



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**CÁLCULO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO PRODUCIDAS POR EL
TRANSPORTE PÚBLICO MUNICIPAL EN EL AÑO 2021 EN EL MUNICIPIO DE
GUATEMALA BASADOS EN CÁLCULO TEÓRICO UTILIZANDO LAS ECUACIONES DEL
IPCC**

Eliette Saraí Pérez Neal

Asesorado por el Ing. Carlos Vinicio Godínez Miranda

Guatemala, enero de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CÁLCULO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO PRODUCIDAS POR EL
TRANSPORTE PÚBLICO MUNICIPAL EN EL AÑO 2021 EN EL MUNICIPIO DE
GUATEMALA BASADOS EN CÁLCULO TEÓRICO UTILIZANDO LAS ECUACIONES DEL
IPCC**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ELIETTE SARAÍ PÉREZ NEAL

ASESORADO POR EL ING. CARLOS VINICIO GODÍNEZ MIRANDA

AL CONFERIRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA AMBIENTAL

GUATEMALA, ENERO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADORA	Inga. Ingrid Lorena Benítez Pacheco
EXAMINADOR	Ing. Pablo César Aníbal Saravia Solares
EXAMINADOR	Ing. Carlos Vinicio Godínez Miranda
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**CÁLCULO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO PRODUCIDAS POR EL
TRANSPORTE PÚBLICO MUNICIPAL EN EL AÑO 2021 EN EL MUNICIPIO DE
GUATEMALA BASADOS EN CÁLCULO TEÓRICO UTILIZANDO LAS ECUACIONES DEL
IPCC**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha agosto de 2020.

Eliette Saraí Pérez Neal

Guatemala 03 de octubre 2022

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final del trabajo de graduación titulado: "CÁLCULO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO PRODUCIDAS POR EL TRANSPORTE PÚBLICO MUNICIPAL EN EL AÑO 2021 EN EL MUNICIPIO DE GUATEMALA BASADOS EN CÁLCULO TEÓRICO UTILIZANDO LAS ECUACIONES DEL IPCC", elaborado por la estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, Eliette Saraí Pérez Neal, quien se identifica con el registro académico 2015-04216 y con el CUI 2759 09727 0101.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,



CARLOS VINICIO GODÍNEZ MIRANDA
Ingeniero Agrónomo
Colegiado 2,212

Ing. Carlos Vinicio Godínez Miranda
ASESOR
Ing. Agrónomo
Colegiado Activo no. 2212



Guatemala, 05 de octubre de 2022.
Ref. EIQ.TG-IF.027.2022.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **028-2019**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Eliette Saraí Pérez Neal**.
Identificado con número de carné: **2759097270101**.
Identificado con registro académico: **201504216**.
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Ambiental**.
En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**CÁLCULO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO
PRODUCIDAS POR EL TRANSPORTE PÚBLICO MUNICIPAL EN
EL AÑO 2021 EN EL MUNICIPIO DE GUATEMALA BASADOS EN
CÁLCULO TEÓRICO UTILIZANDO LAS ECUACIONES DEL IPCC**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Carlos Vinicio Godínez Miranda, profesional de la Ingeniería Agronómica

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"



Carlos Salvador Wong Davi
profesional de la Ingeniería Química
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación

C.c.: archivo

Ing. Carlos Salvador Wong Davi
COLEGIADO. NO. 561





LNG.DIRECTOR.013.EIQ.2023

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área y aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **CÁLCULO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO PRODUCIDAS POR EL TRANSPORTE PÚBLICO MUNICIPAL EN EL AÑO 2021 EN EL MUNICIPIO DE GUATEMALA BASADOS EN CÁLCULO TEÓRICO UTILIZANDO LAS ECUACIONES DEL IPCC**, presentado por: **Eliette Saraí Pérez Neal**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“Id y Enseñad a Todos”



Ing. William G. Álvarez Mejía: M.I.Q., M.U.I.E.
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química

Guatemala, enero de 2023.

LNG.DECANATO.OI.017.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **CÁLCULO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO PRODUCIDAS POR EL TRANSPORTE PÚBLICO MUNICIPAL EN EL AÑO 2021 EN EL MUNICIPIO DE GUATEMALA BASADOS EN CÁLCULO TEÓRICO UTILIZANDO LAS ECUACIONES DEL IPCC**, presentado por: **Eliette Saraí Pérez Neal**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana



Guatemala, enero de 2023

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por su amor, fortaleza y sabiduría, por bendecirme y guiarme a lo largo de mi vida y permitirme haber alcanzado esta meta.
- Mi mamá** Yiasmine Neal. Por su amor incondicional, comprensión y apoyo, por sus ánimos a lo largo de la carrera y por ser mi ejemplo de lucha y perseverancia.
- Mi papá** Samuel Pérez. Por apoyarme y ser un gran pilar en cada etapa de mi vida, por sus consejos, su amor incondicional y motivarme a culminar esta meta.
- Mi hermano** Samuel A. Pérez. Por su amor y ser un apoyo en mi vida, por compartir grandes momentos y alentarme a seguir adelante.
- Mi familia** Por su cariño y apoyo. Especialmente a mi tía Loren, por apoyarme en todo momento.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios y prepararme académicamente.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme las herramientas necesarias y por todos los conocimientos adquiridos para afrontar los retos profesionales.
Mis amigos	Rodolfo Gómez, Edilzar Juárez, Mónica Mejía, Jackeline Toc, Víctor Gómez, Lucía León, Ana Sanchez, Daniel Jerónimo, Violeta Moreno y Edwin Rivera. Por su apoyo, por todos los momentos y alegrías que compartimos. Por crecer juntos profesionalmente y acompañarme a lo largo de la carrera.
Mi asesor	Ing. Agr. Carlos Vinicio Godínez, por su tiempo y los conocimientos brindados, así como por su apoyo para la elaboración de esta investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO.....	XIII
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS	XIX
HIPÓTESIS	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
1. ANTECEDENTES	1
2. JUSTIFICACIÓN	7
3. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA.....	11
3.1. Definición	11
3.2. Delimitación	12
4. MARCO TEÓRICO.....	13
4.1. Atmósfera	13
4.2. Características y composición de la atmósfera	16
4.2.1. Densidad.....	16
4.2.2. Color	16
4.2.3. Temperatura	17
4.2.4. Presión.....	17
4.3. Capas de la atmósfera	18
4.3.1. Tropósfera	19

4.3.2.	Estratósfera	20
4.3.3.	Mesósfera.....	20
4.3.4.	Termósfera	21
4.3.5.	Exosfera	21
4.4.	Aire.....	21
4.4.1.	Composición del aire	22
4.5.	Contaminación atmosférica	23
4.5.1.	Contaminantes primarios.....	24
4.5.1.1.	Dióxido de azufre (SO ₂).....	24
4.5.1.2.	Dióxido de nitrógeno (NO ₂).....	25
4.5.1.3.	Dióxido de carbono (CO ₂).....	26
4.5.1.4.	Monóxido de nitrógeno (NO).....	26
4.5.1.5.	Monóxido de carbono (CO).....	27
4.5.1.6.	Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)	28
4.5.1.7.	Partículas.....	28
4.5.2.	Contaminantes secundarios	30
4.5.2.1.	Ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄).....	30
4.5.2.2.	Ácido nítrico (NO ₄).....	30
4.5.2.3.	Ozono (O ₃)	31
4.5.2.4.	Metano (CH ₄).....	31
4.6.	Efecto invernadero	33
4.6.1.	Gases de efecto invernadero.....	34
4.6.1.1.	Gases de efecto invernadero directos..	34
4.6.1.2.	Gases de efecto invernadero indirectos.	35
4.6.2.	Efecto de las actividades humanas con los GEI	36
4.7.	Calidad del aire	37
4.7.1.	Guías de calidad del aire	38

4.7.2.	Índice de calidad del aire	40
4.7.3.	Calidad del aire en Guatemala	41
4.7.4.	Principales contaminantes atmosféricos en Guatemala	43
4.8.	Consecuencias de la contaminación atmosférica	45
4.8.1.	Calentamiento global	45
4.8.2.	Cambio climático.....	46
4.8.3.	Enfermedades crónicas	48
4.8.3.1.	Acciones ante el cambio climático en Guatemala	51
4.9.	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMUCC)	55
4.10.	Protocolo de Kioto.....	57
4.11.	Acuerdo de Paris	58
4.12.	Transmetro	62
4.13.	Combustibles	64
4.13.1.	Diésel.....	64
4.13.2.	Gasolina.....	66
4.14.	Metodología para el cálculo de emisiones de gases directos de efecto invernadero	67
4.14.1.	Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)	68
5.	DISEÑO METODOLÓGICO	71
5.1.	Variables.....	71
5.1.1.	Variables independientes	71
5.1.2.	Variables dependientes.....	71
5.2.	Delimitación de campo de estudio.....	71
5.3.	Recursos humanos disponibles	72

