable: las alturas de las coladas lávicas, las altas temperaturas de convección de 1.00 m a 3.00 m de profundidad, la probabilidad de existencia de canales lávicos, las afecciones catastrales y las pendientes, entre otras.

La presente investigación tiene como finalidad exponer el estudio empírico que se ha llevado a cabo para optimizar los recursos para la redacción del proyecto y la ejecución del trazado de una nueva carretera que se ha construido en un entorno hostil (sobre coladas calientes de lava) del volcán de Tajogaite en la isla de La Palma, en el tramo comprendido entre los puntos kilométricos 3+500 y 6+500 de la carretera de interés insular LP-213 “Puerto Naos-El Remo” y que comunica los barrios de La Laguna y Las Norias dentro de los términos municipales de Los Llanos de Aridane y Tazacorte.

2. Discusión y resultados

Se tiene constancia de que, en diferentes campos del conocimiento, el análisis numérico de la información frecuentemente se realiza por medio de distintos cálculos estadísticos. Actualmente, se encuentran disponibles métodos que otorgan nuevas posibilidades de tratamiento cuantitativo, que no sería posible realizar con los procedimientos tradicionales uni y bivariantes. Estos métodos, integrados por una serie de técnicas de análisis de datos que forman parte de la rama de la estadística conocida como análisis multivariante^(IV), resultan de gran utilidad para llevar adelante estudios, tanto de dependencia como de interdependencia entre variables.

La presente investigación expone el estudio llevado a cabo para optimizar los recursos en la redacción del proyecto y la ejecución del trazado de una nueva carretera, construida en un entorno hostil del volcán de Tajogaite.



La consistencia del trazado de la nueva infraestructura viaria, construida entre las localidades de la Laguna y las Norias en el Valle de Aridane y Tazacorte, no depende exclusivamente de la correlación entre las diferentes características geométricas de la vía y las sensaciones que esperan encontrar los usuarios de los vehículos al circular por la misma. También se requiere que sea un corredor que permita la instalación de los servicios esenciales (agua de abastecimiento poblacional y de riego, electricidad y telecomunicaciones) para dar suministro a las zonas afectadas, además de garantizar la movilidad vehicular entre el norte y el sur de la vertiente oeste de la isla de La Palma a través de un campo de lavas calientes de reciente formación, con la máxima seguridad posible.

Para llevar a cabo dicha infraestructura viaria, ha sido necesario dar cumplimiento a múltiples variables: Las alturas de las coladas de lava, las temperaturas de 1.00 m a 3.00 m de profundidad, los mapas de probabilidad de la existencia de canales lávicos, el catastro, las coordenadas (X) e (Y) UTM, así como las pendientes de la nueva realidad física que dejaron tras de sí los 85 días del proceso eruptivo del volcán Tajogaite. Mediante un análisis de regresión multivariable (método estadístico), se obtiene de forma individualizada una curva de regresión y, por tanto, la consistencia y propuesta definitiva del tronco de la carretera resulta de la superposición de todas y cada una de esas variables, y siempre asegurando el coeficiente de determinación más elevado.

Con los condicionantes descritos anteriormente, se presentaron a la Dirección del Plan de Emergencias tres variantes o alternativas del trazado de la nueva infraestructura viaria a construir sobre un campo de lavas calientes.

2.1. Variante 1: Alternativa 0.

Esta alternativa consiste en la recuperación del antiguo trazado de la carretera LP-213 "Puerto Naos - El Remo" entre el cruce urbano del barrio de la Laguna (P.K. 3+500) y las Norias (P.K. 6+750). Esta propuesta resulta del todo inviable debido a:

- Las elevadas temperaturas de convección en las coladas de lava, superiores a 280°C a 1.00 m y 600°C a 3.00 m de profundidad (Figura 2).
- Las elevadas pendientes del campo de lavas en la zona de la antigua carretera, por encima del 40%, siendo los espesores de las coladas lávicas entre los 25 m. a 30 m.
- La mayor probabilidad de existencia de canales lávicos.

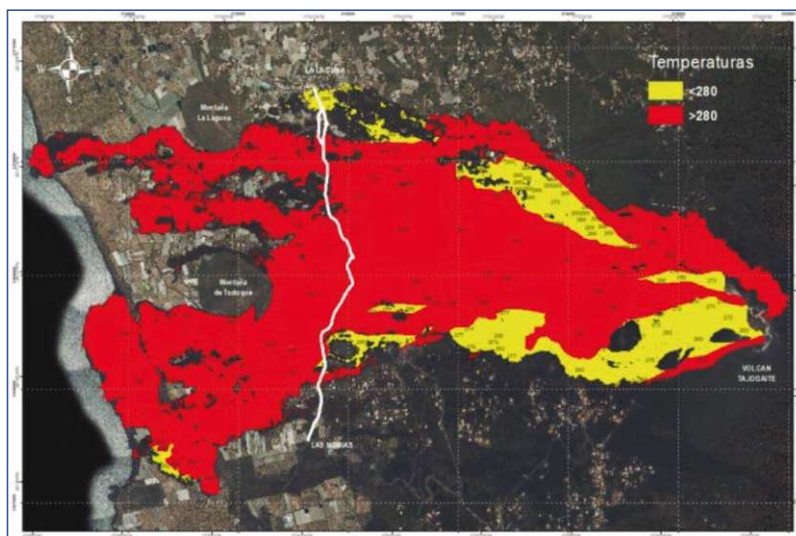


Figura 2. Temperaturas a 3 m. de profundidad. Fuente: IGME.

