



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

**ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS Y TECNOLOGÍAS EN LA INDUSTRIA DE LA
CONSTRUCCIÓN, QUE MEJOREN LA CALIDAD DEL AIRE QUE SE RESPIRA EN
LAS CIUDADES**

Programa de Maestría en Ingeniería Civil

Presentado por:

MARÍA CLAUDIA GARCÍA CARDONA

Pontificia Universidad Javeriana Cali
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Enero de 2025

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme la sabiduría, la inteligencia y la fuerza en este periodo académico de posgrado.

A mi familia y mi novio por brindarme su apoyo, comprensión y fortaleza durante el transcurso de la carrera.

A la Pontificia Universidad Javeriana Cali, por ser el plantel educativo que me brindó las herramientas para ampliar mis conocimientos y relaciones profesionales.

A mi director Iván Fernando Otalvaro Calle y co directora Kathleen Georjanna Salazar por su compromiso, dedicación, compartir sus conocimientos y asesorarme con su experiencia para llevar a cabo esta investigación.

Dedicatoria

Dedico esta tesis a Dios, por permitirme cursar este posgrado, por ser mi guía y darme la fortaleza en momentos de dificultad para culminar con éxito esta etapa de mi vida.

RESUMEN

Palabras clave: concretos autolimpiantes; descontaminación del aire; material particulado; construcción sostenible; enfermedades respiratorias.

En el presente trabajo de grado se analiza el impacto ambiental del sector de la construcción, con un enfoque específico en la calidad del aire en las zonas urbanas y las estrategias que se pueden adoptar para mitigar sus efectos. La principal problemática radica en el rápido crecimiento urbano, la planificación insuficiente, y el impacto significativo de la actividad constructiva, lo cual contribuye sustancialmente a la emisión de contaminantes atmosféricos, tales como material particulado (PM2.5 y PM10), que representan un riesgo considerable para la salud humana, estando vinculados con enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

El objetivo de esta investigación es identificar los factores determinantes que contribuyen a la contaminación atmosférica durante las etapas de transformación de materiales y construcción en obra, y proponer alternativas tecnológicas efectivas para mitigar dicho impacto. Entre las estrategias planteadas se destaca el uso de concretos fotocatalíticos con propiedades autolimpiantes, así como la implementación de sistemas para el control de material particulado, tales como barreras rompe vientos y la humectación de materiales. Estas soluciones no solo tienen el potencial de mejorar la calidad del aire, sino que también contribuyen a la reducción de la frecuencia del mantenimiento de las infraestructuras, generando beneficios económicos significativos a largo plazo.

Asimismo, la investigación aborda el análisis del impacto financiero asociado con la implementación de estas estrategias sostenibles. Se enfatiza la necesidad de considerar el ciclo de vida completo de los materiales de construcción, desde la extracción y producción hasta su aplicación en obra, con el propósito de evaluar de manera rigurosa los beneficios tanto ambientales como financieros que pueden derivarse de la adopción de tecnologías sostenibles. Esta propuesta se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, específicamente con el objetivo de "Ciudades y comunidades sostenibles", promoviendo la reducción del impacto ambiental de las ciudades mediante la mejora de la calidad del aire y la optimización en la gestión de recursos.

Dentro del análisis realizado se identificaron las actividades de las obras de construcción que más aportan a la contaminación del aire, relacionándose hasta en un 60% con la causa de la concentración de material particulado. Adicionalmente, se identificó que la implementación de las estrategias de fácil aplicación y consecución de recursos pueden representar hasta un 2% del costo total de las obras.

En conclusión, el estudio enfatiza la necesidad de avanzar hacia un modelo de construcción sostenible que minimice los impactos ambientales negativos, asegurando así una mejor calidad de vida para los habitantes. La implementación de estrategias innovadoras en el sector de la construcción puede desempeñar un papel fundamental en la reducción de la contaminación atmosférica y en la promoción de un entorno urbano más saludable y habitable.

ABSTRACT

Key words: self-cleaning concrete; air decontamination; particulate matter; sustainable construction; respiratory diseases.

In this thesis, the environmental impact of the construction sector is analyzed, with a specific focus on air quality in urban areas and the strategies that can be adopted to mitigate its effects. The main issue lies in rapid urban growth, insufficient planning, and the significant impact of construction activities, which substantially contribute to the emission of atmospheric pollutants, such as particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), representing a considerable risk to human health and being linked to respiratory and cardiovascular diseases.

The objective of this research is to identify the determining factors that contribute to atmospheric pollution during the stages of material transformation and construction, and to propose effective technological alternatives to mitigate this impact. Among the proposed strategies is the use of photocatalytic concretes with self-cleaning properties, as well as the implementation of systems to control particulate matter, such as windbreak barriers and material moistening. These solutions have the potential not only to improve air quality but also to reduce the frequency of infrastructure maintenance, generating significant long-term economic benefits.

Additionally, the research addresses the analysis of the financial impact associated with the implementation of these sustainable strategies. Emphasis is placed on the need to consider the full life cycle of construction materials, from extraction and production to their application on-site, in order to rigorously assess the environmental and financial benefits that may result from adopting sustainable technologies. This proposal aligns with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), specifically the goal of "Sustainable Cities and Communities," promoting the reduction of cities' environmental impact by improving air quality and optimizing resource management.

The analysis identified the construction activities that contribute most to air pollution, with up to 60% being linked to the concentration of particulate matter. Additionally, it was found that implementing strategies that are easy to apply and fund can represent up to 2% of the total construction cost.

In conclusion, the study emphasizes the need to move toward a sustainable construction model that minimizes negative environmental impacts, thereby ensuring a better quality of life for residents. The implementation of innovative strategies in the construction sector can play a key role in reducing air pollution and promoting a healthier, more livable urban environment.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Planteamiento del problema.....	1
1.2.	Objetivos.....	5
1.3.	Resultados esperados	6
1.4.	Organización del documento escrito.....	6
2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1.	Movimiento mundial para reducir el impacto sobre el medio ambiente	8
2.1.1.	Momentos históricos.....	8
2.1.2.	La sostenibilidad en la construcción.....	14
2.1.3.	Estado de la construcción sostenible en Colombia.....	15
2.1.3.1.	Normatividad nacional para la construcción sostenible.....	17
2.1.3.2.	Sector financiero para la construcción sostenible.....	19
2.1.4.	Herramientas e indicadores para la sostenibilidad.....	20
2.2.	Contaminación en la construcción.....	22
2.3.	Estrategias implementadas en la industria de la construcción para reducir la contaminación	28
3.	METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	35
3.1.	Caracterización de factores y fuentes contaminantes	39
3.2.	Alternativa de diseño	42
3.3.	Análisis financiero	43
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	44
4.1.	Factores que contribuyen a la contaminación del aire durante la transformación de materiales de construcción en obra y en la operación de las obras civiles.....	44

4.1.1.	Ciclo de vida de la construcción	44
4.1.2.	Fuentes de contaminación del aire	45
4.1.3.	Mediciones históricas.....	49
4.2.	Diseñar una estrategia, proceso o aplicación tecnológica que reduzca el impacto en la calidad del aire para analizar los efectos de su implementación.....	59
4.3.	Determinar el impacto financiero de la implementación en una obra civil de la estrategia, proceso o aplicación tecnológica que reduzca los impactos ambientales en el recurso aire para evaluar la posibilidad de su implementación	65
5.	CONCLUSIONES	76
5.1.	Conclusiones	76
5.2.	Recomendaciones	77
5.3.	Recomendaciones para trabajos futuros.....	79
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
7.	GLOSARIO DE TERMINOS ESPECIALES	88
8.	ANEXOS	90

1. INTRODUCCIÓN

A medida que pasa el tiempo y surgen distintas necesidades en los habitantes, el desarrollo de las ciudades es cada vez más imparable. Sin embargo, se ha evidenciado que el crecimiento en ámbitos económicos, industriales, agrícolas, tecnológicos y de infraestructura civil, entre otros, ha afectado de manera significativa la calidad de vida de quienes habitan las grandes ciudades, convirtiéndose esta preocupación no solo en un problema local, sino a nivel global.

De las preocupaciones más relevantes que tiene una afectación a nivel global se encuentra el cambio climático, producto en gran parte por las emisiones de gases de efecto invernadero. Por lo que desde 1997 se creó el Protocolo de Kioto para que los países industrializados se comprometieran a estabilizar las emisiones de estos gases mediante leyes y políticas. A partir de este primer paso, se realizaron diversos acuerdos y conferencias liderados por las Naciones Unidas con el fin de hacer seguimiento y renovar los compromisos adquiridos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y el efecto en el cambio climático (Rodríguez Potes *et al.*, 2018).

De acuerdo con la situación expuesta anteriormente, las Naciones Unidas crearon un conjunto de 17 objetivos para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad a nivel global, denominados Objetivos de Desarrollo Sostenible (Naciones Unidas, 2015b). Uno de estos objetivos es “Ciudades y comunidades sostenibles”, que consiste en la reducción del impacto ambiental negativo en las ciudades haciendo seguimiento a la calidad del aire, gestión de recursos y gestión de desechos (Naciones Unidas, 2015a). Dentro de los sectores más influyentes para lograr las metas de este objetivo, se encuentra el sector de la construcción. Por lo tanto, uno de los grandes retos para aportar a un desarrollo urbano sostenible desde las áreas que involucra la infraestructura civil es analizar el impacto de la implementación de diferentes estrategias y tecnologías que permitan que la calidad del aire que se respira en las ciudades garantice una buena calidad de vida.

1.1. Planteamiento del problema

La calidad del aire que se respira en las ciudades es un indicador de la calidad de vida de sus habitantes, por lo tanto, es de gran importancia identificar las variables que pueden ocasionar alteraciones con impacto negativo en la salud y bienestar. La calidad del aire se ha convertido a nivel global en una gran preocupación debido al aumento de los contaminantes producto de las

diferentes actividades que se desarrollan en las grandes ciudades y que están relacionadas con los sectores industriales, mineros, de la construcción, entre otros.

Debido a que la problemática mencionada anteriormente, tiene un impacto a nivel mundial, las Naciones Unidas en el año 2015, crearon 17 objetivos de desarrollo sostenible para contrarrestar los diferentes impactos negativos que afectan a la sociedad en general, el desarrollo de los países industrializados. En particular, el objetivo 11 que consiste en lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles, se relaciona directamente con el sector de la construcción debido a que, este influye en las diferentes etapas de la planeación, diseño y construcción de las ciudades.

Las grandes ciudades y su rápida urbanización han generado el aumento de las emisiones de carbono y el uso de los recursos naturales. En muchas ocasiones se construyen infraestructuras inadecuadas y con el tiempo sobrecargadas, como lo es en el caso de redes de servicios públicos y carreteras, lo cual aumenta la contaminación del aire e impulsa el crecimiento urbano sin planeación ni control. Ante esta situación, una de las metas del objetivo 11, es que al 2030, se reduzca el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluyendo el mejoramiento de la calidad del aire y la adecuada gestión de los residuos de las ciudades (Naciones Unidas, 2015a).

Adicionalmente, la calidad del aire afecta directamente la salud de quienes habitan en las ciudades. Debido a que la expansión de las ciudades, la globalización de la industria, la agricultura intensiva y el mal manejo de los residuos ha aumentado los índices de contaminación del aire. La contaminación atmosférica en las ciudades se ha convertido también en uno de los grandes retos del sector de la salud, debido a que desde 1990 se han aumentado los fallecimientos por enfermedades cardiovasculares, EPOC, ictus y cáncer de pulmón (Ortega-García, Sánchez-Solís and Ferrís-Tortajada, 2018).

También se ha identificado que las enfermedades provocadas por la contaminación atmosférica en adultos han iniciado en las primeras dos décadas de vida, dejando a los niños más vulnerables a padecer enfermedades respiratorias, al respirar mayor volumen de aire con altas concentraciones de contaminantes. En Europa se tienen contemplados unos estándares de la concentración de óxido de nitrógeno (NO₂) con el fin de controlar las concentraciones de contaminantes. Sin embargo, para el año 2015, en España, se identificaron ciudades con concentraciones por encima de los estándares europeos, es decir, superan el valor de límite anual

de NO₂ de 40 µg/m³, como se observa en la Figura 1 (Ortega-García, Sánchez-Solís and Ferrís-Tortajada, 2018).

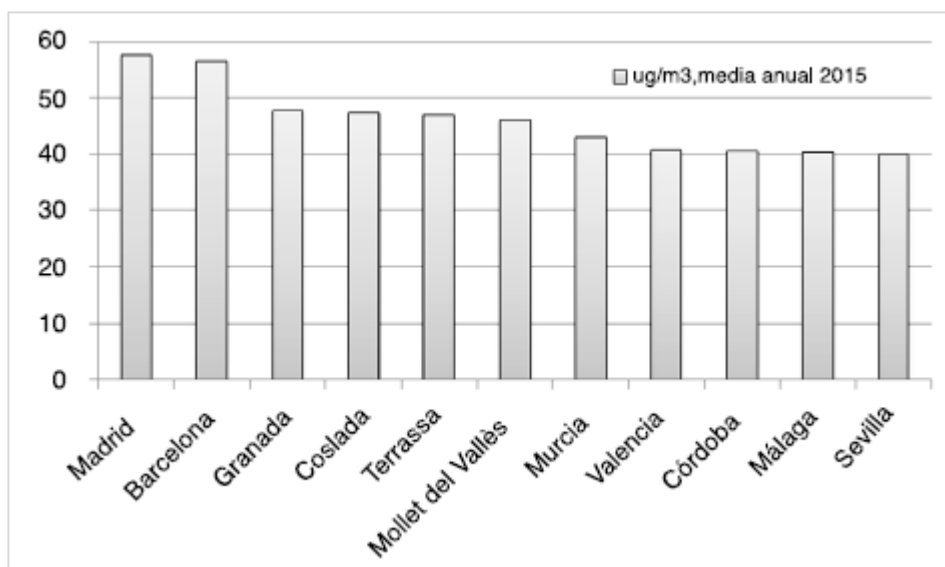


Figura 1. Media anual de las concentraciones de NO₂ en 2015 de estaciones urbanas en ciudades españolas (Ortega-García, Sánchez-Solís and Ferrís-Tortajada, 2018).

Se han realizado experimentos de la exposición a contaminantes como el NO₂ y material particulado (MP) que demuestran que alteran las funciones de la inmunidad innata y que tienen un efecto en las infecciones respiratorias. Mediante el estudio europeo ESCAPE Project, se evaluó esto último, encontrando evidencia que asocia el material particulado con la neumonía en niños (Ubilla and Yohannessen, 2017).

Adicionalmente, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha publicado los tipos de contaminantes implicados en los estudios de morbilidad respiratoria, sus mayores fuentes de emisión y los niveles máximos recomendados, como se muestra en la Tabla 1.

De acuerdo con la tabla anterior, se evidencia que una de las fuentes de emisión está relacionada con el sector de la construcción como lo es el material particulado producto de las actividades de construcción y acumulación de estos en carreteras, emisiones por alto tráfico y volatilidad (PM₁₀) y fuentes de combustión (PM_{2.5}).

Tabla 1. Contaminantes del aire que afectan al sistema respiratorio (Ortega-García et al., 2020).

Contaminantes	Fuentes de emisión	Niveles OMS
Material particulado diámetro <math><2.5\mu\text{m}</math> (PM _{2,5})	Fuentes de combustión	10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media anual 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media de 24h
Material particulado diámetro <math><10\mu\text{m}</math> (PM ₁₀)	Actividades de construcción, polvo en resuspensión de carreteras, tráfico y el viento	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media anual 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media de 24h
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	Emisiones diésel y combustibles relacionadas como el tráfico rodado	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media anual 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media de 1h
Dióxido de azufre (SO ₂)	Combustión de derivados del petróleo en plantas industriales	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media de 24h 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media de 10 min
Ozono (O ₃)	Reacciones fotoquímicas en presencia de luz solar y óxidos o compuestos orgánicos volátiles	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ media octohoraria

El impacto de la contaminación atmosférica en la salud ha tenido especial atención dado que se han realizado estudios sobre el efecto agudo o a corto plazo que genera el aumento de la contaminación, concluyendo que por cada incremento diario en 10 mg/m^3 en la concentración de partículas suspendidas de tamaño <math>< 10\text{ mm}</math>, el número de personas que mueren durante los días inmediatamente posteriores aumenta alrededor de un 0,7% (Dominguez-Rodriguez *et al.*, 2011).

En consecuencia, la Organización Mundial de la Salud (OMS), mediante un comunicado de prensa emitido el 22 de septiembre de 2021 especificó que “la contaminación de aire es una de las mayores amenazas medioambientales para la salud humana, junto con el cambio climático”. Adicionalmente, enfatizó en el daño que la contaminación del aire inflige a la salud humana en concentraciones aún más bajas de lo que se suponía hasta hace algunos años, resaltando el riesgo que presenta para la salud las partículas en suspensión de diámetro igual o inferior a 10 micras (PM₁₀) y 2,5 micras (PM_{2,5})(μm), debido a que las PM_{2,5} y las PM₁₀ son capaces de penetrar profundamente en los pulmones, sin embargo, las PM_{2,5} pueden incluso entrar en el torrente sanguíneo, lo que afecta principalmente al sistema cardiovascular y respiratorio (OMS, 2021).

Las PM₁₀ son una de las principales fuentes de contaminación en las zonas urbanas por el alto tráfico vehicular no solo de vehículos livianos sino de vehículos de carga pesada que transportan los materiales de construcción como lo es el material pétreo de las canteras, cemento, acero, entre otros, y por condiciones meteorológicas que pueden incrementar las concentraciones de este

material particulado (Piras, Pini and Astiaso Garcia, 2019). Por lo tanto, se convierte en uno de los factores a analizar con el fin de identificar estrategias que permitan minimizar el impacto que esta actividad genera directamente en la calidad del aire que se respira en las ciudades.

Adicionalmente, las edificaciones durante su construcción consumen entre el 20 y el 50% de los recursos físicos de su entorno, teniendo una responsabilidad directa con el deterioro del medio ambiente. Una vez construida la infraestructura civil, continúa siendo causa de contaminación, debido a que se producen emisiones, alto consumo de energía y agua y se tiene un impacto en el entorno por el uso, ya sea habitacional o de tráfico (Alavedra *et al.*, 1998).

Frente al escenario expuesto anteriormente, el sector de la construcción, al ser uno de los mayores implicados en la afectación del medio ambiente al generar contaminación y con esto efectos negativos a corto y largo plazo en la calidad de vida de los seres humanos, es de gran importancia buscar alternativas que mitiguen este efecto y eviten empeorar la situación a futuro.

En este orden de ideas, es importante considerar este planteamiento durante el proceso de construcción y operación de los proyectos de infraestructura, con el fin de controlar y minimizar el efecto de los elementos contaminantes del aire que se producen por la actividad edificadora y aportar significativamente al desarrollo sostenible de las ciudades con un impacto a nivel mundial.

1.2. Objetivos

El objetivo general del proyecto es analizar el impacto financiero de la implementación de estrategias y tecnologías en la industria de la construcción en la etapa de transformación de materiales en obra y la operación de obras civiles, que mejoren la calidad del aire que se respira en las ciudades.

El objetivo general se pretende alcanzar cuando se desarrollen los siguientes objetivos específicos:

- Identificar los principales factores que contribuyen a la contaminación del aire durante la transformación de materiales de construcción en obra y en la operación de las obras civiles para evaluar alternativas que permitan mitigar este efecto en el medio ambiente.
- Diseñar una estrategia, proceso o aplicación tecnológica que reduzca el impacto en la calidad del aire para analizar los efectos de su implementación.

- Determinar el impacto financiero de la implementación en una obra civil de la estrategia, proceso o aplicación tecnológica que reduzca los impactos ambientales en el recurso aire para evaluar la posibilidad de su implementación.

1.3. Resultados esperados

En esta investigación se tiene como perspectiva la evaluación de diferentes estrategias, procesos o aplicaciones tecnológicas de construcción sostenible y rentable tanto en la etapa de transformación de materiales en la obra como en la operación de proyectos de infraestructura civil que garanticen una mejor calidad de aire que se respira en las grandes ciudades. Así mismo, se espera obtener información acerca del impacto económico de desarrollar proyectos enfocados en la sostenibilidad y de qué forma la construcción sostenible puede mejorar las condiciones en la calidad de vida de los seres vivos y disminuir el impacto ambiental negativo a nivel mundial, para ser aplicadas en proyectos futuros.

De forma análoga se pretende obtener:

- Factores y elementos que contaminan el aire durante la producción y transformación de materiales en la obra.
- Fuentes de contaminación en proyectos de infraestructura durante la fase de uso y operación.
- Estrategias y procesos que permitan controlar las emisiones de contaminantes que afectan la calidad del aire.
- Estrategias, tecnologías o procesos de remediación frente a la generación de contaminantes en infraestructura civil puesta en operación.
- Impacto financiero en los proyectos de infraestructura civil al implementar durante la construcción y operación alternativas de proyectos sostenibles.
- Identificar alternativas de implementación que garanticen un ejercicio financiero óptimo para el desarrollo de proyectos de obra civil.

1.4. Organización del documento escrito

En el primer capítulo se resume la identificación del problema y los objetivos que se cumplieron en el desarrollo de la propuesta investigativa.

El capítulo 2 contiene la revisión bibliográfica, la misma está dividida en tres partes, comenzando por momentos históricos, sostenibilidad en la construcción, normativa vigente y el impacto del sector financiero en la implementación de alternativas sostenibles.

La metodología del trabajo de grado está descrita en el capítulo 3, incluyendo la descripción del caso de estudio, la alternativa de diseño y el análisis financiero propuesto.

En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos y los análisis de estos, partiendo de los factores que influyen en la contaminación del aire en el ciclo de la construcción, el diseño de las estrategias a implementar para mitigar estos efectos y finalmente realizar el análisis financiero de la propuesta y su viabilidad.

En el capítulo 5 se resumen las conclusiones del trabajo de grado, así como las sugerencias para trabajos futuros.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La revisión bibliográfica está organizada en tres partes. La primera es una revisión detallada de la evolución del movimiento mundial que busca reducir el impacto del desarrollo de las ciudades sobre el medio ambiente. La segunda hace referencia a los impactos en la contaminación que se generan desde la construcción y la tercera las estrategias implementadas para reducir la contaminación y mejorar la calidad del aire.

2.1. Movimiento mundial para reducir el impacto sobre el medio ambiente

Alrededor del mundo, e incluso a la región, hay una preocupación impulsada por las nuevas generaciones en cuidar al planeta, en esta sección se resumen algunos momentos clave en esta iniciativa, así como las generalidades en lo que se ha construido alrededor de la sostenibilidad.

2.1.1. Momentos históricos

De acuerdo con la literatura técnica, en 1944 se llevó a cabo la conferencia de Bretton Woods dado el interés de la conservación y la nueva ciencia del momento, la ecología. Adicionalmente, se tenía interés en establecer el sistema financiero y monetario en la posguerra (López López, 2001).

En los años setenta se acuñó el término ecodesarrollo, y se usaba en conferencias internacionales de medio ambiente y desarrollo. A finales de 1983 la Asamblea General de las Naciones Unidas creó una comisión independiente para elaborar un programa global para el cambio que tenía como objetivos: proponer estrategias a largo plazo para alcanzar el Desarrollo Sostenible, hacer recomendaciones para una mayor cooperación entre países con diferentes niveles de desarrollo para propósitos comunes, analizar las vías mediante las que la comunidad internacional pudiera tratar con mayor eficacia los problemas relacionados con el medio ambiente y definir un programa de acción que incluyera objetivos y propuestas de solución a los problemas relacionados con la protección y mejoramiento del medio ambiente mundial. En 1987 se publicó el Informe Brundtland, como recopilación del trabajo realizado por la comisión conformada por 21 países (López López, 2001).

Esta comisión definió que los problemas ambientales no se podían aislar de otros problemas, y que el Desarrollo Sostenible minimiza el riesgo de crear o de permitir que se exacerbén los problemas existentes, es decir que se satisfaga las necesidades del presente, sin

comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias. El Desarrollo Sostenible se entiende entonces como un proceso de cambio continuo y no como un estado de armonía fijo que implica la óptima utilización de recursos, evolución tecnológica y modificación de las instituciones para contribuir al presente y futuro de las necesidades humanas (López López, 2001).

En 1992 se celebró por parte de la Organización Mundial de Naciones Unidas (ONU) la conferencia del medio ambiente y desarrollo sostenible, conocida como la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro, Brasil. En esta ocasión se trataron temas como la protección de la atmósfera, cambio climático, preservación de los recursos de la tierra, conservación de la biodiversidad, conservación de mares y océanos, mejora de la calidad de vida y de la salud humana, elevación del bienestar y de las condiciones de trabajo de los estratos más pobres de la población. En esta cumbre se llegó a un consenso por gobernantes, científicos y expertos técnicos, dado que la gestión de estos temas requiere el compromiso de todos los países (López López, 2001).

El plan de acción de la cumbre de Río de Janeiro se denomina Agenda 21. En este plan se incluyen temas relacionados con la construcción y promoción del desarrollo de asentamientos urbanos sostenibles, planificación del uso del suelo, sistemas de energía y transporte, así como infraestructura de servicios y construcción. Dentro de las actividades propuestas se encuentra la creación de industrias de materiales de construcción, utilizando en lo posible insumos y recursos naturales de procedencia local y utilización de técnicas tradicionales, uso eficiente de la energía y la utilización sostenible de recursos naturales para la protección de zonas eco-sensibles para minimizar los impactos por actividades constructoras (López López, 2001).

En 1998 se llevó a cabo la convención de las Naciones Unidas sobre el cambio climático generando el Protocolo de Kyoto con el fin de promover el desarrollo sostenible mediante el cumplimiento de compromisos de limitaciones y reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero, aplicando políticas y medidas para la eficiencia energética, tecnologías ecológicamente racionales, entre otras (Naciones Unidas, 1998).

El protocolo de Kyoto es un punto de partida para que los países industrializados inicien el proceso de tomar medidas que contribuyan al desarrollo sostenible. Posteriormente en el 2015 se crearon los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) con el fin de erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible. Se planteó que las metas de cada objetivo deberán cumplirse en los siguientes 15 años,

es decir, al 2030 y que los gobiernos, el sector privado y la sociedad civil debían involucrarse y hacer su aporte (Naciones Unidas, 2015c).

A continuación, en la Tabla 2 se relacionan los 17 ODS y algunas de sus metas que son el plan maestro para un futuro sostenible para toda la humanidad, entre ellos se relacionan y crean desafíos a nivel global.

