



Análisis teórico de la vulnerabilidad y mitigación de pavimentos flexibles frente al cambio climático en Panamá

Theoretical analysis of the vulnerability and mitigation of flexible pavements in the face of climate change in Panama

Gabriel J. Montúfar Ch. 

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil

*Autor de correspondencia: gabriel.montufar@up.ac.pa

RESUMEN. El cambio climático representa un desafío significativo para la infraestructura vial en Panamá, particularmente para los pavimentos flexibles expuestos a factores climáticos predominantes como el incremento de las temperaturas y la intensificación de las precipitaciones. Dichos factores pueden acelerar el deterioro y afectar el rendimiento estructural de las vías. Este estudio tiene como objetivo evaluar la vulnerabilidad de los pavimentos flexibles ante estas condiciones y proponer estrategias de mitigación con aplicabilidad real en diferentes regiones del país. Para ello, se llevó a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva en bases de datos académicas y gubernamentales, complementada con un análisis teórico basado en modelos de viscoelasticidad y fatiga térmica. A partir de la evaluación de estudios previos y datos empíricos disponibles, se identificó que el uso de mezclas asfálticas modificadas con polímeros y la implementación de sistemas de drenaje avanzados son medidas efectivas para mejorar la resiliencia de los pavimentos. Se concluye que la aplicación de estas estrategias permite enfrentar de forma más robusta los efectos del cambio climático, siempre que se adopten de manera personalizada según las características climáticas y geográficas de cada región de Panamá. Asimismo, se recomienda profundizar en estudios de campo que validen y ajusten los modelos teóricos, de modo que las soluciones propuestas puedan integrarse de manera sostenible en la planificación y diseño de la infraestructura vial nacional.

Palabras clave. *Cambio climático, infraestructura vial, mitigación, pavimentos flexibles, vulnerabilidad.*

ABSTRACT. Climate change represents a significant challenge for road infrastructure in Panama, particularly for flexible pavements exposed to prevailing climatic factors such as rising temperatures and intensified rainfall. These factors can accelerate deterioration and affect the structural performance of roads. This study aims to assess the vulnerability of flexible pavements to these conditions and propose mitigation strategies with real applicability in different regions of the country. To this end, an exhaustive bibliographic review was carried out in academic and government databases, complemented by a theoretical analysis based on viscoelasticity and thermal fatigue models. Based on the evaluation of previous studies and available empirical data, it was identified that the use of polymer-modified asphalt mixtures and the implementation of advanced drainage systems are effective measures to improve pavement resilience. It is concluded that the application of these strategies allows to more robustly face the effects of climate change, provided that they are adopted in a personalized manner according to the climatic and geographic characteristics of each region of Panama. It is also recommended to conduct further field studies to validate and adjust theoretical models, so that the proposed solutions can be sustainably integrated into the planning and design of national road infrastructure.

Keywords. *Climate change, road infrastructure, mitigation, flexible pavements, vulnerability.*

1. Introducción

El cambio climático representa uno de los mayores desafíos globales del siglo XXI, afectando significativamente diversas infraestructuras, incluyendo

los pavimentos flexibles. En Panamá, un país caracterizado por su clima tropical y variabilidad climática, los pavimentos flexibles están particularmente expuestos a los efectos adversos del cambio climático,

Citación: G. Montúfar, "Análisis teórico de la vulnerabilidad y mitigación de pavimentos flexibles frente al cambio climático en Panamá", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 21, no. 2, pp. (0), 2025.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 19 de agosto de 2024. **Recibido con correcciones:** 21 de agosto de 2024. **Aceptado:** 2 de abril de 2025.

DOI.

Copyright: 2025 G. Montúfar. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

como el incremento en la frecuencia e intensidad de las lluvias, que contribuyen al deterioro acelerado de las vías [1], [2]. La vulnerabilidad al cambio climático en Panamá no es homogénea; regiones como Bocas del Toro y Darién presentan una mayor susceptibilidad debido a la combinación de factores como el aumento del nivel del mar y la alta frecuencia de inundaciones, lo que requiere un análisis detallado y personalizado de las estrategias de mitigación [4], [9].

Diversos estudios han explorado la vulnerabilidad de los pavimentos flexibles frente al cambio climático, centrándose en cómo factores como las temperaturas extremas, las precipitaciones y las inundaciones impactan su desempeño y durabilidad [5], [6]. Además, la desigualdad socioeconómica en el país agrava estos efectos, ya que las áreas con menor capacidad adaptativa, como las comarcas indígenas y las zonas rurales, enfrentan mayores desafíos para mantener y adaptar su infraestructura vial. Por ejemplo, investigaciones recientes han demostrado que el aumento de las temperaturas y la mayor frecuencia de eventos de precipitación pueden reducir significativamente la vida útil de los pavimentos flexibles [3], [7]. Adicionalmente, se han desarrollado estrategias de mitigación, como el uso de materiales alternativos y el diseño de pavimentos más resistentes, para enfrentar estos desafíos [8], [10], [11].

El objetivo principal de este artículo es evaluar la vulnerabilidad de los pavimentos flexibles en Panamá ante el cambio climático y proponer estrategias de mitigación que permitan prolongar su vida útil y mejorar su rendimiento bajo condiciones climáticas adversas. Este trabajo es relevante porque aborda una problemática crítica en la infraestructura vial del país, y contribuye al estado del arte al presentar soluciones específicas adaptadas al contexto panameño [12].

El artículo se organiza de la siguiente manera: en primer lugar, se presenta la metodología empleada para evaluar la vulnerabilidad de los pavimentos flexibles. Luego, se discuten los resultados obtenidos, seguidos de un análisis comparativo con estudios previos. Finalmente, se proponen estrategias de mitigación basadas en los hallazgos, concluyendo con una discusión sobre la relevancia de estas medidas en el contexto de la infraestructura vial de Panamá. En este contexto, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿De qué manera la implementación de medidas de

mitigación específicas, tales como la modificación de mezclas asfálticas con polímeros y la optimización de sistemas de drenaje, puede reducir la vulnerabilidad de los pavimentos flexibles en Panamá frente a los efectos del cambio climático?

Hipótesis de Investigación: La implementación de medidas de mitigación específicas, tales como la modificación de mezclas asfálticas mediante la incorporación de polímeros y la optimización de sistemas de drenaje, reduce significativamente la vulnerabilidad de los pavimentos flexibles en Panamá frente a los efectos adversos del cambio climático. Se espera que esta intervención se traduzca en una disminución en la tasa de deterioro estructural y en la prolongación de la vida útil de la infraestructura vial, contribuyendo así a una mayor resiliencia y sostenibilidad en el contexto de condiciones climáticas extremas.

2. Materiales y Métodos

La presente investigación se fundamenta en un enfoque metodológico que combina la revisión exhaustiva de literatura relevante con un análisis teórico detallado de los fenómenos involucrados, buscando proporcionar una base sólida para la comprensión y mitigación de los impactos del cambio climático en los pavimentos flexibles en Panamá [13], [14].

Para la revisión bibliográfica, se llevó a cabo una búsqueda sistemática en varias bases de datos académicas y repositorios institucionales, entre ellos Scopus, Web of Science, Google Scholar y fuentes gubernamentales (por ejemplo, ministerios y organismos públicos de Panamá). La selección de estas bases se fundamentó en su amplia cobertura de artículos científicos indexados, informes técnicos y documentos especializados en el área de la ingeniería de pavimentos y el cambio climático, utilizando palabras clave como "pavimentos flexibles", "cambio climático", "vulnerabilidad", "mitigación" y "Panamá". La selección de la literatura se basó en criterios predefinidos que incluían la relevancia geográfica (climas tropicales y subtropicales), la actualidad de los estudios (preferentemente publicaciones de la última década), y la aplicabilidad de los hallazgos al contexto panameño [15].

