UNIVERSIDAD ISAAC NEWTON

SEDE SAN CARLOS

LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

TESIS SOMETIDA AL TRIBUNAL EXAMINADOR DE LA LICENCIATURA PARA OPTAR POR EL GRADO DE LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS EMERGENTES PARA PAVIMENTOS FOTOCATALÍTICOS QUE REDUZCAN CONTAMINACION EN EL AIRE, 2026

JONATHAN GERARDO AGUILAR MARÍN

ESTUDIANTE LICENCIATURA INGENIERÍA CIVIL

MsC. MARCO CHEVEZ CHEVEZ

TUTOR

CIUDAD QUESADA, COSTA RICA

MAYO, 2026

Tribunal Evaluador

Este proyecto profesional fue aprobado por el Tribunal Evaluador de la Licenciatura de Ingeniería Civil de la Universidad Isaac Newton.

Ing. Gerardo Páez González Msc.

PRESIDENTE

MsC. Marco Chevez Chevez

TUTOR ACADEMICO DE INGENIERÍA CIVIL

ING. Oscar Alberto Sánchez Zuñiga

LECTOR DE TESIS

Universidad Isaac Newton
Escuela de Ingeniería Civil
Licenciatura Ingeniería Civil

Declaración Jurada

Yo Jonathan Gerardo Aguilar Marín cédula de identidad [redacted] estudiante de la carrera de Licenciatura en ingeniería civil de la Universidad de Isaac Newton, declaro bajo fe de juramento y conscientes de las responsabilidades de los civiles y penales en este acto, que este Trabajo Final de Investigación es de mi autoría y es presentado con la finalidad de obtener el grado de Licenciatura y tiene como título "Evaluación de tecnologías emergentes para pavimentos fotocatalíticos que reduzcan contaminación en el aire, 2026".

Declaro que en él no se han reproducido informaciones parciales o totales de otros autores, como si fueran de mi propia autoría, por el contrario, se han destacado en el uso de citas textuales las informaciones de otros autores, consignando su origen. Debido a lo anterior, libero a la Universidad Isaac Newton de cualquier responsabilidad en caso de que la declaración sea falsa.

Además, por este medio, autorizo la consulta de esta investigación para fines académicos por parte de la comunidad de usuarios de la Biblioteca de la Universidad Isaac Newton, bajo las modalidades de préstamo interno y a domicilio, así como su inclusión en repositorios o bases de datos digitales que la Universidad considere oportunas.

Entregado en las oficinas de la Dirección Administrativa de la Universidad Isaac Newton ubicada en San Carlos a los 04 días del mes de julio del 2026.

Firma
Jonathan Gerardo Aguilar Marín
Cédula [redacted]

Carta del Tutor

Quesada, 04 de julio del 2026.

Señores

Universidad Isaac Newton

Presente

Estimados señores:

En mi calidad de tutor designado a la Tesis elaborada el estudiante Jonathan Gerardo Aguilar Marín, titulada "Evaluación de tecnologías emergentes para pavimentos fotocatalíticos que reduzcan contaminación en el aire, 2026", durante el período 2026, al respecto hago de su conocimiento que doy mi aprobación para que este Trabajo Final de Graduación, sea desarrollado y presentado ante la Universidad Isaac Newton, contando con los lineamientos establecidos por esta reconocida Universidad.

Agradezco la oportunidad brindada para poder desarrollar junto este estudiante este trabajo que enriquecerá la estructura institucional de esta dependencia.

Sin más por el momento me despido cordialmente,

MsC. Marco Chévez Chévez

Tutor de Tesis

Docente de la Universidad Isaac Newton

Carta del Lector

Ciudad Quesada, 04 de julio del 2026.

Señores

Universidad Isaac Newton

Presente

Estimados señores:

En mi calidad de lector designado a la Tesis elaborada el estudiante Jonathan Gerardo Aguilar Marín, titulada "Evaluación de tecnologías emergentes para pavimentos fotocatalíticos que reduzcan contaminación en el aire, 2026", durante el período 2026, al respecto hago de su conocimiento que doy mi aprobación para que este Trabajo Final de Graduación, sea desarrollado y presentado ante la Universidad Isaac Newton, contando con los lineamientos establecidos por esta reconocida Universidad.

Agradezco la oportunidad brindada para poder desarrollar junto este estudiante este trabajo que enriquecerá la estructura institucional de esta dependencia.

Sin más por el momento me despido cordialmente,

Ing. Oscar Alberto Sánchez Zúñiga

Lector de Tesis

Docente de la Universidad Isaac Newton

Dedicatoria

A mis padres que siempre fueron mi apoyo y equilibrio incondicional, el reflejo de todo el amor que se puede necesitar para seguir creciendo y formándose como profesional. Las gracias infinitas a ellos por impulsarme en la educación y guiarme en este camino tan bendecido hacia un futuro mejor. A Dios las gracias por tenerlos siempre y llenarme de vida para seguir evolucionando.

Tabla de contenidos

Tribunal Evaluador **4**

Declaración Jurada **5**

Carta del Tutor **6**

Carta del Lector **7**

Dedicatoria **8**

Tabla de contenidos **9**

Índice de Figuras **12**

Índice de Tablas **15**

Índice de Abreviaturas en Orden Alfabético **16**

Resumen ejecutivo español/ingles ..... ¡Error! Marcador no definido.

Capítulo 1: Introducción **1**

1.1 Planteamiento del problema de investigación **2**

1.1.1 Contexto **3**

1.1.2 Justificación **6**

1.1.3 Problema de investigación **7**

1.1.4 Estado del arte **9**

1.2 Objetivos de la investigación **13**

1.2.1 Objetivo general **13**

1.2.2 Objetivos específicos **13**

1.3 Las variables o categorías de análisis **14**

1.3.1 Categorías de análisis **15**

1.3.2 Matriz de la investigación **16**

1.4 Alcances **19**

1.5 Formulación de la hipótesis de la investigación **20**

Capítulo 2: Marco Teórico 21

2.1 Estado del conocimiento 21
2.1.1 Dióxido de titanio 22
2.1.2 Proceso Fotocatalítico 22
2.1.3 Influyentes 23
2.1.4 Materiales y productos 28
2.1.4.1 Adoquín Prefabricado 30
2.1.4.2 Lechada Fotocatalítica 31
2.1.4.3 Recubrimiento Cementicio 31
2.1.4.4 Mezcla Fotocatalítica 32
2.1.4.5 Tratamiento fotocatalítico 33
2.1.4.6 Baldosas prefabricadas 33
2.1.4.7 Breinco S.A 34
2.1.5 Descontaminación mediante fotocatálisis 37
2.1.6 Fuentes de Contaminación 38
2.1.7 Contaminantes 39
2.2 Estado de la cuestión 40
2.2.1 Origen 40
2.2.2 Pioneros 41
2.3 Marco legal 42
Capítulo 3: Marco metodológico 44

3.1 Tipo de investigación 44
3.1.1 Naturaleza de la investigación 44
3.1.2 Carácter de la investigación 44
3.2 Sujetos y fuentes de información 45
3.2.1 Sujetos de información 45
3.2.2 Fuentes de información 45
3.3 Muestra y población 46
3.3.3.1 Proyecto Villaverde 46
3.3.3.2 Países Bajos 48
3.3.3.3 Vía Pórpora 49
3.3.3.4 Pavimentos Permeables 51

3.3.3.5 Pavimentos Reciclables **52**
3.3.3.6 Asfalto de baja Temperatura(WMA) **53**
3.3.3.7 Pavimentos Energéticos **55**
3.3.3.8 Pavimentos autorreparables **57**
3.3.3.9 Pavimentos auto sensorizados **58**
3.3.1 Tipo de muestra **59**
3.3.2 Descripción de la muestra **59**
3.3.3 Descripción estadística de la población en estudio **60**
3.4 Instrumentos y técnicas de recolección de datos **60**
3.4.1 Diseño de instrumentos **60**
3.4.2 Procedimiento de intervención **61**
3.5 Estrategia de análisis de datos **62**
3.5.1 Estrategia de intervención **62**
3.5.2 Diagrama de Gantt **63**
Capítulo 4: Análisis e interpretación de los resultados **64**

4.1 Presentación de los resultados para las variables o categorías de análisis **64**
4.1.1 Países Bajos **64**
4.1.2 Villaverde **65**
4.1.3 Via Pórpora **66**
4.1.4 Pavimentos permeables **67**
4.1.5 Pavimentos reciclables **68**
4.1.6 Aslfato de baja temperatura (WMA) **69**
4.1.7 Pavimentos energéticos **70**
4.1.8 Pavimentos Autorreparables **71**
4.1.9 Pavimentos sensorizados **72**
4.2 Análisis y discusión de los resultados para las variables o categorías de análisis. **74**
4.3 Aceptación o rechazo de la hipótesis **80**
Capítulo 5: Limitaciones, Conclusiones y Recomendaciones **82**

5.1 Limitaciones **82**
5.2 Conclusiones **83**
5.3 Recomendaciones **86**
Referencias Bibliográficas **88**

Índice de Figuras

Figura 1-Representación de las 3 formas de estructura cristalina del TiO2 10

Figura 2-Dives in Misericordia Iglesia fabricada con bloques de hormigón prefabricados. 24

Figura 4- Paseo de la Chopera Alcobendas, tramos seleccionadas para la aplicación del recubrimiento fotoactivo. 26

Figura 7-Adoquín prefabricado con capacidad fotocatalítica. 30

Figura 8-Aplicación de capa de mortero y lechada para restauración. Fabricante: Ecobeton Italy 31

Figura 9-Recubrimiento fotocatalítico cementíceo sobre calzada 32

Figura 11-Tratamiento fotocatalítico sobre calzada. Fabricante: Italcementi 33

Figura 12-Pavimentos discontinuos de baldosas fotocatalíticas en Alcobendas Madrid España. Fabricante: Ecogranic 34

..... 34

Figura 13-Adoquín fotocatalítico 35

Figura 14-Adoquín activo, ciudad de Fulda, primer proyecto municipal 36

Figura 15-Canalización de gases de combustión en prueba de campo 36

Figura 18-Proyecto Feder en Villaverde, Aplicación de la emulsión acuosa en los tramos seleccionados en el municipio de Villaverde Madrid España. 47

Figura 19-Proyecto Feder en Villaverde 47

Figura 20-Calle Castorweg en Hengelo (Holanda). Antes de ser repavimentada con materiales de construcción fotocatalíticos. 48

Figura 21-Calle Castorweg en Hengelo (Holanda). Después de ser repavimentada con materiales de construcción fotocatalíticos. 49

Figura 22-Colocación del pavimento fotocatalítico y aplicación de pintura con propiedades fotocatalíticas en el túnel de Via Pórpora 50

Figura 23- Pavimento permeable, ubicado en Valencia España, como solución para la extracción de microplásticos. 52

Figura 24- Muestras de RAP de los diferentes acoplos obtenidos. 53

Fuente: Calderón y Sánchez. 2019 53

Figura 25- Proyecto Life Heatland en Murcia España 55

Figura 26- Se muestra el esquema de la capa del suelo en donde se colocarían los piezoeléctricos a una distancia igual. 56

Figura 27- imagen de las virutas metálicas utilizadas para el diseño de mezcla. 57

Figura 29- Fibras de carbono 58

Figura 30-Calle Castorweg en Hengelo (Holanda) 65

Figura 31-Analizador automático de monitoreo continúo utilizado para la medición de óxidos de nitrógeno (NO, NO_2 y NOx) y ozono (O_3) en aire ambiente, instalado en la plaza de Ágata. 66

Figura 32-Análisis del curado y colocación del pavimento fotocatalítico. 67

Figura 33- Concreto permeable 68

68

Figura 34- Pavimento permeable. 69

Figura 35- Asfalto de baja temperatura. 70

Figura 37- Proceso de formación de grieta y sellado después de los 0 – 14 días de sumergida en agua. Se observa un sellado de al menos 0.26mm. 72

Figura 38- Se puede observar, que la mezcla fue compactada dentro del molde y, posteriormente, se conectaron electrodos con cables de cobre flexibles para realizar las mediciones eléctricas. . 74

Índice de Tablas

Tabla 1: Matriz de la investigación. 17

Tabla 2-Cronograma de actividades 63

Tabla 3- Analisis comparativo del Ciclo de Vida vs Vida Útil Estimada para tecnologias de Pavimentos 77

Tabla 4- Análisis para la implementación de Pavimentos Inteligentes en Costa Rica 79

Abreviaturas en Orden Alfabético

$CaTiO_3$: Titanato de calcio

CFIA: Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos

CH_4: Metano

CO: Monóxido de carbono

CO_2: Dióxido de carbono

COV: Compuestos orgánicos volátiles

ICA: Índice de Calidad del Aire

N_2O: Óxido nitroso

NO: Óxido nítrico

NO_2: Dióxido de nitrógeno

NOx: Óxidos de nitrógeno

OH: Radical hidroxilo

SO_2: Dióxido de azufre

SOx: Óxidos de azufre

TiO_2: Dióxido de titanio

RAP: Asfalto reciclado

GCR: Caucho de llantas

WMA: Asfalto de baja temperatura

REPV: Recolector Energético de Pavimento Vial

$CaCO_3$: Carbonato de calcio

Capítulo 1: Introducción

El crecimiento urbano, el incremento del parque vehicular y el desarrollo de infraestructura vial han contribuido significativamente al aumento de la contaminación atmosférica en las ciudades. La población humana ha ido incrementando, generando más edificaciones y conexiones entre ciudades e incluso países al igual que la producción de mercancías internacionales que han sido transportadas por medios marítimos y terrestres, todo esto ha sido clave para la construcción de puentes y vías de transporte, pero a pesar de este desarrollo, el humo producido ha sido una problemática vigente.

En respuesta a esta problemática, se han desarrollado tecnologías orientadas a reducir los niveles de contaminación atmosférica y promover soluciones sostenibles dentro del sector de la construcción. Entre ellas destaca la fotocatálisis, un proceso químico activado por la radiación solar que, mediante materiales semiconductores como el dióxido de titanio (TiO_2), permite degradar diversos contaminantes presentes en el aire.

Estas tecnologías representan una alternativa sostenible para contribuir a la mejora de la calidad del aire en zonas urbanas con alta concentración vehicular. En este contexto, la ingeniería civil enfrenta el reto de incorporar soluciones innovadoras en el diseño y construcción de infraestructura vial, orientadas tanto al desempeño estructural como a la mitigación ambiental. Por ello, la presente investigación analiza el uso de pavimentos fotocatalíticos como una tecnología emergente con potencial aplicación en entornos urbanos.

La implementación de tecnologías sostenibles en infraestructura vial constituye una estrategia orientada a reducir el impacto ambiental asociado al crecimiento urbano y al incremento del tránsito vehicular. En este sentido, los pavimentos fotocatalíticos o inteligentes surgen como una

alternativa innovadora capaz de contribuir a la disminución de contaminantes atmosféricos mediante procesos fotoquímicos activados por la luz solar o componentes que benefician su estructura y composición.

1.1 Planteamiento del problema de investigación

Es importante ser conscientes del impacto negativo que ha generado la contaminación en el mundo, esta ha afectado significativamente, incluso deteriorando la salud de las personas, de acuerdo con las Naciones Unidas (2022), afirma que casi toda la población mundial, el 99% respira un aire que supera los límites de calidad del aire establecidos por la Organización Mundial de la Salud, esto pone en peligro la salud, según resultados de la actualización del año 2022 sobre su base de datos con respecto a la calidad del aire.

Costa Rica no es la excepción de ser afectado por la contaminación, la población aumenta con el pasar de los años, con ello el incremento del tránsito vehicular, debido al desarrollo urbano e industrial, según datos del Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA), cada año ingresan al país en promedio 90.000 vehículos nuevos (NCR. 2025), todo esto, en conjunto ha contribuido al deterioro del aire, el país al igual que en otras naciones ubicadas en distintos continentes del mundo, registran concentraciones elevadas de óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles y otros derivados de la combustión vehicular.

Ante esta situación es necesario crear e innovar y reducir las problemáticas ambientales, ante esto los ingenieros en ingeniería civil proponen un nuevo sistema en vías comunicativas para la población global, que tienen como finalidad lograr la conexión de nuevas ciudades o rutas alternas, generando el beneficio de movilización para los usuarios del mundo, reduciendo los efectos contaminantes de los gases vehiculares.

1.1.1 Contexto

Con el avance de las diferentes tecnologías de infraestructura y diseño vial, se logró incorporar un elemento que puede reducir de manera eficaz la contaminación por medio de procesos químicos activados por la luz solar presente en el aire, este método se denominados pavimentos fotocatalíticos los cuales presentan una innovación en la ingeniería civil moderna. Su relevancia radica no solo en su función estructural, sino también en su capacidad para contribuir activamente a la sostenibilidad urbana.

Como ya se ha mencionado, este tipo de pavimento pretende disminuir el impacto negativo de la contaminación que se ha generado debido al aumento de las grandes ciudades, situación que no solo ha afectado a la salud de los habitantes sino a la calidad estética de los edificios por el considerable uso y la poca conciencia sobre la preservación, además, de acuerdo con Imanol Moreno (2018), menciona que la base de cemento por sus propiedades físico químicas como su rugosidad, porosidad y composición mineralógica pueden ser vulnerables con el paso del tiempo, debido a estar expuestos a la intemperie. Por ello se pretende brindar una solución, que favorezca en mayor medida a la salud de las personas, contribuyendo con la disminución de la contaminación, además de una mejor innovación estructural.

Costa Rica es un país conocido por ser tropical-húmedo, ubicado en el continente americano, el cual se divide en varias zonas, cada una con características propias, sus siete provincias presentan un clima variado, por ejemplo, las montañas de Monteverde en Puntarenas, son frías y nubladas la mayor parte del año mientras que en Guanacaste, en sus planicies son secas y calientes, el Valle Central tiene un clima promedio de 22°C, recibe constantes brisas de las costas. El promedio anual del país se encuentra entre 22°C y 27°C. (Costa Rica Guides. 2011)

Costa Rica presenta en su clima variaciones durante todo el año, en este ámbito es importante destacar el impacto del cambio climático el cual ha enfrentado el mundo en los últimos años, este país centroamericano ha sido influenciado negativamente, transformando el entorno de algunas zonas. Además, como características esenciales, no cuenta con estaciones climáticas definidas, algunos cantones como San Carlos muestra una presencia de microclimas en distancias cortas, mostrando lluvia y sol en distancias de 5 minutos, esto hace ver que el mecanismo de pavimento fotocatalítico no puede ser adoptado en todas las partes del país, ya que no traería beneficios significativos, sino más bien gastos excesivos, que no favorecen.

De acuerdo con el autor Camilo Cano (2022), afirma lo siguiente:

> Los pavimentos fotocatalíticos son aquellos en los que se ha introducido una capa de óxido de titanio. Este compuesto se trata de un material semiconductor, que ayuda a desactivar los óxidos de nitrógeno que emiten los vehículos cuando queman combustible, tanto diésel como gasolina. Los pavimentos fotocatalíticos, permiten reducir la contaminación atmosférica mejorando por tanto la calidad del aire en nuestras ciudades. Reciben su nombre debido a la fotocatálisis, reacción química natural por la cual la energía solar, se transforma en energía química al interactuar con un catalizador, eliminando contaminantes como el dióxido de carbono, los óxidos de nitrógeno (NOx) o los óxidos de azufre.

