

Carretera ecológica experimental construida con materiales del volcán de Cumbre Vieja sobre lavas calientes. Ecomateriales para las infraestructuras viarias en territorios volcánicos. Isla de La Palma. España

Experimental ecological road built with materials from the Cumbre Vieja volcano on hot lava. Ecomaterials for road infrastructures in volcanic territories. Isla de La Palma. Spain

Amilcar José Cabrera García^{ID} Cabildo Insular de La Palma. España. amilcar.cabrera@ciccp.es

Víctor Manuel Cabrera García^{ID} Escuela de Arquitectura. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. España. victormanuel.cabrera@ulpgc.es

Autor de contacto: victormanuel.cabrera@ulpgc.es

RESUMEN

Tras el anuncio oficial del cese del volcán de Cumbre Vieja en la isla de La Palma, el Plan de Emergencias Volcánico de Canarias (PEVOLCA) dictaminó, entre otras, la necesidad de construir una carretera ex novo en un entorno hostil capaz de garantizar la conexión Norte-Sur de la red viaria de la vertiente oeste de la isla de La Palma y que se había perdido. Se ha realizado un estudio empírico de la construcción de una carretera ecológica sobre las coladas calientes de lava con materiales procedentes del volcán de Cumbre Vieja. El diseño y la ejecución de esta nueva infraestructura viaria de 3287 metros de longitud entre las localidades de La Laguna y de Las Norias, en el Valle de Aridane, en la isla de La Palma, arrojan resultados satisfactorios en las pruebas realizadas y se considera una infraestructura viaria segura desde la óptica del marco legislativo actual.

Palabras clave: volcán; ecomateriales; carretera ecológica; sostenibilidad; paisaje vial.

ABSTRACT

After the official announcement of the cessation of the Cumbre Vieja volcano on the island of La Palma, the Canary Islands Volcanic Emergency Plan (PEVOLCA) ruled, among other things, on the need to build an ex novo road in a hostile environment capable of guaranteeing the north-south connection of the road network on the western slope of the island of La Palma, which had been lost. An empirical study was carried out on the construction of an ecological road over the hot lava flows with materials from the Cumbre Vieja volcano. The design and execution of this new road infrastructure of 3287 metres in length between the towns of La Laguna and Las Norias, in the Aridane Valley, on the island of La Palma, have yielded satisfactory results in the tests carried out and it is considered a safe road infrastructure from the point of view of the current legislative framework.

Keywords: volcano; ecomaterials; ecological road; sustainability; road landscape.

Cómo citar este artículo/Citation: Amilcar José Cabrera García, Víctor Manuel Cabrera García (2025). Carretera ecológica experimental construida con materiales del volcán de Cumbre Vieja sobre lavas calientes. Ecomateriales para las infraestructuras viarias en territorios volcánicos. Isla de La Palma. España. Informes de la Construcción, 77 (577):6906. <https://doi.org/10.3989/ic.6906>.

Copyright: © 2025 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 27/01/2024

Aceptado/Accepted: 24/01/2025

Publicado on-line/Published on-line: 25/03/2025

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 1219 hectáreas de terreno (figura 1), lo que provocó la destrucción de gran parte de las infraestructuras del Valle de Aridane, como las infraestructuras de suministro agua potable, de electricidad y telecomunicaciones, así como las 2988 edificaciones y los 73,8 Km. de carreteras (1).



Figura 1. Extensión de las coladas de lava del volcán “Tajogaite” en Cumbre Vieja. Valle de Aridane. La Palma. Islas Canarias. España. Fuente: <https://visor.grafcan.es/visorweb/>

El Cabildo Insular de La Palma ha implementado una serie de medidas para la reconstrucción y el fortalecimiento económico de la isla tras la erupción volcánica. El Plan de Recuperación que ha diseñado el Cabildo Insular de la isla establece las principales líneas de actuación que se deben seguir. Sin embargo, se han ejecutado obras de emergencia de carácter provisional en las infraestructuras eléctricas (grupos electrógenos auxiliares), de suministro de agua para abastecimiento y riego (desaladoras portátiles) y en las carreteras mientras se planifican las obras de reconstrucción definitiva.

Las carreteras son infraestructuras artificiales que construye el ser humano en el paisaje para facilitar la movilidad entre territorios. Dependiendo de la orografía del terreno, las infraestructuras viarias se construyen de diversas formas, con un impacto variable en el paisaje (desmontes, rellenos controlados con materiales ajenos al propio lugar, contenciones, puentes, soterramientos, etc.). Los estudios de impacto ambiental (EIA) ayudan a minimizar los efectos directos e indirectos sobre el territorio durante su construcción: La pérdida de la capa vegetal, la modificación de los patrones naturales de drenaje del terreno, el incremento de la temperatura, etc. Sin embargo, en España es viable construir una carretera sin realizar estudios de impacto ambiental (EIA) según lo establecido en el artículo 8.3 de la Ley 21/2013 de Evaluación Ambiental (2), en situaciones excepcionales tales como la reparación de infraestructuras críticas dañadas como consecuencia de eventos catastróficos y obras de emergencia. Este es el caso de la isla de La Palma, que se encuentra bajo el amparo del Real Decreto-ley 20/2021, de 5 de octubre (3) por el que se adoptan medidas urgentes de apoyo para la recuperación de los daños causados por las erupciones volcánicas y para la reconstrucción económica y social. En este escenario, se propone la reutilización de los materiales pétreos de las coladas de lava del volcán de Cumbre Vieja para disminuir, en la medida de lo sea posible, los efectos adversos sobre el medio ambiente que conlleva la extracción de áridos de canteras.

Gran parte de la red española de carreteras presenta deterioros superficiales y estructurales en el pavimento, lo que conlleva riesgos para la seguridad vial y el aumento considerable de las partidas económicas destinadas a las tareas de mantenimiento y reparación (figura 2).

Muchas capas bituminosas de rodadura fallan por problemas asociados al daño por envejecimiento antes que por las sollicitaciones impuestas por los vehículos. Frente a esta problemática se han intentado soluciones en el diseño que consisten frecuentemente en aumentar el contenido de asfalto en las mezclas para lograr una película de ligante de mayor espesor envolviendo a los áridos y reducir el porcentaje de vacíos (4).

El pavimento de una infraestructura viaria debe de proveer de una conducción suave, una resistencia al deslizamiento, resistencia a las cargas del tráfico durante un tiempo determinado y una capacidad de drenaje suficiente para permitir una circulación segura. En la actualidad, para la construcción de las carreteras se tienen como alternativas los pavimentos rígidos y los pavimentos flexibles (5) y los pavimentos asfálticos son los más utilizados en la mayoría de los países. Las interacciones entre el pavimento y los vehículos (efectos de la rugosidad, macrotextura, desviaciones en el consumo de combustible del vehículo), así como las interacciones entre el pavimento y el medio ambiente (es decir, los efectos en el clima urbano, escorrentía de aguas pluviales, ruidos, etc.) resultan importantes en consideraciones de sostenibilidad (6). Las infraestructuras viarias de isla de La Palma se configuran bajo un sistema de anillos paralelos al eje de la dorsal de la isla (figura 3) y se clasifican en varios grupos:

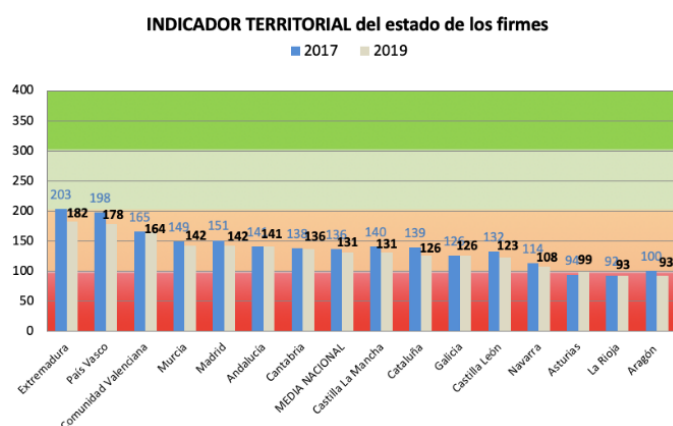


Figura 2. Indicador territorial del estado de los firmes en España (2017-2019). Fuente: Asociación Española de la Carretera. Informe 2020 sobre las necesidades de inversión en conservación