Como criterios de inclusión, se establecieron los siguientes:

-Relevancia geográfica y/o climática: investigaciones centradas en regiones tropicales o subtropicales, con énfasis en entornos similares al de Panamá.

-Aplicabilidad al contexto local: estudios cuyos hallazgos, metodologías o conclusiones pudieran extrapolarse o adaptarse a las condiciones socioeconómicas y ambientales de Panamá.

-Calidad metodológica: artículos o informes con revisión por pares o respaldo institucional, que incluyeran un enfoque claro de recolección y análisis de datos.

En cuanto a los criterios de exclusión, se descartaron:

-Publicaciones duplicadas: referencias que aparecían en más de una base de datos fueron consolidadas para evitar redundancias.

-Falta de enfoque aplicable: documentos cuyo alcance no se relacionaba directamente con la vulnerabilidad o la mitigación de pavimentos frente al cambio climático.

-Insuficiente rigor científico o metodológico: estudios que no describieran adecuadamente su metodología o que no presentaran resultados validados (sea de manera empírica o teórica).

Se analizó críticamente la literatura seleccionada, identificando no solo los hallazgos clave, sino también las tendencias emergentes y los vacíos de conocimiento que podrían ser explorados en futuras investigaciones como se muestra en la tabla 1. Se utilizaron tablas resumen para sintetizar los estudios más relevantes y sus aportes al campo.

Tabla 1. Resumen de estudios revisados y hallazgos relevantes [3], [21], [25], [36]

Estudio / Referencia	Objetivo y Enfoque	Hallazgos Clave	Implicaciones para la Mitigación
Ministerio de Ambiente de Panamá (2023) *Primer Informe Diagnóstico del Sistema de Monitoreo y Evaluación de la Adaptación	Evaluar el impacto del cambio climático en la infraestructura vial panameña.	Identifica la vulnerabilidad de los pavimentos ante condiciones de alta temperatura y lluvias intensas.	Resalta la necesidad de adaptar estrategias de mantenimiento y diseño en contextos climáticos similares.

n al Cambio Climático en Panamá			
Qiao et al. (2020) Pavimentos Flexibles y Cambio Climático : Una Revisión Exhaustiva e Implicaciones	Analizar teóricamente el comportamiento de pavimentos flexibles frente a variaciones climáticas.	Se demuestra la idoneidad de los modelos de viscoelasticidad para predecir el deterioro de los pavimentos.	Sustenta la elección de modelos teóricos empleados en el presente estudio.
Enríquez-Salamanc a (2019) Impactos ambientales de la adaptación n al cambio climático de los pavimentos de carreteras y opciones de mitigación	Investigar alternativas de mitigación para la adaptación de pavimentos ante el cambio climático.	Se evidenció que la incorporación de polímeros y el uso de sistemas de drenaje avanzados mejoran la resiliencia del pavimento.	Apoya la propuesta de estrategias de mitigación específicas para contextos de alta variabilidad climática.
Stoner et al. (2019) Cuantificando el impacto del cambio climático en el	Combinar enfoques teóricos y empíricos para evaluar el rendimiento de pavimentos	Se validaron los modelos viscoelásticos y de fatiga térmica, mostrando	Refuerza la robustez del enfoque metodológico y su posible extrapolación a contextos

rendimiento y la vida útil de los pavimentos flexibles en los Estados Unidos	en condiciones extremas.	correlación entre predicciones y datos experimentales.	tropicales, como el de Panamá.
Saha et al. (2014) Evaluación de los efectos de las condiciones climáticas canadienses en las predicciones del MEPDG para el rendimiento de pavimentos flexibles	Evaluar la aplicabilidad del modelo MEPDG en diferentes condiciones climáticas.	Se enfatiza la importancia de calibrar y ajustar los modelos teóricos a las condiciones locales para obtener predicciones precisas.	Destaca la necesidad de validación y ajuste empírico en estudios futuros, complementando el análisis teórico.

El análisis teórico se llevó a cabo utilizando modelos establecidos en la ingeniería de pavimentos, como los principios de viscoelasticidad y fatiga térmica. Estos modelos permitieron evaluar cómo variables climáticas clave —como la temperatura, la precipitación, la humedad y los ciclos térmicos— afectan propiedades fundamentales del pavimento, incluyendo su resistencia estructural, durabilidad y vida útil. La elección de estos modelos se justificó por su capacidad para simular de manera precisa el comportamiento de los pavimentos bajo condiciones extremas, y por su amplia aceptación en la literatura especializada como se muestra en la tabla 2.

Aunque el presente estudio no incluye un análisis cuantitativo de sensibilidad debido a su naturaleza de revisión teórica, la literatura destaca la importancia de evaluar la robustez de los modelos teóricos (por ejemplo, de viscoelasticidad y fatiga térmica) mediante análisis de

sensibilidad. Estos análisis permiten determinar la influencia de parámetros críticos—como la temperatura, la intensidad de las precipitaciones y las propiedades mecánicas del asfalto—sobre el comportamiento del pavimento. En este sentido, se recomienda que investigaciones futuras integren análisis de sensibilidad para identificar los rangos en los que los modelos mantienen su capacidad predictiva, lo cual contribuirá a optimizar las estrategias de mitigación adaptadas a las condiciones específicas de Panamá.

Tabla 2. Comparación de modelos teóricos para la evaluación de pavimentos flexibles

Modelo/Enfoque	Aplicación Principal	Ventajas	Limitaciones	Referencias
Viscoelasticidad clásica	Análisis del comportamiento a largo plazo de mezclas asfálticas	Representa el carácter dependiente del tiempo - Aplicable a distintos materiales de pavimento	Requiere caracterización compleja de los materiales - Puede influir la variabilidad del material en pavimentos	[21], [24]
Fatiga térmica (e.g. modelos tipo Arrhenius)	Evaluación de grietas y microfisuras por ciclos de temperatura	Integra experimentalmente el comportamiento mecánico y térmico de las mezclas asfálticas	Necesita calibración empírica con datos locales - No capta efectos de carga en tráfico	[25], [27], [36]

Modelos elastoplásticos	Análisis de deformación plástica en mezclas asfálticas	Descripción más detallada del comportamiento plástico - Permite análisis bajo distintas condiciones climáticas	Elevada complejidad computacional - Falta de calibración externa para materiales locales	[23], [40]
Mecánica de fractura lineal-elástica (LEFM)	Propagación de grietas en mezclas asfálticas	Base teórica sólida en fractura - Permite predecir la propagación de grietas	No considera la viscoelasticidad del asfalto - Menor aplicabilidad en mezclas modificadas	[27]
M-E PDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design)	Diseño y desempeño a largo plazo de pavimentos flexibles	Considera efectos combinados de tráfico y medio ambiente - Metodología basada en ensayos y modelos empíricos	Dependencia de calibraciones empíricas - Requiere bases de datos extensas para validación	[22], [38]

Adicionalmente, se analizó el impacto teórico de diversas estrategias de mitigación, tales como la incorporación de polímeros en mezclas asfálticas y el uso de tecnologías de drenaje avanzadas. Los resultados de estos análisis se presentaron en gráficos comparativos que ilustran la efectividad potencial de cada estrategia.

Los resultados del análisis teórico se compararon con estudios previos relevantes para identificar tanto coincidencias como divergencias. Se utilizó un enfoque de análisis comparativo, destacando cómo los hallazgos de esta investigación se alinean o difieren de estudios realizados en otros contextos climáticos similares. Este análisis permitió identificar áreas donde los resultados teóricos aportan nuevas perspectivas o refuerzan las conclusiones existentes. También se discutieron las implicaciones prácticas de estos hallazgos, subrayando la necesidad de adaptar las estrategias de diseño y mantenimiento de pavimentos en Panamá en respuesta a los cambios climáticos proyectados.

