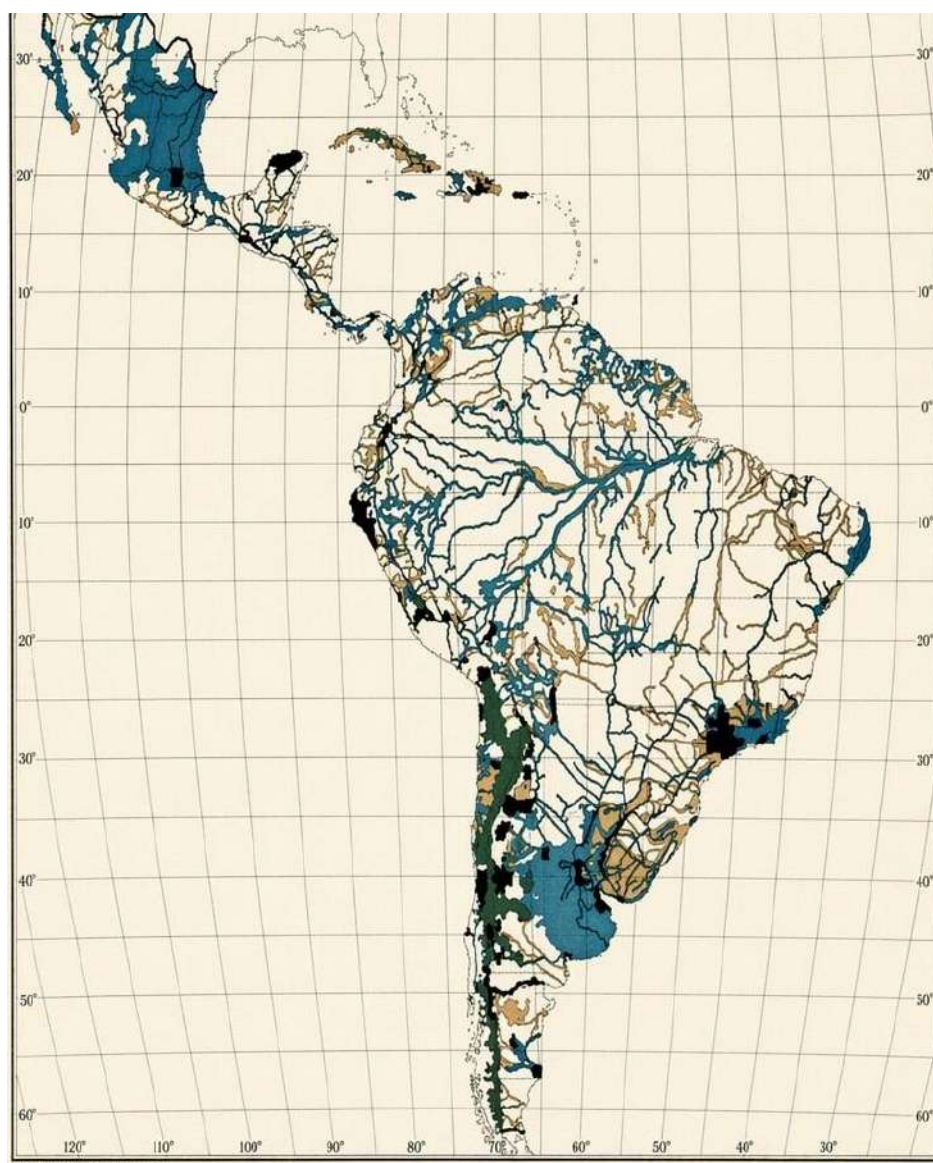


## **Revista Latinoamericana de Difusión Científica**



**Volumen 8 - Número 15**  
Julio – Diciembre 2026  
Maracaibo – Venezuela

## Evaluación del efecto de la radiación ultravioleta en el envejecimiento del ligante asfáltico modificado con nanopartículas de Óxido de Zinc (ZnO) en condiciones del Altiplano boliviano

---

**DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.21482616>**

---

Denisse Mayra Arias Díaz\*

### RESUMEN

El envejecimiento fotooxidativo del ligante asfáltico constituye uno de los principales factores que afectan la durabilidad de los pavimentos flexibles, especialmente en regiones sometidas a elevada radiación ultravioleta, amplitud térmica y condiciones ambientales severas. El presente artículo tiene como objetivo analizar, desde una perspectiva teórica, el efecto de la radiación ultravioleta en el envejecimiento del ligante asfáltico y el potencial uso de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) como modificador fotoprotector en condiciones del altiplano boliviano. Para ello, se desarrolla una revisión crítica del corpus bibliográfico relacionado con envejecimiento fotooxidativo, degradación de materiales bituminosos, nanotecnología aplicada a pavimentos asfálticos y propiedades funcionales del ZnO. El análisis evidencia que la radiación UV favorece la generación de radicales libres, la oxidación del ligante, el incremento de rigidez, la pérdida de ductilidad y la reducción de la capacidad de deformación del material. Asimismo, se identifica que los nanomateriales, particularmente los nanoóxidos metálicos, pueden modificar las propiedades físicas, térmicas y reológicas del asfalto, aunque su efectividad depende de variables como dosificación, dispersión, compatibilidad y estabilidad. En este marco, el ZnO se presenta como una alternativa tecnológicamente pertinente debido a su capacidad de absorción de radiación ultravioleta y su posible efecto mitigador frente a procesos fotooxidativos. Se concluye que la modificación del ligante asfáltico con nano-ZnO constituye una línea de investigación prometedora para mejorar la durabilidad de pavimentos en zonas de alta montaña, requiriéndose futuras evaluaciones experimentales contextualizadas al altiplano boliviano.

**PALABRAS CLAVE:** Radiación ultravioleta, Ligante asfáltico, Envejecimiento fotooxidativo, Nanopartículas de óxido de zinc, Pavimentos asfálticos, Altiplano boliviano.

\*Investigadora. Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-4397-8262>. E-mail: demadiaz99@gmail.com

## **Evaluation of the Effect of Ultraviolet Radiation on the Aging of Asphalt Binder Modified with Zinc Oxide (ZnO) Nanoparticles under Bolivian Highland Conditions**

### **ABSTRACT**

Photooxidative aging of asphalt binder is one of the main factors affecting the durability of flexible pavements, especially in regions exposed to high ultraviolet radiation, thermal amplitude, and severe environmental conditions. This article aims to analyze, from a theoretical perspective, the effect of ultraviolet radiation on asphalt binder aging and the potential use of zinc oxide nanoparticles (ZnO) as a photoprotective modifier under the environmental conditions of the Bolivian highlands. For this purpose, a critical review of the bibliographic corpus related to photooxidative aging, degradation of bituminous materials, nanotechnology applied to asphalt pavements, and functional properties of ZnO is developed. The analysis shows that UV radiation promotes free radical generation, binder oxidation, increased stiffness, loss of ductility, and reduced deformation capacity of the material. Likewise, it is identified that nanomaterials, particularly metallic nano-oxides, can modify the physical, thermal, and rheological properties of asphalt, although their effectiveness depends on variables such as dosage, dispersion, compatibility, and stability. Within this framework, ZnO emerges as a technologically relevant alternative due to its ability to absorb ultraviolet radiation and its potential mitigating effect against photooxidative processes. It is concluded that modifying asphalt binder with nano-ZnO represents a promising research line to improve pavement durability in high-altitude regions, although future experimental evaluations contextualized to the Bolivian highlands are required.

**KEYWORDS:** Ultraviolet radiation, Asphalt binder, Photooxidative aging, Zinc oxide nanoparticles, Asphalt pavements, Bolivian highlands.

### **Introducción**

La infraestructura vial constituye uno de los principales elementos para el desarrollo económico, social y territorial de los países, debido a que permite la integración de regiones productivas, facilita la movilidad de personas y mercancías y contribuye a la competitividad de los sistemas de transporte. En este contexto, los pavimentos asfálticos representan la alternativa más utilizada para la construcción de carreteras debido a sus ventajas técnicas, económicas y operativas. Sin embargo, el adecuado desempeño de estas estructuras depende en gran medida de la estabilidad y durabilidad del ligante asfáltico, componente

responsable de la cohesión entre los agregados minerales y de la capacidad del pavimento para resistir las acciones del tránsito y del medio ambiente.

A lo largo de su vida útil, el ligante asfáltico experimenta procesos progresivos de deterioro que modifican sus propiedades físicas, químicas y reológicas. Dichos procesos son consecuencia de la interacción permanente con factores ambientales como la temperatura, el oxígeno atmosférico, la humedad y la radiación solar. Entre estos mecanismos, el envejecimiento fotooxidativo ha adquirido especial relevancia debido a su influencia directa sobre la pérdida de flexibilidad y capacidad de deformación del material. Según Cortés et al. (2011), el envejecimiento del asfalto genera cambios estructurales que incrementan la rigidez del ligante y reducen su capacidad de respuesta frente a las sollicitaciones mecánicas, favoreciendo la aparición de fisuras y otros mecanismos de deterioro prematuro.

Desde una perspectiva fisicoquímica, el envejecimiento del ligante asfáltico es un fenómeno complejo que involucra procesos simultáneos de oxidación, evaporación de compuestos volátiles y reorganización molecular. Estas transformaciones alteran el equilibrio entre las diferentes fracciones constitutivas del asfalto, modificando su comportamiento viscoelástico y afectando su desempeño en servicio. Morales y Zambrano (2020) señalan que los procesos de oxidación provocan la formación de compuestos más polares y de mayor peso molecular, lo que conduce a un incremento progresivo de la viscosidad y a una disminución de la ductilidad del material.

Dentro de los factores responsables del envejecimiento ambiental, la radiación ultravioleta (UV) constituye uno de los agentes más agresivos para los materiales bituminosos. La energía asociada a este tipo de radiación es capaz de inducir reacciones fotoquímicas que modifican la estructura molecular del ligante, acelerando los procesos de degradación superficial y promoviendo fenómenos de fotooxidación. Rojas et al. (2026) establecen que la exposición prolongada a radiación UV genera alteraciones significativas en las propiedades físicas y mecánicas de los asfaltos convencionales, reduciendo su capacidad de resistencia frente a las condiciones de servicio. En este sentido, la radiación ultravioleta no solamente actúa como un factor complementario del envejecimiento oxidativo, sino que constituye un mecanismo específico de degradación capaz de modificar sustancialmente la estructura interna del ligante.