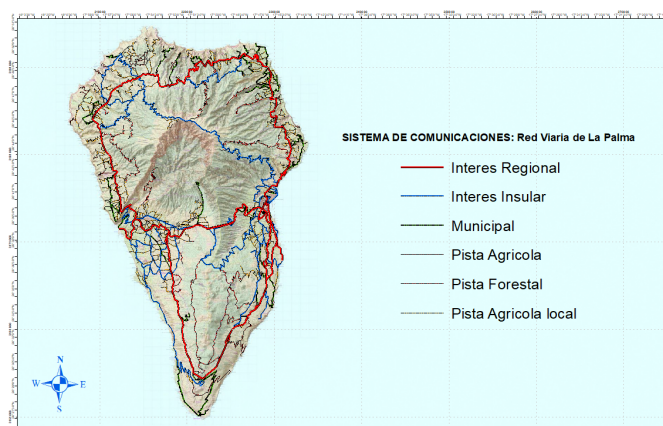


Figura 3. Red viaria de la isla de La Palma. Islas Canarias. España. Fuente: Servicio de infraestructuras del Cabildo de La Palma

- Carreteras de circunvalación, de interés regional cuya titularidad corresponde a la Comunidad Autónoma de Canarias.
- Carreteras insulares, cuya titularidad corresponde al Cabildo Insular.
- Carreteras municipales y Pistas forestales, cuya titularidad corresponde a los Ayuntamientos.
- Pistas agrícolas locales, cuya titularidad corresponde a particulares.

La naturaleza del firme de las carreteras generalmente está compuesta por una serie de capas compactadas de diversos espesores y materiales que configuran el pavimento. Estas capas se diseñan para proporcionar resistencia y comodidad al tráfico rodado. Entre ellas se encuentran la capa de rodadura, que es la que está en contacto directo con el tráfico y debe ser resistente al desgaste. La capa intermedia por su parte, distribuye las cargas hacia las capas inferiores y contribuye a la durabilidad del pavimento. Los firmes de las diferentes carreteras que se han construido a lo largo de tiempo en la isla de La Palma atienden generalmente a las siguientes configuraciones:

- Carreteras de circunvalación: Se configura en varias capas de Mezcla Bituminosa en Caliente (MBC) sobre capa de Zahorra Natural (ZN) y/o Zahorra Artificial (ZA). La capa de pavimento está sujeta a las sucesivas repavimentaciones derivadas de las operaciones de conservación y mantenimiento debido a los daños ocasionados por el incremento del tráfico vehicular y sus cargas.
- Carreteras insulares: Se configura en varias capas de Mezcla Bituminosa en Caliente (MBC) sobre capa de Zahorra Natural (ZN) y/o Zahorra Artificial (ZA), Macadam Asfáltico o suelos tratados, bien con cemento o con cal.
- Carreteras municipales: Se configura en varias capas de Mezcla Bituminosa en Caliente (MBC) sobre capa de Zahorra Natural (ZN), Macadam Asfáltico o suelos tratados, bien con cemento o con cal.
- Pistas forestales: Tienen naturaleza terrosa propia de la geología del lugar y sin tratamiento superficial. No obstante, en la Pista conocida como “Fran Santana” de 10 km de longitud se ejecutó de forma experimental un suelo estabilizado mediante un aditivo estabilizante ligante monocomponente en polvo base de inertes filosilicatos, caolitina, montmorillonita y neosilicatos, cemento blanco y/o cal, pigmentos vegetales cuya finalidad es la mimetización con el entorno.
- Pistas agrícolas locales: Se configura básicamente con pavimento de hormigón en masa sobre una capa base de Zahorra Natural (ZN) y/o Zahorra Artificial (ZA).

La sostenibilidad es un concepto evolutivo del siglo XXI definido como el uso de los recursos de la Tierra de tal manera que se satisfaga la demanda de la generación actual sin obstaculizar las necesidades de las generaciones futuras (7). La creciente demanda de los recursos finitos del Planeta ha creado un problema global y se hace necesario apostar por el empleo de materiales reciclados en las carreteras para disminuir la generación de residuos. Garantizar la durabilidad de las carreteras construidas con áridos no convencionales, secundarios o alternativos presenta un gran desafío. En el ámbito de las infraestructuras viarias, optar por diseñar y construir carreteras con ecomateriales y/o con materiales reciclados (carreteras ecológicas) se presenta como una alternativa viable para ser más respetuosos con el medio ambiente. Una carretera ecológica se puede definir como una vía en el que el diseño, la construcción y la puesta en servicio atiende a una serie de principios básicos:

- Debe de conservar y evitar la fractura de los ecosistemas desde el diseño del trazado y disminuir su impacto económico y social.
- Debe emplearse materiales reciclables y reducir al máximo el empleo de los materiales bituminosos procedentes de los derivados del petróleo.
- Debe de reducir las escorrentías y atender al control fluvial (cunetas, zanjias, etc.).
- Eficiencia energética.

En este contexto, ¿es viable construir una carretera ecológica sobre un campo de lavas calientes con materiales reciclados de las coladas sin comprometer la seguridad vial en un contexto de emergencia? La investigación se centrará en evaluar la seguridad de la carretera ecológica experimental que se construye sobre un entorno hostil de nueva creación, denominado malpaís, originado por las coladas de lava del volcán “Tajogaite” en isla de La Palma (Islas Canarias). Esta carretera se extiende entre el Tramo P.K.3+500 de una localidad conocida como La Laguna y el Tramo P.K. 6+500 de otra localidad conocida como Las Norias. Además, permite la conexión vehicular con la carretera LP-213, que une Puerto Naos y El Remo en el Valle de Aridane.

2. MATERIALES Y MÉTODO

El objetivo principal de la investigación es realizar un estudio empírico para la construcción de una carretera ecológica sobre las coladas calientes de lava con materiales pétreos procedentes del volcán “Tajogaite” en el Valle de Aridane en la isla de La Palma. Se pretende realizar un aprovechamiento sostenible de los recursos que ofrece este territorio volcánico adscrito a la Red Mundial de Reservas de la Biosfera de la UNESCO desde el 6 de noviembre de 2002. En este contexto, se propone adoptar un modelo de desarrollo sostenible en la construcción de las infraestructuras viarias en áreas volcánicas de reciente formación para reducir, en la medida de lo posible, los impactos negativos sobre el entorno.

Entre los objetivos específicos de esta investigación se establecen los siguientes:

- OE1. Planificar el trazado de la nueva carretera que se pretende construir sobre un campo de lavas calientes originadas por el volcán “Tajogaite” donde las temperaturas oscilan entre los 100°C y los 600°C.
- OE2. Caracterizar los materiales que se emplean en la construcción de la nueva carretera (áridos volcánicos procedentes de la trituración de las coladas de lava de reciente formación, ceniza volcánica, conglomerantes en las diversas capas del firme y como dotación de fluido, la salmuera procedente del rechazo del proceso de desalinización del agua del mar que proviene de las desalinizadoras portátiles que se instalaron de forma provisional en la localidad de Puerto Naos en el municipio de Los Llanos de Aridane en la isla de La Palma).
- OE3. Analizar los resultados de los distintos tipos de ensayos estipulados en la legislación actual sobre la construcción de carreteras en España y sus efectos en la seguridad vial de la nueva infraestructura viaria.

3. DISCUSIÓN

3.1. Antecedentes

Las coladas de lava procedentes del volcán “Tajogaite” en la isla de La Palma han afectado gravemente a la conexión del corredor Norte-Sur de la red viaria insular, así como la continuidad de los servicios esenciales en el Valle de Aridane (figura 4). En particular, las carreteras LP-2 “Circunvalación Sur”, LP-213 “Puerto Naos-El Remo”, LP-215 “Tazacorte”, LP-211 “Todoque” y LP-2132 “Tazacorte por la Costa” han quedado parcialmente sepultadas por las coladas de lava que tienen unos espesores medios que oscilan entre los doce metros y los setenta metros. La comunicación vehicular Norte-Sur en esta comarca de la isla ha quedado completamente interrumpida por su vertiente Oeste, aislando varios núcleos poblacionales y explotaciones agrícolas de los municipios de Los Llanos de Aridane, Tazacorte y El Paso.