Como objetivo para este estudio se va analizar y la evaluar las diferentes tecnologías emergentes aplicadas al pavimento, específicamente la técnica fotocatalítica, por ello, se ampliará la información referente a este tema, realizando una descripción de los elementos que lo componen, sus efectos, beneficios, costos que influyen en la ejecución de este nuevo sistema. Sin embargo, se conceptualizan algunos términos, importantes de comprender en el presente documento.

- **Pavimento:** Un pavimento es una estructura constituida por una serie de capas superpuestas, que se diseñan y construyen teniendo en cuenta diferentes métodos, normas y especificaciones técnicas para materiales apropiados, que se someten a diferentes procesos constructivos con el fin de obtener una superficie apta que presente la rigidez y durabilidad necesaria para el tránsito de vehículos. (Mocondino J. 2020)
- **Dióxido de titanio:** El TiO_2 es un polvo blanco e inodoro con un alto índice de refracción y una fuerte absorción de la luz ultravioleta. Presenta actividad fotocatalítica y estabilidad química, y no es tóxico. Existe en tres polimorfos principales: anatasa, rutilo y brookita. La anatasa y el rutilo son los más comunes siendo el rutilo termodinámicamente estable en cambió la anatasa se transforma en rutilo al calentarse. (Stanford Advanced Materials. 2025)

Esta investigación tiene como fin la búsqueda, el análisis y comparativa de las diferentes tecnologías utilizadas para la elaboración de pavimentos fotocatalíticos, con el objetivo de minimizar la contaminación presente en el aire por el incremento vehicular y desarrollo en infraestructura vial que bien ha permitido el tránsito de muchísima más población a nivel mundial.

De acuerdo con Montalbán y Rodríguez (2024), establecen que los pavimentos descontaminantes se pueden instalar en una amplia variedad de entornos, donde su capacidad para reducir contaminantes tiene un impacto directo en la calidad del aire. Algunas de sus aplicaciones más comunes incluyen:

- **Vías Urbanas**: Calles, avenidas y carreteras de alto tráfico vehicular son lugares ideales para estos pavimentos, ya que contribuyen a reducir la contaminación generada por los vehículos.

- **Espacios Públicos**: Plazas, parques, jardines y zonas peatonales se benefician de estos pavimentos, mejorando la calidad del aire en lugares frecuentados por personas de todas las edades.
- **Estacionamientos**: Tanto subterráneos como al aire libre, los pavimentos fotocatalíticos en estacionamientos ayudan a reducir la acumulación de gases contaminantes emitidos por los automóviles.
- **Fachadas de Edificios**: Además del suelo, la tecnología fotocatalítica se puede aplicar en fachadas de edificios, donde contribuye a mejorar la calidad del aire en zonas densamente pobladas.

Esto demuestra que este tipo de tecnología implementada en los pavimentos u otras edificaciones favorecen con la disminución del impacto contaminante, ya se ha estipulado que la función de este sistema es absorber la contaminación que emana de la superficie de elementos de concreto, atrapando las partículas contaminantes que se encuentran presentes en el aire, esto depende de la activación de la luz, por tanto el sol es esencial en este proceso ya que sin este elemento no se activaría la reacción química.

1.1.2 Justificación

El planeta ha enfrentado un aumento progresivo en la ejecución de proyectos de infraestructura y edificaciones en los últimos años, torres de viviendas han albergado a millones de personas, transportes públicos que trasladan a múltiples personas a sus diferentes actividades diarias, vehículos que facilitan el recorrido de los habitantes dirigiéndose a sus actividades rutinarias, estas situaciones en simbiosis han impactado los índices de contaminación.

Es posible la innovación y práctica de los diseños viales y estructurales con la propiedad fotocatalítica en cada uno de sus elementos, para contribuir con ese impacto ambiental en donde la inversión solicite estándares de alta gama y las construcciones sean de una gran dimensión. Estos edificios serán los que proporcionen ese respiro conservador y un aire canalizado por los diferentes compuestos estructurales de la edificación.

Para justificar la inversión en cada una de estas infraestructuras, se debe de retomar en cuanto a la calidad del aire presente en el constante crecimiento urbano, la movilización vehicular es el factor principal del contaminante que más afecta el aire y se encuentra expuesto para población mundial, en algunos lugares con muchísimo más impacto por degradación de las mismas.

1.1.3 Problema de investigación

Para implementar la idea de un pavimento descontaminante a un país como Costa Rica o bien la creación de elementos de concreto con su propiedad catalizadora, se debe de considerar en primera instancia, el aumento de contaminación que se enfrenta en determinadas zonas del país, en donde hay alta frecuencia de paso vehicular y flujo poblacional ya que estos factores producen los efectos de contaminación que afectan la salud de las personas, por ello la innovación de estos espacios, ofrecería un cambio drástico y realmente positivo en el embellecimiento de estructuras pero lo que es más importante en la reducción de la contaminación.

De acuerdo con David Abellán resalta:

> Los pavimentos fotocatalíticos aparecen como una alternativa sostenible para la reducción de los niveles de NO2 atmosférico, basándose en un proceso denominado “fotocatálisis”, el cual consiste en la activación de un compuesto fotocatalizador y semiconductor, en este caso el TiO_2, con ayuda de la radicación solar. En este contexto, es importante señalar que los

materiales semiconductores poseen dos niveles de energía principales: la banda de valencia, donde se encuentran los electrones en su estado normal, y la banda de conducción, a la cual los electrones pueden desplazarse al recibir energía, posteriormente se lleva a cabo la promoción de determinados electrones, desde la banda de valencia a la banda de conducción, generando así un par de electrón-hueco, esos huecos libres son ocupados por radicales hidroxilos, OH, generados en la superficie del TiO_2 a partir del agua presente en el aire. Asimismo, los electrones promocionados a la banda de conducción reaccionan con el oxígeno dando lugar al anión.

Identificar los países pioneros de dicha tecnología, nos da una idea de lo innovador y avanzado que puede estar cada sociedad en cuanto a temas constructivos y equilibrio ambiental. Lo que se busca con esta tecnología y otras nuevas que puedan emerger con el tiempo, es priorizar un entorno sano y duradero.

Para la elaboración de una mezcla fotocatalítica, es indispensable obtener las propiedades del dióxido de titanio, el cual genera en un procedimiento de oxidación, su activación se realizará en el momento en que haya contacto con el sol, este proceso reduce los contaminantes adheridos a la superficie provocados por los humos contaminantes del ambiente.

Para la incorporación de un pavimento con la tecnología mencionada, se deben de tomar en cuenta distintos factores esenciales, los cuales deben llevar su respectivo proceso para la producción y colocación del material en cualquier tipo de superficie, aunque el costo es mayor al pavimento convencional a largo plazo puede beneficiar al ser humano con la transformación del aire en el entorno.

1.1.4 Estado del arte

Las tecnologías emergentes aplicadas a los pavimentos con propiedades fotocatalíticas se presentan como una alternativa orientada a mejorar la calidad del aire en zonas urbanas. Estas tecnologías se basan en incorporar dióxido de titanio (TiO_2) en elementos como losas, secciones o adoquines de concreto, permitiendo que cumplan su función estructural habitual, pero agregando la capacidad de transformar contaminantes presentes en el ambiente. Con esto, los materiales no solo sirven como superficie de rodamiento, sino que también ayudan a generar espacios más limpios y saludables. (Hurtado *et al*. 2010)

El dióxido de titanio (TiO_2) presenta una elevada estabilidad en medios acuosos y muestra una alta tolerancia tanto a soluciones ácidas como alcalinas. Además, se caracteriza por ser un material, reciclable y reutilizable, con un proceso de producción relativamente sencillo. Una de sus principales ventajas es la facilidad con la que puede sintetizarse a escala nanométrica en comparación con otros catalizadores. Asimismo, su energía de banda prohibida resulta adecuada para inducir una amplia variedad de reacciones orgánicas mediante procesos fotocatalíticos. (Huerta A. 2018)

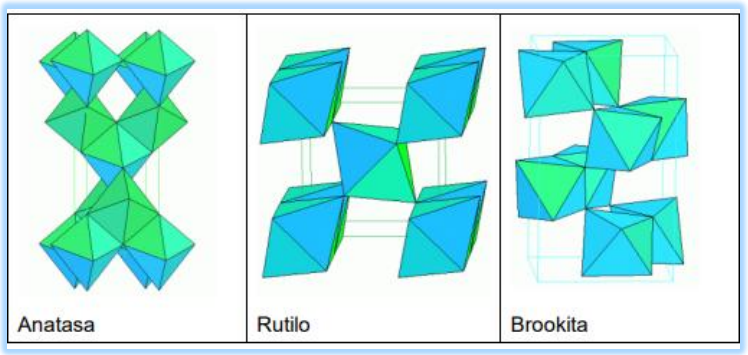
Las fases cristalinas del TiO_2 difieren en el ordenamiento atómico y en las dimensiones de su celda unitaria. Las fases anatasa y rutilo presentan un sistema cristalino tetragonal, caracterizado por dos ejes iguales y uno diferente, mientras que la brookita posee una estructura más compleja. Estas diferencias estructurales influyen directamente en la estabilidad y la actividad fotocatalítica del material.

- Anatasa (tetragonal, a = b = 3.78 Å; c=9.50 Å)
- Rutilo (tetragonal, a = b = 4.58 Å; c = 2.95 Å)

- Brookita (romboédrico, a = 5.43 Å; b = 9.16 Å; c = 5.13 Å)

(Las letras a, b y c indican las dimensiones de la celda cristalina en tres direcciones del espacio y describen la forma interna del cristal, no el tamaño de las partículas, como se muestra en la Figura 1).

Figura 1- Representación de las 3 formas de estructura cristalina del TiO2



Fuente: García L. 2016

La fase anatasa del dióxido de titanio es la más empleada en pavimentos fotocatalíticos debido a su elevada actividad fotocatalítica, la cual se asocia a una menor recombinación electrón–hueco, una mayor área superficial específica y una energía de banda prohibida adecuada para su activación bajo radiación ultravioleta. Estas propiedades favorecen la generación de especies reactivas capaces de degradar contaminantes atmosféricos. Asimismo, en aplicaciones fotocatalíticas es común el uso de dióxido de titanio compuesto mayoritariamente por anatasa, con una pequeña proporción de rutilo, dado que esta combinación mejora la eficiencia del material. Adicionalmente, el TiO_2 destaca por su baja toxicidad, estabilidad en medios acuosos, lo que lo convierte en una alternativa eficiente y viable para aplicaciones ambientales. (Luz solar y TiO_2 para eliminar patógenos, 2019)

El origen de esta tecnología se remonta a los estudios realizados por Akira Fujishima junto al profesor Kenichi Honda, quienes descubrieron las propiedades fotocatalíticas del dióxido de titanio. A partir de este hallazgo, el material comenzó a utilizarse en distintos campos, desde productos cotidianos hasta elementos de construcción. Su aplicación se ha extendido por los beneficios que ofrece en la reducción de contaminantes en zonas urbanas expuestas al crecimiento poblacional y al aumento del tránsito. (Chen *et al*. 2022)

A nivel internacional, diferentes países han experimentado con pavimentos fotocatalíticos, lo que ha permitido evaluar su comportamiento en condiciones reales. En ciudades de Dinamarca, por ejemplo, se han aplicado tratamientos fotocatalíticos en superficies públicas y en áreas cercanas a aeropuertos, obteniendo reducciones notorias de contaminantes atmosféricos. En España, proyectos implementados en Madrid han utilizado recubrimientos especiales en plazas y calles para disminuir la concentración de sustancias dañinas en el aire.

Italia también ha realizado pruebas con adoquines y superficies tratadas con TiO_2, observando mejoras importantes en la calidad del aire en sectores con alto flujo vehicular. Asimismo, en Francia se han desarrollado secciones de pavimento con concreto fotocatalítico en zonas donde la contaminación es elevada, logrando reducciones considerables en los niveles de dióxido de nitrógeno. Otros países como Corea del Sur han probado esta tecnología en túneles urbanos, demostrando que incluso en espacios cerrados puede haber efectos positivos en la disminución de contaminantes.

En el distrito de Villaverde, en Madrid, se llevó a cabo un proyecto de innovación enfocado en la utilización de pavimentos y recubrimientos fotocatalíticos con el objetivo de reducir la contaminación del aire urbano. Con el apoyo de fondos europeos, el Ayuntamiento de Madrid aplicó materiales fotocatalíticos sobre pavimentos ya existentes mediante emulsiones acuosas y

también incorporó prefabricados de hormigón con fotocatálisis en calles y aceras. En distintas zonas del distrito, se trataron superficies de varios miles de metros cuadrados, lo que permitió evaluar el desempeño de estos materiales en condiciones reales de la ciudad. (Ayuntamiento de Madrid. 2015).

Estas experiencias internacionales muestran que la aplicación de pavimentos fotocatalíticos es una herramienta potencial para mejorar la calidad del aire sin necesidad de modificar los métodos constructivos tradicionales. Además, evidencian que la tecnología puede adaptarse a distintos tipos de climas, densidades de tráfico y configuraciones urbanas. Por lo tanto, los avances logrados en otros países sirven como referencia para analizar la posibilidad de implementar esta tecnología en nuevos contextos, especialmente en regiones donde la contaminación atmosférica es un desafío creciente.

La implementación de tecnologías innovadoras en materiales de construcción se ve limitada por factores económicos, técnicos y de conocimiento. En Costa Rica, la falta de experiencia en el uso de estos materiales, el desconocimiento sobre sus beneficios, la carencia de incentivos institucionales y la ausencia de normativas específicas dificultan la adopción de pavimentos fotocatalíticos en entornos urbanos, de manera similar a lo que ocurre con otras soluciones sostenibles. (Vargas Nordcbeck *et al*. 2013).

1.2 Objetivos de la investigación

1.2.1 Objetivo general

1. Evaluar tecnologías emergentes aplicadas en pavimentos fotocatalíticos para la reducción de contaminantes atmosféricos.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Revisar el estado del arte de materiales fotocatalíticos.
2. Analizar experiencias internacionales
3. Proponer lineamientos preliminares de implementación.

1.3 Las variables o categorías de análisis

Los pavimentos fotocatalíticos como se ha destacado, representan una innovación en el ámbito de ingeniería civil, por ello en la infraestructura urbana ya que su enfoque va orientado a la sostenibilidad y la mejora de la calidad del aire. Estos materiales incorporan compuestos fotocatalíticos, como el dióxido de titanio (TiO_2), que al interactuar con la luz solar desencadenan reacciones químicas capaces de descomponer contaminantes atmosféricos como óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles.

Su implementación busca reducir el impacto ambiental del tráfico vehicular que ha estado en un aumento constante por ello contribuir a la salud pública y promover ciudades más limpias y eficientes es el principal objetivo de este nuevo sistema. El análisis de esta tecnología requiere considerar variables técnicas, ambientales, económicas y sociales que permitan evaluar su viabilidad y efectividad en distintos contextos urbanos.

Para evaluar la implementación de este tipo de pavimentos fotocatalíticos y efectividad de los mismos, es necesario definir un conjunto de variables o categorías de análisis que permitan comprender su impacto desde diferentes perspectivas. Estas variables abarcan aspectos técnicos relacionados con la composición y desempeño del material, factores ambientales vinculados a la reducción de contaminantes y la mejora de la calidad del aire, consideraciones económicas sobre costos y beneficios, así como dimensiones sociales que reflejan la aceptación ciudadana y su contribución a políticas de sostenibilidad. El análisis integral de estas categorías facilita una visión completa del potencial y las limitaciones de esta tecnología en entornos urbanos.

1.3.1 Categorías de análisis

Para la aplicación de este nuevo sistema, es necesario considerar algunas categorías esenciales, permitiendo valorar la viabilidad de la implementación. A continuación, se describe cada una:

1. **Variables Técnicas:**

- **Composición del pavimento**: tipo de material base (concreto, asfalto) y porcentaje de TiO_2.
- **Método de aplicación**: mezcla integral, recubrimiento superficial.
- **Durabilidad**: resistencia al desgaste, vida útil.
- **Eficiencia fotocatalítica**: capacidad de degradar NOx, SOx, COV (medida en $mg/m^2 \cdot h$).
- **Condiciones de operación**: exposición solar, humedad, temperatura.

2. **Variables Ambientales:**

- **Reducción de contaminantes**: concentración inicial vs. concentración final (NOx, SOx).
- **Impacto en calidad del aire**: mejora en índices ambientales (ICA).
- **Autolimpieza**: reducción de suciedad y microorganismos.
- Impacto en biodiversidad urbana: efectos indirectos.

3. **Variables Económicas:**

- **Costo de instalación**: Por m2 lleva una diferencia significativa comparado al pavimento convencional del doble. Debido a sus características e impacto con el medio ambiente lo cual genera una mejora en cuanto a calidad del aire.

- **Costo de mantenimiento**: Depende de la tecnología fotocatalítica empleada, puede cambiar el mantenimiento, esto toma importancia si el aditivo esta ya mezclado originalmente con el material o es un simple recubrimiento.

- **Beneficio económico indirecto**: ahorro en salud pública gracias al proceso fotocatalítico que permite la oxidación de partículas contaminantes en el aire.

4. **Variables Sociales:**

- **Aceptación ciudadana**: Se visualizan los cambios estructurales, como el embellecimiento, pero también el mejor funcionamiento de pavimentos, por medio de la reducción de contaminación.
- **Contribución a políticas sostenibles**: Mediante la implementación de esta tecnología se busca realizar una alineación con normativas ambientales del país, en donde se pretende preservar más los recursos naturales.

1.3.2 Matriz de la investigación

En el siguiente punto se representará en forma de tabla la matriz de investigación, utilizada como una herramienta metodológica fundamental para organizar los elementos centrales en el estudio.

Tabla 1: Matriz de la investigación.

Hipótesis	Conceptos	Variables	Indicadores
Los materiales fotocatalíticos basados en dióxido de titanio presentan funciones ambientales y superficiales que permiten mejorar la calidad del aire y mantener superficies más limpias, sin modificar de manera significativa el comportamiento estructural del concreto convencional.	El estado del arte de los materiales fotocatalíticos corresponde a la recopilación y análisis de información existente sobre el uso del dióxido de titanio en pavimentos y elementos de concreto. Incluye su funcionamiento, beneficios, aplicaciones comunes y las características que los diferencian de los materiales tradicionales.	**Variable independiente:** Incorporación del dióxido de titanio como agente fotocatalítico. **Variable dependiente:** Propiedades ambientales y superficiales generadas (reducción de contaminantes y efecto autolimpiante).	Descripción del proceso de oxidación y degradación de contaminantes atmosféricos. Aplicaciones documentadas en pavimentos y elementos de concreto. **Beneficios identificados:** reducción de NOx, autolimpieza y mejora visual. Diferencias conceptuales entre concreto convencional y concreto fotocatalítico.