La problemática asociada a la radiación UV adquiere una importancia particular en regiones de gran altitud, donde la intensidad de la radiación solar aumenta debido a la reducción del espesor atmosférico. El altiplano boliviano presenta características geográficas y climáticas que favorecen la exposición de los pavimentos a niveles elevados de radiación ultravioleta, combinados con importantes variaciones térmicas diarias y bajas temperaturas nocturnas. Estas condiciones generan un entorno altamente agresivo para los materiales asfálticos, acelerando los procesos de envejecimiento y reduciendo la vida útil de las carreteras. López Ramírez (2014) sostiene que la acción simultánea de radiación solar intensa y variaciones térmicas constituye uno de los principales desafíos para la durabilidad de los materiales empleados en infraestructura vial en regiones de montaña.

Frente a esta problemática, la ingeniería de pavimentos ha impulsado el desarrollo de tecnologías orientadas a mejorar la resistencia de los ligantes asfálticos frente a los procesos de envejecimiento. Entre las alternativas más prometedoras se encuentra la modificación de asfaltos mediante materiales nanoestructurados. Durante las últimas dos décadas, la nanotecnología ha experimentado un crecimiento significativo en el ámbito de la ciencia de materiales debido a su capacidad para modificar propiedades físicas y químicas a escala molecular. Fang et al. (2026) indican que los nanomateriales presentan una elevada área superficial específica y una importante capacidad de interacción con las matrices bituminosas, permitiendo mejorar propiedades relacionadas con estabilidad térmica, comportamiento reológico y resistencia al envejecimiento.

La aplicación de nanomateriales en pavimentos asfálticos ha generado resultados favorables en diferentes investigaciones desarrolladas a nivel internacional. Huang et al. (2024) reportan que la incorporación de nanopartículas puede incrementar la estabilidad estructural del ligante, mejorar su comportamiento frente a deformaciones permanentes y contribuir a la reducción de los efectos asociados al envejecimiento oxidativo. De manera similar, Yang y Tighe (2026) destacan que la nanotecnología representa una de las líneas de investigación con mayor potencial para el desarrollo de asfaltos de alto desempeño adaptados a condiciones ambientales extremas.

Entre los diferentes nanomateriales estudiados, las nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) han despertado un interés creciente debido a sus propiedades ópticas, térmicas y fotoprotectoras. El ZnO es un semiconductor de banda prohibida ancha que posee una elevada capacidad para absorber y dispersar radiación ultravioleta, característica que ha

favorecido su utilización en aplicaciones destinadas a la protección frente a procesos de degradación fotoquímica. Calandra et al. (2026) señalan que la incorporación de nanopartículas de ZnO en materiales compuestos puede mejorar su resistencia frente a la radiación UV y disminuir la velocidad de deterioro asociada a procesos de envejecimiento inducidos por exposición solar.

Asimismo, investigaciones recientes desarrolladas por Wolfart et al. (2026) evidencian que la utilización de nanopartículas de ZnO y TiO<sub>2</sub> en sistemas asfálticos permite mejorar determinadas propiedades mecánicas y funcionales del material, contribuyendo a incrementar su durabilidad frente a condiciones ambientales adversas. Estos resultados sugieren que el ZnO podría constituir una alternativa tecnológica viable para reducir los efectos del envejecimiento fotooxidativo en ligantes asfálticos expuestos a elevados niveles de radiación ultravioleta.

A pesar de los avances científicos alcanzados durante los últimos años, aún existe una limitada cantidad de investigaciones orientadas específicamente al estudio del comportamiento de ligantes asfálticos modificados con nanopartículas de ZnO bajo condiciones de alta radiación UV características de regiones andinas de gran altitud. La mayor parte de los estudios disponibles han sido desarrollados en contextos climáticos diferentes a los presentes en el altiplano boliviano, situación que limita la extrapolación de resultados y evidencia la necesidad de generar conocimiento científico adaptado a las condiciones ambientales locales.

En este contexto, el presente artículo tiene como objetivo analizar los fundamentos científicos relacionados con el envejecimiento fotooxidativo del ligante asfáltico, la influencia de la radiación ultravioleta sobre los materiales bituminosos, las aplicaciones de la nanotecnología en pavimentos asfálticos y el potencial del óxido de zinc como agente fotoprotector frente a los procesos de degradación inducidos por radiación UV. Asimismo, se examinan las características ambientales del altiplano boliviano y su posible incidencia sobre el desempeño de ligantes modificados con nanopartículas de ZnO, con la finalidad de contribuir al desarrollo de soluciones tecnológicas orientadas a mejorar la durabilidad de la infraestructura vial en condiciones del altiplano boliviano.

## 1. Envejecimiento fotooxidativo del ligante asfáltico

El envejecimiento fotooxidativo del ligante asfáltico constituye uno de los procesos más relevantes para comprender la pérdida progresiva de desempeño de los pavimentos flexibles expuestos a condiciones ambientales severas. Este fenómeno no puede ser interpretado únicamente como una variación superficial del material, sino como una transformación físico-química compleja que modifica la estructura molecular del betún, altera su comportamiento viscoelástico y reduce su capacidad para responder adecuadamente frente a las sollicitaciones mecánicas y térmicas. Desde una perspectiva doctoral, el envejecimiento del asfalto debe analizarse como un proceso multiescalar, en el que interactúan fenómenos moleculares, reológicos, térmicos y ambientales, cuya consecuencia final se expresa en patologías visibles del pavimento, tales como fisuración, endurecimiento superficial, pérdida de ductilidad, reducción de adherencia y disminución de la vida útil de la estructura vial.

El ligante asfáltico es una matriz orgánica compleja, compuesta por fracciones de distinta polaridad, peso molecular y comportamiento fisicoquímico. Aunque su análisis tradicional suele abordar el material desde parámetros empíricos como penetración, punto de ablandamiento, ductilidad o viscosidad, la comprensión profunda del envejecimiento exige reconocer que estos cambios macroscópicos responden a transformaciones moleculares internas. González (2021), al estudiar la agregación de asfaltenos y su interacción con nanopartículas de  $\text{SiO}_2$ , evidencia la relevancia de los asfaltenos como fracción crítica en los sistemas derivados del petróleo, debido a su tendencia a agregarse, adsorberse sobre superficies y modificar la estabilidad del sistema. Esta aproximación resulta pertinente para el análisis del ligante asfáltico, porque permite comprender que el envejecimiento no se reduce a un simple endurecimiento físico, sino que implica reordenamientos moleculares capaces de alterar la estabilidad coloidal del material.

En términos generales, el envejecimiento del asfalto se relaciona con la pérdida de componentes livianos, la oxidación de fracciones susceptibles, el incremento de compuestos polares y la formación de estructuras moleculares más rígidas. Estos procesos incrementan la viscosidad del ligante, reducen su capacidad de deformación y lo hacen más propenso a la fisuración. Calandra et al. (2020) sostienen que el betún desempeña un papel estructural decisivo dentro del concreto asfáltico, debido a que actúa como fase continua

responsable de aglutinar los agregados minerales y conferir cohesión al sistema. Esta afirmación es fundamental, pues permite establecer que cualquier alteración química o reológica del ligante tiene repercusiones directas sobre el comportamiento global del pavimento.

La literatura reciente ha permitido superar una visión exclusivamente térmica del envejecimiento asfáltico. Si bien la temperatura continúa siendo un factor determinante durante los procesos de producción, mezclado, transporte y compactación, el envejecimiento en servicio se encuentra fuertemente condicionado por la interacción entre el oxígeno atmosférico, la radiación solar, la humedad y las variaciones térmicas. Rojas, Amado, Fernández y Reyes (2013) estudiaron asfaltos colombianos sometidos a envejecimiento por RTFOT, RTFOT más radiación ultravioleta y PAV, analizando propiedades físicas y reológicas. En dicho trabajo se precisa que fueron evaluadas “Physical and Rheological properties such as penetration, ductility, softening point, viscosity with Brookfield and DSR” (Rojas et al., 2013, p. 96), lo que muestra la necesidad de estudiar el envejecimiento desde parámetros convencionales y reológicos de manera articulada.

El aporte de Rojas et al. (2013) es relevante porque introduce la radiación ultravioleta como una variable crítica dentro de los procesos de envejecimiento acelerado. Sus resultados permiten comprender que la exposición UV no debe considerarse un factor secundario, sino un agente capaz de modificar el comportamiento del ligante en interacción con otros mecanismos de envejecimiento. En esta misma línea, López Ramírez (2014) caracterizó asfaltos colombianos sometidos a procesos de envejecimiento en RTFOT y radiación UV entre 100 y 200 horas, aportando evidencia sobre la necesidad de evaluar el efecto de la radiación sobre las propiedades físicas del ligante. Estas investigaciones latinoamericanas son particularmente valiosas para el presente artículo, porque permiten aproximar el problema a contextos geográficos y climáticos más cercanos a la realidad andina que los estudios desarrollados en regiones templadas.

La fotooxidación del ligante asfáltico se produce cuando la radiación ultravioleta interactúa con moléculas presentes en la matriz bituminosa, generando estados excitados y radicales libres que favorecen reacciones de oxidación. Estas reacciones modifican la estructura química del material y promueven la formación de compuestos más polares y rígidos. A diferencia del envejecimiento térmico convencional, la fotooxidación se concentra especialmente en las capas superficiales del pavimento, donde la exposición directa a la



radiación solar es más intensa. Esta particularidad genera un gradiente de envejecimiento: la superficie se endurece y fragiliza antes que las capas internas, lo cual incrementa la susceptibilidad a microfisuras superficiales que posteriormente pueden evolucionar hacia fallas estructurales más severas.

El análisis fotooxidativo exige considerar la relación entre radiación, tiempo de exposición y propiedades reológicas. Filho y Tavares (2017), al evaluar ligantes asfálticos modificados con nanopartículas de dióxido de titanio, incluyeron exposición a radiación UV natural y variaciones térmicas durante tres meses, analizando el comportamiento mediante FTIR y ensayos reológicos. Este enfoque metodológico evidencia que el envejecimiento fotooxidativo no debe evaluarse únicamente mediante ensayos físicos tradicionales, sino también mediante técnicas capaces de identificar transformaciones químicas y cambios en el comportamiento viscoelástico. La combinación entre FTIR, viscosidad rotacional, grado de desempeño, MSCR y LAS permite construir una lectura más integral del deterioro del ligante.