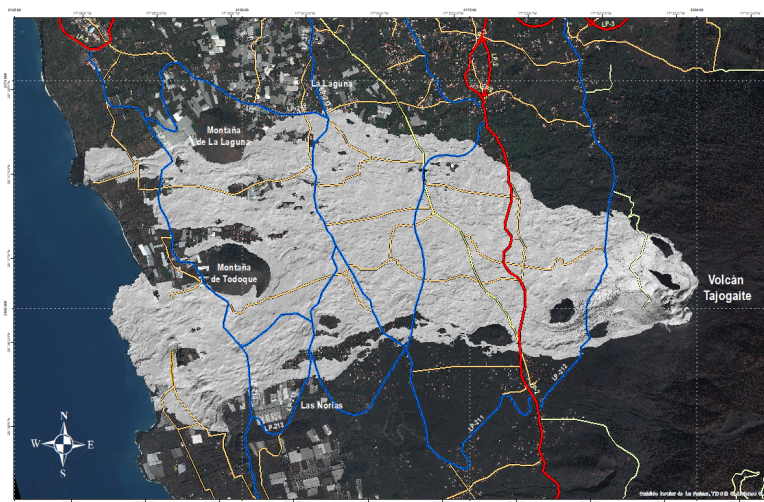


Figura 4. Infraestructura viaria afectada por las coladas de lava del volcán de Cumbre Vieja. Valle de Aridane. La Palma. Islas Canarias. Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta las medidas de prevención y la limitación de actividades para el restablecimiento de la normalidad en función del nivel de Alerta que presenta esta comarca de la isla (riesgos para las personas tanto por las emanaciones de CO₂ como por las elevadas temperaturas de las coladas de lava), el Plan de Emergencias Volcánico de Canarias (PEVOLCA) informa de la urgencia de dotar de servicios esenciales a la zona afectada así como la necesidad de construir una carretera en un “entorno hostil” capaz de garantizar la conexión Norte-Sur de la red viaria de La Palma y resolver los importantes problemas de accesibilidad que se han originado tras la erupción.

En la planificación de la nueva carretera, se han tenido en cuenta los siguientes aspectos:

3.1.1. Altura de las coladas

Para analizar la nueva orografía del territorio y más concretamente de la zona afectada por las coladas de lava, se ha tenido en cuenta el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) efectuado por el Cabildo Insular de La Palma y el Gobierno de Canarias tras el periodo eruptivo del volcán de Cumbre Vieja, donde se puede comprobar las alturas de las sucesivas coladas lávicas sobre el terreno primigenio (figura 5).

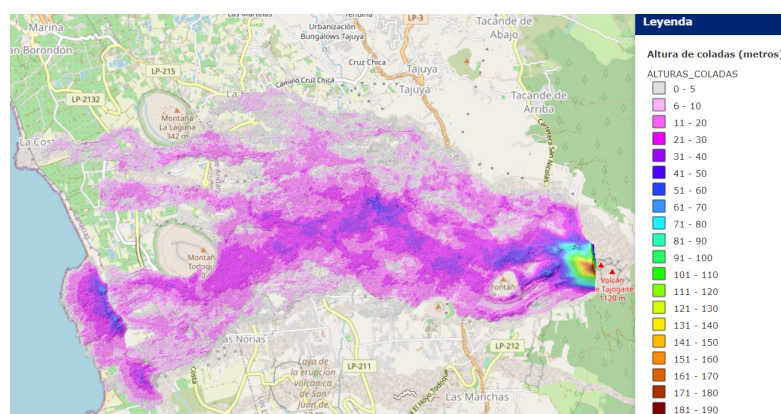


Figura 5. Alturas de las coladas de lava del volcán de Cumbre Vieja. Valle de Aridane. La Palma. Islas Canarias. Fuente: Cabildo Insular de La Palma

De conformidad con la información disponible hasta el momento y las condiciones de las coladas de lava (temperaturas de convección, gases, asentamientos, etc.), se opta en coordinación con las Administraciones Públicas (Comunidad Autónoma y Municipales) por estudiar la viabilidad de construcción de una nueva infraestructura viaria sobre las coladas de lava y situada al Este de las montañas de La Laguna y de Todoque, en el Valle de Aridane (figura 6) donde los espesores de las coladas lávicas son relativamente escasos.

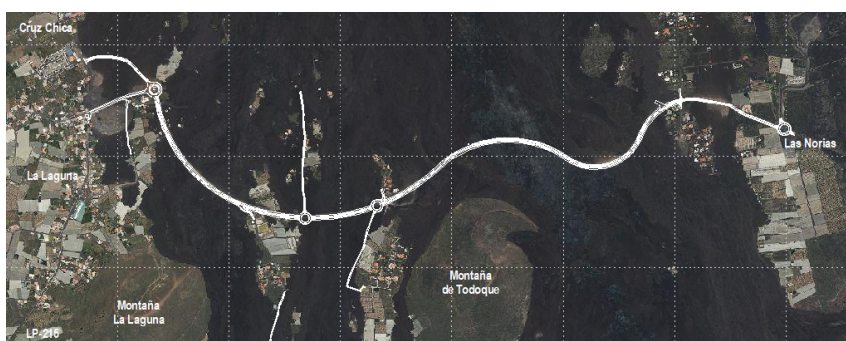


Figura 6. Trazado de la nueva infraestructura viaria sobre las coladas de lava entre las localidades de La Laguna y Las Norias. Valle de Aridane. La Palma. Islas Canarias. Fuente: Elaboración propia

3.1.2. Temperaturas de convección

El estado físico-químico en el que se encuentran actualmente las coladas lávicas, sus asentamientos y sus movimientos en profundidad determinan la existencia de un constante calor de convección que dificultaría cualquier intervención en la superficie de las coladas. Por lo tanto, para el diseño de la nueva carretera se ha tenido en cuenta una altura de colada lávica máxima de 10 metros a tenor de los datos que ha ofrecido el comportamiento de las temperaturas en el frente de excavación y concretamente en las obras con carácter de emergencia ejecutadas por el del Cabildo Insular de La Palma en los bordes de las coladas de lava en zonas territoriales concretas. Se han realizado mapas de enfriamiento de las coladas por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en profundidades que oscilan entre un metro (figura 7) y los tres metros de profundidad (figura 8).

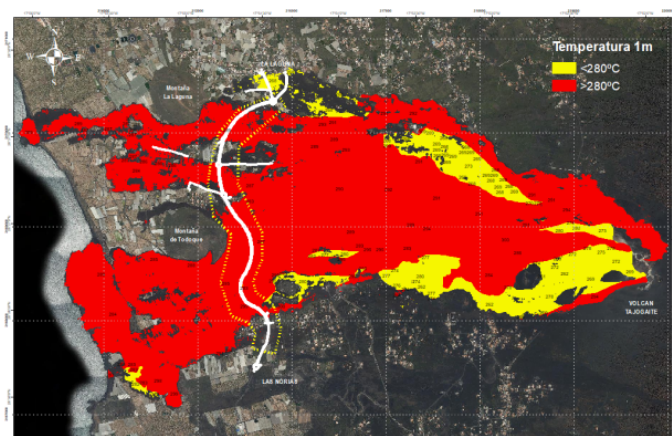


Figura 7. Mapa de temperaturas de las coladas de lava a 1.00 m de profundidad. Valle de Aridane. La Palma, Islas Canarias. Fuente: Instituto Geológico y Minero de España (IGME)

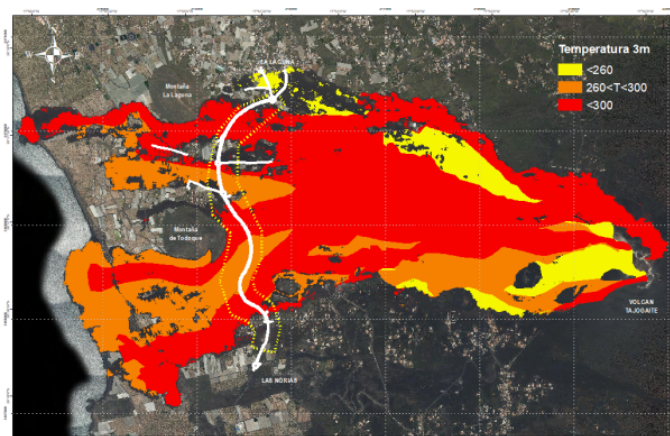


Figura 8. Mapa de temperaturas de las coladas de lava a 3.00 m de profundidad. Valle de Aridane. La Palma, Islas Canarias. Fuente: Instituto Geológico y Minero de España (IGME)

No obstante, se han realizado tres sondeos adicionales (figura 9) con sensores para el control y el monitoreo continuo de las temperaturas de convección existentes en las coladas de lava desde un metro a tres metros de profundidad (figura 10) respecto de la cota definitiva de la plataforma de la nueva carretera que se construye sobre las coladas calientes de lava procedentes del volcán.