En el presente trabajo se han incorporado parámetros de calibración y validación provenientes de investigaciones realizadas en entornos con características climáticas similares a las de Panamá. Si bien la validación experimental directa en el contexto panameño es aún limitada, la aplicabilidad de los modelos ha sido respaldada mediante estudios comparativos en regiones con condiciones de alta temperatura y precipitación, donde se ha demostrado la capacidad de estos enfoques para predecir la vida útil y la vulnerabilidad de los pavimentos.

A pesar del enfoque exhaustivo, es importante reconocer las limitaciones inherentes a un estudio de naturaleza teórica. Las predicciones basadas en modelos teóricos, aunque valiosas, deben ser validadas mediante estudios empíricos en condiciones reales. La investigación futura deberá enfocarse en la implementación práctica de las estrategias de mitigación propuestas y en la recolección de datos empíricos que permitan refinar los modelos teóricos aquí utilizados.

3. Resultados y discusión

En un análisis teórico de la vulnerabilidad de los pavimentos flexibles frente al cambio climático, es posible prever ciertos comportamientos y desafíos basados en la literatura existente y en los modelos teóricos establecidos [16], [17]. La figura 1 ilustra la interacción entre el ciclo de vida del pavimento (desde el diseño hasta el final de su vida útil) y el cambio climático, con un enfoque en estrategias tanto de mitigación como de adaptación.

Diversos estudios han documentado cómo el cambio climático afecta la durabilidad de los pavimentos flexibles y rígidos. Por ejemplo, el estudio de titulado "El efecto del cambio climático en los pavimentos carreteros" muestra que los estresores climáticos, exacerbados por el calentamiento global, aceleran el

deterioro de los materiales y la estructura del pavimento [33]. Asimismo, la investigación "Influencia del clima en los métodos de diseño de pavimentos flexibles", analiza cómo las condiciones climáticas influyen en la resistencia y capacidad de carga de los pavimentos, destacando la necesidad de adaptar los métodos de diseño a las variaciones climáticas [37].

Además, se han documentado casos de adaptación en diversas regiones. En Ontinyent, España, tras la DANA de 2019, se implementaron medidas como la compra de viviendas dañadas y la renaturalización del entorno, con una inversión de 7 millones de euros para la recuperación del río Clariano (García et al., 2021). En la Región Huatar Caribe de Costa Rica, se han priorizado estrategias para desarrollar infraestructura vial resiliente al clima (Méndez y López, 2022), mientras que en Tafalla, España, se han sustituido especies arbóreas en plazas públicas para mitigar el efecto de isla de calor urbano (Fernández, 2023).

Figura 1. Interacción entre el pavimento y el cambio climático.

Fuente: Qiao & Dawson et al, 2020.

3.1 Comportamiento de los pavimentos flexibles bajo cambios climáticos

Para comprender mejor cómo los pavimentos flexibles y rígidos responden de manera diferente a los cambios climáticos, es útil comparar los indicadores de deterioro típicos de cada tipo de pavimento, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Indicadores clave del pavimento a monitorear para impactos del cambio climático [22]

Indicador de Deterioro	Pavimento Asfáltico	Pavimento de Concreto	Diferencia porcentual de degradación (%)
Ahuellamiento superficial	Alto (5-10 mm/año)	Bajo (1-3 mm/año)	67-80% más en pavimentos asfálticos
Grietas por bajas temperaturas	Moderado	Alto	30-50% más en pavimentos de concreto
Grietas en bloque	Alto	Bajo	60-75% más en pavimentos asfálticos

Desprendimiento de material	Alto	Moderado	40-50% más en pavimentos asfálticos
Grietas por fatiga y baches	Alto	Bajo	70-85% más en pavimentos asfálticos
Degradación por ciclos de lluvia	Alto	Moderado	50-65% más en pavimentos asfálticos
Fallas estructurales por sobrecarga	Alto	Bajo	60-75% más en pavimentos asfálticos
Efecto del calor extremo	Crítico (> 60°C)	Moderado (< 40°C)	70-90% más en pavimentos asfálticos
Resistencia a la saturación de agua	Baja	Alta	75-90% más en pavimentos de concreto

Los modelos teóricos indican que los pavimentos flexibles en climas tropicales, como el de Panamá, están expuestos a un mayor riesgo de deterioro debido al incremento en la temperatura y a las precipitaciones intensas [21], [22]. Según la teoría de viscoelasticidad, el material asfáltico se vuelve más susceptible al flujo plástico y a la deformación permanente cuando se expone a temperaturas elevadas.

El efecto del cambio climático también puede amplificar la frecuencia de los ciclos de temperatura y humedad, lo que incrementa la fatiga del material asfáltico y acelera la aparición de grietas [24], [27]. Esta fatiga y fisuración han sido teóricamente vinculadas a fallas prematuras en pavimentos, particularmente en zonas con alta variabilidad climática [23]. La figura 2 es un diagrama que ilustra las interacciones entre el cambio climático, el rendimiento del pavimento, las decisiones de mantenimiento y los costos asociados. Los componentes clave del diagrama son:

- Entrada (a, b): El diagrama comienza con los inputs, que son cambio climático (letra 'a') y demanda de tráfico (letra 'b'). Estos factores externos impactan directamente el sistema de pavimento.

- Sistema de pavimento (c): El sistema de pavimento, donde el rendimiento del pavimento (letra 'c') es afectado tanto por el clima como por la demanda de tráfico.
- Toma de decisiones para mantenimiento (d): Las decisiones de mantenimiento (letra 'd') se basan en el rendimiento del pavimento y a su vez, influyen dicho rendimiento (letra 'e').
- Costos de usuario e impactos ambientales (f, h): Los costos para los usuarios y los impactos ambientales (letra 'f') son influenciados por el rendimiento del pavimento y la demanda de tráfico (letra 'h').
- Costos de agencia e impactos ambientales (g, j): Los costos para las agencias y los impactos ambientales (letra 'g') también son afectados por las decisiones de mantenimiento (letra 'j').
- Salidas (l, m, n): Finalmente, los outputs del sistema incluyen la deterioración adicional o reducida (letra 'l'), cambios en el plan de mantenimiento (letra 'm'), y costos e impactos ambientales adicionales o reducidos (letra 'n').

Figura 2. Interacciones: clima, rendimiento, mantenimiento y costos.

Fuente: Qiao & Dawson et al, 2020.

La vulnerabilidad de los pavimentos flexibles al cambio climático en Panamá varía significativamente según la región, debido a la diversidad geográfica y climática del país. Para comprender mejor esta variabilidad y sus implicaciones en el diseño y mantenimiento de pavimentos, es crucial examinar el mapa de vulnerabilidad climática del país de la figura 3.

Figura 3. Mapa de vulnerabilidad al cambio climático.

Fuente: Guía técnica de cambio climático para proyectos de infraestructura de inversión pública, 2022.

Escala de Colores para la figura 3:

El mapa utiliza una gradación de colores que va desde tonos claros de rosado hasta tonos oscuros de rojo para indicar los niveles de vulnerabilidad climática:

-Rosado claro: Baja vulnerabilidad

-Rosado medio: Vulnerabilidad moderada

-Rojo claro: Alta vulnerabilidad

-Rojo oscuro: Muy alta vulnerabilidad

Criterios de Clasificación:

La vulnerabilidad climática se ha evaluado considerando los siguientes factores:

-Exposición: Grado en que una región está expuesta a peligros climáticos, como inundaciones, sequías o tormentas.

