

SISTEMA DE MONITOREO DINÁMICO ESPACIAL PARA LA CUANTIFICACIÓN Y  
SEGUIMIENTO DE LAS EMISIONES DE CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> Y N<sub>2</sub>O DEL SECTOR  
PRODUCTIVO.

ZULLY JOHANNA BALANTA CARMONA

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA  
CALI  
2023

SISTEMA DE MONITOREO DINÁMICO ESPACIAL PARA LA CUANTIFICACIÓN Y  
SEGUIMIENTO DE LAS EMISIONES DE CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> Y N<sub>2</sub>O DEL SECTOR  
PRODUCTIVO.

ZULLY JOHANNA BALANTA CARMONA

ANTEPROYECTO DE TRABAJO DE GRADO

DIRECTOR:  
MAURICIO EDILBERTO RINCÓN ROMERO

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA  
CALI  
2023

## CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN .....	9
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	11
3. OBJETIVOS .....	14
3.1. OBJETIVO GENERAL .....	14
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
4. JUSTIFICACIÓN .....	16
5. MARCO REFERENCIAL .....	18
5.1. MARCO TEÓRICO .....	18
5.2. ESTADO DEL ARTE .....	21
5.2.1. Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) .....	21
5.2.2. Metano (CH <sub>4</sub> ) .....	22
5.2.3. Óxido nitroso (N <sub>2</sub> O).....	23
6. METODOLOGÍA .....	25
6.1. ETAPA 1: Modelación de datos a partir del uso de métodos de mayor precisión en la estimación de las emisiones de los tres principales gases de efecto invernadero (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> Y N <sub>2</sub> O).....	25
6.1.1. Actividad 1: Identificación de los métodos y requerimientos. ....	26
6.1.2. Actividad 2: Selección y caracterización del o las áreas de estudio...26	
6.1.3. Actividad 3: Caracterización de las fuentes principales de información y recolección de los datos. ....	26
6.1.4. Actividad 4: Adaptación de los métodos según el área de estudio y los recursos disponibles. ....	27
6.2. ETAPA 2: Disposición de un sistema de monitoreo de los GEI que aumente la frecuencia de generación de reportes a comparación de los obtenidos con la metodología actual del país.....	27
6.2.1. Actividad 1: Identificación de los sistemas actuales y funcionalidades. 27	
6.2.2. Actividad 2: Análisis de requerimientos para el caso de estudio. ....	28
6.2.3. Actividad 3: Creación del sistema de información geográfica (SIG)...28	
6.3. ETAPA 3: Mejorar la escala de detalle de la zonificación de los GEI al identificar las fuentes puntuales de emisión. ....	28

6.3.1. Actividad 1: Delimitación del nivel de granularidad en los resultados según los recursos disponibles.....	28
6.3.2. Actividad 2: Evaluación comparativa de resultados frente a reportes históricos.....	28
7. CRONOGRAMA .....	29
8. PRESUPUESTO.....	30
9. BIBLIOGRAFÍA.....	31

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Árbol del problema. Fuente: Propia .....	13
Tabla 2. Árbol de objetivos. Fuente: Propia .....	14
Tabla 3. Métodos directos para el monitoreo de CO <sub>2</sub> con la teledetección pasiva. Fuente: (T. Zhang et al., 2021).....	21
Tabla 4. Satélites para la detección de las emisiones de los GEI a nivel de fuente puntual. Fuente: (GEO et al., 2021) .....	27

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ciclo actual metodológico para la elaboración de los Inventarios Nacionales de Emisiones y Absorciones de Gases de Efecto Invernadero. Fuente: (IDEAM et al., 2021).....	12
Figura 2. Emisiones de GEI del Valle del Cauca según el sector económico. Fuente: (IDEAM et al., 2016) .....	16
Figura 3. Porcentajes de GEI presentes en el Valle del Cauca. Fuente: (IDEAM et al., 2016).....	16
Figura 4. Absorción de los gases atmosféricos en función de la longitud de onda del espectro electromagnético. Fuente: (Barroso et al., 2023) .....	18
Figura 5. Criterios para la investigación de estudios sobre las emisiones de fuentes puntuales. Fuente: (Pan et al., 2021).....	19
Figura 6. Escala espacial y temporal disponible actualmente en la teledetección. Fuente: (S. Zhang et al., 2023) .....	20
Figura 7. Flujograma del método IME. Fuente: (Varon et al., 2018) .....	23
Figura 8. Flujograma del método IPPF. Fuente: (Shi et al., 2021) .....	24
Figura 9. Esquema metodológico. Fuente: Propia .....	25

## LISTA DE ABREVIATURAS

CIAT	Centro Internacional de Agricultura Tropical
CLARS-FTS	California Laboratory for Atmospheric Remote Sensing
CVC	Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca
DEM	Digital Elevation Model
DIAL	Differential absorption Lidar
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GHG	Greenhouse Gas
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IME	Integrated Mass Enhancement
INGEI	Inventarios Nacionales de Emisiones y Absorciones de Gases de Efecto Invernadero
IPCC	Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
IPPF	Interior Point Penalty Function
Minambiente	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
MRV	Monitoreo, Reporte y Verificación
Mton	Millones de toneladas
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDC	Nationally Determined Contributions
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TIR	Thermal infrared
ODIAC	Open-Data Inventory for Anthropogenic Carbon dioxide

## RESUMEN

El actual aumento en la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) en la Tierra, obliga a todas las entidades gubernamentales del mundo implemente políticas para el monitoreo, verificación y reporte (MRV) de estos gases, esto con el fin de llegar a un punto donde los impactos en la Tierra sean irreversibles. El Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) es la organización que da directriz sobre las metodologías y buenas prácticas para la cuantificación de los GEI, donde cada país selecciona el método según los recursos que disponga, siendo el del nivel 1 el utilizado por Colombia. El limitado presupuesto para la creación de los Inventarios Nacionales de Emisiones y Absorciones de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) del país, así como el alto costo de equipos de medición in situ, ha causado que las estimaciones sean generalizadas, con restringida resolución espacial y altas incertidumbres en los resultados. La teledetección es una herramienta clave al ser una alternativa importante para la identificación y cuantificación de los GEI, por este motivo, en los últimos años ha aumentado la disposición de satélites diseñados específicamente para la cuantificación de estos gases. El objetivo de este trabajo es que a partir del uso de imágenes obtenidas con la teledetección pasiva, se desarrolle un sistema de monitoreo dinámico espacial que permita cuantificar y seguir las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O de un área del sector productivo localizada en el departamento del Valle del Cauca. Es así como se plantea la metodología que consta de tres etapas, cada una orientada en cumplir con los objetivos específicos, junto con el cronograma que estipula el tiempo que se dispondrá para llevar a cabo el proyecto.

**PALABRAS CLAVE:** GEI, DIÓXIDO DE CARBONO, METANO, ÓXIDO NITROSO, SENSORES REMOTOS, SIG, SECTOR PRODUCTIVO.



## 1. INTRODUCCIÓN

El planeta Tierra actualmente está pasando por cambios en su clima, como consecuencia de la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI). Estos gases presentes en la atmósfera terrestre, aportan en el aumento de la temperatura, debido a la capacidad de captura y reemisión de la radiación infrarroja de la superficie de la Tierra (IDEAM et al., 2017). Las actividades humanas son inequívocamente la causa del calentamiento global, y de que la temperatura del planeta haya alcanzado 1,1°C por encima del período 1850-1900 en 2011-2020 (IPCC, 2023).

Las emisiones mundiales de GEI siguen en aumento, contando también con las contribuciones históricas, se han empezado a producir cambios rápidos y generalizados en la atmósfera, el océano, la criósfera y la biosfera, afectando así a los fenómenos meteorológicos y climáticos de la Tierra (IPCC, 2023). Con el fin de frenar el aumento de la temperatura media global, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, acrónimo en inglés), dio lineamientos para que cada país evalúe su situación e implemente medidas de acción, que aporten en la meta de limitar el calentamiento global a 1,5 °C. Es así como surge la necesidad de cuantificar y monitorear los aportes de GEI que se generan en el mundo, de tal manera en la que se puedan tomar las medidas de mitigación adecuadas para cada región.