3.1.3. Probabilidad de existencia de canales lávicos

Para el diseño de la nueva carretera hay que tener presente la probabilidad de encontrar canales lávicos a lo largo del trazado de la infraestructura viaria. Los canales lávicos o tubos volcánicos generalmente con forma de túneles se forman en el interior de coladas lávicas más o menos fluidas mientras dura la actividad reogenética. Por su génesis, son cavidades primarias y se clasifican como singenéticas, reogenéticas y subterráneas. Pueden adquirir una estructura simple de tubo lineal o llegar a formar complejas redes de ramales interconectados a distintos niveles y con dimensiones que abarcan desde unos pocos centímetros hasta varias decenas de metros. El Instituto Geológico y Minero de España (IGME) ha elaborado durante el periodo post-eruptivo un mapa de probabilidad de existencia de estos canales lávicos (figura 11) en base al comportamiento de movilidad de las coladas durante las últimas semanas de la fase efusiva del volcán de Cumbre Vieja.

3.1.4. Afectación al catastro

En el diseño de la nueva infraestructura viaria se ha tenido en cuenta el Sistema General del Catastro con la finalidad de establecer la mínima afectación en cuanto al estado de los terrenos previos a la erupción del volcán. Se realiza un análisis mediante el sistema de información geográfica para determinar el trazado de la nueva carretera evitando en todo momento las edificaciones y minimizando la ocupación en superficie de las propiedades de los afectados (figura 12).

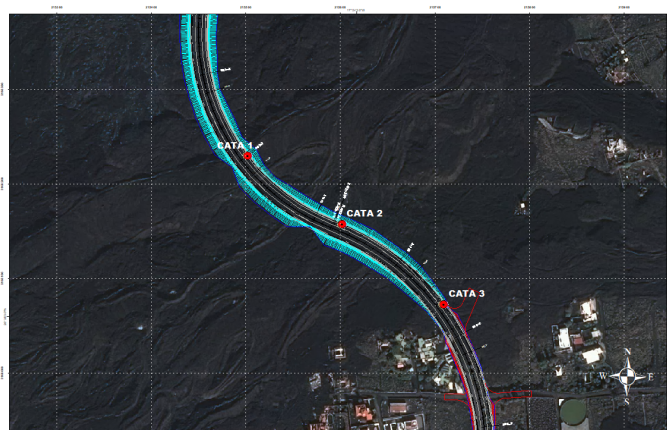


Figura 9. Situación de los sondeos en el trazado de la nueva carretera sobre las coladas en el Valle de Aridane. La Palma, Islas Canarias. Fuente: Elaboración propia



Figura 10. Temperatura de las coladas de lava en el sondeo N° 3 a 3.00 metros de profundidad. Valle de Aridane. La Palma, Islas Canarias. Fuente: Autores

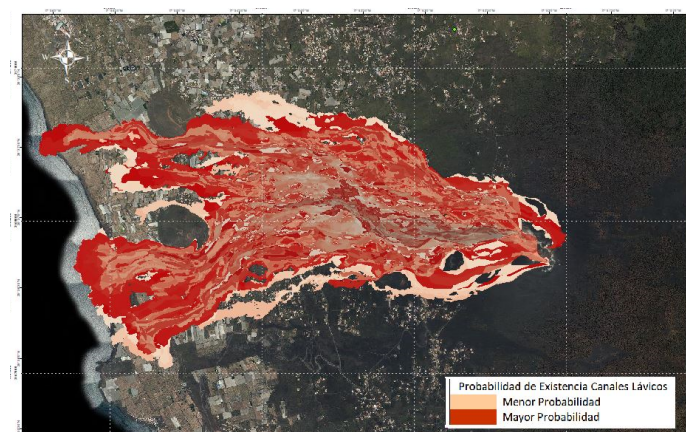


Figura 11. Mapa probabilístico de canales lávicos según la movilidad de las coladas del volcán de Cumbre Vieja. Valle de Aridane. La Palma. Islas Canarias. Fuente: Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

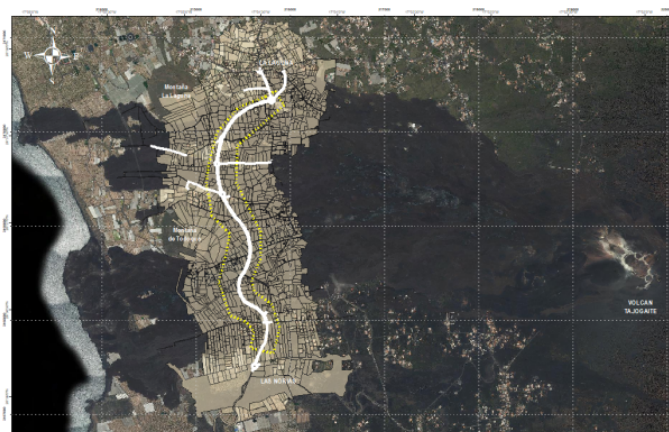


Figura 12. Mapa de propiedades afectadas por las coladas lávicas del volcán de Cumbre Vieja. Valle de Aridane. La Palma. Islas Canarias. Fuente: <https://visor.grafcan.es/visorweb/>

3.2. Descripción de la solución adoptada

La solución adoptada surge a partir del encargo de la dirección del Plan de Emergencia durante el proceso efusivo. Se realiza un análisis de regresión estadístico tomando en consideración las multivariantes: Las alturas de las coladas, las temperaturas de a uno y tres metros de profundidad, la probabilidad de existencia de canales lávicos y otros elementos geológicos de interés (fumarolas, jameos, etc.), la afectación catastral y las pendientes. Se ha tomado en consideración las curvas de regresión con el mayor coeficiente de determinación, las cuales se han ajustado a los parámetros que establece la legislación vigente en España para el diseño de infraestructuras lineales. En esencia, el análisis de regresión consiste en ajustar un modelo a los datos, estimando coeficientes a partir de las observaciones y de los modelos de comportamiento durante el proceso efusivo.

Se pretende predecir las respuestas a partir de las múltiples variables (regresión múltiple) predictivas o explicativas que han sido despejadas en función de coordenadas, dentro del sistema de replanteo (sistema de georreferenciación) de la zona. El eje de la infraestructura viaria (curva de regresión) se obtiene a partir del gráfico (figura 13) donde las magnitudes de los ejes, tanto en (X) como en (Y) se corresponden con las coordenadas UTM referidas al elipsoide WGS 1984, zona 28°N. El gráfico muestra el lugar geométrico de los puntos donde con mayor probabilidad se garantiza el cumplimiento de todas y cada una de las variables atendiendo al marco legislativo actual.

El trazado de la nueva carretera (figura 14) tiene una longitud de 3287 metros con una pendiente longitudinal máxima del 10,77% y una pendiente longitudinal mínima del 0,93%.