-Sensibilidad: Capacidad del entorno natural y humano para soportar los efectos adversos del cambio climático.
Capacidad de adaptación: Habilidad de la comunidad o ecosistema para ajustarse a los cambios climáticos y mitigar posibles daños.

Cada factor se ha calificado en una escala del 1 al 5, donde 1 representa una baja incidencia y 5 una alta incidencia. La combinación de estas calificaciones determina el nivel de vulnerabilidad asignado a cada área.

3.1.1 Resiliencia de los pavimentos a las altas temperaturas

Los estudios recientes han destacado cómo el aumento de las temperaturas afecta la resistencia estructural de los pavimentos flexibles [25], [26]. Los pavimentos sometidos a condiciones de calor extremo muestran una mayor susceptibilidad al ahuellamiento y deformaciones permanentes, especialmente en regiones tropicales como Panamá [18]. Estos efectos se agravan con el tiempo debido al envejecimiento acelerado del asfalto bajo temperaturas altas y constantes [20]. En Panamá, zonas con altas temperaturas constantes como las áreas costeras del Pacífico, muestran una mayor susceptibilidad al ahuellamiento y deformaciones permanentes. Este efecto es más pronunciado en regiones con menores recursos para el mantenimiento vial, exacerbando las desigualdades existentes.

3.1.2 Efectos de las precipitaciones intensificadas

La frecuencia e intensidad de las lluvias también son factores críticos especialmente en regiones como el Caribe panameño, donde las inundaciones son comunes y se espera que aumenten debido al cambio climático [28], [30]. Las precipitaciones intensas incrementan el riesgo de saturación del pavimento, reduciendo su capacidad de carga y acelerando el deterioro por fatiga [31], [32]. Este es un aspecto particularmente relevante para Panamá, donde las lluvias intensas son comunes y se espera que aumenten debido al cambio climático. La saturación prolongada puede llevar a fallas estructurales tempranas, lo que subraya la necesidad de un diseño que incluya sistemas de drenaje eficientes y materiales resistentes a la humedad [19]. Según el Instituto de Meteorología e Hidrología de Panamá (IMHPA), la temporada de lluvias se inicia en mayo y dura hasta noviembre, siendo septiembre y octubre los meses más lluviosos. Durante este período, las precipitaciones son abundantes, de intensidad entre moderada a fuerte, y

suelen estar acompañadas de actividad eléctrica, especialmente en horas de la tarde [39].

Estadísticas del Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC) indican que la precipitación pluvial mensual en Panamá varía significativamente a lo largo del año, con picos durante los meses de septiembre y octubre. Estos datos reflejan la variabilidad y abundancia de las lluvias en el país [41].

3.1.3 Ciclos térmicos y fatiga del pavimento

Los ciclos de temperatura, donde el pavimento se expone a fluctuaciones diarias significativas entre temperaturas altas y bajas, inducen tensiones internas que resultan en fisuras [38]. Estos ciclos térmicos son especialmente perjudiciales en zonas donde la temperatura varía considerablemente entre el día y la noche, exacerbando el desgaste y la aparición de grietas en los pavimentos [34].

3.1.4 Consideraciones geotécnicas y de cimentación en el modelo teórico

Es importante destacar que la precisión y aplicabilidad de los modelos teóricos para evaluar la vulnerabilidad de los pavimentos flexibles podrían verse significativamente afectadas por factores geotécnicos. En este sentido, se recomienda ampliar el modelo actual incorporando dos aspectos fundamentales:

Variabilidad del material geológico: La heterogeneidad en la composición, estratigrafía y propiedades mecánicas del subsuelo influye de manera directa en la durabilidad y el rendimiento de las estructuras viales. En Panamá, donde las condiciones geológicas varían considerablemente entre regiones, incluir parámetros como la densidad, la capacidad portante y la composición mineralógica del material subyacente permitirá ajustar y calibrar con mayor precisión los modelos de viscoelasticidad y fatiga térmica. Esto, a su vez, posibilitará una predicción más realista del comportamiento estructural ante cargas y condiciones climáticas adversas [21], [24].

Sección de cimentación de las estructuras viales: Tradicionalmente, muchos estudios asumen condiciones homogéneas en la cimentación a lo largo del territorio, lo que podría derivar en una evaluación inexacta de la respuesta del pavimento a largo plazo. Es, por tanto, fundamental integrar en el modelo una representación detallada de la cimentación, considerando las variaciones locales en la rigidez y estabilidad del suelo. Esto permitirá identificar con mayor precisión las zonas de mayor vulnerabilidad y diseñar estrategias de mitigación

específicas (por ejemplo, refuerzos o técnicas de estabilización del subsuelo) que respondan a las particularidades geotécnicas de cada región [22], [40].

3.2 Impacto teórico de las estrategias de mitigación

El uso de materiales mejorados, como polímeros modificadores de asfalto, es una estrategia teóricamente respaldada para mitigar los efectos adversos del cambio climático en los pavimentos, especialmente en regiones con variabilidad climática alta [29]. En áreas vulnerables como las mencionadas, es crucial personalizar las estrategias de mitigación para abordar los desafíos específicos de cada región. Estos materiales pueden aumentar la resistencia del pavimento a la deformación y mejorar su durabilidad bajo condiciones climáticas adversas [35], [36].

Los modelos teóricos también sugieren que el diseño de pavimentos debe adaptarse para incorporar un mayor espesor de las capas de asfalto y la implementación de capas de base estabilizadas que puedan distribuir mejor las cargas y resistir la humedad [40].

3.2.1 Modificación del asfalto con polímeros

El uso de polímeros modificadores en mezclas asfálticas ha mostrado ser una estrategia efectiva para mejorar la resistencia a las deformaciones y prolongar la vida útil de los pavimentos bajo condiciones climáticas adversas. Los polímeros ayudan a mantener la flexibilidad del asfalto a temperaturas bajas y su rigidez a temperaturas altas, reduciendo así la probabilidad de ahuellamiento y agrietamiento [25]. En Panamá, esta tecnología es particularmente prometedora para zonas con fluctuaciones extremas de temperatura y humedad. La implementación de polímeros como modificadores del asfalto ha demostrado ser una estrategia eficaz para mejorar las propiedades de los pavimentos en climas tropicales, como el de Panamá. Diversos estudios respaldan su aplicabilidad y beneficios en estas condiciones climáticas.

Un estudio realizado en Panamá evaluó la modificación del cemento asfáltico AC-30 utilizando polímeros como Butonal NX 1129, Muestra A1 y Elvaloy. Los resultados indicaron mejoras significativas en las propiedades físicas y mecánicas del asfalto modificado, destacando un aumento en la recuperación elástica torsional, lo que sugiere un mejor desempeño en condiciones climáticas tropicales [45].

Además, una revisión sobre el uso de polímeros reciclados como modificadores de asfalto analizó sus características y beneficios. El estudio concluyó que la

incorporación de polímeros reciclados mejora el rendimiento y las propiedades mecánicas del pavimento en comparación con el aglutinante natural, lo que sugiere su eficacia en climas tropicales [46].

3.2.2 Diseño para condiciones climáticas extremas

Incorporar diseños de pavimentos que consideren los escenarios climáticos proyectados es esencial para mejorar la resiliencia de la infraestructura vial en Panamá. Es recomendable el uso de capas de asfalto más gruesas y bases estabilizadas como medidas para distribuir mejor las cargas y prevenir el deterioro prematuro en condiciones climáticas extremas en áreas costeras y zonas rurales con alta vulnerabilidad [36]. Además, la investigación sugiere que el refuerzo de las capas inferiores del pavimento puede reducir significativamente la propagación de grietas desde la base hacia la superficie.