El empleo de técnicas reológicas avanzadas constituye un punto clave para elevar el análisis del envejecimiento asfáltico a nivel doctoral. El envejecimiento no solo incrementa la rigidez del material, sino que modifica su capacidad de recuperación, su resistencia a deformaciones permanentes y su comportamiento frente a cargas cíclicas. En esta dirección, Soares (2018) reconoce que las investigaciones sobre nanomateriales aplicados a pavimentación han incorporado nanoarcillas,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , nanosílice,  $\text{ZnO}$  y  $\text{TiO}_2$ , precisamente porque estos materiales pueden modificar la respuesta del ligante frente a mecanismos de deformación y envejecimiento. Esta perspectiva permite articular el estudio del envejecimiento con el desarrollo de modificadores capaces de intervenir en la estructura interna del material.

La relación entre envejecimiento y viscosidad ocupa un lugar central dentro del análisis del ligante asfáltico. Huang, Wang, Wu, Zhang y Huang (2024) desarrollaron una revisión amplia sobre los efectos de los nanomateriales en las características de viscosidad de asfaltos modificados, señalando que la incorporación de partículas a escala nanométrica tiende a incrementar la viscosidad del asfalto y a mejorar su resistencia frente a deformaciones a altas temperaturas y fisuración a bajas temperaturas. Desde una lectura crítica, este hallazgo debe ser interpretado con cautela: el incremento de viscosidad puede ser favorable para la resistencia a deformación permanente, pero también podría afectar la

trabajabilidad, la compactabilidad y el comportamiento a bajas temperaturas si no se controla adecuadamente la dosificación del modificador.

En este sentido, Yang y Tighe (2013) sostienen que la incorporación de nanomateriales en asfaltos modifica el comportamiento del ligante; específicamente, señalan que estos materiales pueden “increase the viscosity of asphalt binders” (p. 1269). Esta cita resulta relevante porque sintetiza una tendencia ampliamente reportada en la literatura: la nanomodificación suele aumentar la rigidez y la viscosidad del ligante. Sin embargo, a nivel doctoral, este resultado no debe asumirse como universalmente positivo, ya que el desempeño final depende de la naturaleza del nanomaterial, su tamaño, morfología, dispersión, compatibilidad con el betún, concentración y condiciones ambientales de servicio.

Fang, Yu, Liu y Li (2013) ya habían señalado que los nanomateriales aplicados a la modificación asfáltica representan una línea de investigación emergente, orientada a mejorar propiedades mecánicas, térmicas y de durabilidad. Su contribución es importante porque permite situar el estudio del envejecimiento dentro de una transición tecnológica: la ingeniería vial ha pasado de utilizar modificadores convencionales, como polímeros y fibras, hacia materiales nanoestructurados capaces de interactuar con la matriz bituminosa a escala molecular. Este cambio no es menor, pues implica pasar de una modificación predominantemente macroscópica a una modificación con potencial de actuar sobre los mecanismos internos de degradación del ligante.

No obstante, el uso de nanomateriales también plantea tensiones científicas y tecnológicas. Calandra et al. (2020) advierten que las nanopartículas pueden mejorar propiedades del betún y del asfalto, pero su aplicación debe evaluarse considerando costos, compatibilidad, dispersión y beneficios reales frente al desempeño requerido. Este enfoque crítico es necesario porque evita asumir la nanotecnología como una solución automática. En realidad, la eficacia de un nanomodificador frente al envejecimiento depende de su capacidad para integrarse de manera homogénea en la matriz bituminosa y mantener estabilidad durante las etapas de mezclado, almacenamiento, colocación y servicio.

La estabilidad del sistema modificado es especialmente relevante cuando se analiza el envejecimiento fotooxidativo. Wang, Xiong, Yue, Hao y Yue (2020), al investigar nanomateriales de carbono en ligantes asfálticos desde perspectivas de estabilidad de almacenamiento, termodinámica y mecanismos internos, demostraron que las

nanopartículas pueden modificar la estabilidad térmica y las características químicas del ligante. Su estudio también evidencia que el envejecimiento UV puede afectar desfavorablemente algunas propiedades termodinámicas, lo que refuerza la necesidad de evaluar los modificadores no solo antes del envejecimiento, sino también después de procesos de exposición acelerada o natural.

Otro aporte relevante proviene de Chiman, Chiman, Spitsina y Lobach (2011), quienes estudiaron el efecto de un derivado amínico de fullereno C60 sobre las propiedades del asfalto PG 58-22. Aunque este material difiere del ZnO, su inclusión en el análisis resulta útil porque muestra cómo los sistemas nanométricos basados en carbono pueden modificar propiedades reológicas del ligante y producir cambios en el envejecimiento a corto plazo. Este antecedente amplía el panorama del problema: el envejecimiento asfáltico puede ser intervenido mediante distintas familias de nanomateriales, pero cada una opera mediante mecanismos diferentes.

Desde una perspectiva aplicada, Avila Robayo (2022) evaluó partículas ultrafinas sintetizadas con Bone Char como adsorbente de Cr(VI) y su posterior disposición como modificador de asfaltos. Aunque su objetivo principal se orienta hacia la remediación ambiental y la valorización de residuos, su aporte es pertinente porque vincula el desempeño del ligante con la incorporación de partículas ultrafinas. Este tipo de estudios evidencia que la modificación del asfalto también puede conectarse con enfoques de sostenibilidad, economía circular y aprovechamiento de materiales residuales, dimensiones cada vez más relevantes para la ingeniería vial contemporánea.

En el caso de los nanoóxidos, el dióxido de titanio y el óxido de zinc ocupan un lugar destacado por sus propiedades fotocatalíticas y fotoprotectoras. Cortés et al. (2011) analizaron la aplicación de nanomateriales activos en aglomerado asfáltico para la reducción de gases de combustión, mostrando que los materiales nanoestructurados pueden incorporarse en firmes asfálticos con finalidades funcionales adicionales a la resistencia mecánica. Si bien su enfoque se orienta hacia la reducción de contaminantes, este antecedente permite comprender que la interacción entre luz solar, nanomateriales y pavimentos puede aprovecharse tecnológicamente, tanto en términos ambientales como en términos de protección del material.

Rodríguez-Alfaro, Luévano-Hipólito y Torres-Martínez (2024) profundizan en el uso de nanopartículas fotocatalíticas de TiO<sub>2</sub> incorporadas en materiales de construcción,

destacando el potencial de estos materiales para generar superficies funcionales. Aunque el artículo se orienta principalmente a materiales de construcción distintos del ligante asfáltico, su valor para este estudio radica en que refuerza la importancia de los nanoóxidos como materiales capaces de interactuar con la radiación solar. Esta línea conceptual resulta directamente vinculable al uso de ZnO como agente fotoprotector del asfalto, debido a su capacidad para absorber radiación ultravioleta y reducir procesos de degradación fotoquímica.

El estudio de Wolfart, Staub de Melo, Manfro, Barra y Barbosa (2025) resulta particularmente importante porque analiza la incorporación combinada de nanopartículas de ZnO y TiO<sub>2</sub> en una mezcla asfáltica densa modificada con polímero SBS. Sus resultados muestran mejoras en conductividad térmica, desempeño a alta temperatura, comportamiento frente a deformación permanente y capacidad de autorrecuperación. Aunque su foco no es exclusivamente el envejecimiento fotooxidativo del ligante, el trabajo aporta evidencia reciente sobre la viabilidad técnica de emplear ZnO en sistemas asfálticos complejos. Desde el punto de vista de la presente investigación, este antecedente refuerza la pertinencia de estudiar el ZnO no solo como modificador mecánico, sino como posible agente funcional frente a condiciones ambientales agresivas.

Bandeira et al. (2026) ubican la nanotecnología aplicada al asfalto dentro del marco de la pavimentación sostenible, resaltando que los nanomateriales pueden contribuir a mejorar durabilidad, resistencia y desempeño en condiciones extremas. Este planteamiento resulta especialmente útil para contextualizar el envejecimiento fotooxidativo en regiones de alta exposición ambiental, como el altiplano boliviano. En este tipo de escenarios, el envejecimiento del ligante no representa únicamente un problema técnico, sino también un problema económico y ambiental, porque el deterioro prematuro incrementa la frecuencia de mantenimiento, eleva los costos de conservación y demanda mayor consumo de materiales.

A nivel epistemológico, el envejecimiento fotooxidativo del ligante asfáltico exige una lectura interdisciplinaria. No puede ser comprendido solamente desde la ingeniería de pavimentos, ni únicamente desde la química de materiales. Requiere integrar la ciencia de polímeros, la nanotecnología, la reología, la física de la radiación y la ingeniería vial. Esta integración resulta indispensable porque el deterioro observable en campo es consecuencia de mecanismos internos que se activan a escala molecular bajo condiciones ambientales

determinadas. Por ello, el estudio del envejecimiento fotooxidativo debe articular ensayos físicos, análisis reológicos, caracterización química y evaluación ambiental.

En el contexto del altiplano boliviano, este análisis adquiere una relevancia particular. Las condiciones de gran altitud, elevada radiación solar, amplitud térmica diaria y bajas temperaturas nocturnas configuran un ambiente altamente agresivo para los pavimentos asfálticos. La radiación UV puede acelerar el endurecimiento superficial del ligante, mientras que las variaciones térmicas incrementan los esfuerzos de contracción y expansión. Bajo estas condiciones, un ligante envejecido pierde capacidad de relajar tensiones y se vuelve más vulnerable a la fisuración. Por ello, la evaluación del envejecimiento fotooxidativo no debe limitarse a reproducir protocolos generales, sino que debe considerar condiciones representativas del entorno donde el material será utilizado.

En síntesis, el envejecimiento fotooxidativo del ligante asfáltico constituye un proceso crítico que articula degradación química, endurecimiento físico, pérdida de desempeño reológico y reducción de durabilidad. La literatura del corpus bibliográfico permite identificar tres ideas centrales: primero, la radiación UV actúa como un agente acelerador del envejecimiento en servicio; segundo, los cambios moleculares inducidos por oxidación y fotooxidación se expresan en incremento de viscosidad, rigidez y susceptibilidad a la fisuración; tercero, la incorporación de nanomateriales abre una vía tecnológica para modificar la respuesta del ligante frente a dichos procesos, aunque su efectividad depende de la compatibilidad, dispersión, dosificación y estabilidad del sistema. En este marco, el uso de nanopartículas de ZnO se perfila como una alternativa pertinente para ser analizada en condiciones del altiplano boliviano, debido a sus propiedades fotoprotectoras y a su potencial para reducir la degradación inducida por radiación ultravioleta.