Las experiencias internacionales demuestran que la aplicación de materiales fotocatalíticos en infraestructura urbana genera resultados positivos en la reducción de contaminantes atmosféricos y en el comportamiento superficial de los pavimentos.	Las experiencias internacionales se refieren a la revisión de proyectos implementados en diversos países donde se han utilizado pavimentos o recubrimientos fotocatalíticos. Este análisis permite identificar los resultados obtenidos, los contextos de aplicación y las conclusiones derivadas de dichas intervenciones.	**Variable independiente:** Implementación de pavimentos o recubrimientos fotocatalíticos en otros países. **Variable dependiente:** Resultados ambientales y operativos asociados a su aplicación.	**Registro de países que han desarrollado proyectos**: Italia, Japón, Dinamarca, Francia, España, Corea del Sur, entre otros). **Tipo de infraestructura intervenida**: calles, aceras, túneles, plazas u otros. **Resultados:** Se ha reportado reducción de contaminantes atmosféricos y comportamiento autolimpiante. **Condiciones de implementación:** clima, nivel de tráfico, tipo de mezcla utilizada.
La formulación de lineamientos preliminares permite orientar la futura aplicación de pavimentos fotocatalíticos considerando sus beneficios, requerimientos técnicos y limitaciones, lo que facilita su adopción en contextos urbanos expuestos a altos niveles de contaminación.	Los lineamientos preliminares consisten en una propuesta inicial que establece recomendaciones para implementar pavimentos fotocatalíticos. Incluyen criterios técnicos, condiciones ambientales, factores de selección y aspectos de mantenimiento necesarios para garantizar su funcionamiento adecuado.	**Variable independiente:** Condiciones técnicas y criterios establecidos para la implementación. **Variable dependiente:** Viabilidad técnica y ambiental del uso de pavimentos fotocatalíticos.	• Recomendaciones sobre el contenido de dióxido de titanio en las mezclas. • Criterios de selección según tipo de vía, tránsito, exposición solar y ubicación. • Condiciones ambientales requeridas para que el proceso fotocatalítico sea efectivo. • Consideraciones de mantenimiento, limpieza y monitoreo de desempeño. • Beneficios esperados para el entorno urbano.

Fuente: Elaboración propia. Aguilar J.(2026)

1.4 Alcances

Esta investigación tiene como objetivo analizar las tecnologías emergentes aplicadas en pavimentos fotocatalíticos y comprender su potencial para contribuir a la reducción de contaminantes atmosféricos. El estudio busca recopilar, organizar y examinar información existente sobre el uso del dióxido de titanio en materiales de construcción, con el fin de establecer un panorama claro sobre su funcionamiento, beneficios y características principales.

Además, la investigación pretende identificar y evaluar experiencias internacionales donde esta tecnología ha sido aplicada, lo que permitirá reconocer los resultados obtenidos, los contextos en los que ha funcionado y las condiciones que favorecen su implementación. Este análisis aporta una visión comparativa que enriquece el conocimiento disponible y abre la posibilidad de considerar futuras aplicaciones en otros entornos y con diferentes tecnologías.

Otro de los propósitos del estudio es generar lineamientos preliminares que sirvan como una base conceptual para orientar cómo podría implementarse esta tecnología en regiones donde aún no ha sido utilizada, como es el caso de Costa Rica. Dichos lineamientos buscan ofrecer un punto de partida para futuras investigaciones o proyectos técnicos más avanzados.

En conjunto, la investigación contribuye al desarrollo de nuevo conocimiento al integrar información dispersa, documentar prácticas internacionales relevantes y presentar una propuesta inicial de aplicación. De esta manera, el trabajo amplía la comprensión sobre el papel de los pavimentos fotocatalíticos en la mejora de la calidad del aire y en el desarrollo de infraestructuras más sostenibles.

Tal como se ha expresado es fundamental establecer nuevas estrategias que favorezcan a la ciudadanía, por tanto, mediante este nuevo implemento se busca demostrar los beneficios que se pueden aportar a la ciudadanía, reduciendo los altos niveles de contaminación,

embellecimiento estructural y lo que es aún más importante beneficiando la salud de las personas debido a la disminución de los elementos contaminantes producto de los vehículos.

1.5 Formulación de la hipótesis de la investigación

Las tecnologías emergentes basadas en dióxido de titanio aplicadas en pavimentos fotocatalíticos representan una alternativa viable para contribuir a la reducción de contaminantes atmosféricos, tal como lo sugieren las experiencias internacionales documentadas. Su evaluación permite identificar beneficios ambientales potenciales que podrían considerarse para futuras aplicaciones en contextos urbanos similares aprovechando el diseño a gran escala de infraestructuras en la que se pueda aprovechar este tipo material y su propiedad fotocatalítica.

Capítulo 2: Marco Teórico

El objetivo de este marco teórico es establecer los fundamentos conceptuales, característicos y científicos que sustentan la investigación sobre pavimentos fotocatalíticos con incorporación de dióxido de titanio (TiO_2) que reduzcan la contaminación del aire. En este apartado se desarrollan los principales antecedentes y el estado del conocimiento relacionado con la tecnología fotocatalítica aplicada a materiales de pavimentación, así como los conceptos teóricos vinculados a la fotocatálisis, las propiedades del dióxido de titanio y su interacción con contaminantes atmosféricos. Asimismo, se abordan las características generales de los pavimentos, los tipos de mezclas empleadas y los factores que influyen en el desempeño mecánico y ambiental de estos sistemas, con el propósito de contextualizar el estudio y proporcionar una base teórica sólida para el análisis y desarrollo de la investigación.

2.1 Estado del conocimiento

El estado del conocimiento permite examinar los aportes teóricos y técnicos existentes en torno a la aplicación de tecnologías fotocatalíticas basadas en dióxido de titanio dentro del sector de la infraestructura vial. Mediante la revisión de investigaciones científicas, informes técnicos y experiencias internacionales previamente documentadas, este apartado recopila y sistematiza la información disponible sobre el uso de pavimentos fotocatalíticos y su desempeño en la reducción de contaminantes atmosféricos en espacios urbanos.

De igual manera, este análisis permite identificar empresas y proyectos beneficiados con este tipo de material, los resultados de estas edificaciones y las limitaciones señaladas por estudios anteriores, ofreciendo un panorama del desarrollo y evolución de estas tecnologías. La información recopilada sirve como base para el planteamiento del presente estudio y contribuye a evidenciar la

idea de evaluar el potencial de los pavimentos fotocatalíticos en contextos urbanos o estructurales con características similares, como el de Costa Rica.

Ante esto a continuación se presentan dos conceptos importantes a entender, relacionados con el implemento de esta nueva tecnología, que tienen como fin presentar al lector un mejor panorama, comprendiendo sobre los elementos más importantes.

2.1.1 Dióxido de titanio

El óxido de titanio (IV) rutilo y el óxido de titanio (IV) anatasa se producen industrialmente en grandes cantidades utilizándose como pigmentos, catalizadores y en la producción de materiales cerámicos. El óxido de titanio (IV) tiene gran importancia como pigmento blanco por sus propiedades de dispersión, su estabilidad química y su no toxicidad. El óxido de titanio (IV) es el pigmento inorgánico más importante en términos de producción mundial. (Hurtado *et al*. 2010)

2.1.2 Proceso Fotocatalítico

La fotocatálisis heterogénea y otros procesos avanzados de oxidación son buenos ejemplos de la aplicación de la catálisis como tratamiento para la destrucción de contaminantes. La fotocatálisis heterogénea involucra la absorción directa o indirecta de energía radiante (UV o visible) por un sólido (catalizador o sustrato), que generalmente es un óxido semiconductor de banda ancha. Donde, en la región entre las fases del sólido excitado y la solución (interface gas-sólido), tienen lugar reacciones redox que pueden propiciar la remoción de los contaminantes. (Rojas P. 2021)

Por un largo periodo de tiempo grupos de personas se han basado en establecer nuevos mecanismos que contrarresten las problemáticas vigentes en la sociedad, buscando nuevas alternativas que favorezcan a la mayoría de la población, algunos gobiernos presentan un mayor

apoyo en temas relacionados con infraestructura vial contando con un presupuesto asignado, mientras que otros se encuentran un poco más limitados, mediante esta investigación se busca exponer algunos de los países que han tenido cambios significativos con el implemento de las nuevas tecnología de pavimentos fotocatalíticos.

2.1.3 Influyentes

Como ya se ha detallado con anterioridad, la incorporación de pavimentos fotocatalíticos es originada por el uso del dióxido de titanio (TiO_2), utilizado como un material semiconductor el cual es capaz de inducir reacciones fotoquímicas orientadas a la oxidación o visto desde otro enfoque, aporta con la eliminación de contaminantes atmosféricos producidos por vehículos, industrias, entre otros.

A nivel internacional algunos países se han apoyado de nuevas herramientas pese al aumento de niveles de contaminación, por ejemplo, Japón se reconoce como el principal pionero en la investigación y además aplicación inicial de materiales fotocatalíticos en el sector de la construcción, mostrando resultados positivos con el pasar de los años, desde finales de la década de 1990 el desarrollo de cementos y superficies con propiedades fotoactivas fueron destinadas a la mitigación ambiental. (Chen *et al*. 2022)

Eventualmente, en el continente europeo, Italia también desempeñó un papel determinante en la consolidación de esta nueva tecnología fotocatalítica, esta nación se centró particularmente a través de las investigaciones y además aplicaciones impulsadas por Italcementi S.P.A, consideradas así como las iniciales, también lograron desarrollar productos como TX Active®, utilizados en edificaciones y pavimentos urbanos a inicios de los años 2000, en conjunto lograron demostrar la viabilidad de esta solución para la reducción de contaminantes como los óxidos de nitrógeno. (Lucas, S *et al*. 2023)

De acuerdo con Moreno Huertas (2018), uno de los hitos más importantes en este tema de pavimentos fotocatalíticos, ocurrió con la primera edificación siendo esta una iglesia, en ella se evaluó la aplicación de materiales fotocatalíticos a una escala real, esta iglesia ubicada en Roma recibía el nombre de Dives in Misericordia (estructura representada en la Figura 2). Este proyecto fue llevado a cabo por el arquitecto estadounidense Richard Meier y finalizado en el año 2000.

Huertas destaca que su diseño arquitectónico se caracteriza por la presencia de tres grandes estructuras curvas conformadas por 346 bloques de hormigón prefabricado, elaborados con cemento blanco modificado mediante la incorporación de dióxido de titanio. Seis años después de su construcción, no se observaron diferencias significativas en la tonalidad de los bloques de hormigón entre las superficies exteriores e interiores, lo que evidenció la estabilidad cromática del material a lo largo del tiempo.

Figura 2- Dives in Misericordia Iglesia fabricada con bloques de hormigón prefabricados.



Fuente: Huertas M. 2018.

Muchos de los productos fotocatalíticos aplicados sobre las infraestructuras urbanas se han estudiado de manera individual. Pero ¿qué ocurriría si los aplicamos todos conjuntamente sobre un barrio o zona localizada de una ciudad con altas cotas de contaminación? Precisamente esto es lo que se ha desarrollado como “isla fotocatalítica”. Se trata de una medida pionera en España, pero que en otros países como Japón se está popularizando rápidamente. Consiste en aplicar los

materiales fotocatalíticos sobre una zona muy localizada, que puede ser una calle o un barrio, donde se den cita todas las aplicaciones anteriormente mencionadas, de tal forma que se creará una especie de “eco-barrio”. (Rodríguez *et al*. 2024)

En este contexto se desarrolla el proyecto **LifeMinox-Street**, financiado por la Unión Europea, cuyo objetivo principal es evaluar la eficiencia fotocatalítica de materiales disponibles en el mercado y aplicados sobre diversas superficies, tales como fachadas, pavimentos peatonales y capas asfálticas. Dentro de las etapas finales del proyecto se contempla la implementación de los materiales fotoactivos con mayor potencial en el municipio de Alcobendas, ubicado en la Comunidad de Madrid. (Proyecto LifeMinox-Street. 2016)

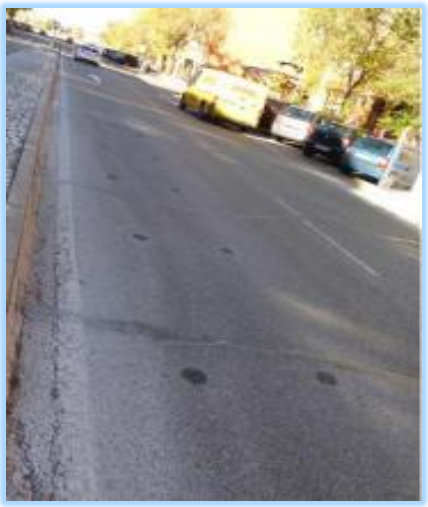
En la actualidad, el proyecto se encuentra en la etapa de implementación de los productos seleccionados en condiciones reales de operación. Con este fin, se aplicó un recubrimiento fotoactivo sobre un tramo de pavimento bituminoso ubicado en el Paseo de la Chopera como se muestran en las figuras 3 y 4, en el municipio de Alcobendas. Tras la aplicación del material y una vez transcurrido el período de secado (representado en la figura 5), el requerido para asegurar su correcta adherencia, el área intervenida fue habilitada nuevamente para el tránsito vehicular. (Proyecto LifeMinox-Street. 2016)

Figura 3- Paseo de la Chopera Alcobendas, tramos seleccionadas para la aplicación del recubrimiento fotoactivo.



Fuente: Proyecto LifeMinox-Street. 2016

Figura 4- Paseo de la Chopera Alcobendas, tramos seleccionadas para la aplicación del recubrimiento fotoactivo.



Fuente: Proyecto LifeMinox-Street. 2016

Figura 5- Paseo de la Chopera Alcobendas, Se muestran sectores donde ya seco el recubrimiento dando un característico tono blanco.



Fuente: Proyecto LifeMinox-Street. 2016

Fujita Corp, es una empresa japonesa dedicada a la construcción general y con sede en Tokio, informó el 3 de octubre de 2010 sobre el desarrollo de una innovadora tecnología para pavimentos (como se muestra en la Figura 6), viales capaces de capturar y degradar compuestos orgánicos volátiles (COV) presentes en las emisiones de los vehículos. Esta tecnología fue desarrollada de manera conjunta con Taiheiyo Cement Corp. y Fujita Road Construction Co, a partir de avances obtenidos en investigaciones colaborativas con el Instituto Nacional de Ciencia y Tecnología Industrial Avanzada (AIST). La nueva tecnología de pavimentos, denominada “Photoroad Technology Clean Ox (Oxidante)”.

Figura 6 -Fujita Corp, Aplicación del Clean Ox.



Fuente: Japan FS, Fujita Corp. 2010

2.1.4 Materiales y productos

En los últimos años se han registrado avances relevantes en el desarrollo de materiales de construcción con propiedades fotocatalíticas basados en dióxido de titanio (TiO_2). Este material ha despertado un notable interés como fotocatalizador para la degradación de contaminantes orgánicos, debido a características como su elevada estabilidad química y su adecuada compatibilidad con distintos materiales empleados en la construcción.

Asimismo, el TiO_2 puede interactuar con los óxidos metálicos presentes en el cemento, dando lugar a la formación de compuestos estables, como el titanato de calcio ($CaTiO_3$), el cual presenta una energía de banda prohibida aproximada de 3,5 eV y un punto isoeléctrico cercano a un pH de 3 (Esto significa que el material se activa principalmente con luz ultravioleta y que su comportamiento superficial cambia según el nivel de acidez del entorno, factores que influyen directamente en su eficiencia para eliminar contaminantes).

Diversas investigaciones han analizado la incorporación de nanomateriales basados en TiO_2 en matrices cementicias y otros materiales de construcción, con el objetivo de mejorar la capacidad de eliminación de contaminantes atmosféricos. (Wei *et al*, 2023)

Existe una amplia variedad de revestimientos que incorporan propiedades fotocatalíticas, los cuales han sido desarrollados con el propósito de mejorar la calidad de vida de la población y mitigar las condiciones ambientales del entorno urbano. Entre estos materiales se incluyen pinturas, recubrimientos cerámicos, elementos prefabricados de hormigón y vidrios, entre otros. Todos ellos comparten el objetivo de actuar como superficies activas con capacidad fotocatalítica, lo que les permite presentar propiedades autolimpiantes, efectos bactericidas y contribuir a la purificación del aire.

Dentro de estos materiales destacan los hormigones fotocatalíticos, en particular aquellos elaborados con cementos especiales desarrollados por empresas como Italcementi, los cuales son modificados mediante la incorporación de dióxido de titanio. A través del proceso de fotocatálisis, estos materiales favorecen la oxidación y descomposición de contaminantes atmosféricos, especialmente los óxidos de nitrógeno generados por las emisiones vehiculares, transformándolos en compuestos menos perjudiciales como nitratos y sulfatos. Estos contaminantes se originan principalmente en la combustión de combustibles fósiles y representan un riesgo tanto para la salud humana como para el medio ambiente.

Asimismo, se han desarrollado pinturas fotocatalíticas autolimpiantes, como las conocidas comercialmente como Bio-NOx, las cuales poseen la capacidad de absorber los óxidos de nitrógeno presentes en el aire y convertirlos en nitratos inocuos que pueden ser eliminados naturalmente por la lluvia. Este tipo de recubrimiento puede aplicarse en diversas superficies, incluyendo cerámicas decorativas y ladrillos cerámicos tipo “klinker” utilizados en fachadas expuestas, ampliando así su campo de aplicación en el entorno construido. (Barriga G. 2021)

2.1.4.1 Adoquín Prefabricado

Otros elementos también han sido modificados mediante la incorporación de materiales fotocatalíticos, con el objetivo de reducir la contaminación generada por emisiones gaseosas. Entre estos destacan los adoquines con propiedad fotocatalicita (material visible en la figura 7), los cuales son elementos prefabricados elaborados a base de concreto, a los que se les adiciona dicho componente. Estos se fabrican en una amplia variedad de formas y dimensiones (Chávez R, 2021).

Figura 7-Adoquín prefabricado con capacidad fotocatalítica.



Fuente: Chávez R. 2021

El cemento fotocatalítico se define como aquel que incorpora un aditivo fotocatalizador en su composición, cuya dosificación es establecida por el fabricante para asegurar una actividad catalítica adecuada. En aplicaciones como los hormigones blancos, este material ha demostrado buen desempeño en términos de luminosidad y estabilidad estética debido a su capacidad autolimpiante. Diversos estudios indican que la actividad fotocatalítica es mayor en morteros y hormigones con adiciones de cenizas volantes ricas en sílice, y que la textura superficial influye en su eficacia, presentando las superficies lisas un comportamiento más estable a largo plazo. (García L. 2016)

2.1.4.2 Lechada Fotocatalítica

El pavimento de mortero o lechada de cemento fotocatalítico está compuesto por un mortero cementicio con aditivos fotocatalíticos y una resina como se observa en la figura 8, el cual se mezcla hasta lograr una consistencia homogénea y se aplica como una capa sobre superficies previamente limpias. Este material, disponible en distintos colores, se emplea en calles, aceras, zonas peatonales, áreas deportivas y carriles bici, y puede contribuir a una reducción de la contaminación atmosférica.

Figura 8- Aplicación de capa de mortero y lechada para restauración. Fabricante: Ecobeton Italy



Fuente: García L. 2016

2.1.4.3 Recubrimiento Cementicio

El recubrimiento cementicio con propiedades fotocatalíticas se emplea en carreteras y pavimentos asfálticos de diversa naturaleza (tecnología mostrada en la figura 9), incluyendo vías con alto volumen de tránsito, plazas, estacionamientos y túneles. Este material se caracteriza por su elevada adherencia sobre superficies asfálticas y su resistencia frente a ciclos de hielo-deshielo. Su aplicación se realiza mediante la formación de una película delgada, ya sea por aspersión o cepillado, procurando que el producto penetre en los poros del aglomerado asfáltico. Visualmente, este tipo de recubrimiento tiende a aclarar el color de la calzada.

Figura 9 -Recubrimiento fotocatalítico cementíceo sobre calzada



Fuente: García L. 2016.

2.1.4.4 Mezcla Fotocatalítica

La mezcla fotocatalítica de base cementicia representada en la figura 10, compuesta por cemento, cuarzo, sílice, pigmentos y diversos aditivos, se formula con una dosificación que le confiere buenas propiedades mecánicas y una elevada eficiencia en la reducción de contaminantes atmosféricos. Este material es ampliamente utilizado como acabado en pavimentos de uso industrial y civil, aplicándose sobre superficies de hormigón. Además, presenta alta resistencia a la abrasión, a las variaciones térmicas y posee características impermeabilizantes.