3.2.3 Tecnologías de drenaje mejoradas

La gestión del agua es crucial para la durabilidad del pavimento. Las tecnologías avanzadas de drenaje y la incorporación de materiales permeables en la construcción de carreteras pueden reducir la acumulación de agua y la presión hidrostática que daña la estructura del pavimento [42], [43]. Estas soluciones no solo mitigan los efectos de las lluvias intensas, sino que también ayudan a prevenir la erosión de las capas inferiores del pavimento [44].

Para implementar efectivamente las estrategias de mitigación discutidas, es crucial adoptar un enfoque cíclico y adaptativo. La Figura 4 ilustra un proceso de cinco pasos para la adaptación al cambio climático en el contexto de la infraestructura vial, que puede aplicarse específicamente a los pavimentos flexibles en Panamá.

- **Comprender el contexto del sitio y el clima futuro:** Este paso inicial enfatiza la importancia de recopilar información. Implica comprender las características específicas del sitio o activo en cuestión y los posibles impactos del cambio climático que podría enfrentar en el futuro.
- **Evaluar el activo frente a escenarios de clima futuro:** Aquí, el enfoque se desplaza hacia la evaluación de la vulnerabilidad del activo. Esto probablemente implica el uso de modelos y proyecciones climáticas para comprender cómo podría funcionar el activo bajo diferentes escenarios climáticos futuros.
- **Desarrollar, evaluar y seleccionar medidas de adaptación:** Una vez que se identifican las vulnerabilidades, el siguiente paso es explorar

posibles soluciones. Esto implica generar ideas, evaluar y seleccionar las medidas de adaptación más apropiadas para mejorar la resiliencia del activo al cambio climático.

- **Revisar consideraciones adicionales:** Este paso destaca la importancia de considerar una gama más amplia de factores más allá de los impactos climáticos inmediatos. Esto podría incluir consideraciones sociales, económicas, ambientales y regulatorias.
- **Monitorear y revisar según sea necesario:** El paso final subraya la naturaleza continua del proceso de adaptación. Enfatiza la necesidad de un monitoreo y una evaluación continuos para garantizar la eficacia de las medidas implementadas y realizar ajustes según sea necesario en respuesta a las condiciones cambiantes o a nueva información.

Un estudio analizó el uso de pavimentos permeables como solución para el manejo de aguas pluviales en países como Panamá y México. Estos sistemas permiten la infiltración del agua a través del pavimento, reduciendo la acumulación superficial y mejorando la resistencia del pavimento al minimizar el efecto de las cargas dinámicas asociadas al agua superficial. Los resultados mostraron una disminución significativa en la incidencia de daños relacionados con el agua, evidenciando la eficacia de los pavimentos permeables en climas tropicales [47].

Aunque en un contexto diferente, la ciudad de Valencia ha implementado soluciones basadas en la naturaleza, como parques inundables y sistemas de drenaje urbano sostenible, para mitigar los efectos de lluvias intensas. Estas medidas han demostrado ser efectivas en la gestión de aguas pluviales, reduciendo la presión sobre los sistemas de drenaje tradicionales y mejorando la resiliencia de las infraestructuras urbanas [48].

Un estudio en Colombia destacó la importancia de diseñar sistemas de drenaje adecuados en zonas tropicales para preservar la integridad de las vías. La investigación enfatizó que un drenaje eficiente es crucial para evitar la saturación de las capas del pavimento, lo que a su vez previene deformaciones y fallas estructurales. La implementación de cunetas, alcantarillas y sistemas de drenaje subterráneo adecuados ha sido fundamental para mantener la funcionalidad y prolongar la vida útil de las carreteras en estas regiones [51].

Figura 4. Elementos clave de un proceso de estudio de adaptación.
Fuente: Saleh et al, 2022.

3.3 Discusión

Los resultados del análisis teórico destacan que el cambio climático impone desafíos significativos a la durabilidad y desempeño de los pavimentos flexibles en Panamá. La necesidad de adaptar los diseños actuales a las condiciones específicas de cada región del país es fundamental para reducir la vulnerabilidad de la infraestructura vial. El estado del arte sugiere que las estrategias tradicionales de diseño y mantenimiento de pavimentos pueden ser inadecuadas frente a las condiciones climáticas futuras, lo que subraya la necesidad de adaptar y mejorar las prácticas actuales.

La evaluación económica de las estrategias propuestas es esencial para determinar su viabilidad y el impacto en el mantenimiento a largo plazo. A continuación, se analizan dos de las principales estrategias desde una perspectiva de costo-beneficio:

La implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) en regiones tropicales puede requerir inversiones iniciales significativas. Sin embargo, estudios han demostrado que estos sistemas, al gestionar eficazmente las aguas pluviales, reducen la incidencia de inundaciones y, por ende, los costos asociados a daños en infraestructuras y propiedades. Por ejemplo, en un análisis de viabilidad económica realizado por Sanguino López (2019), se evidenció que la adopción de SUDS en zonas urbanas no solo mitiga riesgos ambientales, sino que también ofrece beneficios económicos a largo plazo al disminuir los gastos en mantenimiento y reparaciones [52].

La incorporación de polímeros en mezclas asfálticas ha mostrado mejoras en las propiedades mecánicas y en la durabilidad de los pavimentos. Según el estudio “Evaluación del ciclo de vida y análisis del costo del ciclo de vida de mezclas de asfalto modificado con polímeros” de Li, Huang y Wang (2019), la incorporación de polímeros en la estructura de pavimentos flexibles genera beneficios económicos a lo largo de su ciclo de vida. Aunque el uso de polímeros puede aumentar ligeramente el costo inicial del pavimento, este incremento se compensa con una mejora en la durabilidad y una mayor resistencia a la fatiga, lo que se traduce en una reducción de la frecuencia y de los costos asociados a las intervenciones de mantenimiento y rehabilitación. En otras palabras, los pavimentos modificados con polímeros logran una optimización de la relación costo-beneficio al disminuir los costos operativos acumulados durante su vida útil, lo que implica ahorros significativos

a largo plazo en comparación con pavimentos convencionales [53].

3.3.1 Adaptación de diseños actuales

Los estudios revisados sugieren que una adaptación efectiva de los diseños de pavimentos debe incluir la utilización de materiales más resilientes, como mezclas asfálticas modificadas con polímeros, y la implementación de sistemas de drenaje avanzados. Estas medidas están diseñadas para hacer frente a los incrementos proyectados en temperatura y precipitación, reduciendo el riesgo de fallas estructurales.

3.3.2 Implicaciones para la infraestructura vial en Panamá

Panamá, al ser un país tropical con una infraestructura vial que ya enfrenta desafíos significativos debido al clima, necesita incorporar estos avances en la planificación y ejecución de proyectos viales. La implementación de prácticas de mantenimiento preventivo, junto con la adopción de materiales y tecnologías más resistentes, es crucial para garantizar la sostenibilidad de sus carreteras.

3.3.3 Limitaciones y necesidad de investigación empírica

Aunque el análisis teórico proporciona una base sólida, es fundamental validar estas estrategias a través de estudios empíricos en el contexto específico de Panamá. La variabilidad climática local y la diversidad de condiciones geográficas requieren una evaluación continua para ajustar y perfeccionar los modelos teóricos existentes.

El estado del arte y el análisis teórico subrayan la importancia de adoptar enfoques integrales y adaptativos en el diseño y mantenimiento de pavimentos en respuesta al cambio climático. La investigación futura debe centrarse en la validación de estas estrategias teóricas mediante pruebas empíricas y estudios de caso específicos para maximizar la eficacia y la durabilidad de la infraestructura vial en Panamá. Además, es fundamental validar empíricamente los modelos teóricos propuestos en este estudio. Para ello, se sugiere que futuras investigaciones se enfoquen en:

-Realización de pruebas de laboratorio y ensayos en campo sobre la resistencia de pavimentos modificados con polímeros en diversas condiciones climáticas.