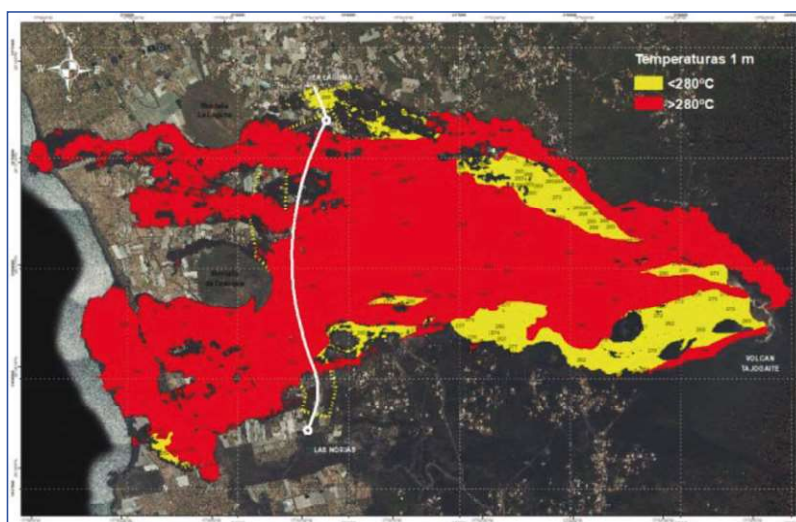


Figura 3. Temperaturas a 1 m. de profundidad. Fuente: IGME.

2.2. Variante 2: Alternativa 1.

Esta alternativa consiste en la ejecución de un nuevo trazado de la carretera LP-213, con el mismo origen y destino que la alternativa 0, entre el cruce urbano del barrio de la Laguna (P.K. 3+500) y las Norias (P.K. 6+750). Esta propuesta se rechaza debido a que no se cumple con los siguientes condicionantes:

- Las alturas de las coladas de lava son superiores a los 10 m y 20 m.
- Las elevadas temperaturas de convección en las coladas de lava, superiores a 280°C a 1.00 m (Figura 3) y a 600°C a 3.00 m de profundidad.
- Las elevadas pendientes del campo de lavas, superiores al 40% entre los puntos de mayor y menor altitud.
- La mayor probabilidad de existencia de canales lávicos.
- Mayor afectación catastral en cuanto a edificaciones y otros usos respecto de la situación anterior a la erupción volcánica.



Figura 4. Reclasificación del MDT. Fuente: Cabildo de La Palma.



Figura 5. Pendientes. Fuente: Cabildo de La Palma.

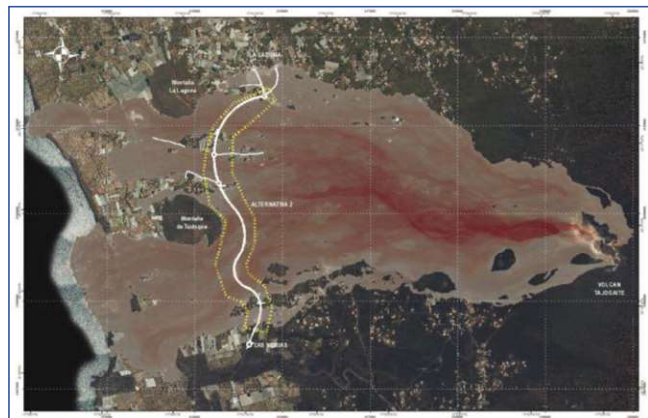


Figura 6. Canales Lávicos. Fuente: IGME.

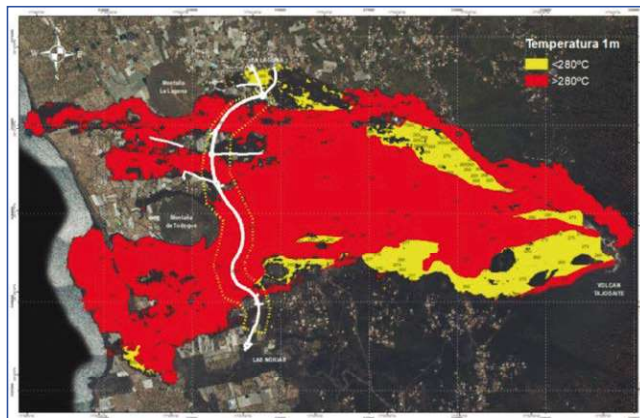


Figura 7. Temperaturas a 1.00 m. de profundidad. Fuente: IGME.

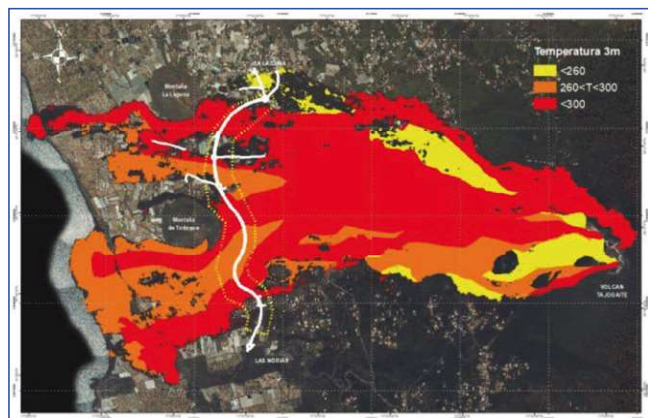


Figura 8. Temperaturas a 3.00 m. de profundidad. Fuente: IGME.

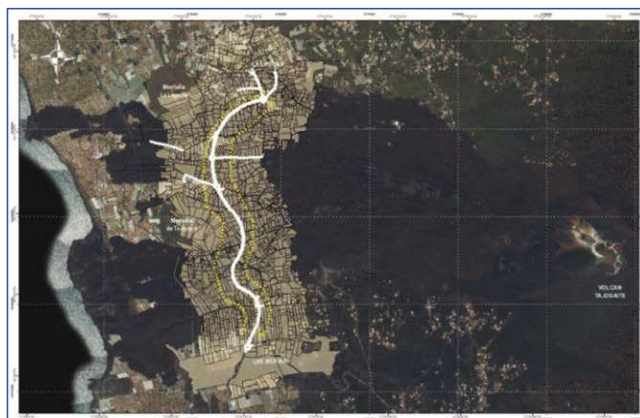


Figura 9. Afección Catastral. Fuente: Catastro.