Por lo que respecta a la sección transversal de la nueva carretera, la plataforma tiene veinte metros de ancho para hacer frente a dos objetivos. De un lado, se pretende disipar hacia los laterales (taludes) el calor de convección existente en las coladas de lava como consecuencia de los continuos y constantes movimientos de circulación en profundidad del flujo lávico. De otro lado, se han reservado espacios de servidumbre para ubicar los servicios esenciales (suministro eléctrico en Media y Baja Tensión, suministro de telecomunicaciones, suministro de agua de abasto y de riego). En definitiva, la sección transversal de la vía (figura 15) está compuesta por tres carriles de circulación de 3,50 metros de ancho centrados respecto al eje de la plataforma y dos zonas diferenciadas para la servidumbre de los servicios esenciales de 4,70 metros a ambos lados del eje central de la infraestructura.

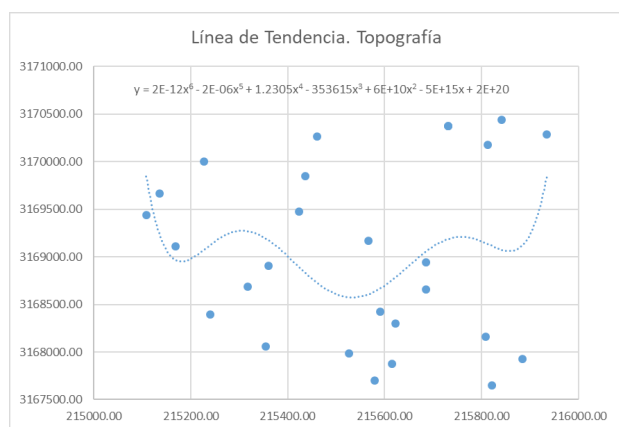


Figura 13. Curva de tendencia de topografía según análisis de regresión polinomial. Fuente: Elaboración propia

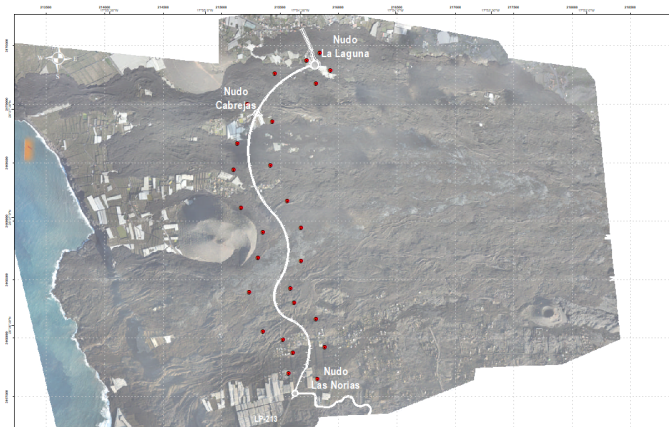
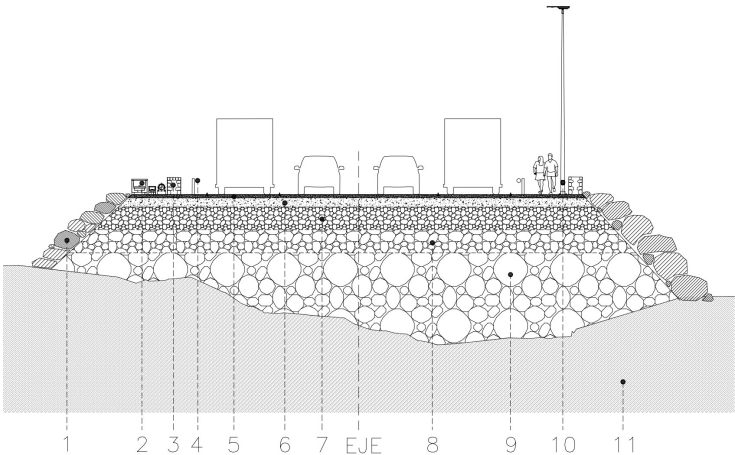


Figura 14. Zonificación del área de estudio por topografía de la nueva infraestructura viaria sobre las coladas de lava del volcán de Cumbre Vieja. Valle de Aridane. La Palma. Islas Canarias. Fuente: Elaboración propia



LEYENDA: 1. Escollera de piedras. 2. Galería de infraestructuras esenciales (agua de abasto y de riego, media tensión y telecomunicaciones). 3. Muro de protección. 4. Barrera de protección de vehículos. 5. Capa de rodadura. 6. Capa base. 7. Capa subbase. 8. Explanada. 9. Núcleo del terraplén (pedraplén). 10. Luminaria fotovoltaica. 11. Coladas de lava calientes (100°C-600°C) del volcán de Cumbre Vieja.

Figura 15. Sección transversal de la nueva carretera sobre las coladas de lava del volcán de Cumbre Vieja. Valle de Aridane. La Palma. Islas Canarias. Fuente: Elaboración propia.

Con los datos que se han obtenido de la estación de aforo instalada en la carretera LP-213 (entre los cruces de Las Norias y La Laguna) en los Llanos de Aridane, la intensidad media diaria (IMD) en el tramo comprendido entre el sur y norte de las coladas lávicas es de cinco mil quinientos vehículos al día. Al no disponer de dispositivo de aforo para la determinación de tráfico pesado, se estima un coeficiente del 4% sobre el total de la IMD, valor que suele ser lo habitual en las carreteras de ámbito insular. De conformidad con lo estipulado en la Norma 6.1-IC de Secciones de firme (8) en el carril de diseño correspondiente a un sentido de circulación (reparto por sentidos 50%/50%) y asumiendo un carril exterior destinado a los vehículos pesados se determina lo siguiente [1]:

$$IMDp = 5500 \times 0,50 \times 0,04 = 110 \text{ vehículos pesados} \quad [1]$$

La Norma 6.1-IC establece las siguientes categorías de tráfico a efectos del dimensionado de firmes (tabla 1) y en este caso equivale a una categoría de tráfico T31 ($IMDp \geq 100$).

Tabla 1. Categorías de tráfico pesado T3 y T4. Fuente: Norma 6.1-IC de Secciones de firmes

CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO	T31	T32	T41	T42
IMDp (vehículos pesados/día)	<200	<100	<50	<25
	≥100	≥50	≥25	

Los apartados 3.1 y 3.2 proporcionan una visión detallada de su alcance y se relacionan directamente con el objetivo específico EO1 de esta investigación.

3.3. Materiales empleados

En los archipiélagos de la Macaronesia (Azores, Cabo Verde, Canarias y Maderia) los áridos utilizados son siempre de naturaleza volcánica debido su formación geológica, bien procedentes de los depósitos piroclásticos (basálticos y sálicos), bien de la fragmentación de rocas volcánicas (basaltos, traquitas, fonolitas e ignimbritas), a diferencia de lo que ocurre en los territorios continentales. Algunas de estas litologías, especialmente los basaltos masivos, suelen proporcionar áridos con buenas propiedades mecánicas debido a su elevada densidad y resistencia (9).

En la construcción de la nueva infraestructura viaria sobre las coladas calientes de lava del volcán “Tajogaite” en el Valle de Aridane en la isla de La Palma se pretende realizar 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. Debido a razones económicas y logísticas, se descarta en todo momento importar áridos de regiones continentales. En este escenario, los materiales que se emplean son los siguientes:

- Ceniza volcánica y áridos de diferentes granulometrías procedentes de la trituración y posterior cribado de las coladas de lava del volcán de Cumbre Vieja.
- Salmuera procedente de los residuos originados por las desalinizadoras portátiles que se instalaron de forma provisional 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 lávicas.
- Cal viva y cal hidráulica como conglomerantes aptos para resistir las elevadas temperaturas que emanan de las coladas de lava de reciente formación.

A la mezcla compuesta por piedras pequeñas, ceniza volcánica, cal y agua se le conoce como hormigón romano (opus caementicium). Con este material la civilización romana construyó numerosos templos, caminos, acueductos, arcos, bóvedas, cúpulas, muelles marítimos, etc. y que muchas de estas obras persisten hasta nuestros días.

El hormigón de cal es un material que entronca perfectamente con la tradición constructiva mediterránea y da respuesta a las exigencias de compatibilidad en obras de restauración, así como las actuales exigencias de sostenibilidad. Se trata de conseguir un silicato cálcico o un aluminato cálcico y, por tanto, añadir a la cal, sílice (SiO_2) o alúmina (Al_2O_3) reactiva. A esta capacidad de reaccionar con la cal (y otros alcalinos) en presencia de agua la llamamos puzolanidad (10).