-Evaluaciones comparativas de pavimentos con diferentes estrategias de drenaje para determinar su efectividad en la prevención de fallas estructurales.

-Desarrollo de modelos de predicción basados en inteligencia artificial para optimizar estrategias de mantenimiento vial adaptadas al cambio climático.

Con el fin de fortalecer la validez de los modelos teóricos presentados, se recomienda la realización de estudios empíricos en diversas regiones de Panamá. Estos estudios permitirían implementar y monitorear en tiempo real pavimentos construidos con los materiales y técnicas discutidos en este trabajo. Los estudios sugeridos deberían incluir los siguientes componentes:

- Monitoreo a largo plazo de pavimentos modificados con polímeros bajo diferentes condiciones climáticas y de tráfico, para evaluar su desempeño y durabilidad en contextos variados.
- Evaluaciones comparativas entre pavimentos que incorporen distintos tipos de sistemas de drenaje, con el objetivo de medir su efectividad en la prevención de daños causados por la humedad.
- Análisis de costos y beneficios asociados con la implementación de estas tecnologías avanzadas, en comparación con los métodos tradicionales, para determinar la viabilidad económica y operativa de su adopción a gran escala.

4. Conclusiones

- Este estudio contribuye significativamente al campo de la ingeniería de pavimentos y al conocimiento sobre los impactos del cambio climático en la infraestructura vial de países tropicales como Panamá. Al analizar las regiones más vulnerables y proponer estrategias de mitigación, el trabajo ofrece un marco práctico para abordar los desafíos climáticos específicos de Panamá, mejorando la durabilidad y sostenibilidad de los pavimentos flexibles en contextos climáticos adversos.
- Ventajas: Las propuestas presentadas, como el uso de polímeros modificadores de asfalto y tecnologías avanzadas de drenaje, son ventajosas porque permiten aumentar la resiliencia de los pavimentos frente a las condiciones climáticas extremas, al tiempo que se adaptan a las particularidades regionales de Panamá.
- Limitaciones: Sin embargo, una limitación importante es que las conclusiones se basan principalmente en modelos teóricos. Aunque estos modelos son robustos, su aplicabilidad en el mundo real debe ser

verificada mediante estudios empíricos específicos para las diversas regiones del país. Además, la implementación de estas tecnologías avanzadas puede ser costosa, lo que podría limitar su adopción en áreas con recursos financieros limitados.

- Los resultados de este estudio sirven como referencia para la planificación y diseño de infraestructuras viales en Panamá, proporcionando directrices claras sobre cómo adaptar los pavimentos a las condiciones climáticas proyectadas. Las aplicaciones prácticas incluyen la mejora de la resiliencia de las carreteras en regiones vulnerables, lo que no solo prolongará la vida útil de estas infraestructuras, sino que también reducirá los costos de mantenimiento y reparación a largo plazo. Para la implementación efectiva de estas estrategias, se recomienda a la industria vial adoptar medidas concretas, tales como:

-Integración de asfaltos modificados con polímeros en pavimentos de alta carga y zonas vulnerables a temperaturas extremas.

-Uso de pavimentos permeables y sistemas avanzados de drenaje para reducir la saturación y erosión causada por lluvias intensas.

-Implementación de normativas que incorporen estudios climáticos en los procesos de diseño y mantenimiento de pavimentos.

-Aplicación de sensores y monitoreo en tiempo real para evaluar el desempeño de pavimentos bajo escenarios climáticos extremos.

- Se recomienda realizar estudios empíricos en las diversas regiones de Panamá para validar los modelos teóricos y ajustar las estrategias de mitigación propuestas. Estos estudios deberían incluir la implementación de proyectos piloto que permitan monitorear el rendimiento de los pavimentos bajo diferentes condiciones climáticas y de tráfico. Además, sería útil explorar alternativas de financiamiento y cooperación interinstitucional para facilitar la adopción de estas tecnologías en áreas con recursos limitados [49], [50].
- Este estudio aporta al cuerpo de conocimiento sobre la intersección entre el cambio climático y la ingeniería de pavimentos, especialmente en el contexto de los países en desarrollo. Al resaltar la necesidad de enfoques adaptativos y personalizados en el diseño de infraestructuras, este trabajo podría inspirar nuevas investigaciones en otros países con desafíos climáticos similares. Además, la metodología empleada y los hallazgos presentados pueden servir como base para futuras investigaciones

que busquen integrar consideraciones socioeconómicas y climáticas en la planificación de infraestructuras.

AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Ambiente de Panamá por facilitar el acceso a informes y datos cruciales sobre el cambio climático en el país.

CONFLICTO DE INTERESES

El autor declara no tener algún conflicto de interés.

CONTRIBUCIÓN Y APROBACIÓN DE LOS AUTORES

El autor, G. Montúfar, fue responsable de la totalidad del proceso investigativo, incluyendo el análisis de datos, la conceptualización del estudio, la ejecución de la investigación y la redacción completa del manuscrito. Su contribución abarca el 100% de todas las etapas del trabajo presentado en este artículo.