## 2. Radiación UV y degradación de materiales bituminosos

La radiación ultravioleta constituye uno de los factores ambientales de mayor incidencia en el deterioro superficial de los materiales bituminosos, especialmente cuando estos se encuentran expuestos de manera permanente a condiciones de alta radiación solar. En el caso de los pavimentos asfálticos, su efecto no debe ser comprendido únicamente como una agresión externa sobre la superficie del material, sino como un proceso energético capaz de activar transformaciones químicas que repercuten directamente en el comportamiento físico, reológico y mecánico del ligante. Por ello, el

estudio de la radiación UV resulta indispensable para interpretar los mecanismos de envejecimiento del asfalto en regiones donde la exposición solar es intensa y sostenida durante gran parte del año.

Desde el punto de vista físico, la radiación ultravioleta forma parte del espectro electromagnético de la radiación solar y posee mayor energía que la luz visible. Esta característica le permite interactuar con compuestos orgánicos presentes en el ligante asfáltico, especialmente con estructuras moleculares susceptibles a la oxidación y a la ruptura de enlaces. Cuando la energía UV es absorbida por determinadas moléculas del asfalto, se generan estados excitados que pueden desencadenar reacciones fotoquímicas. Estas reacciones favorecen la formación de radicales libres, los cuales, al entrar en contacto con el oxígeno atmosférico, aceleran el proceso de fotooxidación del material.

La importancia de este fenómeno radica en que la degradación inducida por radiación UV no se limita a modificar la apariencia superficial del pavimento. En realidad, produce cambios profundos en la matriz bituminosa, alterando la composición química del ligante y reduciendo progresivamente su capacidad de deformación. A medida que avanza el proceso fotooxidativo, el material tiende a endurecerse, pierde ductilidad y desarrolla una estructura más rígida y frágil. Esta transformación resulta crítica porque el ligante asfáltico cumple la función de mantener la cohesión entre los agregados y absorber parte de las tensiones generadas por el tránsito y las variaciones térmicas.

En este sentido, la radiación UV debe ser analizada como un agente acelerador del envejecimiento en servicio. Rojas, Amado, Fernández y Reyes (2013) incorporaron la radiación ultravioleta dentro de los procesos de envejecimiento de asfaltos colombianos, evidenciando que su acción modifica propiedades físicas y reológicas del ligante. Este aporte resulta relevante porque desplaza el análisis del envejecimiento desde una visión centrada exclusivamente en temperatura y oxidación hacia una comprensión más amplia, donde la radiación solar participa activamente en la degradación del material. De manera complementaria, López Ramírez (2014) estudió asfaltos sometidos a envejecimiento por RTFOT y exposición UV, mostrando la necesidad de considerar el tiempo de exposición como una variable determinante en la evolución del deterioro.

La degradación por radiación UV presenta una característica particular: afecta con mayor intensidad las zonas superficiales del pavimento. Esta condición se explica porque la radiación solar incide directamente sobre la capa expuesta, generando un envejecimiento

más acelerado en la superficie que en el interior del material. Como resultado, puede formarse una capa superficial endurecida que pierde capacidad de deformación y se vuelve más susceptible al agrietamiento. Esta diferencia entre la superficie y las capas internas del ligante produce un gradiente de envejecimiento que, con el tiempo, favorece el inicio de microfisuras. Dichas microfisuras pueden propagarse por efecto del tránsito, la temperatura y la humedad, convirtiéndose posteriormente en fallas visibles del pavimento.

La radiación UV no actúa de manera aislada. En condiciones reales de servicio, sus efectos se combinan con la temperatura, el oxígeno, la humedad y las cargas vehiculares. Esta interacción multiplica la complejidad del fenómeno, porque el pavimento no envejece bajo una única causa, sino bajo la acción simultánea de varios agentes ambientales. Filho y Tavares (2017), al evaluar ligantes modificados con nanopartículas de dióxido de titanio, incorporaron radiación UV natural y variaciones térmicas dentro del análisis, lo que permite comprender que el envejecimiento fotooxidativo debe estudiarse desde una perspectiva integrada. Esta visión es especialmente útil para investigaciones desarrolladas en regiones de alta montaña, donde las condiciones ambientales suelen ser más agresivas que en zonas de menor altitud.

Desde la perspectiva reológica, la radiación UV provoca un endurecimiento progresivo del ligante. Este endurecimiento se manifiesta mediante el incremento de la viscosidad y la rigidez del material, así como mediante la reducción de su capacidad para relajarse frente a esfuerzos repetidos. En términos prácticos, un ligante más rígido puede ofrecer inicialmente mayor resistencia a la deformación permanente; sin embargo, si dicha rigidez es producto del envejecimiento no controlado, se convierte en un factor negativo porque reduce la flexibilidad del pavimento y aumenta la probabilidad de fisuración. Por ello, no todo incremento de rigidez debe interpretarse como mejora del desempeño. La diferencia fundamental está en si el cambio reológico responde a una modificación tecnológica controlada o a una degradación ambiental progresiva.

Este punto es particularmente importante cuando se analiza la nanotecnología aplicada a asfaltos. Huang, Wang, Wu, Zhang y Huang (2024) explican que los nanomateriales pueden modificar las características de viscosidad de los asfaltos, mejorando su comportamiento frente a determinadas solicitaciones. Sin embargo, desde una lectura crítica, el aumento de viscosidad debe ser evaluado con cuidado, ya que un ligante excesivamente rígido puede presentar dificultades de trabajabilidad y mayor

susceptibilidad al agrietamiento a bajas temperaturas. Por tanto, la modificación del ligante debe buscar un equilibrio entre estabilidad, flexibilidad, resistencia al envejecimiento y comportamiento constructivo.

En este marco, la degradación por radiación UV plantea un doble desafío para la ingeniería vial. Por una parte, obliga a comprender cómo la energía solar transforma químicamente el ligante asfáltico. Por otra, exige desarrollar materiales capaces de resistir o retardar dichas transformaciones. Aquí adquieren relevancia los nanomateriales, especialmente aquellos que presentan interacción directa con la radiación ultravioleta. Fang, Yu, Liu y Li (2013) señalan que los nanomateriales aplicados a la modificación asfáltica han sido estudiados por su capacidad para mejorar propiedades mecánicas y de durabilidad. No obstante, su efectividad depende de factores como el tipo de partícula, tamaño, dispersión, compatibilidad con la matriz bituminosa y estabilidad durante el servicio.

Los nanoóxidos metálicos resultan especialmente relevantes dentro de este campo, porque algunos de ellos presentan propiedades ópticas y fotoprotectoras. Materiales como el dióxido de titanio y el óxido de zinc poseen capacidad de interacción con la radiación solar, razón por la cual han sido empleados en aplicaciones vinculadas con fotocátalisis, protección superficial y materiales funcionales. Rodríguez-Alfaro, Luévano-Hipólito y Torres-Martínez (2024) destacan el uso de nanopartículas fotocatalíticas en materiales de construcción, mostrando que la incorporación de nanoóxidos puede otorgar nuevas funciones a los materiales expuestos al ambiente. Aunque su trabajo se centra principalmente en materiales de construcción distintos del asfalto, su aporte permite comprender el potencial de los nanoóxidos para modificar la interacción entre radiación y superficie material.

En el caso específico de los pavimentos, el interés por estos materiales se relaciona con la posibilidad de reducir el impacto de la radiación UV sobre el ligante asfáltico. Cortés et al. (2011) estudiaron nanomateriales activos incorporados en aglomerado asfáltico con fines ambientales, evidenciando que las superficies asfálticas pueden ser diseñadas no solo como estructuras resistentes, sino también como sistemas funcionales capaces de interactuar con su entorno. Esta idea es relevante para el presente artículo, porque permite proyectar el uso del óxido de zinc no únicamente como un modificador del ligante, sino como un agente funcional con potencial fotoprotector.



El óxido de zinc adquiere especial interés debido a su capacidad para absorber radiación ultravioleta. Esta propiedad permite plantear que su incorporación en el ligante asfáltico podría reducir parte de la energía UV disponible para inducir reacciones fotooxidativas dentro de la matriz bituminosa. Wolfart, Staub de Melo, Manfro, Barra y Barbosa (2025) analizaron mezclas asfálticas modificadas con nanopartículas de ZnO y TiO<sub>2</sub>, reportando mejoras en propiedades térmicas, mecánicas y funcionales del material. Aunque el estudio no se limita exclusivamente al envejecimiento UV del ligante, aporta evidencia reciente sobre la viabilidad del uso de ZnO en sistemas asfálticos modificados.

La degradación de materiales bituminosos por radiación UV adquiere mayor relevancia cuando se considera el contexto del altiplano boliviano. Las regiones de gran altitud se caracterizan por una atmósfera menos densa, mayor incidencia de radiación solar y fuertes amplitudes térmicas diarias. En estas condiciones, el pavimento se encuentra sometido a calentamiento superficial durante el día y enfriamiento intenso durante la noche. Si el ligante ha sido previamente endurecido por procesos fotooxidativos, su capacidad de deformación disminuye y aumenta el riesgo de fisuración térmica. Por ello, el análisis de la radiación UV no puede separarse de las condiciones climáticas del lugar donde se construye y opera la infraestructura vial.

Esta relación entre ambiente y material exige una lectura territorial del envejecimiento asfáltico. No es suficiente importar resultados obtenidos en laboratorios o regiones con condiciones climáticas moderadas; es necesario interpretar el comportamiento del ligante en función de las características ambientales específicas del altiplano. La elevada radiación UV, las bajas temperaturas nocturnas y los cambios térmicos abruptos generan un escenario de exposición que puede acelerar la pérdida de propiedades del asfalto convencional. En consecuencia, la investigación sobre ligantes modificados con nano-ZnO adquiere pertinencia no solo por su novedad tecnológica, sino por su potencial adaptación a una problemática local concreta.

Desde una perspectiva metodológica, el estudio de la radiación UV sobre materiales bituminosos requiere combinar ensayos físicos, reológicos y químicos. Las pruebas convencionales, como penetración, punto de ablandamiento, ductilidad y viscosidad, permiten observar cambios macroscópicos del ligante; sin embargo, no explican por sí solas los mecanismos internos de degradación. Por ello, deben complementarse con técnicas como FTIR, DSR, MSCR, LAS y análisis térmicos, capaces de identificar transformaciones

moleculares, cambios viscoelásticos y variaciones en la resistencia del material. Esta integración metodológica permite pasar de una evaluación descriptiva del deterioro hacia una comprensión explicativa del envejecimiento fotooxidativo.