5.4.	Recursos materiales disponibles	72
5.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa	72
5.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	73
5.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	73
5.7.1.	Cálculo del dióxido de carbono (CO ₂).....	73
5.7.1.1.	Combustible vendido	74
5.7.2.	Cálculo del metano (CH ₄) y óxido nitroso (N ₂ O)	75
5.7.2.1.	Distancia recorrida.....	76
5.7.2.2.	Emisión durante la fase de calentamiento	76
5.7.2.3.	Emisiones de CO _{2eq}	77
5.7.3.	Tablas de datos.....	77
5.8.	Métodos y modelos de los datos según tipo de variables	81
5.9.	Programas utilizados para análisis de datos.....	81
6.	RESULTADOS	83
6.1.	Emisiones mensuales de CO ₂ producidas por el Transmetro ..	83
6.2.	Emisiones de CO ₂ por cada línea del Transmetro	84
6.3.	Emisiones mensuales de CH ₄ producidas por el Transmetro...	85
6.4.	Emisiones de CH ₄ por cada línea del Transmetro.....	87
6.5.	Emisiones mensuales de N ₂ O producidas por el Transmetro ..	88
6.6.	Emisiones de N ₂ O por cada línea del Transmetro	90
6.7.	Emisiones totales mensuales por el Transmetro	91
6.8.	Emisiones totales mensuales de CO _{2eq} por el Transmetro	93
6.9.	Emisiones totales por cada línea del Transmetro	95
6.10.	Emisiones totales de CO _{2eq} por cada línea del Transmetro	96
6.11.	Emisiones mensuales de CO _{2eq} producidas por el Transmetro con otro tipo de combustible.....	98

7. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	101
CONCLUSIONES	105
RECOMENDACIONES.....	107
BIBLIOGRAFÍA.....	109
APÉNDICES	115
ANEXO	131

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Atmósfera terrestre.....	18
2.	Capas de la atmósfera	19
3.	Contaminantes primarios y secundarios.....	32
4.	Efecto invernadero	35
5.	Mapa de cambio climático	48
6.	Mapa del área de cobertura de Transmetro	62
7.	Proyección de demanda de diésel para el sector del transporte en Guatemala	65
8.	Proyección de demanda de gasolina para el sector del transporte en Guatemala	67
9.	Toneladas de CO ₂ emitidas mensualmente por el Transmetro en el año 2021	84
10.	Toneladas de CO ₂ emitidas por cada línea del Transmetro.....	85
11.	Gráfica de toneladas de CH ₄ emitidas mensualmente por el Transmetro en el año 2021	86
12.	Toneladas de CH ₄ emitidas por cada línea del Transmetro.....	88
13.	Toneladas de N ₂ O emitidas mensualmente por el Transmetro en el año 2021	89
14.	Gráfica de toneladas de N ₂ O emitidas por cada línea del Transmetro.....	91
15.	Toneladas totales emitidas mensualmente por el Transmetro en el año 2021	93

16.	Gráfica de las toneladas totales de CO _{2eq} emitidas por el Transmetro en el año 2021	94
17.	Gráfica de las toneladas de GEI totales emitidas por las líneas del Transmetro	96
18.	Gráfica de toneladas totales de CO _{2eq} emitidas por cada línea del Transmetro	97
19.	Comparación de emisiones de CO _{2eq} mensualmente en el año 2021	99

TABLAS

I.	Categorías de cambios de clima y sus predicciones	36
II.	Cantidad de CO ₂ introducido en el sistema de la tierra y subsistemas debido a actividades humanas y también por fenómenos naturales	37
III.	Índice de calidad del aire	40
IV.	Parámetros de medición para calidad el aire según la OMS.....	44
V.	Opciones de reducción de emisiones en energía	52
VI.	Emisiones y absorciones de GEI de Guatemala	54
VII.	Informes de investigación del IPCC	70
VIII.	Combustible vendido	77
IX.	Unidades de Transmetro por línea.....	78
X.	Distancia recorrida por línea	78
XI.	Potencial de calentamiento mundial a 100 años relacionados con el CO ₂	78
XII.	Factores de emisión de CO ₂ por defecto del transporte terrestre y rango de incertidumbre	79
XIII.	Factores de emisión de CH ₄ y N ₂ O del transporte terrestre y rangos de incertidumbre	79
XIV.	Factores de emisión para los vehículos diésel y gasolina europeos (mg/km) modelo Copert IV	80

XV.	Factores de emisión para los vehículos diésel y gasolina europeos (mg/km) modelo Copert IV	80
XVI.	Toneladas de CO ₂ emitidas mensualmente por el Transmetro en el año 2021	83
XVII.	Toneladas de CO ₂ emitidas por cada línea del Transmetro	84
XVIII.	Toneladas de CH ₄ emitidas mensualmente por el Transmetro en el año 2021	86
XIX.	Toneladas de CH ₄ por cada línea del Transmetro ordenada de menor a mayor	87
XX.	Toneladas de N ₂ O emitidas mensualmente por el Transmetro en el año 2021	89
XXI.	Toneladas de N ₂ O emitidas por cada línea del Transmetro ordenada de menor a mayor	90
XXII.	Toneladas totales emitidas mensualmente por el Transmetro en el año 2021	92
XXIII.	Toneladas totales de CO _{2eq} emitidas mensualmente por el Transmetro en el año 2021	94
XXIV.	Toneladas totales de GEI emitidas por cada línea del Transmetro.....	95
XXV.	Toneladas totales de CO _{2eq} emitidas por cada línea del Transmetro.....	97
XXVI.	Toneladas de CO _{2eq} emitidas mensualmente con combustible gasolina en el año 2021	98

x

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
CO₂	Dióxido de carbono
CO_{2eq}	Dióxido de carbono equivalente
KRV	Distancia recorrida
FE	Factor de emisión
Gal	Galón
Gg	Giga-gramos
GEI	Gases de efecto invernadero
Kg	Kilogramo
Km	Kilómetro
NH₄	Metano
mg	Miligramo
N₂O	Óxido nitroso
PCG	Potencial de Calentamiento Global
TJ	Terajulio
Ton	Toneladas

GLOSARIO

Adaptación	Es el ajuste en los sistemas naturales y humanos que se presenta como respuesta a cambios climáticos actuales o futuros y sus efectos, el cual disminuye los daños o potencia las oportunidades de intervención.
Antropogénico	Resultante de la actividad de los seres humanos o producto de esta.
Calentamiento global	Aumento en la temperatura del planeta como resultado, entre otros factores, del incremento de gases de efecto invernadero en la atmósfera.
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
Combustible diésel	Es un hidrocarburo líquido compuesto fundamentalmente por parafinas y utilizado principalmente como combustible en calefacción y en motores de encendido por compresión.
Combustión	Proceso mediante el cual se produce la quema de cualquier sustancia, ya sea gaseosa, líquida o sólida. En este proceso el combustible se oxida y desprende calor y, con frecuencia, luz.

Contaminación atmosférica	Degradación de la calidad del aire que tiene efectos negativos para la salud humana o el entorno natural o edificado, debido a la introducción en la atmósfera de procesos naturales o actividades humanas, de sustancias (gases, aerosoles) que conlleven efectos nocivos directos (contaminantes primarios) o indirectos (contaminantes secundarios).
Contaminante	Sustancia que produce contaminación en el recurso en el que es vertida o emitida.
Emisión	Es la descarga continua o discontinua en la atmósfera de materias, sustancias o formas de energía procedentes, directa o indirectamente, de cualquier fuente susceptible de producir contaminación atmosférica.
Emisión de dióxido de carbono equivalente (CO_{2eq})	Cuantía de emisión de dióxido de carbono que causaría el mismo forzamiento radiactivo integrado o cambio de temperatura, en un plazo de tiempo dado, que cierta cantidad emitida de un gas de efecto invernadero o de una mezcla de gases de efecto invernadero.
Fuentes fijas	Es la fuente de emisión que se encuentra en un determinado lugar incluso cuando la descarga de contaminantes sea de forma dispersa.

Fuentes móviles	Se refiere a las emisiones producidas por todos los medios de transporte con motores de combustión.
Gases de efecto invernadero	Componente gaseoso de la atmósfera, natural o antropógeno, que absorbe y emite radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación terrestre emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera y por las nubes.
Hidrocarburo	Compuesto formado de los elementos carbono e hidrógeno, cualquiera que sea su estado físico.
IPCC	Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Es el órgano internacional encargado de evaluar los conocimientos científicos relativos al cambio climático.
INSIVUMEH	Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología.
Mitigación	Actividades que limitan las emisiones GEI y/o aumentan la captura de carbono en sumideros, con la intención de disminuir o prevenir los impactos climáticos futuros en la sociedad.
Potencial de calentamiento global	La medida en la que un gas de efecto invernadero contribuye al calentamiento global. Para hacer comparables los efectos de los diferentes gases, expresa el potencial de calentamiento de un gas en

comparación con el que posee el mismo volumen de CO₂ durante el mismo periodo de tiempo.

Resiliencia

Capacidad de los sistemas sociales, económicos y ambientales de afrontar un suceso, tendencia o perturbación peligrosa, respondiendo o reorganizándose de modo que mantengan su función esencial, su identidad y su estructura, y conservando al mismo tiempo la capacidad de adaptación, aprendizaje y transformación.

Variabilidad climática

Se refiere a variaciones en las condiciones climáticas medias y otras estadísticas del clima, en todas las escalas temporales y espaciales que se extienden más allá de un fenómeno meteorológico en particular.

Vulnerabilidad

Medida en que un sistema es capaz o incapaz de afrontar los efectos negativos del cambio climático, incluso la variabilidad climática y los episodios extremos.

RESUMEN

El presente estudio consistió en realizar el cálculo de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera por las 7 rutas del transporte público municipal, Transmetro, en la ciudad de Guatemala, entre enero y diciembre de 2021. Las rutas que recorre el Transmetro son: la Línea 1 (Centro Histórico), Línea 2 (Hipódromo del Norte), Línea 6 (Norte), Línea 7 (USAC Periférico), Línea 12 (Centra Sur), Línea 13 (Eje Central) y Línea 18 (Nororiente).