2.3. Variante 3: Alternativa 2.

Esta alternativa consiste en la ejecución de un nuevo trazado de la carretera LP-213 entre el cruce urbano del barrio de la Laguna (P.K. 3+200) y las Norias (P.K. 6+750), en el valle de Aridane, y presenta los siguientes condicionantes:

- Se sitúa en una zona donde las alturas de las coladas de lava son inferiores a los 10 m. y 20 m. (Figura 4).
- Las diferencias de cota existentes entre los puntos de mayor y menor altitud en la zona de las coladas y las pendientes resultan inferiores al 20% (Figura 5).
- Las temperaturas de convección en las coladas de lava entre 1.00 m. (Figura 7) y 3.00 m. de profundidad (Figura 8) son inferiores a 300°C.

- Menor probabilidad de existencia de canales lávicos (Figura 6).
- Menor afectación catastral en cuanto a edificaciones y otros usos respecto de la situación anterior a la erupción volcánica.

Por lo tanto, la alternativa que ofrece mayor garantía de cumplimiento con cada uno de los parámetros preestablecidos a priori es la variante 3, alternativa 2 y, en consecuencia, se redacta el proyecto y se ejecutan las obras referidas a la nueva infraestructura viaria sobre el campo de coladas de lavas calientes. Hasta la fecha, se han propuesto varios métodos de evaluación de la consistencia del trazado de una infraestructura viaria y que se basan, por lo general, en el estudio pormenorizado e individualizado de algunos aspectos que intervienen en el problema, lo que no es consecuente con la diversidad de factores que forma parte de la actividad de la construcción, la combinación de los cuales en un momento concreto



Figura 10. Zonificación del ámbito de estudio sobre el Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Fuente: Elaboración propia.

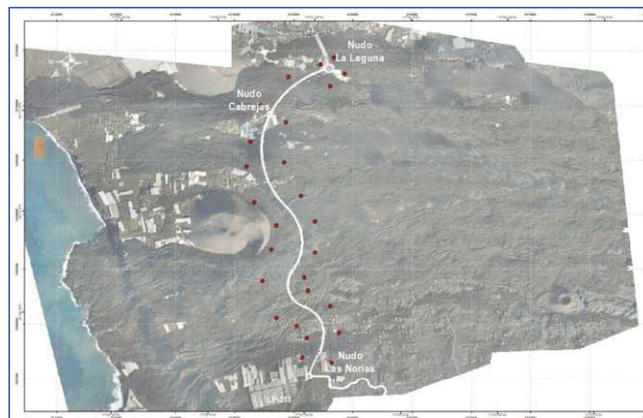


Figura 11. Zonificación del ámbito de estudio por topografía sobre las coladas de lava. Fuente: Elaboración propia.

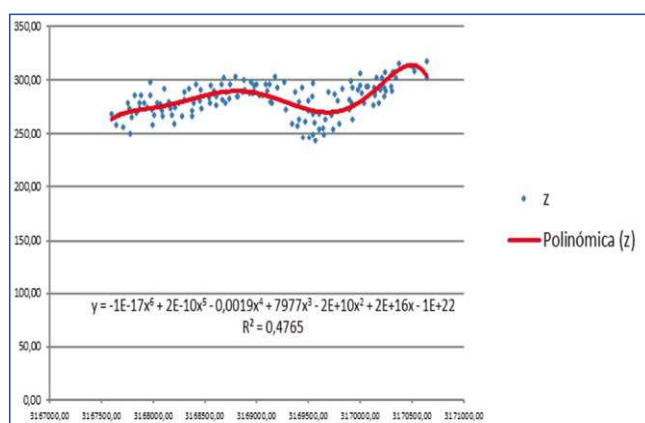


Figura 12. Comparación entre la cota Z (msnm) con coordenada YUTM. Fuente: Elaboración propia.

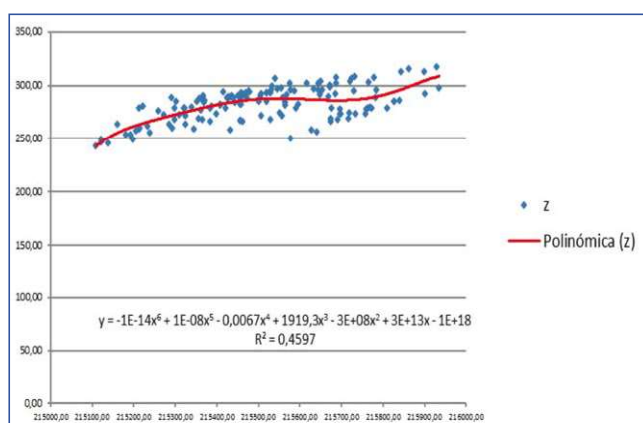


Figura 13. Comparación entre la cota Z (msnm) con coordenada XUTM. Fuente: Elaboración propia.