El autor afirma que se leyó y aprobó la versión final de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] Segunda Contribución Determinada a Nivel Nacional (CDN2) Ministerio de Ambiente de Panamá, "Segunda Contribución Determinada a Nivel Nacional (CDN2)", 2020. [En línea]. Disponible: [https://online.fliphtml5.com/eebm/sorx/]. [Accedido: 18-ago-2024].
- [2] Estrategia Nacional de Desarrollo Socioeconómico, Inclusivo, bajo en Emisiones y Resiliente al Cambio Climático 2050 ELP Panamá, Ministerio de Ambiente de Panamá, "Estrategia Nacional de Desarrollo Socioeconómico, Inclusivo, bajo en Emisiones y Resiliente al Cambio Climático 2050 ELP Panamá", 2021. [En línea]. Disponible: [https://online.fliphtml5.com/eebm/fxsv/]. [Accedido: 18-ago-2024].
- [3] Primer Informe Diagnóstico del Sistema de Monitoreo y Evaluación de la Adaptación al Cambio Climático en Panamá, Ministerio de Ambiente de Panamá, "Primer Informe Diagnóstico del Sistema de Monitoreo y Evaluación de la Adaptación al Cambio Climático en Panamá", 2023. [En línea]. Disponible: [https://online.fliphtml5.com/eebm/vhlf/]. [Accedido: 18-ago-2024].
- [4] Sistema de Monitoreo y Evaluación de la Adaptación al Cambio Climático en Panamá, Ministerio de Ambiente de Panamá, "Sistema de Monitoreo y Evaluación de la Adaptación al Cambio Climático en Panamá", 2023. [En línea]. Disponible: [https://online.fliphtml5.com/eebm/vabq/]. [Accedido: 18-ago-2024].
- [5] Informe de Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI) 2022, Ministerio de Ambiente de Panamá, "Informe de Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (GEI) 2022", 2022. [En línea]. Disponible: [https://online.fliphtml5.com/eebm/dafn/]. [Accedido: 18-ago-2024].
- [6] Política Nacional de Cambio Climático (PNCC), Ministerio de Ambiente de Panamá, "Política Nacional de Cambio Climático (PNCC)", 2021. [En línea]. Disponible: [https://online.fliphtml5.com/eebm/lsxz/]. [Accedido: 18-ago-2024].
- [7] Principales problemas ambientales de Panamá, Ministerio de Ambiente de Panamá, "Principales problemas ambientales de Panamá", 2020. [En línea]. Disponible: [https://online.fliphtml5.com/eebm/pfga/]. [Accedido: 18-ago-2024].
- [8] Escenarios de Cambio Climático, 2030-2050-2070, Segunda Fase, Ministerio de Ambiente de Panamá, "Escenarios de Cambio Climático, 2030-2050-2070, Segunda Fase", 2023. [En línea]. Disponible: [https://online.fliphtml5.com/eebm/fdth/]. [Accedido: 18-ago-2024].
- [9] Índice de Vulnerabilidad al Cambio Climático de la República de Panamá, Ministerio de Ambiente de Panamá, "Índice de Vulnerabilidad al Cambio Climático de la República de Panamá", 2021. [En línea]. Disponible: [https://online.fliphtml5.com/eebm/nuhh/]. [Accedido: 18-ago-2024].
- [10] Manual de implementación de ETC - MiAmbiente 2021, Ministerio de Ambiente de Panamá, "Manual de implementación de ETC - MiAmbiente 2021", 2021. [En línea]. Disponible: [https://online.fliphtml5.com/eebm/zdpu/]. [Accedido: 18-ago-2024].
- [11] GUÍA COMUNITARIA, Ministerio de Ambiente de Panamá, "GUÍA COMUNITARIA", 2021. [En línea]. Disponible: [https://online.fliphtml5.com/eebm/hkjs/]. [Accedido: 18-ago-2024].
- [12] Plan Nacional de Acción Climática, Ministerio de Ambiente de Panamá, "Plan Nacional de Acción Climática", 2022. [En línea]. Disponible: [https://online.fliphtml5.com/eebm/vage/]. [Accedido: 18-ago-2024].
- [13] Nivel de Referencia Forestal de Panamá, Ministerio de Ambiente de Panamá, "Nivel de Referencia Forestal de Panamá", 2021. [En línea]. Disponible: [https://online.fliphtml5.com/eebm/dbrn/]. [Accedido: 18-ago-2024].
- [14] Manual de operaciones y procedimientos del Fondo Verde para el Clima en Panamá, Ministerio de Ambiente de Panamá, "Manual de operaciones y procedimientos del Fondo Verde para el Clima en Panamá", 2022. [En línea]. Disponible: [https://online.fliphtml5.com/eebm/cgca/]. [Accedido: 18-ago-2024].
- [15] Guía técnica de Cambio Climático para proyectos de infraestructura de Inversión pública, Ministerio de Ambiente de Panamá, "Guía técnica de Cambio Climático para proyectos de infraestructura de Inversión pública", 2022. [En línea]. Disponible: [https://online.fliphtml5.com/eebm/bovf/]. [Accedido: 18-ago-2024].
- [16] Y. Wang, Y. Huang, W. Rattanachot, K. Lau, y S. Suwansawas, "Mejora del diseño y gestión de pavimentos para inundaciones más frecuentes causadas por el cambio climático," International Journal of Pavement Engineering, vol. 18, no. 4, pp. 487-499, abr. 2015. DOI: https://doi.org/10.1260/1369-4332.18.4.487
- [17] P. Saini y A. Grover, "CAMBIO CLIMÁTICO – INTEGRACIÓN DE POLÍTICAS, PRÁCTICAS Y EDUCACIÓN," Journal of Global Research, vol. 9, no. 2, pp. 21-28, jul. 2023. DOI: https://doi.org/10.46587/jgr.2023.v09i02.002

- [18] G. Carroll, J. G. Eurich, K. D. Sherman, R. Glazer, M. T. Braynen, K. A. Callwood, A. Castañeda, C. Dahlgren, K. A. Karr, K. M. Kleisner, V. Burns-Perez, S. E. Poon, N. Requena, V. Sho, S. N. Tate, & S. Haukebo, "Una evaluación participativa de la vulnerabilidad climática para la pesca recreativa en áreas de mareas en Belice y Las Bahamas," *Frontiers in Marine Science*, vol. 10, artículo 1177715, may. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1177715>
- [19] K. E. Bagne y D. Finch, "Vulnerabilidad de especies al cambio climático en el suroeste: especies amenazadas, en peligro y en riesgo en el área de entrenamiento Barry M. Goldwater, Arizona," Informe Técnico General RMRS-GTR-284, Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, pp. 1-47, feb. 2015. DOI: <https://doi.org/10.2737/rmrs-gtr-284>
- [20] K. García, L. Castillo, y C. Saavedra, "Análisis de anomalías climáticas para la cuenca del río La Villa, Panamá, basado en escenarios RCP," *Journal of Climate Change Studies*, vol. 12, no. 3, pp. 150-165, dic. 2020. DOI: <https://doi.org/10.33412/idd.v16.1.2444>
- [21] Y. Qiao, A. Dawson, T. Parry, G. Flintsch, y W.-s. Wang, "Pavimentos Flexibles y Cambio Climático: Una Revisión Exhaustiva e Implicaciones," *Sostenibilidad*, vol. 12, no. 3, pp. 1057, feb. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12031057>
- [22] M. Saleh y L. Hashemian, "Abordando la Resiliencia al Cambio Climático en Pavimentos: Principales Problemas de Vulnerabilidad y Medidas de Adaptación," *Sostenibilidad*, vol. 14, no. 4, pp. 2410, feb. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14042410>
- [23] A. Md, C. Gomes, J. Dias, y A. Cerdà, "Explorando el Nexo entre Género y Cambio Climático, y Empoderando a las Mujeres en la Región Costera Suroccidental de Bangladesh para la Adaptación y Mitigación," *Clima*, vol. 10, no. 11, pp. 172, nov. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/cli10110172>
- [24] S. T. Swarna y K. Hossain, "Impacto del Cambio Climático y Adaptación para Pavimentos de Asfalto en Carreteras: Una Revisión de la Literatura," *Revista Canadiense de Ingeniería Civil*, vol. 49, no. 1, pp. 10-26, ene. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjce-2021-0209>
- [25] Á. Enríquez-de-Salamanca, "Impactos ambientales de la adaptación al cambio climático de los pavimentos de carreteras y opciones de mitigación," *Revista Internacional de Ingeniería de Pavimentos*, vol. 20, no. 6, pp. 1-10, jun. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1326236>
- [26] P. Debaeke, P. Casadebaig, F. Flénet, y N. Langlade, "Cultivo de girasol y cambio climático: vulnerabilidad, adaptación y potencial de mitigación a partir de estudios de caso en Europa," *OCL - Oleaginosas y grasas, Cultivos y Lípidos*, vol. 24, no. 1, pp. D102, ene. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1051/OCL/2016052>
- [27] I. Asadi, S. Jacobsen, M. Baghban, M. Maghfouri, y M. Hashemi, "Revisión del potencial de los materiales de cambio de fase en pavimentos de hormigón para capacidades anticongelantes y mitigación de la isla de calor urbana," *Edificios*, vol. 13, no. 12, pp. 3072, dic. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13123072>
- [28] K. Denryter y J. K. Fischer, "Mitigar las barreras antropogénicas para facilitar los cambios de distribución ayuda a reducir la vulnerabilidad de un gran herbívoro al cambio climático," *Conservación Animal*, vol. 25, no. 3, pp. 223-232, mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/acv.12776>
- [29] R. Namdar, E. Karami, y M. Keshavarz, "Cambio climático y vulnerabilidad: el caso de los países MENA," *ISPRS Revista Internacional de Geo-Información*, vol. 10, no. 11, pp. 794, nov. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi10110794>
- [30] A. Kathirvelpandian, A. Rasheeq, G. Kantharajan, T. Kumawat, T. T. A. Ajith Kumar, y U. Sarkar, "Evaluando la vulnerabilidad inducida por el cambio climático en el ecosistema de manglares de Pichavaram a través de un enfoque multiescala centrado en las partes interesadas," *Revista de Agua y Cambio Climático*, vol. 15, no. 4, pp. 123-135, jul. 2024. DOI: <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.373>
- [31] H. Dai, J. Mamkhezri, N. Arshed, A. Javaid, S. Salem, y Y. Khan, "El papel de la combinación energética en la determinación de la vulnerabilidad al cambio climático en los países del G7," *Sostenibilidad*, vol. 14, no. 4, pp. 2161, feb. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14042161>
- [32] K. E. Haslett, J. F. Knott, A. M. K. Stoner, J. E. Sias, E. V. Dave, J. M. Jacobs, W. Mo, & K. Hayhoe, "Impactos del cambio climático en el diseño y las prácticas de rehabilitación de pavimentos flexibles," *Diseño de Materiales y Pavimentos de Carreteras*, vol. 22, no. 9, pp. 2098-2112, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1880468>
- [33] J. F. Mendoza-Sánchez y O. A. Marcos-Palomares, "El efecto del cambio climático en los pavimentos carreteros," en *Memorias del Congreso Mexicano del Asfalto*, Cancún, México, mayo 2018. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/344891476_EL_EFECTO_DEL_CAMBIO_CLIMATICO_EN_LOS_PAVIMENTOS_CARRETEROS
- [34] Y. Qiao, Y. Zhang, Y. Zhu, T. Lemkus, A. M. K. Stoner, J. Zhang, and Y. Cui, "Evaluación de los impactos del cambio climático en la vida útil del pavimento flexible basándose en mediciones del deflectómetro de peso descendente," *Física y Química de la Tierra*, vol. 120, p. 102908, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102908>
- [35] D. N. Dima, R. Andrei, V. Boboc, & I. Scânteianu, "Evaluación de la sostenibilidad de los pavimentos flexibles," *El Boletín del Instituto Politécnico de Jassy, Sección de Construcción. Arquitectura*, vol. 63, no. 2, pp. 97-104, 2017. https://www.researchgate.net/publication/321016667_EVALUATION_OF_THE_SUSTAINABILITY_OF_FLEXIBLE_PAVEMENTS
- [36] A. Stoner, J. Daniel, J. Jacobs, K. Hayhoe, & I. Scott-Fleming, "Cuantificando el impacto del cambio climático en el rendimiento y la vida útil de los pavimentos flexibles en los Estados Unidos," *Registro de Investigación de Transporte*, vol. 2673, pp. 110-122, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1177/0361198118821877>
- [37] [1] J. F. Mendoza-Sánchez, E. M. Alonso-Guzmán, R. Soto Espitia, y H. L. Chávez García, "Influencia del clima en los métodos de diseño de pavimentos flexibles," *ResearchGate*, ene. 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/372308091_Influencia_del_clima_en_los_metodos_de_diseno_de_pavimentos_flexibles
- [38] G. Guest, Jieying Zhang, O. Maadani & H. Shirkhani, "Incorporando los impactos del cambio climático en las evaluaciones del ciclo de vida de la infraestructura: Un estudio de caso del rendimiento de la vida útil del pavimento," *Revista de Ecología*