Se determinó que los buses del Transmetro emiten dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O). Para esto se tomó en cuenta el tipo y la cantidad de combustible que usan los buses, la distancia recorrida y el tipo de vehículo, entre otros factores, utilizando el método propuesto por el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC o Panel Intergubernamental del Cambio Climático) en 2006, y las ecuaciones correspondientes. Esta metodología es utilizada internacionalmente para el cálculo de las emisiones de GEI.

Los resultados permiten afirmar que el Transmetro emitió en 2021 un total de 18 908,14 ton de $\text{CO}_{2\text{eq}}$, correspondiendo el 98,33 % al CO_2 con 18 592,08 Ton/año; el 1,54 % al N_2O con 291,60 Ton/año; y el 0,13 % al CH_4 con 24,46 Ton/año. De las siete líneas analizadas, la Línea 12 (Centra Sur) es la que emite la mayor cantidad de GEI, correspondiéndole el 34,52 % del total de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ del cual el 97,35 % es CO_2 , el 1,78 % es N_2O y 0,87 % es CH_4 . El mes que representa la mayor emisión de GEI es el mes de julio con un total de 1 876,90 ton de $\text{CO}_{2\text{eq}}$. En comparación de combustibles, la gasolina emite menos toneladas totales de GEI, pero mayores toneladas de metano que el diésel.

OBJETIVOS

General

Calcular las emisiones directas de gases de efecto invernadero (GEI) producidas en las siete líneas del Transmetro, transporte público municipal de la ciudad de Guatemala, con base en cálculo teórico, utilizando las ecuaciones del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), en el año 2021 y considerando estándares ideales en el estado y mantenimiento del transporte.

Específicos

1. Realizar un inventario de la estimación teórica de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, metano y óxido nitroso) producidos por las diferentes líneas del Transmetro en el año 2021.
2. Identificar con base en cálculos teóricos las líneas de Transmetro con mayor volumen de gases de efecto invernadero producido en el mismo año.
3. Identificar los meses con mayor emisión y con menor emisión de GEI producidos por el Transmetro en el año 2021, con base en el consumo teórico.
4. Estimar la cantidad total de CO_{2eq} de los GEI producidos por el Transmetro durante el año 2021 empleando datos teóricos.

HIPÓTESIS

El combustible que se utiliza en las unidades de las diferentes líneas del Transmetro es un factor determinante en el incremento o decrecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Hipótesis nula:

El combustible que se utiliza en las unidades de las diferentes líneas del Transmetro no es un factor determinante en el incremento o decrecimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero.

INTRODUCCIÓN

Los fenómenos naturales asociados con la atmósfera, tales como sequías, el calentamiento global, las inundaciones, los huracanes y ciclones, son cada vez más frecuentes y extremos en todo el mundo. El incremento en la fuerza destructiva de estos fenómenos atmosféricos se ha asociado con el calentamiento global de la tropósfera, atribuido a un incremento desmedido de los gases de efecto invernadero, provenientes de la combustión de hidrocarburos en motores de combustión interna instalados en fábricas y vehículos motorizados, avance tecnológico obtenido en los países industrializados a mediados del siglo XIX. A este incremento de la temperatura de la tropósfera se le atribuye el cambio climático, un efecto secundario que se manifiesta a través de olas de calor o de frío extremas en regiones del planeta que no las experimentaban antes; el incremento de las zonas desérticas o áridas; la aparición de huracanes, tifones y ciclones más violentos, destructivos y más extensos y frecuentes, así como la ocurrencia de largos períodos de sequía o de lluvias torrenciales. Los estudios más recientes indican que los países más vulnerables al cambio climático son Japón, Filipinas y Alemania. Si bien Guatemala no se encuentra entre los primeros diez lugares, sí se ubica entre el rango de los veinte países más vulnerables en todo el mundo.

El efecto invernadero es un fenómeno natural que ocurre en la tropósfera, la capa más baja de la atmósfera, que ayuda a mantener estable la temperatura global en el planeta Tierra, impidiendo que durante la transición de la noche al día se congelen las regiones del planeta no expuestas al Sol. Este fenómeno beneficioso ha permitido el desarrollo exitoso de las diferentes formas de vida en el planeta. El efecto invernadero es producido por diferentes gases, presentes

en forma natural en la atmósfera, siendo los principales el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O), el ozono estratosférico (O_3) y el vapor de agua. Durante millones de años estos gases conservaron sus concentraciones en la atmósfera, con una tendencia natural a la reducción de carbono, debido a su captura y fijación por los organismos fotosintéticos. Esta reducción de carbono se tradujo en un enfriamiento gradual de la Tierra, pasando de un clima tropical global a un clima más templado y frío. Sin embargo, a partir de la Revolución Industrial a mediados del siglo XIX, con la invención del motor de combustión interna que funciona con la quema de hidrocarburos, se incrementó la producción no natural de CO_2 , N_2O , CH_4 , además de compuestos orgánicos volátiles (COV), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrato (NO_x) y la formación temporal de ozono en la troposfera.

La emisión de estos gases provenientes de actividades antropogénicas durante muchos años no tuvo ningún control ni regulación, incrementándose sobre todo en los países industrializados del hemisferio norte y posteriormente en Asia. Los científicos afirman que, de continuar aumentando las emisiones de gases de efecto invernadero, la temperatura media de la superficie global va a aumentar algunos grados Celsius para el futuro. Según los informes del IPCC, el aumento promedio de los últimos 50 años es de $0,13\text{ }^\circ\text{C}$ por década.

En Guatemala las fuentes móviles son una de las causas principales de la emisión de gases de efecto invernadero, tanto por la circulación de vehículos particulares y motocicletas, como por el transporte público y transporte pesado, sobre todo en la ciudad de Guatemala y centros urbanos del interior del país. No existe un control por parte de las autoridades municipales sobre la edad o antigüedad de los buses urbanos, transporte pesado, ni de automóviles que transitan en la ciudad, lo cual redundará en una mayor cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero.

En los últimos años la circulación de vehículos particulares ha aumentado, pues muchos habitantes del municipio de Guatemala y municipios aledaños han optado por adquirir un vehículo propio para desplazarse. Sin embargo, el sector de la población que sigue haciendo uso del transporte público sigue siendo una gran mayoría. A principios del siglo XXI el transporte público se encontraba en decadencia, con empresas particulares que poseían flotas de buses viejos e inseguros. Los asaltos, extorsiones y asesinatos en las unidades desbordaban la capacidad de respuesta de las fuerzas del orden público.

En 2007, la Municipalidad de Guatemala lanzó el Transmetro, empresa municipal de transporte público con vías, paradas y centros de pago exclusivos, poniendo al servicio de la ciudadanía buses modernos, tanto simples como articulados, similar a los modelos de transporte de la ciudad de Bogotá en Colombia y al Metrobús de Quito, Ecuador. Consta de siete líneas, las cuales son seguras y no sufren del flagelo de la extorsión. El Transmetro contribuye a que se puedan movilizar grandes cantidades de guatemaltecos y reduce el uso del automóvil por parte de las personas que utilizan este servicio.

Sin embargo, como cualquier vehículo que tiene motor de combustión interna, los buses de Transmetro son emisores de gases de efecto invernadero, y a la fecha no se ha realizado ningún estudio a nivel de campo para realizar el inventario de gases de efecto invernadero para conocer el volumen de emisión de CO₂, CH₄ y N₂O para cada línea de Transmetro, y así analizar el impacto ante la sociedad y el ambiente para proponer soluciones viables y mejorar la calidad de vida de la población. Para el cálculo de estas emisiones se utilizó el método descrito en la sección 6 y se representan de manera gráfica los resultados obtenidos.

Contar con los resultados de la estimación de los GEI emitidos por el Transmetro ayuda a tener una línea de base sobre el aporte de esta empresa municipal de transporte a la emisión GEI en el sector de energía. Esta línea de base aportará nueva información a los inventarios nacionales de GEI realizados por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.

1. ANTECEDENTES

El cambio climático es uno de los mayores desafíos en este tiempo, el aumento de la emisión de los gases de efecto invernadero provoca la variabilidad climática, que es una de las consecuencias más evidentes en Guatemala. Cada vez es más difícil predecir el inicio y finalización de la época lluviosa y de la época seca y son más drásticos los cambios en la intensidad, duración y frecuencia de la precipitación. Esto amenaza la producción de alimentos, poniendo en riesgo la seguridad alimentaria a nivel nacional, la pérdida de ecosistemas y el aumento de las enfermedades respiratorias e intestinales.

Según el boletín de la Organización Meteorológica Mundial: “El rápido aumento de los niveles atmosféricos de CO₂ y otros gases de efecto invernadero (GEI) podría provocar cambios impredecibles en los sistemas climáticos, a causa de una fuerte retroacción positiva, lo que conllevaría graves perturbaciones ecológicas y económicas”¹.

Como parte del cumplimiento de la *Constitución Política de la República de Guatemala*, el Artículo 97: Medio Ambiente y Equilibrio Ecológico, en su parte B menciona: “se dictarán todas las normas necesarias para garantizar que la utilización y el aprovechamiento de la fauna, de la flora, de la tierra y del agua, se realicen racionalmente, evitando su depredación”², y en cumplimiento de tratados internacionales, Guatemala en 1995 ratificó el Convenio Marco de las

¹ Organización Meteorológica Mundial. *Boletín de la OMM sobre los gases de efecto invernadero*. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4024. Consulta: 29 de abril de 2019.