Tabla 2. Objetivos y metas de desarrollo sostenible (Naciones Unidas, 2020)

Descripción	Metas
Objetivo 1: Fin de la pobreza	<p>Para 2030, erradicar la pobreza extrema para todas las personas en el mundo, actualmente medida por un ingreso por persona inferior a 1,25 dólares al día.</p> <p>Para 2030, reducir al menos a la mitad la proporción de hombres, mujeres, niños y niñas de todas las edades que viven en la pobreza en todas sus dimensiones con arreglo a las definiciones nacionales.</p>
Objetivo 2: Hambre cero	<p>Para 2030, poner fin al hambre y asegurar el acceso de todas las personas, en particular los pobres y las personas en situaciones vulnerables, incluidos los lactantes, a una alimentación sana, nutritiva y suficiente durante todo el año</p>
Objetivo 3: Salud y bienestar	<p>Para 2030, reducir la tasa mundial de mortalidad materna a menos de 70 por cada 100.000 nacidos vivos</p> <p>Para 2030, poner fin a las muertes evitables de recién nacidos y de niños menores de 5 años, logrando que todos los países intenten reducir la mortalidad neonatal al menos hasta 12 por cada 1.000 nacidos vivos, y la mortalidad de niños menores de 5 años al menos hasta 25 por cada 1.000 nacidos vivos</p>
Objetivo 4: Educación de calidad	<p>De aquí a 2030, asegurar que todas las niñas y todos los niños terminen la enseñanza primaria y secundaria, que ha de ser gratuita, equitativa y de calidad y producir resultados de aprendizaje pertinentes y efectivos</p> <p>De aquí a 2030, asegurar que todas las niñas y todos los niños tengan acceso a servicios de atención y desarrollo en la primera infancia y educación preescolar de calidad, a fin de que estén preparados para la enseñanza primaria</p>
Objetivo 5: Igualdad de género	<p>Poner fin a todas las formas de discriminación contra todas las mujeres y las niñas en todo el mundo</p> <p>Eliminar todas las formas de violencia contra todas las mujeres y las niñas en los ámbitos público y privado, incluidas la trata y la explotación sexual y otros tipos de explotación</p>
Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento	<p>De aquí a 2030, lograr el acceso universal y equitativo al agua potable a un precio asequible para todos</p> <p>De aquí a 2030, lograr el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos para todos y poner fin a la defecación al aire</p>

Descripción	Metas
Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante	<p>libre, prestando especial atención a las necesidades de las mujeres y las niñas y las personas en situaciones de vulnerabilidad</p> <p>De aquí a 2030, garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, fiables y modernos.</p> <p>De aquí a 2030, aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas.</p> <p>De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética</p>
Objetivo 8: Trabajo decente y crecimiento económico	<p>Mantener el crecimiento económico per capita de conformidad con las circunstancias nacionales y, en particular, un crecimiento del producto interno bruto de al menos el 7% anual en los países menos adelantados</p> <p>Lograr niveles más elevados de productividad económica mediante la diversificación, la modernización tecnológica y la innovación, entre otras cosas centrándose en los sectores con gran valor añadido y un uso intensivo de la mano de obra</p>
Objetivo 9: Industria, innovación e infraestructuras	<p>Desarrollar infraestructuras fiables, sostenibles, resilientes y de calidad, incluidas infraestructuras regionales y transfronterizas, para apoyar el desarrollo económico y el bienestar humano, haciendo especial hincapié en el acceso asequible y equitativo para todos.</p> <p>Promover una industrialización inclusiva y sostenible y, de aquí a 2030, aumentar significativamente la contribución de la industria al empleo y al producto interno bruto, de acuerdo con las circunstancias nacionales, y duplicar esa contribución en los países menos adelantados.</p>
Objetivo 10: Reducción de las desigualdades	<p>De aquí a 2030, lograr progresivamente y mantener el crecimiento de los ingresos del 40% más pobre de la población a una tasa superior a la media nacional.</p> <p>De aquí a 2030, potenciar y promover la inclusión social, económica y política de todas las personas, independientemente de su edad, sexo, discapacidad, raza, etnia, origen, religión o situación económica u otra condición.</p>
Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles	<p>De aquí a 2030, asegurar el acceso de todas las personas a viviendas y servicios básicos adecuados, seguros y asequibles y mejorar los barrios marginales.</p> <p>De aquí a 2030, aumentar la urbanización inclusiva y sostenible y la capacidad para la planificación y la gestión participativas, integradas y sostenibles de los asentamientos humanos en todos los países.</p> <p>De aquí a 2030, reducir el impacto ambiental negativo per capita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo</p>
Objetivo 12: Producción y consumo responsable	<p>Aplicar el Marco Decenal de Programas sobre Modalidades de Consumo y Producción Sostenibles, con la participación de todos los países y bajo el liderazgo de los países desarrollados, teniendo en</p>

Descripción	Metas
	<p>cuenta el grado de desarrollo y las capacidades de los países en desarrollo.</p> <p>De aquí a 2030, lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales</p>
Objetivo 13: Acción por el clima	<p>Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países.</p> <p>Incorporar medidas relativas al cambio climático en las políticas, estrategias y planes nacionales</p>
Objetivo 14: Vida submarina	<p>De aquí a 2025, prevenir y reducir significativamente la contaminación marina de todo tipo, en particular la producida por actividades realizadas en tierra, incluidos los detritos marinos y la polución por nutrientes.</p> <p>De aquí a 2020, gestionar y proteger sosteniblemente los ecosistemas marinos y costeros para evitar efectos adversos importantes, incluso fortaleciendo su resiliencia, y adoptar medidas para restaurarlos a fin de restablecer la salud y la productividad de los océanos</p>
Objetivo 15: Vida de ecosistemas terrestres	<p>Para 2020, velar por la conservación, el restablecimiento y el uso sostenible de los ecosistemas terrestres y los ecosistemas interiores de agua dulce y los servicios que proporcionan, en particular los bosques, los humedales, las montañas y las zonas áridas, en consonancia con las obligaciones contraídas en virtud de acuerdos internacionales</p>
Objetivo 16: Paz, justicia e instituciones sólidas	<p>Reducir significativamente todas las formas de violencia y las correspondientes tasas de mortalidad en todo el mundo.</p> <p>Poner fin al maltrato, la explotación, la trata y todas las formas de violencia y tortura contra los niños.</p> <p>Promover el estado de derecho en los planos nacional e internacional y garantizar la igualdad de acceso a la justicia para todos</p>
Objetivo 17: Alianzas para lograr los objetivos	<p>Fortalecer la movilización de recursos internos, incluso mediante la prestación de apoyo internacional a los países en desarrollo, con el fin de mejorar la capacidad nacional para recaudar ingresos fiscales y de otra índole</p>

El objetivo de desarrollo sostenible número 11 que contempla Ciudades y Comunidades Sostenibles, hace referencia al aumento en la urbanización de las ciudades; que para el 2030 se espera que aumente hasta el 60%. Este crecimiento ejerce presión en las condiciones de salud pública y el entorno de vida, debido a que se aumenta la contaminación y el aire que se respira no cumple con las normas de seguridad establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS), por lo tanto, se tiene como meta que al año 2030 se reduzca el impacto ambiental negativo teniendo en cuenta la calidad del aire (Naciones Unidas, 2015a)

Respecto al objetivo 11 Ciudades y comunidades sostenibles, el gobierno actual en Colombia ha planteado las siguientes metas para dar cumplimiento a la agenda del 2030.

Tabla 3. Metas objetivo 11 en Colombia (DNP (Departamento Nacional de Planeación), 2022)

Descripción	Metas
Vivienda segura y asequible	De aquí a 2030, asegurar el acceso de todas las personas a viviendas y servicios básicos adecuados, seguros y asequibles y mejorar los barrios marginales
Sistemas de transporte asequibles y sostenibles	De aquí a 2030, proporcionar acceso a sistemas de transporte seguros, asequibles, accesibles y sostenibles para todos y mejorar la seguridad vial, en particular mediante la ampliación del transporte público
Urbanización inclusiva y sostenible	De aquí a 2030, aumentar la urbanización inclusiva y sostenible y la capacidad para la planificación y la gestión participativas, integradas y sostenibles de los asentamientos humanos en todos los países
Proteger el patrimonio cultural y natural del mundo	Redoblar los esfuerzos para proteger y salvaguardar el patrimonio cultural y natural del mundo
Reducir los efectos adversos de los desastres naturales	De aquí a 2030, reducir significativamente el número de muertes causadas por los desastres, incluidos los relacionados con el agua, y de personas afectadas por ellos, y reducir considerablemente las pérdidas económicas directas provocadas por los desastres
Minimizar el impacto ambiental de las ciudades	De aquí a 2030, reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades, incluso prestando especial atención a la calidad del aire y la gestión de los desechos municipales y de otro tipo
Construir espacios públicos verdes, seguros e inclusivos	De aquí a 2030, proporcionar acceso universal a zonas verdes y espacios públicos seguros, inclusivos y accesibles, en particular para las mujeres y los niños, las personas de edad y las personas con discapacidad
Fortalecer la planeación del desarrollo nacional y regional	Apoyar los vínculos económicos, sociales y ambientales positivos entre las zonas urbanas, periurbanas y rurales fortaleciendo la planificación del desarrollo nacional y regional
Implementar Políticas para la Inclusión, la Eficiencia de los Recursos y la Reducción del Riesgo de Desastres	De aquí a 2030, aumentar considerablemente el número de ciudades y asentamientos humanos que adoptan e implementan políticas y planes integrados para promover la inclusión, el uso eficiente de los recursos, la mitigación del cambio climático y la adaptación
Apoyo a los países menos desarrollados en la construcción sostenible y resiliente	Proporcionar apoyo a los países menos adelantados, incluso mediante asistencia financiera y técnica, para que puedan construir edificios sostenibles y resilientes utilizando materiales locales

2.1.2. La sostenibilidad en la construcción

La sostenibilidad en la construcción está asociada a la necesidad de gestionar los altos impactos ambientales generados por la industria de la construcción y la racionalización de los recursos naturales en el marco del desarrollo sostenible.

Según el Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, las edificaciones sostenibles se consideran construcciones civiles diseñadas y construidas de manera segura, que incorporan componentes y materiales con bajos niveles de energía, materiales reciclables y renovables, hacen uso eficiente de la energía y el recurso hídrico, utilizan diseños de bioarquitectura y técnicas de construcción más eficientes, son flexibles y fácilmente adaptables ante los efectos del cambio climático, tienen una vida útil mayor a la del promedio de edificaciones, se adaptan fácilmente a un rango amplio de necesidades sociales presentes y futuras, y promueven hábitos sostenibles entre sus usuarios (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

En el marco de la Política de Gestión Ambiental Urbana, MinAmbiente desarrolló y publicó en el año 2012 el documento “Criterios ambientales para el diseño y construcción de vivienda urbana”, donde se abarcan propuestas con enfoque principalmente preventivo relacionadas con el uso de recursos renovables y con tres objetivos básicos de sostenibilidad: racionalizar el uso de los recursos naturales renovables, sustituir con sistemas o recursos alternativos y manejar el impacto ambiental producido (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

Adicionalmente, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, a través de la Norma Técnica Colombiana NTC-6112 de 2016 “Etiquetas Ambientales Tipo I. Sello Ambiental Colombiano – SAC”, estableció criterios ambientales para diseño y construcción de edificaciones sostenibles para uso diferente a vivienda. Los productos que cuentan con este sello se caracterizan por hacer uso sostenible de los recursos que emplean, utilizar materias primas que no sean nocivas para el medio ambiente, emplear procesos de producción que involucran menos energía o que hacen uso de fuentes de energía renovables, considerar aspectos de reciclaje, reutilización o biodegradabilidad, usar materiales de empaque preferiblemente reutilizables o biodegradables y en cantidades mínimas, emplear tecnologías limpias o que generen menor impacto relativo sobre el ambiente o indicar al consumidor la mejor forma para la disposición final (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

En el mismo marco, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible trabajó en el desarrollo de incentivos tributarios en materia de sostenibilidad en las edificaciones, entre los cuales se destacan: exención de impuestos definidos en el marco del artículo 255 del Estatuto Tributario Nacional para edificaciones que se encuentren certificadas en su fase de diseño por un ente certificador acreditado en construcción sostenible de orden nacional o internacional y la exclusión del IVA para promover algunas medidas pasivas en la construcción de edificaciones que se encuentren en proceso de obtener alguna certificación energética o ambiental, de orden nacional o internacional (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018).

2.1.3. Estado de la construcción sostenible en Colombia

Los avances más destacables en materia de sostenibilidad para Colombia llegaron después del 2008, cuando fue creado el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS), una organización sin ánimo de lucro, cuyo compromiso es elevar el nivel de sostenibilidad de todas las edificaciones nuevas y existentes en las ciudades de nuestro país (ASOBANCARIA, 2022a).

En los últimos años ha aumentado la concientización de la importancia de tomar acciones responsables por el cuidado del medio ambiente para proteger la habitabilidad del planeta, por lo que se ha incentivado la generación de una oferta cada vez más amplia de bienes y servicios que incorporen criterios de sostenibilidad. El sector de la construcción en Colombia no ha sido ajeno a esta situación, por lo que se han incorporado dentro de los procesos las certificaciones de construcciones sostenibles. Para el mes de marzo de 2022, el 6,9% de los proyectos de vivienda en Colombia contaban con una certificación de sostenibilidad, de los cuales el 83% son EDGE (ASOBANCARIA, 2022a).

La construcción sostenible en Colombia se ha podido desarrollar debido a la articulación con diferentes políticas públicas, estrategias, programas y acciones creadas desde el gobierno en los últimos años, teniendo en cuenta que el impacto que tiene este sector en la economía a lo largo de su ciclo de vida. En el país existen políticas e iniciativas orientadas a la adaptación y mitigación del cambio climático. Estas políticas integran intenciones internacionales y nacionales de cambio climático, plantean acciones a corto, mediano y largo plazo que el Gobierno colombiano ha establecido como hoja de ruta con metas a nivel nacional, sectorial y territorial (Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, 2021a).

Para este marco normativo, se toma como punto de partida el Acuerdo de París adoptado el 12 de diciembre de 2015 en París, Francia. En 2017 este Acuerdo se adoptó como política nacional en Colombia mediante la Ley 1844 de 2017. De esta norma se deriva la Política Nacional de Cambio Climático aprobada en el 2017 y la Ley 1931 de Cambio Climático de 2018, en las cuales se establecen las directrices para la gestión del cambio climático y donde se integran el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC) y la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC), entre otros (Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, 2021a).

De acuerdo con el último informe acerca del estado de la construcción sostenible en Colombia, presentado por el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS) en el año 2024, se evidencia un aumento significativo en el número de proyectos licenciados que han sido registrados en algún sistema de certificación en construcción sostenible, como se presenta en la Figura 2.

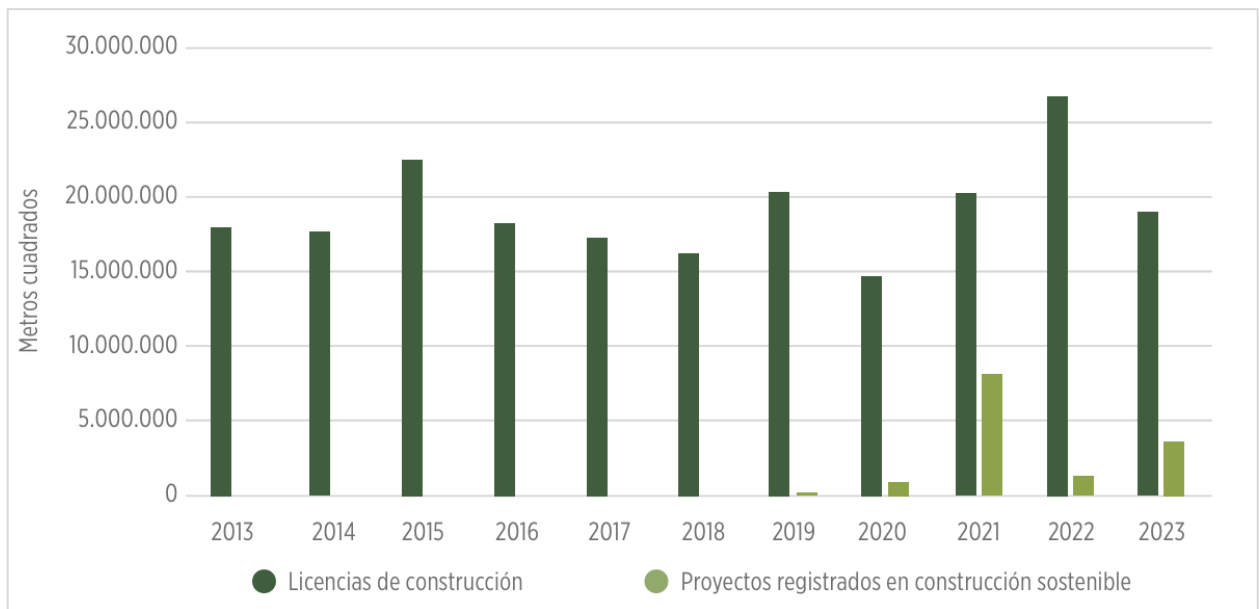


Figura 2. Evolución de la actividad edificatoria de vivienda en el país y los proyectos registrados en algún sello en construcción sostenible en los últimos diez años (Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, 2024)

Según la gráfica anterior, se puede observar que entre 2017 y 2020, en promedio, solo el 1,3% de las edificaciones residenciales licenciadas se registraron en algún sistema de certificación en construcción sostenible. Sin embargo, en los últimos tres años este porcentaje aumentó, alcanzando un promedio del 22%. En los últimos 10 años (2013-2023), el 16% de las edificaciones comerciales e institucionales se registraron en algún sistema de certificación en construcción sostenible. Este incremento se refleja en la transformación de las ciudades a través de su implementación dentro

de los planes de desarrollo y políticas públicas alineados con los ODS para mejorar el bienestar de sus habitantes (Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, 2024).

Adicionalmente, la sostenibilidad se ha convertido en un diferenciador en el mercado y una ventaja competitiva para constructores, desarrolladores, diseñadores, fabricantes y proveedores de materiales. Así mismo, operadores y entidades financieras han integrado la sostenibilidad en su ADN corporativo, reconociéndola como fundamental para el éxito a largo plazo. Si bien aún se presentan retos frente a la aceptación de la construcción sostenible en el mercado por parte de clientes y resistencia al cambio en prácticas de construcción convencionales, es una oportunidad de desarrollar nuevos modelos de negocio y estrategias comerciales, en conjunto con el impulso del sector financiero que ha ido creando productos y servicios específicos para proyectos sostenibles (Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, 2024).

2.1.3.1. Normatividad nacional para la construcción sostenible

A continuación, en la Tabla 4 se relaciona el marco normativo para tener en cuenta en el análisis de la problemática planteada relacionado con el concepto de construcción sostenible:

Tabla 4. Marco normativo

Normativa	Año	Descripción
Ley 23	1973	Por el cual se conceden facultades extraordinarias al Presidente de la República para expedir el Código de Recursos Naturales y de Protección al Medio Ambiente y se dictan otras disposiciones (Congreso de Colombia, 1973).
Ley 629	2000	Por medio de la cual se aprueba el "Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático", hecho en Kyoto el 11 de diciembre de 1997 (Congreso de Colombia, 2000).
Resolución 610	2010	Por la cual se modifica la Resolución 601 del 4 de abril de 2006 (Ministerio de Ambiente, 2010).
CONPES 3819	2014	Política nacional para consolidar el sistema de ciudades en Colombia: Fortalecer el Sistema de Ciudades como motor de crecimiento del país, promoviendo la competitividad regional y nacional, el mejoramiento de la calidad de vida de los colombianos y la sostenibilidad ambiental, en un contexto de equidad y post conflicto (Departamento Nacional de Planeación, 2014)

Normativa	Año	Descripción
Resolución 1055	2015	Por la cual se establece el concepto ambiental de obra como instrumento de control para la regulación, vigilancia y seguimiento de los proyectos de construcción y/o urbanización, y se adoptan los términos de referencia para el sector de la construcción en el área de jurisdicción del DAGMA (DAGMA, 2015).
NTC 6112	2016	Etiquetas ambientales tipo I. Sello Ambiental Colombiano (SAC). criterios ambientales para diseño y construcción de edificaciones sostenibles para uso diferente a vivienda (ICONTEC, 2016)
Resolución 2254	2017	Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017)
Decreto 2205	2017	Por el cual se modifica parcialmente el Capítulo 18, Título 1, Parte 2, Libro 1 del Decreto 1625 de 2016, Único Reglamentario en Materia Tributaria y se dictan otras disposiciones (Presidencia de la república de Colombia, 2017)
Ley 1844	2017	Por medio de la cual se aprueba el “Acuerdo de París”, adoptado el 12 de diciembre de 2015, en París, Francia (Congreso de Colombia, 2017).
CONPES 3919	2018	Política nacional de edificaciones sostenibles: Impulsar la inclusión de criterios de sostenibilidad para todos los usos y dentro de todas las etapas del ciclo de vida de las edificaciones a través de ajustes normativos, el desarrollo de mecanismos de seguimiento y la promoción de incentivos económicos, que contribuyan a mitigar los efectos negativos de la actividad edificadora sobre el ambiente, mejorar las condiciones de habitabilidad y generar oportunidades de empleo e innovación (Republica de Colombia- Departamento Nacional de Planeación, 2018).
CONPES 3918	2018	Estrategia para la implementación de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) en Colombia: Definir la estrategia de implementación de los ODS en Colombia, estableciendo el esquema de seguimiento, reporte y rendición de cuentas, el plan de fortalecimiento estadístico, la estrategia de implementación territorial y el mecanismo de interlocución con actores no gubernamentales. (Departamento Nacional de Planeación, 2018a).
CONPES 3934	2018	Política de crecimiento verde: Impulsar a 2030 el aumento de la productividad y la competitividad económica del país, al tiempo que se asegura el uso sostenible del capital natural y la inclusión social, de manera compatible con el clima (Departamento Nacional de Planeación, 2018)
CONPES 3943	2018	Política para el mejoramiento de la calidad del aire (Departamento Nacional de Planeación, 2018b).
Ley 1931	2018	Por la cual se establecen directrices para la gestión del cambio climático (Congreso de Colombia, 2018).

Normativa	Año	Descripción
Resolución 1524	2019	Por la cual se adopta el documento técnico “guía de buenas prácticas ambientales para el sector de la construcción en el área urbana de Santiago de Cali” (DAGMA, 2019).
Ley 1955	2019	Por el cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 (Congreso de Colombia, 2019).

2.1.3.2. Sector financiero para la construcción sostenible

El sector bancario ha tenido una importante participación en el desarrollo de la construcción sostenible en el país, debido a que ha generado una oferta de productos financieros con beneficios adicionales para apoyar la vivienda sostenible y se ha articulado con el Gobierno Nacional en el diseño e implementación de incentivos como el subsidio de EcoBERTURA, para la adquisición de vivienda No VIS sostenible en el país. Así como beneficios tributarios asociados a exclusión del IVA, descuento de renta y depreciación acelerada en proyectos que incorporan el uso de fuentes de energía no convencionales (ASOBANCARIA, 2022b).

Para el sector de la construcción, algunos bancos han empezado a otorgar tasas preferenciales en crédito constructor y en crédito hipotecario para proyectos con certificaciones en sostenibilidad. De las entidades bancarias encuestadas para el informe del estado de la construcción sostenible en Colombia, el 25% cuenta con líneas de financiamiento sostenible en la actualidad. Las mismas entidades esperan que en cinco años entre un 30% y un 50% de su portafolio de crédito constructor sea destinado para la construcción sostenible (Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, 2021b).

A cierre de 2020, de acuerdo con las cifras del Climate Bonds Initiative (CBI), Colombia emitió Bonos Verdes Corporativos Financieros y Bonos de Clima Certificado por más de 500 millones de dólares, convirtiéndose en el quinto país de Sur América en la emisión de este tipo de bonos, después de Chile, Brasil, Perú y Argentina. Para el segundo semestre de 2021 el Gobierno colombiano emitió sus primeros bonos verdes soberanos mediante los cuales buscaría entre \$1,5 y \$2 billones para adaptarse al cambio climático, usar energías renovables y migrar al transporte sostenible, entre otros (Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, 2021a).

De manera transversal a estas emisiones de bonos, el sector financiero colombiano a través de Asobancaria ha trabajado en la implementación del Protocolo Verde, que es un programa cuyo

objetivo es facilitar la convergencia de esfuerzos del Gobierno Nacional y del Sector Financiero Colombiano para que este incorpore e implemente las políticas y prácticas del sector financiero que sean precursoras, multiplicadoras, demostrativas como ejemplares en términos de responsabilidad ambiental en armonía con un Desarrollo Sostenible (Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, 2021a).

Adicionalmente, la Superintendencia Financiera de Colombia emitió en 2020 la Guía de Buenas Prácticas para la emisión de bonos verdes en Colombia que promueve principios de integridad, transparencia y divulgación de acuerdo con el mercado de valores del país. Entidades financieras que pertenecen al sector privado como Bancolombia, Davivienda, BBVA, Banco de Bogotá y Banco Caja Social ofrecen líneas de crédito sostenible orientadas a la construcción sostenible (Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, 2021a).

Por lo anterior, el sistema financiero tiene un alto potencial para seguir movilizando la construcción sostenible en el país, teniendo en cuenta que de los desarrolladores y constructores encuestados en el informe del estado de la construcción sostenible en Colombia, el 71% reporta que su empresa financia sus proyectos por medio de una entidad bancaria y que más del 80% afirma que el hecho de tener una tasa reducida influye en su decisión de certificar o no un proyecto en construcción sostenible (Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, 2021a).

2.1.4. Herramientas e indicadores para la sostenibilidad

Los cambios medioambientales se valoran mediante la aplicación de indicadores como lo es el índice de contaminación, medición de residuos, entre otros, que son importantes para obtener información del estado de la relación entre la sociedad y el mejoramiento o empeoramiento de la calidad del entorno, con el fin de que al realizar valoraciones cuantitativas y cualitativas para formular políticas y tomar decisiones acertadas para el futuro (López López, 2001).

Para valorar el impacto de la construcción en el medio ambiente, es necesario contar con un procedimiento que permita evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando el uso de materiales, energía y los vertidos al entorno, para identificar las posibilidades de disminuir dichos impactos. El procedimiento que permite realizar lo anteriormente mencionado se conoce como Análisis del Ciclo de Vida (ACV), que supone que todas las etapas de la vida de los materiales propician impactos ambientales, es decir, desde la

extracción y procesamiento de materia prima, transporte de productos, distribución, uso, mantenimiento, reutilización y reciclado y finalmente disposición final (López López, 2001).

La aplicación del ACV es muy útil en la formulación de políticas ambientales a largo plazo en aspectos como la utilización de materiales, conservación de recursos naturales y la reducción de riesgo ambiental asociado a procesos y productos. Con el fin de realizar una adecuada gestión ambiental y prevención de la contaminación en los proyectos de construcción, desde la cumbre de Río de Janeiro, la Organización Internacional de Estandarización creó una serie de normas para orientar este tema, que se encuentran dentro de la Norma ISO 14000. Adicionalmente, para las empresas que trabajan en el sector de la construcción se creó la norma ISO/TC 59/SC 4 denominada planificación de la vida útil de las construcciones, la cual contiene directrices para la construcción sostenible (López López, 2001).

Teniendo en cuenta la importancia de la construcción sostenible por el impacto en los diferentes componentes medio ambiente, no solo la normativa y procedimientos son aplicables para evaluar y analizar el impacto de las diferentes etapas de las construcciones a nivel global. Sino que también a nivel local se tienen herramientas que permiten la recolección de datos para el análisis y la creación de indicadores con el fin de realizar una adecuada toma de decisiones frente al tema en particular de la contaminación del aire por actividades relacionadas con la construcción.