Figura 10- Aplicación de mezcla fotocatalítica con base cemento



Fuente: García L. 2016.

2.1.4.5 Tratamiento fotocatalítico

El tratamiento fotocatalítico para pavimentos asfálticos consiste en un producto transparente elaborado a partir de una dispersión fotocatalítica en una emulsión acuosa con resinas. Su aplicación se realiza mediante aspersión formando una película superficial sobre la calzada tal como se visualiza en la figura número 11. En el caso de pavimentos asfálticos nuevos, se recomienda aplicar el tratamiento tras un periodo inicial de curado, asegurando que la superficie se encuentre limpia y seca. Este tipo de tratamiento no altera las propiedades funcionales del pavimento, tales como la adherencia de los neumáticos, la capacidad de drenaje ni la absorción acústica. Asimismo, al ser transparente, no es necesario proteger la señalización vial durante su aplicación.

Figura 11-Tratamiento fotocatalítico sobre calzada. Fabricante: Italcementi



Fuente: Espiga Lisbona García, 2016.

2.1.4.6 Baldosas prefabricadas

Los pavimentos fotocatalíticos discontinuos constituyen una solución de pavimentación urbana basada en el uso de baldosas prefabricadas de hormigón y otros materiales que incorporan una capa superficial con dióxido de titanio (Figura 12). Además de su función arquitectónica y estética, estas baldosas contribuyen a la reducción de contaminantes atmosféricos. A modo de

referencia, se ha estimado que la pavimentación de una superficie equivalente a un campo de fútbol con este tipo de elementos podría compensar las emisiones generadas por más de 4 000 vehículos durante un año. En algunos casos también se utilizan para su fabricación materias primas procedentes del reciclaje.

Figura 12- Pavimentos discontinuos de baldosas fotocatalíticas en Alcobendas Madrid España. Fabricante: Ecogranic



Fuente: García L. 2016

2.1.4.7 Breinco S.A

Breinco, S.A. es una empresa española con sede en Barcelona, España, reconocida por la fabricación, diseño y desarrollo de suministros fotocatalíticas, especialmente de tipo "hormigón", esta entidad ha basado su negocio en la idea de construir espacios dentro de la urbanización sostenibles y con paisajes urbanos agradables para su vista, sus productos están orientados en el ámbito de arquitectura y mobiliario urbano. (Breinco. 2010)

Dentro de su línea de innovación y compromiso ambiental, Breinco ha incorporado el uso de materiales fotocatalíticos, destacando el desarrollo de piezas de hormigón fotocatalítico Air Clean (material representado en la figura 13). Estas soluciones integran dióxido de titanio (TiO_2) en su composición, permitiendo la activación del proceso fotocatalítico en presencia de radiación

solar, lo que contribuye a la reducción de contaminantes atmosféricos, como los óxidos de nitrógeno (NOx), y a la mejora de la calidad del aire en entornos urbanos.

La aplicación de estas piezas fotocatalíticas se orienta principalmente a pavimentos, adoquines y elementos de urbanización, combinando beneficios funcionales, estéticos y medioambientales. De esta manera, Breinco integra la tecnología fotocatalítica como una herramienta complementaria dentro de sus soluciones constructivas, alineándose con los principios de la construcción sostenible y el urbanismo orientado al bienestar ambiental. (Breinco, 2010)

Figura 13- Adoquín fotocatalítico



Fuente: Breinco. (2010)

En agosto del 2006 se completó el primer proyecto municipal en el país de Alemania donde se llevó a cabo la incorporación de adoquines activos fotocatalíticos air clean en la ciudad de Fulda (representado en la figura 14).

Figura 14- Adoquín activo, ciudad de Fulda, primer proyecto municipal



Fuente: Breinco, (2010)

Para llevar un estudio de campo eficiente, se requiere de los instrumentos adecuados con los que se refleja la capacidad que tienen las diferentes tecnologías fotocatalíticas empleadas en el pavimento. Breinco nos muestra la capacidad para elaborar dichas pruebas en proyectos ya finalizados con el fin de concientizar el beneficio descontaminante de brindan sus materiales y productos de construcción. (Dichos procedimientos pueden ser observados en las figuras 15 y 16)

Figura 15- Canalización de gases de combustión en prueba de campo



Fuente: Breinco, (2010)

Figura 16- Monitorización del NOx en la prueba de campo



Fuente: Breinco, (2010)

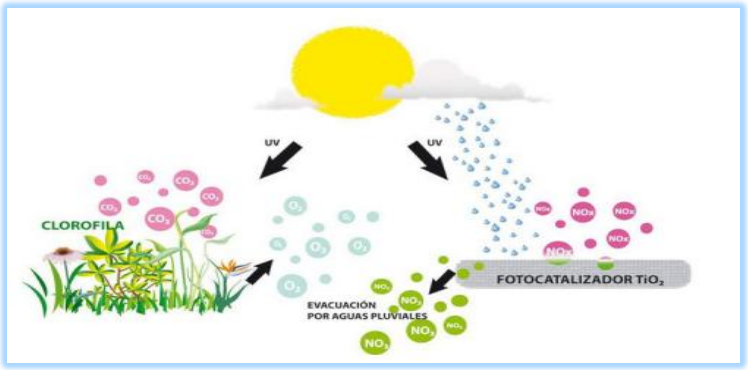
Dicho proyecto se realizó en una calle de Erfurt Alemania, donde se utilizaron los adoquines air clean para dar análisis a las reducciones de NO y NO_2. Durante un periodo de 6 meses, los resultados evidenciaron la disminución de un 20% en dióxido de nitrógeno y un 38% en óxido nítrico. Estas mediciones cumplen los valores exigidos por el 22° Reglamento sobre Valores de inmisión para sustancias nocivas en el aire (Reglamento BlmSchV) en la versión aceptada el 4 de julio de 2007 (Boletín oficial federal alemán I, pág. 1006) anexo 4 para mediciones orientadas. (Breinco, 2010)

2.1.5 Descontaminación mediante fotocatálisis

Mediante el proceso de fotocatálisis como se observa en la figura 17, es posible reducir de forma significativa diversos contaminantes presentes en los entornos urbanos, tales como los óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos de azufre (SOx), compuestos orgánicos volátiles (COV), monóxido de carbono (CO), mercaptanos, formaldehído, compuestos orgánicos clorados y compuestos aromáticos policíclicos. Los materiales de construcción que incorporan agentes fotocatalíticos resultan especialmente eficaces en la eliminación de NOx, los cuales se generan principalmente por el tránsito vehicular, las actividades industriales y la producción de energía.

Los óxidos de nitrógeno son considerados altamente perjudiciales para la salud humana y, además, contribuyen al incremento del efecto invernadero y al calentamiento global.

Figura 17- Proceso Fotocatalítico



Fuente: Reyes Chávez, (2021)

Este proceso químico se produce a través de un material semiconductor que actúa como catalizador y que, al absorber radiación ultravioleta, genera especies reactivas capaces de iniciar reacciones de oxidación. Dichas especies reaccionan con los contaminantes presentes en el aire, transformándolos en compuestos menos nocivos, lo que permite la descontaminación progresiva del entorno. (Barriga G. 2021)

2.1.6 Fuentes de Contaminación

La contaminación atmosférica no es generada exclusivamente por la actividad humana; sin embargo, las fuentes más significativas y perjudiciales para el medio ambiente suelen estar asociadas a las acciones del ser humano y a sus actividades económicas. Los contaminantes presentes en la atmósfera pueden clasificarse según distintos criterios y, de acuerdo con su origen, se diferencian principalmente dos tipos de fuentes. (García L. 2016)

Por un lado, se encuentran las fuentes naturales o biológicas, que producen emisiones de manera independiente a la intervención humana, como el polvo levantado por el viento, la

vegetación, los incendios forestales, la descomposición de materia orgánica y la actividad volcánica.

Por otro lado, se identifican las fuentes antropogénicas, derivadas de las actividades humanas, las cuales se subdividen en fuentes fijas o estacionarias, correspondientes a instalaciones localizadas en un solo lugar destinadas a procesos industriales, económicos o de servicios que generan emisiones contaminantes, y fuentes móviles, que incluyen los distintos medios de transporte y la maquinaria móvil.

La contribución de estas fuentes a la contaminación del aire varía según el contexto territorial, ya que las condiciones ambientales y las características propias de cada zona influyen en los niveles de contaminación atmosférica. (García L. 2016)

2.1.7 Contaminantes

Los óxidos de carbono, principalmente el dióxido de carbono (CO_2) y el monóxido de carbono (CO), son contaminantes relevantes de la atmósfera. Aunque el CO_2 es un gas natural y no tóxico, su incremento debido a la quema de combustibles fósiles y la deforestación lo convierte en un factor clave del calentamiento global. El CO, generado en gran parte por la combustión incompleta en los motores de vehículos, es un contaminante primario de origen antropogénico y resulta tóxico para la salud humana; su control se realiza mediante sistemas que favorecen su oxidación a CO_2. (García L. 2016)

Los óxidos de nitrógeno (NOx), principalmente el NO y el NO_2, son contaminantes atmosféricos relevantes asociados a la formación de smog, ozono troposférico y lluvia ácida. El NO es el compuesto más emitido, pero se oxida rápidamente a NO_2, que es el que predomina en la atmósfera. Estos gases se generan principalmente en procesos de combustión a altas temperaturas y tienen efectos negativos sobre la salud, la vegetación y los materiales, además de

influir en la degradación del ozono. Asimismo, el óxido nitroso (N_2O) contribuye al efecto invernadero y a la destrucción de la capa de ozono, siendo emitido mayoritariamente por procesos naturales y, en menor medida, por actividades agrícolas y ganaderas. (García L. 2016)

El dióxido de azufre (SO_2) es un contaminante atmosférico que contribuye a la formación de smog y lluvia ácida, afectando principalmente el sistema respiratorio. Sus principales fuentes son la combustión de carbón y petróleo, así como procesos metalúrgicos. Los pavimentos fotocatalíticos, al incorporar dióxido de titanio, pueden ayudar a degradar el SO_2 presente en el aire, contribuyendo a la reducción de estos efectos contaminantes.

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) con entre uno y cuatro átomos de carbono se destacan como contaminantes debido a que se presentan en estado gaseoso a temperatura ambiente. El metano (CH_4) es un contaminante primario y el hidrocarburo más abundante en la atmósfera. Su producción natural ocurre por la descomposición anaerobia de materia orgánica en zonas húmedas y por las fermentaciones intestinales de los seres vivos.

En cuanto a su origen antropogénico, se genera a partir de la quema de combustibles fósiles, el cultivo de arroz y la descomposición de residuos en vertederos. Aunque no representa un riesgo directo para la salud humana, contribuye al efecto invernadero. Otros hidrocarburos volátiles también participan de manera importante en las reacciones que generan el smog fotoquímico. (García L. 2016)

2.2 Estado de la cuestión

2.2.1 Origen

Durante la década de 1970, la investigación en este ámbito adquirió un impulso significativo gracias a los estudios desarrollados por Fujishima y Honda, quienes lograron

demostrar de manera experimental la descomposición fotoinducida del agua en hidrógeno y oxígeno. Para ello, emplearon una celda electroquímica integrada por un electrodo semiconductor de dióxido de titanio y un electrodo metálico, ambos sumergidos en un medio electrolítico acuoso, lo que permitió la conversión directa de la energía luminosa en energía química almacenada en los productos de reacción generados en los electrodos. (Fabregat Martínez, 2018)

Muchos de los estudios se han focalizado en la fotoxidación de gases NOx, y sus resultados han sido altamente favorables. Por ejemplo, parte de la calle Borgo Palazzo en Bérgamo en Italia, se cubrió con adoquines fotocatalíticos (piedras de concreto recubiertas con TX Active® producido por Italcementi) y se midió la concentración de NOx durante dos semanas. Los resultados se compararon con la fracción no modificada de la calle pavimentada con asfalto. El aire circundante del pavimento fotocatalítico mostró una concentración de NOx de aproximadamente 30-40% menor que los valores de referencia (Rodríguez et al, 2024)

2.2.2 Pioneros

Italcementi es una de las empresas pioneras y más representativas en la historia de la industria cementera a nivel internacional. Su origen se remonta al año 1864, cuando fue fundada en la ciudad de Bérgamo bajo el nombre de *Società Bergamasca per la Fabbricazione del Cemento e della Calce Idraulica*, por iniciativa de Giuseppe Piccinelli. Desde sus inicios, la empresa se distinguió por su enfoque en la producción de materiales innovadores y por su contribución al desarrollo del sector de la construcción. A comienzos del siglo XX, la gestión de Italcementi pasó a manos de la familia Pesenti, etapa que marcó un punto de inflexión en la consolidación del grupo industrial. A través de procesos de fusión y expansión, se conformó una red de plantas cementeras a nivel nacional, sentando las bases de un grupo industrial sólido y tecnológicamente avanzado para la época.

> El carácter pionero de Italcementi se evidenció nuevamente hacia finales de la década de 1980, cuando inició un proceso de internacionalización temprana, consolidado en 1992 con la adquisición de Ciments Français. Esta operación constituyó uno de los hitos más relevantes de la industria italiana, al representar la mayor adquisición industrial realizada en el extranjero por una empresa del país y uno de los crecimientos corporativos más acelerados registrados en el sector. Como resultado, Italcementi pasó de ser una compañía predominantemente nacional a convertirse en un grupo multinacional, con presencia productiva en diversos países y una estructura operativa de gran escala. (Del Re. 2014)

2.3 Marco legal

El uso, diseño y construcción de pavimentos en Costa Rica se fundamenta en un conjunto de disposiciones legales y técnicas que regulan la infraestructura vial del país. En primer lugar, la Ley General de Caminos Públicos N.º 5060 establece la clasificación de la red vial nacional y asigna al Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) la responsabilidad de su planificación, administración y conservación, constituyéndose como la base legal para el desarrollo de proyectos viales a nivel nacional. (Ministerio de Obras Públicas y Transportes [MOPT], 2010)

Asimismo, la Ley de Tránsito por Vías Públicas Terrestres y Seguridad Vial N.º 9078 regula los aspectos relacionados con la circulación vehicular y la seguridad vial, los cuales deben ser considerados en el diseño geométrico y estructural de las vías públicas, influyendo indirectamente en los criterios técnicos aplicables al diseño de pavimentos urbanos y rurales. (Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, 2020)

En materia de sostenibilidad, la Ley N.º 9828 (2020) establece la obligatoriedad del uso de materiales reutilizables en proyectos de infraestructura vial estatal, promoviendo la incorporación de criterios ambientales en la selección de materiales de pavimentación. Esta normativa refuerza el interés nacional por el desarrollo de soluciones constructivas que contribuyan a la reducción del impacto ambiental asociado a la infraestructura vial. (Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, 2020)

Desde el punto de vista técnico, el diseño y construcción de pavimentos en Costa Rica se rige por el Manual de Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras, Caminos y Puentes (CR-2010)**,** oficializado y actualizado posteriormente como CR-2020 por el MOPT. Este manual establece los criterios técnicos, procedimientos constructivos y especificaciones de materiales que deben cumplirse en los proyectos viales del país. (Ministerio de Obras Públicas y Transportes [MOPT], 2010)

Finalmente, el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales de la Universidad de Costa Rica (Lanamme-UCR) desempeña un papel fundamental en la elaboración, actualización y fiscalización técnica de las normas aplicables a la red vial nacional, actuando como ente asesor especializado en materia de materiales, pavimentos y control de calidad de las obras viales. (Ministerio de Obras Públicas y Transportes [MOPT], 2010)

Capítulo 3: Marco metodológico

Esta investigación describe el enfoque, tipo y procedimientos utilizados para el desarrollo de este trabajo, el cual tiene un carácter mixto (cualitativo y cuantitativo) y se orienta al análisis de tecnologías emergentes aplicadas a pavimentos fotocatalíticos e inteligentes. Dado que en Costa Rica no se registra actualmente la implementación de este tipo de tecnología, el estudio se fundamenta en la revisión y análisis de experiencias internacionales, investigaciones y aplicaciones con el fin de evaluar su funcionamiento, beneficios y potencial de adaptación al contexto ambiental y nacional. Asimismo, la metodología adoptada permite sustentar la hipótesis planteada, destacando la importancia del uso de materiales fotocatalíticos como una alternativa innovadora para la mejora de la calidad ambiental y el bienestar de la sociedad.

3.1 Tipo de investigación

3.1.1 Naturaleza de la investigación

La investigación adopta un enfoque mixto, exploratorio y descriptivo, orientado al análisis e interpretación de información documental y experiencias internacionales, sin la aplicación de técnicas de medición cuantitativa ni ensayos experimentales, lo cual es consistente con lo señalado por Hernández-Sampieri *et al*. (2014), quienes indican que este tipo de estudios es apropiado cuando el fenómeno ha sido poco investigado en un contexto específico.

3.1.2 Carácter de la investigación

Este enfoque permite ordenar y comprender la información disponible sobre la tecnología, sin buscar explicar causas ni comprobar relaciones entre variables, lo cual es característico de las investigaciones de tipo descriptivo, según lo señalado por Hernández-Sampieri *et al*. (2014).

3.2 Sujetos y fuentes de información

3.2.1 Sujetos de información

Los sujetos de información utilizados en esta investigación están conformados por instituciones y fuentes documentales que aportaron información en materia de pavimentos fotocatalíticos. Debido al carácter descriptivo y mixto del estudio, la información utilizada se obtuvo principalmente de documentos técnicos, estudios de caso y publicaciones oficiales que se realizaron en otros países quienes implementaron esta nueva técnica.

Entre los principales sujetos de información se incluyen universidades, centros de investigación, empresas del sector de la construcción y de materiales, así como bases de datos académicas y sitios web institucionales donde se presentan experiencias internacionales sobre el uso de tecnologías fotocatalíticas en pavimentos y espacios urbanos. Estas fuentes permiten obtener información confiable y suficiente para responder al problema de investigación y cumplir con los objetivos planteados.

3.2.2 Fuentes de información

En esta investigación se emplean fuentes de información primarias y secundarias. Las fuentes primarias están conformadas por documentos técnicos y estudios relacionados de manera directa con los pavimentos fotocatalíticos, elaborados por instituciones de investigación, universidades y empresas especializadas. Estas fuentes brindan información sobre las aplicaciones y los resultados obtenidos con esta tecnología, lo que permite comparar distintas experiencias desarrolladas a nivel internacional.

Las fuentes secundarias incluyen documentos de apoyo como libros, tesis, normas, artículos de revisión y publicaciones electrónicas. La selección de estas fuentes se realizó tomando en cuenta

su confiabilidad, su relación con el tema de estudio y su aporte al logro de los objetivos de la investigación.

3.3 Muestra y población

3.3.3.1 Proyecto Villaverde

El proyecto “Impulso de la pavimentación sostenible en Villaverde (Madrid)”, cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), consistió en la aplicación experimental de materiales fotocatalíticos en pavimentos urbanos con el objetivo de evaluar su capacidad para reducir contaminantes atmosféricos, especialmente óxidos de nitrógeno (NOx), en condiciones reales de uso. (El Ayuntamiento de Madrid, 2015)

La intervención incluyó la aplicación de una emulsión acuosa fotocatalítica sobre pavimentos existentes como se muestran en las Figuras 18 y 19, la colocación de prefabricados de hormigón con dióxido de titanio (TiO_2) y el uso de pinturas fotocatalíticas en un túnel urbano, permitiendo comparar distintas soluciones tecnológicas.