² Asamblea Nacional Constituyente. *Constitución Política de la República de Guatemala. Artículo 97*.

Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), con el objetivo de reducir las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, y ratificó cada uno de los protocolos y acuerdos establecidos por el CMNUCC para su cumplimiento.

En el Informe del Estado de Guatemala sobre los derechos humanos y el cambio climático se especificó que, de acuerdo con la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL): “se estima que Centroamérica produce menos del 0,5 % del carbono del planeta, sin embargo, es una de las regiones más vulnerables ante los embates del cambio climático mundial”³.

En Guatemala se han elaborado cuatro Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero (INVGEI) en los años 1990, 1994, 2000 y 2005. Según la *Segunda comunicación nacional sobre cambio climático Guatemala*, de los resultados obtenidos de los INVGEI se determinó que el principal GEI emitido es el CO₂, seguido por el N₂O y en menor cantidad el CH₄, que corresponde a actividades del sector de energía principalmente, en donde se incluyó en primer lugar actividades de transporte, segundo la quema de combustibles en la industria energética y en tercer lugar el consumo de energía en las actividades comerciales, institucionales y residenciales. Las emisiones se calcularon en “10 222,64 Gg en 1994, 10 426,67 Gg en 2000 y 12 166,18 Gg de dióxido de carbono equivalente (CO₂-eq) en 2005”⁴. Es decir, las emisiones se han incrementado en los últimos años.

³ Comisión Presidencial Coordinadora de la Política del Ejecutivo en materia de Derechos Humanos. *Informe del Estado de Guatemala Resolución 7/23 del Consejo de Derechos Humanos: Los derechos humanos y el cambio climático*. <https://www.ohchr.org/sites/default/files/Documents/Issues/ClimateChange/Submissions/Guatemala.pdf>. Consulta: 29 de abril de 2019.

⁴ Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Segunda comunicación nacional sobre cambio climático Guatemala*. p. 10.

En el 2015 se realizó un informe titulado *Fuentes móviles en ruta de Guatemala y los gases de efecto invernadero, año base 2013 (una perspectiva y una aproximación)*. En este informe se realizó el cálculo de emisiones de fuentes móviles en ruta para 6 subcategorías: motocicleta, automóviles, camionetas, microbuses, buses y camiones, con la metodología del Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE), en donde se toma en cuenta las clasificaciones de las fuentes móviles en ruta como el combustible que utiliza, tamaño, tecnología de diseño del motor, estándares de emisiones americanas y europeas.⁵

Este modelo para la estimación de emisiones toma en cuenta la distancia recorrida de la fuente móvil en ruta y no el consumo de combustible, se asumió también una velocidad a 50 km/h como recorrido medio. Los resultados demuestran que para el año 2013 se tuvo una emisión de 10 763 298 toneladas métricas de CO₂, 17 790 toneladas métricas de CH₄ y 67 toneladas métricas de N₂O, teniendo un aumento con respecto al año base 2011 de CO₂ de 1 648 millones de toneladas métricas. Para el año 2013 las emisiones de CO₂ representan más del 99 % de las emisiones estimadas y las emisiones de CH₄ y N₂O fueron en pequeñas proporciones.

En 2013 se realizó un informe titulado *Estrategias de Mitigación y Métodos para la Estimación de las Emisiones de Gases Efecto Invernadero en el Sector Transporte*, en el cual se presentan 11 estrategias de transporte con 39 medidas innovadoras para la reducción de emisiones de GEI e incluye soluciones para el transporte de carga y de pasajeros, así como los impactos de la reducción de las emisiones de GEI. Sugiere el cálculo de las emisiones de CO₂ mediante la

⁵ PERÉZ ZAMORA, Abelardo. *Fuentes móviles en ruta de Guatemala y los gases de efecto invernadero, año base 2013 (una perspectiva y una aproximación)*. p. 1-6.

multiplicación de la cantidad de combustible consumido por un factor que es la relación de los pesos moleculares del CO₂ con respecto al carbono.⁶

También en 2018 se publicó un artículo científico titulado *Cálculo de la línea base de las emisiones de gases de efecto invernadero y proyecciones a futuro para el sector transporte en el estado de Veracruz, México*, que presenta el cálculo de la línea base de las toneladas de CO₂ del periodo 2010 al 2026 utilizando el modelo *Long-range Energy Alternatives Planning system (LEAP)*, con el fin de que, sobre esta base, se reduzca más del 15 % de las emisiones de combustible para el año 2026. En la investigación se calcula el CO₂ por ser el gas de efecto invernadero más contribuyente en México en el sector de energía, se realiza el cálculo por tipo de transporte y por tipo de combustible, teniendo como resultado que en 2026 se tiene un crecimiento de 48 % de toneladas de CO₂ en comparación del año 2010.⁷

Ibáñez en 2014 realizó la investigación de tesis titulada *Estimación de Huella de Carbono en el Sector Transporte del Municipio Tenjo-Cundinamarca*, en esta investigación se utilizaron las directrices para inventarios de GEI del IPCC 2006, con el fin de obtener la estimación de huella de carbono en el sector del transporte en CO₂ equivalente para ese municipio, para poder implementar proyectos y acciones que permitan mitigar y/o compensar las emisiones de GEI. Las conclusiones de esta investigación indicaron que para el año base 2012 se emitieron 5 982,2 Ton de CO₂ equivalente de emisiones de alcance 1 y el mayor

⁶ RÍOS, Ramiro Alberto; ARANGO, Francisco; VICENTINI, Vera Lucia; ACEVEDO-DAUNAS, Rafael. *Estrategias de mitigación y métodos para la estimación de en el sector transporte emisiones de gases de efecto invernadero*. p. I.

⁷ MARTÍNEZ-RODRÍGUEZ, María Concepción; CAMPOS-VILLEGAS, Lorena Elizabeth; CASTILLO-MONROY, José Jesús. *Cálculo de la línea base de las emisiones de gases de efecto invernadero y proyecciones a futuro para el sector transporte en el estado de Veracruz, México*. https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/4123. Consulta: 28 de abril de 2019.

porcentaje en el sector del transporte corresponde al transporte intermunicipal con 47 %.⁸

Además, en el 2016 se publicó un artículo titulado *Estimación de las Emisiones de CO₂ desde la perspectiva de la demanda de transporte en Medellín*, en el cual emplearon los datos de la encuesta de movilidad cotidiana EOD2012. Se realizó la estimación para el CO₂ por ser el más representativo en las emisiones totales con un 78 %. En este estudio se analizaron las diferencias de las emisiones de dióxido de carbono entre dos áreas: el área metropolitana del Valle de Aburrá y al interior de la zona urbana de Medellín, ya que en cada una se tiene diferencias socioeconómicas y allí se generan la mayor cantidad de viajes. Se utilizó la metodología presentada en las directrices del IPCC 2006, teniendo como resultado que para el año 2012 se realizaron 5,6 millones de viajes al día, lo cual representa 3 545 633 kg de CO₂ diarios.⁹

⁸ IBÁÑEZ MONROY, Yeisson Fabian. *Estimación de huella de carbono en el sector transporte del municipio Tenjo – Cundinamarca*. p. 60.

⁹ RÍOS BEDOYA, Vanessa; MARQUET, Oriol; MIRALLES-GUASCH, Carme. *Estimación de las emisiones de CO₂ desde la perspectiva de la demanda de transporte en Medellín*. <https://www.redalyc.org/pdf/3330/333047931017.pdf>. Consulta: 28 de abril de 2019.

2. JUSTIFICACIÓN

Las concentraciones de gases de efecto invernadero en la parte baja de la atmósfera se han incrementado desde la revolución industrial, por el aumento de actividades industriales, especialmente por el uso de compuestos fósiles como fuente de energía, así como por el crecimiento de la población, actividades agrícolas y ganaderas y el aumento de la deforestación. Cuando los valores de concentración de los GEI son mayores a los que se encuentran normalmente en la atmósfera, se producen variaciones en la temperatura de la superficie terrestre, alterando el clima a lo largo del tiempo. A esto se le conoce como calentamiento global, el cual trae como consecuencia el cambio climático.

Guatemala es un país altamente vulnerable a los efectos del cambio climático, afectando no solo a los habitantes de las áreas urbanas, sino principalmente a los habitantes de las áreas rurales, ya que una gran parte de ellos basan su economía y medios de vida en la agricultura, especialmente de secano, dependiendo exclusivamente de la lluvia para regar sus cultivos. A esta vulnerabilidad se deben sumar las características geológicas y geomorfológicas del país, los altos índices de pobreza, el bajo desarrollo de la población, el manejo inadecuado de los recursos naturales y la falta de aplicación de los planes nacionales para la adaptación al cambio climático.

Según los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero (1990, 1994, 2000 y 2005), el gas más emitido en el país es el CO₂, que aporta más de dos terceras partes del total de emisiones. En el año 1990 la actividad de transporte representaba el 28,3 % del total de emisiones de CO₂, las emisiones de esta actividad han presentado un aumento en los inventarios de los años

posteriores, para el año 2005, según el resultado de emisiones totales de CO₂, representa el 47,60 %¹⁰ de estas emisiones, siendo la actividad de transporte una de las fuentes principales de emisión de GEI en Guatemala, esto se debe al incremento del parque vehicular, pues significa mayor consumo de combustible.