Con base a las directrices del IPCC, Colombia en su informe de Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC, siglas en inglés), establece como objetivo el disminuir el 51% de las emisiones de GEI para el 2030 (Minambiente, 2020). Así mismo, el 22 de diciembre de 2021, se sanciona la Ley de Acción Climática (Ley 2169), para constituir los requerimientos necesarios que ayudaran en el cumplimiento de las metas (Decreto 172 de 2022). Surgen así los Inventarios Nacionales de Emisiones y Absorciones de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) con el fin de medir las emisiones y absorciones de cada sector, así como el sistema MRV, para el Monitoreo, Reporte y Verificación de las actividades generadoras de dichos gases (CVC et al., 2018).

Por medio de los INGEI, se identifica la generación de estos gases según los diferentes sectores económicos del país: Minas y energía, Industrias manufactureras, Transporte, Residencial, Comercial, Agropecuario, Forestal y Saneamiento. Sin embargo, los elevados costos de personal que es solicitado para la realización de estos inventarios, la baja precisión del método utilizado para el cálculo de las emisiones, así como el tiempo requerido para la ejecución, ha aumentado la dificultad para realizar un seguimiento continuo a las diferentes actividades generadoras de estos gases de efecto invernadero.

El nivel de incertidumbre presente en el método actual para la estimación de GEI, causa que se creen inconsistencias en los reportes, y que de esta manera se afecte la validación de la efectividad de las acciones de mitigación (P. A. Arias et al., 2022). Con el fin disminuir las discrepancias en las estimaciones, se ha comenzado a utilizar la teledetección para el cálculo de los tres principales GEI: Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), Metano ( $\text{CH}_4$ ) y Óxido Nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), y se ha descubierto que existe un potencial mayor de lo imaginado. Por una parte, los problemas de subestimación de las emisiones de GEI que se suelen presentar en los inventarios de autoinforme, se podrían solucionar con técnicas de detección remota, ya que enfoque además de brindar un mayor detalle espacial, permitiría tener un seguimiento más preciso de las medidas de mitigación de una región (Gurney et al., 2021).

Actualmente la NASA está desarrollando un programa de monitoreo que permite localizar, cuantificar y seguir las emisiones de fuentes puntuales de metano y dióxido de carbono, procedentes del aire y el espacio, la cual ha denominado como Carbon Mapper (NASA, 2021). Con este tipo de sistemas de monitoreo, se visualiza el potencial que tiene el uso de imágenes multiespectrales para el seguimiento de los GEI; es así, como en los últimos años se han lanzado más satélites con este fin, y cuya información se suele disponer de libre acceso para la comunidad.

Existen diversas actividades del sector productivo de Colombia, que generan GEI de manera significativa, sin embargo las estimaciones de estos gases llegan a ser poco precisas, debido al sistema y escala actual en la que se realizan los inventarios. Se busca así, que con la implementación de un sistema de monitoreo dinámico, que integre el componente espacial y ofrezca un mayor detalle al lograr identificar las fuentes puntuales de emisión, se pueda realizar un seguimiento más continuo a las empresas de la región que aportan de manera significativa en la acumulación de GEI.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Un inventario de emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero, es un reporte que data la cantidad de aportes en gases transmitidos según el tipo de actividad humana, junto con la captura de estos que se realiza por parte de los bosques, cultivos o pastizales (IDEAM et al., 2016). Con estos inventarios, se informa sobre los avances y contribuciones del país, frente a la meta global de mantener la temperatura por debajo de 2 °C y limitada a los 1,5 °C. Además, sirven como orientación para la identificación e implementación de las medidas de mitigación, que se deban adoptar en Colombia.

En un INGEI se estiman 6 gases de efecto invernadero, los cuales son el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), Metano (CH<sub>4</sub>), Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), Hidrofluorocarbonos (HFC), Hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) y Perfluorocarbonos (PFC). Los resultados de estos reportes, se ven agrupados según el IPCC en cuatro actividades: 1 - Energía, 2 - Procesos Industriales y uso de productos, 3 - Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra y 4 – Residuos. Sin embargo, con el fin de dar mayor claridad en el contexto de Colombia, estos también se presentan según el sector económico, como lo es el transporte, residencia, comercio, forestal, entre otros (IDEAM et al., 2016).

El ciclo actual que constituye la elaboración del inventario de emisiones y absorciones de GEI para Colombia, son de dos años (ver Figura 1), debido a toda la participación que se requiere por parte de diferentes instituciones, aunque el IDEAM es el principal encargado (IDEAM et al., 2018). La metodología actual, hace que resulte imposible, desde el punto de vista logístico y presupuestario, monitorear las emisiones de gases a nivel nacional o departamental (IDEAM et al., 2016). Se puede encontrar una guía para la elaboración o actualización de estos inventarios, en el contexto colombiano, donde se dan los lineamientos y se dispone de una herramienta de Excel para poder realizar de forma más efectiva los cálculos (Minambiente et al., 2021). Sin embargo, la recopilación de la información, es aún en gran medida manual y demandante de tiempo, ya que aun en entornos más pequeños como los municipales, este proceso se hace a partir de encuestas o en la consulta de base de datos (CIAT et al., 2021).



Figura 1. Ciclo actual metodológico para la elaboración de los Inventarios Nacionales de Emisiones y Absorciones de Gases de Efecto Invernadero. Fuente: (IDEAM et al., 2021)

En cuanto a los métodos propuestos por la IPCC, el de nivel 1 es el menos detallado, puesto que los factores de emisión son tomados de los ya previamente calculados por otras fuentes (CIAT et al., 2021). En el Valle del Cauca, este es el método que se utiliza para las estimaciones de los GEI de cada municipio, debido a que no existen unos factores de emisión calculados para la región (CVC & CIAT, 2018)2018). Es por esto, que se presentan discrepancias en las incertidumbres obtenidas, de acuerdo con el método que se utilice.

En los últimos 50 años, se han presentado 16 fenómenos de niña y 19 de niño en el Valle del Cauca, como consecuencia del cambio climático, donde los excesos de humedad y sequía de la región se espera que sigan aumentando (CVC et al., 2018). Además de esto, se estima que cerca del 2040 el incremento en la temperatura para el Valle del Cauca sería del 1 °C, causando así reducciones en las precipitaciones, mayores o iguales al 10% (IDEAM et al., 2018). Razón por la cual resulta importante poder monitorear de una manera más frecuente y precisa, las emisiones de GEI del departamento.

La problemática evidenciada se consolidó en un árbol del problema (ver Tabla 1), ejercicio por el cual se logra identificar de manera clara y precisa las causa y efectos determinantes en la problemática tratada; se resaltó a su vez la primera columna,

puesto que esta sirve para contextualizar el tema, más no entra en el alcance de la solución que se propone para la tesis.

<b>Impactos</b>	Aumento de la temperatura media global del planeta	Toma de medidas de mitigación generalizadas y poco eficientes según el caso de estudio	Bajo control en el incremento de los incidentes ambientales	Limitado reconocimiento de las actividades más generadoras de emisiones según el caso de estudio
	Incremento en la acumulación de GEI	Alta incertidumbre de las emisiones de GEI generadas a una escala apropiada. (IDEAM et al., 2021)	Reducido número de inspecciones de la contaminación ambiental que genera la industria, por parte de las autoridades ambientales	Desestimación de la identificación espacial de las fuentes puntuales de emisión de GEI
<b>Problema</b> <b>Deficiencia en el método actual utilizado para el cálculo de las emisiones de GEI aportados por el sector productivo</b>				
<b>Causas directas</b>	Cambios en la interacción del ser humano con la Tierra al realizar actividades sin medir las consecuencias al entorno.	Elevadas discrepancias entre las estimaciones de GEI con mediciones atmosféricas, INGEI y los programas de autoinforme. (Gurney et al., 2021)	Reducido seguimiento de las actividades contaminantes generadas por las industrias de la región. (Tarazona, 2022)	Bajo nivel de detalle en la zonificación de los GEI (CIAT et al., 2021)
<b>Causas indirectas</b>	Acelerado crecimiento de la industria, siendo el punto de inflexión la Revolución Industrial.	Deficiencia en la precisión del método utilizado para la estimación de los GEI	Altos costos actuales en los sistemas de monitoreo ambiental	Escaso uso de la información espacial para el cálculo de los GEI

Tabla 1. Árbol del problema. Fuente: Propia

### 3. OBJETIVOS

A partir del árbol de problemas, se crea el de objetivos, donde se pasa en positivo las causas identificadas e identifican los fines de estos.