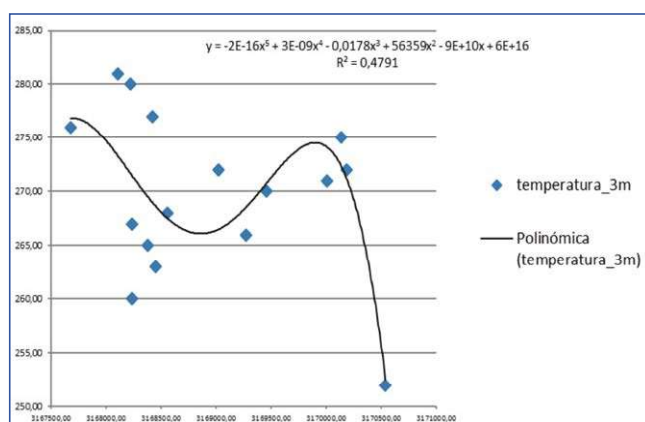


Figura 14. Temperaturas de convección a 3.00 m. de profundidad con coordenada YUTM. Fuente: Elaboración propia.

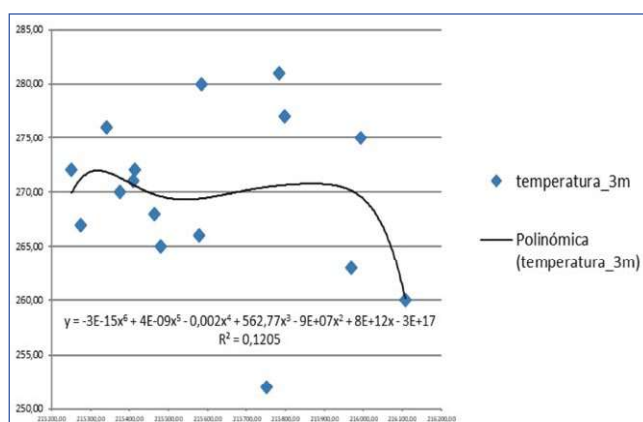


Figura 15. Temperaturas de convección a 3.00 m. de profundidad con coordenada XUTM. Fuente: Elaboración propia.

puede influir negativamente sobre la seguridad. Como parte del estudio de la consistencia del trazado de esta nueva infraestructura viaria es necesario tener en cuenta un aspecto importante que, de forma genérica, no se suele considerar en el diseño, siendo relevante dentro del proceso de trazado de una carretera: La coordinación entre planta y alzado mediante un análisis de regresión multivariante.

Con el estudio de regresión, se ha determinado cual es el lugar geométrico de los puntos donde se cumplen con la máxima probabilidad las variables comparadas (Figura 10). Además, se han realizado las comparaciones entre las cotas Z (msnm) y las temperaturas de convección a diferentes profundidades con las coordenadas XUTM e YUTM. De la superposición de cada una de las curvas se obtiene una poligonal que corresponderá con el eje del tronco principal de la nueva infraestructura viaria. Una vez encajado el trazado en planta en el

entorno físico por topografía (Figura 11), se ha definido su trazado en alzado a partir de un análisis del movimiento de tierras que es necesario para garantizar la máxima capacidad aislante de los materiales que conforman la plataforma de la carretera, al objeto de hacer frente a las elevadas temperaturas de convección que existen en el campo de las coladas de lava. Para la consecución de dicha premisa, se desarrolla un diagrama de masas (Figura 17) para compensar cada una de las actuaciones realizadas en las obras de emergencia y decretadas por la administración para su ejecución por el sistema de emergencia con la finalidad de garantizar de alguna forma el mínimo impacto volumétrico de materiales y, por tanto, de alteración del medio físico.

En consecuencia, el aprovechamiento y el reciclado del material volcánico resulta ser de vital importancia para desarrollar la nueva infraestructura viaria de forma sostenible.

Con la finalidad de disipar las altas temperaturas de convección en el campo de lavas, se realiza un diseño riguroso del alzado de la plataforma (Figura 18). Para la ejecución material de la infraestructura, se apuesta por un aprovechamiento sostenible de los recursos naturales que ofrece este territorio volcánico adscrito a la Red Mundial de Reservas de la Biosfera de la UNESCO y, en este sentido, los materiales de construcción empleados son los siguientes:

- Ceniza volcánica y áridos de diferentes granulometrías procedentes de la trituración de las coladas de lava del volcán de Tajogaite.
- Salmuera procedente de los residuos originados por las desalinizadoras portátiles que se instalaron de forma provisional en Puerto Naos ante la dificultad de obtener agua en la zona de actuación debido a que gran parte de la red de suministro de agua se encuentra sepultada por las coladas de lava.

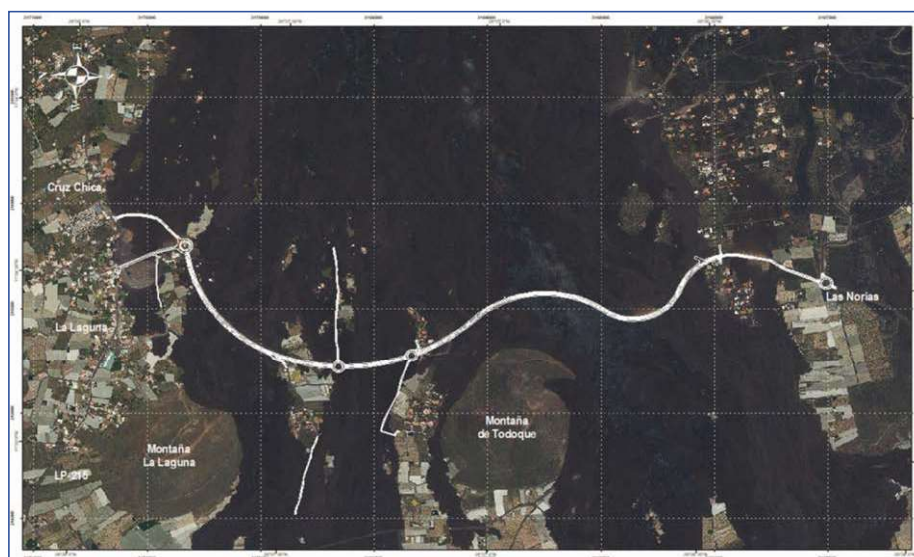


Figura 16. Trazado en planta de la nueva carretera entre la Laguna y las Norias. Valle de Aridane. Isla de La Palma. Fuente: Elaboración propia.