En la ciudad de Guatemala para mayo del 2021 se contabilizaban 4 millones 289 mil 623 vehículos en toda la república, circulando diariamente 1 millón 822 mil vehículos; esto representó el 43 % del parque vehicular del todo el país. El número de motocicletas fue aproximadamente de 1 millón 848 mil 623; automóviles 832 mil 169 y buses y microbuses 118 mil 301. Estas cifras van en aumento cada año, lo que significa que serán mayores las emisiones de GEI, principalmente del CO₂.¹¹

Para llevar a cabo el cumplimiento del convenio de París, que es mejorar la calidad de vida de la población y tener un control de las emisiones de las diferentes fuentes antropogénicas, es necesario identificar y cuantificar la cantidad de contaminantes emitidos por fuentes móviles en las ciudades. Se deben esbozar estrategias para disminuir la emisión de los gases de efecto invernadero, tanto en fuentes fijas como móviles. En el caso de las fuentes móviles, una forma de controlar las emisiones es mediante la disminución del uso de automóviles particulares, promoviendo el uso del transporte municipal, que se encargue de transportar una gran cantidad de personas, que tenga un servicio seguro, de calidad y que cubra diferentes rutas. En la ciudad de Guatemala se han tenido algunos avances en este sentido con la implementación del Transmetro, y está en proyecto la construcción de un aerómetro y un metroraíl.

Con el uso de la Guía de 1996 para Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero, se calculó el dióxido de carbono, el óxido nitroso y el metano producido por el Transmetro, tomando datos proporcionados por la municipalidad

¹⁰ Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Primera comunicación nacional sobre cambio climático*. p. 12.

¹¹ FLORES, Mauricio. *Sigue incrementándose el parque vehicular en Guatemala*. <https://transito.gob.gt/sigue-incrementandose-el-parque-vehicular-en-guatemala/>. Consulta: 28 de abril de 2019.

de Guatemala correspondientes a 2021. Esta información podrá ayudar a establecer planes para un manejo y control de gases emitidos por el Transmetro para tener un transporte más eficiente y amigable con el ambiente.

3. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

3.1. Definición

De acuerdo con los inventarios de gases de efecto invernadero realizados en Guatemala, en los últimos años la ciudad de Guatemala ha sufrido un incremento en la emisión de GEI, para el año 1994 representó un incremento de “146,7 % respecto al año 1990, para el periodo 2000 representó el 24 % de incremento respecto a 1994 y en el año 2005 representó un decremento del 9,1 %”¹² respecto al año 2000.

Esto se debe al aumento y concentración de industrias manufactureras (la tasa de crecimiento de este sector es entre 2 % y 3 %, esto de acuerdo con el Ministerio de Economía de Guatemala), el crecimiento del parque vehicular (se reporta un incremento de 4,50 % de finales de 2020 a mayo 2021) y el cambio de uso de suelos (para el periodo 2001-2010 se estimó que la pérdida de bosque fue de 1 millón 34 mil 622 hectáreas, principalmente por la transformación a tierras agrícolas y praderas), provocando variabilidad climática y daños en la salud de los guatemaltecos por la contaminación atmosférica. Aunque las emisiones de gases de efecto invernadero en Guatemala no son significativas a nivel mundial, el país es altamente vulnerable a los efectos del cambio climático.

En cumplimiento a lo establecido en el Acuerdo de París, Guatemala tiene como compromiso realizar acciones e implementar medidas de mitigación, adaptación y reducción de vulnerabilidad al cambio climático. De allí la

¹² Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Segunda comunicación nacional sobre cambio climático Guatemala*. p. 8.

importancia de realizar inventarios nacionales de gases de efecto invernadero que determinen las emisiones de cada sector.

En Guatemala se han realizado cuatro inventarios nacionales (1990, 1994, 2000 y 2005) en los que se incluye el sector de energía, que agrupa las emisiones provenientes de actividades energéticas fijas y móviles, pero aún no se cuenta con un inventario que determine la cantidad de gases emitidos por el transporte municipal, Transmetro. Por eso era necesario realizar la cuantificación de los principales gases de efecto invernadero emitidos por este transporte, para el aporte en la toma de acciones para la reducción y mitigación de los gases de efecto invernadero.

3.2. Delimitación

El estudio tuvo los siguientes alcances y límites:

- Geográfico: se realizó en las diferentes zonas que transita el Transmetro dentro de la Ciudad de Guatemala.
- Personal: técnicos de la Dirección de Medio Ambiente de la municipalidad de Guatemala.
- Temporal: se realizó durante los meses de enero a diciembre de 2021.
- Temático: los temas relevantes que se abordaron en esta investigación son: contaminantes atmosféricos, efecto invernadero, calidad del aire, cambio climático y el uso de la metodología de IPCC para el cálculo de los gases.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Atmósfera

La atmósfera terrestre es una capa compuesta de una mezcla de gases que envuelve toda la Tierra. Los principales gases que la forman son el “nitrógeno (78 %), el oxígeno (21 %), el argón (0,93 %), el dióxido de carbono (0,033 %)”¹³ y otros gases en menor proporción. En la atmósfera inferior se encuentran también partículas sólidas en suspensión, aerosoles, sales y material biológico y vapor de agua.

La atmósfera se formó aproximadamente hace 4 600 millones de años por los diferentes cambios que sufrió la Tierra. La formación de la atmósfera se puede dividir en cuatro etapas, la primera abarca los primeros 500 millones de años, cuando el planeta era geológicamente muy activo, produciendo una variedad de gases y formando una atmósfera primitiva extremadamente densa. Los gases que componían esta atmósfera eran: azufre, helio, hidrógeno, metano, óxidos de carbono y vapor de agua. Durante este tiempo la Tierra tenía poca gravedad, las moléculas no se podían retener y había un desprendimiento constante de los gases ligeros, ocasionando que la atmósfera se perdiera en el espacio.

La segunda etapa es alrededor de 4 mil millones de años, por un tiempo se estuvieron liberando nuevos gases y vapor de agua de las rocas que se formaron en la Tierra, la atmósfera cambió y había presencia de dióxido de carbono, monóxido de carbono, moléculas de agua, nitrógeno e hidrógeno que, junto con

¹³ GONZÁLEZ CÁRDENAS, Rubén. Formación y evolución de la atmósfera terrestre. http://www.cienciorama.unam.mx/a/pdf/66_cienciorama.pdf. Consulta: 28 de abril de 2019.

la disminución de la temperatura debajo de 100 °C, permitieron la formación de la hidrosfera. Durante los siguientes años, la condensación del vapor de agua ocasionó una precipitación constante, formando masas de agua ricas en ácido carbónico, esto causó la formación de rocas carbonatadas, provocando la disminución de dióxido de carbono en la atmósfera, sedimentándose en las masas de agua. En esta última parte del periodo había una atmósfera de carácter reductor, sin presencia de oxígeno libre y rica en gases como el amoníaco y el metano.

La tercera etapa se desarrolló hace aproximadamente 3 500 millones de años, con una atmósfera estable, cuerpos de agua y radiación solar, que permitieron condiciones favorables para la formación de organismos unicelulares que vivían dentro del agua, capaces de realizar fotosíntesis y con ello liberar oxígeno, causando la disminución de dióxido de carbono.

La atmósfera se enriqueció con oxígeno (O₂) y se fue distribuyendo en todas las capas de la atmósfera, pero en la llamada estratósfera se asentó una capa de oxígeno molecular. Durante el día, esta capa de O₂ es bombardeada por haces de radiación ultravioleta provenientes del sol, de frecuencia ultracorta, que son capaces de disociar las moléculas de O₂ en dos átomos de O, dando paso a la formación temporal de ozono (O+O₂=O₃). Con esta disociación los rayos ultravioletas son repelidos de vuelta al espacio exterior, impidiendo su ingreso a la Tierra. De esta manera, la capa de O₂ en la estratósfera cumple una función de escudo, protegiendo a los seres vivos de los rayos ultravioletas, permitiendo el desarrollo de la vida en la Tierra tal como la concebimos actualmente.

En la cuarta etapa continuaron las interacciones y formación de algunos gases en la atmósfera, creando las condiciones ideales para el desarrollo de organismos más grandes. Esta atmósfera es la que actualmente conocemos,

constituida por los gases formados en las diferentes etapas. Los gases se mantienen en movimiento por las corrientes de los vientos y las lluvias, permitiendo que los organismos vivos puedan respirar.

La atmósfera tiene diferentes funciones, entre las principales están:

- Regular la temperatura: gracias a la atmósfera la tierra puede mantener el calor, teniendo una temperatura constante durante el día y la noche, lo cual permite la vida en el planeta. La atmósfera deja pasar las radiaciones solares, pero impide la salida de las radiaciones que la superficie terrestre devuelve, calentándose el planeta Tierra.
- Dar vida: los gases que componen la atmósfera terrestre son indispensables para los seres vivos, entre los principales está el oxígeno que se utiliza para respirar y el dióxido de carbono para realizar el proceso de fotosíntesis por parte de las plantas. La atmósfera también se compone de algunos elementos como el agua, la luz y el viento, que también son importantes para cada una de las acciones anteriores.
- Brindar protección: la atmósfera actúa como escudo debido a los gases que la forman, absorbiendo las radiaciones perjudiciales provenientes del sol y permitiendo que pasen las necesarias con una menor intensidad, y al mismo tiempo protege a la Tierra de los cuerpos celestes, que al traspasar la atmósfera se incendian y se desintegran por la fricción con los gases que rodean la tierra.

4.2. Características y composición de la atmósfera

A continuación, se describen las características y propiedades de la atmósfera terrestre.