En síntesis, la radiación ultravioleta representa un agente crítico en la degradación de materiales bituminosos porque activa procesos fotoquímicos que aceleran la oxidación del ligante, incrementan su rigidez y reducen su capacidad de deformación. Su efecto es especialmente severo en zonas de elevada exposición solar y gran altitud, donde las condiciones ambientales intensifican los mecanismos de envejecimiento. La evidencia analizada permite sostener que el uso de nanoóxidos, particularmente ZnO, constituye una línea de investigación pertinente para mitigar los efectos de la radiación UV sobre el asfalto. En el caso del altiplano boliviano, esta alternativa adquiere un valor estratégico, ya que permitiría avanzar hacia el diseño de pavimentos más durables, resistentes y adaptados a condiciones climáticas extremas.

### 3. Nanotecnología aplicada a pavimentos asfálticos

La nanotecnología aplicada a pavimentos asfálticos representa una de las líneas de investigación más relevantes dentro de la ingeniería vial contemporánea, debido a su capacidad para intervenir en el comportamiento de los materiales a escalas donde se originan muchas de sus propiedades físicas, químicas y reológicas. A diferencia de los modificadores convencionales, cuya acción suele manifestarse principalmente a escala macroscópica o mesoscópica, los nanomateriales poseen dimensiones reducidas, elevada área superficial específica y alta capacidad de interacción con la matriz bituminosa. Estas características permiten modificar la estructura interna del ligante, mejorar su respuesta frente a agentes ambientales y optimizar determinadas propiedades asociadas al desempeño del pavimento.

El interés por la nanotecnología en asfaltos no surge únicamente de la búsqueda de materiales más resistentes, sino de la necesidad de responder a un problema estructural de la infraestructura vial: el deterioro prematuro de los pavimentos bajo condiciones ambientales y de carga cada vez más exigentes. En regiones sometidas a altas temperaturas, radiación ultravioleta intensa, tránsito pesado o variaciones térmicas significativas, los ligantes convencionales pueden perder rápidamente sus propiedades funcionales. En este contexto, los nanomateriales se presentan como una alternativa

tecnológica orientada a mejorar la estabilidad térmica, la resistencia al envejecimiento, la adhesión, la viscosidad, la recuperación elástica y la durabilidad de los sistemas asfálticos.

Fang, Yu, Liu y Li (2013) identifican la modificación asfáltica mediante nanomateriales como un campo de desarrollo emergente, en el que distintos tipos de nanopartículas han sido evaluadas para mejorar el desempeño de ligantes y mezclas. Este planteamiento permite comprender que la nanotecnología no debe entenderse como una solución única, sino como un conjunto de estrategias diferenciadas según la naturaleza del nanomaterial empleado. Nanoarcillas, nanosílice, nanotubos de carbono, óxidos metálicos, grafeno, óxido de grafeno y partículas funcionalizadas poseen mecanismos de acción distintos, por lo que su efecto sobre el asfalto depende de su composición, morfología, dosificación, dispersión y compatibilidad con el ligante.

Desde una perspectiva reológica, uno de los efectos más reportados de los nanomateriales es el incremento de la viscosidad del ligante asfáltico. Yang y Tighe (2013) señalan que la incorporación de nanopartículas como nanoarcillas, nanosílice y nanotubos tiende a aumentar la viscosidad de los ligantes y mejorar la resistencia a deformación permanente y fatiga. Sin embargo, este resultado debe interpretarse con cautela. En ingeniería de pavimentos, una mayor viscosidad puede ser favorable para resistir deformaciones a altas temperaturas, pero también puede generar dificultades de mezclado, compactación o desempeño a bajas temperaturas si no se controla adecuadamente. Por tanto, el reto no consiste simplemente en rigidizar el ligante, sino en alcanzar un equilibrio entre estabilidad, trabajabilidad, flexibilidad y resistencia al envejecimiento.

Huang, Wang, Wu, Zhang y Huang (2024) profundizan en esta problemática al analizar los efectos de los nanomateriales sobre las características de viscosidad de asfaltos modificados. Los autores explican que los nanomateriales pueden incrementar la viscosidad debido a interacciones físicas y químicas con las moléculas del asfalto, así como por la formación de estructuras internas más densas o redes espaciales dentro de la matriz bituminosa. Esta interpretación es importante porque permite comprender que el comportamiento del ligante modificado no depende únicamente de la presencia de partículas, sino de la forma en que estas interactúan con los componentes del asfalto.

La modificación a escala nanométrica puede generar distintos mecanismos de mejora. Las nanopartículas de dimensión cero, como algunos óxidos metálicos, pueden adherirse a la superficie del ligante y aumentar las interacciones intermoleculares. Los

materiales unidimensionales, como nanotubos de carbono, pueden actuar como refuerzo interno y contribuir a la transferencia de esfuerzos. Los nanomateriales bidimensionales, como grafeno u óxido de grafeno, pueden favorecer mecanismos de adsorción e interacción superficial. Esta diversidad de comportamientos evidencia que la nanotecnología aplicada a asfaltos no debe ser abordada como una categoría homogénea, sino como un campo técnico donde cada material presenta ventajas, limitaciones y riesgos específicos.

Calandra, Loise, Porto, Oliviero Rossi, Lombardo y Caputo (2020) plantean una discusión crítica particularmente pertinente al preguntarse hasta qué punto resulta realmente conveniente explotar nanopartículas para mejorar las propiedades de betunes y asfaltos. Su análisis permite introducir una dimensión indispensable para un artículo doctoral: la nanotecnología no puede ser evaluada únicamente desde el desempeño de laboratorio, sino también desde su viabilidad técnica, económica y ambiental. Un nanomaterial puede mejorar propiedades reológicas o mecánicas, pero su implementación a escala vial requiere considerar costos de producción, disponibilidad, compatibilidad, dispersión, seguridad, estabilidad de almacenamiento y beneficios reales durante la vida útil del pavimento.

Esta mirada crítica resulta necesaria porque uno de los principales problemas en la aplicación de nanomateriales al asfalto es la dispersión. Debido a su elevada energía superficial, las nanopartículas tienden a aglomerarse, reduciendo la efectividad de la modificación y generando posibles puntos débiles dentro de la matriz bituminosa. Una dispersión deficiente puede provocar heterogeneidad, inestabilidad de almacenamiento y variabilidad en el comportamiento del material. En consecuencia, la tecnología de incorporación resulta tan importante como el tipo de nanopartícula seleccionada. El mezclado, la temperatura, el tiempo de agitación, la velocidad de corte y la compatibilidad química son variables que condicionan el desempeño final del ligante modificado.

Soares (2018) reconoce que las investigaciones sobre nanomateriales aplicados a pavimentación han incorporado nanoarcillas, nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , nanosílice,  $\text{ZnO}$  y  $\text{TiO}_2$ , lo que demuestra la amplitud del campo de estudio. Esta diversidad de materiales responde a la necesidad de mejorar propiedades distintas: algunas nanopartículas se orientan a incrementar resistencia mecánica; otras buscan mejorar estabilidad térmica; otras poseen propiedades fotocatalíticas o fotoprotectoras; y algunas se exploran por su potencial

en sostenibilidad o valorización de residuos. Esta clasificación funcional es importante porque permite ubicar al ZnO dentro de una familia específica de nanoóxidos con potencial interacción frente a radiación ultravioleta.

Filho y Tavares (2017), al estudiar ligantes asfálticos modificados con nanopartículas de dióxido de titanio, muestran que la nanotecnología también puede evaluarse desde una perspectiva reológica avanzada. Su trabajo integra ensayos como viscosidad rotacional, grado de desempeño, MSCR, LAS y FTIR, lo que permite relacionar la modificación del ligante con cambios en resistencia a deformación permanente, fatiga, recuperación y estructura química. Este enfoque metodológico es fundamental porque evidencia que el análisis de nanomodificadores no debe limitarse a ensayos empíricos tradicionales, sino que debe incorporar herramientas capaces de explicar los mecanismos internos del material.

La nanotecnología también permite introducir funciones adicionales al pavimento. Cortés et al. (2011) analizaron la aplicación de nanomateriales activos en aglomerado asfáltico para la reducción de gases de combustión, mostrando que los firmes asfálticos pueden ser concebidos como superficies funcionales capaces de interactuar con el ambiente. Esta visión amplía el papel tradicional del pavimento: ya no se trata solamente de una estructura destinada a soportar cargas, sino de un material que puede contribuir a objetivos ambientales, de durabilidad o de protección frente a agentes externos. Esta idea es relevante para la presente investigación porque permite interpretar el nano-ZnO no solo como modificador mecánico, sino como posible agente funcional frente a la radiación UV.

En la misma línea, Rodríguez-Alfaro, Luévano-Hipólito y Torres-Martínez (2024) estudian nanopartículas fotocatalíticas de  $\text{TiO}_2$  incorporadas en materiales de construcción, destacando el potencial de los nanoóxidos para generar superficies inteligentes. Aunque su trabajo no se centra exclusivamente en pavimentos asfálticos, aporta una base conceptual útil para comprender cómo determinados nanoóxidos pueden interactuar con la radiación solar y modificar el comportamiento superficial de los materiales. Esta perspectiva resulta aplicable al análisis de ZnO, ya que su capacidad de absorción de radiación ultravioleta puede ser aprovechada para reducir la energía disponible para reacciones fotooxidativas dentro del ligante asfáltico.

El uso de nanomateriales en pavimentación también se vincula con la sostenibilidad. Bandeira et al. (2026) ubican la nanotecnología asfáltica dentro de la pavimentación sostenible, destacando su potencial para incrementar durabilidad, resistencia y desempeño

bajo condiciones extremas. Esta orientación es particularmente importante para contextos como el altiplano boliviano, donde la mejora de la durabilidad no solo tiene implicaciones técnicas, sino también económicas y ambientales. Un pavimento más resistente al envejecimiento puede reducir intervenciones de mantenimiento, disminuir consumo de materiales, optimizar recursos públicos y minimizar impactos asociados a rehabilitaciones frecuentes.

La sostenibilidad también aparece en investigaciones que exploran el uso de partículas ultrafinas derivadas de materiales residuales. Avila Robayo (2022) evaluó partículas ultrafinas sintetizadas con Bone Char como adsorbente de Cr(VI) y su posterior disposición como modificador de asfaltos. Aunque su estudio no se orienta directamente al envejecimiento UV, resulta relevante porque demuestra que la modificación asfáltica puede articularse con procesos de remediación ambiental y valorización de residuos. Este tipo de investigaciones amplía el horizonte de la nanotecnología aplicada a pavimentos, vinculándola con economía circular y gestión ambiental.