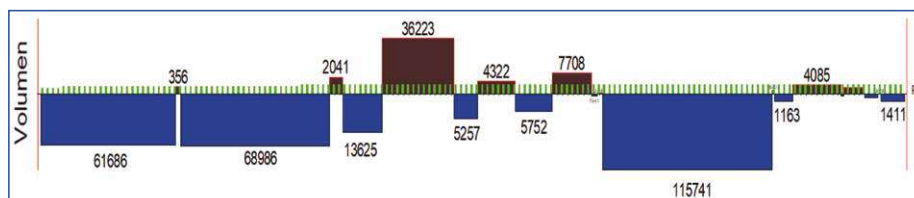


Figura 17. Diagrama de Masas. Fuente: Elaboración propia.

- Cal viva y cal hidráulica como conglomerante apto para resistir las elevadas temperaturas que emanan las coladas de lava y, por tanto, disminuir la conductividad térmica del sistema.

Para la ejecución material de la infraestructura, se apuesta por un aprovechamiento sostenible de los recursos naturales que ofrece este territorio volcánico, adscrito a la Red Mundial de Reservas de la Biosfera de la UNESCO.



Actualmente no se tiene conocimiento de cuáles deben ser los procedimientos de construcción de las infraestructuras viarias sobre los campos de lavas calientes basados en el estudio de la conductividad térmica de los suelos que conforman su estructura. Tanto en la literatura como en las normativas vigentes, no figuran valores fiables acerca de la conductividad térmica de los materiales de los suelos (contenido de humedad o temperaturas a las que se ha medido) y mucho menos del material procedente del machaqueo y clasificación de las coladas de lava.

La conductividad térmica (λ) es uno de los parámetros fundamentales para llegar a comprender el comportamiento higrótérmico del material e interviene en los modelos físicos y matemáticos que se utilizan para estimar los consumos energéticos de los edificios⁽⁶⁾.

Por tanto, conocida la (λ) de forma fiable, se podría prever de manera aproximada el comportamiento térmico de los suelos y, para este caso en concreto, reducir la conducción de calor que proviene de las coladas calientes de lava entre las distintas capas de la infraestructura viaria. La conductividad térmica no puede ser un valor fijo para los materiales procedentes del machaqueo y clasificación de las coladas lávicas, sino que oscilará dentro de una horquilla de valores en función del contenido de humedad y de la temperatura, incluso de la densidad en los casos en los que los materiales sean heterogéneos. El proceso de transporte del calor a través de un sólido es complejo, debido a la existencia de poros con aire y agua ocluida en su interior⁽⁶⁾. Se superponen los procesos de conducción, convección y radiación, a los que se añade la influencia del calor latente de vaporización del agua en caso de que haya cambiado de estado. Es decir, el aparente sólido es en realidad una mezcla de fases (sólida, líquida y gaseosa), en las que cada una tiene su aportación al conjunto.

Los tres parámetros que afectan directamente y con mayor incidencia al comportamiento térmico son: la densidad, el calor específico y la conductividad térmica. De ellos, solo este último es complejo de medir, es variable y (para un mismo material) depende principalmente de la propia densidad, del contenido de la humedad (dependiente del coeficiente de sorción higroscópica y del coeficiente de resistencia a la difusión de vapor de agua) así como de la temperatura.

Las fachadas convencionales de la edificación se fabrican con materiales sólidos densos con porosidades bajas o medias y que trabajan a temperatura ambiente, lo que significa que el calor se transmite hacia su interior principalmente por conducción. Como resultado, los fenómenos de la radiación y la convección se reducen a las superficies de los parámetros⁽⁶⁾. Para el caso que nos ocupa, resulta necesario disminuir la porosidad del material procedente del

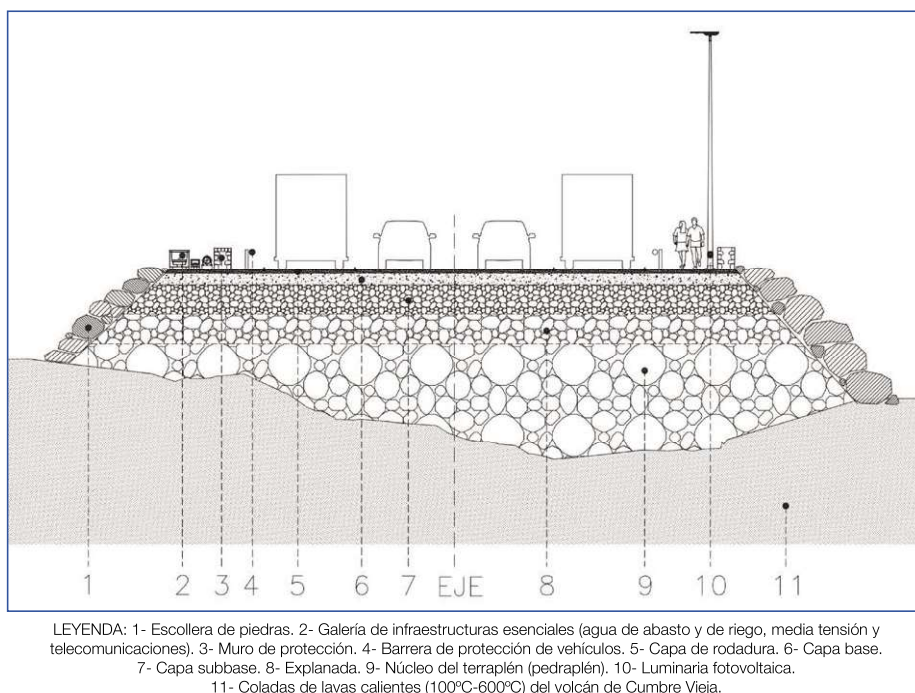


Figura 18. Sección transversal de la nueva carretera entre la Laguna y las Norias. Fuente: Elaboración propia.

tratamiento y machaqueo de las coladas de lava, adicionando un medio salino (la salmuera) y cal. La conductividad térmica y el comportamiento higrótérmico de los materiales indicados anteriormente se obtuvieron mediante el Método de la Aguja Térmica (MAT), que facilitó el análisis de la fiabilidad del sólido generado.