<b>Fines a largo plazo</b>	Apoyar en la toma de medidas de mitigación de los GEI	Incrementar el grado de control frente a los incidentes ambientales	Primer acercamiento frente a las actividades más contaminantes según sea el sector productivo.
<b>Fines directos</b>	Disminuir el grado de incertidumbre en el cálculo de las emisiones de los GEI	Mejorar la continuidad con la que se efectúan las inspecciones por parte de las autoridades ambientales	Poder identificar las fuentes puntuales de emisión de GEI
<b>Objetivo General</b>	<b>Optimizar el método de cálculo y monitoreo de las emisiones de GEI del sector productivo</b>		
<b>Objetivos específicos</b>	Bajas discrepancias en las estimaciones de los GEI	Incrementar la frecuencia con la que se realizan seguimientos a las actividades contaminantes en la región	Mayor nivel de detalle en la zonificación de los GEI
<b>Actividades / Medios</b>	Adaptación nuevas fuentes de información para la estimación de GEI	Elaboración de una metodología que incorpore un aumento en la frecuencia con la que se realizan las estimaciones de GEI	Uso de información espacial como recurso principal para el cálculo de emisiones de GEI

Tabla 2. Árbol de objetivos. Fuente: Propia

Con base a este árbol, quedan planteados los siguientes objetivos:

#### 3.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema de monitoreo dinámico espacial que permita cuantificar y seguir las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O de un área del sector productivo del Valle del Cauca.

#### 3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar los datos con métodos de mejor precisión en la estimación de las emisiones de los tres principales gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O).
- Disponer de un sistema de monitoreo de los GEI que aumente la frecuencia de generación de reportes a comparación de los obtenidos con la metodología actual del país.
- Mejorar la escala de detalle de la zonificación de los GEI al identificar las fuentes puntuales de emisión.

El desarrollo de la tesis parte de la hipótesis de que la teledetección es actualmente una de las técnicas claves para el estudio del cambio climático, razón por la que se plantea la siguiente pregunta: ¿Cómo por medio de la teledetección se puede cuantificar y realizar un seguimiento de las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> Y N<sub>2</sub>O por parte del sector productivo?

#### 4. JUSTIFICACIÓN

El límite establecido de mantener el calentamiento global por debajo de 1,5 °C, se realiza con el fin de evitar llegar a un punto donde los impactos en la Tierra sean irreversibles. Se estima que alrededor del 2040, el aumento de la temperatura global alcanzaría dicho valor, si se continúa con la misma tasa de comportamiento actual (IPCC, 2022). En el caso de Colombia, se ha visto un aumento del 15% en el total de las emisiones de GEI, desde los años 90 hasta el 2010; donde los principales aportes vienen por parte de la industria manufacturera, minas y energía, y transporte (IDEAM et al., 2017).

Según la tercera comunicación nacional de cambio climático del IDEAM, Colombia está actualmente emitiendo un aproximado de 66,5 Mton CO<sub>2</sub>eq, gases de los cuales solo en 10 se departamentos concentran el 59% de las emisiones totales del país, y dónde ubicamos en el cuarto puesto al Valle del Cauca con emisiones de 16,50 Mton CO<sub>2</sub>eq, mientras que las absorciones son solo -4,40 Mton CO<sub>2</sub>eq (IDEAM et al., 2017).



Figura 2. Emisiones de GEI del Valle del Cauca según el sector económico. Fuente: (IDEAM et al., 2016)

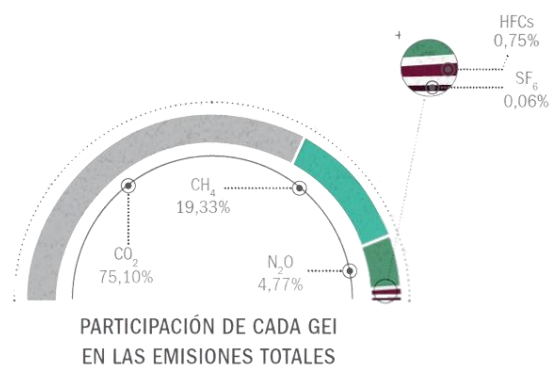


Figura 3. Porcentajes de GEI presentes en el Valle del Cauca. Fuente: (IDEAM et al., 2016)

La implementación de medidas de mitigación para los GEI, se ve afectada según la frecuencia con la que se realice el Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV) de las actividades generadoras de estos gases. Los métodos actuales para la medición de los GEI se dividen en dos: Directa, tomando datos de campo por medio de equipos instalados in situ, ya sea con un muestreo puntual o monitoreo continuo, o Indirecta, realizando estimaciones al multiplicar el dato de la actividad por el factor de emisión (Pizarro Gariazzo, 2021). En el caso de Colombia, se utiliza un método indirecto, esto debido a que como señala Pizarro Gariazzo (2021), “los equipos de medición son costosos y la calibración compleja”.



“Los inventarios nacionales de emisiones de GEI son indispensables para monitorear y controlar el cambio climático, pero no brindan información sobre el patrón espacial de las emisiones” (Charkovska et al., 2019). Es por esto, que surgen otros métodos para la estimación de estos gases, y el uso de satélites es actualmente un elemento clave para la medición de las fuentes de emisión, razón por la cual, ya se encuentran satélites en órbita cuyo enfoque principal es cuantificar los GEI (Jervis et al., 2021).

Con el desarrollo de un sistema que capture y procese los datos espaciales, se podrá aumentar la frecuencia con la que se realiza el seguimiento a los GEI, donde este solo se verá limitado según sea la resolución temporal de el o los satélites a utilizar. Se busca también obtener una mejor precisión espacial sobre las fuentes puntuales de emisión, esta información es crucial para poder identificar de manera concreta en qué sectores está ocurriendo dicho evento y posteriormente reconocer que actividad lo pudo ocasionar (Cusworth, 2022).

Del total de GEI tomados para un inventario, son tres los principales emitidos a nivel global: CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, donde por una parte, aunque el metano y el óxido nitroso presentan de manera respectiva 265 y 28 veces, un mayor poder de calentamiento que el dióxido de carbono, este es el que está más presente en la atmósfera (Saynes Santillán et al., 2016). Por esta razón, gran parte de las publicaciones científicas actuales, están centradas en el estudio y la medición de alguno de estos tres gases de efecto invernadero.

## 5. MARCO REFERENCIAL

### 5.1. MARCO TEÓRICO

Muchos de los GEI son generados naturalmente, sin embargo el aumento en la acumulación actual de estos gases a raíz de fuentes antropogénicas, ha generado un desbalance en la Tierra, que se evidencia con el cambio climático. La absorción y reemisión de la radiación en estos gases se refleja dentro del rango infrarrojo térmico del planeta (como se observa en la Figura 4), por lo que el uso de sensores remotos se convierte en una tecnología clave para obtener información sobre estos (Zhao et al., 2023). El monitoreo ambiental que se realiza con la teledetección, permite trabajar a diferentes escalas, donde actualmente el mayor alcance ha sido con la identificación de las fuentes puntuales de emisión.