La estabilidad de almacenamiento es otro aspecto crítico en asfaltos nanomodificados. Wang, Xiong, Yue, Hao y Yue (2020) analizaron nanomateriales de carbono en ligantes asfálticos desde perspectivas de estabilidad de almacenamiento, termodinámica y mecanismos internos. Su investigación evidencia que la incorporación de nanopartículas puede mejorar ciertas características del ligante, pero también exige evaluar si el sistema modificado permanece estable durante el almacenamiento en caliente. Este punto es fundamental para cualquier aplicación práctica, ya que un ligante que presenta segregación o inestabilidad durante el almacenamiento puede perder homogeneidad y afectar el desempeño final del pavimento.

La modificación con nanomateriales también puede alterar el comportamiento frente al envejecimiento. Chiman, Chiman, Spitsina y Lobach (2011) estudiaron el efecto de un derivado amínico de fullereno C60 sobre un asfalto PG 58-22, observando cambios en propiedades reológicas y en el proceso de envejecimiento a corto plazo. Aunque este tipo de nanomaterial difiere de los nanoóxidos, su incorporación dentro del análisis permite comprender que las nanopartículas pueden intervenir en mecanismos de envejecimiento mediante diferentes rutas: algunas actúan como refuerzos, otras como barreras, otras como estabilizadores y otras como modificadores de interacción molecular.

La Tabla 1 sintetiza los principales tipos de nanomateriales identificados en el corpus bibliográfico y su posible contribución al desempeño de pavimentos asfálticos.

Tabla 1. Nanomateriales aplicados a pavimentos asfálticos y su aporte potencial

| Tipo de nanomaterial                   | Ejemplos reportados                                       | Aporte potencial al asfalto                                                                                        | Limitaciones o aspectos críticos                                               | Referencias del corpus                                                |
|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Nanoarcillas                           | Montmorillonita, organoarcillas                           | Mejoran estabilidad térmica, resistencia al envejecimiento y comportamiento en asfaltos modificados con polímeros. | Requieren buena dispersión y compatibilidad con el ligante.                    | Yang y Tighe (2013); Soares (2018)                                    |
| Nanosílice                             | SiO <sub>2</sub> nanométrico                              | Puede incrementar rigidez, resistencia mecánica y estabilidad del sistema.                                         | Puede afectar la trabajabilidad si se aglomera o se usa en exceso.             | Duarte (2013); Huang et al. (2024)                                    |
| Nanotubos de carbono                   | CNT                                                       | Refuerzo interno, mejora de resistencia a carga cíclica y posible incremento de estabilidad.                       | Alto costo, dispersión compleja y posibles impactos ambientales.               | Fang et al. (2013); Yang y Tighe (2013); Wang et al. (2020)           |
| Grafeno y óxido de grafeno             | GO, grafeno                                               | Mejoran interacción superficial, estabilidad térmica y propiedades mecánicas.                                      | Riesgo de segregación y dificultad de dispersión homogénea.                    | Wang et al. (2020); Huang et al. (2024)                               |
| Nanoóxidos metálicos                   | TiO <sub>2</sub> , ZnO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | Potencial fotoprotector, fotocatalítico, mejora reológica y térmica.                                               | Deben evaluarse compatibilidad, dosificación y estabilidad.                    | Filho y Tavares (2017); Soares (2018); Rodríguez-Alfaro et al. (2024) |
| ZnO y TiO <sub>2</sub> combinados      | ZnO + TiO <sub>2</sub>                                    | Mejora térmica, mecánica, reológica y de autorrecuperación en mezclas modificadas.                                 | Requiere optimización de dosificación y evaluación frente a envejecimiento UV. | Wolfart et al. (2025)                                                 |
| Nanomateriales funcionales ambientales | TiO <sub>2</sub> activo, partículas ultrafinas recicladas | Superficies funcionales, reducción de contaminantes o valorización de residuos.                                    | Viabilidad económica y desempeño a largo plazo.                                | Cortés et al. (2011); Avila Robayo (2022); Bandeira et al. (2026)     |

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Tabla 1, la nanotecnología aplicada a pavimentos asfálticos no constituye una línea homogénea, sino un campo multidimensional donde convergen objetivos mecánicos, reológicos, ambientales y funcionales. Esta diversidad es una fortaleza, pero también plantea un desafío metodológico: cada nanomaterial debe ser

evaluado en función del problema específico que se busca resolver. Para el caso del envejecimiento fotooxidativo inducido por radiación UV, no basta con seleccionar un material que mejore la resistencia mecánica; se requiere un modificador que además tenga capacidad de interactuar con la radiación ultravioleta, reducir la degradación fotoquímica o estabilizar la matriz bituminosa frente a procesos oxidativos.

En este sentido, el ZnO se posiciona como un nanomaterial de interés particular para la presente investigación, porque pertenece al grupo de nanoóxidos con propiedades fotoprotectoras y potencial interacción con la radiación UV. A diferencia de otros nanomateriales cuyo efecto principal se relaciona con refuerzo mecánico o modificación de viscosidad, el ZnO podría contribuir específicamente a mitigar los procesos de degradación inducidos por radiación ultravioleta. Esta particularidad permite articular el problema del envejecimiento fotooxidativo con una alternativa tecnológica coherente desde el punto de vista químico, físico y ambiental.

No obstante, el potencial del ZnO no debe ser asumido de manera automática. Su efectividad dependerá de la dosificación, tamaño de partícula, dispersión, interacción con el ligante base, estabilidad frente a almacenamiento y comportamiento después de la exposición UV. Además, la incorporación de nanopartículas puede incrementar la viscosidad del ligante, lo que exige evaluar el equilibrio entre resistencia al envejecimiento y trabajabilidad. Por ello, la nanotecnología aplicada a pavimentos debe ser estudiada desde una perspectiva integral que considere no solo el desempeño final del material, sino también su viabilidad constructiva y su comportamiento durante todo el ciclo de vida.

Desde una mirada doctoral, la principal contribución de la nanotecnología al campo de los pavimentos no radica únicamente en mejorar indicadores aislados, sino en abrir la posibilidad de diseñar ligantes con funciones específicas frente a condiciones ambientales concretas. En el caso del altiplano boliviano, donde la radiación UV, la altitud y la amplitud térmica configuran un ambiente particularmente agresivo, la nanomodificación debe orientarse a desarrollar materiales adaptados al territorio. En este marco, el uso de nano-ZnO se justifica no solo por su novedad tecnológica, sino por su coherencia con el problema físico-químico que se busca mitigar: el envejecimiento fotooxidativo del ligante asfáltico bajo alta exposición ultravioleta.

En síntesis, la nanotecnología aplicada a pavimentos asfálticos ofrece una plataforma de innovación para mejorar la durabilidad, funcionalidad y sostenibilidad de los materiales



viales. El corpus bibliográfico revisado muestra que los nanomateriales pueden modificar la viscosidad, estabilidad térmica, resistencia a deformación, comportamiento frente a fatiga, interacción superficial y respuesta frente al envejecimiento. Sin embargo, también evidencia que su aplicación exige una evaluación crítica de dispersión, compatibilidad, dosificación, costos y beneficios reales. En consecuencia, la incorporación de nanopartículas de ZnO debe abordarse como una estrategia tecnológica con fundamento científico, orientada a reducir los efectos de la radiación UV y a fortalecer el desempeño del ligante asfáltico en condiciones extremas como las del altiplano boliviano.

#### 4. Propiedades fotoprotectoras del óxido de zinc (ZnO) y condiciones ambientales del Altiplano boliviano

El óxido de zinc (ZnO) constituye uno de los nanoóxidos metálicos de mayor interés para la modificación de materiales expuestos a radiación solar, debido a sus propiedades ópticas, térmicas y fotoprotectoras. En el campo de los pavimentos asfálticos, su estudio adquiere particular relevancia porque el envejecimiento fotooxidativo del ligante se encuentra estrechamente relacionado con la absorción de energía ultravioleta, la generación de radicales libres y la formación de compuestos oxidados que rigidizan la matriz bituminosa. Por ello, la incorporación de nanopartículas de ZnO no debe ser entendida únicamente como una estrategia de refuerzo físico, sino como una alternativa funcional orientada a reducir la agresividad de la radiación UV sobre el ligante asfáltico.

Desde el punto de vista químico y físico, el ZnO se caracteriza por su capacidad para interactuar con la radiación ultravioleta. Esta propiedad permite que parte de la energía incidente sea absorbida, dispersada o atenuada antes de generar reacciones fotoquímicas dentro de la matriz bituminosa. En materiales orgánicos como el asfalto, esta función resulta especialmente importante, porque la radiación UV puede provocar ruptura de enlaces, generación de especies reactivas y formación de productos de oxidación. En consecuencia, un nanomodificador con capacidad de absorción UV podría actuar como barrera parcial frente a la degradación fotooxidativa, reduciendo la velocidad de envejecimiento del ligante.

La literatura sobre nanoóxidos aplicados a materiales de construcción permite comprender que la interacción entre radiación solar y partículas semiconductoras abre posibilidades tecnológicas relevantes. Rodríguez-Alfaro, Luévano-Hipólito y Torres-Martínez (2024) destacan el uso de nanopartículas fotocatalíticas en materiales de

construcción, especialmente  $\text{TiO}_2$ , como parte del desarrollo de superficies funcionales expuestas al ambiente. Aunque su análisis se orienta principalmente a materiales cementicios, el principio científico resulta aplicable a los pavimentos asfálticos: determinados nanoóxidos pueden modificar la forma en que un material interactúa con la radiación solar, otorgándole funciones adicionales frente a procesos ambientales.

En el caso del  $\text{ZnO}$ , su pertinencia para el presente artículo se fundamenta en su potencial fotoprotector. A diferencia de otros nanomateriales cuyo aporte principal se relaciona con el incremento de rigidez, viscosidad o resistencia mecánica, el  $\text{ZnO}$  posee una propiedad directamente vinculada con el problema de investigación: su interacción con la radiación ultravioleta. Esta característica permite construir una relación lógica entre causa y solución tecnológica. Si la radiación UV acelera el envejecimiento fotooxidativo del ligante, entonces resulta pertinente evaluar un modificador capaz de reducir el impacto de dicha radiación sobre la matriz bituminosa.