4.2.1. Densidad

La densidad de la atmósfera es menor a una mayor altura y el aire es más ligero, ya que la presión del aire disminuye en las capas más altas.

4.2.2. Color

Todos los gases de la atmósfera son incoloros, por ello la atmósfera como tal no tiene color. Sin embargo, en la estratósfera se lleva a cabo la dispersión de la luz a través del fenómeno de Rayleigh, esto se da cuando la radiación ultravioleta, al chocar con las moléculas de O₂, les transfiere energía, los átomos vibran y difunden la luz en todas direcciones, resaltando el color azul, dándole color al cielo.

Cada color tiene una longitud de onda y un ángulo distinto, a mayor longitud, mayor ángulo. El color rojo tiene longitud de onda más larga y el violeta más corta. Durante el día se ve azul, ya que los rayos llegan perpendicularmente, al atardecer o al amanecer los rayos solares realizan un mayor recorrido para llegar a la superficie terrestre, alcanzan la tierra de forma oblicua llegando solo los rojizos. Por la noche, al no recibir la radiación solar, no se da este proceso de difundir la luz, lo que permite ver el espacio exterior.

4.2.3. Temperatura

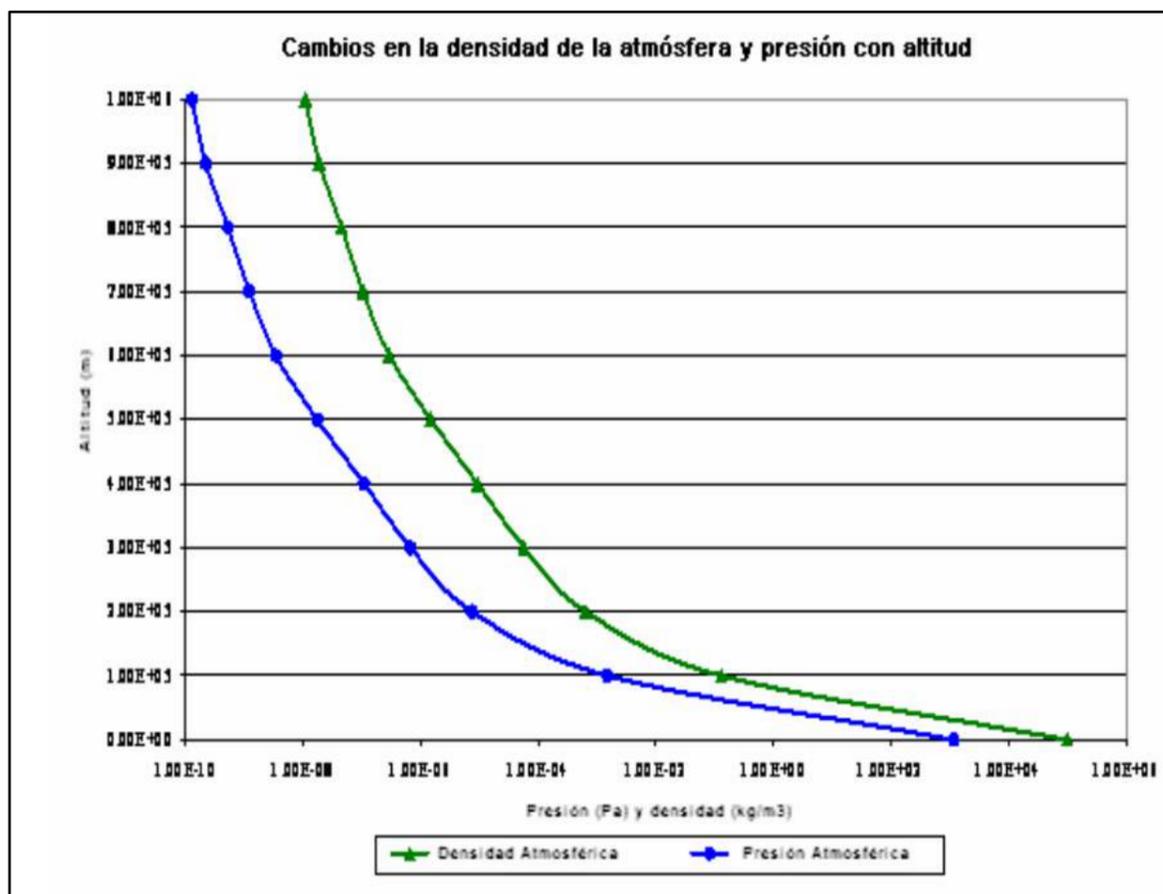
Conforme aumenta la altitud, la temperatura del aire disminuye, sin embargo, hay algunos gases que pueden absorber la radiación solar y transformarla en calor y es por eso que, en algunas partes altas de la atmósfera, la temperatura aumenta ayudando a diferenciar las distintas zonas de la misma, a esto se le conoce como inversión térmica. La temperatura atmosférica puede indicar la cantidad de energía calorífica que hay acumulada en el aire en un lugar y momento determinados.

4.2.4. Presión

La presión atmosférica es el peso de una masa de aire sobre la superficie terrestre, esto depende de la altura del lugar, ya que a mayor altura menor presión y, a menor altura, mayor presión. La gravedad que ejerce la Tierra sobre la capa atmosférica hace que la atmósfera tome una forma ovalada alrededor de la Tierra, siendo más ancha en el ecuador y angosta en el polo, debido a esto hay una mayor presión en los polos y menor en el ecuador.

Cuando se da una variación de estas características se producen los fenómenos atmosféricos. Por ejemplo, por el grado de inclinación de la tierra la radiación solar no calienta igual toda la superficie terrestre, teniendo diferentes temperaturas y presiones en las distintas zonas de la atmósfera, y para equilibrarlo se dan los movimientos de las masas de aire, a este movimiento se le conoce como flotabilidad, en donde la temperatura del aire se eleva cuando se aumenta la presión atmosférica y decrece cuando disminuye la presión. Esto produce los fenómenos de brisas, tornados, tormentas tropicales y huracanes.

Figura 1. **Atmósfera terrestre**

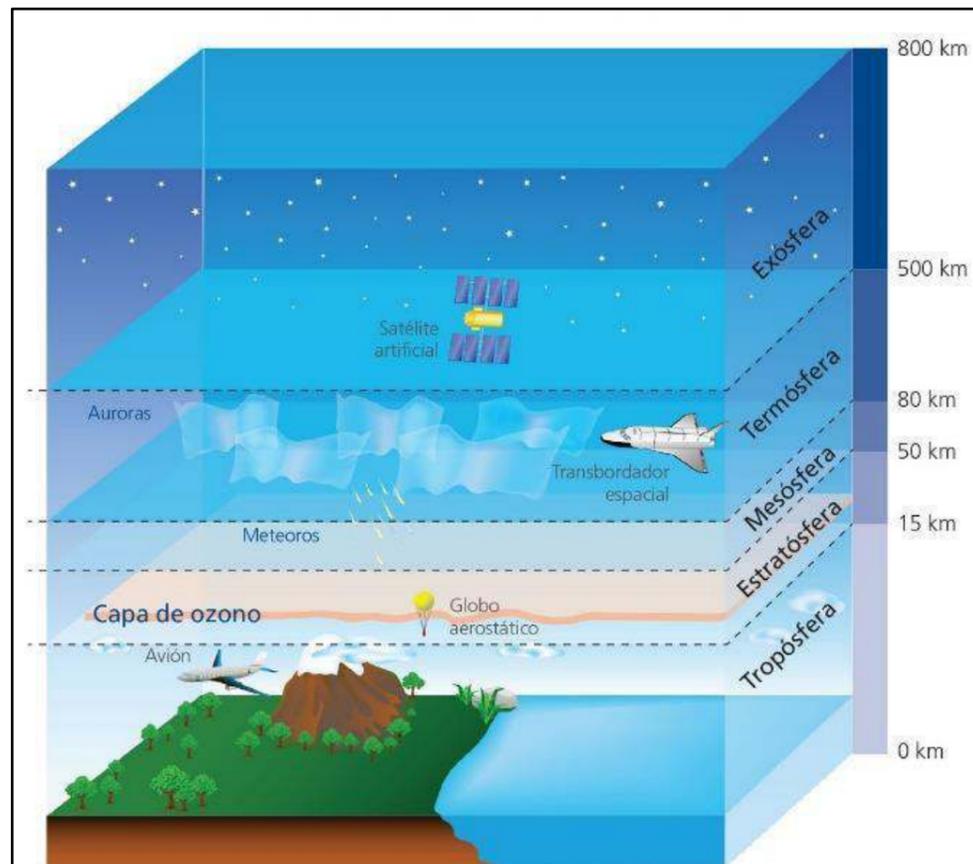


Fuente: LEAL-QUIRÓS, Edertho. *La atmósfera: un sistema del planeta tierra*.
<https://www.uv.mx/personal/tcarmona/files/2010/08/Leal-.pdf>. Consulta: 28 de abril de 2019.

4.3. Capas de la atmósfera

La estructura vertical de la atmósfera es consecuencia de la absorción de la radiación solar en la capa atmosférica, lo cual produce la variación de la temperatura según la altura. Tomando en cuenta esto, se puede dividir la atmósfera en las siguientes capas:

Figura 2. Capas de la atmósfera



Fuente: Esquema.net. *Esquema de la atmósfera*. <https://esquema.net/atmosfera/>. Consulta: 28 de abril de 2019.