3. Ensayos de laboratorio

La caracterización térmica de los materiales que configura la infraestructura viaria se realiza en laboratorio, con el material seco y con humedad higroscópica (con agua potable y con salmuera), con la finalidad de controlar los parámetros y poder comparar los resultados. Se miden cuatro muestras con los diferentes materiales en varios sectores de la plataforma de la infraestructura viaria: Zahorra artificial procedente de la clasificación y machaqueo de las coladas de lava, adición de cal y ceniza volcánica. Para determinar los valores de conductividad térmica, las muestras elegidas se ensayaron por separado con agua potable y con agua con diferentes niveles de salinidad.

- Muestra uno: 100% de agua potable.
- Muestra dos: 75% de agua potable y 25% de salmuera.

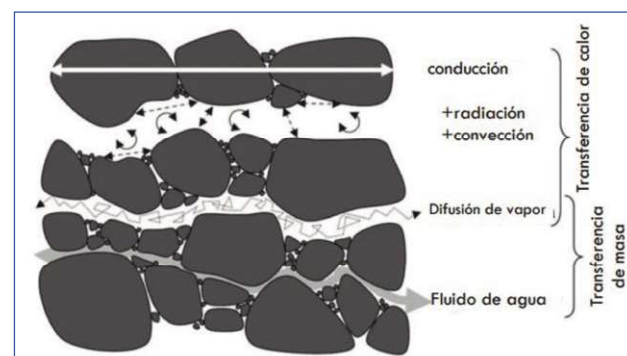


Figura 19. Transferencia de calor y masa en un material granular poroso. Fuente: Hall y Allison, 2009a.

- Muestra tres: 50% de agua potable y 50% de salmuera.
- Muestra cuatro: 100% de salmuera.

Las mediciones de las muestras se obtuvieron a través de un medidor TLS-100, dispositivo portátil que se utiliza para medir la conductividad y la resistencia térmica de una diversidad de muestras, entre ellas, suelos, rocas, hormigón y polímeros. Este elemento registra, almacena y procesa los resultados que se obtienen a través de un sensor tipo RK-3, lo que permite realizar mediciones de las propiedades térmicas de los materiales. El medidor de Fuente de Línea Transitoria (TLS) cumple con las normas ASTM D5334 e IEEE 442-2017. La aguja del sensor consta de un cable calefactor delgado y un sensor de temperatura sellado en un tubo de acero de 150, 100 o 50 mm. El sensor se introduce totalmente en la muestra a analizar. El calor llega a la muestra mediante una fuente de corriente constante (q) y el incremento de la temperatura se registra durante un período de tiempo determinado. Para el cálculo de la conductividad térmica (λ), se utiliza la pendiente (a) del diagrama de incremento de la temperatura frente al logaritmo del tiempo. Mientras mayor sea la conductividad térmica de una muestra, la pendiente será menos pronunciada. Para muestras de baja conductividad térmica, la pendiente será más pronunciada^(vii).

Los ensayos se realizaron con umbrales de temperaturas que oscilaban entre 28°C y 140°C. Los resultados de los mismos revelaron que, a medida que aumentaba la temperatura, las muestras con escasa salinidad presentaban una mayor conductividad térmica y,

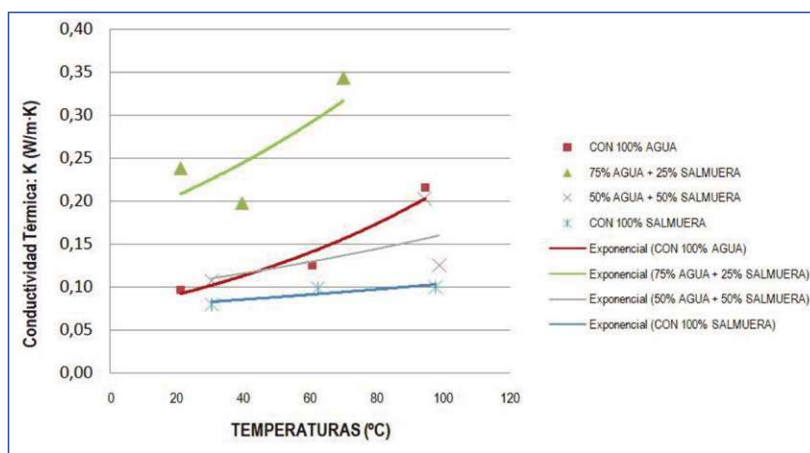


Figura 20. Niveles de conductividad térmica de las muestras ensayadas. Fuente: Elaboración propia.

por el contrario, las muestras con mayor salinidad presentaban una menor conductividad térmica (Figura 20).

De acuerdo a Villar^(viii), a pesar de que la propia temperatura de las muestras influye en el valor de la (λ), dado que los materiales estudiados no tienen un coeficiente de (λ) elevado y los rangos de temperatura en que nos movemos son moderados, el error por esta causa no se considera significativo. En el MAT se constata que, a medida que aumenta el tiempo de medida, aumenta el valor de (λ) y disminuyen la dispersión y la desviación típica. Los parámetros que influyen en los resultados son:

- El tiempo de medida.
- La incorporación de grasa térmica.
- El contenido de humedad de las piezas.