El desempeño de los materiales se evaluó mediante ensayos de laboratorio, mediciones de calidad del aire y seguimiento temporal de la actividad fotocatalítica, generando información técnica relevante sobre su eficacia y durabilidad en entornos urbanos reales, lo que convierte a este proyecto en una referencia clave para el análisis comparativo de pavimentos descontaminantes. (El Ayuntamiento de Madrid, 2015)

La finalidad principal del proyecto consiste en evaluar el impacto de la aplicación de pavimentos fotocatalíticos a escala real sobre la calidad del aire, específicamente en relación con la disminución de las concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO_2).

Figura 18- Proyecto Feder en Villaverde, Aplicación de la emulsión acuosa en los tramos seleccionados en el municipio de Villaverde Madrid España.



Fuente: El Ayuntamiento de Madrid, (2015)

Figura 19- Proyecto Feder en Villaverde



Fuente: El Ayuntamiento de Madrid, (2015)

3.3.3.2 Países Bajos

En los Países Bajos se desarrolló un protocolo de medición específico para proyectos de aplicación de materiales fotocatalíticos en infraestructura urbana, el cual amplía el análisis más allá de los contaminantes atmosféricos, incorporando la evaluación de variables ambientales y operativas adicionales. Entre los parámetros considerados se incluyen la temperatura ambiente, la dirección e intensidad del viento, la radiación solar tanto en el rango ultravioleta como en el visible, la presión atmosférica, el volumen de tráfico vehicular y la concentración de ozono.

Este protocolo fue diseñado y validado durante la ejecución de un proyecto piloto que consistió en el recubrimiento con materiales de construcción fotocatalíticos de una calle urbana ubicada en la ciudad de Hengelo (figura 20 y 21), Países Bajos, con una superficie aproximada de 170 m de longitud por 5,5 m de ancho. Dicho proyecto forma parte de la muestra analizada en la presente investigación, ya que aporta un caso de estudio documentado que integra mediciones en condiciones reales de operación y un enfoque metodológico integral, permitiendo evaluar la influencia de múltiples variables en la eficiencia de los pavimentos fotocatalíticos para la mejora de la calidad del aire urbano. (Pérez S. 2016)

Figura 20- Calle Castorweg en Hengelo (Holanda). Antes de ser repavimentada con materiales de construcción fotocatalíticos.



Fuente: Pérez P, (2016)

Figura 21-Calle Castorweg en Hengelo (Holanda). Después de ser repavimentada con materiales de construcción fotocatalíticos.



Fuente: Pérez S, (2016)

3.3.3.3 Vía Pórpora

La intervención realizada en el túnel de Vía Pórpora (figura 22), en la ciudad de Milán (Italia), consistió en un proceso integral de rehabilitación en el que se llevó a cabo simultáneamente la sustitución del pavimento existente por un pavimento de hormigón fotocatalítico de altas prestaciones y el tratamiento del techo mediante la aplicación de una pintura con propiedades fotocatalíticas. Esta actuación permitió incorporar materiales activos en distintas superficies del túnel con el objetivo de mejorar la calidad del aire en un entorno urbano cerrado y de elevada carga contaminante. (Pérez S. 2016)

Figura 22- Colocación del pavimento fotocatalítico y aplicación de pintura con propiedades fotocatalíticas en el túnel de Via Pórpora



Fuente: Sugráñez Pérez, (2016)

La efectividad de los pavimentos fotocatalíticos analizados se demuestra a través de la evidencia empírica documentada en proyectos reales desarrollados en España, Países Bajos e Italia, donde se registraron reducciones medibles de óxidos de nitrógeno tras su implementación. El análisis comparativo evidencia que, si bien las aplicaciones superficiales mediante emulsiones acuosas presentan altos rendimientos iniciales, su durabilidad es limitada. En contraste, los pavimentos de hormigón fotocatalítico, especialmente aquellos ejecutados con elementos prefabricados, mantienen una actividad fotocatalítica más estable en el tiempo, incluso en entornos urbanos confinados. En consecuencia, se deduce que esta tecnología ofrece un mayor potencial para la reducción sostenida de contaminantes atmosféricos en la infraestructura vial urbana.

3.3.3.4 Pavimentos Permeables

Los pavimentos permeables surgen como una alternativa para mitigar la escorrentía superficial y reducir los caudales pico, los cuales están asociados a la generación de inundaciones en zonas urbanizadas donde la cuenca ha perdido su capacidad natural de infiltración. Estos sistemas tienen como finalidad permitir la infiltración o el almacenamiento temporal del agua pluvial, contribuyendo a amortiguar el volumen de precipitación y a incrementar el tiempo de concentración. (Neciosup N. 2024)

Su implementación es recomendable en áreas de baja pendiente y con niveles de tráfico reducidos, tales como estacionamientos, vías de circulación ligera y aceras, entre otros, siendo además necesario que el nivel freático se encuentre a una profundidad suficiente respecto al fondo del sistema de almacenamiento, con el fin de evitar interferencias que disminuyan su capacidad de retención. En la Figura 23 se presenta un ejemplo de la aplicación de esta tecnología en infraestructura vial permeable. (Neciosup N. 2024)

Un estudio desarrollado en Valencia (España) demostró que los pavimentos permeables pueden alcanzar eficiencias de retención de microplásticos entre el 89% y el 100%, gracias a su estructura porosa y al uso de geotextiles. Estos sistemas actúan como filtros que capturan partículas contaminantes presentes en la escorrentía urbana, evidenciando su potencial como solución para la reducción de la contaminación difusa y la protección de los ecosistemas acuáticos. (Cadena SER. 2024)

Los resultados reportados corresponden a ensayos experimentales realizados bajo condiciones controladas, en los cuales se simularon eventos de lluvia para evaluar la capacidad de retención de microplásticos, sin establecer un periodo específico de tiempo de monitoreo.

Figura 23- Pavimento permeable, ubicado en Valencia España, como solución para la extracción de microplásticos.



Fuente: Cadena SER, (2024)

3.3.3.5 Pavimentos Reciclables

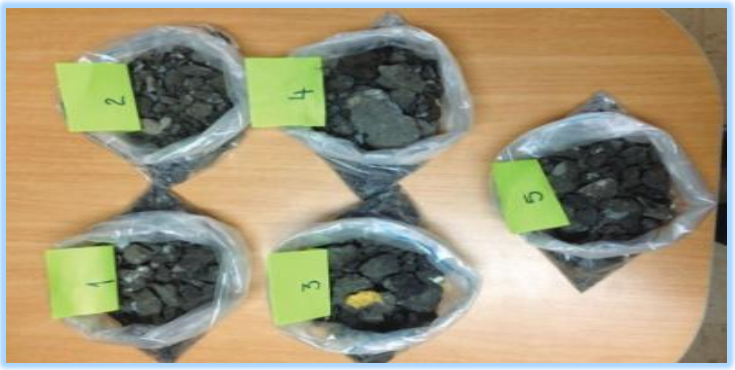
El uso de mezclas asfálticas con pavimento reciclado (RAP) y caucho reciclado proveniente de neumáticos (muestras disponibles en la figura 24) ha demostrado mejorar el desempeño mecánico de los pavimentos flexibles, especialmente en términos de resistencia a la fatiga y al ahuellamiento. Asimismo, esta tecnología permite la reutilización de residuos, reduciendo la necesidad de materiales vírgenes y contribuyendo a la disminución de emisiones contaminantes, lo que la convierte en una alternativa viable para su aplicación en vías secundarias y terciarias. (Calderón y Sánchez. 2019)

El diseño experimental de mezclas asfálticas con materiales reciclados requiere una caracterización detallada de cada uno de sus componentes, incluyendo el pavimento asfáltico recuperado (RAP) y el grano de caucho reciclado (GCR), este último proveniente de neumáticos fuera de uso. En el estudio desarrollado por Luis Calderón y Juan Sánchez (2019), el RAP fue evaluado en términos de su granulometría y contenido de ligante envejecido, el cual presenta mayor rigidez debido a procesos de oxidación, mientras que el GCR fue analizado según su tamaño de partícula y su comportamiento elástico, aportando flexibilidad a la mezcla.

A partir de estos materiales, se diseñaron diferentes combinaciones variando sus proporciones y ajustando el contenido de ligante asfáltico virgen, con el fin de lograr un equilibrio adecuado entre rigidez y deformabilidad. Posteriormente, se elaboraron probetas compactadas en laboratorio bajo condiciones controladas, las cuales fueron sometidas a ensayos de desempeño como resistencia al ahuellamiento y fatiga.

Los resultados evidenciaron que la incorporación conjunta de RAP y GCR permite mejorar la resistencia a deformaciones permanentes y aumentar la vida útil del pavimento, siempre que se optimice la dosificación de los materiales. De esta manera, se demuestra que el uso de mezclas recicladas no solo es técnicamente viable, sino que también representa una alternativa sostenible al reducir el consumo de materiales vírgenes y aprovechar residuos de difícil disposición final (Calderón y Sánchez. 2019).

Figura 24- Muestras de RAP de los diferentes acoplos obtenidos.



Fuente: Calderón y Sánche, (2019)

3.3.3.6 Asfalto de baja Temperatura(WMA)

Las mezclas asfálticas de baja temperatura se caracterizan por elaborarse en un rango aproximado de 110 °C a 130 °C. En contraste, las mezclas asfálticas en caliente se producen a temperaturas más elevadas, generalmente entre 140 °C y 180 °C, siendo común una temperatura cercana a 160 °C empleando betún caliente como ligante. Una de las principales ventajas de las

mezclas de baja temperatura radica en que su producción y colocación pueden realizarse de manera similar a los procesos convencionales, sin requerir modificaciones significativas en los métodos constructivos. (Wirtgen Group. s.f.)

El proyecto **Life Heatland**, desarrollado en la ciudad de Murcia, España, constituye una iniciativa orientada a mitigar el efecto de isla de calor urbana mediante la implementación de pavimentos asfálticos de alta reflectancia, conocidos como asfaltos fríos o cool pavements. Esta investigación, impulsada por el Centro Tecnológico de la Construcción en colaboración con diversas entidades, contempló la intervención de aproximadamente 24.000 m² distribuidos en siete vías urbanas, donde seis fueron pavimentadas con mezclas modificadas y una se mantuvo como tramo de control con asfalto convencional. En la Figura 25 se presenta un ejemplo de la aplicación de esta tecnología.

El material desarrollado se caracteriza por el uso de un aglutinante sintético transparente, combinado con agregados minerales y pigmentos reflectantes a base de óxidos, lo que permite incrementar la reflectancia solar y reducir la absorción térmica. La metodología incluyó la instalación de sistemas de monitoreo continuo que registraron variables como temperatura superficial y ambiental, humedad, radiación solar, ruido e iluminación, con mediciones periódicas a lo largo de varios años, lo cual permitió evaluar el comportamiento del pavimento en condiciones reales.

Los resultados evidenciaron reducciones de hasta 15 °C en la temperatura superficial y aproximadamente 2 °C en la temperatura del aire, además de una disminución del ruido del tráfico cercana a 3 dB y un incremento en la iluminación natural. Estos beneficios contribuyen a reducir el consumo energético asociado al alumbrado público y a la climatización de edificaciones,

demostrando la viabilidad técnica y ambiental de este tipo de pavimentos como una solución sostenible y replicable en entornos urbanos. (Life Heatland. 2021)

Figura 25- Proyecto Life Heatland en Murcia España



Fuente: Life Heatland, (2021)

3.3.3.7 Pavimentos Energéticos

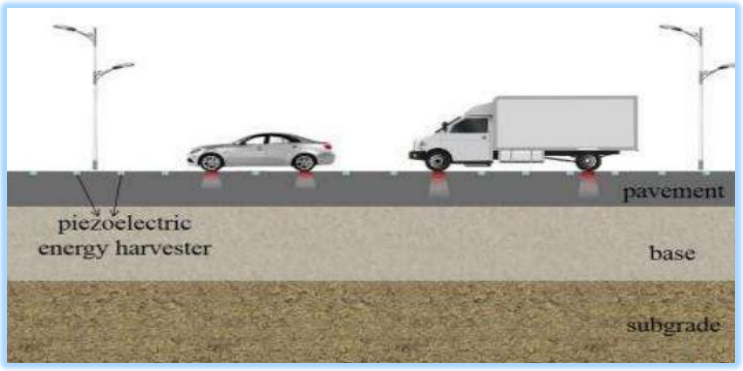
Los pavimentos flexibles han comenzado a ser estudiados como una fuente potencial de energía renovable debido a su constante exposición a condiciones ambientales y cargas vehiculares. Según Rodríguez *et al*. (2015), el asfalto puede comportarse como un acumulador térmico, capaz de captar energía solar y almacenarla en forma de calor. A partir de este principio, se han desarrollado sistemas que incorporan tuberías dentro del pavimento para la circulación de fluidos, permitiendo la extracción de energía térmica y su posterior aprovechamiento. Esta tecnología representa una alternativa innovadora para transformar las condiciones adversas del pavimento en oportunidades de generación energética, contribuyendo al desarrollo de infraestructuras más sostenibles.

Un ejemplo reciente de aprovechamiento energético en pavimentos corresponde al desarrollo de recolectores energéticos viales (REPV), los cuales transforman la energía mecánica generada por el tránsito vehicular en energía eléctrica. En este contexto, José S. Tapia Nevárez (2024) propone el rediseño de un sistema basado en un mecanismo de cuatro barras tipo manivela–

balancín, el cual se activa mediante la deformación inducida por el paso de los vehículos sobre la superficie del pavimento como se observa en la figura 26. El dispositivo está compuesto por elementos estructurales metálicos de alta resistencia, diseñados para soportar cargas repetitivas, así como por un sistema de transmisión mecánica acoplado a un generador eléctrico. Además, el diseño contempla la integración del sistema dentro de la estructura del pavimento flexible, asegurando su funcionalidad sin comprometer la seguridad vial ni la durabilidad de la capa de rodadura.

Los resultados del estudio indican que este tipo de tecnología puede alcanzar eficiencias entre el 48% y el 65%, dependiendo de las condiciones de operación, lo que evidencia su potencial como alternativa para la generación de energía en infraestructura vial. Asimismo, se plantea su aplicación en zonas de alto tránsito, como accesos vehiculares y áreas urbanas, con el objetivo de alimentar sistemas de iluminación y señalización, contribuyendo al desarrollo de soluciones sostenibles y energéticamente eficientes.

Figura 26- Se muestra el esquema de la capa del suelo en donde se colocarían los piezoeléctricos a una distancia igual.

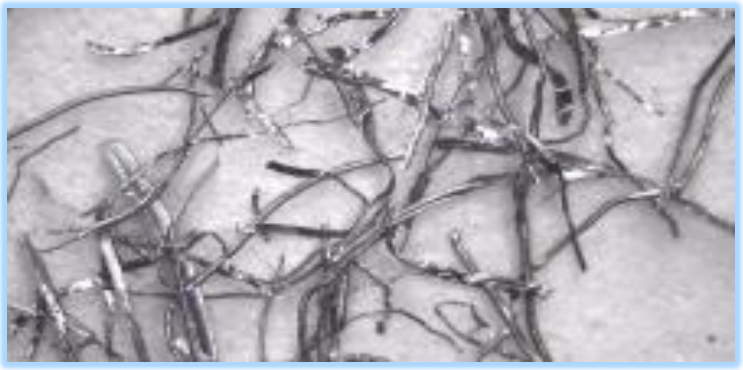


Fuente: Navárez J, (2024)

3.3.3.8 Pavimentos autorreparables

Los pavimentos autorreparables representan una de las innovaciones más relevantes dentro de los pavimentos inteligentes, al permitir la recuperación parcial de sus propiedades mecánicas sin intervención directa. En este sentido, estudios como el desarrollado por Álvaro González *et al*. (2018) proponen el uso de mezclas asfálticas modificadas con materiales metálicos, tales como fibras de lana de acero y virutas metálicas (Figura 27), que permiten inducir el calentamiento del pavimento mediante microondas. Este proceso eleva la temperatura del material, favoreciendo el flujo del betún y el cierre de grietas, aprovechando su comportamiento termoplástico. Los resultados experimentales evidencian que estas mezclas pueden recuperar aproximadamente el 50% de su resistencia inicial tras procesos de agrietamiento, incluso después de varios ciclos de reparación. Asimismo, se destaca que la incorporación de materiales reciclados como el pavimento asfáltico recuperado (RAP) puede afectar ligeramente la eficiencia del proceso, aunque sin comprometer su viabilidad. Este tipo de tecnología presenta un alto potencial para incrementar la vida útil de los pavimentos y reducir los costos de mantenimiento, consolidándose como una alternativa sostenible en la infraestructura vial moderna.

Figura 27- Imagen de las virutas metálicas utilizadas para el diseño de mezcla.



Fuente: Gonzales A *et al*, (2018)

3.3.3.9 Pavimentos auto sensorizados

Los pavimentos sensorizados constituyen una de las principales innovaciones dentro de los pavimentos inteligentes, al permitir el monitoreo continuo de su estado estructural mediante la integración de materiales con capacidad de auto-sensorización. En este sentido, estudios recientes desarrollados por la ASEFMA (2024) han demostrado la viabilidad de diseñar mezclas bituminosas modificadas con fibras de carbono (Figura 29), capaces de actuar como sensores intrínsecos. Estas mezclas presentan variaciones en su resistencia eléctrica cuando son sometidas a cargas o deformaciones, lo que permite detectar en tiempo real cambios en su comportamiento estructural, tales como esfuerzos, deformaciones y deterioro. Esta tecnología facilita la implementación de estrategias de mantenimiento predictivo y contribuye a la digitalización de la infraestructura vial, posicionándose como un elemento clave en el desarrollo de carreteras inteligentes.

Figura 29- Fibras de carbono



Fuente: ASEFMA, (2024)

3.3.1 Tipo de muestra

Según Hernández, Fernández y Baptista (2014), el tipo de muestra en una investigación depende del enfoque metodológico adoptado. En el presente estudio, de enfoque mixto cualitativo–cuantitativo y de carácter documental y diseño no experimental, no se recurre a un muestreo probabilístico, debido a que no se realiza trabajo de campo ni se recopilan datos primarios.

Por lo anterior, se emplea un muestreo no probabilístico de tipo intencional, basado en la selección de proyectos que cumplen con criterios específicos alineados con los objetivos de la investigación. La muestra está conformada por proyectos internacionales en los que se implementaron pavimentos fotocatalíticos en vías urbanas y que cuentan con información técnica y científica documentada, tanto descriptiva como numérica, sobre su desempeño en la reducción de contaminantes atmosféricos, tales como óxidos de nitrógeno (NOx), entre otros.

3.3.2 Descripción de la muestra

La muestra de la investigación está compuesta por proyectos internacionales seleccionados mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional, desarrollados en España, Países Bajos e Italia. Estos proyectos se caracterizan por la aplicación de pavimentos fotocatalíticos en vías urbanas y por contar con estudios técnicos y científicos que documentan su desempeño en la reducción de contaminantes atmosféricos. Este tipo de muestreo es congruente con investigaciones de enfoque mixto (Hernández, Fernández & Baptista, 2014).

3.3.3 Descripción estadística de la población en estudio

La investigación se desarrolla bajo un enfoque mixto y se fundamenta en la revisión de fuentes documentales, por lo que no se emplean fórmulas estadísticas para la definición de la muestra, dado que no se pretende alcanzar una representatividad numérica. Según lo señalado por Hernández, Fernández y Baptista (2014), en este tipo de estudios la selección de los casos se realiza de manera intencional, atendiendo a la relevancia y a la disponibilidad de la información.