- Industrial, vol. 24, no. 2, pp. 356-368, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1111/jiec.12915>
- [39] Instituto de Meteorología e Hidrología de Panamá, "Régimen Pluviométrico de Panamá," [En línea]. Disponible en: <https://www.imhpa.gob.pa/es/regimen-pluviometrico-panama>
- [40] Xu Yang, Zhanping You, J. Hiller, & D. Watkins., "Sensibilidad del diseño de pavimentos flexibles a las entradas climáticas de Michigan utilizando el diseño de pavimento ME," Revista Internacional de Ingeniería de Pavimentos, vol. 18, no. 7, pp. 622-632, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1105373>
- [41] Instituto Nacional de Estadística y Censo, "Meteorología: año 2015," Panamá en Cifras, Panamá, 2016. [En línea]. Disponible en: https://www.inec.gob.pa/publicaciones/Default3.aspx?ID_CATEGORIA=2&ID_PUBLICACION=821&ID_SUBCATEGORIA=4
- [42] Ester Tseng, I. Al-Qadi, E. Tutumluer, I. Qamhia & H. Ozer, "Resiliencia de pavimentos flexibles y estrategias de mitigación después de eventos ambientales adversos," Registro de Investigación de Transporte, vol. 2677, pp. 351-366, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1177/03611981231165761>
- [43] D. King and P. Taylor, "Estrategias de recubrimiento de hormigón para mejorar la resiliencia del pavimento," Registro de Investigación de Transporte, vol. 2677, pp. 259-269, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1177/03611981231156570>
- [44] A. E. A. El-Maaty, "Implicaciones del cambio de temperatura para el rendimiento y la vida útil del pavimento flexible," Revista Internacional de Ingeniería y Tecnología del Transporte, vol. 3, no. 1, pp. 1-11, 2017. DOI: <https://doi.org/10.11648/J.IJTET.20170301.11>
- [45] B. Kaa, R. Mogoruzza, and I. Anguizola, "Análisis de propiedades de mezclas asfálticas modificadas en Panamá," Revista de Iniciación Científica, vol. 2, no. 1, pp. 48-60, Jun. 2016. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric/article/view/600>
- [46] [1] J. R. Bobadilla Peña, F. L. Tesen Muñoz, J. J. Tigre Acosta, y S. P. Muñoz Pérez, "Uso de polímeros en asfalto: una revisión," Gaceta Técnica, vol. 23, no. 1, pp. 94-109, ene. 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/358231229_Uso_de_polimeros_en_asfalto_una_revision
- [47] L. S. Cayón Cayón y L. A. Toro Ojeda, "Análisis de pavimentos permeables como solución alternativa al problema de inundaciones en la calle 22 y la carrera 5 de la ciudad de Santa Marta, la calle 17 y la 12 en Barranquilla y la calle 1 de Valledupar entre los años 2015-2021," Trabajo de grado, Universidad Cooperativa de Colombia, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://repository.ucc.edu.co/handle/20.500.12494/34755>
- [48] S. Perales-Momparler, "Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del ciclo urbano del agua," en Jornada Técnica de la Cámara de Comercio de Zaragoza, Zaragoza, España, nov. 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.camarazaragoza.com/wp-content/uploads/2018/11/Ponencia-Sara-Perales.pdf>
- [49] Remi Oyediji, D. Lu, and S. Tighe, "Impacto de las inundaciones y anegamientos en el rendimiento del pavimento de hormigón," Revista Internacional de Ingeniería de Pavimentos, vol. 22, no. 10, pp. 1363-1375, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1685671>
- [50] Z. Shao, "Evaluación de los impactos del cambio climático en la infraestructura vial," Revista Internacional de Geomate, vol. 13, no. 38, pp. 120-128, 2017. DOI: <https://doi.org/10.21660/2017.38.72099>
- [51] H. H. Reyes Escobar, "Propuesta de diseño de drenaje de aguas pluviales en la 5ta calle de la zona 6 de Retalhuleu, Retalhuleu," Licenciatura en Ingeniería Civil con Énfasis en Construcciones Rurales, Universidad Rural de Guatemala, Guatemala, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://urural.edu.gt/wp-content/uploads/2024/08/0427-2020.pdf>
- [52] S. A. Sanguino López, "Análisis beneficio costo de la implementación de sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS) en la ciudad de Bogotá D.C.," Tesis de maestría, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/1126/Sanguino%20L%C3%B3pez%20Sergio%20Andr%C3%A9s-2019.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
- [53] J. Li, B. Huang y W. Wang, "Evaluación del ciclo de vida y análisis del costo del ciclo de vida de mezclas asfálticas modificadas con polímeros", J. Clean. Prod., vol. 211, págs. 1070-1081, noviembre de 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.11.102, [en línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.102>