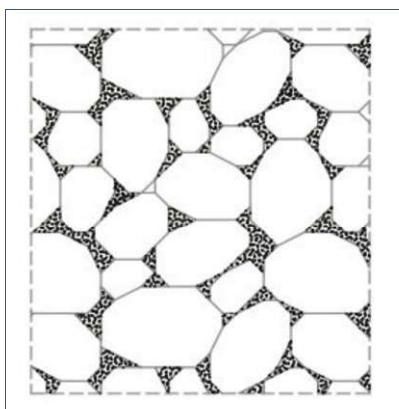


Figura 21. Cristalización del sodio en los vacíos de los suelos. Fuente: Elaboración propia.

Las características físico-químicas de la salmuera residual y la cristalización de las sales durante el proceso de evaporación la convierten en un factor clave para la cohesión de los materiales porosos que se han empleado en la construcción de esta singular infraestructura viaria. Además, la presencia de esta disolución salina condiciona otros mecanismos de deterioro, como son las reacciones de propia disolución, la adsorción de gases y la actividad biológica. La distribución de la sal disuelta dentro de la masa de los suelos se realiza de manera rápida, debido a que el cloruro de sodio (NaCl) es soluble en agua y permite que ocupe con facilidad los huecos. Durante el período de fraguado, la mezcla suelo-sal pierde humedad rápidamente debido a las elevadas temperaturas existentes, lo que permite evaporar el cloro y cristalizar el sodio en los vacíos de los materiales pétreos de los suelos, lo que supone un aumento considerable de la densidad de los mismos (Figura 21).

Para el caso que nos ocupa, el cloruro de sodio (NaCl) produce efectos positivos sobre la relación humedad-densidad de los suelos que carecen de plasticidad, y actúa como aislante térmico dada su baja conductividad térmica.

Determinar las propiedades térmicas de los suelos es fundamental en diversas aplicaciones de la Ingeniería Geotécnica, como el diseño de estructuras termo-activas, el aislamiento de sistemas de transmisión subterráneos, el almacenamiento de desechos sólidos y radioactivos, así como la estabilización térmica de suelos^[9]. En este sentido, se ha elaborado un ráster del trazado de la infraestructura viaria con la finalidad de obtener los mapas de conductividades térmicas de cada una de las capas que conforman su sección transversal (Figura 18)



Figura 22. Mapa de conductividad térmica en la capa del terraplén (pedraplén). Fuente: Elaboración propia.

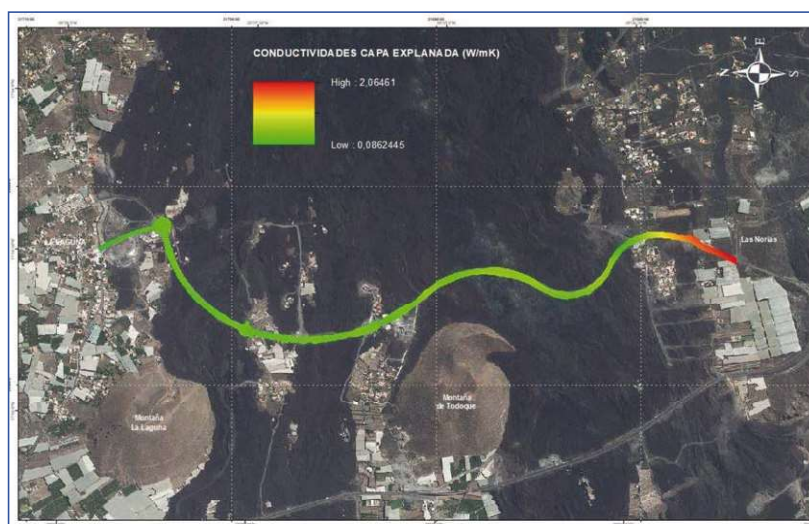


Figura 23. Mapa de conductividad térmica en la capa de la explanada. Fuente: Elaboración propia.

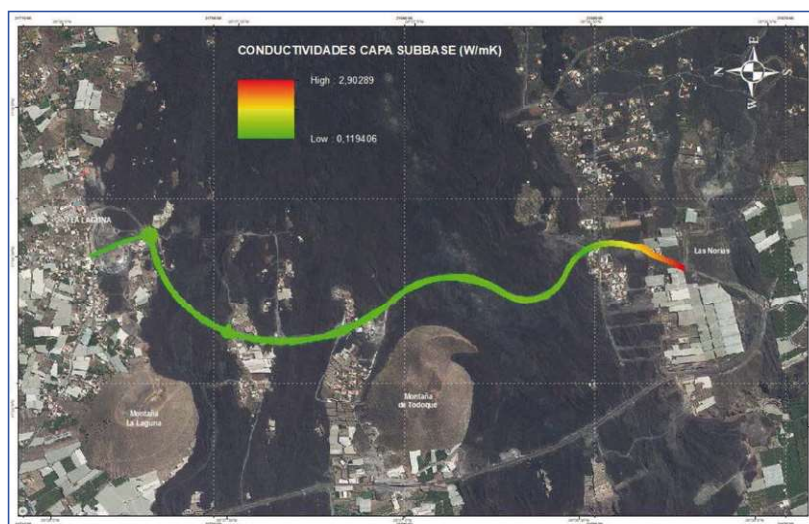


Figura 24. Mapa de conductividad térmica en la capa de la subbase. Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

En la actualidad, no se dispone de suficientes datos precisos de las conductividades térmicas de los suelos (materiales terrosos), en parte debido a que su estudio se ha focalizado principalmente en las envolventes de las edificaciones con materiales heterogéneos con escasas conductividades térmicas. La transferencia de calor en los suelos es un fenómeno complejo que involucra múltiples procesos simultáneos, y no se suele considerar en la realización de las infraestructuras viarias.