3.4. Caracterización de los materiales

3.4.1. Ceniza volcánica

Se realiza un análisis químico de espectroscopia de infrarrojos (IR) y un análisis químico de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) de dos muestras de ceniza volcánica que se obtuvieron de dos lugares diferentes. Una muestra se recogió en una zona próxima al volcán de Cumbre Vieja (tabla 2) y otra muestra se recogió en el municipio de Villa de Mazo, a 20 Km de la zona eruptiva (tabla 3).

La granulometría media de la ceniza volcánica de ambas muestras se indica en la tabla 4.

3.4.2. Áridos volcánicos

Para caracterizar los materiales pétreos de las coladas de lava de reciente formación y determinar la composición elemental de las muestras, se realiza un análisis de fluorescencia de rayos (XRF) y un análisis de espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Geoquímicamente se clasifican como basaltos alcalinos con abundancia de silicatos que se subdividen en tres grupos dominantes y que representan el 90,07 % de la mineralogía modal (11).

- Silicatos de Ca Fe-Al (49,54%)
- Silicatos de Ca-Mg-Fe (20,94%)
- Clinopiroxeno y plagioclasa (19,59%)

Los minerales más abundantes existentes en estos materiales pétreos son los siguientes:

- Olivino (2,70%)
- Ti-Magnetita (2,12%)
- Ilmenita (1,95%)
- Biotita (1,65%)

La granulometría de los áridos de machaqueo obtenidos mediante la trituración con una planta móvil de diseño compacto (modelo Terex de simple efecto) de los desmontes de las coladas de lava de las diversas obras de emergencia ejecutadas por el Cabildo Insular de La Palma en distintas zonas de la erupción, es la indicada en la tabla 5.

Para asegurar la idoneidad de los áridos de machaqueo en la construcción de la infraestructura viaria, se lleva a cabo un exhaustivo control de calidad mediante diversos análisis y ensayos para determinar sus propiedades, tales como la granulometría de las partículas mediante los modelos de tamizado según UNE-EN 933-1:1998/A1:2006, la resistencia a la fragmentación según UNE-EN 1097-2:2010, la densidad y la absorción de agua de las partículas entre 0,063 mm y 63 mm según UNE-EN 1097-6:2014 así como los ensayos de equivalentes de la arena para evaluar los finos según UNE-EN 933-8:2000.

Tabla 2. Análisis químico de la ceniza volcánica recogida en las proximidades del volcán de Cumbre Vieja. La Palma. Islas Canarias. Fuente: PROQUICESA

Análisis Químico (%)	
SiO_2	44,83
Al_2O_3	14,06
Fe_2O_3	13,515
CaO	10,51
(CaO)r	10,04
MgO	7,07
Na_2O	2,01
K_2O	1,86
SO_3	0
TiO_2	4,04
P_2O_5	0,63
CL	0,06
SiO_2 reactiva	41,28
Puzolanidad	Cumple

Tabla 3. Análisis químico de la ceniza volcánica recogida a 20 Km. de la zona eruptiva (Villa de Mazo). La Palma. Islas Canarias. Fuente: CEISA.

Análisis Químico (%)	
SiO_2	42,66
Al_2O_3	13,62
Fe_2O_3	13,34
CaO	9,92
MgO	7,25
Na_2O	2,01
K_2O	1,86
SO_3	0
TiO_2	4,04
P_2O_5	0,63
SiO_2 reactiva	39,82
Puzolanidad	Cumple

Tabla 4. Granulometría de la ceniza del volcán de Cumbre Vieja. La Palma. Islas Canarias. Fuente: PROQUICESA y CEISA.

Granulometría (% retenido)	
2,00 mm	0,8
1,00 mm	4,1
0,250 mm	90,6
0,090 mm	98,6
0,063 mm	99,2
0,045 mm	99,4

3.4.3. Salmuera

El fluido que se emplea para el amasado del hormigón romano, así como la dotación hídrica en l/m² para favorecer la compactación de las diferentes capas de la plataforma de la carretera, es la salmuera que proviene del rechazo del proceso de desalinización del agua de las desaladoras portátiles que se instalaron de forma provisional (obras de emergencia) en la localidad de Puerto Naos, en el municipio de Los Llanos de Aridane, para suplir y dotar de agua de riego al sistema hidráulico insular.

Se realiza un análisis químico mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), espectrometría de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) y espectrofotómetro de una muestra de la salmuera del emisario de salida de las desaladoras (tabla 6).

Tabla 5. Porcentaje de árido retenido en los diferentes tamices.
Fuente: Laboratorio ICINCO, La Palma.

Tamiz (mm)	Pasa (%)	Huso ZA o/32
100	100,00	---
80	100,00	---
63	100,00	---
40	100,00	100 - 100
32	100,00	88 - 100
25	98,7	---
20	96,0	65 - 90
12,5	74,4	52 - 76
10	66,5	---
6,3	52,0	---
5	46,6	---
2	33,3	15 - 32
1,25	25,7	---
0,5	13,3	9 - 24
0,25	6,2	4 - 16
0,063	4,2	0 - 9

Tabla 6. Análisis de la salmuera extraída del emisario de salida de las desaladoras portátiles situadas en Puerto Naos. Los Llanos de Aridane. La Palma. Islas Canarias. Fuente: AGRICALIA.

RESULTADOS		
Ph	6,96	
Conductividad eléctrica	79200 µS/cm	
Código de muestra: R173	Meq/l	Ppm
Calcio	33,80	676
Magnesio	167,8	2040
Sodio	694,78	15980
Potasio	23,50	919
Boro	---	5,04
Cloruros	846	30033
Bicarbonatos	7,60	463,6
Sulfatos	102,07	4900,0
Nitratos	<0,07	<4,4
Cloro libre	---	<0,05
Residuo seco	55461,4 mg/l	
STD (sólidos totales disueltos)	63700 mg/l	
ÍNDICES/RELACIONES		
SAR	69,21	
Dureza Calc (mg equivalente/l/CaCO3)	10088,7	
L'ANGELIER Simplificado T=21,6°C	+0,89	
LSI (Estándar Methods 2330-B)	+2,04	

En las últimas décadas, se ha puesto el foco en el aprovechamiento del agua de mar como solución a falta de disponibilidad de recursos hídricos. En este sentido, el empleo del agua de mar es una solución viable y muy atractiva para el procesamiento de minerales en el aprovechamiento de materiales para las infraestructuras viarias.

3.4.4. Los conglomerantes: Cal y cemento

Las cales pueden ser clasificadas de acuerdo con su origen, su composición química, el tamaño de sus cristales, su porosidad y su textura o su composición geológica. Desde hace tiempo, los suelos que conforman las explanadas y los rellenos de algunas carreteras se realizan con cal. En otro orden de cuestiones cabe decir que la cal es un conglomerante que junto a las cenizas volcánicas reactivas y el agua de amasado origina una reacción puzolánica resistente con el paso del tiempo. En este contexto, se ha diseñado una capa previa a la capa de rodadura conformada por hormigón romano reforzada con cemento de 15 cm. de espesor. Esta solución, de marcado carácter empírico, pretende garantizar que los valores de la conductividad térmica sean muy bajos y hacer posible la ubicación de los servicios esenciales sobre la plataforma de la vía.

A continuación, se describen las características químicas de las cales comerciales que se han empleado en esta carretera experimental (tabla 7 y tabla 8).

Tabla 7. Características de la cal hidráulica NHL5.
Fuente: CALES PASCUAL, SL.

Características Químicas	
SO ₃	1,74 %
Ca(OH) ₂	19,38 %
Resistencia a compresión (7 días)	3,6 Mpa
Resistencia a Compresión (28 días)	6,2 Mpa
Inicio del fraguado	135 minutos
Final del fraguado	195 minutos

Tabla 8. Características de la cal viva CL90-Q.
Fuente: CALES PASCUAL, SL.