Por ejemplo, en Colombia se cuenta con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM para el monitoreo y control de la contaminación atmosférica. En los últimos informes del estado de la calidad del aire, el contaminante con mayor potencial de afectación en el territorio nacional es el Material Particulado Menor a 2,5 micras (PM2.5), el cual está constituido por partículas muy pequeñas, producidas principalmente por los vehículos pesados que utilizan diésel como combustible, y que pueden transportar material muy peligroso para el cuerpo como metales pesados, compuestos orgánicos y virus, afectando de este modo las vías respiratorias. Las zonas que mayor afectación presentan por importantes niveles de contaminación atmosférica son: el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, localidades industriales en Bogotá, el municipio de Ráquira en Boyacá y la zona industrial de ACOPI en el municipio de Yumbo, Valle del Cauca (IDEAM, 2017).

A su vez el IDEAM cuenta con el subsistema de información sobre calidad del aire – SISAIRES, el cual permite recolectar información de las variables meteorológicas y de calidad del

aire que reportan las autoridades ambientales en Colombia para el diseño, evaluación y ajuste de las políticas y estrategias nacionales y regionales de prevención y control de la calidad del aire (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

Respecto al municipio de Santiago de Cali, se cuenta con el Departamento Administrativo de Gestión Medio Ambiente – DAGMA que coordina y administra el Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire de Santiago de Cali (SVCASC), con el fin de medir los niveles de los contaminantes que se producen en la ciudad, reportando mensualmente los resultados de las diferentes estaciones de medición, analizando el índice de calidad del aire (ICA) para identificar las estaciones con índices menos favorables (DAGMA, 2021).

Estas herramientas brindan información confiable y cuantitativa que es de gran utilidad para la identificación de las fuentes de contaminación y para la posterior toma de decisiones en favor de minimizar los impactos causados al medio ambiente y específicamente a la calidad del aire, por actividades propias del sector de la construcción.

2.2. Contaminación en la construcción

El impacto ambiental de un proyecto de construcción se entiende como la diferencia entre el medio ambiente futuro, que evolucionaría naturalmente sin la obstrucción de una actividad humana y el medio ambiente futuro que se modificará por la realización de un proyecto, acción o disposición administrativa con implicaciones medioambientales (López López, 2001).

El sector de la construcción es considerado mundialmente como una de las principales fuentes de contaminación medioambiental, debido que produce enormes efectos negativos en el medio ambiente ya sea directa o indirectamente. Entre ellos se encuentra la generación de polvo, contaminación acústica, operaciones con remoción de la vegetación y la contaminación atmosférica. Adicionalmente, diferentes estudios han revelado que quienes laboran en el sector de la construcción son quienes más se exponen diariamente a problemas de salud como afecciones respiratorias y al hígado, cáncer, deterioro de la audición, hipertensión, molestias, trastornos del sueño y problemas cardiovasculares (Enshassi, Kochendoerfer and Rizq, 2014)

La contaminación del aire tiene un gran impacto tanto en la salud como en el medio ambiente. Respecto a la salud, se encuentran pequeñas partículas de contaminación penetran profundamente en los pulmones y torrente sanguíneo, provocando alrededor de un tercio de las muertes por accidente cerebrovascular, enfermedad respiratoria crónica y cáncer de pulmón, así como una

cuarta parte de las muertes por ataque cardíaco, como se muestra en la Figura 3. En el medio ambiente, los contaminantes climáticos de vida corta (CCVP) se encuentran entre los contaminantes más relacionados con los efectos sobre la salud y el calentamiento a corto plazo del planeta (Breathelife 2030, 2016).



Figura 3. Porcentaje de muertes por enfermedades producidas por la contaminación del aire (Breathelife 2030, 2016).

Dentro de los daños en el medio ambiente por las actividades de construcción se puede mencionar el agotamiento de los recursos, pérdida de la diversidad biológica debido a la extracción de materias primas, vertido de residuos, menor productividad laboral, efectos adversos para la salud humana debido a la mala calidad del aire interior, calentamiento global, lluvia ácida y esmog causado por las emisiones generadas por la fabricación de productos para la construcción y el transporte que consume energía (Enshassi, Kochendoerfer and Rizq, 2014)

Los impactos adversos para el medio ambiente son: desechos, ruido, polvo, residuos sólidos, generación de tóxicos, contaminación del aire y del agua, malos olores, cambio climático, uso del suelo, operaciones con remoción de la vegetación y emisiones peligrosas. Las emisiones al aire son generadas por los gases de los escapes de los vehículos y el polvo durante la etapa de construcción, estas emisiones contienen CO₂, NO₂ y SO₂. Las emisiones de ruidos son generadas por los diversos equipos, compresores de aire y vehículos. Los equipos para la construcción y otras fuentes generan ruidos en el rango de los 70 a 120 dB en los alrededores de la obra. Los residuos son generados por las actividades de la construcción, campamentos, plantas de tratamiento de residuos u otras fuentes (Enshassi, Kochendoerfer and Rizq, 2014).

El sector de la construcción es responsable de consumir un gran volumen de recursos naturales y de generar una gran cantidad de contaminantes como resultado del consumo de energía

durante la extracción y transporte de la materia prima. Algunas de las estadísticas disponibles indican que la construcción y operación de las edificaciones son responsables de un 12-16 % del consumo de agua; un 25% de la madera cosechada; un 30-40 % del consumo energético; un 40% de los materiales vírgenes extraídos y un 20-30% de las emisiones de gases de efecto invernadero (Enshassi, Kochendoerfer and Rizq, 2014).

Gran porcentaje de los proyectos de construcción se ubican en una zona altamente poblada, por lo que las personas que viven alrededor de estos sitios están expuestos a efectos dañinos para su salud como polvo, vibraciones y ruido causados por cierto tipo de actividades constructivas. Durante la fase de construcción, el polvo y el ruido son los principales factores que afectan la salud humana. De los impactos que se generan las actividades de construcción, los impactos al ecosistema afectan al medio ambiente con un 67.5%, en los recursos naturales es responsable del 21% y en el ámbito social corresponde al 11.5% (Enshassi, Kochendoerfer and Rizq, 2014).

Dentro de las actividades producto de la construcción también se generan residuos que se conocen como residuos de construcción y demolición, RCD, que son provenientes de la construcción, rehabilitación y demolición de cualquier tipo de obra. En Colombia, grandes cantidades de residuos o escombros producto de la industria de la construcción son dispuestos en lugares inadecuados o son mal utilizados, como relleno en sitios que a futuro servirán como zonas de construcción de nuevas edificaciones, transformando estos espacios en terrenos inestables y muy difíciles de ser aprovechados. Estos residuos pueden ser material de excavación (tierra, arena, grava, rocas, etc), construcción y mantenimiento de obras civiles (asfalto, metales) y materiales de demolición (bloques de concreto, ladrillos, yeso, porcelana, etc) (Pacheco Bustos, Fuentes Pumarejo and Sanchez, 2017).

Los RCD se han convertido en un problema ambiental, dado que, por su cantidad y disposición inadecuada, se han configurado en focos de contaminación de suelos y aguas superficiales. Frente a lo cual diferentes países han tomado medidas para una adecuada gestión integral de los residuos generados en obra. Algunos de los ejemplos de esta adecuada gestión son: reincorporación de RCD en procesos constructivos, reúso o aprovechamiento de RCD como materias primas, procesamiento de RCD para ser convertidos en agregados minerales para concretos y asfaltos o aprovechamiento de RCD como llenantes minerales (Pacheco Bustos, Fuentes Pumarejo and Sanchez, 2017).

La industria de la construcción ha tenido un papel muy importante en la mejora de la calidad de vida de las personas y es uno de los principales contribuyentes al crecimiento socioeconómico de los países al proporcionar empleo en gran medida a trabajadores calificados y no calificados. Sin embargo, las actividades de construcción contribuyen significativamente a la contaminación del aire con la emisión de polvo y partículas (Alshetty and Nagendra, 2022).

El polvo generado por el sector de la construcción corresponde a partículas finas suspendidas en el aire y que por su tamaño y morfología son una gran amenaza para la salud humana. La actividad de la construcción aumenta la concentración de partículas en el entorno circundante entre un 16-40%. Diversos estudios han evidenciado que las emisiones totales de partículas PM10 han alcanzado 7,7 y 6,27 toneladas por día en las ciudades de Bangalore y Mumbai respectivamente, representando una contribución aproximada del 15 al 20% en cualquier área urbana (Alshetty and Nagendra, 2022).

Adicionalmente, se estima que el 47% de las emisiones de PM10 son aportadas por el tránsito de camiones en caminos no pavimentados y el 24% de las emisiones en caminos pavimentados durante la construcción de pavimentos. Los aportes de actividades de construcción a la contaminación del medio ambiente circundante como la fabricación de concreto y almacenamiento corresponden al 14%, planta de trituración 13%, movimientos de tierras y excavación 2%. Las demoliciones, limpiezas y trabajos en las estructuras son algunas de las principales actividades responsables de las emisiones de material particulado en el sitio de trabajo (Alshetty and Nagendra, 2022).

El impacto de las emisiones de material particulado afecta no solo la salud de los trabajadores de la construcción sino también en los residentes del vecindario. El estudio realizado por Alshetty y Nagendra infiere que la resuspensión de polvo de carretera y emisiones fugitivas eran las principales razones de las altas concentraciones de PM en el entorno circundante de un sitio de construcción. La carga de sedimentos en las carreteras que se acercaban al área de construcción era visiblemente alta y es la causa principal del aumento de la exposición entre circundantes y vecinos. Las partículas finas en el polvo de la carretera son tóxicas debido a que son una mezcla de partículas emitidas por el escape de los vehículos, el desgaste de los frenos y neumáticos y desgaste de la superficie de la carretera que son cancerígenos por naturaleza (Alshetty and Nagendra, 2022).

En el estudio mencionado anteriormente, se recolectaron muestras para identificar las cantidades de la concentración de material particulado y registro de flujo vehicular, en el que se evidenció que el flujo de vehículos pesados dentro del área de estudio durante la fase de construcción se incrementó de 2 a 3 veces. Así mismo, los derrames de materiales de los vehículos y la deposición de emisiones fugitivas de las actividades de construcción son responsables de la alta carga de sedimentos en las vías urbanas cerca de la construcción. Se evidenció también que los factores meteorológicos como la humedad, temperatura, velocidad y dirección del viento tienen un impacto significativo en las concentraciones de contaminantes en el aire (Alshetty and Nagendra, 2022).

De acuerdo con los resultados del estudio de Alshetty y Nagendra (2022), se encontró que la fracción total de deposición de PM₁₀ en las vías respiratorias humanas durante la fase de construcción fue del 74 al 78%, 23 al 54% de PM_{2.5} y 20 al 25% de PM₁. Por lo tanto, la exposición a corto plazo a los contaminantes puede provocar problemas de salud agudos y crónicos, además, por las características químicas de las PM, como la adherencia de metales pesados, pueden conducir a un alto riesgo de carcinogenicidad para la salud. En diversos estudios se han demostrado que las cubiertas verdes pueden reducir significativamente la contaminación por PM, y que para reducir la exposición de los receptores se pueden usar mascarillas faciales y purificadores de aire. En consecuencia, es necesaria la integración de prácticas sostenibles, el uso de tecnologías de control de la contaminación y la implementación de políticas a escala local.

El material particulado es una mezcla de partículas muy pequeñas y gotas de líquido responsables de la contaminación del aire. La maquinaria diésel utilizada para la construcción de carreteras son la segunda fuente más importante de emisiones de PM y representan el 24,3% del total de las emisiones de PM de las fuentes móviles, teniendo en cuenta que el tipo de combustible, las condiciones de manejo y el tránsito por vías no pavimentadas o sucias afectan las emisiones (Giunta, 2020).

Los impactos ambientales y sociales de la construcción de pavimentos cobran gran importancia debido a que aproximadamente se construirían más de 25 millones de kilómetros de nuevas vías en el mundo y el 90% en países desarrollados, por lo que el sector transporte contribuye con aproximadamente el 14% de las emisiones totales de gases efecto invernadero y un 72% de esta contribución se atribuye al ciclo de vida de las carreteras (construcción, uso, mantenimiento y rehabilitación). Las emisiones de material particulado durante el tránsito sobre vías no

pavimentadas resultan de la interacción entre los neumáticos de los vehículos y las superficies erosionables de la carretera y dependen de factores como las propiedades de la superficie de las vías, el tráfico, peso del vehículo y condiciones climáticas (Giunta, 2020).

Adicionalmente, no solo la maquinaria que transporta materiales a los sitios de construcción genera grandes aportes a la contaminación del aire, también contribuye la maquinaria que se encuentra realizando actividades en la obra, como lo son retroexcavadoras o cargadores. La maquinaria móvil fuera de las carreteras generalmente utiliza motor diésel y se generan partículas (PM), óxidos de nitrógeno (NOx), hidrocarburos (CH) y monóxido de carbono (CO) que son los principales contaminantes. Las emisiones de NOx y PM de los motores diésel representan cerca del 70% y el 90% respectivamente de las emisiones totales de los vehículos en China. En Europa, la agencia medioambiental en el año 2019 indicó que las emisiones de fuentes móviles no viales, contribuyen significativamente al medio ambiente atmosférico europeo y de este el 17% corresponde a las emisiones de PM (Zhang *et al.*, 2020).

El estudio realizado por Zhang *et al.* (2020), mediante un método experimental consistió en el análisis de los escapes de los vehículos y recolección de muestras de material particulado durante las diferentes condiciones de trabajo para estudiar la composición química del PM.

De acuerdo con los resultados obtenidos, en las muestras de PM_{2.5} se detectaron Ni, Mn, Pb, Mg, Cu, K, Zn, Fe, S, Al, Na, Ca, Cd, Hg, Co, V y Ti. Las concentraciones de Ca, Na, Al, S, Fe y Zn son las más altas. También se pudo identificar que el azufre proviene principalmente del combustible diésel, es decir que a medida que aumenta la calidad del combustible, la concentración de azufre en el escape de gas tiende a disminuir. Además, también se detectaron 18 tipos de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), de los cuales aproximadamente el 88% corresponden a fluoreno, fenantreno, antraceno, fluranteno, pireno, benzo flouranteno y benzo perileno (Zhang *et al.*, 2020).

En el estudio en mención también se pudo identificar que los valores de concentración de HAP equivalentes a benzo pireno en maquinaria cargadora, excavadora y montacargas eran superiores a las concentraciones recomendadas por la Organización Mundial de la Salud, OMS. Por lo que las emisiones de PM de la maquinaria de construcción no vial en China requieren un control urgente por los efectos adversos y peligrosos para la salud, mediante regulaciones estrictas con el fin de reducir estas emisiones (Zhang *et al.*, 2020).

De acuerdo con lo anterior, se puede evidenciar que la predicción de los impactos medioambientales causados por la construcción en las primeras etapas del proyecto puede conducir al mejoramiento del comportamiento medioambiental de los proyectos y obras de construcción, así mismo, una estrategia muy importante es la creación de leyes estrictas que conduzcan hacia la reducción de estos impactos negativos como obligar a las instituciones a realizar Evaluaciones de Impacto Ambiental (EIA) (Enshassi, Kochendoerfer and Rizq, 2014).

La contaminación del aire es uno de los problemas ambientales más desafiantes que se debe enfrentar a escala local, regional y global. Según la OMS en el 2012, aproximadamente 3 millones de muertes fueron atribuibles a la contaminación del aire exterior. Los efectos sobre la salud considerados en el estudio realizado por (Rovira, Domingo and Schuhmacher, 2020) han sido la mortalidad a largo plazo, enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), cáncer de pulmón y cardiopatía isquémica. El modelo analizado permite cuantificar los efectos sobre la salud debido a la exposición a la contaminación del aire en el Campo de Tarragona, donde se obtuvo como resultado una mayor concentración a la permitida por la OMS para O₃, PM₁₀ y PM_{2.5}.

Adicionalmente, se encontró una correlación entre la tasa de desempleo y los niveles de contaminantes del aire, lo que indicó que la crisis económica entre el 2008 y 2014 fue un factor que influyó en los niveles de contaminantes. En este orden de ideas, la reducción de los niveles de contaminantes atmosféricos (PM_{2.5}), según la OMS debería reducir la mortalidad de adultos entre 23 y 297 casos al año, que supone entre el 0,5 y 7% de toda la mortalidad de la zona (Rovira, Domingo and Schuhmacher, 2020).

2.3. Estrategias implementadas en la industria de la construcción para reducir la contaminación

De acuerdo con el desarrollo de los proyectos de construcción, se ha identificado la necesidad de realizar una gestión ambiental. Una de las herramientas más útiles en la etapa de pre inversión de los proyectos es la Evaluación del Impacto Ambiental (EIA), como metodología para prever y considerar las alteraciones positivas y negativas que propiciarán las obras nuevas, así como las instalaciones, actividades y programas a realizar como complemento de las obras de ingeniería (López López, 2001).

En este sentido y teniendo en cuenta el desarrollo sostenible, a nivel mundial se han considerado las ciudades como un elemento integral que incluye en su totalidad la infraestructura

y demás componentes que pueden afectar el desarrollo de las mismas, como es el caso de Malmö en Suecia, que se ha convertido en una de las ciudades más verdes y más sostenibles del mundo mediante la gestión de planes, proyectos e iniciativas como lo es la construcción con techos verdes, uso de energías renovables, proyectos de manejo de residuos y reciclaje, implementación de medios de transporte que no contaminen el aire y la urbanización ordenada y planeada de la ciudad (Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, 2014).

Adicionalmente, se han realizado investigaciones frente a la relación que tienen las altas concentraciones de material particulado, producto del tráfico vehicular y las condiciones climáticas (Piras, Pini and Astiaso Garcia, 2019), identificando que si bien muchos países desarrollados han optado por una transición verde hacia una movilidad sostenible para vehículos livianos, es necesario evaluar estrategias y alternativas para la flota de vehículos de carga pesada que transportan los insumos para las actividades de construcción.

En Colombia se han creado diferentes guías y manuales para las buenas prácticas ambientales en la construcción con el fin de garantizar el desarrollo de proyectos sostenibles de infraestructura civil. Adicionalmente, para el desarrollo de proyectos bajo estas condiciones se han tenido en cuenta certificaciones a nivel internacional, como lo es el caso del proyecto Arizá de la constructora Conaltura, que ejecutó un proyecto de vivienda vertical en el año 2018 (Portafolio Blog 360 grados, 2017) y que contó con el certificado estadounidense LEED, que reconoce proyectos de construcción sostenible que utilizan menos energía, reducen emisiones de carbono y contribuyen con ambientes saludables (Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, 2018).

El proyecto residencial Viverdi 85, localizado en la ciudad de Barranquilla, incluyó en sus diseños aislamientos térmicos, ventanería de altas especificaciones y sistemas de iluminación LED para ahorrar energía, reciclar el agua producto de la condensación de las unidades del aire acondicionado para ahorrar agua potable y reciclar en un 90% los materiales de la obra, por lo que también recibió la certificación LEED Gold en diciembre de 2016 (Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, 2016).

Uno de los casos de éxito de la implementación de certificación LEED v4 Plata es el proyecto Makro Vale de Lili al sur de la ciudad de Cali, Colombia. En donde se realizó la renovación de la antigua tienda super mayorista en el mismo lote, pasando de una tienda antigua y con niveles bajos de eficiencia energética y de consumo de agua a una tienda actualizada con estándares superiores.

Para lograr destacarse por su desempeño energético se implementaron las siguientes estrategias: Submedición de energía con el fin de tener un uso más eficiente de esta y poder rastrear fácilmente las pérdidas, ahorro del 58% de la potencia de iluminación instalada frente a edificios similares, iluminación natural, fachada con aislamiento climático, cubierta altamente reflectiva y aislante y áreas verdes y concreto blanco en zonas de parqueo para reducir el efecto de isla de calor (Consejo Colombiano de Construcción Sostenible, 2021a)

Adicionalmente, en el caso concreto de estudio del impacto de la calidad del aire, se ha identificado que uno de los factores que más influye en la contaminación del aire es el material particulado. Esta situación se puede generar por explotación de material pétreo en canteras dado que quedan partículas suspendidas en el aire o por el mismo transporte si el material no se encuentra humectado (Berrera Osorio, 2010). Esta actividad tiene un impacto negativo en el componente aire por los trabajos de perforación y voladura, transporte u procesamiento, así como la emisión de polvo, de la que se pueden derivar impactos permanentes sobre la salud mientras la cantera se encuentre funcionando, incluso una vez cerrada, si no se realiza una adecuada restauración (Hernández Jatib *et al.*, 2014).

De acuerdo con lo anterior, con el fin de disminuir el impacto se han planteado alternativas que requieren de unos recursos económicos y unos procesos logísticos para su ejecución, como lo es el riego periódico de carretas y depósitos de material, compactación y asfaltado de la vías de acceso a la cantera, empelar captadores de polvo en el proceso de perforación, reducción del tiempo entre explotación y rehabilitación, limitar velocidad de circulación, instalación de barreras rompevientos, cubrimiento con lonas del material a transportar o uso de cintas transportadoras con protección (Hernández Jatib *et al.*, 2014).

El polvo es uno de los impactos negativos más crítico que afecta al medio ambiente, por lo que se ha propuesto emplear métodos adecuados de control del mismo usando técnicas, como por ejemplo, sistemas de humectación que utilicen agua por aspersión para evitar o captar el polvo en suspensión, cerramientos para contener el polvo y sistemas de ventilación/extracción para removerlo. Para reducir la cantidad de sedimentos transportados sobre el pavimento por los vehículos motorizados que salen de la obra, se podrían lavar las ruedas cuando acarrear lodo o desechos (Enshassi, Kochendoerfer and Rizq, 2014).

Respecto a la fase de operación de la infraestructura civil, se ha detectado la generación de contaminantes que afectan la calidad del aire, y que, por lo tanto, requieren de la evaluación de un

sistema que permita generar purificación del aire utilizando (Medina *et al.*, 2016). Adicionalmente, se ha identificado que las estructuras de concreto se ven afectadas por factores externos producidos por la contaminación ambiental que van deteriorando el aspecto o color de las fachadas de concretos arquitectónicos, por lo que se han usado pinturas y sellantes para reducir este efecto, pero no ha sido suficiente, dado que se requiere de un mantenimiento constante (ARGOS, 2021).

En consecuencia, se han propuesto alternativas para que el concreto sea autolimpiante, como lo es el concreto fotocatalítico, que consiste en la aplicación de partículas de dióxido de titanio al cemento blanco o gris sin afectar su desempeño y eliminando sustancias contaminantes adheridas a la superficie, manteniendo fachadas limpias y con un ahorro de costos por constante mantenimiento. El beneficio de usar este material es un aire más limpio y esto se evidencia en obras a gran escala, donde la mayor superficie está expuesta a la luz y ofrece un mejor desempeño autolimpiante y descontaminante (ARGOS, 2021).

Teniendo en cuenta la gran cantidad de emisiones de material particulado se ha evaluado la exposición que tienen los materiales de construcción a una inmensa gama de contaminantes generando un impacto nocivo en el aspecto estético y estructural. Por lo que el uso de fotocatalizadores como el TiO_2 ha sido una implementación funcional como una forma eficiente de mitigar los efectos de la contaminación por material particulado y NO_x (Khannyra *et al.*, 2021a).

Mediante diversos ensayos de laboratorio se ha podido evaluar la actividad foto catalítica producida por los materiales a base de cemento que contienen TiO_2 , incorporando propiedades de auto-limpieza y purificación del aire, dado que las características fisico-químicas de los materiales a base de cemento, especialmente aquellos expuestos a la intemperie, presentan un proceso de deterioro acelerado debido a la exposición continua y directa a muchos contaminantes atmosféricos y a diferentes tipos de micro organismos (Maury and de Belie, 2010).

Se han identificado varios semiconductores para la eliminación de contaminantes como lo son óxidos y calcogenuros metálicos (TiO_2 , ZnO , ZnS o CdS) que pueden realizar procesos fotocatalíticos aprovechando la luz solar, sin embargo, para ser usados para tal fin, se requiere el cumplimiento de algunos factores: potencial redox suficientemente positivo, estabilidad química frente a la descomposición, baja toxicidad y tener un costo viable. En este caso al realizar el análisis

de los diferentes semiconductores, el que cumple con las propiedades descritas anteriormente es el dióxido de titanio (TiO_2) (Sugrañez Pérez, 2016).

El dióxido de titanio es el fotocatalizador más utilizado en la industria por sus propiedades y su resistencia a la corrosión química y fotoquímica, que permiten que sea un fotocatalizador muy activo tanto para la oxidación de los compuestos tóxicos iniciales como de los intermedios generados en las reacciones. Se ha comprobado que al utilizar TiO_2 en la fotocatalisis solar es posible eliminar compuestos orgánicos tóxicos y metales como cromo o arsénico (Castellar Ramos and Osorio Tamayo, 2012).

La fotocatalisis es eficiente en la eliminación de contaminantes atmosféricos, contribuyendo significativamente a mejorar la calidad de vida. El TiO_2 se ha convertido en un componente esencial en materiales de construcción con propiedades fotocatalíticas, debido a su bajo costo, estabilidad química, seguridad para la salud humana, no toxicidad y eficiencia. Adicionalmente, es compatible con materiales convencionales de construcción, como el cemento, sin comprometer sus características y se puede incorporar como un componente integral del concreto, así como mediante la aplicación de recubrimientos superficiales. Se utiliza en morteros de cemento, adoquines y traviesas exteriores para crear edificios inteligentes con propiedades autolimpiantes, antimicrobianas y purificadoras de aire (Fernández Mantilla, 2023).

El TiO_2 adopta tres estructuras cristalinas principales, que son la anatasa (estructura cristalina tetragonal distorsionada), el rutilo (estructura cristalina tetragonal) y la brookita (estructura cristalina ortorrómbica), siendo solamente el rutilo y la anatasa las que resultan atractivas para aplicaciones prácticas, debido a que son semiconductores con una amplia brecha de energía. Los fotocatalizadores tienen la capacidad de descomponer óxidos y compuestos orgánicos contaminantes que representan problemas para la salud y el medio ambiente (Fernández Mantilla, 2023).

De acuerdo con los diferentes elementos contaminantes, se ha identificado que la contaminación del aire causada por óxidos de nitrógeno (NO_x) es un problema de gran relevancia que contribuye a desmejorar la calidad de vida, especialmente en áreas urbanas de gran tamaño (Fernández Mantilla, 2023) Según el estudio realizado por (Khannyra *et al.*, 2021b) en Europa se emiten más de 7000 toneladas de NO_x y 3000 kilotoneladas de material particulado (PM), por lo que los materiales de las construcciones se encuentran expuestos a una gran gama de

contaminantes que tienen un impacto nocivo en el aspecto estético y estructural. Por lo que se ha estudiado la aplicación de fotocatalizadores como tratamiento para las superficies de materiales de construcción para la purificación del aire. Uno de los fotocatalizadores que ha mostrado mayor efectividad es el dióxido de titanio, TiO_2 , debido a que tiene propiedades ópticas y eléctricas favorables, así como su disponibilidad, estabilidad, bajo costo y elevada fotoactividad.