4.3.1. Tropósfera

En la tropósfera, al ascender disminuye la temperatura, alcanza una altura de 19 km a la altura del ecuador, 12 km en latitudes medias y 9 km sobre los polos, aproximadamente.

Es la capa que recibe las emisiones directamente procedentes de la superficie terrestre, conteniendo la mayoría de los gases de la atmósfera y la mayor parte del vapor de agua atmosférico. Se caracteriza por tener movimientos convectivos y de mezcla, así como movimientos verticales y horizontales de las masas de aire, en esta capa ocurren los fenómenos meteorológicos y biológicos.

La capa límite superior se conoce como tropopausa, en donde sucede una inversión térmica.

4.3.2. Estratósfera

Es una capa muy estable, la temperatura aumenta uniformemente con la altura, no se da la convección ni la mezcla turbulenta de los constituyentes atmosféricos. Es una capa seca, por lo tanto, no tiene nubes y no suceden fenómenos meteorológicos. Contiene grandes cantidades de O₂ que durante el día se convierte en O₃ (ozono) al repeler la radiación ultravioleta, provocando el aumento de temperatura. El ozono se sitúa entre los 15 y 35 km de altura, pero su concentración máxima se registra entre los 20 y 25 km de altitud. Se tiene mayor movimiento horizontal que vertical, siendo esto perjudicial para la concentración de contaminantes, ya que se pueden difundir más rápido. La estratósfera tiene una altura de hasta 50 km, a partir de esta altitud empieza la estratopausa.

4.3.3. Mesósfera

Es una capa que se caracteriza por una disminución de temperatura con la altitud, alcanza los 80 km de altura. En esta capa se pueden observar variaciones entre las estaciones de verano e invierno. En verano la temperatura es menor que en invierno, las concentraciones de O₂ y vapor de agua son insignificantes. Contiene alrededor del “1 % de la masa de aire total de la atmósfera, y la densidad del aire es mínima, variando la presión entre 1 y 0,01 mb”¹⁴. Esto da paso a la formación de turbulencia. En la parte superior se encuentra la mesopausa, en

¹⁴ FLORES, Mauricio. *Sigue incrementándose el parque vehicular en Guatemala*. <https://transito.gob.gt/sigue-incrementandose-el-parque-vehicular-en-guatemala/>. Consulta: 28 de abril de 2019.

esta región se observan las temperaturas más bajas de la atmósfera y se debe a que no hay influencia de radiación solar ni de radiación terrestre.

4.3.4. Termósfera

En esta capa la temperatura aumenta conforme la altura, la densidad de aire es baja, principalmente se compone de nitrógeno y oxígeno atómico, este último predomina arriba de los 200 km. La presencia de partículas electrizadas da lugar a la aparición de capas ionizadas, las cuales reflejan las ondas radioeléctricas. En la termósfera hay una presencia importante de los gases ligeros debido a la disociación del nitrógeno, del oxígeno y de los procesos de difusión molecular. Por arriba de los 200 km de la atmósfera durante la noche, al ya no recibir radiación solar, se vuelve casi-isoterma.

4.3.5. Exosfera

Tiene una densidad muy baja de gases similar al espacio exterior, alcanza unos 500 km altura, en donde las moléculas de aire son escasas, lo cual hace difícil reconocer su límite superior, es la zona de tránsito entre el espacio y la atmósfera terrestre, la cual contiene un alto contenido de polvo cósmico.

4.4. Aire

Es una mezcla de gases que permite la vida de humanos y animales en la Tierra, los principales elementos que lo componen son el oxígeno y el nitrógeno. El 95 % del total de la masa de aire atmosférico se encuentra en los primeros 15 km cerca de la superficie terrestre, debido a la atracción gravitatoria y a la compresibilidad de los gases, conforme a la altura la composición del aire varía.

4.4.1. Composición del aire

El aire varía según la ubicación en las capas de la atmósfera, si está a una mayor altitud tendrá menor presión, menor peso y la proporción de gases será diferente, ya que los elementos más pesados serán atraídos por la fuerza de gravedad.

Los gases que forman el aire son los siguientes:

- Nitrógeno (78 %): es un elemento esencial para todos los seres vivos, aproximadamente el 98 % del contenido de nitrógeno de todo el mundo se encuentra en el suelo, en la estructura química de la roca y sedimento, el resto se encuentra en la naturaleza, moviéndose por medio del ciclo del nitrógeno.
- Oxígeno (21 %): es utilizado por los seres vivos para la respiración y otras actividades como la obtención de energía. Un porcentaje se encuentra en la corteza terrestre, en la masa de los océanos y en la atmósfera. Es uno de los elementos más abundante de la superficie terrestre, tiene la capacidad de formar compuestos con casi todos los elementos conocidos a excepción de los gases nobles.
- Argón (0,94 %): pertenece al grupo de gases nobles. La atmósfera de la tierra es la principal fuente de argón, también se encuentra en minerales y meteoritos. Tiene una reactividad química muy baja, es utilizado para corte y soldadura de metales y para lámparas eléctricas y bombillas.

- Dióxido de carbono (0,03 %): es un elemento clave en el ciclo del carbono, es vital para el proceso de las plantas, animales y para el ser humano. Es la forma energéticamente más estable del carbono.
- Vapor de agua: la cantidad de agua en la atmósfera es una mínima parte de la existente en la superficie terrestre, el vapor de agua proviene de una parte por la evaporación de cuerpos de agua y otra parte por la transpiración de las plantas. Es de vital importancia en el ciclo del agua, en los fenómenos climáticos y en los procesos de regulación de temperatura.
- Otros gases: se encuentran en una proporción muy pequeña. Entre estos están: hidrógeno, neón, helio, metano, criptón y xenón.

4.5. Contaminación atmosférica

Se denomina contaminación atmosférica a la presencia de una sustancia indeseable en el aire, en cantidades suficientes para producir un impacto perjudicial en el sistema y alterar el equilibrio de los gases que componen la atmósfera.

Existen diferentes fuentes de contaminación, entre las principales está el proceso de combustión, tanto por procesos industriales como en automóviles y calefacciones residenciales. En la combustión ocurre la oxidación de los elementos que componen los combustibles, las materias primas y el aire, generando dióxido y monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y azufre, entre otros contaminantes que tienen un efecto negativo en la salud, medio ambiente, clima y bienes de la naturaleza.

Una de las fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos de origen antropogénico es zonal, que incluye tanto fuentes móviles como fijas, mezcladas en un espacio. Las características dinámicas de la atmósfera y la morfología del terreno serán factores importantes en la concentración o dispersión de los contaminantes producidos por estas fuentes, pues de esto dependerá la aparición de nuevos contaminantes que no son emitidos directamente por las fuentes.

Entre los contaminantes atmosféricos están:

4.5.1. Contaminantes primarios

Son los que proceden directamente de las fuentes de emisión al ambiente, las fuentes pueden ser naturales o antropogénicas, como erupciones volcánicas y tubos de escape de automóviles.

4.5.1.1. Dióxido de azufre (SO₂)

- Características principales: el dióxido de azufre, al combinarse con la humedad en el aire, forma ácido sulfúrico (H₂SO₄), que provoca la lluvia ácida, esto puede ocasionar daños en infraestructura y construcciones.
- Fuentes principales:
 - Antropogénicas: la industria refinera, las fundiciones y la combustión del carbón.
 - Naturales: la mayor parte de las emisiones de dióxido de azufre provienen de fuentes naturales como erupciones volcánicas, descomposición biológica y emisiones marinas.

- Efectos principales: la exposición al SO₂ afecta los conductos respiratorios y ataques asmáticos, provoca enfermedades como la bronquitis crónica y el enfisema. También provoca la corrosión a los metales y deterioro a los textiles, las pinturas, a los materiales de construcción y a los monumentos históricos. Produce daño a la fotosíntesis, al transformarse en lluvia ácida provoca decoloración y lesiones en el follaje, así como efectos en lagos y ríos.

4.5.1.2. Dióxido de nitrógeno (NO₂)

- Características principales: es un gas amarillo parduzco producido por la reacción fotoquímica del óxido nitroso (NO), es uno de los óxidos de nitrógeno más abundantes producidos por el hombre y de forma natural. Es parte de la composición de la lluvia ácida, de la formación del smog fotoquímico y del ozono troposférico.
- Fuentes principales:
 - Antropogénicas: es emitido por la quema de combustibles fósiles, emisiones de fábricas (como la elaboración de ácido nítrico y la producción de energía) y por los escapes de los motores de los vehículos.
 - Naturales: se emite en una menor cantidad, mediante actividad bacteriana, volcánica y por descargas eléctricas atmosféricas.
- Efectos principales: produce irritación en los pulmones y daña las células que revisten estos, causa infecciones respiratorias. Afecta a la vegetación con la caída prematura de las hojas e inhibición del crecimiento, provoca corrosión de metales por la lluvia ácida y en el ambiente produce disminución de la visibilidad.

4.5.1.3. Dióxido de carbono (CO₂)

- Características principales: gas incoloro, inodoro, incombustible, denso y poco reactivo. Juega un papel importante en varios procesos biológicos dentro del ciclo natural del carbono, siendo indispensable para la vida en la tierra. Entre el ciclo de carbono se da un intercambio de toneladas de carbono entre la atmósfera, los océanos y la vegetación terrestre.
- Fuentes principales:
 - Antropogénicas: la mayor producción de emisiones de dióxido de carbono es por el uso de combustibles fósiles como una fuente de energía (carbón, leña, gas natural, petróleo y sus derivados) y las centrales térmicas.
 - Naturales: se produce por la respiración de los seres vivos y por fermentación, los volcanes también contribuyen al incremento del CO₂.
- Efectos principales: es uno de los causantes del incremento de la temperatura de la Tierra, teniendo cambios determinantes en el clima y efectos climáticos. En concentraciones muy altas puede producir dolores de cabeza, mareos y asfixia.