Características Químicas	
CO ₂	1 %
CaO	97 %
SiO ₂	0,2 %
Al ₂ O ₃	0,2 %
Fe ₂ O ₃	0,15 %
MgO	1 %
S	0,15 %

El cemento que se emplea es de tipo Pórtland CEM I 42,5 R-SR3 (12). Este cemento, de endurecimiento rápido, posee un bajo contenido en aluminato tricálcico, lo que le confiere una resistencia moderada o alta ante los ambientes químicamente agresivos (sulfatos, cloruros, agua de mar, ácidos, etc.).

Los apartados 3.3 y 3.4 contienen una detallada caracterización de los materiales, conectándolos directamente con el objetivo específico EO2 de esta investigación.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez caracterizados los materiales, se realizan diversos tipos de ensayos en laboratorio (de envuelta, de tipo Marshall, probetas a compresión, de carga con placa, etc.) referidos a la resistencia, estabilidad y deformación de cada una de las capas que conforman la plataforma de la infraestructura viaria. Los resultados de los ensayos deben cumplir con las exigencias establecidas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para las obras de Carreteras y Puentes (13) para garantizar la conformidad y la seguridad en la construcción de la carretera.

4.1. Firme

4.1.1. Capa de rodadura

Capa uniforme compuesta por una mezcla de asfalto en frío (MAF) de 8 cm. de espesor total, correspondiendo 3 cm. del tipo AF8 con fracciones de áridos de machaqueo 5/10, enriquecida con ceniza volcánica de 3 mm de tamaño máximo y 5 cm. del tipo AF16 con fracciones de áridos de machaqueo 10/20. La dotación del ligante utilizada es de 1 kg/m² de emulsión bituminosa del tipo C67BF3 MBA como riego de curado. De los ensayos de envuelta realizados por el Laboratorio de Asfaltos de ATDN del TechLab de Repsol (tabla 9) de la mezcla de asfalto en frío (MAF), se desprende que los áridos de naturaleza volcánica que envuelven un 70-80% de cubrición a la rotura de emulsión recuperan la envuelta si esta se continua.

Tabla 9. Resultados de ensayos de envuelta. Fuente: Laboratorio ATDN Techlab Repsol

Garbancillo 5/10 100%	Árido	Rompe	Cubrición % en la rotura	Durante la envuelta	% Cubrición final
Emulsión tipo 1, 6 % T ambiente	Seco	Sí	60%	Recupera	80%
Emulsión tipo 3, 6 % T ambiente	Seco	Sí	70%	Recupera	90-100%
Emulsión tipo 4, 6 % T ambiente	Seco	Sí	80%	Recupera	90-100%

Además, para garantizar la calidad de la mezcla de asfalto en frío (MAF) se han realizado ensayos de resistencia, estabilidad y deformación plástica tipo Marshall (tabla 10 y tabla 11).

Bajo la capa de rodadura, se dispone de una capa uniforme de 15 cm. de espesor de un pavimento rígido realizado con hormigón de cal (hormigón romano) reforzado con cemento y compuesto principalmente por áridos de machaqueo procedentes de las coladas de lava de diferentes granulometrías: (20/40) al 20%, (6/12) al 20%, (0/6) al 40% y ceniza volcánica al 20%. Para minimizar la corrosión por cloruros en este pavimento rígido debido al uso de la salmuera como dotación de fluido, se emplean los siguientes conglomerantes: Cal hidráulica (NHL 5) al 75% y cemento Pórtland (CEM I 42,5 R-SR3) al 25%.

Con la finalidad de estudiar el comportamiento resistente de este pavimento rígido frente a las cargas dinámicas que origina el tráfico vehicular, se opta por realizar varios ensayos de resistencia a compresión (tabla 12) a los 7, 28 y 42 días.

4.1.2. Capa base

Bajo la capa de rodadura se dispone de una capa uniforme de 70 cm. de espesor realizada por la mezcla de áridos de machaqueo de diferentes granulometrías: (20/40) al 20%, (6/12) al 20%, (0/6) al 40%, ceniza volcánica al 20%, dotación de 2 l/m² de salmuera y como conglomerante la cal hidráulica (NHL5). La densidad máxima Proctor de 2,046 gr/cm³.

Las bases y subbases realizadas con el mezclado de grava, ceniza y cal presentan elevada facilidad de compactación por el efecto lubricante de los granos de ceniza, un endurecimiento lento con bajas rigideces a corto plazo, una disminución del agrietamiento originado por asientos diferenciales y retracciones térmicas producidas a corto plazo y la posibilidad de apertura al tráfico tras ser compactada. La resistencia mecánica de las bases de grava-ceniza son más bajas al principio que las realizadas con conglomerantes con elevado contenido de clinker. Sin embargo, las reacciones puzolánicas elevan esta resistencia al cabo de algunos meses (14).

Según el art. 512 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) para los suelos estabilizados in situ se establece para la coronación un módulo de deformación vertical en el segundo ciclo de carga del ensayo con placa ($E_{v2} \geq 50$ MPa) para los suelos seleccionados y ($E_{v2} \geq 30$ MPa) para el resto. El ensayo con placa de carga consiste en medir los asientos de una placa circular de acero de 700 cm² en el terreno. De los ensayos realizados en esta capa base se obtiene un módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (E_{v2}) de 162,65 MPa, por lo tanto, se cumple con las condiciones requeridas para esta capa. La categoría de la capa base es de tipo E2 conforme a Norma Española referida a los ensayos de carga con placa NLT 357/98 (15). En relación al coeficiente K, entre el módulo de deformación obtenido en el segundo ciclo de carga (E_{v2}) y el módulo de deformación obtenido en el primer ciclo de carga (E_{v1}) se cumple en todos los casos con la condición de ($K \leq 2,2$).

Tabla 10. Ensayo MB304 (Marshall).
Fuente: Laboratorio ATDN Techlab Repsol

Ensayo: MB304 - S/UNE-EN 12697-34:2013			
DENSIDAD APARENTE PROCEDIMIENTO B (SATURADA SUPERFICIE SECA)			
Masa	852,3	860	866
Temperatura	21°C		
Masa	504,4	506	508,5
Masa	869,7	878,5	883,4
Densidad	2328,72	2304,34	2305,56
Densidad	2312,87		
Densidad	2681		
Contenido	13,7		
Porcentaje	4,04		
Densidad	1030		
Huecos en	22,8		
Huecos	39,8		

Tabla 11. Ensayo Marshall (estabilidad y deformación).
Fuente: Laboratorio ATDN Techlab Repsol

ESTABILIDAD Y DEFORMACIÓN			
Estabilidad	3251	3368	3151
Factor de	0,76	0,76	0,76
Estabilidad	2471	2560	2395
Media	2475		
Deformación	4,69	4,76	4,70
Media	4,72		
Estabilidad	2526	2680	2508
Deformación	2,91	2,96	2,86
Probetas	Laboratorio		
Temperatura	150°C		

Tabla 12. Rotura de probetas del hormigón romano. Fuente: Laboratorio ICINCO S.A

Edad hormigón (días)	Carga de rotura (kN)	Tensión de rotura (N/mm ²)	Tensión media (N/mm ²)	Recorrido
7	256,65	10,3	11,4	20%
7	314,68	12,6		
28	459,28	18,4	18,7	4%
28	476,01	19,0		
42	473,05	18,9	18,9	0%
42	472,91	18,9		

4.1.3. Capa subbase

Esta capa compactada de espesor uniforme de 1,00 m. está compuesta por la mezcla de áridos de diferentes granulometrías: (20/40) al 30%, (6/12) al 30%, (0/6) al 40% y una dotación de 2 l/m² de salmuera con un valor de densidad máxima Proctor de 2,046 gr/cm³. Al tratarse de una carretera experimental construida sobre un entorno hostil (lavas calientes con temperaturas superiores a 100°C), se ha considerado oportuno extremar las precauciones y acometer de forma extraordinaria ensayos de carga con placa (E_{v2}) en las capas de subbase y de la explanada, con la finalidad de alcanzar la máxima seguridad posible desde un punto de vista resistente. De los ensayos realizados en esta capa subbase se obtiene un módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (E_{v2}) de 182,43 MPa, por lo tanto, se cumple con la condición establecida en el art.512 del PG-3 de ($E_{v2} \geq 50$ MPa) para suelos seleccionados. La categoría de la capa subbase es de tipo E2. En relación al coeficiente K referido a los ensayos de carga con placa de la norma NLT 357/98, se cumple con la condición de ($K \leq 2,2$).