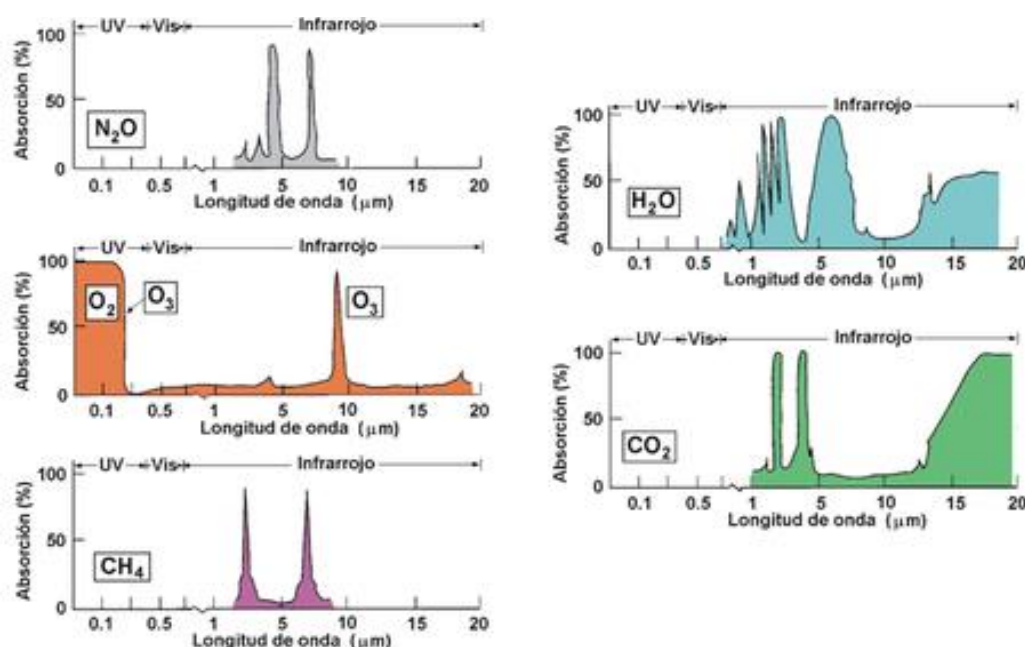


Figura 4. Absorción de los gases atmosféricos en función de la longitud de onda del espectro electromagnético. Fuente: (Barroso et al., 2023)

Los datos actuales sobre las emisiones a nivel de fuente puntual se obtienen de autoinformes, pero algunas investigaciones han demostrado como con el uso de satélites como el OCO-2, se puede detectar las emisiones de fuentes puntuales de CO<sub>2</sub> (Pan et al., 2021) Anteriormente, la detección del dióxido de carbono se obtenía por medio del uso de bandas del infrarrojo térmico (TIR) o infrarrojo cercano, las cuales no estaban diseñadas para controlar este gas, por lo que en los primeros estudios se evidenciaron errores sistematizados. Es así como en los comienzos de la década de los 2000, se empezaron a introducir nuevas tecnologías con sensores especializados para la detección de CO<sub>2</sub>, que proporcionaban un mayor rango en

las longitudes de ondas del infrarrojo, mejorando de manera significativa la precisión en los resultados (Zhao et al., 2023).

Para la teledetección de las fuentes puntuales CO<sub>2</sub> los requisitos son más rigurosos, puesto que se necesita una resolución espacial más fina, así como se debe tener en cuenta las condiciones meteorológicas que afectan a los patrones de transporte de este gas en la atmósfera; por esta razón se recomienda utilizar los satélites para la medición de grandes fuentes puntuales de emisión (Pan et al., 2021).

En la Figura 5, se observa el flujograma propuesto por Pan (2021) para la evaluación de los métodos de estimación de las emisiones de CO<sub>2</sub>, el cual se compone en tres pasos: el primero consiste en la selección de los antecedentes, el segundo en la simulación de las emisiones, para el cual se necesita definir el modelo a utilizar, así como tener en cuenta las variables meteorológicas que pueden afectar la manera en que se transporta el CO<sub>2</sub>, y finalmente la realización de un análisis comparativo usando como referencia los autoinformes realizados por parte de las industrias.

#### Emisiones de fuentes puntuales

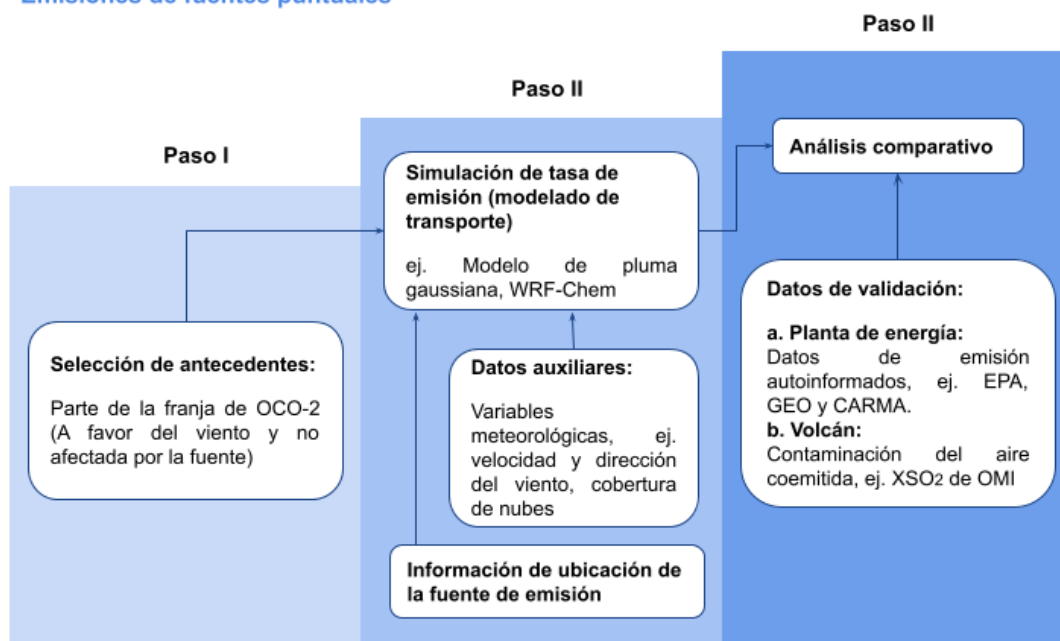


Figura 5. Criterios para la investigación de estudios sobre las emisiones de fuentes puntuales. Fuente: (Pan et al., 2021)

En el caso del metano, las tecnologías disponibles para la teledetección se clasifican según la escala a la que permite trabajar, como se observa en la Figura 6; los satélites proporcionan un monitoreo continuo en comparación a otras herramientas, y con las recientes mejoras en la resolución espacial, resulta este como una buena alternativa para la identificación de las fuentes puntuales de emisión (S. Zhang et al., 2023).

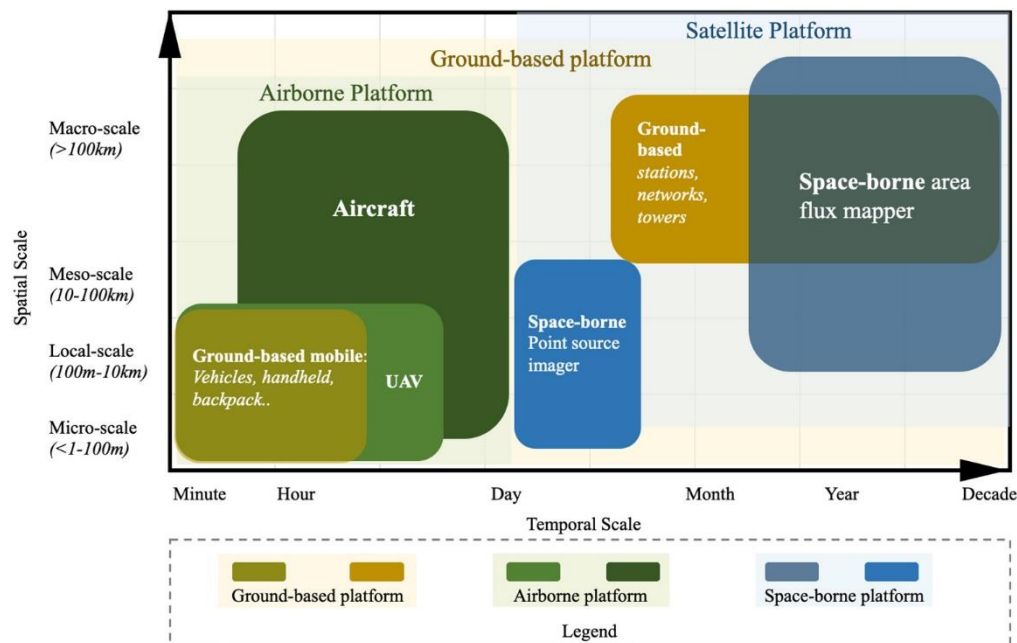


Figura 6. Escala espacial y temporal disponible actualmente en la teledetección. Fuente: (S. Zhang et al., 2023)

Aunque los datos obtenidos con sensores que permiten trabajar a micro escala, proporcionan una mayor exactitud espacial, estos a comparación de los de macro escala, tienen una menor precisión en la medición de la concentración del  $\text{CH}_4$ ; por lo que es recomendado fusionar los datos y técnicas, siempre teniendo en cuenta las limitaciones que se presentan en la disponibilidad de la información a raíz de las condiciones climáticas, la nubosidad y los aerosoles (S. Zhang et al., 2023).