Una de las limitaciones en el desarrollo de materiales auto limpiantes basados en TiO_2 está asociada con la falta de absorción localizada exclusivamente en el rango UV y también la rápida recombinación de los pares electrón-hueco. Por lo que para promover la actividad foto catalítica del TiO_2 se ha implementado el uso de metales por su alta absorción en el rango visible que le permite actuar como trampas de electrones eficientes para disminuir la velocidad de la recombinación fotogenerada de huecos de electrones (Khannyra *et al.*, 2021b).

Entre los metales más usados para la modificación del TiO_2 se encuentran el oro (Au), platino (Pt), plata (Ag) y cobre (Cu). Los fotocatalizadores basados en Cu- TiO_2 para la autolimpieza y purificación del aire mediante la aplicación como recubrimientos en fachadas de materiales de construcción requieren una buena adherencia y recubrimiento duradero. Por lo que en el estudio de Khannyra *et al.* (2021b), se analizó una mezcla para aplicar sobre una superficie de concreto mediante la técnica de aspersión y se evaluó su efectividad mediante la azul de metileno para el desempeño de autolimpieza y descontaminación del aire. En este estudio se evidenció que el cobre cargado con fotocatalizadores reveló un aumento significativo en la absorción del rango visible, así mismo, que la sensibilidad de los fotocatalizadores aumenta hacia la iluminación visible.

También se pudo establecer que con una carga de cobre del 5% y una menor viscosidad en la mezcla permite una penetración más profunda del producto en la superficie porosa, por lo tanto, produce mayor absorción y adherencia. En cuanto al aspecto físico del recubrimiento se evidencio que el cambio de color en la muestra no se alteró significativamente y que se obtuvieron superficies más lisas con una mayor eficiencia fotocatalítica y durabilidad (Khannyra *et al.*, 2021b).

En algunas edificaciones como la iglesia Dives in Misericordia (Roma, Italia) y el edificio público Cité de la Musique et des Beaux-Arts (Chamberí, Francia) se ha utilizado para su construcción material con base de cemento que contienen TiO_2 y que están en uso. También existen otras edificaciones con este tipo de hormigón terminado en Bélgica, Francia, Italia, Mónaco, Marruecos, Japón y China (Tobon Gonzalez, 2015).

La aplicación del TiO_2 , no solo se ha implementado en edificaciones sino en pavimentos, como en Bélgica, donde se instalaron 10.000 m^2 de adoquines de hormigón en las calles secundarias de un eje principal de entrada a Amberes. En este proyecto, el TiO_2 en forma de anatasa se aplicó en 8mm de la capa de desgaste de los adoquines. El uso de TiO_2 combinado con cemento conduce a una transformación del NO_x en NO_3 , que se adsorbe en la superficie debido a la alcalinidad del hormigón, creando un efecto sinérgico, ya que la matriz de cemento ayuda a atrapar eficazmente los gases y compuestos que proceden del NO y el NO_2 .

De este estudio se concluyó que la durabilidad de la acción fotocatalítica permanece casi intacta, aunque para ello se debe dar una limpieza regular (por la lluvia) de la superficie y que la humedad relativa (HR) es un parámetro importante, que puede reducir la eficiencia de la actividad. Si la HR es demasiado alta, el agua se adsorbe en la superficie y evita la reacción con los contaminantes (Lisbona García, 2016).

En Suramérica, se han realizado diferentes análisis para determinar la viabilidad de su implementación, uno de ellos se realizó en Perú para determinar la influencia del TiO_2 en el concreto permeable, donde se evaluó la dosificación óptima de la aplicación de la sustancia fotocatalítica que garantizara las condiciones de resistencia y permeabilidad. En este estudio se evidenció que la dosificación de 1.5% de TiO_2 en fase anatasa presentó una mejora significativa en el coeficiente de permeabilidad en comparación con la muestra estándar. Además, se logró cumplir con la resistencia a compresión y se exhibieron las propiedades fotocatalíticas (Fernández Mantilla, 2023).

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

A continuación, se describe la metodología de investigación a utilizar durante el desarrollo del proyecto.

El presente trabajo se fundamenta en el estudio de caso de la aplicación de las diferentes técnicas y alternativas para mitigar los efectos de las actividades de construcción en la calidad del aire en el desarrollo del proyecto Club Campestre Entre Ceibas. El club está ubicado en un lote de 17.600 m² al oriente del municipio de Tuluá, Valle del Cauca, hacia la vía que conduce al corregimiento San Rafael a 3 km de la zona urbana, como se presenta en la Figura 4.

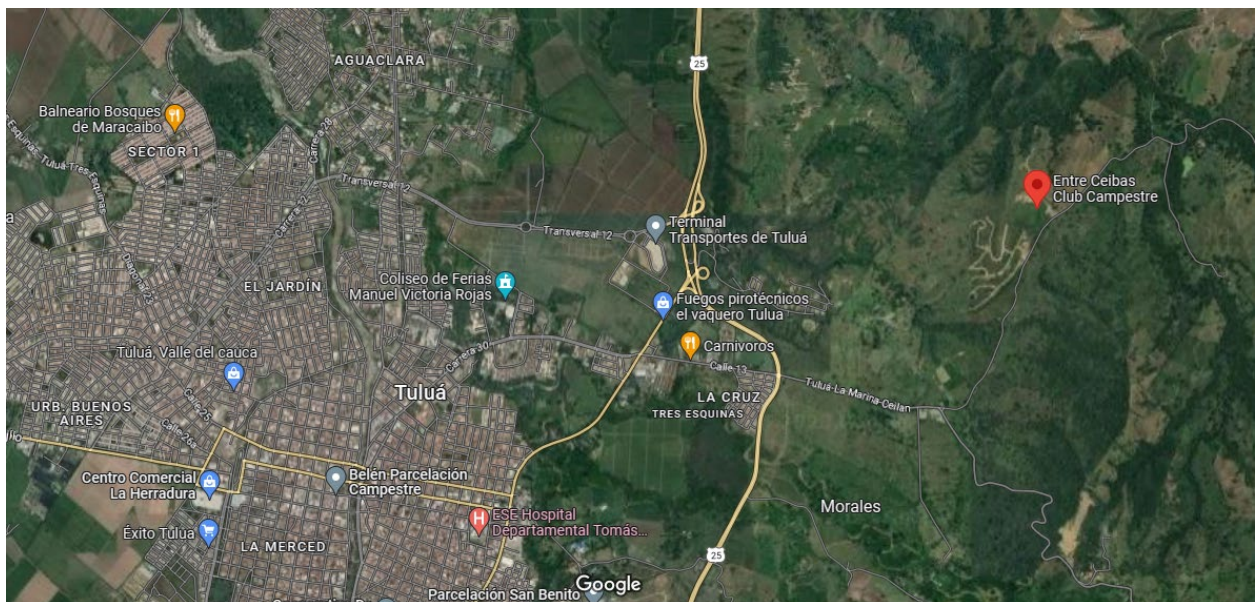


Figura 4 Ubicación club campestre Entre Ceibas

El club se encontrará rodeado de naturaleza sobre la cordillera central, con espacios de recreación, deporte y para compartir en familia. Se proyecta que cuente con cinco canchas de tenis y cuatro de fútbol, zonas húmedas, piscina natural, tres edificaciones para disfrutar de una discoteca insonorizada, salón de eventos, auditorio y espacios para actividades de negocios, como se presenta en las figuras 5 y 6.



Figura 5. Proyecto Entre Ceibas (Consultores Proactivos SAS, 2021).

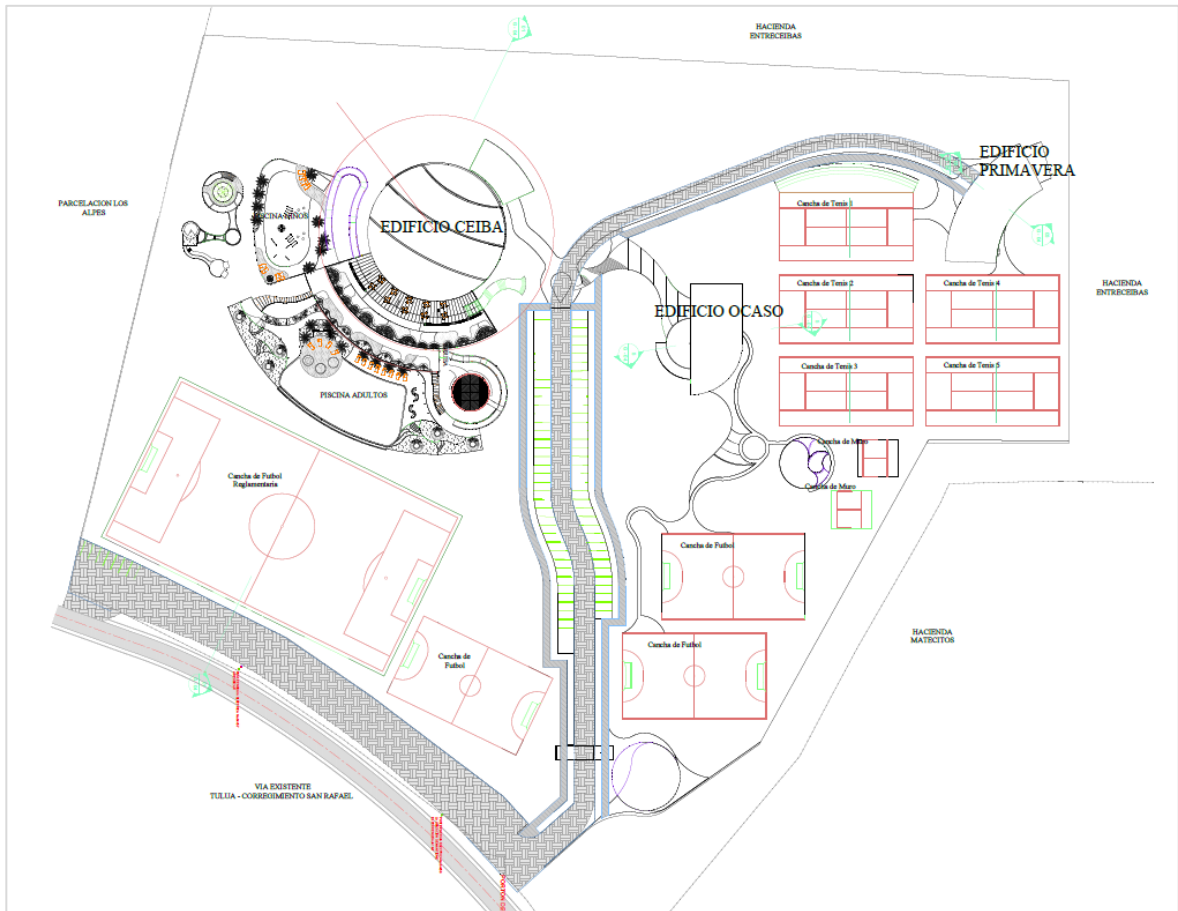


Figura 6. Plano proyecto Entre Ceibas (Consultores Proactivos SAS, 2021).

Teniendo en cuenta que el proyecto se caracteriza por estar rodeado de extensas zonas verdes, se busca que las edificaciones y estructuras que lo conforman no generen un impacto negativo durante la construcción y posterior operación. Por lo tanto, es importante evaluar la aplicación de técnicas y materiales durante la ejecución de las actividades de la obra civil y posterior puesta en operación del club, al estar enfocado en garantizar un ambiente saludable al aire libre.

En este sentido, es importante tener en cuenta los métodos constructivos, el tipo de estructura a construir y las fases del proyecto. La primera fase consta del movimiento de tierras inicial para la vía principal de acceso al área de las edificaciones, la construcción de la zona del campamento, almacén y muros de contención en tierra armada, tanque y red contra incendios, red eléctrica principal, canchas de tenis y del edificio Ceibas.



Figura 7. Canchas de tenis proyecto Entre Ceibas (Consultores Proactivos SAS, 2021).



Figura 8. Edificio Ceibas (Consultores Proactivos SAS, 2021).

La segunda fase consta de la construcción de las cuatro canchas de fútbol, pavimentación parqueadero, piscina y edificio Ocaso. La última fase consiste en la construcción del edificio primavera, las zonas verdes y parques. En las siguientes figuras se observa la proyección del edificio primavera y de las canchas de fútbol, así como en la Tabla 5, se presentan las cantidades generales de las intervenciones que requiere el proyecto.



Figura 9. Canchas de futbol proyecto Entre Ceibas (Consultores Proactivos SAS, 2021).



Figura 10. Edificio Primavera(Consultores Proactivos SAS, 2021).

Tabla 5. Cantidades proyecto Entre Ceibas. Tomado y adaptado de Consultores Proactivos SAS, (2021).

ACTIVIDAD	UND	CANTIDAD
Movimientos de tierras (excavaciones y conformación de taludes)	m ³	42.591,8
Preparación de concretos en sitio para estructuras	m ³	1.524,2
Pavimento rígido y andenes	m ³	1.014,9
Edificio Ceiba	m ²	8823,84
Edificio Ocaso	m ²	4.287,0
Edificio Primavera	m ²	3.369,0
Canchas de fútbol	m ²	8348,0
Canchas de tenis	m ²	4200,0

El proyecto en la actualidad se encuentra en la primera fase de ejecución de obras preliminares de movimientos de tierras para conformación y nivelación de terrazas.

Al conocer los procesos constructivos y actividades a realizar para la ejecución del proyecto, se busca identificar las fuentes principales que contribuyen a la contaminación del aire con el fin de proponer alternativas para su ejecución y que se disminuya o se elimine la generación de contaminantes.

3.1. Caracterización de factores y fuentes contaminantes

La metodología de investigación comprendió varias etapas: primero, se realizó el trabajo de campo en proyectos de construcción en el municipio de Tuluá donde se identificaron factores y fuentes de contaminación de aire con partículas PM_{2.5} y PM₁₀. Al revisar información de campo,

se buscó una herramienta que permitiera evidenciar el efecto de estas actividades de construcción en la calidad del aire, como lo es la aplicación AirVisual que en tiempo real arroja el índice de calidad del aire mediante la ponderación de seis principales contaminantes (PM_{2.5}, PM₁₀, monóxido de carbono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y ozono a nivel del suelo) y también arroja la medición de la concentración de material particulado 2.5, mediante el registro de los datos por contribuyentes que pertenecen al movimiento IQAir, como se puede observar en la Figura 11.

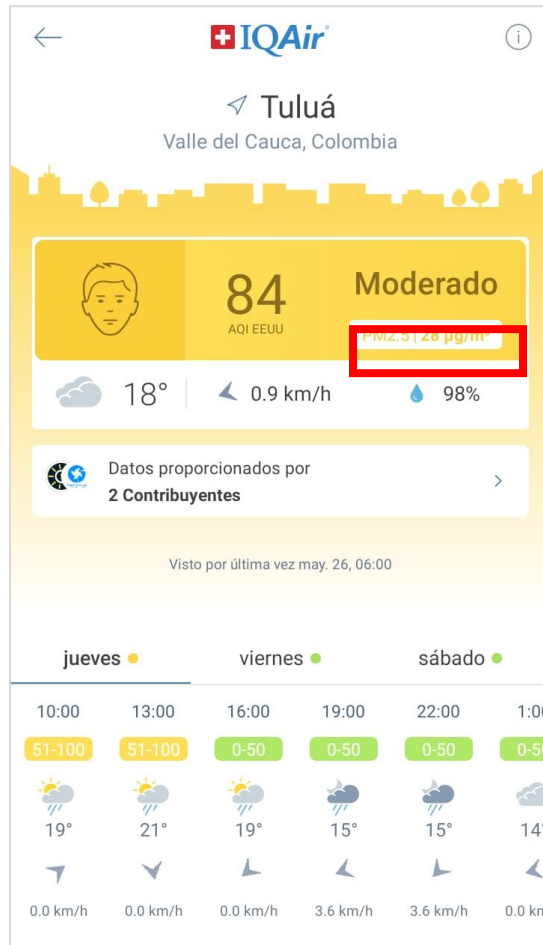


Figura 11. Registro de aplicación Air Visual. (IQAir)

Esta fue una herramienta muy valiosa dentro de la recolección de información debido a que mediante la inteligencia artificial en tiempo real la aplicación AirVisual recopila, analiza y valida millones de puntos de datos de calidad del aire que provienen de monitores de calidad del aire que son operados por gobiernos, organizaciones no gubernamentales e individuos. Estas estaciones proporcionan datos precisos y fiables sobre la calidad del aire. Hay seis categorías de

contribuyentes: gobierno, organización sin fines de lucro, educativo, corporativo, individual y anónimo (IQ Air, 2022).

La plataforma AirVisual tiene como objetivo centralizar y agregar toda la información sobre la calidad del aire disponible en tiempo real en un lugar, con el fin de proporcionar la visión general más completa de la calidad del aire global. Las fuentes de datos que se informan a través de la aplicación AirVisual incluyen datos de sensores, de estaciones de monitoreo gubernamentales, estaciones públicas AirVisual Pro y sensores PurpleAir (IQ Air, 2022). En Colombia se cuenta con las siguientes estaciones y fuentes de datos:

Tabla 6. Estaciones de medición de calidad del aire en Colombia. Tomado y adaptado de IQ Air (2022)

Estaciones de medición	Cantidad
Bogotá	10
Medellín	4
Cartagena	1
Barranquilla	1
Cali	1
Tuluá	2
Manizales	2
TOTAL	21

Tabla 7. Fuentes de datos aplicación Air Visual. Tomado y adaptado de IQ Air (2022)

Fuentes de datos	Tipo
Aires nuevos	Organización colaboradora sin ánimo de lucro
Observatorio ambiental de Bogotá	Gubernamental
U.S. embassy in Bogotá	Colaboradores diplomáticos
Purple Air	Organización colaboradora sin ánimo de lucro
IQ Air	Organización colaboradora sin ánimo de lucro
Air Now	Organización colaboradora sin ánimo de lucro
Air Gradient	Organización colaboradora sin ánimo de lucro

Con la aplicación de esta herramienta, al obtener la concentración de material particulado y el nivel de calidad de aire en tiempo real, se identificaron grupos de actividades que pueden afectar el incremento en la concentración de material particulado PM_{2,5}, con el fin de verificar la relación entre la ejecución de actividades de construcción y su efecto en la calidad del aire.

La toma de datos se realizó entre los meses de mayo a julio de 2022 para los siguientes grupos de actividades: movimientos de tierras, equipos y maquinaria, elaboración de concretos en obra,

mampostería y repellos, consultando en la aplicación datos como concentración $PM_{2.5}$, hora, porcentaje de humedad y temperatura, los cuales se registraron en la Tabla 10, del numeral 4.1.3.

Adicionalmente, se buscó información acerca de las mediciones de las concentraciones de estas partículas y fuentes contaminantes relacionadas con procesos de construcción o infraestructura civil para definir impacto que generan en la calidad del aire en diferentes momentos dentro del ciclo de vida como lo son durante la producción del material, transformación de materiales en obra y su posterior operación. Esta información se obtuvo mediante las bases de datos del IDEAM que se registran en la plataforma SISAIRE (subsistema de información sobre calidad del aire) de las variables meteorológicas y de calidad del aire a nivel nacional para el año 2021.

El análisis de la información de la calidad del aire se realizó con los datos de las concentraciones de material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} durante el año 2021 para la ciudad de Bogotá y Medellín como referente nacional de ciudades con altos volúmenes de actividades contaminantes. Así mismo, se revisó el registro de la información para el municipio de Tuluá con el fin de tener la referencia local conforme las mediciones realizadas por la entidad ambiental.

3.2. Alternativa de diseño

Con la información recopilada y analizada del punto anterior se planteó el diseño de las estrategias que permiten reducir el impacto en la calidad del aire de los elementos contaminantes identificados. Para las alternativas de aplicación se tuvo en cuenta factores como el control en obra de las emisiones, facilidad y practicidad en la implementación, así como la disponibilidad de equipos y materiales de forma local que no acarren sobrecostos innecesarios, como se presenta en la Figura 12.

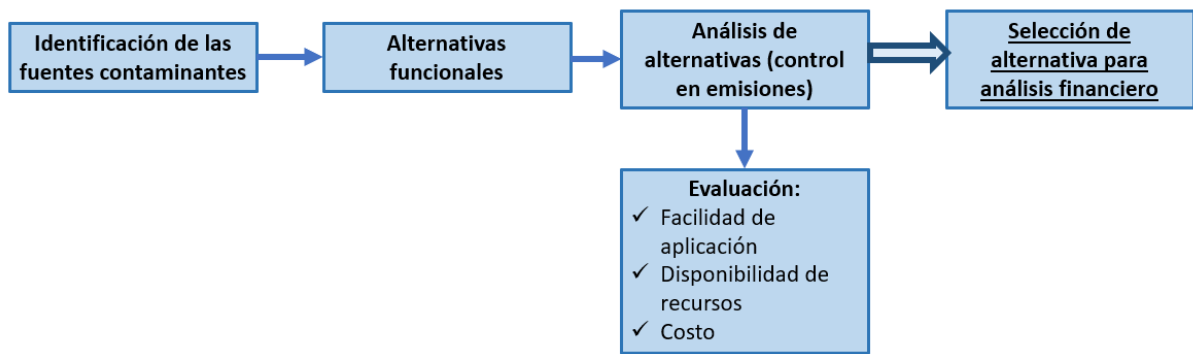


Figura 12. Análisis de alternativa de diseño. Fuente: Elaboración propia

3.3. Análisis financiero

Al tener las alternativas o estrategias para reducir el impacto en la calidad del aire conforme los criterios mencionados en el numeral anterior, para realizar el análisis de la viabilidad financiera de la posible implementación de las estrategias, se construyeron los respectivos análisis de precios unitarios teniendo como referencia los precios de la Gobernación del Valle del Cauca.

Con la información del costo de la implementación de dichas estrategias, se realizó el análisis de factibilidad del proyecto en dos escenarios. El primero con la viabilidad financiera del proyecto con una construcción tradicional y el segundo incluyendo las alternativas planteadas. La viabilidad de cada uno de los escenarios se obtuvo mediante el análisis del flujo de costos en la etapa de diseños, flujo de ventas, flujo de la construcción, la gestión créditos, inversiones y depreciaciones, con lo cual se construyó el flujo de caja neto del proyecto y del inversionista.

Con estos datos, se realizó el análisis financiero teniendo en cuenta los indicadores de bondad como lo son el valor presente neto, la tasa de oportunidad, la tasa interna de retorno, el WACC y la relación beneficio costo, con lo cual se obtuvo la viabilidad de los escenarios planteados, evaluando si se obtienen los resultados esperados por los inversionistas y la comparación desde el punto de referencia del resultado en el escenario de construcción tradicional versus el comportamiento financiero con la aplicación de las alternativas que mitigan los efectos en la calidad del aire con la ejecución del proyecto.

Así mismo, se investigó sobre la gestión operativa de proyectos de construcción evaluando beneficios o alivios tributarios al implementar construcción sostenible, como descuentos en tasas de interés en el préstamo bancario, exclusión de IVA o descuento en el impuesto de renta.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presenta el desarrollo de la investigación con sus respectivos resultados y análisis.

4.1. Factores que contribuyen a la contaminación del aire durante la transformación de materiales de construcción en obra y en la operación de las obras civiles

4.1.1. Ciclo de vida de la construcción

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es el método o herramienta utilizada para entender el impacto real de un producto, proceso, servicio y edificio. El ACV de la construcción abarca desde la extracción de materias primas y procesamiento de materiales, hasta la fabricación, posiblemente distribución, uso, reparación y mantenimiento y finalmente, la eliminación o reciclado, como se muestra en la Figura 13. Durante cada etapa del ACV se utiliza una selección de parámetros para cuantificar el impacto ambiental (Bové, 2016).

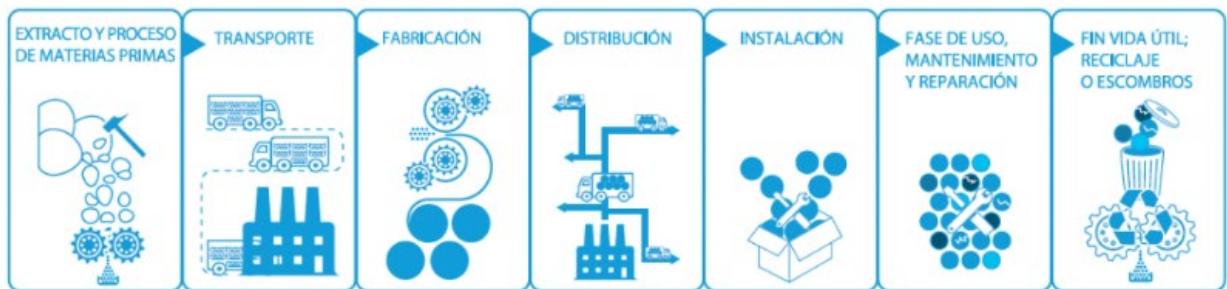


Figura 13. Análisis del ciclo de vida de construcciones (Bové, 2016)

El ACV se ha convertido en un aspecto importante de las edificaciones verdes, no solo en la etapa de uso que se ve influenciada por factores como el uso de energía, el consumo de agua y la generación de residuos, sino que cada vez la fase de la construcción juega un papel de mayor importancia, al enfocarse en realizar una mejor elección de materiales siendo consecuentes con el medio ambiente. Con la evolución de edificaciones carbono neto cero en la etapa de uso, se vuelve indispensable tener en cuenta la energía necesaria para crear productos de construcción y fomentar los sistemas de construcción con un menor impacto ambiental (Bové, 2016).

De acuerdo con lo anterior, dentro del análisis del ciclo de vida de las construcciones, las etapas de fabricación o transformación de materiales en obra y de uso u operación de edificaciones, tienen gran relevancia en la construcción de infraestructura con un bajo impacto ambiental, por lo tanto, el enfoque del presente documento será en estas dos etapas del ciclo del vida de construcciones, con el fin de identificar técnicas y aplicaciones tecnológicas que permitan mitigar los efectos de los diferentes contaminantes en la calidad del aire que se respira en las ciudades.

4.1.2. Fuentes de contaminación del aire

La contaminación del aire es el proceso en que las sustancias resultantes de actividades antrópicas y/o naturales, están presentes en la atmosfera en concentraciones superiores a los niveles permisibles establecidos por las normativas (Núñez Blanco, 2019). El Ministerio de Ambiente mediante la Resolución 2254 de 2017 estableció los niveles máximos de contaminantes del aire como lo son: el ozono (O₃), dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂), partículas en suspensión menores a 2.5 micrones (PM 2.5), partículas en suspensión menores a 10 micrones (PM 10) y monóxido de carbono (CO), los cuales afectan significativamente la salud y el bienestar humano.

De acuerdo con el artículo 2 de la resolución 2254 de 2017 se establecen los niveles máximos permisibles de los contaminantes mencionados anteriormente se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 8. Niveles máximos permisibles de contaminantes criterio en el aire (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2017)

Contaminante	Nivel máximo permisible ($\mu\text{m}/\text{m}^3$)	Tiempo de exposición
PM ₁₀	50	Anual
	75	24 horas
PM _{2.5}	25	Anual
	37	24 horas
SO ₂	50	24 horas
	100	1 hora
NO ₂	60	Anual
	200	1 hora
O ₃	100	8 horas

CO	5.000	8 horas
	35.000	1 hora

El ozono (O_3) es un componente natural en la atmósfera, cuya concentración se incrementa con la altitud hasta alcanzar un máximo en la capa de ozono. La mayor parte del ozono en la tropósfera se produce cuando los óxidos de nitrógeno (NOX), el monóxido de carbono (CO) y los compuestos orgánicos volátiles (COV) reaccionan en la atmósfera, en presencia de luz solar. Las fuentes antropogénicas más importantes de precursores de ozono son las emisiones vehiculares, las emisiones industriales y los solventes químicos. A pesar de que estos precursores se originan en áreas urbanas, pueden ser arrastrados por los vientos a lo largo de varios kilómetros provocando incrementos en la concentración de ozono en regiones menos pobladas (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2017).