4.2. Cimiento del firme

4.2.1. Explanada

La explanada la conforman una consecución de capas de espesor total no superior a los 1,50 metros y que está compuesta por todo uno de cantera con tamaño máximo de 1000 mm y con una dotación de 2 l/m² de salmuera de forma constante hasta la llegada a la cota de coronación. De los ensayos realizados en esta capa de la explanada con placa de carga se obtiene un módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (E_{v2}) de 210,94 MPa, por lo tanto, se cumple con la condición establecida en el art.330 del PG-3 de ($E_{v2} \geq 50$ MPa) para suelos seleccionados. En este sentido, la categoría de la explanada es tipo E2. En relación al coeficiente K referido a los ensayos de carga con placa de la norma NLT 357/98, se cumple con la condición de ($K \leq 2,2$).

4.2.2. Núcleo del terraplén (pedraplén)

Esta capa de espesor variable de hasta 2,00 metros según la orografía del terreno está formada por varias capas de piedras basálticas con un gramaje que oscila entre los 800 Kg a los 2000 Kg así como áridos de diferentes granulometrías y una dotación de 2 l/m² de salmuera para favorecer la compactación. La protección de los taludes laterales inclinados de la plataforma de la infraestructura se conforma mediante una escollera de piedras del lugar de 1000 Kg aproximadamente. De los ensayos realizados en esta capa del núcleo del terraplén con placa de carga se obtiene un módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga (E_{v2}) de 162,65 MPa, por lo tanto, se cumple con la condición establecida en el art.330 del PG-3 de ($E_{v2} \geq 50$ MPa) para suelos seleccionados. En relación al coeficiente K referido a los ensayos de carga con placa de la norma NLT 357/98, se cumple con la condición de ($K \leq 2,2$).

El apartado 4 proporciona una visión detallada de los resultados obtenidos en los ensayos realizados, vinculándolos directamente con el objetivo específico EO3 de esta investigación.

5. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

La ausencia de estudios exhaustivos sobre el ciclo de vida de las infraestructuras viarias construidas sobre un campo de lavas calientes, así como la falta de modelos de comportamiento a largo plazo que validen la estabilidad térmica y mecánica de las mismas, puede generar incertidumbres respecto a la reducción de su vida útil. Sin embargo, para garantizar una adecuada longevidad de la infraestructura, se han implementado sondeos adicionales con sensores y sistemas de teledetección para una monitorización continua en tiempo real. La recopilación continua de datos sobre las condiciones de los materiales utilizados en la carretera experimental permitirá ajustar y corregir posibles fallos de manera temprana, reduciendo así los costos de reparación mediante un mantenimiento preventivo.

6. CONCLUSIONES

Las carreteras son infraestructuras artificiales creadas por el ser humano en el paisaje para facilitar la movilidad entre territorios y que, en ocasiones, han sido construidas en el pasado sin tener en cuenta los efectos sobre el medio ambiente. La isla de La Palma es Reserva Mundial de la Biosfera de la UNESCO y, por lo tanto, es un territorio donde se deben de aplicar los modelos de desarrollo sostenible para minimizar los impactos negativos sobre el medio ambiente. Los escasos conocimientos existentes sobre las actuaciones que se deben de realizar en los territorios volcánicos en fase post-eruptiva, así como la posibilidad de optimizar los recursos naturales en los procesos constructivos de las infraestructuras viarias sostenibles entre otros, son los condicionantes que han motivado la reutilización de los materiales pétreos procedentes del volcán de Cumbre Vieja como alternativa en la reconstrucción del Valle de Aridane en la isla de La Palma.

El comportamiento térmico local y global de la nueva carretera ecológica experimental construida sobre las coladas calientes de lava con materiales pétreos procedentes del volcán “Tajogaite” (ceniza volcánica y áridos de machaqueo procedentes de la trituración de las coladas de lava de reciente formación), el empleo de la cal como conglomerante (cal viva y cal hidráulica) así como el aprovechamiento de la salmuera procedente de los residuos originados por las desalinizadoras portátiles que se instalaron de forma provisional en la localidad de Puerto Naos en el municipio de Los Llanos de Aridane, han originado a corto plazo un sistema termodinámico estable y resistente.

A la vista de los resultados satisfactorios que se han obtenido a través de los diversos ensayos que se han realizado de cada una de las distintas capas de las que consta esta singular infraestructura viaria y en especial, en el pavimento rígido, construido con hormigón romano bajo la capa de rodadura, se concluye que no resulta necesario finalizar la vía con un pavimento flexible de una mezcla de asfalto en frío (MAF).

En resumen, los resultados de los diversos ensayos realizados confirman que el diseño y la ejecución de la nueva carretera ecológica experimental de 3287 metros de longitud, construida con ecomateriales sobre las coladas calientes de lava del volcán “Tajogaite”, entre las localidades de La Laguna y Las Norias en el Valle de Aridane, en la isla de La Palma, cumplen con los estándares de seguridad establecidos en el marco legislativo actual.

No obstante, se han instalado sensores para el control y el monitoreo continuo de la infraestructura viaria a largo plazo, lo que permitirá detectar cualquier anomalía en tiempo real. Asimismo, se ha implementado el uso de drones para realizar evaluaciones periódicas del estado de la carretera.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores de este artículo declaran no tener conflictos de intereses financieros, profesionales o personales que pudieran haber influido de manera inapropiada en este trabajo.

DECLARACIÓN DE CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Amílcar José Cabrera García: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Administración de proyecto, Redacción - borrador original, Redacción - revisión y edición.

Víctor Manuel Cabrera García: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Redacción - revisión y edición.

REFERENCIAS

- (1) 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/>
- (2) ESPAÑA. Ley 21/2013 de Evaluación Ambiental. *Boletín Oficial del Estado*, nº 296, de 11 de diciembre de 2013.
- (3) ESPAÑA. Real Decreto-ley, de 5 de octubre. *Boletín Oficial del Estado*, nº 239, de 6 de octubre de 2021.
- (4) Bianchetto, Hugo; Miró Recasens, Rodrigo; Pérez Jiménez, Félix (2006). “Mezclas asfálticas. Resistencia al envejecimiento de las mezclas bituminosas en caliente: beneficios y limitaciones de la incorporación de fillers comerciales. Primera parte: Estudios en base al método UCL” Universidad Nacional de la Plata. Argentina.
- (5) Yorder, EJ; Witzack, MW (1975). “Principio de diseño de pavimentos” Segunda Edición.
- (6) AAVV. Pavimentos Viales de la Asociación Mundial de la Carretera PIARC (2019). “Soluciones para una pavimentación ecológica y materiales sostenibles”. Estado del arte de las mejores prácticas, retos y tecnologías nuevas y emergentes. Grupo de trabajo D.2.1 del Comité Técnico D.2.
- (7) Kuhlman, T; Farrington, J (2010) “What is sustainability”. *Journal Sustainability*, 2.
- (8) ESPAÑA. Norma 6.1-IC de Secciones de firmes de la Instrucción de Carreteras. *Boletín Oficial del Estado*, 12 de diciembre de 2003.
- (9) AAVV. Caracterización de áridos volcánicos de Canarias y aplicaciones en la construcción de carreteras. IV Congreso Nacional de áridos, Madrid 2015.
- (10) Rosell, Joan Ramón; Bosch, Montserrat (2018) “Hormigones de cal: nuevos “viejos” materiales”. VI Jornadas FICAL Libro de Actas, 76. Universidad Politécnica de Catalunya (UPC). España.
- (11) AAVV. Research Square (2021) “Petrolgy of the opening eruptive phase of the 2021. Cumbre Vieja erupcion, La Palma, Canary Islands”.
- (12) UNE-EN-197-1 (2000). Cementos. Parte 1. Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.
- (13) ESPAÑA. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para las obras de Carreteras y Puentes (PG-3)
- (14) Yepes Piqueras, Víctor. <https://victorypes.blogs.upv.es/tag/firmes/> (Consulta: 15/05/2022)
- (15) ESPAÑA. NLT 357/98. Ensayo de carga con placa.