En cuanto al óxido nítrico, aunque este es el tercer GEI más importante del planeta, las estimaciones y los estudios actuales son limitados, y tienden a manejar una resolución espacial a nivel nacional; sin embargo es posible obtener las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  a escala local, como lo realizan Sander & Zeng (2021), al utilizar el observatorio de teledetección CLARS-FTS para una cuenca de Los Ángeles, California.

Es importante además de tener en cuenta todas las consideraciones por parte de los autores para la cuantificación y monitoreo del  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  Y  $\text{N}_2\text{O}$ , seguir la guía sobre las buenas prácticas recomendadas por el IPCC (2000), evitando realizar subestimaciones en los cálculos, así como resaltar la importancia en cambiar o mejorar los métodos cuando se dispone de nuevos datos y tecnologías, como con la teledetección.

## 5.2. ESTADO DEL ARTE

Actualmente, los estudios realizados para la estimación de los GEI, suelen emplear métodos en los que se combinan varias fuentes de información, además de los datos obtenidos con los sensores remotos; la consideración de variables climáticas o mediciones in situ, sirve como medida para mejorar la precisión y exactitud en los resultados. A continuación se mostrará la tendencia actual de las investigaciones con relación al trabajo propuesto, este apartado se dividió según el tipo de GEI a tratar.

### 5.2.1. Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

La detección del CO<sub>2</sub> se puede realizar a través del uso de métodos directos por medio de trazadores, sensores activos o pasivos; la teledetección pasiva, al igual que los otros métodos, presenta sus ventajas y desventajas como se observa en la Tabla 3, donde actualmente sus principales retos están en la mejora de la resolución espacial, así como el hardware y algoritmo utilizado para la detección (T. Zhang et al., 2021), sin embargo tiene un gran potencial para la estimación de los GEI, por lo que es necesario seguir explorando nuevas metodologías.

Métodos		Fase de aplicación	Sensores	Plataforma	Ventajas	Desventajas
Teledetección pasiva por microondas	Espectrómetros de rejilla	Teórico	Espectrómetro de rejilla	Basado en tierra	- No necesita una fuente de luz de emisión activa y tiene mayor robustez. - Se pueden monitorear múltiples contenidos de gas simultáneamente.	- Es necesario mejorar la velocidad de identificación de las columnas de CO <sub>2</sub> . - Susceptible a la temperatura, la humedad y otras condiciones meteorológicas.
	Espectroscopía infrarroja pasiva por transformada de Fourier de camino abierto	Sitio piloto	Espectrómetro de absorción FTIR	Basado en tierra	- El rango y la frecuencia de monitoreo se pueden seleccionar de forma independiente - Amplio rango de monitoreo - Los datos de fondo están fácilmente disponibles	- La señal puede atravesar la atmósfera que contiene un alto nivel de CO <sub>2</sub> . - Baja resolución, interferencia de aerosoles.
	Espectrómetro de imágenes aéreas	Teórico	Espectrómetros de imágenes	UAV	- No se requiere equipo de campo	
	Satélite de observación de carbono	Teórico	GOSAT, OCO-2, OCO-3, TanSat	Satélite		

*Tabla 3. Métodos directos para el monitoreo de CO<sub>2</sub> con la teledetección pasiva. Fuente: (T. Zhang et al., 2021)*

El OCO-2 de la NASA, es el primer satélite de la Tierra destinado para la observación del CO<sub>2</sub>, así como el más utilizado. Hua et al. (2023) en un estudio realizado utilizando este satélite para estimar las emisiones del dióxido de carbono, resalta la importancia de añadir datos adicionales como los meteorológicos; es por esto, que tomaron insumos del ERA5, MODIS, DEM SRTM, un inventario de datos abiertos sobre dióxido de carbono antropogénico (ODIAC) y datos estadísticos. El uso de toda esta información complementaria, permitió tener una buena precisión en los resultados, a diferencia de otros modelos en los cuales solo se usó como fuente datos, los obtenidos con los sensores remotos.

El viento es uno de los factores meteorológicos que más influye en el proceso de la estimación de la emisión del CO<sub>2</sub>, por lo que si la incertidumbre es grande, también lo serán los resultados finales; por esto es clave que además de combinar datos terrestres, aéreos y satelitales, se disponga de datos meteorológicos de una resolución espacial igual o menor a los obtenidos con el sensor remoto (Guo et al., 2023).

#### 5.2.2. Metano (CH<sub>4</sub>)

Dubey et al. (2023) realizaron una comparación de las estimaciones de las emisiones de metano obtenidas por medio de satélites con los reportados en los inventarios. Utilizando datos de TROPOMI en la cuenca Montney de Canadá, encontraron  $7,4 \pm 6,4$  veces de metano que el registrado en los inventarios; sin embargo la falta de correlación en los datos cuando estos se evalúan a escala de instalación, evidencia que aún existen limitantes en los instrumentos así como necesidad de mejorar los métodos de modelación.

De los métodos disponibles para la cuantificación de las emisiones de metano, se destacan cuatro principales: el método de inversión de la pluma gaussiana, el del píxel fuente, el flujo de sección transversal y el de mejora de masa integrada (Integrated Mass Enhancement – IME); de los cuales al realizar comparaciones utilizando datos del satélite GHGsat, se encontró que estos dos últimos son los más adecuados, puesto que presentan errores del 8-12% y 5-12% respectivamente, cuyos incremento en el error depende significativamente de la precisión del instrumento (Varon et al., 2018).

El método IME también ha presentado buenos resultados utilizando datos del PRISMA, Guanter et al. (2021) evaluaron el potencial que tiene para mapear las emisiones puntuales del CH<sub>4</sub>, y encontraron errores sistemáticos cercanos al 10% debido a las incertidumbres de calibración del satélite; además otro factor importante que afecta la detección y cuantificación del metano, es el brillo y la homogeneidad de la superficie que se estudie. En la Figura 7 se muestran las entradas requeridas para la ejecución del método IME, así como los resultados que se esperan obtener del mismo.

## Source rate retrieval by the IME method

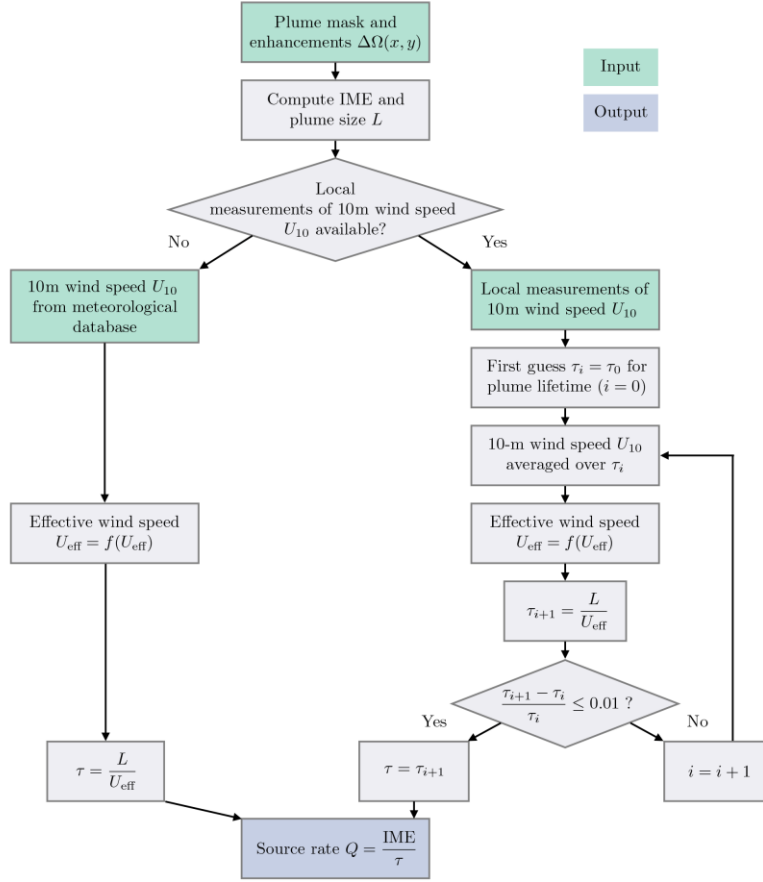


Figura 7. Flujograma del método IME. Fuente: (Varon et al., 2018)

### 5.2.3. Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)

La detección del N<sub>2</sub>O se realiza frecuentemente a una escala global, en parte se debe a lo difícil que es estimar este GEI por satélite, ya que su firma espectral es débil y su variabilidad en la troposfera, baja (Chalinel et al., 2022). Para realizar un análisis a escala de ciudad, en Los Ángeles, Addington et al. (2021) utilizaron el observatorio de teledetección CLARS-FTS, para estimar las emisiones de N<sub>2</sub>O, y encontraron que sus cálculos eran 3 veces mayores que los reportados en los inventarios estatales; sin embargo las discrepancias presentes en los resultados y la limitada identificación sobre las posibles causas, resalta la importancia de mejorar la comprensión de las emisiones de N<sub>2</sub>O a escala urbana.