La carretera experimental realizada sobre un campo de lavas calientes (100°C - 600°C) entre las localidades de La Laguna y Las Norias en la isla de La Palma se ha construido con materiales procedentes del reciclaje y machaqueo de las coladas de lava, ceniza volcánica, cal y salmuera. A la vista de los resultados obtenidos, se concluye que la dotación de salmuera en las distintas capas de la infraestructura viaria resulta ser un material aislante dada su baja conductividad térmica. Esta circunstancia, junto a las elevadas temperaturas existentes en un campo de lavas calientes, convierte a la salmuera en un estabilizante natural que modifica la estructura interna de los suelos seleccionados, los cuales oponen resistencia al paso del calor de conducción (cristalización del sodio en los vacíos de los suelos).

En este contexto, se observan mejoras considerables en las propiedades físicas y mecánicas, así como una reducción significativa de la porosidad de los suelos de cada una de las capas que configuran esta singular infraestructura viaria.

Referencias bibliográficas

- I. Informe sobre las actuaciones y medidas emprendidas tras la erupción del volcán de Cumbre Vieja (La Palma), seis meses después del inicio de la emergencia. <https://riesgovolcanico-lapalma.hub.arcgis.com/>
- II. LORO AGUAYO, Manuel (2015) "Modelo para la integración del trazado de infraestructuras lineales en el paisaje y medio ambiente basado en SIG". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos.
- III. ESPAÑA. Norma 3.1-IC de Trazado de Carreteras. Ministerio de Fomento del Gobierno de España.
- IV. DILLON, William R; GOLDSTEIN, Matthew. (1984) "Multivariate Analysis. Methods and Applications. Wiley&Sons. New York.

- V. MOSQUETA ARENCIBIA, Pablo (2013) "Medida de la conductividad térmica con el método de la aguja térmica, basado en la fuente lineal de calor transitorio, para su aplicación en los cerramientos de adobes y bloques de tierra comprimida". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Arquitectura.
- VI. BAREA, Rafael (2004). "Thermal conductivity biphasic ceramics". Universidad Autónoma de Madrid. Facultad de Ciencias.
- VII. <https://thermtest.com/latinamerica/tls-100>
- VIII. VILLAR, María Victoria; AROZ, J (2011), "Medida de la conductividad térmica de adobes". Nota técnica CIEMAT/DMA/DG200/1/12.
- IX. FAROUKI, Omar. T (1981). "The thermal properties of soils in cold regions", Cold Regions Science and Technology. Vol 5, pp 67-75. [https://doi.org/10.1016/0165-232X\(81\)90041-0](https://doi.org/10.1016/0165-232X(81)90041-0)

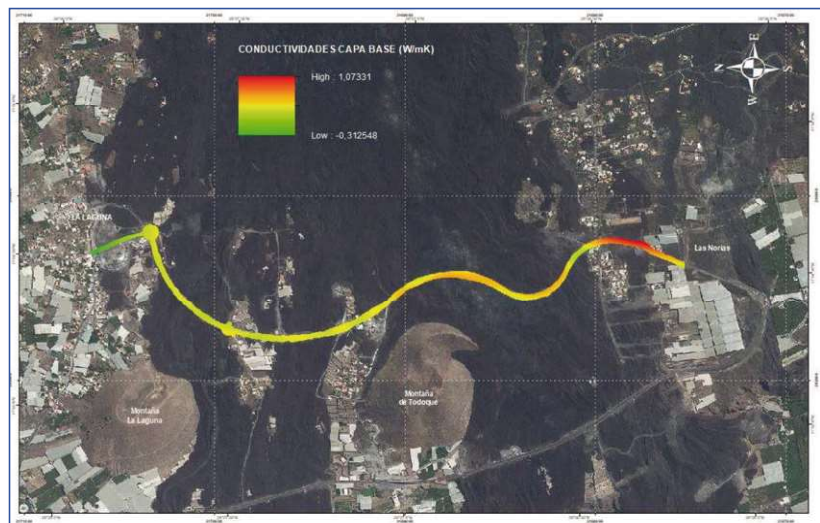


Figura 25. Mapa de conductividad térmica en la capa de la base. Fuente: Elaboración propia.

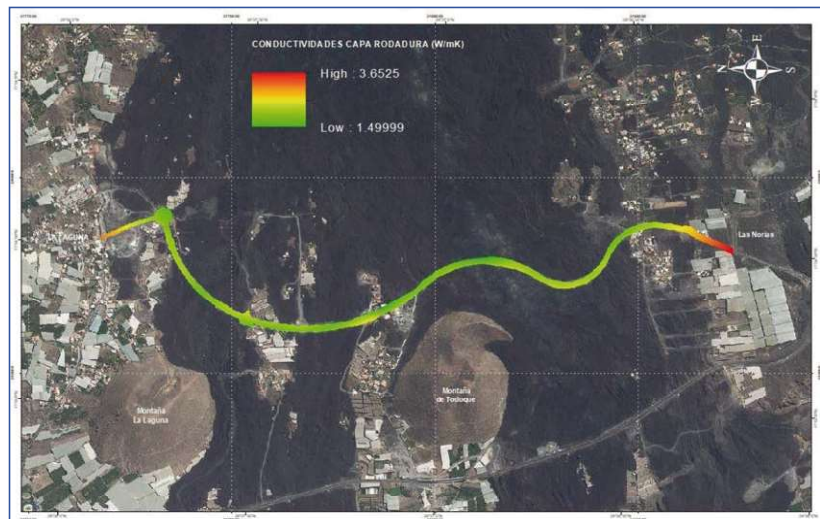


Figura 26. Mapa de conductividad térmica en la capa de rodadura. Fuente: Elaboración propia.