La población de estudio está constituida por proyectos internacionales en los que se han implementado pavimentos fotocatalíticos en vías urbanas y que disponen de información técnica confiable. La muestra está conformada por los proyectos más representativos identificados en la literatura científica, lo que permite desarrollar un análisis pertinente del objeto de estudio.

3.4 Instrumentos y técnicas de recolección de datos

Los instrumentos y técnicas de recolección de datos se definieron de acuerdo con los objetivos de la investigación y su enfoque mixto. Al tratarse de un estudio documental, el principal instrumento fue la revisión de fuentes secundarias, tales como artículos científicos, tesis e informes técnicos sobre proyectos de pavimentos fotocatalíticos o tecnologías utilizadas con la misma propiedad para la eliminación de los contaminantes. La técnica utilizada fue el análisis documental, mediante el cual se recopiló y organizó la información relevante para su posterior análisis comparativo.

3.4.1 Diseño de instrumentos

Este análisis se diseñó para comparar la eficiencia de proyectos internacionales en la reducción de contaminantes atmosféricos mediante el uso de tecnologías fotocatalíticos. Debido al enfoque mixto y documental del estudio, no se aplicaron instrumentos de medición directa, sino que se

utilizó información obtenida de estudios científicos existentes como revistas y otros aportes de información académica.

El instrumento consistió en una matriz comparativa en la que se organizó la información relevante de cada proyecto, considerando aspectos como el tipo de pavimento, el contaminante analizado, el porcentaje de reducción reportado, la durabilidad del efecto y el entorno de aplicación. Esta herramienta permitió comparar los proyectos desarrollados en España, Países Bajos e Italia e identificar la tecnología con mayor eficiencia en la reducción de contaminantes del aire junto a otras tecnologías que incorporan el mismo fin,

3.4.2 Procedimiento de intervención

El procedimiento se desarrolló bajo un enfoque mixto y documental. Inicialmente, se seleccionaron proyectos internacionales sobre pavimentos fotocatalíticos aplicados en vías urbanas de España, Países Bajos e Italia. Posteriormente, se recopiló información a partir de fuentes secundarias confiables, como artículos científicos, tesis e informes técnicos, de las cuales se extrajeron los datos relevantes relacionados con el tipo de pavimento, los contaminantes evaluados y los resultados obtenidos.

La información recopilada fue organizada en una matriz comparativa que permitió analizar y contrastar los proyectos seleccionados, con el objetivo de identificar la tecnología fotocatalítica más eficiente en la reducción de contaminantes atmosféricos. Al tratarse de un estudio documental, no se requirió la aplicación de instrumentos a personas ni la gestión de autorizaciones institucionales.

3.5 Estrategia de análisis de datos

3.5.1 Estrategia de intervención

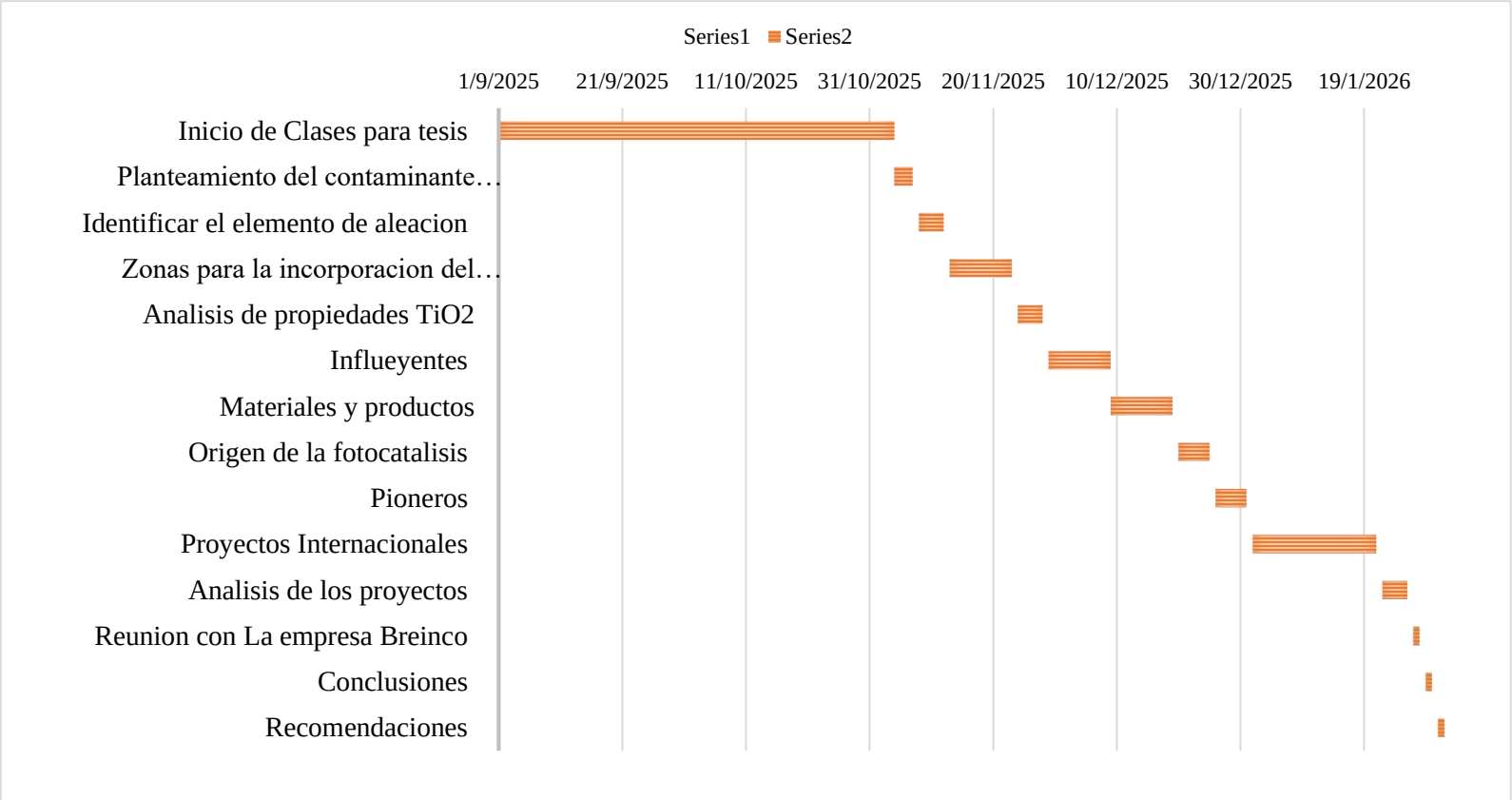
Manteniendo el enfoque de la investigación mixta, toda la información recopilada proviene de fuentes confiables, tales como revistas científicas, trabajos académicos tipo tesis y material audiovisual elaborado por empresas internacionales que promueven el uso de tecnologías fotocatalíticas en el ámbito de la construcción.

Los proyectos analizados, desarrollados en países reconocidos por su innovación tecnológica, cuentan con estudios que respaldan su aplicación, desde el análisis inicial del área de intervención hasta pruebas de laboratorio de los materiales utilizados. Estos estudios permiten evaluar la eficiencia del producto y su capacidad para reducir contaminantes. Asimismo, se consideran las condiciones climáticas propias de cada región, ya que estas pueden influir en el comportamiento y la composición del material fotocatalítico.

La investigación se desarrolló de manera interpretativa y se apoyó en la triangulación metodológica, entendida como la comparación de información obtenida a partir de distintas fuentes secundarias (Hernández, Fernández y Baptista, 2014). Este apartado tiene como finalidad describir el procedimiento de análisis aplicado a cada una de las tecnologías fotocatalíticas estudiadas.

3.5.2 Diagrama de Gantt

Tabla 2-Cronograma de actividades



Fuente: Elaboración propia. Jonathan, Aguilar (2025)

Capítulo 4: Análisis e interpretación de los resultados

La finalidad del apartado se fundamentó en una revisión e investigación de información a partir de fuentes documentales confiables tales como artículos científicos, proyectos internacionales en donde se implementó esta tecnología de pavimentos, Es necesario resaltar el enfoque ambiental, en el que los resultados indican que la tecnología fotocatalítica contribuye positivamente a la mejora de la calidad del aire urbano, actuando como una herramienta complementaria a otras estrategias de control de la contaminación. No obstante, mediante el avance de la investigación se refleja que la efectividad del pavimento depende de factores como la intensidad de la radiación solar, el nivel de tráfico, el mantenimiento de la superficie y las condiciones climáticas del entorno donde se aplica.

4.1 Presentación de los resultados para las variables o categorías de análisis

4.1.1 Países Bajos

En la ciudad de Hengelo, Países Bajos, se desarrolló un proyecto a escala real para evaluar la eficacia de un pavimento fotocatalítico con dióxido de titanio (TiO_2), aplicado en un tramo de 170 m y comparado con una sección de 100 m pavimentada con adoquines convencionales como área de control (como se observan en la figura 30). El monitoreo se realizó durante 26 días distribuidos en más de un año, considerando variables de tráfico, concentraciones de NO, NO_2 y ozono, así como condiciones meteorológicas y radiación solar. Los resultados evidenciaron una reducción promedio del 19 % en la concentración de NO_2 en el tramo fotocatalítico, alcanzando el 28 % en horas de la tarde y hasta un 45 % bajo condiciones climáticas favorables, en comparación con la calle de control. (Ballari et al., 2013)

Figura 30- Calle Castorweg en Hengelo (Holanda)



Fuente: Ballari *et al*. 2013

4.1.2 Villaverde

Hasta la fecha, no se dispone de publicaciones oficiales que presenten de manera detallada los resultados finales del proyecto en Villaverde Madrid España. No obstante, durante jornadas técnicas y congresos en los que se ha expuesto esta experiencia, representantes del Ayuntamiento de Madrid han señalado diversas limitaciones asociadas al estudio. Entre ellas, se destaca la complejidad en la interpretación de las mediciones obtenidas mediante distintos equipos y sensores utilizados para el monitoreo de la calidad del aire. Asimismo, se ha indicado que la aplicación de esta tecnología no produjo incrementos en las concentraciones de ozono (O_3) ni en los niveles de material particulado en suspensión, específicamente PM2,5 y PM10, lo cual resulta relevante desde el punto de vista de la salud pública. Sin embargo, también se ha manifestado que, tras un período aproximado de un año, los resultados asociados a la eficiencia descontaminante del tratamiento resultaron prácticamente insignificantes. (Almazán Cruzado, 2018)

Por otra parte, fabricantes y empresas encargadas han señalado que una parte del tratamiento fotocatalítico fue ejecutada sobre pavimentos que se encontraban en condiciones deficientes, así como bajo circunstancias meteorológicas desfavorables, como la presencia de lluvias durante su

aplicación. Adicionalmente, no se cuenta con información precisa respecto a las labores de mantenimiento realizadas posteriormente ni sobre la frecuencia con la que estas pudieron haberse llevado a cabo por parte del Ayuntamiento tras la intervención. (Almazán Cruzado, 2018)

Figura 31- Analizador automático de monitoreo continúo utilizado para la medición de óxidos de nitrógeno (NO, NO_2 y NOx) y ozono (O_3) en aire ambiente, instalado en la plaza de Ágata.



Fuente: Almazán Cruzado. 2018

4.1.3 Via Pórpora

En el túnel de Via Pórpora en Milán se implementó un proyecto experimental de rehabilitación urbana que incluyó la aplicación de pavimento de hormigón fotocatalítico **y** pintura fotocatalítica en el techo del túnel como se aprecia en la figura 32. Esta infraestructura, de 104 m de longitud y alto flujo vehicular, fue objeto de campañas de monitoreo de tráfico y calidad del aire realizadas por la Agencia de Movilidad y Medio Ambiente y ARPA Lombardia. Los resultados mostraron una reducción aproximada del 22,7 % en las concentraciones de NO_2**,** incluso bajo condiciones de iluminación menos favorables, lo que evidencia el potencial de los materiales fotocatalíticos en infraestructuras viales cerradas. (*TX Active — Principio activo fotocatalítico*, 2013)

Figura 32- Análisis del curado y colocación del pavimento fotocatalítico.



Fuente: TX Active. 2013

4.1.4 Pavimentos permeables

Los pavimentos permeables demostraron ser una tecnología eficiente para el control de escorrentías urbanas y la retención de contaminantes presentes en el agua superficial. Los estudios analizados evidenciaron capacidades de retención de microplásticos entre un 89 % y un 100 %, gracias a la estructura porosa del sistema y al uso de geotextiles filtrantes. Aunque esta tecnología no actúa directamente sobre contaminantes atmosféricos como los NOx, sí contribuye de manera indirecta a la sostenibilidad ambiental urbana mediante la reducción de contaminación difusa y la protección de ecosistemas acuáticos. Asimismo, su implementación favorece la infiltración del agua y disminuye la carga sobre los sistemas de drenaje urbano. Muestra terminada representada en la figura 33 (Neciosup N. 2024)

Figura 33- Concreto permeable



Fuente: Neciosup N. 2024

4.1.5 Pavimentos reciclables

Los pavimentos reciclables elaborados con RAP y caucho reciclado evidenciaron mejoras importantes en el desempeño mecánico de las mezclas asfálticas, especialmente en resistencia a la fatiga y deformación permanente. Además del beneficio estructural, esta tecnología contribuye a disminuir el impacto ambiental asociado a la acumulación de residuos de construcción y neumáticos fuera de uso, promoviendo la economía circular en la infraestructura vial. La reutilización de materiales reduce el consumo de recursos naturales y las emisiones asociadas a la producción de mezclas nuevas. (Calderón y Sánchez. 2019)

Figura 34- Falla de la briqueta RAP a base de las muestras.



Fuente: Calderón y Sánche, (2019)

4.1.6 Asfalto de baja temperatura (WMA)

Los asfaltos de baja temperatura (WMA) mostraron resultados positivos en términos de sostenibilidad ambiental y eficiencia energética (Figura 35). Los estudios desarrollados en Murcia, España, evidenciaron reducciones de hasta 15 °C en la temperatura superficial del pavimento y aproximadamente 2 °C en la temperatura ambiental.

Asimismo, se reportaron disminuciones en contaminación acústica y consumo energético urbano. Estas mezclas permiten reducir emisiones durante su fabricación debido a menores temperaturas de producción, favoreciendo la disminución de gases contaminantes y el ahorro energético en procesos constructivos. (Wirtgen Group. s.f.)

Figura 35- Asfalto de baja temperatura.



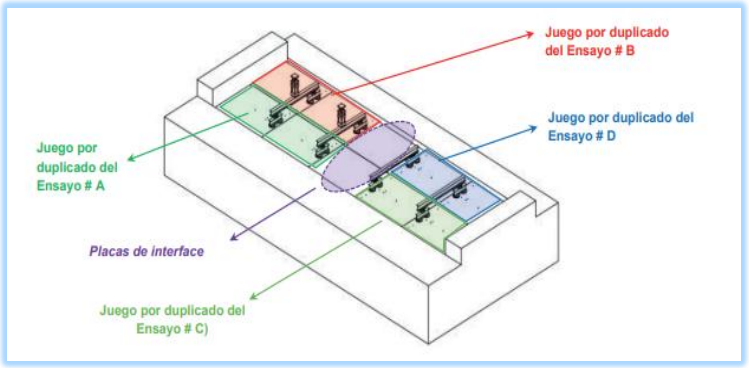
Fuente: Wirtgen group. Sf

4.1.7 Pavimentos energéticos

Los pavimentos energéticos representan una innovación orientada al aprovechamiento de energía térmica y mecánica generada en la infraestructura vial. Los estudios revisados indican que los pavimentos flexibles poseen capacidad para absorber y almacenar calor proveniente de la radiación solar, permitiendo su posible aprovechamiento como fuente de energía renovable.

Aunque esta tecnología aún se encuentra en etapas de desarrollo experimental, presenta un alto potencial para contribuir a ciudades sostenibles mediante la generación alternativa de energía y la reducción indirecta del impacto ambiental asociado al consumo energético convencional. En la Figura 36 se muestra el montaje del balancín. (Rodríguez *et al*. 2015)

Figura 36- Montaje para el ensayo elaborado en pavimentos energéticos.



Fuente: Rodríguez *et al*. (2015)

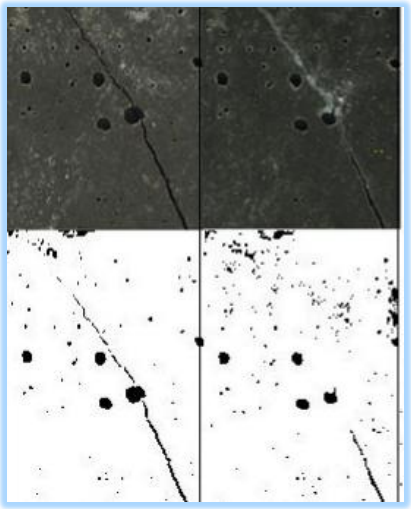
4.1.8 Pavimentos Autorreparables

Los pavimentos autorreparables representan una de las tecnologías emergentes más innovadoras dentro de la infraestructura vial sostenible, debido a su capacidad de sellar fisuras de manera autónoma y prolongar la vida útil de los materiales. Entre las investigaciones analizadas destaca el uso de bacterias del tipo *Bacillus Pseudofirmus* incorporadas dentro de mezclas de hormigón, las cuales, al entrar en contacto con agua y oxígeno tras la aparición de grietas, activan procesos biológicos capaces de precipitar carbonato de calcio ($CaCO_3$), permitiendo el sellado parcial o total de las fisuras. (González et al. 2018)

Los resultados experimentales evidenciaron sellado de grietas de hasta 0.3 mm a temperaturas cercanas a 23 °C como se visualizan en la figura 37, mientras que temperaturas muy bajas o elevadas disminuyeron considerablemente la eficiencia del proceso biológico. Esta tecnología contribuye significativamente a la sostenibilidad de la infraestructura vial, ya que reduce necesidades de mantenimiento correctivo, disminuye el consumo de materiales adicionales y prolonga la durabilidad estructural del pavimento. Asimismo, representa una alternativa

innovadora orientada al desarrollo de materiales inteligentes capaces de responder de forma autónoma al deterioro producido por factores ambientales y cargas vehiculares. (González *et al*. 2018)

Figura 37- Proceso de formación de grieta y sellado después de los 0 – 14 días de sumergida en agua. Se observa un sellado de al menos 0.26mm.



Fuente: González *et al*. 2018

4.1.9 Pavimentos sensorizados

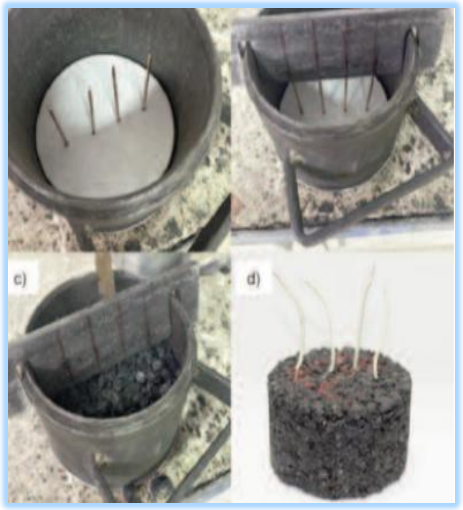
Los pavimentos auto sensorizados representan una tecnología innovadora dentro de la infraestructura vial inteligente, ya que permiten monitorear en tiempo real el comportamiento estructural y operativo de las carreteras mediante sensores incorporados en la mezcla asfáltica o en diferentes capas del pavimento. Estos sistemas son capaces de registrar variables como deformaciones, cargas vehiculares, temperatura, humedad, vibraciones y aparición de fisuras, proporcionando información continua sobre el estado de la vía y su desempeño ante las condiciones de servicio. (ASEFMA. 2024)

La capacidad de monitoreo permanente favorece una gestión más eficiente del mantenimiento vial, debido a que permite identificar de manera temprana posibles fallas estructurales y programar intervenciones preventivas antes de que el deterioro alcance niveles críticos. Asimismo, esta tecnología contribuye a mejorar la seguridad operacional y optimizar la toma de decisiones en la administración de infraestructura vial, reduciendo costos de mantenimiento y prolongando la vida útil del pavimento.