Shi et al. (2021) propone una metodología de alta resolución para la cuantificación de las fuentes puntuales de gases, como los óxidos de nitrógeno (dentro del cual se encuentra el N<sub>2</sub>O), basado en la función de penalización de puntos interiores (IPPF),

procedimiento que se explica en la Figura 8, el cual se realiza utilizando un Lidar de absorción diferencial (DIAL) o sensores in situ cerca de la fuente puntual. Este modelo asegura obtener precisiones que pueden superior al 98%, sin embargo se desconoce para el caso en el que se use como fuente de datos los satelitales.

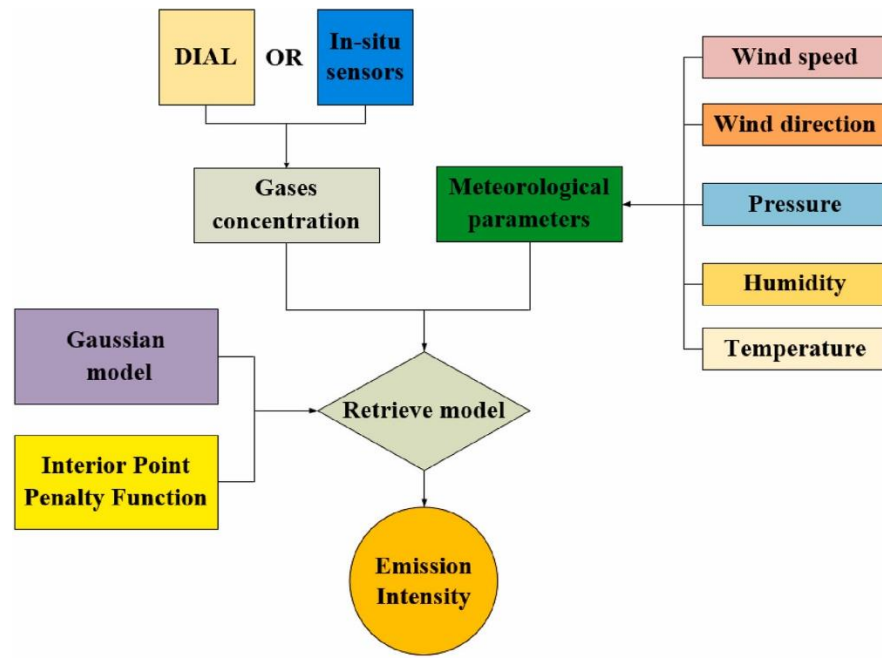


Figura 8. Flujograma del método IPPF. Fuente: (Shi et al., 2021)



## 6. METODOLOGÍA

La metodología se propone para ser desarrollada dentro del Valle del Cauca, cuya síntesis del proceso a ejecutar se observa en la Figura 9, la cual consta de tres etapas que consisten en: primero la obtención y modelación de los datos, posteriormente la creación y disposición de un SIG, y finalmente la búsqueda de la obtención de una mejor granularidad en los datos así como la evaluación comparativa de los mismos. Cada una de estas etapas, están orientadas a cumplir con los objetivos específicos establecidos.

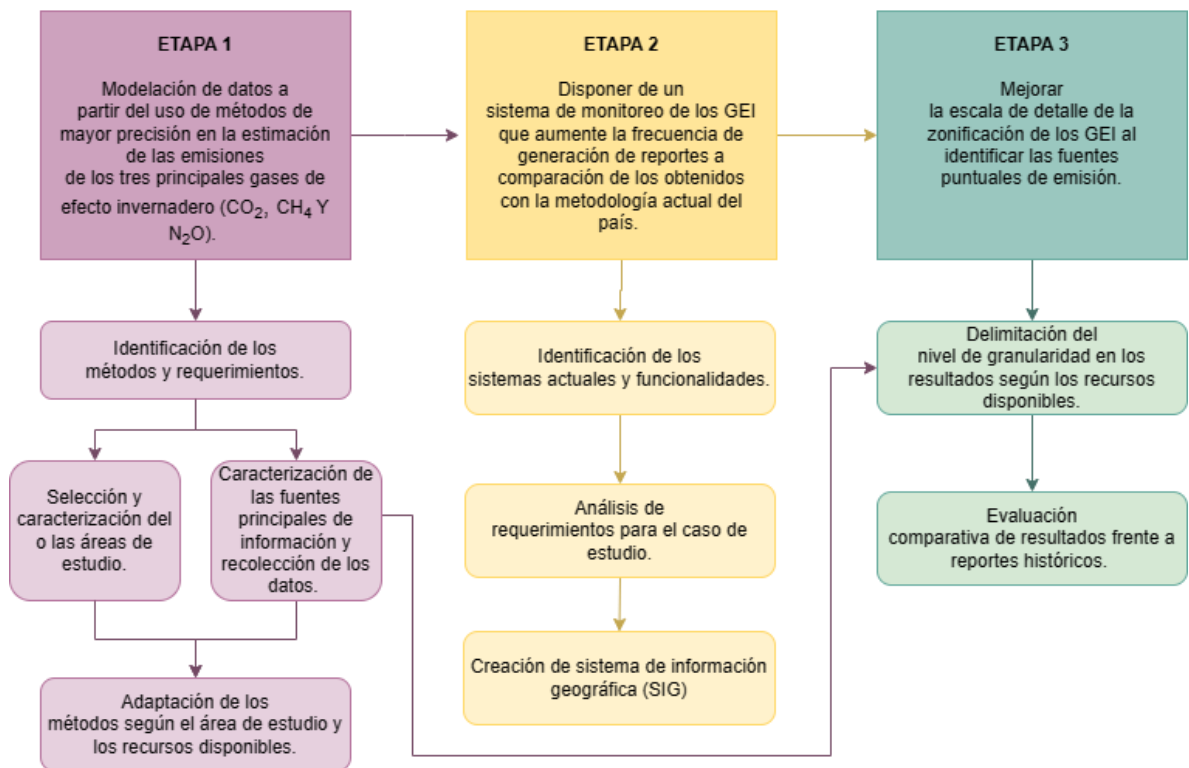


Figura 9. Esquema metodológico. Fuente: Propia

La primera etapa se realiza en base al primer objetivo, el cual consiste en la identificación y adaptación de los métodos actuales para el cálculo de las emisiones de los tres GEI, con el fin de modelar adecuadamente los datos. Para cada una de las secciones, se explicará cada una de las actividades que se deben ejecutar.

### 6.1. ETAPA 1: Modelación de datos a partir del uso de métodos de mayor precisión en la estimación de las emisiones de los tres principales gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O).

Con base en el artículo de Pan et al. (2021) sobre el potencial de la teledetección para el monitoreo CO<sub>2</sub>, se adopta la metodología empleada para la revisión de los modelos actuales de estimación de los GEI, contemplando a su vez las limitaciones de los sensores remotos al trabajar en escala de fuente puntual, para así plantear las siguientes actividades:

#### 6.1.1. Actividad 1: Identificación de los métodos y requerimientos.

Con el marco referencial se han identificado algunos de los modelos actualmente utilizados para la estimación de los GEI, es necesario que además de esto, se reconozca que datos son requeridos y la disponibilidad que se tiene de los mismo para el departamento.