Respecto a los efectos en la salud, el ozono en el organismo ejerce su acción cuando el tracto respiratorio es expuesto a este componente, el alcance dependerá de la concentración de ozono, la duración de la exposición, los patrones de exposición y la ventilación. Estos efectos aumentan la susceptibilidad a las infecciones respiratorias. El ozono reduce la función pulmonar, a concentraciones elevadas de ozono se puede agravar el asma y puede causar daño permanente en el pulmón (Dirección de Monitoreo Atmosférico, 2017).

El dióxido de nitrógeno (NO_2) es emitido en pequeñas cantidades junto con el NO y se origina por oxidación del NO en la atmósfera. Tanto el NO como el NO_2 están considerados como contaminantes del aire y son conocidos como NOx. Los óxidos de nitrógeno se forman durante los procesos de combustión a elevadas temperaturas por la oxidación del nitrógeno del aire. La fuente principal de óxidos de nitrógeno, óxido nítrico NO y dióxido de nitrógeno NO_2 procede directamente del tráfico rodado, siendo este responsable de aproximadamente la mitad de las emisiones en regiones como Europa. Las concentraciones de NO y NO_2 son elevadas en áreas urbanas donde el tráfico es más intenso. Otras fuentes importantes de este contaminante son las centrales térmicas productoras de energía eléctrica, instalaciones domésticas de calefacción y procesos industriales (Valladolid, 2021).

El dióxido de azufre SO_2 es un gas que se origina durante la combustión de carburantes fósiles que contienen azufre (petróleo, combustibles sólidos), llevada a cabo sobre todo en los procesos

industriales de alta temperatura y de generación eléctrica. Este contaminante puede producir, incluso a grandes distancias del foco emisor, efectos sobre la salud como irritación e inflamación del sistema respiratorio, afecciones e insuficiencias pulmonares o alteración del metabolismo de las proteínas. Adicionalmente, sobre los ecosistemas puede ocasionar daños a la vegetación y pérdida de especies e incluso sobre las edificaciones, a través de procesos de acidificación, pues una vez emitido, reacciona con el vapor de agua y con otros elementos presentes en la atmósfera, de modo que su oxidación en el aire da lugar a la formación de ácido sulfúrico. Además, también actúa como precursor de la formación de sulfato amónico, lo que incrementa los niveles de PM₁₀ y PM_{2.5}, con graves consecuencias igualmente sobre la salud (Ministerio de Ambiente y Desarrollo, 2012).

El monóxido de carbono es un gas inodoro, incoloro, insípido, tóxico y muy inflamable. Es menos pesado que el aire, por lo que se acumula en las zonas altas de la atmósfera. Tiene una afinidad mucho más alta que el oxígeno por la hemoglobina de la sangre, formando un compuesto denominado carboxihemoglobina, que impide el transporte de oxígeno a las células, y por tanto el organismo no puede obtener la energía para sobrevivir. La principal fuente de emisión del monóxido de carbono se produce en el sector transporte debido a la combustión incompleta de gas, petróleo, gasolina, carbón y aceites. Otras fuentes de emisiones son los aparatos domésticos que queman combustibles fósiles y respecto a los sectores industriales se encuentra la industria metalurgia en la fundición de aceros, industrias de fabricación de papel y plantas productoras de formaldehído (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico España, 2020).

Las partículas PM₁₀ corresponden a aquellas con diámetro ≤ 10 micrómetros. Las partículas PM_{2.5}, tienen un diámetro aerodinámico nominal $\leq 2,5$ μm . El material particulado tiene diferentes tiempos de vida y de permanencia en la atmósfera, esto depende del tamaño de las partículas, con duración de horas, para las partículas más gruesas, hasta días y semanas, para las partículas más pequeñas. Así mismo, hay variaciones dependiendo de la capa atmosférica en que se encuentra. Por ejemplo, el tiempo de vida del PM en la troposfera varía entre un día a dos semanas, y aproximadamente un año en la estratósfera (Núñez Blanco, 2019).

El material particulado puede clasificarse según su origen, natural o antropogénico. Las fuentes naturales de PM pueden ser erupciones volcánicas, tormentas de arena, actividades sísmicas, aerosoles marinos o incendios forestales. Entre las fuentes antropogénicas, generadas por las

actividades humanas, son principalmente originadas por emisiones vehiculares emitidas por motores diésel o gasolina, actividades industriales, de construcciones civiles y agricultura (Núñez Blanco, 2019).

De acuerdo con un estudio desarrollado en el 2019 en la ciudad de Barranquilla donde se buscó cuantificar la contribución de las fuentes de material particulado atmosférico (PM10 y PM2.5), se identificó que las fuentes prioritarias para el PM2.5 fueron la combustión de aceite combustible e industria de fertilizantes (36%) y suelo re suspendido (22,3%), mientras que para el PM10 se destacaron las contribuciones de obras civiles y suelo re suspendido (34,2%) y aerosol marino (29,8%), de acuerdo con los aportes de las fuentes locales (Núñez Blanco, 2019).

En la normativa aplicable para el control de la calidad del aire en Colombia se identifican las principales sustancias contaminantes de acuerdo con la fuente que las produce. Por ejemplo, el material particulado PM 2.5 y PM 10 se relaciona directamente con las actividades realizadas en obra y el dióxido de nitrógeno que se genera por el tráfico rodado, pero que para tratar los efectos de este contaminante se han desarrollado alternativas que al aplicarlo en superficies de infraestructura civil que retienen este contaminante, son sustancias que pueden analizarse dentro del ciclo de vida de la construcción con el fin de construir infraestructura con un menor impacto ambiental referente a la calidad del aire.

En cuanto a la etapa de transformación de materiales en obra, se han identificado actividades que generan en mayor porcentaje emisiones de material particulado, como lo es el material que se levanta durante el tránsito de maquinaria tanto al interior como al exterior de las obras, así como el movimiento de tierras o materias primas referentes a material pétreo y escombros o trasiegos internos de materiales. Así mismo, se produce material particulado en la fabricación de concretos y morteros en obra por el movimiento de materiales que expanden partículas finas que son volátiles, durante actividades de corte de concreto, mampostería o cerámicas, como se evidencia en la Figura 14 (Vergaño, 2019).

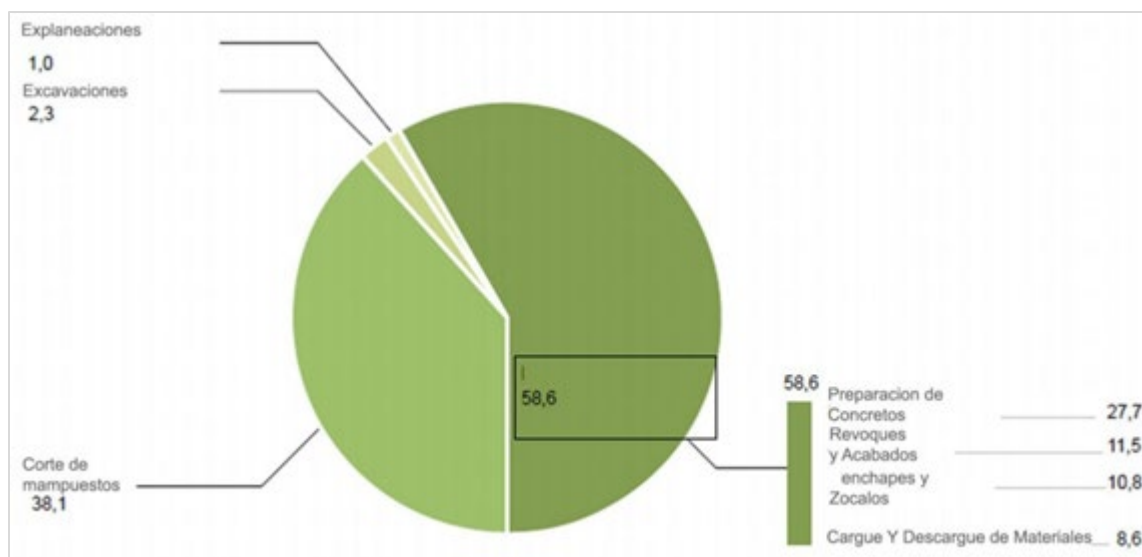


Figura 14. Porcentaje de influencia de actividades de construcción en la generación de material particulado (Vergaño, 2019).

De acuerdo con diferentes profesionales que se relacionan con la industria de la construcción y el medio ambiente, los procesos constructivos pueden ser responsables del 10 al 25% del material particulado que contamina el aire, y que además de que el control de sus emisiones es inevitable, se ha infravalorado esta generación, por lo que es necesario implementar alternativas que puedan mitigar sus efectos (Vergaño, 2019).

4.1.3. Mediciones históricas

Para determinar el impacto que tienen las diversas actividades del sector de la construcción en la calidad del aire es importante tener en cuenta mediciones históricas en ciudades que han experimentado situaciones críticas respecto a las concentraciones altas de material particulado. Esta información se analizó a través de la plataforma SISAIRES (subsistema de información sobre calidad del aire), en la cual el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) a nivel nacional recolecta información de las variables meteorológicas y de calidad del aire mediante las diferentes estaciones que manejan las autoridades ambientales de las ciudades y municipios.

Se inició con el análisis de la información de la calidad del aire fundamentándose en las concentraciones de material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} durante el año 2021 para la ciudad de Bogotá, teniendo en cuenta dos estaciones de medición, una ubicada en la localidad de Ciudad

Bolívar al sur de la ciudad y Suba ubicada al noroccidente. En las siguientes gráficas se observa la variación de las mediciones mensuales de la concentración de material particulado en promedio y la medición más alta por mes, comparado con los límites de cada uno de acuerdo con los niveles máximos permitidos en la resolución 2254 de 2017, en la que se establecen unos niveles desde el año 2018 y otros a partir del año 2030.

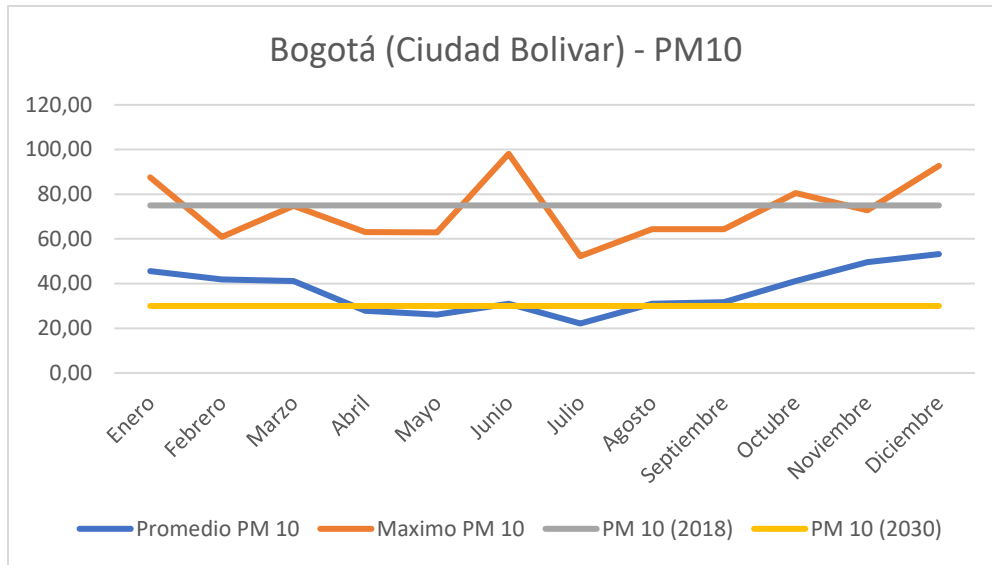


Figura 15. Registro de mediciones de PM_{10} estación Ciudad Bolívar ubicada en Bogotá D.C. Tomado y adaptado de (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022)

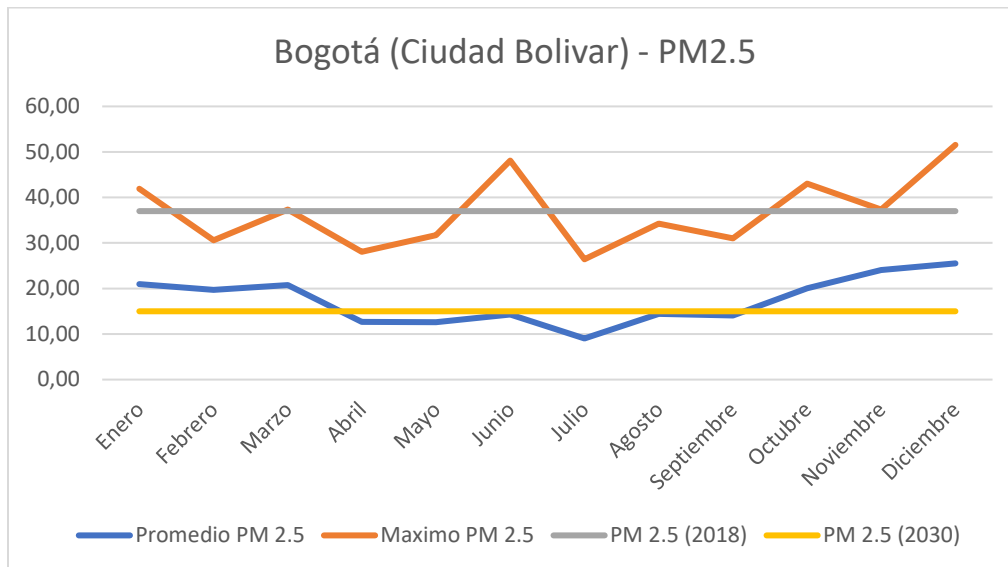


Figura 16. Registro de mediciones de $PM_{2.5}$ estación Ciudad Bolívar ubicada en Bogotá D.C. Tomado y adaptado de (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022)

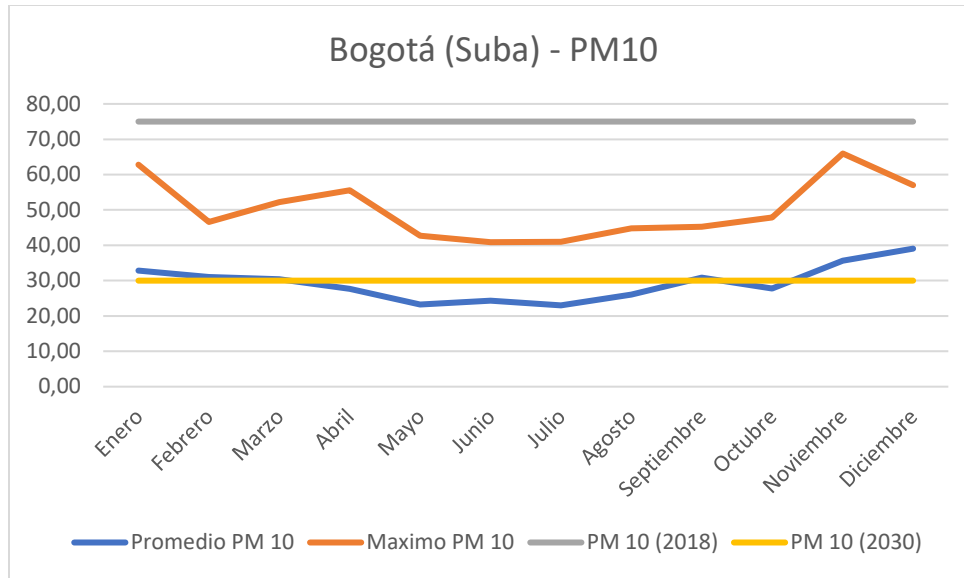


Figura 17. Registro de mediciones de PM₁₀ estación Suba ubicada en Bogotá D.C. . Tomado y adaptado de (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022)

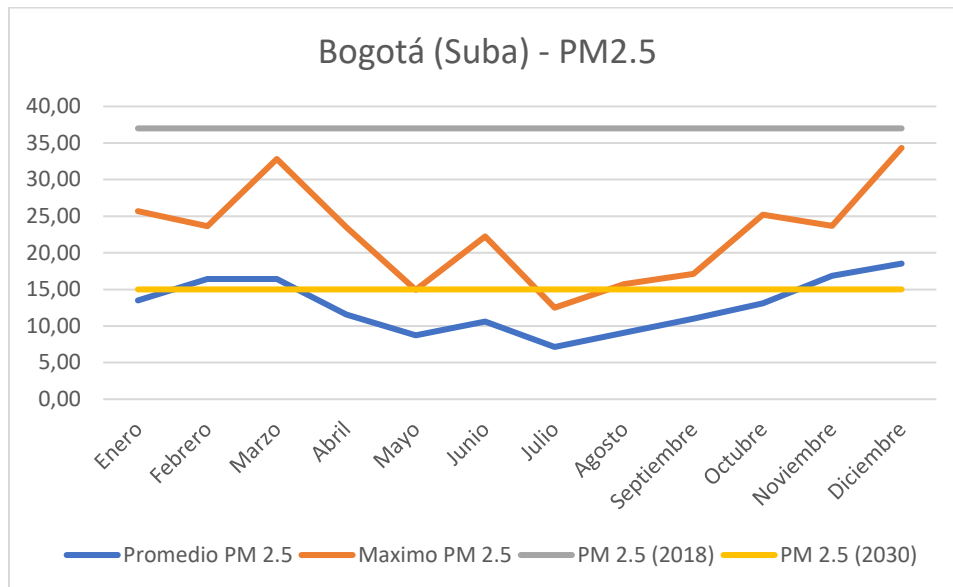


Figura 18. Registro de mediciones de PM_{2.5} estación Suba ubicada en Bogotá D.C. . Tomado y adaptado de (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022)

Respecto a la información de las gráficas anteriores, se puede analizar que la localidad de Ciudad Bolívar cuenta con unos niveles de concentración de material particulado PM_{2.5} y PM₁₀, mayor que los de la localidad de Suba. En la Figura 15 se observa que las mediciones de la concentración de PM₁₀ no son superiores al límite actual (75 µg/m³), sin embargo, se han presentado picos en los meses de enero, marzo, junio, octubre y diciembre que superan este límite.

Adicionalmente, frente al nivel de medición que se proyecta como máximo al año 2030, se evidencia una situación crítica, debido a que de las mediciones promedio para el año 2021, el 75% se encuentran por encima del nivel proyectado de $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Así mismo, se puede observar en la Figura 16 que el comportamiento de los niveles de concentración de $\text{PM}_{2.5}$ para la localidad de Ciudad Bolívar, son muy similares a los de PM_{10} , se evidencia picos que superan el nivel permitido en la actualidad y las mediciones promedio tienden a acercarse al límite proyectado para 2030 de $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un 60% de las mediciones supera este límite.

Estas mediciones en la localidad de Ciudad Bolívar obedecen a que en este sector de la ciudad se desarrollan actividades altamente contaminantes, debido a que se encuentra el relleno sanitario doña Juana, canteras de explotación minera y ladrilleras, sumado a que hay polvo en el aire de zonas que no están pavimentadas en donde el viento a través de procesos erosivos hace que este material particulado quede resuspendido en el aire (La Republica, 2023). Por lo tanto, la exposición a material particulado en esta localidad es alta y se deben tomar medidas para mitigar los efectos en la población.

Respecto a las mediciones registradas de material particulado en la localidad de Suba en la Figura 17 y Figura 18, se observa que las mediciones promedio de las concentraciones para ambos tienden a encontrarse cercanas al límite proyectado para el 2023, y para algunos casos, los máximos registrados superan este límite. Por lo que, en la actualidad las actividades que generan concentración de material particulado en esta localidad se encuentran dentro de los límites permitidos, sin embargo, se deben plantear medidas para que al año 2030 estas concentraciones no incrementen.

También se tuvo en cuenta las mediciones para la ciudad de Medellín para el año 2021 en la estación Villa Hermosa, como se observa en las siguientes figuras, considerando que la contaminación del aire en esta ciudad representa uno de los mayores riesgos ambientales sobre la salud humana, debido a que se ha evidenciado una exposición prolongada al aire contaminado y esto se relaciona con aumentos en la mortalidad derivada de enfermedades respiratorias y cardiovasculares. El Material Particulado compuesto por partículas inferiores a 2.5 micras de diámetro ($\text{PM}_{2.5}$) y el compuesto por partículas de un diámetro inferior a las 10 micras (PM_{10}) son

los contaminantes con mayor presencia en entornos abiertos urbanos, y con mayores afectaciones sobre la salud (Medellín cómo vamos, 2021).

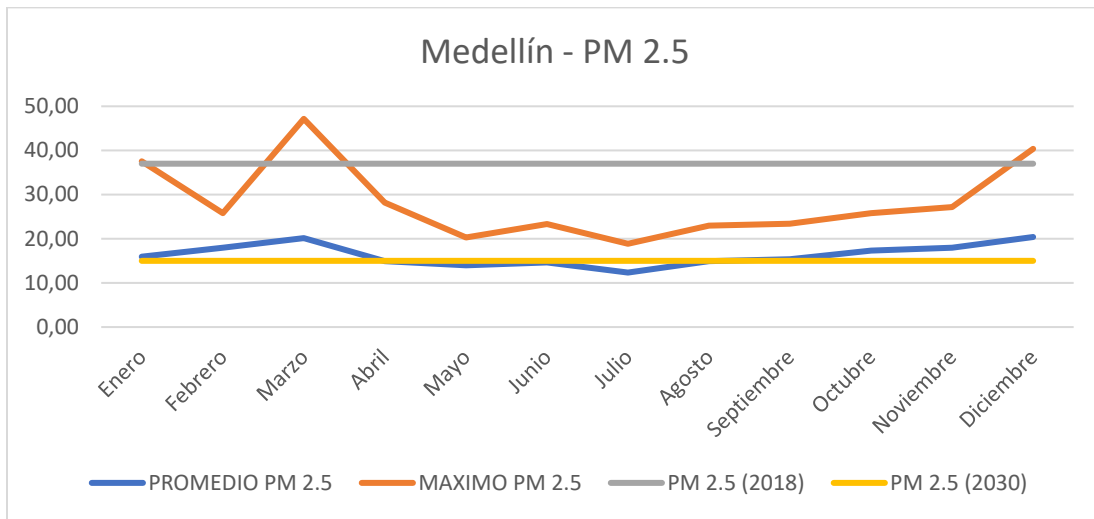


Figura 19. Registro de mediciones de PM_{2.5} estación Villa hermosa ubicada en Medellín. Tomado y adaptado de (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022)

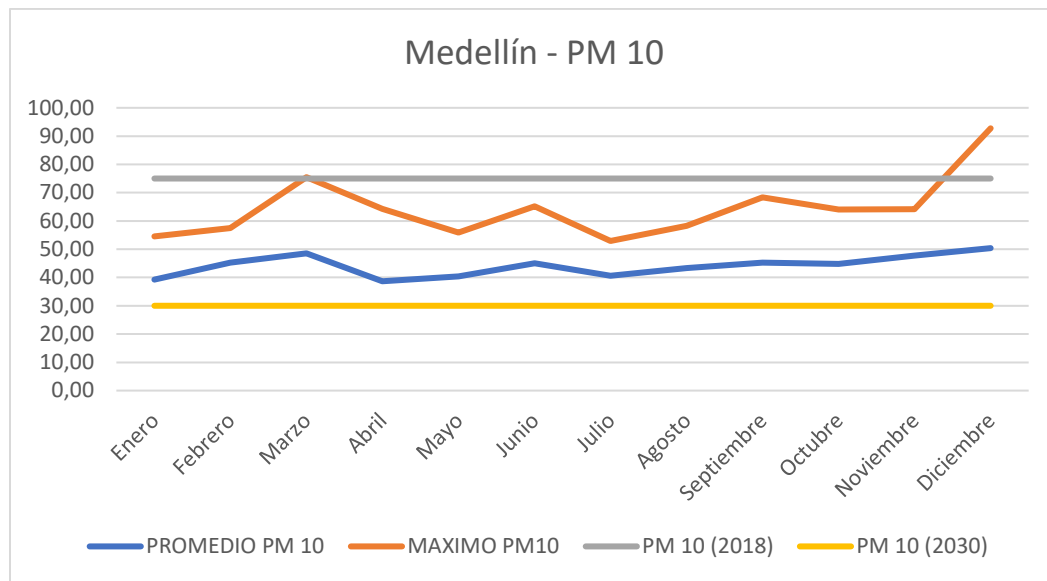


Figura 20. Registro de mediciones de PM₁₀ estación Villa hermosa ubicada en Medellín. Tomado y adaptado de (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022)

Entre 2020 y 2021 en Medellín, disminuyó la satisfacción con la calidad del aire, pasando de 45 a 34 %. Adicionalmente, la mayoría de los aspectos ambientales disminuyeron la satisfacción ciudadana, retornando a niveles prepandemia (Medellín cómo vamos, 2021). Por lo anterior, se observa en las gráficas que, aunque se han presentado picos de mediciones máximas mensuales

muy cercanas a la concentración permitida en la actualidad para ambas partículas, es necesario revisar las medidas que se toman en la ciudad para mejorar la calidad del aire, debido a que las actividades que se desarrollan en este sector superarían el límite permitido para el año 2030, poniendo en riesgo la salud de sus habitantes.

De acuerdo con el proyecto objeto de estudio de caso, es necesario analizar las mediciones de las concentraciones de las partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} en el municipio de Tuluá para el año de estudio 2021, donde en las siguientes figuras se observa el comportamiento de la concentración de estas partículas. Para el caso específico de $PM_{2.5}$ se observa que las mediciones promedio y máximas por mes no exceden el límite actual. Sin embargo, con la proyección del límite para el año 2030 se identifica que las mediciones máximas en un 60% pasan este límite o se encuentra muy cercano.