Wolfart, Staub de Melo, Manfro, Barra y Barbosa (2025) aportan evidencia reciente sobre el uso combinado de nanopartículas de  $\text{ZnO}$  y  $\text{TiO}_2$  en mezclas asfálticas densas modificadas con polímero SBS, reportando mejoras en propiedades térmicas, mecánicas, reológicas y de autorrecuperación. Este antecedente es relevante porque demuestra que el  $\text{ZnO}$  puede ser incorporado en sistemas asfálticos complejos y participar en la mejora del desempeño del material. Aunque el estudio no se limita exclusivamente al envejecimiento fotooxidativo del ligante, permite sostener que el  $\text{ZnO}$  posee viabilidad técnica dentro de matrices asfálticas modificadas y que su análisis frente a radiación UV constituye una línea de investigación pertinente.

La acción potencial del  $\text{ZnO}$  frente al envejecimiento puede explicarse mediante tres mecanismos principales. El primero corresponde a la absorción o atenuación de radiación UV, mediante la cual las nanopartículas reducen la energía disponible para inducir reacciones fotoquímicas en el ligante. El segundo se relaciona con la modificación de la estructura interna del asfalto, ya que la presencia de partículas nanométricas puede alterar la movilidad molecular, incrementar la viscosidad y generar una matriz más estable frente a la degradación. El tercero corresponde a un posible efecto de barrera, donde la dispersión adecuada de nanopartículas dificulta la penetración de agentes externos como oxígeno y radiación hacia determinadas zonas del ligante.

No obstante, estos mecanismos no actúan de manera automática ni garantizan por sí mismos una mejora del desempeño. Calandra, Loise, Porto, Oliviero Rossi, Lombardo y Caputo (2020) advierten que la incorporación de nanopartículas en betunes y asfaltos debe evaluarse considerando no solo las mejoras reportadas en laboratorio, sino también aspectos asociados a dispersión, compatibilidad, costos, estabilidad y viabilidad tecnológica. Esta advertencia resulta fundamental para el uso de ZnO, porque una dispersión deficiente podría producir aglomeraciones, heterogeneidad y pérdida de efectividad fotoprotectora. Por tanto, la dosificación y el procedimiento de incorporación son variables críticas para garantizar que el nanomaterial cumpla la función esperada.

En términos reológicos, la incorporación de nanopartículas puede modificar la viscosidad del ligante asfáltico. Huang, Wang, Wu, Zhang y Huang (2024) señalan que los nanomateriales pueden incrementar la viscosidad de asfaltos modificados debido a interacciones físicas y químicas dentro de la matriz bituminosa. Este comportamiento puede ser favorable si mejora la resistencia frente a deformaciones permanentes y envejecimiento; sin embargo, también puede representar una limitación si reduce excesivamente la trabajabilidad o incrementa la fragilidad del material a bajas temperaturas. En consecuencia, el uso de ZnO debe orientarse hacia una dosificación equilibrada que permita mejorar la resistencia al envejecimiento sin comprometer las condiciones de mezclado, aplicación y desempeño térmico.

La relevancia del ZnO se intensifica cuando se analiza el contexto ambiental del altiplano boliviano. Esta región presenta condiciones de gran altitud, elevada exposición solar, atmósfera menos densa, baja humedad relativa en determinados periodos y amplitudes térmicas diarias marcadas. Tales condiciones generan un ambiente especialmente agresivo para los pavimentos asfálticos. Durante el día, la superficie del pavimento puede recibir altos niveles de radiación solar y experimentar calentamiento; durante la noche, las bajas temperaturas favorecen procesos de contracción térmica. Si el ligante ha sido endurecido previamente por fotooxidación, su capacidad de deformación disminuye, incrementando la probabilidad de fisuración.

En este sentido, el envejecimiento del asfalto en el altiplano no debe interpretarse como una simple reproducción de los mecanismos observados en regiones de menor altitud. La radiación UV adquiere un peso mayor dentro del proceso de deterioro, por lo que las soluciones tecnológicas deben adaptarse a esta particularidad territorial. Las

investigaciones de Rojas, Amado, Fernández y Reyes (2013) y López Ramírez (2014), desarrolladas en el contexto latinoamericano, muestran la importancia de incorporar la radiación ultravioleta en los análisis de envejecimiento de asfaltos, superando enfoques centrados únicamente en envejecimiento térmico u oxidativo convencional. Esta orientación resulta especialmente pertinente para Bolivia, donde las condiciones de exposición solar pueden acelerar la degradación del ligante.

La adaptación tecnológica al altiplano boliviano exige que el diseño del ligante modificado responda al ambiente de servicio. No basta con demostrar que el ZnO mejora alguna propiedad aislada en laboratorio; se requiere analizar si su incorporación contribuye realmente a reducir la degradación inducida por radiación UV en condiciones representativas de alta montaña. Esto implica evaluar propiedades físicas como penetración, viscosidad y punto de ablandamiento antes y después de la exposición UV, pero también considerar técnicas complementarias que permitan identificar cambios químicos y reológicos. Filho y Tavares (2017) muestran la importancia de integrar análisis físicos, reológicos y químicos para comprender el efecto de nanopartículas en ligantes asfálticos expuestos a condiciones ambientales.

La aplicación de ZnO también debe analizarse desde una perspectiva de sostenibilidad. Bandeira et al. (2026) vinculan la nanotecnología asfáltica con la pavimentación sostenible, destacando que los nanomateriales pueden contribuir a mejorar la durabilidad y el desempeño de los pavimentos bajo condiciones extremas. En el caso del altiplano boliviano, prolongar la vida útil del ligante asfáltico tendría implicaciones técnicas, económicas y ambientales. Un pavimento más resistente al envejecimiento podría reducir la frecuencia de mantenimiento, disminuir el consumo de materiales, optimizar recursos institucionales y limitar impactos ambientales asociados a rehabilitaciones recurrentes.

Sin embargo, la sostenibilidad del nano-ZnO debe ser evaluada integralmente. Su uso puede ser técnicamente prometedor, pero requiere considerar disponibilidad, costo, seguridad en manipulación, estabilidad en el ligante y comportamiento a largo plazo. La innovación tecnológica no debe limitarse a incorporar un material novedoso, sino a demostrar que dicho material resuelve un problema real de desempeño bajo condiciones específicas. En este caso, el problema no es solamente mejorar el asfalto en términos generales, sino reducir el envejecimiento fotooxidativo en un entorno de alta radiación UV y amplitud térmica como el altiplano boliviano.

La Tabla 2 sintetiza la relación entre las propiedades del ZnO, los mecanismos de envejecimiento fotooxidativo y las condiciones ambientales del altiplano boliviano.

Tabla 2. Relación entre propiedades del ZnO, envejecimiento fotooxidativo y condiciones del Altiplano boliviano

| Dimensión de análisis       | Condición o propiedad relevante                            | Efecto sobre el ligante asfáltico                                               | Función potencial del nano-ZnO                                       | Implicación para el altiplano boliviano                                      |
|-----------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Radiación ultravioleta      | Alta energía incidente sobre la superficie asfáltica       | Activación de reacciones fotoquímicas y formación de radicales libres           | Absorción, atenuación o dispersión parcial de radiación UV           | Puede reducir la velocidad de degradación superficial del ligante            |
| Fotooxidación               | Presencia conjunta de radiación UV y oxígeno               | Formación de compuestos oxidados, incremento de rigidez y pérdida de ductilidad | Posible efecto fotoprotector y estabilizador de la matriz bituminosa | Contribuye a mitigar el envejecimiento acelerado en zonas de alta radiación  |
| Amplitud térmica diaria     | Calentamiento diurno y enfriamiento nocturno               | Contracción, expansión y aumento de esfuerzos térmicos                          | Mejora potencial de estabilidad térmica y comportamiento reológico   | Favorece ligantes más resistentes a fisuración térmica                       |
| Estructura nanométrica      | Alta área superficial específica                           | Mayor interacción con componentes del asfalto                                   | Refuerzo físico-químico y modificación de viscosidad                 | Permite diseñar ligantes con propiedades adaptadas al ambiente local         |
| Dispersión del nanomaterial | Homogeneidad dentro del ligante                            | Evita aglomeraciones y zonas débiles                                            | Mejora la efectividad del ZnO como modificador                       | Requiere protocolos de mezclado adecuados para aplicación práctica           |
| Durabilidad vial            | Exposición prolongada a radiación, oxígeno y temperatura   | Reducción de vida útil y aumento de mantenimiento                               | Retardo del envejecimiento y conservación de propiedades físicas     | Puede disminuir intervenciones de conservación en carreteras de alta montaña |
| Sostenibilidad              | Necesidad de reducir mantenimiento y consumo de materiales | Mayor demanda de recursos si el pavimento envejece prematuramente               | Incremento potencial de vida útil del pavimento                      | Aporta a infraestructura vial más durable y eficiente                        |

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Tabla 2, el interés por el ZnO no se limita a su condición de nanopartícula, sino a su correspondencia funcional con el problema específico que se busca abordar. El envejecimiento fotooxidativo es provocado en gran medida por la interacción entre radiación UV y matriz bituminosa; por tanto, un material con propiedades de absorción UV resulta científicamente coherente como modificador. Esta relación causa-solución fortalece la pertinencia del presente artículo, ya que conecta la naturaleza del deterioro con una alternativa tecnológica específica.

Desde una perspectiva doctoral, el aporte central de este análisis radica en comprender que el ZnO no debe ser estudiado únicamente como aditivo, sino como componente funcional dentro de un sistema asfáltico diseñado para condiciones ambientales extremas. Su evaluación requiere articular química de materiales, reología, física de la radiación, ingeniería vial y análisis territorial. Esta integración es especialmente necesaria en el altiplano boliviano, donde el envejecimiento del ligante no responde únicamente al tránsito o a la temperatura, sino a una combinación agresiva de radiación solar, altitud, oxígeno, amplitud térmica y tiempo de exposición.

En consecuencia, el uso de nanopartículas de ZnO en ligantes asfálticos representa una línea de investigación pertinente para mejorar la durabilidad de pavimentos en regiones de alta montaña. Su potencial fotoprotector, combinado con su posible influencia en la estabilidad térmica y reológica del ligante, permite proyectarlo como una alternativa tecnológica para mitigar el envejecimiento fotooxidativo. No obstante, su aplicación debe ser evaluada experimentalmente bajo condiciones controladas y contextualizadas, considerando dosificación, dispersión, compatibilidad, propiedades físicas, comportamiento reológico y exposición UV. Solo de esta manera será posible determinar si el nano-ZnO constituye una solución viable para prolongar la vida útil de los pavimentos asfálticos en el altiplano boliviano.