#### 6.1.2. Actividad 2: Selección y caracterización del o las áreas de estudio.

Una de las recomendaciones importantes que realiza Pan et al. (2021) es enfocarse en la ubicación de vastas fuentes puntuales que tengan fuertes señales de emisión. Por esto es necesario ubicar dentro del departamento los lugares dentro del sector productivo cuyos reportes de emisiones sean considerablemente altos, caracterizar los aspectos físicos, biológicos y químicos del sitio, así como la disponibilidad de datos meteorológicos como la velocidad y dirección del viento.

Otro aspecto decisivo para la determinación del área de estudio, son los GEI que se puedan encontrar en el lugar, puesto que es poco probable encontrar un sitio donde se emitan los tres gases que se van a trabajar, es posible que se escojan al menos dos zonas de estudio.

#### 6.1.3. Actividad 3: Caracterización de las fuentes principales de información y recolección de los datos.

Es necesario la identificación de las fuentes principales de información actualmente dispuestas, así como caracterizar de manera detallada la información del satélite, datos como su resolución espacial o temporal. En la Tabla 4 se muestra algunos de los satélites que actualmente se encuentran en órbita, y que cumplen con el requerimiento de permitir trabajar a escala de fuente puntual.

País / Región	Organización	Instrumento	GEI monitoreados directamente			Acceso a datos
			CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	
China	CNSA	Gaofen-5 (GMI)	X	X		Limitado
China	NRSCC NSMCCMA	TanSat (ACGS)	X	X		Limitado

Europa	EC ESA NSO	Sentinel-5P (TROPOMI)		X		Abierto
Italia	ASI	PRISMA (HYC)	X	X		Abierto
Estados Unidos	NASA	OCO-2	X			Abierto
Estados Unidos	NASA	OCO-3	X			Abierto
Canadá / Reino Unido	GHGSat	GHGSat-D		X		Suscripción de pago
Canadá / Reino Unido	GHGSat	GHGSat-C1 y GHGSat-C2		X		Suscripción de pago
Estados Unidos	Orbital Sidekick	Aurora	X	X	X	Suscripción de pago

*Tabla 4. Satélites para la detección de las emisiones de los GEI a nivel de fuente puntual. Fuente: (GEO et al., 2021)*

#### 6.1.4. Actividad 4: Adaptación de los métodos según el área de estudio y los recursos disponibles.

Finalmente se adaptan y emplean cada uno de los modelos según la escala y disponibilidad de recursos que se obtengan a partir de la actividad 3; de esta manera se podrá obtener los resultados esperados que es identificar y cuantificar los tres GEI, realizando una evaluación comparativa en la actividad 2 de la etapa 3.

### 6.2. ETAPA 2: Disposición de un sistema de monitoreo de los GEI que aumente la frecuencia de generación de reportes a comparación de los obtenidos con la metodología actual del país.

#### 6.2.1. Actividad 1: Identificación de los sistemas actuales y funcionalidades.

Para esta etapa se realizará una amplia búsqueda sobre los sistemas de monitoreo de GEI que están actualmente dispuestos libremente para la comunidad; en este caso uno de los principales referentes para este trabajo será el portal “Carbon Mapper” creado por la Nasa, cuya finalidad es la identificación de las fuentes puntuales de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> a escala global.

#### 6.2.2. Actividad 2: Análisis de requerimientos para el caso de estudio.

Identificación de los requerimientos, empezando con la arquitectura del sistema a partir de la definición del modelo conceptual, lógico y físico; posteriormente se determina el lenguaje de programación para la automatización en la obtención, seguimiento y cálculo de las emisiones de los gases, trabajando a su vez el diseño de la interfaz gráfica.

#### 6.2.3. Actividad 3: Creación del sistema de información geográfica (SIG)

Definida la arquitectura del sistema, y cada uno de los elementos necesarios para su funcionamiento, se empieza a crear el sistema, para finalmente verificar su correcto desempeño, realizando un adecuado manejo de errores y determinando aspectos técnicos como la frecuencia en el mantenimiento de la plataforma, así como una guía de uso. Se aclara así que el sistema hará una recolección de los datos y cálculo de los puntos de emisión de manera automática, de esta manera la entrada y muestra de información será dinámica.

### 6.3. ETAPA 3: Mejorar la escala de detalle de la zonificación de los GEI al identificar las fuentes puntuales de emisión.

#### 6.3.1. Actividad 1: Delimitación del nivel de granularidad en los resultados según los recursos disponibles.

El nivel de detalle en la detección de las emisiones de los GEI, se verá determinado según los resultados que se obtengan en la actividad 3 de la etapa 1; a partir de esto se establece el nivel de granularidad máxima de los productos. Se destaca así que hasta el momento, una de las mayores limitantes para la detección de las emisiones a escala de fuente puntual, es la estimación del N<sub>2</sub>O, puesto que son pocos los satélites actualmente dispuestos para la cuantificación de este gas a escala de detalle.

#### 6.3.2. Actividad 2: Evaluación comparativa de resultados frente a reportes históricos.

La evaluación de los resultados se realizará a partir de comparar las mediciones obtenidas por satélites a las estimaciones reportadas en los inventarios nacionales o en los de auto informes. El proceso metodológico será en base a la empleada por Dubey et al. (2023) cuando se realizó este análisis para Canadá.

## 7. CRONOGRAMA

Actividades	Enero				Febrero				Marzo				Abril				Mayo				Junio				Julio				Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
Metodología																																												
Etapa 1																																												
Actividad 1																																												
Actividad 2																																												
Actividad 3																																												
Actividad 4																																												
Etapa 2																																												
Actividad 1																																												
Actividad 2																																												
Actividad 3																																												
Etapa 3																																												
Actividad 1																																												
Actividad 2																																												
Revisión del Director de T.G.																																												
Primera corrección del documento																																												
Segunda revisión del Director de T.G.																																												
Envío al Comité del Programa																																												
Envío a los Jurados																																												
Revisión de los Jurados																																												
Correcciones finales del T.G.																																												
Sustentación																																												

## 8. PRESUPUESTO

Ítem	Rubro	Gismodel - Univalle		Total
		Especie	Efectivo	
1	Talento humano	\$ 13.000.154	\$ -	\$ 13.000.154
2	Equipos y software	\$ 5.500.000	\$ -	\$ 5.500.000
3	Administrativos	\$ 7.200.000	\$ -	\$ 7.200.000
<b>TOTAL</b>		\$ 25.700.154	\$ -	<b>\$ 25.700.154</b>

### 1. TALENTO HUMANO

Cargo específico	Justificación (Salario)	Cantidad	Dedicación (h/sem)	Semanas	Total
Director Proyecto	\$ 8.000.000	1	6	41	\$ 11.353.846
Estudiante	\$ 1.160.000	1	6	41	\$ 1.646.308
<b>TOTAL</b>					<b>\$ 13.000.154</b>

### 2. EQUIPOS Y SOFTWARE

Equipos y software (Descripción)	Especificaciones técnicas	Justificación	Cantidad	Propiedad / Administración (% para el proyecto)	Valor unitario	Total
Gismodel	Computadores disponibles	Uso de servidores en línea y programación	3	0,4	\$ 100.000.000	\$ 4.000.000
Equipo Estudiante	Computador		1		\$ 1.500.000	\$ 1.500.000
<b>TOTAL</b>						<b>\$ 5.500.000</b>

### 3. ADMINISTRACIÓN

Recursos	Justificación	Valor total
Oficina, internet, energía, comunicación, administración		\$ 7.200.000