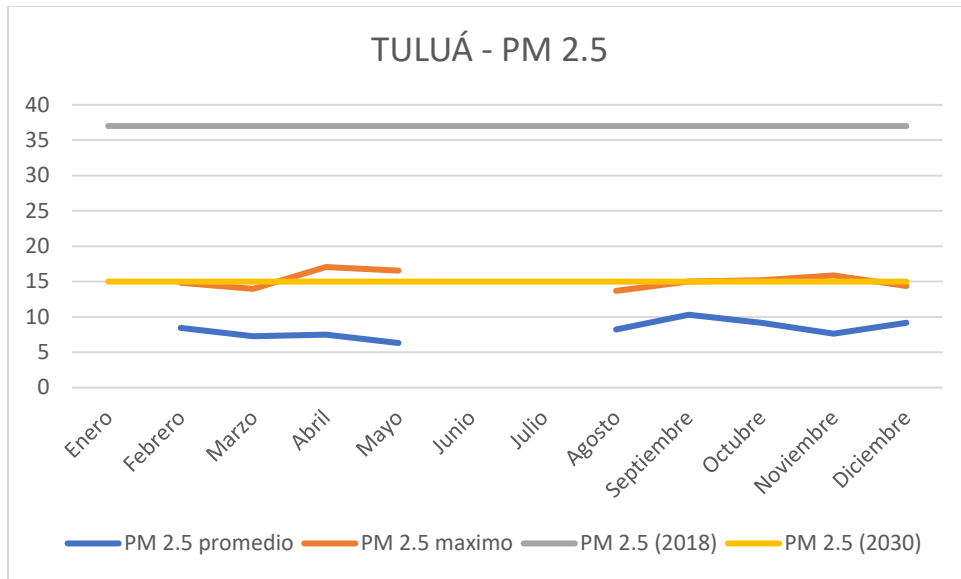


Figura 21. Registro de mediciones de $PM_{2.5}$ estación Tuluá, Valle del Cauca. Tomado y adaptado de (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022)

Respecto a las mediciones de las partículas PM_{10} en el municipio de Tuluá se identifica que, aunque el promedio no excede el límite vigente, el 20% de las mediciones máximas sí lo excede. Así mismo, el 30% de las mediciones promedio y el 90% de las mediciones máximas sobrepasan

el límite proyectado para el año 2023, por lo tanto, la concentración de estas partículas requiere mayor vigilancia para controlar sus niveles.

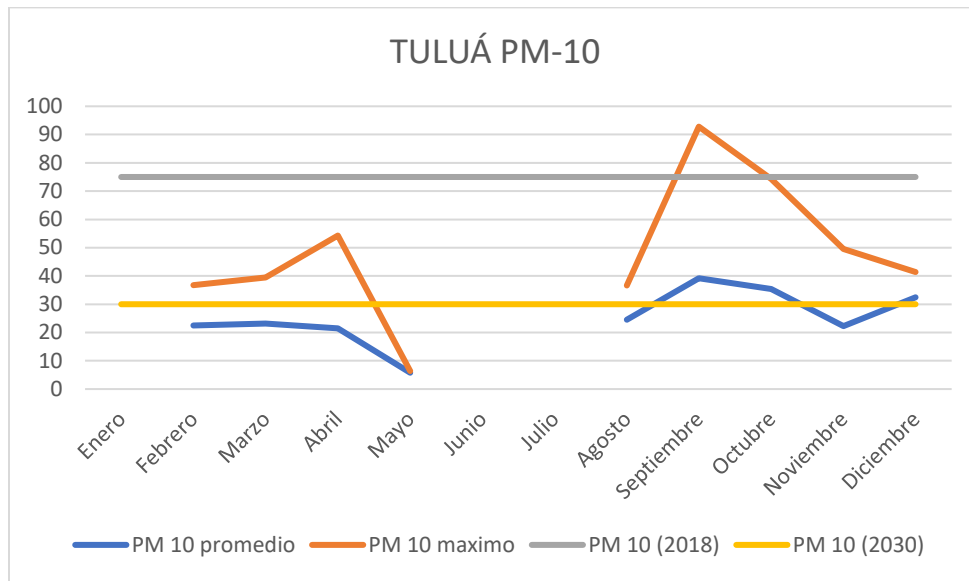


Figura 22. Registro de mediciones de PM₁₀ estación Tuluá, Valle del Cauca. Tomado y adaptado de (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022)

De acuerdo con la información arrojada por el sistema de calidad del aire del IDEAM, respecto a las concentraciones de material particulado para el municipio de Tuluá, se realiza un análisis detallando la actividad constructora durante el año 2021 con el fin de evaluar la influencia de estas en la concentración de partículas PM_{2.5} y PM₁₀, como se evidencia en la siguiente tabla.

Tabla 9. Áreas intervenidas por las obras ejecutadas en Tuluá en el año 2021. Fuente: Datos tomados de contratación de obras públicas relacionados en SECOP I

Descripción	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic
Bacheos pavimento rígido (m ²)				67,00	56,00	84,00	82,00	65,35	42,00	35,20		
Bacheos pavimento flexible (m ²)				60,28	50,38	75,57	73,77	58,79	37,78	31,67		
Carpeta asfáltica aguacalara y centro (m ²)					5.148,70							
Pavimento rígido comuna 8 (m ²)							620,00	1.538,70	4.972,19	1.080,00		
Pavimento flexible calle 34							984,60	1.496,47				

Descripción	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag	Sep	Oct	Nov	Dic
con carrera 27A (m ²)												
Andenes aguaclara y sajonia (m ²)									4.116,70	1.156,45	561,80	230,34
Carpeta asfáltica Tv 12 (m ²)										12.214,00	16.600,00	
Pavimento rígido B/ Flor de la campana (m ²)												705,00
Pavimento rígido campoalegre (m ²)											1.032,00	
Pavimento rígido B/ Nuevo príncipe (m ²)											654,00	436,00
Pavimento rígido vía la rivera (m ²)											284,70	685,30
Pavimento flexible vía la rivera (m ²)												840,00
Conformación de taludes Club campestre Entre ceibas (m ²)		5489	4870	12587	7224				5378,7	3472,7		4352
TOTAL Área intervenida (10³ m²)	0	5,48	4,87	12,71	12,48	0,15	1,76	3,16	14,54	17,99	19,13	7,24

De acuerdo con la información anterior se realiza un análisis de la correlación entre las variables de metros cuadrados intervenidos en obras civiles vs concentración de material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀), lo cual se presenta en las siguientes figuras, evidenciando que en un 63% la magnitud de las intervenciones en obras de infraestructura ejecutadas en el municipio de Tuluá están relacionadas con la concentración de PM_{2.5}, mientras que del área intervenida se relaciona en un 46% la concentración registrada para PM₁₀.

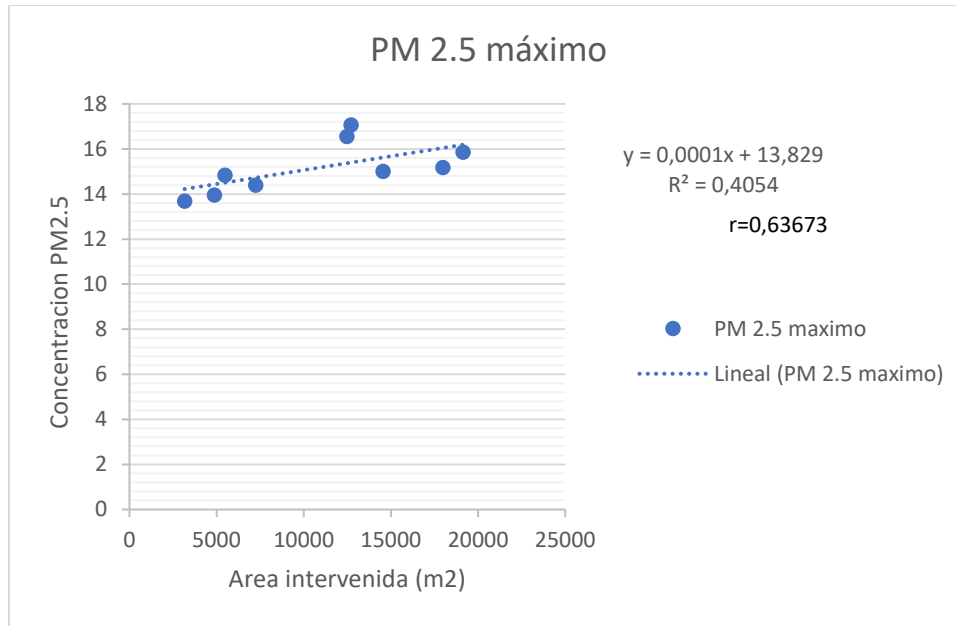


Figura 23. Correlación entre las variables área intervenida vs. Concentración PM_{2.5}.
Fuente: Elaboración propia

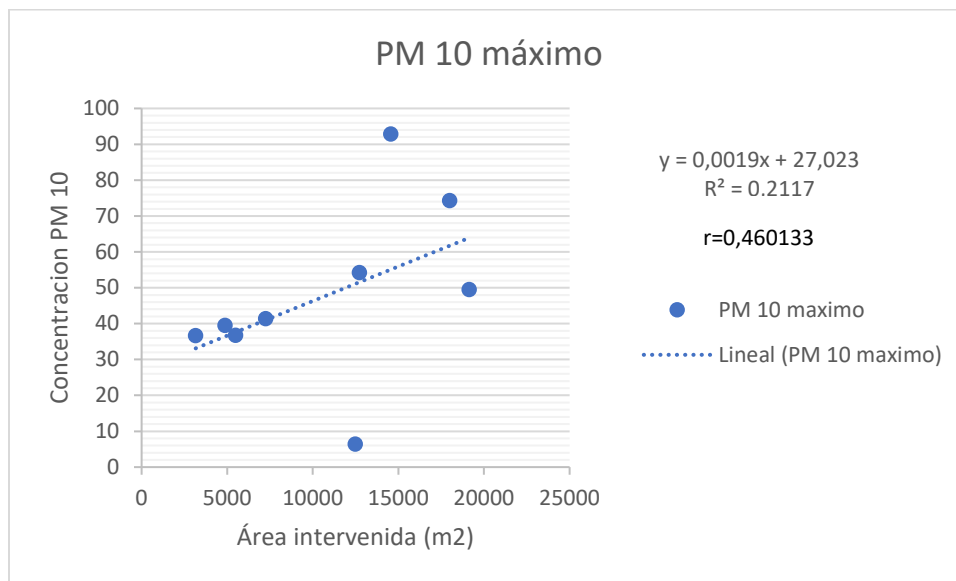


Figura 24. Correlación entre las variables área intervenida vs. Concentración PM₁₀.
Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los registros históricos reportados y relacionados con las obras civiles para el año 2021, se buscó el método para tener mediciones instantáneas según la ubicación y actividades desarrolladas, encontrando la aplicación AirVisual que el tiempo real arroja el índice de calidad del aire mediante la ponderación de seis principales contaminantes (PM_{2.5}, PM₁₀, monóxido de carbono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y ozono a nivel del suelo) y también arroja la

medición de la concentración de material particulado 2.5, mediante el registro de los datos por contribuyentes que pertenecen al movimiento IQAir.

Teniendo en cuenta esta herramienta, se identificaron grupos de actividades que pueden afectar el incremento en la concentración de material particulado PM_{2.5}, con el fin de verificar la relación entre estas dos variables.

La toma de datos se realizó entre los meses de mayo a julio de 2022 para los siguientes grupos de actividades: movimiento de tierras, equipos y maquinaria, elaboración de concretos en obra, mampostería y repellos, consultando en la aplicación datos como concentración PM_{2.5}, hora, porcentaje de humedad y temperatura, los cuales se registraron en la siguiente tabla.

Tabla 10. Registro de variables para análisis de concentración de PM_{2.5} y actividades de construcción. Tomado y adaptado de Air Visual.

Grupos de actividades	Fecha	Concentración PM 2.5 (µg/m ³)	Hora	Humedad (%)	Temperatura (°C)
Movimientos de tierras	18/05/2022	18	2:39 p. m.	70	25
	19/05/2022	7,2	8:25 a. m.	98	17
	21/05/2022	20,4	9:54 a. m.	93	18
	23/05/2022	7	8:22 a. m.	95	19
	3/06/2022	12	3:49 p. m.	87	20
	11/06/2022	15	3:04 p. m.	95	18
	6/07/2022	26	9:09 a. m.	95	19
	12/07/2022	16,8	8:20 a. m.	100	17
Equipos y maquinaria	26/05/2022	28	8:10 a. m.	98	18
	6/07/2022	26	9:09 a. m.	95	19
	8/07/2022	15,6	9:55 a. m.	92	19
Concretos en obra	18/05/2022	18	2:39 p. m.	70	25
	24/05/2022	18	12:42 p. m.	70	25
	28/05/2022	9,6	12:21 p. m.	60	25
	31/05/2022	28	9:09 a. m.	98	18
	3/06/2022	12	3:49 p. m.	87	20
	10/06/2022	12	4:21 p. m.	94	19
	23/06/2022	36,3	12:06 p. m.	69	25
	2/07/2022	21	8:42 a. m.	99	16
Mampostería	8/07/2022	15,6	9:55 a. m.	92	19
	17/05/2022	6,1	3:43 p. m.	85	20
	18/05/2022	18	2:39 p. m.	70	25

Grupos de actividades	Fecha	Concentración PM 2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Hora	Humedad (%)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)
	3/06/2022	12	3:49 p. m.	87	20
Repellos	17/05/2022	6,1	3:43 p. m.	85	20

De acuerdo con los datos registrados se puede analizar la influencia en la concentración de los grupos de actividades, iniciando por equipos y maquinaria, elaboración de concretos en obra, movimientos de tierras, mampostería y repellos. Así mismo, se puede relacionar la temperatura y la hora con el incremento de la concentración de material particulado. Tomando un rango de 21 a 25 $^{\circ}\text{C}$ la concentración se promedia en 19.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ presentándose en horas cercanas al medio día y tarde, en el rango de 18 a 20 $^{\circ}\text{C}$ la concentración se promedia en 16.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ presentándose en horas finales de la tarde y en un rango de 16 a 17 $^{\circ}\text{C}$ en horas de la mañana, la concentración de PM_{2.5} se promedia en 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Teniendo en cuenta estos resultados obtenidos de mediciones en campo, se evidencia que si bien en la actualidad cumplen con el rango permisible de concentración de PM_{2.5}, de acuerdo con la proyección al año 2030 estas actividades superarían la concentración límite de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, por lo tanto, es necesario tomar acciones que garanticen la calidad del aire.

4.2. Diseñar una estrategia, proceso o aplicación tecnológica que reduzca el impacto en la calidad del aire para analizar los efectos de su implementación

De acuerdo con las actividades identificadas dentro de los procesos constructivos que pueden generar mayor concentración de material particulado relacionados en el punto anterior, se encuentran el descargue de material pétreo, movimiento de tierras, preparación de concretos en sitio, cortes de material para mampostería y pavimentos, así como limpiezas generales en obra.

Teniendo en cuenta la disponibilidad de recursos y la practicidad en su implementación no se abordó un proceso o aplicación tecnología, si no que en este caso específico se diseñaron las estrategias de implementación en obras de construcción que se exponen a continuación, con el fin de contrarrestar los efectos de las emisiones de partículas en la ejecución de las actividades mencionadas anteriormente.

Tabla 11. Estrategias para minimizar impacto en calidad de aire en obras. Fuente: Elaboración propia

ACTIVIDAD	ESTRATEGIA	
<p>Descargue de material pétreo</p>	<p>Acopio con cerramiento y lona protectora para evitar pérdida de material, contaminación del suelo y esparcimiento de material particulado</p>	 <p>Fuente: Propia</p>
<p>Movimiento de tierras (excavaciones y conformación de taludes)</p>	<p>Cañones nebulizadores para humedecer la zona de trabajo y evitar el esparcimiento de material particulado en el aire</p>	 <p>Fuente: (Hennlich, 2024)</p>
<p>Preparación de concretos en sitio para estructuras</p>	<p>Cerramiento en plástico tipo invernadero (3x3x5m) y uso de mascarillas para preparación manual de concretos con el fin de evitar el esparcimiento de material particulado de arena, grava y cemento</p>	 <p>Fuente: Propia; (Central plast, 2024)</p>
<p>Cortes de material para mampostería y muros</p>	<p>Incluir aspiradora a la cortadora de mampostería y uso de mascarillas para evitar el esparcimiento de material particulado en el lugar y en las vías respiratorias de los trabajadores</p>	 <p>Fuente: (Hilti, 2024)</p>

ACTIVIDAD

ESTRATEGIA

Cortes en pavimento

Incluir aspiradora a la cortadora de pavimento y uso de mascarillas para evitar el esparcimiento de material particulado en el lugar y en las vías respiratorias de los trabajadores



Fuente: (Homecenter, 2024)

Retiro de saldos en obra

Empaquetamiento de escombros o saldos en sitio en estopas para contener material particulado que se puede esparcir en el aire una vez se vaya a hacer la disposición final



Fuente: Propia

Pavimento rígido y andenes

Concreto autolimpiante MR38 para pavimentos y concreto de 3100 psi para andenes con TiO_2 en la mezcla



Fuente: Propia

Pintura vinilo

Pintura con TiO_2 para los acabados en las fachadas de board



Fuente: (Ti-Pure, 2024)

ACTIVIDAD	ESTRATEGIA
Limpiezas generales en obra	Limpiezas generales en obra con hidrolavadora para evitar esparcimiento de material particulado



Fuente: (Equiconstructor, 2024)

Conforme las alternativas propuestas para mitigar el impacto que tiene las altas concentraciones de material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} durante la ejecución de una obra, a continuación, se presentan los análisis de precios unitarios asociados a la implementación de estas estrategias.

Tabla 12 Análisis de precio unitario para acopio con cerramiento y lona protectora. Fuente: Elaboración propia

CERRAMIENTO PERIMETRAL PARA ACOPIO (h=1,5m)						UND	
ITEM - Descripción	Unidad	Cant	Desper	Vr/Unitario	Vr/Parcial		
002556-TABLA1x10x300OTOBO	UND	1,67	0	13.007	21.722		
001365-GUADUA[TACO]2.50-3M	UND	1	0	10.500	10.500		
002294-PUNTILLA2CC	LBS	0,07	0,25	3.900	273		
004086-ALAMBREGALVANIZADO#18	KG	0,2	0	9.900	1.980		
MOAG13-MANOOBRAALBANILERIA3AYUDANTE-1C	HC	0,17	0	41.793	7.105		
MQ0301-HERRAMIENTAMENOR	GLB	0,748	0	1.600	1.197		
	Materiales	Equipo	AIU	SubTotal	Mano de Obra	Otros	VALOR TOTAL
	34.475	0	0	34.475	7.105	1.197	\$ 42.776
CONTRAPISO CONCRETO E=10 CM 2.500Psi						M2	
ITEM - Descripción	Unidad	Cant	Desper	Vr/Unitario	Vr/Parcial		
001617-LISTON1x4x300OTOBO	UND	0,335	0	26.333	8.822		
002293-PUNTILLA1.1/2CC	LBS	0,05	0	3.900	195		
ME0109-MEZCLA CONCRETO 2500 PSI(17.5 MPA)	M3	0,1	0	285.667	28.567		
MOAG11-MANOOBRAALBANILERIA1AYUDANTE-1OFI	HC	0,7	0	23.896	16.727		
MQ0301-HERRAMIENTAMENOR	GLB	0,4	0	1.600	640		
	Materiales	Equipo	AIU	SubTotal	Mano de Obra	Otros	VALOR TOTAL
	37.583	0	0	37.583	16.727	640	\$ 54.950
CONFORMACION DE TIERRA A MANO						M2	
ITEM - Descripción	Unidad	Cant	Desper	Vr/Unitario	Vr/Parcial		
MOAG03-MANOOBRAALBANILERIA3AYUDANTE	HC	0,01	0	26.846	268		
MQ0301-HERRAMIENTAMENOR	GLB	0,01	0	1.600	16		
MQ0125-VIBROCOMPACT ADORTIPORANA	DIA	0,05	0	29.155	1.458		
003282-GASOLINACORRIENTE	GLN	0,08	0	8.890	711		
003830-ACEITEMOTOR4TIEMPOS	GLN	0,015	0	86.625	1.299		
	Materiales	Equipo	AIU	SubTotal	Mano de Obra	Otros	VALOR TOTAL
	1.458	0	0	1.458	268	2.027	\$ 3.753
08-06-21-CUNETAS EN TIERRA (MANUAL)						ML	
ITEM - Descripción	Unidad	Cant	Desper	Vr/Unitario	Vr/Parcial		
MOAG01-MANOOBRAALBANILERIA1AYUDANTE	HC	0,2	0	8.949	1.790		
MQ0301-HERRAMIENTAMENOR	GLB	0,1	0	1.600	160		
	Materiales	Equipo	AIU	SubTotal	Mano de Obra	Otros	VALOR TOTAL
	0	0	0	\$ 0	1.790	160	\$ 1.950
LONA PROTECTORA IMPERMEABLE						M2	
ITEM - Descripción	Unidad	Cant	Desper	Vr/Unitario	Vr/Parcial		
MOAG01-MANOOBRAALBANILERIA1AYUDANTE	HC	0,2	0	8.949	1.790		
LONA PROTECTORA IMPERMEABLE	M2	1	0	\$ 6.500,00	\$ 6.500,00		
GANCHO TIPO CANCAMO PARA SOPORTE DE LONA	UND	2	0	100	\$ 200,00		
	Materiales	Equipo	AIU	SubTotal	Mano de Obra	Otros	VALOR TOTAL
	\$ 6.700,00	0	0	\$ 6.700,00	1.790	0	\$ 8.490
CERRAMIENTO PERIMETRAL PARA ACOPIO (h=1,5m)			\$ 1.796.604,60				
CONTRAPISO CONCRETO E=10 CM 2.500Psi			\$ 4.945.541				
CONFORMACION DE TIERRA A MANO			\$ 337.750,65				
08-06-21-CUNETAS EN TIERRA (MANUAL)			\$ 81.892				
LONA PROTECTORA IMPERMEABLE			\$ 764.082,00				
			TOTAL \$ 7.925.870				
			VALOR M2 \$ 88.065				

Tabla 13 Análisis de precio unitario para cañón nebulizador. Fuente: Elaboración propia

CAÑÓN NEBULIZADOR					HRS	
ITEM - Descripción	Unidad	Cant	Desper	Vr/Unitario	Vr/Parcial	
CAÑÓN NEBULIZADOR 50M	HRS	1	0	\$ 60.000,00	\$ 60.000,00	
Materiales	Equipo	AIU	SubTotal	Mano de Obra	Otros	VALOR TOTAL
	0	60.000	0	\$ 60.000	0	\$ 60.000

Tabla 14 Análisis de precio unitario para cerramiento tipo invernadero. Fuente: Elaboración propia

CERRAMIENTO EN PLASTICO TIPO INVERNADERO (3x3x5m)						GLB	
ITEM - Descripción	Unidad	Cant	Desper	Vr/Unitario	Vr/Parcial		
003170-"VARETA2"x2"x3MOTOB0"	UND	9	0	8.558	77.022		
AGROLENE UV CAL 7 INVERNADERO	UND	1	0	41.900	41.900		
001365-GUADUA[TACO] 5M	UND	5	0	9.750	48.750		
002294-PUNTILLA2CC	LBS	1	0,25	4.695	4.707		
004086-ALAMBREGALVANIZADO#18	KG	1	0	16.049	16.049		
MOAG13-MANO OBRA ALBANILERIA 3 AYUDANTE-1 OIF	HC	9	0	61.787	556.083		
MQ0301-HERRAMIENTA MENOR	GLB	1	0	10.000	10.000		
Materiales	Equipo	AIU	SubTotal	Mano de Obra	Otros	VALOR TOTAL	
	188.428	0	0	\$ 188.428	556.083	10.000	\$ 754.511

Tabla 15 Análisis de precio unitario para sistema de aspiración para cortadoras / pulidoras.
Fuente: Elaboración propia

SIST. ASPIRACION CORTADORA/PULIDORA CON DISCO					ML	
ITEM - Descripción	Unidad	Cant	Desper	Vr/Unitario	Vr/Parcial	
Sistema de Aspiración de Polvo Bosch GDE 230 FC-S para Pulidoras	DIA	0,081		\$ 50.000,00	\$ 4.050,00	
Materiales	Equipo	AIU	SubTotal	Mano de Obra	Otros	VALOR TOTAL
	0	4.050	0	\$ 4.050	0	\$ 4.050

Tabla 16 Análisis de precio unitario para cortadora de pavimento. Fuente: Elaboración propia

SIST. ASPIRACION CORTADORA PAVIMENTO					ML	
ITEM - Descripción	Unidad	Cant	Desper	Vr/Unitario	Vr/Parcial	
Sistema de Aspiración de Polvo Bosch	DIA	0,07		\$ 80.000,00	\$ 5.600,00	
Materiales	Equipo	AIU	SubTotal	Mano de Obra	Otros	VALOR TOTAL
	0	5.600	0	\$ 5.600	0	\$ 5.600

Tabla 17 Análisis de precio unitario para empaquetamiento de escombros. Fuente: Elaboración propia

EMPAQUETAMIENTO DE ESCOMBROS					M3		
ITEM - Descripción	Unidad	Cant	Desper	Vr/Unitario	Vr/Parcial		
LONA OCOSTALES EN FIBRAS	UND	18	0	\$ 900,00	\$ 16.200,00		
MOAG01-MANO OBRA ALBANILERIA 1 AYUDANTE	HC	0,28	0	13.146	\$ 3.680,88		
Materiales	Equipo	AIU	SubTotal	Mano de Obra	Otros	VALOR TOTAL	
	\$ 16.200,00	0	0	\$ 16.200	3.681	0	\$ 16.200

Tabla 18 Análisis de precio unitario para concreto autolimpiante. Fuente: Elaboración propia

PAVIMENTO CONCRETO MR=38 INCL. TiO2					M3
MATERIALES	UNIDAD	CANTIDAD	% DESPERD	PRECIO UNIT.	VALOR UNITARIO
AGUA	LT	210	3	39,00	8.435,70
ARENA GRUESA	M3	0,87	3	52.278,00	46.846,32
GRAVA TRITURADA 3/4"	M3	0,47	3	89.313,00	43.236,42
CEMENTO GRIS PORTLAND SACO	KG	480	3	650,00	321.360,00
TiO2	g	24		81,80	1.963,20
SUBTOTAL					421.841,64

Tabla 19 Análisis de precio unitario para pintura de exteriores con TiO₂. Fuente: Elaboración propia

PINTURA EXTERIORES CON TiO2					M2	
ITEM - Descripción	Unidad	Cant	Desper	Vr/Unitario	Vr/Parcial	
KORAZA CON TiO2	CUÑ	0,25	1	272.800	68.882	
Sika Transparente-10 Repelente Agua Incoloro	CUÑ	0,03	1	515.000	15.605	
M.O. PINTURA 1 AYUDANTE + 1 OFICIAL	HC	0,53333333	0	35.494	18.930	
HERRAMIENTA MENOR	GLB	0,020	0,25	12.427	249	
ANDAMIO METALICO CERTIFICADO A U/D		1	0	15.775	15.775	
Materiales	Equipo	AIU	SubTotal	Mano de Obra	Otros	VALOR TOTAL
84.487	16.024	0	\$ 100.511	18.930	0	\$ 119.441

Tabla 20 Análisis de precio unitario para limpieza de obra con equipo a presión. Fuente: Elaboración propia

LIMPIEZAS DE OBRA CON EQUIPO A PRESION					DIA	
ITEM - Descripción	Unidad	Cant	Desper	Vr/Unitario	Vr/Parcial	
HIDROLAVADORA	HRS	8	0	\$ 10.000,00	\$ 80.000,00	
Materiales	Equipo	AIU	SubTotal	Mano de Obra	Otros	VALOR TOTAL
0	80.000	0	\$ 80.000	0	0	\$ 80.000

4.3. Determinar el impacto financiero de la implementación en una obra civil de la estrategia, proceso o aplicación tecnológica que reduzca los impactos ambientales en el recurso aire para evaluar la posibilidad de su implementación

Con el fin de evaluar el impacto financiero de la implementación de las diferentes estrategias relacionadas en el numeral anterior, se realizó el análisis de factibilidad del proyecto en dos escenarios. El primero corresponde al desarrollo del proyecto con una construcción tradicional y el segundo incluyendo dentro de la construcción las actividades y materiales que mitigan la contaminación del aire durante el desarrollo de las obras.