Aunque su función principal no está orientada directamente a la eliminación de contaminantes atmosféricos, los pavimentos auto sensorizados generan beneficios ambientales indirectos al disminuir la frecuencia de rehabilitaciones y reconstrucciones, reduciendo el consumo de materiales, maquinaria y energía asociados a los procesos constructivos.

De igual manera, el monitoreo inteligente permite mejorar la eficiencia de la movilidad urbana y minimizar interrupciones prolongadas en las vías, contribuyendo así al desarrollo de infraestructuras más sostenibles y tecnológicamente avanzadas. En la figura 38 se muestran los moldes compactados con la incorporación de los electrodos. (ASEFMA. 2024)

Figura 38- Se puede observar, que la mezcla fue compactada dentro del molde y, posteriormente, se conectaron electrodos con cables de cobre flexibles para realizar las mediciones eléctricas.



Fuente: ASEFMA. 2024

4.2 Análisis y discusión de los resultados para las variables o categorías de análisis

El análisis se estructura con base en las variables definidas en la investigación, lo que permite interpretar la eficiencia de cada tecnología en función de su tipo, condiciones de aplicación y desempeño en la reducción de contaminantes atmosféricos.

En los casos analizados se identificaron tres enfoques distintos para la incorporación de la propiedad fotocatalítica. En Holanda se utilizó un pavimento con propiedades fotocatalíticas incorporadas directamente en el material, lo que permitió una interacción permanente entre el contaminante atmosférico y la superficie activa. En España se aplicó una emulsión acuosa con propiedad fotocatalítica sobre pavimentos existentes(Alcobendas), mientras que en Italia se empleó un pavimento fotocatalítico en un túnel, complementado con un recubrimiento de pintura con la misma propiedad.

Estos proyectos internacionales evidencian diferencias significativas en cuanto a su desempeño. Las tecnologías basadas en pavimentos fotocatalíticos, como las implementadas en Holanda e Italia, presentaron una mayor estabilidad y continuidad en la acción fotocatalítica, debido a que el material activo forma parte integral de la superficie. En contraste, la emulsión acuosa aplicada en España mostró una menor capacidad de permanencia, lo que limitó su efectividad en condiciones reales de operación.

Uno de los factores determinantes identificados en el análisis fue el estado del pavimento previo a la aplicación de la tecnología. En el caso de España, la emulsión acuosa fue aplicada sobre pavimentos en condiciones deficientes, con presencia de desgaste y deterioro superficial sumado el estado climático que no ayudo mucho a la hora de la colocación lo que redujo significativamente la adherencia y la durabilidad del material fotocatalítico.

Esta limitación en la durabilidad por factores climáticos y superficiales como se observa en el caso de España(Villaverde) es precisamente el vacío que las nuevas tecnologías de pavimentos buscan resolver. Al integrar estas variables, se evidencia que la evolución de la ingeniería vial ya no solo busca mitigar la contaminación atmosférica en puntos específicos. El objetivo real de las nuevas tecnologías es proporcionar herramientas versátiles que hagan la construcción más eficiente y garanticen la resiliencia a largo plazo de toda la infraestructura.

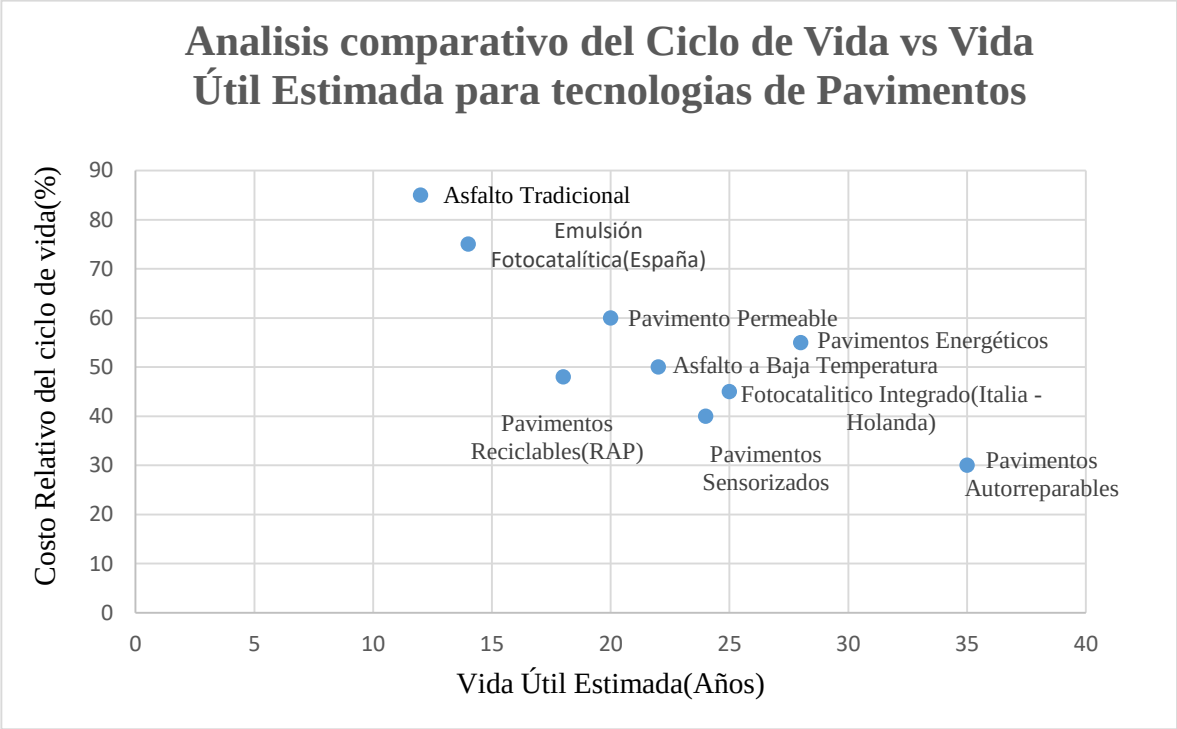
Los resultados analizados permiten establecer que la implementación de tecnologías fotocatalíticas e inteligentes debe considerar no solo el tipo de producto utilizado, sino también el contexto físico y ambiental en el que se aplica. La evidencia sugiere que los pavimentos con propiedades fotocatalíticas incorporadas ofrecen un desempeño más confiable para la reducción

de contaminantes atmosféricos, especialmente en entornos con alta variabilidad climática y condiciones de tráfico intenso.

De manera complementaria, el análisis de otras tecnologías emergentes aplicadas a infraestructura vial, tales como pavimentos permeables, energéticos, autorreparables y auto sensorizados y los ya mencionados, evidencia una tendencia internacional orientada al desarrollo de pavimentos multifuncionales con capacidades ambientales, energéticas y operativas adicionales. Aunque cada tecnología presenta objetivos y mecanismos de funcionamiento distintos, todas comparten el propósito de mejorar el desempeño sostenible de la infraestructura vial y reducir el impacto ambiental asociado al crecimiento urbano y vehicular.

En este contexto, los pavimentos fotocatalíticos destacan por su capacidad de contribuir directamente a la mitigación de contaminantes atmosféricos, mientras que otras tecnologías complementan aspectos relacionados con drenaje urbano, eficiencia energética, monitoreo estructural y durabilidad de los materiales. Esto demuestra que la evolución de la ingeniería vial moderna se orienta hacia soluciones integrales capaces de responder simultáneamente a desafíos ambientales, funcionales y urbanos.

Tabla 3- Analisis comparativo del Ciclo de Vida vs Vida Útil Estimada para tecnologias de Pavimentos



Fuente: Elaboración propia. Jonathan, Aguilar (2025)

En la tabla 3 se presenta el análisis de las tecnologías de pavimentos estudiadas, contrastando la vida útil estimada (durabilidad) en el eje horizontal frente al costo relativo del ciclo de vida en el eje vertical. Este enfoque permite evaluar la viabilidad financiera real de cada alternativa, superando la visión tradicional que solo considera el costo inicial de construcción.

Como se puede observar en la distribución de los cuadrantes, el asfalto tradicional y las emulsiones fotocatalíticas superficiales se ubican en la zona superior izquierda, lo que demuestra un comportamiento de baja durabilidad y un alto costo acumulado debido a la necesidad de intervenciones, bacheos y aplicaciones constantes. En contraste, las tecnologías emergentes

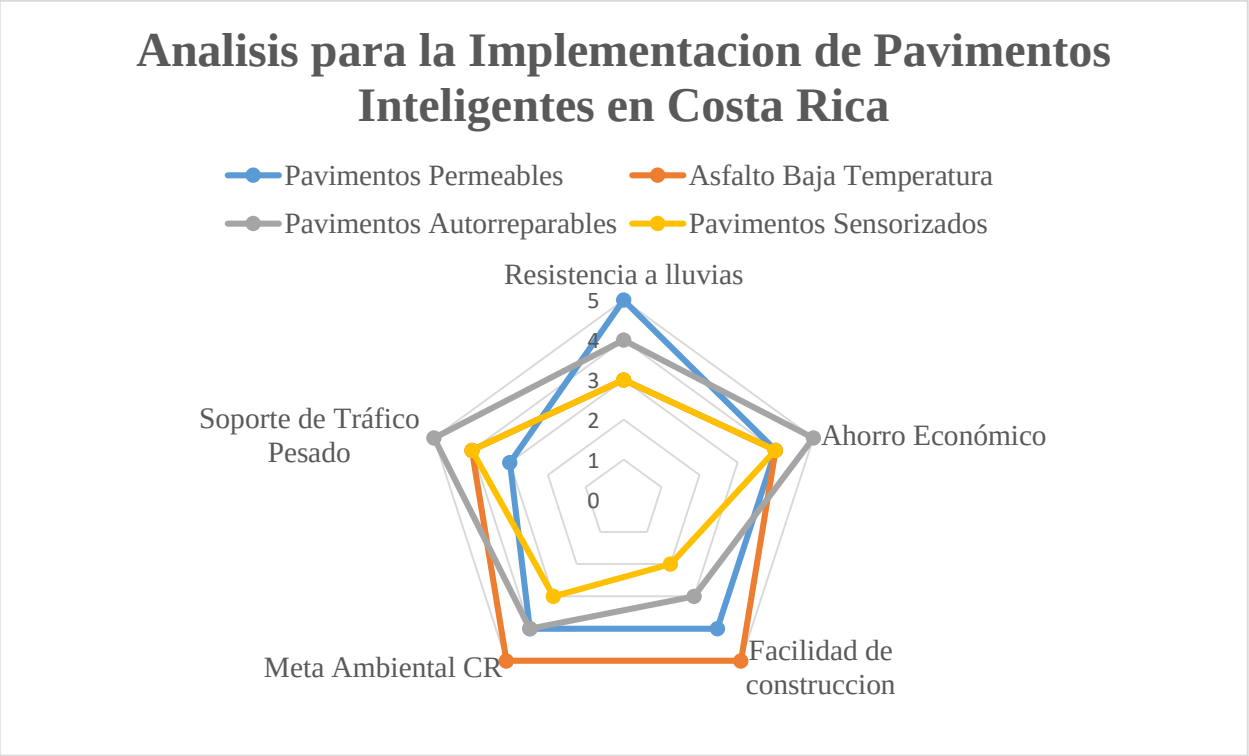
muestran un desplazamiento hacia la zona inferior derecha, considerada el escenario óptimo de rendimiento de la infraestructura.

Destacan especialmente los pavimentos autorreparables y sensorizados; aunque su implementación inicial requiere una inversión técnica superior, su capacidad para mitigar fallas de manera autónoma o predecir daños estructurales reduce drásticamente los costos de mantenimiento a lo largo de las décadas.

De igual forma, soluciones como los pavimentos reciclables (RAP) y de baja temperatura logran un equilibrio costo-beneficio altamente competitivo al reducir el uso de materias primas vírgenes y energía en planta.

En síntesis, la evidencia gráfica demuestra que la transición hacia pavimentos avanzados no solo es una solución ambiental, sino una estrategia financiera sostenible para optimizar los presupuestos de infraestructura vial a largo plazo.

Tabla 4- Análisis para la implementación de Pavimentos Inteligentes en Costa Rica



Fuente: Elaboración propia. Jonathan, Aguilar (2025)

En la tabla 4 se presenta la matriz de idoneidad tecnológica para el contexto vial de Costa Rica, la cual evalúa las alternativas seleccionadas bajo cinco criterios críticos de la infraestructura nacional. Como se aprecia en el diagrama radial, no existe una única tecnología absoluta, sino soluciones específicas que responden a las condiciones particulares de cada región del país.

El asfalto de baja temperatura destaca por mostrar la mayor área de cobertura en los criterios de facilidad de construcción y metas ambientales; de este modo, se consolida como la opción más viable a corto plazo para la red vial nacional, dado que su implementación requiere únicamente la maquinaria activa en las plantas asfálticas del país, al tiempo que reduce la huella

de carbono operacional. Por otro lado, para las regiones con alta vulnerabilidad climática y regímenes de precipitación extrema —como la vertiente del Caribe o la Zona Norte—, el pavimento permeable se posiciona como la solución idónea debido a su ponderación máxima en la gestión de escorrentía pluvial.

Finalmente, para los corredores de tráfico pesado y alta densidad estructural (tales como la Ruta 1 o la Ruta 27), los pavimentos autorreparables ofrecen el mejor desempeño a largo plazo, lo que justifica la inversión inicial al mitigar de forma autónoma los daños por fatiga y deformación plástica.

4.3 Aceptación o rechazo de la hipótesis

La hipótesis planteada en dicha investigación sostiene que las tecnologías emergentes basadas en dióxido de titanio, aplicadas en pavimentos fotocatalíticos, representan una alternativa viable para contribuir a la reducción de contaminantes atmosféricos, a partir de experiencias internacionales previamente documentadas.

A partir del análisis y discusión de los resultados obtenidos en los casos de estudio desarrollados en Holanda, España e Italia, se evidencia que la viabilidad de estas tecnologías no depende únicamente de la presencia del dióxido de titanio como agente fotocatalítico, sino de su correcta integración en el pavimento y de las condiciones técnicas y ambientales de su aplicación.

Los resultados demuestran que las soluciones basadas en pavimentos con propiedades fotocatalíticas incorporadas lograron evidenciar una eficiencia significativa en la reducción de contaminantes atmosféricos, particularmente óxidos de nitrógeno (NOx), lo que respalda la existencia de beneficios ambientales potenciales en contextos urbanos. En contraste, las

tecnologías basadas en recubrimientos superficiales, como la emulsión acuosa aplicada en España, no presentaron resultados concluyentes, debido principalmente a factores externos como el mal estado del pavimento y las condiciones climáticas desfavorables.

En función de la evidencia analizada, la hipótesis se acepta de manera parcial y condicionada, en tanto se confirma que las tecnologías fotocatalíticas basadas en dióxido de titanio son una alternativa viable para la reducción de contaminantes atmosféricos, siempre que sean implementadas mediante pavimentos fotocatalíticos y bajo condiciones adecuadas de diseño, aplicación y mantenimiento.

Esta aceptación parcial pone de manifiesto la importancia de considerar el contexto urbano, el estado de la infraestructura y la escala del proyecto como elementos determinantes para el aprovechamiento efectivo de las propiedades fotocatalíticas del material, especialmente en el diseño a gran escala de infraestructuras donde su impacto ambiental puede ser más significativo.

Asimismo, el análisis de otras tecnologías emergentes aplicadas a infraestructura vial sostenible permitió identificar que los pavimentos fotocatalíticos forman parte de una tendencia global orientada al desarrollo de soluciones multifuncionales capaces de incorporar beneficios ambientales adicionales a las estructuras tradicionales. En este contexto, tecnologías como pavimentos permeables, energéticos, autorreparables y auto sensorizados complementan el avance hacia sistemas viales más sostenibles, eficientes e inteligentes.

Capítulo 5: Limitaciones, Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Limitaciones

Como se ha mencionado a lo largo del texto la contaminación afecta múltiples áreas como la salud humana, el medio ambiente, aire e incluso el agua, esto provoca que surja una nueva tecnología que busca reducir esta problemática. En este contexto, la presente investigación se centró en el estudio de los pavimentos fotocatalíticos como solución innovadora, sin embargo, para que este sistema sea plasmado en la realidad costarricense, presente un alto costo económico, por el uso de dióxido de titanio el cual tiene una propiedad llamada fotocatálisis, misma que se activa y tiene el poder de descomponer contaminantes del aire, además que su proceso de fabricación es más especializado por sus componentes, asimismo el requerimiento de licencias o tecnologías patentadas especiales para la fabricación de este nuevo pavimento.

Esta investigación presenta una serie de limitaciones que deben ser consideradas para una adecuada interpretación de los resultados y conclusiones obtenidas. El estudio es de carácter mixto, ya que combina el análisis cualitativo y cuantitativo de información proveniente de fuentes secundarias, por lo que no contempla la realización de mediciones experimentales directas, pero si aporta porcentajes con base a proyectos realizados.

En este sentido, los datos cuantitativos utilizados, tales como porcentajes de reducción de contaminantes atmosféricos y resultados de eficiencia fotocatalítica, corresponden a estudios y proyectos internacionales previamente documentados, lo que limita la posibilidad de estandarizar los métodos de medición empleados en cada caso analizado.

Asimismo, la investigación se centra en el análisis de proyectos desarrolladas en Holanda, España e Italia, por lo que los resultados obtenidos no pueden generalizarse de manera directa a otros contextos geográficos o urbanos sin considerar las particularidades climáticas, ambientales y de infraestructura propias de cada región.

Otra limitación relevante corresponde a la variabilidad en las condiciones de aplicación de las tecnologías fotocatalíticas, tales como el estado previo del pavimento y terreno, las condiciones climáticas durante la implementación y la intensidad del tráfico vehicular, factores que influyen directamente en la eficiencia del proceso fotocatalítico y dificultan una comparación completamente homogénea entre los casos de estudio.

Adicionalmente, la disponibilidad y el nivel de detalle de la información consultada no fue uniforme, dado que algunos estudios presentan datos parciales o emplean metodologías distintas para la evaluación de la reducción de contaminantes atmosféricos, lo que condiciona el alcance del análisis comparativo.

La investigación se enfoca exclusivamente en tecnologías fotocatalíticas basadas en dióxido de titanio aplicadas en pavimentos, sin incluir un análisis comparativo con otras tecnologías emergentes de mitigación de la contaminación atmosférica, ni una evaluación económica detallada que permita determinar su viabilidad financiera a largo plazo.