## Conclusiones

El envejecimiento fotooxidativo del ligante asfáltico constituye un fenómeno crítico para la durabilidad de los pavimentos flexibles, debido a que integra transformaciones químicas, físicas y reológicas que modifican progresivamente la estructura interna del material. A partir del análisis desarrollado, se concluye que la degradación del asfalto no

debe entenderse únicamente como un endurecimiento superficial, sino como un proceso multiescalar que afecta la composición molecular del ligante, incrementa su rigidez, reduce su ductilidad y disminuye su capacidad de disipar tensiones inducidas por el tránsito y las variaciones térmicas.

La radiación ultravioleta representa un agente ambiental determinante en la degradación de los materiales bituminosos, especialmente en condiciones de exposición solar intensa. Su acción favorece la generación de radicales libres, acelera procesos de oxidación y promueve la formación de compuestos más polares dentro de la matriz asfáltica. En consecuencia, la radiación UV no debe ser considerada un factor secundario del envejecimiento, sino una variable central para explicar el deterioro prematuro de pavimentos ubicados en regiones de alta radiación solar.

El análisis teórico permite establecer que la degradación inducida por radiación UV se manifiesta principalmente en la superficie del pavimento, generando un gradiente de envejecimiento entre la zona expuesta y las capas internas del material. Esta condición favorece la formación de una capa superficial más rígida y frágil, susceptible a microfisuración, pérdida de flexibilidad y propagación progresiva de fallas. Por ello, el estudio del envejecimiento fotooxidativo exige integrar ensayos físicos, reológicos y químicos que permitan comprender no solo el efecto visible del deterioro, sino también sus mecanismos internos.

La nanotecnología aplicada a pavimentos asfálticos constituye una alternativa relevante para mejorar el desempeño de los ligantes frente a condiciones ambientales severas. Los nanomateriales presentan elevada área superficial, capacidad de interacción con la matriz bituminosa y potencial para modificar propiedades como viscosidad, estabilidad térmica, resistencia al envejecimiento y comportamiento reológico. Sin embargo, su aplicación no debe asumirse como una solución automática, ya que su efectividad depende de factores como dispersión, compatibilidad, dosificación, estabilidad de almacenamiento, costo y viabilidad constructiva.

El óxido de zinc (ZnO) se posiciona como un nanomaterial de especial interés para la modificación de ligantes asfálticos expuestos a radiación ultravioleta, debido a sus propiedades fotoprotectoras y su capacidad de interacción con la radiación UV. A diferencia de otros nanomateriales cuyo aporte se orienta principalmente al refuerzo mecánico, el ZnO presenta una correspondencia funcional directa con el problema analizado, ya que podría

contribuir a reducir la energía disponible para inducir reacciones fotooxidativas en la matriz bituminosa.

Las condiciones ambientales del altiplano boliviano intensifican la relevancia del problema de investigación, debido a la combinación de gran altitud, elevada radiación solar, amplitud térmica diaria y bajas temperaturas nocturnas. Estas condiciones generan un ambiente altamente agresivo para los pavimentos asfálticos, donde el envejecimiento fotooxidativo puede acelerarse y reducir la vida útil del ligante. En este contexto, la evaluación de ligantes modificados con nano-ZnO adquiere pertinencia territorial, tecnológica y científica.

Desde una perspectiva de ingeniería vial, el uso de nanopartículas de ZnO podría contribuir al diseño de pavimentos más durables y adaptados a condiciones extremas, siempre que se demuestre experimentalmente su influencia sobre propiedades como penetración, viscosidad, punto de ablandamiento, estabilidad térmica y resistencia al envejecimiento inducido por radiación UV. Por tanto, el presente artículo no plantea resultados experimentales concluyentes, sino una base teórica sólida que justifica la necesidad de desarrollar estudios de laboratorio orientados a validar el comportamiento del ligante modificado.

El análisis realizado evidencia que la problemática del envejecimiento fotooxidativo requiere un enfoque interdisciplinario que articule la ingeniería de pavimentos, la química de materiales, la reología, la nanotecnología y la física de la radiación. Esta integración permite comprender que el deterioro del asfalto no depende de una única variable, sino de la interacción entre composición del ligante, exposición ambiental, condiciones térmicas, radiación UV y posibles estrategias de modificación.

Finalmente, se concluye que la incorporación de nanopartículas de ZnO en ligantes asfálticos representa una línea de investigación prometedora para mejorar la durabilidad de pavimentos en regiones de alta montaña como el altiplano boliviano. No obstante, su aplicación práctica requiere estudios experimentales controlados que permitan determinar dosificaciones óptimas, mecanismos de dispersión, compatibilidad con el ligante base y comportamiento antes y después de la exposición a radiación ultravioleta. De esta manera, la investigación futura podrá contribuir al desarrollo de materiales asfálticos más resistentes, sostenibles y adecuados a las condiciones ambientales específicas de Bolivia.



## Referencias

- Avila Robayo, K. Y. H. (2022). *Uso de partículas ultrafinas sintetizadas con Bone Char como adsorbente de Cr(VI) y su disposición como modificador de asfaltos*. <https://hdl.handle.net/1992/63587>
- Bandeira, T. L. T., Barcelos, L. de Q., Gomes, P., & Fagan, S. B. (2026). O emprego da nanotecnologia no asfalto - pavimentação sustentável: Uma breve revisão. *Disciplinarum Scientia | Naturais e Tecnológicas*, 27(1), 101–119. <https://doi.org/10.37779/nt.v27i1.5563>
- Calandra, P., Loise, V., Porto, M., Oliviero Rossi, C., Lombardo, D., & Caputo, P. (2020). Exploiting nanoparticles to improve the properties of bitumens and asphalts: At what extent is it really worth it? *Applied Sciences*, 10(15), 5230. <https://doi.org/10.3390/app10155230>
- Chiman, A., Chiman, L., Spitsina, N., & Lobach, A. (2011). *Efecto de fullereno modificado C60-4BA sobre propiedades del asfalto PG 58-22*.
- Cortés, C., Cadenas, J., Pérez, A., Costa, A., Santiago, J., Irusta-Mata, R., Feroso, J., Esquena, J., Vilchez, A., & Potti, J. (2011). *Aplicación de nanomateriales activos en el aglomerado asfáltico para la reducción de gases de combustión*. <https://doi.org/10.13140/2.1.2577.7928>
- Duarte, D. (2013). *Efecto de la adición de nanosílice en cementos y concretos*. [https://www.researchgate.net/publication/312377045\\_Efecto\\_de\\_la\\_adicion\\_de\\_nanosilice\\_en\\_cementos\\_y\\_concretos](https://www.researchgate.net/publication/312377045_Efecto_de_la_adicion_de_nanosilice_en_cementos_y_concretos)
- Fang, C., Yu, R., Liu, S., & Li, Y. (2013). Nanomaterials applied in asphalt modification: A review. *Journal of Materials Science & Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2013.04.008>
- Filho, M., & Tavares, P. G. (2017). *Avaliação reológica de ligantes asfálticos modificados com nanopartículas de dióxido de titânio*. Universidade Federal de Campina Grande. <https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/374>
- González, G. (2021). *Estudio de la adsorción de asfaltenos y de sus subfracciones A1 y A2 sobre nanopartículas de SiO<sub>2</sub> mediante técnicas metalopetrolómicas* [Tesis doctoral, Université de Pau et des Pays de l'Adour; Universidad Central de Venezuela]. <https://doi.org/10.70675/c5bb9a99z9831z4eedz87d4zfae207556d18>
- Huang, H., Wang, Y., Wu, X., Zhang, J., & Huang, X. (2024). Nanomaterials for modified asphalt and their effects on viscosity characteristics: A comprehensive review. *Nanomaterials*, 14(18), 1503. <https://doi.org/10.3390/nano14181503>
- López Ramírez, S. P. (2014). *Caracterización de asfaltos colombianos sometidos a procesos de envejecimiento en RTFOT y UV entre las 100 y 200 horas*.
- Rodríguez-Alfaro, L. F., Luévano-Hipólito, E., & Torres-Martínez, L. M. (2024). Nanopartículas de TiO<sub>2</sub> fotocatalíticas incorporadas en materiales de construcción.

D. M. Arias Díaz // Evaluación del efecto de la radiación ultravioleta en el envejecimiento...271-304

¡Construyamos edificios inteligentes! *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 17(32).  
<https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2024.32.69737>

Rojas, J., Amado, H., Fernández, W., & Reyes, F. (2013). Efectos de la radiación ultravioleta en asfaltos colombianos. *Revista Científica*, 1(15), 96.  
<https://doi.org/10.14483/23448350.3947>

Soares, L. R. R. (2018). *Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologias e Recursos Naturais, Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, área de concentração: Geotecnia*.

Wang, R., Xiong, Y., Yue, M., Hao, M., & Yue, J. (2020). Investigating the effectiveness of carbon nanomaterials on asphalt binders from hot storage stability, thermodynamics, and mechanism perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 276, 124180.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124180>

Wolfart, J., Staub de Melo, J. V., Manfro, A. L., Barra, B. S., & Barbosa, R. C. (2025). Effects of the combined incorporation of ZnO and TiO<sub>2</sub> nanoparticles on the mechanical, rheological, thermal, and healing properties of a dense polymeric asphalt mixture. *Nanomaterials*, 15(23), 1779. <https://doi.org/10.3390/nano15231779>

Yang, J., & Tighe, S. (2013). A review of advances of nanotechnology in asphalt mixtures. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 96, 1269–1276.  
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.144>

## Conflicto de interés

El autor de este manuscrito declara no tener ningún conflicto de interés.

## Declaración ética

El autor declara que el proceso de investigación que dio lugar al presente manuscrito se desarrolló siguiendo criterios éticos, por lo que fueron empleadas en forma racional y profesional las herramientas tecnológicas asociadas a la generación del conocimiento.

## Copyright

La **Revista Latinoamericana de Difusión Científica** declara que reconoce los derechos de los autores de los trabajos originales que en ella se publican; dichos trabajos son propiedad intelectual de sus autores. Los autores preservan sus derechos de autoría y comparten sin propósitos comerciales, según la licencia adoptada por la revista.

## Licencia CreativeCommons

Esta obra está bajo una Licencia CreativeCommons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