En este sentido, inicialmente se realizó el análisis de la factibilidad del proyecto Club Campestre Entre Ceibas teniendo en cuenta la fase preliminar de estudios y diseños, flujo de ventas de membresías y el flujo de caja para la construcción, como se presenta a continuación.

Tabla 21. Plan de inversión Estudios y diseños Club Campestre Entre Ceibas. Fuente: Elaboración propia

PRESUPUESTO ESTUDIOS, DISEÑOS, PERMISOS			PLAN DE INVERSIÓN						
Código	DESCRIPCIÓN	VALOR (\$)	MES 1	MES 2	MES 3	MES 4	MES 5	MES 6	MES 7
Proyecto: Club campestre Entre Ceibas									
E	ESTUDIOS	55.000.000,00	45.000.000,00	10.000.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
E1	Estudio de suelos	20.000.000	10.000.000,00	10.000.000,00					
E2	Topografía	35.000.000	35.000.000,00						
D	DISEÑOS	345.000.000,00	48.000.000,00	75.200.000,00	65.400.000,00	29.400.000,00	24.000.000,00	45.500.000,00	57.500.000,00
D1	Diseño arquitectónico y de urbanismo	120.000.000	48.000.000,00	36.000.000,00	36.000.000,00				
D2	Diseño estructural	98.000.000		39.200.000,00	29.400.000,00	29.400.000,00			
D3	Diseño hidrosanitario	45.000.000					18.000.000,00	13.500.000,00	13.500.000,00
D4	Diseño red contra incendios	15.000.000					6.000.000,00	4.500.000,00	4.500.000,00
D5	Diseño red de gas	12.000.000							12.000.000,00
D6	Diseño redes electricas, voz y datos	55.000.000						27.500.000,00	27.500.000,00
P	PERMISOS	50.000.000	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	50.000.000,00
P1	Licencia de construcción (planeación municipal)	-							-
P2	Derechos notariales	50.000.000							50.000.000,00
P3									
TOTAL			93.000.000	85.200.000	65.400.000	29.400.000	24.000.000	45.500.000	107.500.000
VALOR ACUMULADO			93.000.000	178.200.000	243.600.000	273.000.000	297.000.000	342.500.000	450.000.000
PORCENTAJE EJECUCIÓN MENSUAL			20,67%	18,93%	14,53%	6,53%	5,33%	10,11%	23,89%
PORCENTAJE EJECUCIÓN ACUMULADO			20,67%	39,60%	54,13%	60,67%	66,00%	76,11%	100,00%

Para analizar el flujo de ventas se contempla un periodo desde agosto de 2021 hasta junio de 2024, teniendo en cuenta la forma de pago de una cuota inicial del 40 y 60% contra entrega, así mismo, se estiman los costos de la sala de ventas, personal y oficinas, lo cual se presenta en el anexo A2- Factibilidad ESC1 - Flujo ventas, sin embargo, el flujo de ventas anual proyectado de las membresías del club se puede observar en la Figura 25.

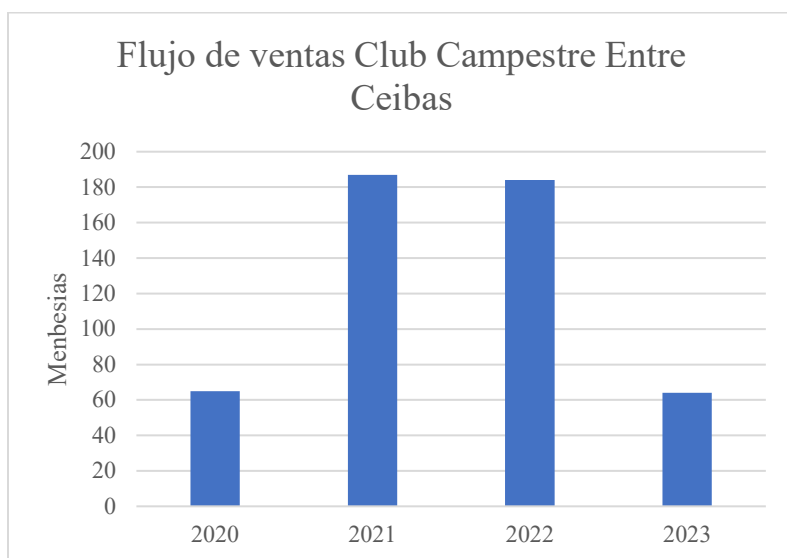


Figura 25 Flujo de ventas Club Campestre Entre ceibas. Fuente: Elaboración propia.

El flujo de caja para la construcción del proyecto se presenta en la Tabla 22, que contempla desde julio de 2022 a noviembre de 2024, para un total de 30 meses, teniendo en cuenta las etapas de ejecución de la obra, los valores de anticipo y rete garantía respectiva.

Productos / Bancos	Tasa de Interés % E.A.	Financiación
Bancolombia	UVR + 7.55%	70% V / No VIS
BBVA	23.16%	70% V / No VIS
Banco de Occidente	20,68% E.A	50% V/No VIS
Banco Caja Social	14.50% EA	De 50% a 80%
Banco Itaú	15.94% EA	70%

Figura 26 Tasas de interés para construcción de vivienda. Fuente: <https://www.rankia.co/blog/mejores-creditos-y-prestamos-colombia/3805117-tasas-interes-creditos-hipotecarios>

Una vez se cuenta con la información anterior, se realiza el flujo de caja neto del proyecto y del inversionista.

Tabla 23 Flujo de caja neto del proyecto. Fuente: Elaboración propia

FLUJO NETO DE CAJA DEL PROYECTO						
PERIODOS	0	1	19	20	47	
VENTAS BRUTAS	-	-	161.064.882	322.129.764	12.207.398.687	
= VENTAS NETAS	-	-	161.064.882	322.129.764	12.207.398.687	
(-) COSTOS DE OPERACIÓN	93.000.000	85.200.000	8.200.000	322.276.520	83.960.376	
(-) COSTOS DE ADMINISTRACION	10.500.000	10.500.000	14.000.000	14.000.000	14.000.000	
= UTILIDAD BRUTA	(103.500.000)	(95.700.000)	138.864.882	(14.146.756)	12.109.438.311	
(+) OTROS INGRESOS						
(-) OTROS EGRESOS						
(-) DEPRECIACIONES	-	2.458.333	2.458.333	2.458.333	2.458.333	
(-) AMORTIZACIONES DE ACTIVOS DIFERIDOS						
(+) UTILIDAD (O PÉRDIDA) POR VENTA DE A-FUJOS						
= UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	(103.500.000)	(98.158.333)	136.406.549	(16.605.089)	12.106.979.978	
(-) IMPUESTO DE RENTA (35%)	-	-	47.742.292	-	4.237.442.992	
= UTILIDAD O PERDIDA NETA	(103.500.000)	(98.158.333)	88.664.257	(16.605.089)	7.869.536.986	
(+) DEPRECIACIONES	-	2.458.333	2.458.333	2.458.333	2.458.333	
(+) AMORTIZACIONES DE ACTIVOS DIFERIDOS						
(+) VALOR EN LIBROS DE LOS ACTIVOS FUJOS						
(+) RECUPERACION DEL CAPITAL DE TRABAJO						
(-) INVERSION EN ACTIVOS FUJOS	295.000.000	-	100.960.000	100.960.000	100.960.000	
(-) INVERSION EN CAPITAL DE TRABAJO						
(-) INVERSIONES EN ACTIVOS DIFERIDOS	10.000.000					
FLUJO NETO DE CAJA DEL PROYECTO	(408.500.000)	(95.700.000)	(9.837.410)	(115.106.756)	7.771.035.319	

Tabla 24 Flujo de caja neto del inversionista. Fuente: Elaboración propia

FLUJO NETO DE CAJA DEL INVERSIONISTA						
PERIODOS	0	1	19	20	47	
VENTAS BRUTAS	-	-	161.064.882	322.129.764	12.207.398.687	
= VENTAS NETAS	-	-	161.064.882	322.129.764	12.207.398.687	
(-) COSTOS OPERACIÓN	93.000.000	85.200.000	8.200.000	322.276.520	83.960.376	
(-) COSTOS ADMINISTRACION	10.500.000	10.500.000	14.000.000	14.000.000	14.000.000	
= UTILIDAD BRUTA	(103.500.000)	(95.700.000)	138.864.882	(14.146.756)	12.109.438.311	
(+) OTROS INGRESOS						
(-) OTROS EGRESOS						
(-) DEPRECIACIONES	-	2.458.333	2.458.333	2.458.333	2.458.333	
(-) AMORTIZACIONES DE ACTIVOS DIFERIDOS						
(+) UTILIDAD (O PÉRDIDA) POR VENTA DE A-FUJOS						
(-) GASTOS FINANCIEROS (INTERESES)	-	-	-	-	518.005	
= UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	(103.500.000)	(98.158.333)	136.406.549	(16.605.089)	12.106.461.973	
(-) IMPUESTO DE RENTA (35%)	-	-	47.742.292	-	4.237.261.691	
= UTILIDAD O PERDIDA NETA	(103.500.000)	(98.158.333)	88.664.257	(16.605.089)	7.869.200.283	
(+) DEPRECIACIONES	-	2.458.333	2,458.333	2,458.333	2,458.333	
(+) AMORTIZACIONES DE ACTIVOS DIFERIDOS						
(+) VALOR EN LIBROS DE LOS ACTIVOS FIJOS						
(+) RECUPERACION DEL CAPITAL DE TRABAJO						
(-) INVERSION EN ACTIVOS FIJOS	295.000.000	-	100.960.000	100.960.000	100.960.000	
(-) INVERSION EN CAPITAL DE TRABAJO						
(-) INVERSIONES EN ACTIVOS DIFERIDOS	10.000.000	-	-	-	-	
(+) CREDITOS RECIBIDOS	-	-	-	-	-	
(-) AMORTIZACION DE CAPITAL	-	-	-	-	45.648.735	
FLUJO NETO DE CAJA DEL PROYECTO	(408.500.000)	(95.700.000)	(9.837.410)	(115.106.756)	7.725.049.880	

Con los flujos de caja, se realiza la evaluación de los indicadores de bondad del proyecto y del inversionista teniendo en cuenta la tasa de oportunidad (TIO), el costo promedio ponderado del capital (WACC), valor presente neto (VPN), tasa interna de retorno (TIR) y relación beneficio costo (RBC). En este caso se plantea una TIO del 15% E.A. tanto para el proyecto como para el inversionista, que sea mayor a la tasa del crédito hipotecario del mercado y de acuerdo a las condiciones del proyecto se realiza la evaluación de cada uno de los indicadores, como se presenta en la Tabla 25 y Tabla 26.

En el caso específico del análisis del WACC se tiene en cuenta el valor aportado por los inversionistas y el valor del crédito, lo cual corresponde a una inversión inicial de \$3.100.000.000 que de acuerdo al flujo de caja comprende el pago del 13% del costo del lote, el 100% de los estudios, diseños y permisos, el 45% de los costos de ventas y administrativos, y el 15% de la construcción.

Tabla 25. Indicadores de bondad del proyecto. Fuente: Elaboración propia

TIO Proyecto (E.A)		15,00%
TIO Proyecto (m.v)		1,17%
WACC		
Impuesto de Renta		35%
Costo Crédito		14,50%
Costo Crédito después de impuestos (rd)		9,43%
Costo de Capital Propio (rp)		15,00%
Total Inversión Inicial	\$	3.100.000.000
Valor del Crédito	\$	1.000.000.000
Valor aportado por los Inversionistas	\$	2.100.000.000
WACC (CPPC) E.A.		13,20%
WACC (CPPC) m.v.		1,04%
VPN	\$	2.954.571.728
TIR		3,78%
RBC		1,36
(-)	-\$	8.179.993.590
(+)	\$	11.134.565.318

Tabla 26. Indicadores de bondad del inversionista. Fuente: Elaboración propia

TIO inversionista (E.A)		15,00%
TIO Proyecto (m.v)		1,17%
WACC (CPPC) E.A.		13,20%
WACC (CPPC) m.v.		1,04%
VPN	\$	2.715.006.453
TIR		4,04%
RBC		1,35
(-)	-\$	7.787.457.767
(+)	\$	10.502.464.220

De acuerdo con los resultados anteriores, se interpreta que los valores presente neto para el proyecto y el inversionista son positivos y que la TIR en ambos casos es mayor al WACC, lo que indica que se genera más de lo que cuesta el financiamiento por deuda y patrimonio y la relación beneficio costo es positiva, por lo tanto, ejecutar el proyecto e invertir en él es viable financieramente, bajo las condiciones evaluadas.

Si bien el proyecto en condiciones de construcción tradicional es viable, es necesario evaluar el impacto financiero de la implementación de las estrategias relacionadas en el numeral 4.2. Para la ejecución del proyecto en la fase de construcción se identificaron en cada una de las etapas, las actividades donde se requieren tomar acciones para mitigar la contaminación del aire, el costo de estas actividades y el porcentaje que representa en el total del presupuesto, como se presenta en la Tabla 27.

Tabla 27. Análisis de costos actividades con impacto en la contaminación del aire. Fuente: Elaboración propia

ACTIVIDAD	UND	CANTIDAD			Total
		Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	
Descargue de material pétreo	m ³	2.001,6	98,0	373,9	2.473,5
Movimientos de tierras (excavaciones y conformación de taludes)	m ³	36.106,6	5.111,2	1.374,0	42.591,8
Preparación de concretos en sitio para estructuras	m ³	15,0	659,5	849,7	1.524,2
Cortes de material para mampostería y muros	ml		8,8	266,3	275,1
Cortes en pavimento	ml	1.866,2		267,4	2.133,5
Retiro de saldos en obra	m ³	395,8	400,5	156,3	952,6
Pavimento rígido y andenes	m ³	896,2		118,7	1.014,9
Pintura vinilo	m ²			788,6	788,6
Limpiezas generales en obra	m ²			4.238,4	4.238,4
Valor total etapa		\$ 4.026.622.056	\$ 6.332.074.815	\$ 1.423.057.213	\$ 11.781.754.083
Valor actividades a mitigar		\$ 712.471.062	\$ 506.565.985	\$ 148.222.051	\$ 1.367.259.099
Porcentaje		18%	8%	10%	12%

En la Tabla 28 se presenta el valor de la implementación de cada una de las estrategias propuesta para contrarrestar los efectos de las actividades durante la etapa de construcción y el impacto en el presupuesto de las obras.

Tabla 28. Costo de estrategias. Fuente: Elaboración propia

ACTIVIDAD	ESTRATEGIAS	UND	CANTIDAD	VR. UNITARIO	VR. TOTAL
Descargue de material pétreo	Acopio con cerramiento	glb	1	\$ 7.925.870	\$ 7.925.870
Movimientos de tierras (excavaciones y conformación de taludes)	Cañones nebulizadores	hrs	270	\$ 60.000	\$ 16.200.000
Preparación de concretos en sitio para estructuras	Cerramiento en plástico tipo invernadero (3x3x5m)	glb	1	\$ 754.511	\$ 754.511
Cortes de material para mampostería y muros	Aspiradora	ml	275,1	\$ 12.000	\$ 3.300.732
Cortes en pavimento	Aspiradora	ml	2.133,5	\$ 5.600	\$ 11.947.790
Retiro de saldos en obra	Empaquetamiento de escombros	m ³	952,6	\$ 16.200	\$ 15.431.472
Pavimento rígido y andenes	Concreto autolimpiante MR38	m ³	1.014,9	\$1.963,20	\$ 1.992.408
Pintura vinilo	Pintura con TiO ₂	m ²	788,6	\$ 119.141	\$ 93.956.975
Limpiezas generales en obra	Limpiezas con hidrolavadora	día	10	\$ 80.000	\$ 800.000
				COSTOS DIRECTOS	\$ 152.309.759
				AIU (15%)	\$ 22.846.464
				TOTAL	\$ 175.156.223
				VALOR DE LAS OBRAS	\$11.781.754.083
				% sobre el valor total de las obras	1,49%

Teniendo en cuenta que al implementar las estrategias incrementa el presupuesto del proyecto en un 1.49%, se realiza la evaluación financiera anterior, buscando aplicar a descuentos en tasas de interés en el préstamo bancario, exclusión de IVA o descuento en el impuesto de renta. Se realizó la investigación en el sector bancario sobre crédito constructor sostenible o para negocios verdes, la cual se presenta en la Tabla 29.

Tabla 29. Beneficios del sector financiero para créditos sostenibles. Fuente: (Grupo Bancolombia, 2024);(Banco Caja Social, 2024);(Banco de Bogotá, 2024);(BBVA, 2024)

Entidad financiera	¿A quién aplica?	Beneficios
Bancolombia	Línea de crédito que le permite al constructor desarrollar su proyecto de construcción de vivienda, diferente de vivienda o institucional y su posterior comercialización.	Si el constructor certifica su proyecto bajo alguno de los estándares de sostenibilidad como EDGE, LEED, CASA, podrá acceder a mejores condiciones de tasa con la línea sostenible.
Banco Caja Social	El crédito constructor Proyectos Verdes facilita recursos a las inmobiliarias, que apliquen como proyectos verdes (sostenibles) en proceso de certificación.	Tasa preferencial: Disminución de hasta 50 puntos básicos en el spread sobre la tasa vigente en Crédito Constructor
Banco de Bogotá	Financiación para proyectos de construcción de edificaciones que cumplan estándares de sostenibilidad. Los proyectos deben estar en proceso de obtener certificación en sostenibilidad con EDGE, LEED, CASA, BREEM, COREL, entre otros aceptados en Colombia. Aplica para energía renovable, energía sostenible, eficiencias energéticas, tratamiento de residuos.	Exclusión de IVA (equipo y materiales). Descuento de renta de 25% aplicable a 3 años Descuento de 100* Pb en la tasa Crédito Constructor Sostenible
Banco BBVA	Construcción de proyectos de vivienda sostenible VIS y NO VIS.	Descuento en tasa de hasta 100 PBS presentando el Certificado o pre certificado de sostenibilidad del proyecto

Al identificar que un requisito para aplicar a los beneficios financieros o tributarios se debe contar con certificaciones o estar en el proceso de obtenerla, se evidenció que estas certificaciones se encuentran enfocadas en el ahorro energético, por lo que la integración de materiales o implementación de estrategias enfocadas en mejorar la calidad del aire no aplican en estos casos.

Con este panorama se realiza la evaluación de los indicadores de bondad para el proyecto y el inversionista en la Tabla 30 y Tabla 31.

Tabla 30 Flujo de caja neto del proyecto con estrategias sostenibles. Fuente: Elaboración propia

FLUJO NETO DE CAJA DEL PROYECTO						
PERIODOS	0	1	19	20	47	
VENTAS BRUTAS	-	-	162.918.127	325.836.254	12.137.336.198	
= VENTAS NETAS	-	-	162.918.127	325.836.254	12.137.336.198	
(-) COSTOS DE OPERACIÓN	93.000.000	85.200.000	8.200.000	325.890.347	90.959.596	
(-) COSTOS DE ADMINISTRACION	10.500.000	10.500.000	14.000.000	14.000.000	14.000.000	
= UTILIDAD BRUTA	(103.500.000)	(95.700.000)	140.718.127	(14.054.094)	12.032.376.601	
(+) OTROS INGRESOS						
(-) OTROS EGRESOS						
(-) DEPRECIACIONES	-	2.458.333	2.458.333	2.458.333	2.458.333	
(-) AMORTIZACIONES DE ACTIVOS DIFERIDOS						
(+) UTILIDAD (O PÉRDIDA) POR VENTA DE A-FIJOS						
= UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	(103.500.000)	(98.158.333)	138.259.794	(16.512.427)	12.029.918.268	
(-) IMPUESTO DE RENTA (35%)	-	-	48.390.928	-	4.210.471.394	
= UTILIDAD O PERDIDA NETA	(103.500.000)	(98.158.333)	89.868.866	(16.512.427)	7.819.446.874	
(+) DEPRECIACIONES	-	2.458.333	2.458.333	2.458.333	2.458.333	
(+) AMORTIZACIONES DE ACTIVOS DIFERIDOS						
(+) VALOR EN LIBROS DE LOS ACTIVOS FIJOS						
(+) RECUPERACION DEL CAPITAL DE TRABAJO						
(-) INVERSION EN ACTIVOS FIJOS	295.000.000	-	100.960.000	100.960.000	100.960.000	
(-) INVERSION EN CAPITAL DE TRABAJO						
(-) INVERSIONES EN ACTIVOS DIFERIDOS	10.000.000					
FLUJO NETO DE CAJA DEL PROYECTO	(408.500.000)	(95.700.000)	(8.632.801)	(115.014.094)	7.720.945.208	

Tabla 31 Flujo de caja neto del inversionista con estrategias sostenibles. Fuente: Elaboración propia

FLUJO NETO DE CAJA DEL INVERSIONISTA						
PERIODOS	0	1	19	20	47	
VENTAS BRUTAS	-	-	162.918.127	325.836.254	12.137.336.198	
= VENTAS NETAS	-	-	162.918.127	325.836.254	12.137.336.198	
(-) COSTOS OPERACIÓN	93.000.000	85.200.000	8.200.000	325.890.347	90.959.596	
(-) COSTOS ADMINISTRACION	10.500.000	10.500.000	14.000.000	14.000.000	14.000.000	
= UTILIDAD BRUTA	(103.500.000)	(95.700.000)	140.718.127	(14.054.094)	12.032.376.601	
(+) OTROS INGRESOS						
(-) OTROS EGRESOS						
(-) DEPRECIACIONES	-	2.458.333	2.458.333	2.458.333	2.458.333	
(-) AMORTIZACIONES DE ACTIVOS DIFERIDOS						
(+) UTILIDAD (O PÉRDIDA) POR VENTA DE A-FIJOS						
(-) GASTOS FINANCIEROS (INTERESES)	-	-	-	-	518.005	
= UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	(103.500.000)	(98.158.333)	138.259.794	(16.512.427)	12.029.400.264	
(-) IMPUESTO DE RENTA (35%)	-	-	48.390.928	-	4.210.290.092	
= UTILIDAD O PERDIDA NETA	(103.500.000)	(98.158.333)	89.868.866	(16.512.427)	7.819.110.171	
(+) DEPRECIACIONES	-	2.458.333	2.458.333	2.458.333	2.458.333	
(+) AMORTIZACIONES DE ACTIVOS DIFERIDOS						
(+) VALOR EN LIBROS DE LOS ACTIVOS FIJOS						
(+) RECUPERACION DEL CAPITAL DE TRABAJO						
(-) INVERSION EN ACTIVOS FIJOS	295.000.000	-	100.960.000	100.960.000	100.960.000	
(-) INVERSION EN CAPITAL DE TRABAJO						
(-) INVERSIONES EN ACTIVOS DIFERIDOS	10.000.000	-	-	-	-	
(+) CREDITOS RECIBIDOS	-	-	-	-	-	
(-) AMORTIZACION DE CAPITAL	-	-	-	-	45.648.735	
FLUJO NETO DE CAJA DEL PROYECTO	(408.500.000)	(95.700.000)	(8.632.801)	(115.014.094)	7.674.959.769	

Así mismo, se realiza la evaluación de los indicadores de bondad que se presenta en la Tabla 32 y Tabla 33.

Tabla 32 Indicadores de bondad del proyecto con estrategias sostenibles. Fuente: Elaboración propia

TIO Proyecto (E.A)		15,00%
TIO Proyecto (m.v)		1,17%
WACC		
Impuesto de Renta		35%
Costo Crédito		14,50%
Costo Crédito después de impuestos (rd)		9,43%
Costo de Capital Propio (rp)		15,00%
Total Inversión Inicial	\$	3.100.000.000
Valor del Crédito	\$	1.000.000.000
Valor aportado por los Inversionistas	\$	2.100.000.000
WACC (CPPC) E.A.		13,20%
WACC (CPPC) m.v.		1,04%
VPN	\$	2.855.011.427
TIR		3,70%
RBC		1,35
(-)	-\$	8.245.322.436
(+)	\$	11.100.333.862

Tabla 33 Indicadores de bondad del inversionista con estrategias sostenibles. Fuente: Elaboración propia

TIO inversionista (E.A)		15,00%
TIO Proyecto (m.v)		1,17%
WACC (CPPC) E.A.		13,20%
WACC (CPPC) m.v.		1,04%
VPN	\$	2.620.254.884
TIR		3,96%
RBC		1,33
(-)	-\$	7.841.893.620
(+)	\$	10.462.148.504

Con los datos obtenidos se evidencia que los valores presente neto para el proyecto y el inversionista son positivos implementando las estrategias sostenibles y que la TIR en ambos casos es mayor al WACC, lo que indica que se genera más de lo que cuesta el financiamiento por deuda y patrimonio y la relación beneficio costo es positiva, por lo tanto ejecutar el proyecto e invertir en él es viable financieramente bajo las condiciones descritas.

5. CONCLUSIONES

5.1. Conclusiones

En el presente trabajo de grado se analizó el impacto financiero de la implementación de estrategias y tecnologías en la industria de la construcción en la etapa de transformación de materiales en obra y la operación de obras civiles, buscando mejorar la calidad del aire que se respira en las ciudades.

Se identificaron los principales factores que contribuyen a la contaminación del aire durante la transformación de materiales de construcción en obra y en la operación de las obras civiles, como lo son los movimientos de tierras, preparación de concretos en obra, cortes con equipos para acabados y recubrimientos de fachadas, que permitieron evaluar alternativas para mitigar estos efectos en el medio ambiente, relacionando directamente en más de un 60% las actividades de construcción con el incremento en la concentración de material particulado.

Se diseñaron estrategias que reducen el impacto en la calidad del aire para analizar los efectos de su implementación, teniendo en cuenta el control de las emisiones durante la fase de construcción, la facilidad de su implementación en obra y la disponibilidad de los materiales y equipos en la zona del proyecto evaluado.

Se determinó el impacto financiero de la implementación de las estrategias en un proyecto de obra civil, buscando reducir los impactos ambientales en el recurso aire para evaluar la posibilidad de su implementación. Mediante este análisis se obtuvo como resultado el incremento en menos de un 2% en los costos del proyecto empleando las estrategias seleccionadas y manteniendo la viabilidad financiera conforme el VPN, TIR, WACC, B/C, demostrando que es un proyecto atractivo para invertir y que se contribuye la conservación y mitigación de efectos negativos en el aire.

5.2. Recomendaciones

Después de hacer este trabajo de grado se identificó que es necesario que los gobiernos promuevan leyes que obliguen a las instituciones y empresas a realizar evaluaciones de impacto medioambiental desde la etapa de diseños y planificación de los proyectos de construcción para reforzar la conciencia sobre el impacto que tiene este sector en el medio ambiente, debido a que la predicción de escenarios en la etapa de diseño, permite que se establezca el adecuado monitoreo para controlar los posibles efectos garantizando procesos de construcción más sostenibles.