5.2 Conclusiones

A partir del estudio de las experiencias internacionales desarrolladas en Holanda, España e Italia, se determina que las tecnologías fotocatalíticas basadas en dióxido de titanio constituyen una opción técnicamente factible para contribuir a la mitigación de contaminantes atmosféricos,

siempre y cuando su aplicación se realice mediante pavimentos fotocatalíticos y bajo condiciones apropiadas de diseño, ejecución y mantenimiento.

El análisis realizado pone de manifiesto que la eficacia del proceso fotocatalítico está fuertemente influenciada por la incorporación del material activo en la estructura del pavimento, así como por factores externos tales como el estado previo de la infraestructura, las condiciones climáticas y la magnitud del proyecto. En este contexto, los pavimentos fotocatalíticos evidenciaron un comportamiento más estable y consistente en comparación con soluciones basadas únicamente en recubrimientos superficiales.

La adopción de un enfoque mixto permitió integrar el análisis de datos cuantitativos provenientes de estudios previos con una evaluación cualitativa de las condiciones de aplicación, lo que posibilitó una comprensión más amplia de los elementos que inciden en la eficiencia de estas tecnologías y su máximo aprovechamiento.

En contexto nacional, se concluye que Costa Rica cuenta con condiciones ambientales favorables para la eventual implementación de tecnologías fotocatalíticas, tales como niveles adecuados de radiación solar y un proceso continuo de desarrollo gracias a ser un país con un alto nivel turístico cada vez se visualiza más el crecimiento urbano y de infraestructura adecuada para inducir este tipo de tecnología. No obstante, su incorporación enfrenta limitaciones relacionadas con los costos iniciales de implementación, la escasa experiencia local en este tipo de soluciones y la insuficiente formación de profesionales especializados en materiales y procesos fotocatalíticos.

Desde un enfoque económico, se reconoce que la aplicación de pavimentos fotocatalíticos implica una inversión inicial mayor en comparación con las alternativas convencionales y su exportación al país representa una inversión aún más elevada; sin embargo, entre los beneficios potenciales asociados a la mejora en cuanto a calidad del aire y al impulso de la sostenibilidad urbana, podrían justificar su inversión a futuro, siempre que se realicen análisis de costo-beneficio ajustados a las condiciones del país y el proyecto a elaborar.

Se establece que la implementación de tecnologías fotocatalíticas en Costa Rica debería realizarse de manera progresiva y planificada, priorizando el desarrollo de proyectos piloto en infraestructuras urbanas de alto impacto, acompañados por procesos de capacitación técnica y una articulación efectiva entre el sector público, la academia y la industria de la construcción. Este enfoque permitiría evaluar su desempeño en condiciones locales y generar una base sólida para su eventual aplicación a mayor escala.

De otra manera, el análisis de tecnologías emergentes aplicadas a infraestructura vial permitió identificar que los pavimentos fotocatalíticos forman parte de una tendencia global orientada al desarrollo de soluciones sostenibles e inteligentes dentro de la ingeniería civil. Tecnologías como los pavimentos permeables, energéticos, autorreparables y auto sensorizados evidencian el interés creciente por incorporar funcionalidades ambientales, energéticas y operativas adicionales a los sistemas tradicionales de pavimentación.

En este sentido, se concluye que la implementación futura de infraestructura vial sostenible en Costa Rica podría beneficiarse de un enfoque integral que combine distintas tecnologías de acuerdo con las necesidades ambientales, urbanas y económicas del país, priorizando soluciones adaptadas a las condiciones climáticas y al contexto nacional.

5.3 Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos y las conclusiones desarrolladas en la presente investigación, se formulan las siguientes recomendaciones orientadas a fortalecer el análisis y facilitar la eventual implementación de tecnologías fotocatalíticas en el contexto costarricense.

En primer lugar, se recomienda priorizar el uso de pavimentos fotocatalíticos con el material activo integrado en su estructura, dado que estos demostraron un desempeño más estable y eficiente en comparación con soluciones basadas únicamente en recubrimientos superficiales. De igual manera, resulta fundamental realizar una evaluación técnica previa del estado del pavimento y de las condiciones ambientales de la zona.

Para el contexto nacional, se sugiere iniciar la implementación de estas tecnologías mediante proyectos piloto en infraestructuras urbanas de alto impacto, tales como vías con alta carga vehicular, zonas peatonales o túneles, lo que permitiría evaluar su comportamiento bajo condiciones locales y reducir los riesgos asociados a su adopción a gran escala.

Desde el punto de vista económico, se recomienda llevar a cabo estudios de costo-beneficio adaptados a la realidad del país, que consideren no solo la inversión inicial, sino también los costos de mantenimiento y los beneficios ambientales a mediano y largo plazo. De igual forma, se sugiere analizar la posibilidad de establecer incentivos o mecanismos de financiamiento que faciliten la adopción de tecnologías sostenibles en proyectos de infraestructura.

En el ámbito académico y profesional, se recomienda fortalecer los programas de formación y capacitación en materiales y procesos fotocatalíticos, así como promover la investigación aplicada

mediante alianzas entre universidades, instituciones públicas y el sector privado. Esto contribuiría al desarrollo de capacidades técnicas locales y a la generación de conocimiento contextualizado.

Finalmente, para futuras investigaciones, se recomienda desarrollar estudios experimentales en el ámbito nacional que permitan evaluar la eficiencia real de los pavimentos fotocatalíticos bajo condiciones climáticas y urbanas propias de Costa Rica, así como ampliar el análisis comparativo con otras tecnologías emergentes orientadas a la mitigación de la contaminación atmosférica.

Alternativamente, se recomienda ampliar futuras líneas de investigación relacionadas con otras tecnologías emergentes aplicadas a infraestructura vial sostenible, tales como pavimentos permeables, energéticos, autorreparables y auto sensorizados, con el fin de desarrollar soluciones integrales que permitan mejorar simultáneamente el desempeño estructural, ambiental y operativo de las vías urbanas.

Referencias Bibliográficas

Almazán Cruzado, D. (2018). *Pavimentos fotocatalíticos: Avances, aplicaciones y retos* (Comunicación técnica). Scribd. https://es.scribd.com/document/453989036/Pavimentos-Fotocatalicos-pdf?

Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. (1972). *Ley General de Caminos Públicos, Ley N.º 5060*. San José, Costa Rica.

Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. (2012). *Ley de Tránsito por Vías Públicas Terrestres y Seguridad Vial, Ley N.º 9078*. San José, Costa Rica.

Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. (2020). *Ley para incentivar y promover la construcción de infraestructura vial sostenible mediante el uso de materiales reutilizables, Ley N.º 9828*. San José, Costa Rica.

ASEFMA. (2024). *Diseño de mezclas bituminosas auto-sensorizadas*. Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas. https://asefma.es/wp-content/uploads/2024/12/29.-Dise%C3%B1o-de-mezclas-bituminosas_Maquetaci%C3%B3n-1.pdf

Ayuntamiento de Madrid. (2015, 26 de noviembre). Impulso de la pavimentación sostenible desde el Ayuntamiento de Madrid: Proyecto FEDER en Villaverde para la descontaminación del aire ambiente a través de la fotocatálisis aplicada a pavimentos urbanos [Presentación en PDF]. Ayuntamiento de Madrid.https://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/FondosEuropeos/madrid_es/EspecialInformativo/FEDER/ficheros/Pavimentacion%20sostenible%20b.pdf?

Ayuntamiento de Madrid. (2015, 26 de noviembre). Impulso de la pavimentación sostenible desde el Ayuntamiento de Madrid: Proyecto FEDER en Villaverde para la descontaminación del aire ambiente a través de la fotocatálisis aplicada a pavimentos urbanos. Madrid, España: Ayuntamiento de Madrid.https://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/FondosEuropeos/madrid_es/EspecialInformativo/FEDER/ficheros/Pavimentacion%20sostenible%20b.pdf?

Ballari, M., Hunger, M., Hüsken, G., & Brouwers, H. J. H. (2013). *Full scale demonstration of air-purifying pavement*. *Construction and Building Materials, 49*, 751–755. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389413001210?

Breinco, (2010). *Adoquín activo fotocatalítico Air Clean: soluciones para la mejora de la calidad del aire* (Documento técnico). file:///C:/Users/Jonathan/Downloads/Informe%20Fraunhofer%20FC%20Breinco%20Canyon.pdf

BREINCO. (s.f). Pavimentos y fachadas descontaminantes. https://www.breinco.com/es/airclean/#:~:text=Pavimentos%20y%20fachadas%20descontaminantes&text=Los%20tratamientos%20fotocatal%C3%ADticos%20reducen%20los,trav%C3%A9s%20de%20las%20aguas%20pluviales.

Cadena SER. (2024, agosto 31). *Un estudio demuestra la eficacia de los pavimentos permeables en la retención de microplásticos urbanos*. https://cadenaser.com/comunitat-valenciana/2024/08/31/un-estudio-demuestra-la-eficacia-de-los-pavimentos-permeables-en-la-retencion-de-microplasticos-urbanos-radio-valencia/?utm_source

Calderón, L., & Sánchez, J. (2019). *Desempeño del pavimento con mezcla reciclada (RAP) y grano de caucho reciclado (GCR)*. Revista Infraestructura Vial, Universidad de Costa Rica. https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rvial/article/view/3811/4250

Cano, Camilo. (s.f). Pavimentos fotocatalíticos. https://eadic.com/blog/entrada/pavimentos-fotocataliticos/

Chen, J., Poon, C. S., & others. (2022). *Recent advances in photocatalytic cement-based materials for environmental remediation*. **Materials, 15**(15), 5407. https://doi.org/10.3390/ma15155407

Del Re, P. (2014). Studio delle prestazioni energetiche, ambientali e analisi economica di una moderna cementeria: La nuova linea produttiva dell'impianto Italcementi di Rezzato (Tesis de grado, Politecnico di Milano). Politesi, Politecnico di Milano.https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/95522/3/2014_10_Del_Re.pdf

Espiga Lisbona García, L. (2016). *Materiales fotocatalíticos y sus aplicaciones en construcción* (Trabajo Final de Máster). Universitat Politècnica de Catalunya.https://upcommons.upc.edu/server/api/core/bitstreams/8728f464-bf5a-4eb2-892c-5e2b41dfd62a/content

Fabregat Martínez, J. (2018). Preparación y caracterización de fotocatalizadores basados en TiO_2 por síntesis hidrotermal. Modificación y cuantificación de la química superficial (Trabajo de Fin de Grado). Universidad de Alicante.https://rua.ua.es/server/api/core/bitstreams/91ª5d4d4-ad10-429b-a8b0-90b80c29a5e1/content

González, A., Storey Palma, L., Schlangen, E., & Norambuena-Contreras, J. (2018). *Pavimentos asfálticos autorreparables con materiales reciclados mediante calentamiento por microondas*. Conferencia presentada en Arica, Chile. https://www.researchgate.net/profile/Alvaro-

Gonzalez-38/publication/328135313_PAVIMENTOS_ASFALTICOS_AUTORREPARABLES_CON_MATERIALES_RECICLADOS_MEDIANTE_CALENTAMIENTO_POR_MICROONDAS_Autores/links/5bba9dc74585159e8d8bdc8a/PAVIMENTOS-ASFALTICOS-AUTORREPARABLES-CON-MATERIALES-RECICLADOS-MEDIANTE-CALENTAMIENTO-POR-MICROONDAS-Autores.pdf

González, J. P. (2021). *Aplicación de materiales fotocatalíticos en pavimentos urbanos: evaluación de reducción de NOx* (Tesis de grado, Universidad Mayor). Repositorio Universidad Mayor.https://repositorio.umayor.cl/xmlui/bitstream/handle/sibum/6827/16173993-2_SAG.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.

https://concepto.de/contaminacion-atmosferica/

https://oa.upm.es/56010/1/TFG_DAVID_MIGUEL_ABELLAN.pdf

https://oa.upm.es/58166/1/TFG_20_Molero_Ballesteros_Laura.pdf

https://www.scielo.sa.cr/pdf/ingenieria/v33n2/2215-2652-ingenieria-33-02-74.pdf

Huerta Andrade, E**.** (2018). Efecto del dióxido de titanio sobre las propiedades antimicrobianas de películas elaboradas a partir de almidón de frijol (Phaseolus vulgaris L.) (Tesis de Maestría). Universidad del Papaloapan, Campus Tuxtepec.https://www.unpa.edu.mx/tesis_Tux/tesis_digitales/maestria_biotecnologia/MB27-_Esbeydi_Huerta_Andrade.pdf?

Hurtado Mera, G., & Zúñiga García, D. (2010). *Influencia del dióxido de titanio para generar propiedades antibacterianas en los esmaltes de baldosas* (Trabajo final de investigación, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Cuenca). Universidad de Cuenca. https://dspace-test.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/2414/1/tq1015.pdf?utm_source

Japan for Sustainability. (2011, 16 de febrero). *New Road Pavement Tech Cleans VOC from Cars*. JapanFS.org. Recuperado de https://www.japanfs.org/en/news/archives/news_id030602.html?utm_source

Life Heatland. (2021, noviembre 2). *Reducción de hasta 12ºC de temperatura en las calles de Murcia*. https://heatlandlife.eu/reduccion-de-hasta-12oc-de-temperatura-en-las-calles-de-murcia/

Lucas, S. S., Ferreira, V. M., & de Aguiar, J. L. B. (2023). *Recent advances in photocatalysis on cement-based materials*. **Construction and Building Materials, 368**, 130355. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130355

Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2020). *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes (CR-2020).* MOPT, Costa Rica.

Montalbán y Rodríguez. (2024). Beneficios de los pavimentos descontaminantes en la construcción. https://montalbanyrodriguez.com/blog/beneficios-de-los-pavimentos-descontaminantes-en-la-construccion/#:~:text=Este%20tipo%20de%20pavimento%20est%C3%A1,funcionales%2C%20embellecen%20el%20entorno%20urbano.

Moreno Huerga, I. (2018). Fotocatálisis en materiales en base de cemento. Evaluación de autolimpieza de fotocatalíticos en el espectro visible frente al UV.https://oa.upm.es/49707/1/TFG_Moreno_Huerga_Imanol.pdf

Moreno, Imanol. (2018). Fotocatálisis en materiales en base de cemento. https://oa.upm.es/49707/1/TFG_Moreno_Huerga_Imanol.pdf

Naciones Unidas (2022). El 99% de la población mundial respira aire contaminado. https://news.un.org/es/story/2022/04/1506592

NCR (2025). La relación del aumento vehicular y la baja de nacimientos en Costa Rica, https://ncrnoticias.com/nacionales/la-relacion-entre-el-aumento-de-vehiculos-y-la-baja-en-nacimientos-en-costa-rica/

Neciosup Nieto, L. A. (2024). *Análisis de diseños de concreto permeable para pavimentos, Lima 2024* [Tesis de grado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/157722/B_Neciosup_NLA-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Prada Rojas, A. F. (2021). *Evaluación de la efectividad del uso del fotocatalizador TiO_2 para la remoción de gases contaminantes tipo NOx en el aire* (Proyecto integral de grado, Ingeniería Química). Fundación Universidad de América. Repositorio Institucional Lumieres. https://hdl.handle.net/20.500.11839/8327

Pujadas, M., Palacios, M., Nunez, L., German, M., Fernandez-Pampillon, J., Iglesias, J. D., & Santiago, J. L. (2016, May). Real scale demonstration of the depolluting capabilities of a photocatalytic pavement in a real urban area. In *Proceedings of the 17th International Conference on Harmonization within Atmospheric Dispersion Modeling for Regulatory Purposes, Budapest, Hungary* (pp. 9-12).https://www.harmo.org/Conferences/Proceedings/_Budapest/publishedSections/PPT/H17-090_poster.pdf

Revista Técnica de la asociación española de la carretera. (s.f). Uso de cementos fotcatalíticos para vías urbanas con altos volúmenes de tráfico. https://www.researchgate.net/profile/Gian-Luca-Guerrini/publication/317764867_Use_of_photocatalytic_cements_on_urban_roads_with_high_traffic_volumes/links/59ea03fdaca272cddddb6fde/Use-of-photocatalytic-cements-on-urban-roads-with-high-traffic-volumes.pdf

Reyes Chávez, J. A. (2021). *Efecto de la adición de dióxido de titanio en adoquines de concreto f'c = 210 kg/cm² en Lurigancho, Chosica-2021* [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/90933?

Rodríguez, D., Garnica, V., Rodríguez, C., & Rodríguez, L. (2015). *Energía renovable a partir de un pavimento flexible*. Asfaltos y Pavimentos, (31), 34–42. https://www.researchgate.net/profile/Daniella_Rodriguez2/publication/303565420_Energia_Renovable_a_partir_de_un_pavimento_flexible_Asfaltos_y_pavimentos_Edicion_31/links/574880b108ae5f7899b9d6d5/Energia-Renovable-a-partir-de-un-pavimento-flexible-Asfaltos-y-pavimentos-Edicion-31.pdf#page=36

Rodríguez-Alfaro, L. F., Luévano-Hipólito, E., & Torres-Martínez, L. M. (2024). Nanopartículas de TiO_2 fotocatalíticas incorporadas en materiales de construcción: ¡Construyamos edificios inteligentes! Mundo Nano, 17(32), 1e–39e.https://www.scielo.org.mx/pdf/mn/v17n32/2448-5691-mn-17-32-e00090.pdf

Stanford Advanced Materials. (2025). Todo lo que debe saber sobre los óxidos de titanio. https://www.samaterials.es/everything-you-need-to-know-about-titanium-oxides.html

Suárez, S., Martínez, C., Jansson, I., Vilanova, O., Nieto, S., Núñez, L., ... & Sánchez, B. Evaluación de la reducción de óxidos de nitrógeno utilizando materiales fotocatalíticos comerciales.

Proyecto LifeMinox-Street de la UE.https://www.conama.org/conama/download/files/conama2016/CT%202016/1998971923.pdf

Sugráñez Pérez, R. (2016). *Nuevos materiales de construcción con propiedades auto-limpiantes y auto-descontaminantes* (Tesis doctoral). Universidad de Córdoba, España.https://helvia.uco.es/bitstream/handle/10396/13373/2016000001229.pdf?sequence=1

Tapia Nevárez, J. S. (2024). *Rediseño de un recolector energético de pavimento vial* (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Querétaro.https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/10256/1/IGMAC-311359.pdf

TX Active — Principio activo fotocatalítico. (2013). Yumpu. https://www.yumpu.com/es/document/read/15060778/tx-active-principio-activo-fotocatalitico/21

Vargas Nordcbeck, A., Leiva Villacorta, F., Aguiar Moya, J. P., & Loría Salazar, L. G. (2013). *Aplicación del uso de tecnologías sostenibles en mezclas asfálticas de Costa Rica* (Informe LM-PI-UMP-007-P). Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica.https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/bitstream/handle/50625112500/256/LM-PI-UMP-007-P.pdf?sequence=1&isAllowed=y

VectorMine. (2023). *Permeable pavement as porous material usage for road layers outline diagram* [Ilustración vectorial]. Shutterstock. https://www.shutterstock.com/es/image-vector/permeable-pavement-porous-material-usage-road-2294548077?dd_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F

Wei, Y., Meng, H., Wu, Q., Bai, X., & Zhang, Y. (2023). *TiO_2-Based photocatalytic building material for air purification in sustainable and low-carbon cities: A review*. **Catalysts, 13**(12), 1466.https://www.mdpi.com/2073-4344/13/12/1466

Wirtgen Group. (s.f.). *El asfalto de baja temperatura es el asfalto del futuro*. Wirtgen Group. https://www.wirtgen-group.com/es-global/revista/the-road/innovation/el-asfalto-de-baja-temperatura-es-el-asfalto-del-future/?utm_source