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Addington, O., Zeng, Z. C., Pongetti, T., Shia, R. L., Gurney, K. R., Liang, J., Roest, G., He, L., Yung, Y. L., & Sander, S. P. (2021). Estimating nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emissions for the Los Angeles Megacity using mountaintop remote sensing observations. *Remote Sensing of Environment*, 259. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112351>
- Arias, P. A., Villegas, L. D., Mesa, O. J., Pabón, J. D., Arango, J., Arango-Aramburo, S., Armenteras, D., Berrouet, L., Barahona, R., Barco, J., Cardona, Y., Carvajal-Escobar, Y., Ceballos-Bonilla, L. I., Cerón, W. L., Escobar, J. H., González, C., Hoyos, I. C., Hoyos, N., Jaramillo, C., ... Zuluaga, M. D. (2022). Methodological implications and inconsistencies of Colombia's Third National Communication on Climate Change. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 46(180), 769–794. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1705>
- Barroso, J., Blanco, J., Chiodo, G., & Serrano, E. (2023). *Efecto Invernadero*. <http://meteolab.fis.ucm.es/clima/efecto-invernadero>
- Chalinel, R., Attié, J. L., Ricaud, P., Vidot, J., Kangah, Y., Hauglustaine, D., & Thompson, R. (2022). Evaluation and Global-Scale Observation of Nitrous Oxide from IASI on Metop-A. *Remote Sensing*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/rs14061403>
- Charkovska, N., Halushchak, M., Bun, R., Nahorski, Z., Oda, T., Jonas, M., & Topylko, P. (2019). A high-definition spatially explicit modelling approach for national greenhouse gas emissions from industrial processes: reducing the errors and uncertainties in global emission modelling. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 24(6), 907–939. <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9836-6>
- CIAT, CVC, & DAGMA. (2021). *INVENTARIO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y CONTAMINANTES CRITERIO PARA SANTIAGO DE CALI*. [www.ciat.cgiar.org](http://www.ciat.cgiar.org)
- Cusworth, D. (2022, October 31). *Point sources of methane emissions*. PNAS Science Sessions Podcast. <https://www.pnas.org/post/podcast/point-sources-methane-emission>
- CVC, & CIAT. (2018). *Inventario de Gases de Efecto Invernadero. Año Base 2010. Municipio de Palmira Valle del Cauca*. [www.ciat.cgiar.org](http://www.ciat.cgiar.org)
- CVC, CIAT, & Secretaría de Desarrollo Rural, A. y P. (2018). *Plan Integral de Cambio Climático- PICC*.

- Dubey, L., Cooper, J., Staffell, I., Hawkes, A., & Balcombe, P. (2023). Comparing satellite methane measurements to inventory estimates: A Canadian case study. *Atmospheric Environment: X*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2022.100198>
- GEO, ClimateTRACE, & WGIC. (2021). *GHG Monitoring from Space: A mapping of capabilities across public, private, and hybrid satellite missions*.
- Guanter, L., Irakulis-Loitxate, I., Gorroño, J., Sánchez-García, E., Cusworth, D. H., Varon, D. J., Cogliati, S., & Colombo, R. (2021). Mapping methane point emissions with the PRISMA spaceborne imaging spectrometer. *Remote Sensing of Environment*, 265. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112671>
- Guo, W., Shi, Y., Liu, Y., & Su, M. (2023). CO2 emissions retrieval from coal-fired power plants based on OCO-2/3 satellite observations and a Gaussian plume model. *Journal of Cleaner Production*, 397. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136525>
- Gurney, K. R., Liang, J., Roest, G., Song, Y., Mueller, K., & Lauvaux, T. (2021). Under-reporting of greenhouse gas emissions in U.S. cities. *Nature Communications*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20871-0>
- Hua, Y., Zhao, X., & Sun, W. (2023). Estimation of anthropogenic CO2 emissions at different scales for assessing SDG indicators: Method and application. *Journal of Cleaner Production*, 414. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137547>
- IDEAM, Fundación Natura, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLEERÍA. (2021). *Tercer Informe Bienal de Actualización de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC)*. [www.cambioclimatico.gov.co](http://www.cambioclimatico.gov.co);
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLEERÍA. (2016). *INVENTARIO NACIONAL Y DEPARTAMENTAL DE GASES EFECTO INVERNADERO - COLOMBIA*.
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLEERÍA. (2017a). *TERCERA COMUNICACIÓN NACIONAL DE COLOMBIA. RESUMEN EJECUTIVO*. [www.ideam.gov.co](http://www.ideam.gov.co);
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLEERÍA. (2017b). *TERCERA COMUNICACIÓN NACIONAL DE COLOMBIA RESUMEN EJECUTIVO*. [www.ideam.gov.co](http://www.ideam.gov.co);
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLEERÍA. (2018). *Segundo Reporte Bienal de Actualización de Colombia ante la CMNUCC*. [www.ideam.gov.co](http://www.ideam.gov.co);



- IPCC. (2000). *ELECCIÓN DE LA METODOLOGÍA Y REALIZACIÓN DE NUEVOS CÁLCULOS*. Alexander Nakhutin. [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/spanish/7\\_Methodological\\_ES.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/spanish/7_Methodological_ES.pdf)
- IPCC. (2022). Framing and Context. In: Global Warming of 1.5°C. In *Global Warming of 1.5°C* (pp. 49–92). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.003>
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (P. Arias, M. Bustamante, I. Elgizouli, G. Flato, M. Howden, C. Méndez-Vallejo, J. J. Pereira, R. Pichs-Madruga, S. K. Rose, Y. Saheb, R. Sánchez Rodríguez, D. Ürge-Vorsatz, C. Xiao, N. Yassaa, J. Romero, J. Kim, E. F. Haites, Y. Jung, R. Stavins, ... C. Péan, Eds.). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Jervis, D., McKeever, J., Durak, B. O. A., Sloan, J. J., Gains, D., Varon, D. J., Ramier, A., Strupler, M., & Tarrant, E. (2021). The GHGSat-D imaging spectrometer. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(3), 2127–2140. <https://doi.org/10.5194/amt-14-2127-2021>
- Minambiente. (2020). *Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC)*.
- Minambiente, UK PACT, IDEAM, & WWF Colombia. (2021). *GUÍA PARA LA ACTUALIZACIÓN DE INVENTARIOS DE EMISIONES DE GEI EN CIUDADES COLOMBIANAS*. [www.wwf.org.co](http://www.wwf.org.co)
- NASA. (2021). *Methane, CO2 Detection Satellite / Greenhouse Gas / Carbon Mapper*. <https://carbonmapper.org/>
- Pan, G., Xu, Y., & Ma, J. (2021). The potential of CO2 satellite monitoring for climate governance: A review. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 277). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111423>
- Pizarro Gariazzo, R. (2021). *Sistemas de instrumentos de fijación de precios del carbono en América Latina y jurisdicciones de las Américas relevantes*. [www.cepal.org/apps](http://www.cepal.org/apps)
- Sander, S. P., & Zeng, Z.-C. (2021). *Quantifying Trends in Methane Emissions in the Los Angeles Basin Using Remote Sensing Spectroscopy at CLARS*. <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2021-07/17RD030.pdf>
- Saynes Santillán, V., Etchevers Barra, J. D., Paz Pellat, F., & Alvarado Cárdenas, L. O. (2016). *EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN SISTEMAS AGRÍCOLAS DE MÉXICO*.

- Shi, T., Han, Z., Gong, W., Ma, X., & Han, G. (2021). High-precision methodology for quantifying gas point source emission. *Journal of Cleaner Production*, 320. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128672>
- Tarazona, D. (2022, September 30). *En Colombia se han presentado 2133 incidentes y derrames de hidrocarburos entre 2015 y junio de 2022*. <https://es.mongabay.com/2022/09/cuantos-incidentes-y-derrames-de-petroleo-se-han-presentado-en-colombia/>
- Varon, D. J., Jacob, D. J., McKeever, J., Jervis, D., Durak, B. O. A., Xia, Y., & Huang, Y. (2018). Quantifying methane point sources from fine-scale satellite observations of atmospheric methane plumes. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(10), 5673–5686. <https://doi.org/10.5194/amt-11-5673-2018>
- Zhang, S., Ma, J., Zhang, X., & Guo, C. (2023). Atmospheric remote sensing for anthropogenic methane emissions: Applications and research opportunities. In *Science of the Total Environment* (Vol. 893). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164701>
- Zhang, T., Zhang, W., Yang, R., Liu, Y., & Jafari, M. (2021). CO2 capture and storage monitoring based on remote sensing techniques: A review. *Journal of Cleaner Production*, 281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124409>
- Zhao, S., Liu, M., Tao, M., Zhou, W., Lu, X., Xiong, Y., Li, F., & Wang, Q. (2023). The role of satellite remote sensing in mitigating and adapting to global climate change. In *Science of the Total Environment* (Vol. 904). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166820>