Un indicador de la calidad de vida de los habitantes en las ciudades es la calidad de aire que se respira, por lo que mitigar los efectos de la contaminación atmosférica no solo es un reto para el sector de la construcción sino también de la salud, debido a que con el paso del tiempo se ha observado el incremento de muertes por enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

En este sentido, si bien es cierto que la industria de la construcción es uno de los principales contribuyentes al crecimiento socioeconómico de los países al proporcionar empleo a trabajadores calificados y no calificados, es necesario controlar los efectos colaterales que contribuyen a la contaminación del aire con la emisión de polvo y partículas debido a que estas son una gran amenaza para la salud humana.

Por lo anterior, es necesario revisar las medidas que se toman en las ciudades para mejorar la calidad del aire, debido a que las actividades de los sectores productivos muestran una tendencia a superar los límites de las concentraciones de elementos contaminantes, poniendo en riesgo la salud de sus habitantes.

Identificar durante las etapas de un proyecto de construcción los factores o actividades que generan mayor concentración de elementos contaminantes permite promover estrategias óptimas para el control de dichos elementos y en ocasiones la inversión que se requiere no impacta significativamente el análisis financiero del proyecto, sin embargo, se garantizan espacios de trabajo seguros, la prevención de enfermedades en edades tempranas y reducir el impacto en el medio ambiente.

En la última década se ha evidenciado el aumento de registro de proyectos con certificaciones en construcción sostenible, generando una ventaja competitiva en el mercado inmobiliario, sin

embargo, aún se presentan retos en la aceptación de este tipo de proyectos, generando una oportunidad para crear nuevos modelos de negocio.

Estas certificaciones se han desarrollado en enfoque sostenible respecto al cuidado de del recurso hídrico y energético, por lo tanto, uno de los retos es ampliar este alcance, por ejemplo, en la mitigación de los efectos de la contaminación del aire que promueva un entorno urbano más saludable.

5.3. Recomendaciones para trabajos futuros

De acuerdo con el desarrollo de este trabajo de grado, considero que es importante abarcar diferentes alternativas que impliquen la integración del área de ingeniería civil con otros ámbitos debido a que se puede explorar la aplicación de estrategias y tecnologías que mitiguen los efectos de actividades contaminantes en la calidad del aire como por ejemplo, en la intervención de edificaciones existentes donde en necesario que sigan funcionando durante remodelaciones o adecuaciones, como lo es el caso de clínicas y hospitales que operan todo el tiempo y las condiciones de desinfección y tratamiento de material particulado es muy sensible por la asepsia que se requiere en estos lugares.

Adicionalmente, se puede explorar la posibilidad de implementar otros tipos de recubrimientos para fachadas que incluyen productos o materiales que permitan la purificación del aire una vez puesto en funcionamiento las edificaciones. Aportando así a la conservación de uno de los recursos que en la actualidad se ha afectado por el desarrollo de la sociedad y que afecta a los individuos directamente en su salud.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alavedra, P. *et al.* (1998) ‘La construcción sostenible. El estado de la cuestión.’, *Boletín CF+S*, 4 [Preprint], (1578–097X). Available at: <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n4/apala.html>.

Alshetty, D. and Nagendra, S.M.S. (2022) ‘Impact of vehicular movement on road dust resuspension and spatiotemporal distribution of particulate matter during construction activities’, *Atmospheric Pollution Research*, 13(1), p. 101256. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101256>.

ARGOS (2021) *CONCRETO FOTOCATALITICO OFRECIENDO VENTAJAS IMPORTANTES EN LA CONSTRUCCION*. Available at: <https://emea.mitsubishielectric.com/ar/products-solutions/factory-automation/index.html>.

ASOBANCARIA (2022a) ‘Hacia una construcción sostenible en Colombia’, pp. 1–10.

ASOBANCARIA (2022b) ‘Hacia una construcción sostenible en Colombia’, pp. 1–10.

Banco Caja Social (2024) *Crédito Constructor Proyectos Verdes*. Available at: <https://www.bancocajasocial.com/empresas/credito-empresas/credito-constructor-proyectos-verdes/> (Accessed: 11 January 2025).

Banco de Bogotá (2024) *Crédito constructor sostenible*. Available at: <https://www.bancodebogota.com/empresas/productos-de-credito/creditos-sostenibles/credito-constructor-sostenible> (Accessed: 11 January 2025).

BBVA (2024) *Préstamo Constructor Profesional Sostenible*. Available at: <https://www.bbva.com.co/empresas/productos/prestamos/constructor/profesional-sostenible.html> (Accessed: 11 January 2025).

Berrera Osorio, D.C. (2010) *Análisis del impacto ambiental en la cantera el muelle, Universidad militar nueva granada*. Available at: http://awsassets.wfnz.panda.org/downloads/earth_summit_2012_v3.pdf%0Ahttp://hdl.handle.net/10239/131%0Ahttps://www.uam.es/gruposinv/meva/publicaciones_jesus/capitulos_espanyol_jesus/2005_motivacion_para_el_aprendizaje_Perspectiva_alumnos.pdf%0Ahttps://ww.

Bové, J. (2016) ‘El análisis de ciclo de vida en la edificación sostenible’, *Aislamiento y sostenibilidad*, (8.5.2017), pp. 2003–2005.

Breathelife 2030 (2016) *Impactos en la salud y el clima*. Available at: <https://breathelife2030.org/es/the-issue/health-and-climate-impacts/>.

Castellar Ramos, M.I. and Osorio Tamayo, J.C. (2012) *Estado del arte de la fotocatalisis solar como tecnica para la remocion de efluentes quimicos provenientes de laboratoriao, Unversidad San Buenaventura*.

Central plast (2024) *PLASTICO DE INVERNADERO*. Available at: <https://www.centralplast7deagosto.com/plastico-invernadero/141-plastico-de-invernadero-6-anchox-70-mts-calibre-6.html> (Accessed: 11 January 2025).

Congreso de Colombia (1973) ‘Ley 23 de 1973’, *Revista Chilena de Derecho y Ciencia Política*, 4(3), pp. 11–13. Available at: <https://doi.org/10.7770/rchdyep-v4n3-art649>.

Congreso de Colombia (2000) ‘Ley 629 de 2000’, *Diario Oficial No. 45.628 de 2 de agosto de 2004*, (51), p. 1. Available at: http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/codigo_civil_pr046.htmlhttp://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/decreto_2811_1974.htmlhttp://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1733_2014.html

Congreso de Colombia (2017) ‘LEY 1844 de 2017’, *Secetaria del Senado*, (52143), pp. 1–7.

Congreso de Colombia (2018) ‘Ley 1931 de 2018’, p. 19 páginas.

Congreso de Colombia (2019) ‘Ley 1955 de 2019’.

Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (2014) ‘Desarrollo urbano sostenible: Malmö, Suecia’. Available at: <https://www.cccs.org.co/wp/download/desarrollo-urbano-sostenible/?wpdmdl=3919>.

Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (2016) ‘Viverdi 85’.

Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (2018) *Programa LEED en Colombia*. Available at: <https://www.cccs.org.co/wp/capacitacion/talleres-de-preparacion-leed/>.

Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (2021a) ‘Estado de la Construcción Sostenible en COLOMBIA’, pp. 1–77.

Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (2021b) ‘Estado de la Construcción Sostenible en COLOMBIA’, pp. 1–77. Available at: www.cccs.org.co.

Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (2024) ‘Estado de la Construcción Sostenible en Colombia’.

Consultores Proactivos SAS (2021) *Entre Ceibas Club Campestre*. Available at: <https://consultoresproactivos.com/club-campestre/> (Accessed: 12 January 2025).

DAGMA (2015) ‘Resolución 1055 de 2015’, p. 20.

DAGMA (2019) ‘Resolución 1524 de 2019’, p. 7.

DAGMA (2021) ‘Boletín diario de la calidad del aire de Santiago de Cali’.

Departamento Nacional de Planeación (2014) ‘Documento CONPES 3819: Política nacional para consolidar el sistema de ciudades en Colombia’, *Consejo Nacional de Política Económica y Social República De Colombia Departamento Nacional De Planeación*, p. 69.

Departamento Nacional de Planeación (2018a) ‘CONPES 3918’, *Documento CONPES 3918*, p. 74. Available at: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Economicos/3918.pdf>.

Departamento Nacional de Planeación (2018b) ‘CONPES 3943’, *Consejo Nacional de Política Económica y Social - República de Colombia*, (ESTRATEGIA PARA LA ATENCIÓN DE LA MIGRACIÓN DESDE VENEZUELA), p. 115. Available at: <https://www.cancilleria.gov.co/documento-conpes-estrategia-atencion-migracion-venezuela>.

Departamento Nacional de Planeación (2018c) ‘Política de Crecimiento Verde, Documento CONPES 3934 de 2018’, p. 44.

Dirección de Monitoreo Atmosférico (2017) ‘¿Qué es el ozono? El ozono como contaminante del aire’, (X), p. 1.

DNP (Departamento Nacional de Planeación) (2022) *ODS: Ciudades y comunidades sostenibles*, <https://ods.dnp.gov.co/es/objetivos/ciudades-y-comunidades-sostenibles>.

Dominguez-Rodriguez, A. *et al.* (2011) ‘Estudio comparativo de las partículas en aire ambiente en pacientes ingresados por insuficiencia cardiaca y síndrome coronario agudo’, *Elsevier Espan~a* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2010.12.017>.

Enshassi, A., Kochendoerfer, B. and Rizq, E. (2014) ‘An evaluation of environmental impacts of construction projects’, *Revista Ingenieria de Construccion*, 29(3), pp. 234–254. Available at: <https://doi.org/10.4067/s0718-50732014000300002>.

Equiconstructor (2024) *Maquinaria, Accesorios y Andamios Para Construcción*. Available at: <https://www.equiconstructor.com.mx/2022/09/28/en-que-consiste-la-limpieza-de-una-construccion/> (Accessed: 11 January 2025).

Fernández Mantilla, J. del R. (2023) ‘Influencia Del Dióxido De Titanio En El Concreto Permeable Con Efecto Fotocatalizador’, *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(5), pp. 2648–2672. Available at: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i5.7911.

Giunta, M. (2020) ‘Assessment of the environmental impact of road construction: Modelling and prediction of fine particulate matter emissions’, *Building and Environment*, 176(March), p. 106865. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106865>.

Grupo Bancolombia (2024) *Construcción Sostenible*. Available at: <https://www.grupobancolombia.com/sostenibilidad/enfoque-sostenible/clientes/financiacion-sostenible/credito-constructor> (Accessed: 11 January 2025).

Hennlich (2024) *Construccion y demoliciones*. Available at: <https://www.hennlich-dust-control.com/aplicacion/construccion-y-demoliciones/> (Accessed: 11 January 2025).

Hernández Jatib, N. *et al.* (2014) ‘Evaluación Ambiental Asociada a La Explotación Del Yacimiento De Materiales De Construcción La Inagua, Guantánamo, Cuba’, *Luna Azul*, (38), pp. 146–158. Available at: <https://doi.org/10.17151/luaz.2014.38.9>.

Hilti (2024) *Cortadora eléctrica DCH 300-X*. Available at: https://www.hilti.com.co/c/CLS_POWER_TOOLS_7125/CLS_CONCRETE_SAWS_7125/r6332875 (Accessed: 11 January 2025).

Homecenter (2024) *Sistema de Aspiración de Polvo GDE*. Available at: <https://www.homecenter.com.co/homecenter-co/product/511176/sistema-de-aspiracion-de-polvo-gde-115-125-fc-t-para-mini-pulidoras-de-4-1-2pulg-y-5pulg/511176/> (Accessed: 11 January 2025).

ICONTEC (2016) *NTC 6112*. Available at: <https://tienda.icontec.org/gp-etiquetas-ambientales-tipo-i-sello-ambiental-colombiano-sac-criterios-ambientales-para-diseno-y-construccion-de-edificaciones-sostenibles-para-uso-diferente-a-vivienda-ntc6112-2016.html>.

IDEAM (2017) *Calidad del aire*.

IQ Air (2022) *Calidad del aire en el mundo*. Available at: <https://www.iqair.com/es/world-air-quality> (Accessed: 12 January 2025).

Khannyra, S. *et al.* (2021a) ‘Cu-TiO₂/SiO₂ photocatalysts for concrete-based building materials: Self-cleaning and air de-pollution performance’, *Construction and Building Materials*, 313, p. 125419. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125419>.

Khannyra, S. *et al.* (2021b) ‘Cu-TiO₂/SiO₂ photocatalysts for concrete-based building materials: Self-cleaning and air de-pollution performance’, *Construction and Building Materials*, 313, p. 125419. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125419>.

Lisbona García, L. (2016) *MATERIALES FOTOCATALÍTICOS Y SUS APLICACIONES EN CONSTRUCCIÓN*.

López López, V.M. (2001) *DESARROLLO SOSTENIBLE. Aproximación conceptual y operativa de los principios de sostenibilidad al sector de la construcción*.

Maury, A. and de Belie, N. (2010) ‘State of the art of TiO₂ containing cementitious materials: Self-cleaning properties’, *Materiales de Construcción*, 60(298), pp. 33–50. Available at: <https://doi.org/10.3989/mc.2010.48408>.

Medellín como vamos (2021) *Medio ambiente*. Available at: [https://www.medellincomovamos.org/sectores/medio-ambiente#:~:text=%25%2F%2F%2F2021-34%25,ciudadana%2C%20retornando%20a%20niveles%20prepandemia.&text=Habitar un medio ambiente sano,de vida de las personas](https://www.medellincomovamos.org/sectores/medio-ambiente#:~:text=%25%2F%2F%2F2021-34%25,ciudadana%2C%20retornando%20a%20niveles%20prepandemia.&text=Habitar%20un%20medio%20ambiente%20sano,de%20vida%20de%20las%20personas).

Medina, A.F. *et al.* (2016) ‘DISEÑO DE UN SISTEMA PARA GENERAR PURIFICACIÓN DEL AIRE Y AUTO-LIMPIEZA EN LAS SUPERFICIES DEL TÚNEL DE LA AVENIDA COLOMBIA (CALI)’, *Pontificia Universidad Javeriana Cali – Facultad de Ingeniería* [Preprint].

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010) ‘Resolucion 610’, (610).

Ministerio de ambiente y desarrollo (2012) *Criterios ambientales para el diseño y construcción de vivienda urbana, Artículo*.

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (2017) ‘Resolución 2254’.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018) *Construcción Sostenible*. Available at: <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/construccion-sostenible/#:~:text=Las edificaciones sostenibles se consideran,diseños de bioarquitectura y técnicas>.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico España (2020) *Dióxido de azufre*. Available at: <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/dioxido-azufre.aspx>.

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (2022) *SISAIRE*. Available at: <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/sisaire>.

Naciones Unidas (1998) ‘Protocolo de Kyoto’, *PROTOCOLO DE KYOTO DE LA CONVENCION MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO*, 61702, pp. 108–117. Available at: <https://doi.org/10.1145/115790.115803>.

Naciones Unidas, O. (2015a) *Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles*. Available at: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>.

Naciones Unidas, O. (2015b) *Objetivos de desarrollo sostenible*. Available at: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.

Naciones Unidas, O. (2015c) *Objetivos de desarrollo sostenible*. Available at: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>.

Naciones Unidas, O. (2020) *Objetivos y metas de desarrollo sostenible*. Available at: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>.

Núñez Blanco, P.Y. (2019) ‘Estimación de fuentes de material particulado atmosférico (PM10 y PM2.5) en la ciudad de Barranquilla, Colombia’, *Universidad de La Costa*, p. 106.

OMS (2021) ‘Las nuevas Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire tienen como objetivo evitar millones de muertes debidas a la contaminación del aire’, pp. 1–5. Available

at: <https://www.who.int/es/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution?s=08>.

Ortega-García, J.A. *et al.* (2020) ‘Urban air pollution and hospital admissions for asthma and acute respiratory disease in Murcia city (Spain)’, *Anales de Pediatría*, 93(2), pp. 95–102. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.anpedi.2020.01.012>.

Ortega-García, J.A., Sánchez-Solís, M. and Ferrís-Tortajada, J. (2018) ‘Air pollution and children’s health’, *Anales de Pediatría*, 89(2), pp. 77–79. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.anpedi.2018.04.017>.

Pacheco Bustos, C.A., Fuentes Pumarejo, L.G. and Sanchez, H.A. (2017) ‘Residuos de construcción y demolición (RDC), una perspectiva de aprovechamiento para la ciudad de Barranquilla desde su modelo de gestión’, *Ingeniería y Desarrollo*, 35.

Piras, G., Pini, F. and Astiaso Garcia, D. (2019) ‘Correlations of PM10 concentrations in urban areas with vehicle fleet development, rain precipitation and diesel fuel sales’, *Atmospheric Pollution Research*, 10(4), pp. 1165–1179. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.01.022>.

Portafolio Blog 360 grados (2017) ‘La vivienda sostenible de abre espacio en el país’, *360 grados*, p. 1.

Presidencia de la República de Colombia (2017) ‘Decreto 2205 de 2017’, pp. 1–6.

República de Colombia- Departamento Nacional de Planeación (2018) ‘Conpes 3919’, *Consejo Nacional de Política Económica y Social*, p. 98. Available at: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Económicos/3919.pdf>.

La Republica (2023) *Los niveles de calidad del aire en Bogotá y su dinámica desigual entre localidades*. Available at: [https://www.larepublica.co/salud-ejecutiva/los-niveles-de-calidad-del-aire-en-bogota-y-su-dinamica-desigual-entre-localidades-3323686#:~:text=La investigación arroja que las,Ciudad Bolívar%2C Bosa y Kennedy](https://www.larepublica.co/salud-ejecutiva/los-niveles-de-calidad-del-aire-en-bogota-y-su-dinamica-desigual-entre-localidades-3323686#:~:text=La%20investigaci%C3%B3n%20arroja%20que%20las,Ciudad%20Bos%C3%A1y%20Kennedy).

Rodríguez Potes, L.M. *et al.* (2018) ‘Arquitectura y urbanismo sostenible en Colombia. Una mirada al marco reglamentario’, *Bitácora Urbano Territorial*, 28(3), pp. 19–26. Available at: <https://doi.org/10.15446/bitacora.v28n3.52051>.

Rovira, J., Domingo, J.L. and Schuhmacher, M. (2020) ‘Air quality, health impacts and burden of disease due to air pollution (PM10, PM2.5, NO2 and O3): Application of AirQ+ model to the Camp de Tarragona County (Catalonia, Spain)’, *Science of the Total Environment*, 703, p. 135538. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135538>.

Sugr  n  z Pérez, R. (2016) ‘NUEVOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN CON PROPIEDADES AUTO-LIMPIANTES Y DESCONTAMINANTES Memoria de Tesis presentada por’. Available at: www.uco.es/publicaciones.

Ti-Pure (2024) *Ti-PureTM TS-6300*. Available at: <https://www.tipure.com/es/products/coatings/ts-6300> (Accessed: 11 January 2025).

Tobon Gonzalez, J. (2015) *El dióxido de titanio como material fotocatalítico y su influencia en la resistencia a la compresión en morteros*.

Ubilla, C. and Yohannessen, K. (2017) ‘Contaminación Atmosférica Efectos En La Salud Respiratoria En El Niño’, *Revista Médica Clínica Las Condes*, 28(1), pp. 111–118. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rmclc.2016.12.003>.

Valladolid, A. de (2021) *  xidos de Nitrógeno NO/NO2*. Available at: <https://www.valladolid.es/es/rccava/contaminantes/oxidos-nitrogeno-no2>.

Vergaño, J.S. (2019) *Material particulado, estrategias para el control del material particulado en obras de construcción*. Available at: https://issuu.com/cartillasinvestigacion/docs/material_particulado.

Zhang, Q. *et al.* (2020) ‘Emission characteristics and chemical composition of particulate matter emitted by typical non-road construction machinery’, *Atmospheric Pollution Research*, 11(4), pp. 679–685. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.12.018>.

7. GLOSARIO DE TERMINOS ESPECIALES

Construcción sostenible: Reducción de los impactos ambientales causados por los procesos de construcción, uso y derribo de los edificios y por el ambiente urbanizado.

Desarrollo sostenible: Satisfacción de las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades.

Impacto ambiental: Alteración del medio ambiente, provocada directa o indirectamente por un proyecto o actividad en un área determinada. Modificación del ambiente ocasionada por la acción del hombre o de la naturaleza.

Enfermedades respiratorias: enfermedad o trastorno respiratorio cualquier condición o afección que afecta al sistema respiratorio.

Enfermedad pulmonar obstructiva crónica, EPOC: Enfermedad pulmonar inflamatoria crónica que causa la obstrucción del flujo de aire de los pulmones.

Contaminación: Presencia en el ambiente de sustancias o elementos dañinos para los seres humanos y los ecosistemas.

Efecto invernadero: Fenómeno natural por el cual la radiación solar traspasa la capa protectora de la Tierra y la captura en forma de calor. Con la intervención humana, se ha incrementado la emisión de gases que no dejan escapar del planeta el calor del sol. Estos gases se acumulan en la atmósfera, lo que aumenta la temperatura de la Tierra y genera el cambio climático.

Material particulado (PM): es un indicador representativo común de la contaminación del aire que afectan a más personas que cualquier otro contaminante. Los principales componentes de las PM son los sulfatos, los nitratos, el amoníaco, el cloruro de sodio, el hollín, los polvos minerales y el agua. Consisten en una compleja mezcla de partículas sólidas y líquidas de sustancias orgánicas e inorgánicas suspendidas en el aire. Si bien las partículas con un diámetro de 10 micrones o menos (\leq PM10) pueden penetrar y alojarse profundamente dentro de los pulmones, existen otras partículas aún más dañinas para la salud, que son aquellas con un diámetro de 2,5 micrones o menos (\leq PM2.5). Las PM2.5 pueden atravesar la barrera pulmonar y entrar en el sistema sanguíneo. La exposición crónica a partículas contribuye al riesgo de desarrollar enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como cáncer de pulmón (OMS, 2018).

Fotocatálisis: La fotocatalisis es un proceso fotoquímico que sirve para limpiar el aire de sustancias contaminantes producidas por uso de vehículos, industria o producción de energía. Se ha aplicado a materiales que se usan en la construcción de edificaciones y pavimentos para mejorar la calidad del aire que se respira en las ciudades. Para que este proceso se lleve a cabo es necesario la aplicación de un fotocatalizador en el material y la presencia de radiación solar que active el catalizador para que se produzca la reacción (Serrano Yuste, 2016).

Dióxido de titanio (TiO₂): es un material fotocatalítico que tiene una estructura electrónica compuesta por dos bandas, la banda de valencia (llena de electrones) y la banda de conducción (sin electrones), que en su proceso químico al reaccionar con moléculas de agua y oxígeno generan los radicales hidróxilos (oxidantes) y los aniones radicales superoxidantes (reductores). Los radicales hidróxilos y los aniones radicales superoxidantes generados sobre la superficie del TiO₂ han demostrado una gran capacidad para degradar diferentes tipos de microorganismos, casi todos los tipos de contaminantes orgánicos y otros compuestos inorgánicos tales como NO_x y SO₂ (Maury and de Belie, 2010).

8. ANEXOS

A1- Factibilidad ESC1 - Diseños

PRESUPUESTO ESTUDIOS, DISEÑOS, PERMISOS		
Código	DESCRIPCIÓN	VALOR (\$)
Proyecto: Club campestre Entre Ceibas		
E	ESTUDIOS	55.000.000,00
E1	Estudio de suelos	20.000.000
E2	Topografía	35.000.000
D	DISEÑOS	345.000.000,00
D1	Diseño arquitectonico y de urbanismo	120.000.000
D2	Diseño estructural	98.000.000
D3	Diseño hidrosanitario	45.000.000
D4	Diseño red contra incendios	15.000.000
D5	Diseño red de gas	12.000.000
D6	Diseño redes electricas, voz y datos	55.000.000
P	PERMISOS	50.000.000
P1	Licencia de construcción	-
P2	Derechos notariales	50.000.000
P3		
TOTAL		450.000.000

VALOR ACUMULADO

PORCENTAJE EJECUCIÓN MENSUAL

PORCENTAJE EJECUCIÓN ACUMULADO

PLAN DE INVERSIÓN							
MES 1	MES 2	MES 3	MES 4	MES 5	MES 6	MES 7	
45.000.000,00	10.000.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10.000.000,00	10.000.000,00						
35.000.000,00							
48.000.000,00	75.200.000,00	65.400.000,00	29.400.000,00	24.000.000,00	45.500.000,00	57.500.000,00	
48.000.000,00	36.000.000,00	36.000.000,00					
	39.200.000,00	29.400.000,00	29.400.000,00				
				18.000.000,00	13.500.000,00	13.500.000,00	
				6.000.000,00	4.500.000,00	4.500.000,00	
						12.000.000,00	
					27.500.000,00	27.500.000,00	
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	50.000.000,00	
							-
						50.000.000,00	
93.000.000	85.200.000	65.400.000	29.400.000	24.000.000	45.500.000	107.500.000	
93.000.000	178.200.000	243.600.000	273.000.000	297.000.000	342.500.000	450.000.000	
20,67%	18,93%	14,53%	6,53%	5,33%	10,11%	23,89%	
20,67%	39,60%	54,13%	60,67%	66,00%	76,11%	100,00%	

A7- Factibilidad ESC2 - Diseños

PRESUPUESTO ESTUDIOS, DISEÑOS, PERMISOS		
Código	DESCRIPCIÓN	VALOR (\$)
Proyecto: Club campestre Entre Ceibas		
E	ESTUDIOS	55.000.000,00
E1	Estudio de suelos	20.000.000
E2	Topografía	35.000.000
D	DISEÑOS	345.000.000,00
D1	Diseño arquitectónico y de urbanismo	120.000.000
D2	Diseño estructural	98.000.000
D3	Diseño hidrosanitario	45.000.000
D4	Diseño red contra incendios	15.000.000
D5	Diseño red de gas	12.000.000
D6	Diseño redes eléctricas, voz y datos	55.000.000
P	PERMISOS	50.000.000
P1	Licencia de construcción (planeación municipal)	-
P2	Derechos notariales	50.000.000
P3		
TOTAL		450.000.000

VALOR ACUMULADO

PORCENTAJE EJECUCIÓN MENSUAL

PORCENTAJE EJECUCIÓN ACUMULADO

PLAN DE INVERSIÓN							
MES 1	MES 2	MES 3	MES 4	MES 5	MES 6	MES 7	
45.000.000,00	10.000.000,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10.000.000,00	10.000.000,00						
35.000.000,00							
48.000.000,00	75.200.000,00	65.400.000,00	29.400.000,00	24.000.000,00	45.500.000,00	57.500.000,00	
48.000.000,00	36.000.000,00	36.000.000,00					
	39.200.000,00	29.400.000,00	29.400.000,00				
				18.000.000,00	13.500.000,00	13.500.000,00	
				6.000.000,00	4.500.000,00	4.500.000,00	
						12.000.000,00	
					27.500.000,00	27.500.000,00	
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	50.000.000,00	
							-
						50.000.000,00	
93.000.000	85.200.000	65.400.000	29.400.000	24.000.000	45.500.000	107.500.000	
93.000.000	178.200.000	243.600.000	273.000.000	297.000.000	342.500.000	450.000.000	
20,67%	18,93%	14,53%	6,53%	5,33%	10,11%	23,89%	
20,67%	39,60%	54,13%	60,67%	66,00%	76,11%	100,00%	