4.5.1.4. Monóxido de nitrógeno (NO)

- Características principales: es poco soluble en agua, se oxida muy rápido, transformándose en dióxido de nitrógeno y luego en ácido nítrico, lo cual produce la lluvia ácida.

- Fuentes principales:
 - Antropogénicas: se forma por la quema de combustibles fósiles provenientes de fuentes fijas y móviles. También hay en procesos de soldadura y corte, así como en el uso de ácido nítrico para el tratamiento de metales.
 - Naturales: se produce en algunas bacterias y virus.
- Efectos principales: afecta a los pulmones y se dan insuficiencias respiratorias. En el ambiente en altas concentraciones puede causar limitaciones en el crecimiento vegetal.

4.5.1.5. Monóxido de carbono (CO)

- Características principales: es un gas que es ligeramente menos denso que el aire, es incoloro e inodoro, insípido, no irritante.
- Fuentes principales:
 - Antropogénicas: se forma por la incompleta combustión de hidrocarburos y sustancias que contienen carbón (gasolina, diésel, etc.), por el mal estado de los motores y la falta de oxígeno. El monóxido de carbono puede formarse en el interior de una casa por la combustión de leña para calefacción, en la cocina y humos de cigarrillo.
 - Naturales: por la oxidación del metano procedente de la fermentación anaerobia de la materia orgánica y en la producción y degradación de la clorofila, así como en incendios naturales.

- Efectos principales: daños perjudiciales en la salud humana por la hemoglobina de la sangre, ya que al combinarse disminuye la capacidad de esta de transportar oxígeno afectando el sistema nervioso central y provocando problemas cardíacos y pulmonares, dolores de cabeza, fatiga, fallos respiratorios y la muerte.

4.5.1.6. Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)

- Características principales: se forman de una molécula de carbono y de otra molécula de: hidrógeno, halógenos, oxígeno, azufre, fósforo, silicio o nitrógeno. Son determinantes para la composición del ozono troposférico.
- Fuentes principales:
 - Antropogénicas: combustión incompleta de los motores de fuentes móviles, por evaporación de hidrocarburos, evaporación de disolventes, por calefacciones, por industrias de disolventes, minería, vertederos, entre otros.
 - Naturales: las emisiones pueden originarse de fuentes biogénicas como los vegetales, y también de la fermentación para producir metano por parte de microorganismos o animales.
- Efectos principales: reaccionan con otros componentes para producir niebla y provocar contaminación por aerosoles en presencia de radiación solar.

4.5.1.7. Partículas

- Características principales: es el conjunto del material no gaseoso que se encuentra en el aire. Se determinan según el tipo de diámetro, pueden ser

partículas con diámetro de 10 μm (PM_{10}), que son partículas finas y gruesas que pueden llegar a la tráquea y los bronquios y con diámetro de 2,5 μm ($\text{PM}_{2,5}$), y además partículas ultrafinas que pueden alcanzar los alveolos.

Las partículas de mayor tamaño con diámetro de 10 μm tienden a sedimentarse cerca de los lugares donde son producidas, sirven como medio de transporte para sustancias peligrosas como metales pesados e hidrocarburos y las partículas más pequeñas duran más tiempo en suspensión y son transportadas a mayores distancias por medio de corrientes de aire. El material particulado es uno de los contaminantes más significativos en la contaminación atmosférica, causante de los diferentes daños a la salud de los habitantes de una región.

- Fuentes principales:
 - Antropogénicas: por la quema de praderas y restos de cosechas, provocando incendios forestales, por los motores de combustión interna (automóviles, buses, camiones, entre otros), fertilizantes, polvo de construcción, emisiones industriales, entre otros.
 - Naturales: como el polvo, polen, moho, espuma marina y ceniza volcánica.
- Efectos principales: el material particulado que causa mayor daño es el de diámetro de 2,5 micras o menos, estas partículas pueden viajar profundamente por los pulmones, penetrando en el aparato respiratorio hasta depositarse en los alvéolos, provocando enfermedades respiratorias y efectos en las enfermedades cardiovasculares. Las partículas también pueden aumentar la susceptibilidad a los resfriados y al asma, provocar

cáncer en los pulmones, causar deterioro en los materiales y la disminución de la visibilidad.

4.5.2. Contaminantes secundarios

Son los que se originan en el aire por las reacciones químicas. Esto sucede por la interacción de dos o más contaminantes primarios o entre contaminantes primarios y elementos de la atmósfera.

4.5.2.1. Ácido sulfúrico (H₂SO₄)

- Características principales: es un compuesto muy reactivo y altamente corrosivo. Se origina por la reacción de la atmósfera del vapor de agua con los óxidos de azufre, al precipitarse el ácido forma la lluvia ácida.
- Fuentes principales: emisiones por combustión de hidrocarburos de fuentes móviles.
- Efectos principales: puede causar irritación en los ojos, en la piel y en el tracto respiratorio. Causa daños a los recursos naturales.

4.5.2.2. Ácido nítrico (NO₄)

- Características principales: la oxidación del dióxido de nitrógeno (NO₂) da lugar al ácido nítrico, procedente de procesos de combustión de combustibles fósiles y también de actividad volcánica.
- Efectos principales: es uno de los causantes de la lluvia ácida.

4.5.2.3. Ozono (O₃)

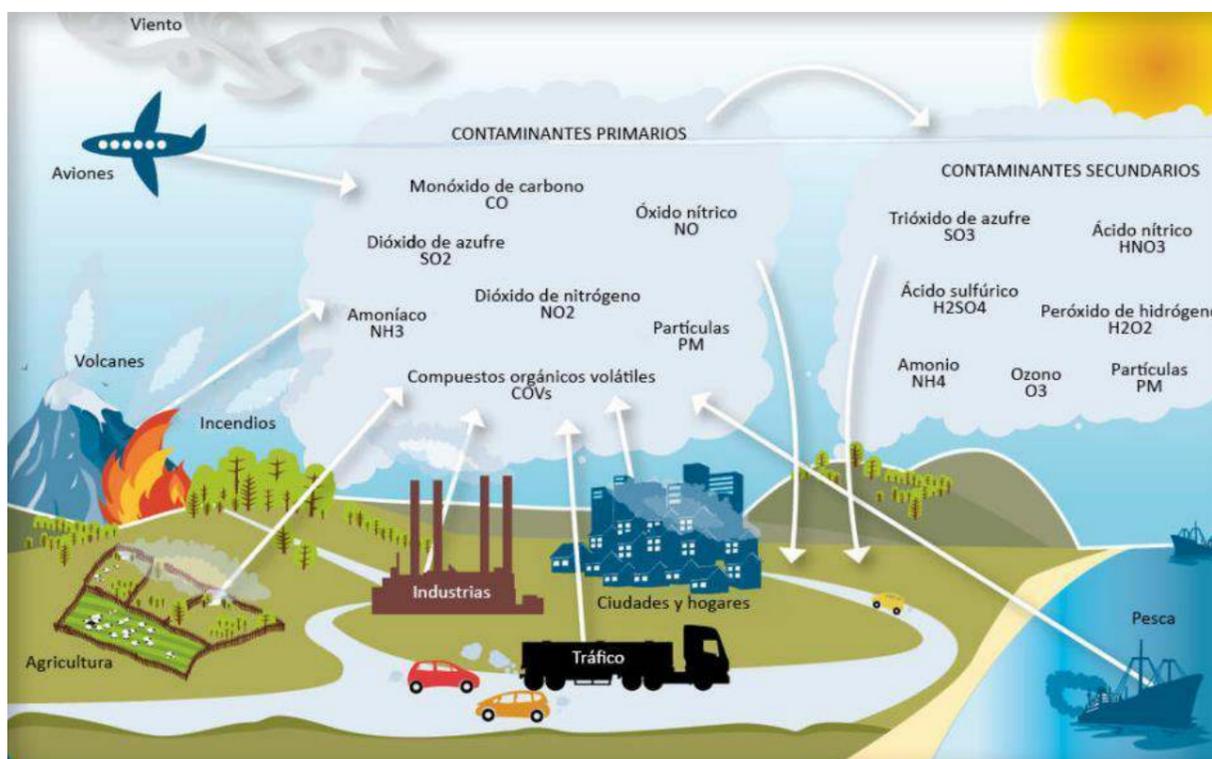
- Características principales: es un contaminante secundario que se forma por reacciones fotoquímicas entre la radiación solar, óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COV). Es el más complejo de los contaminantes, por su dificultad para reducirlo, ya que no es directamente emitido por una fuente. Se encuentra en la estratósfera, donde ayuda a la superficie terrestre a disminuir la penetración de los rayos ultravioletas, y en la tropósfera los altos niveles de ozono pueden representar daños a la salud y el ambiente. Es el principal componente del smog fotoquímico.
- Efectos principales: causa molestias en la salud como irritación de los ojos, nariz y del tracto respiratorio, agrava las enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Cuando hay concentraciones pequeñas de ozono, puede dañar la etapa de crecimiento de las plantas con la disminución de la actividad fotosintética y el incremento de formación de plagas. También puede causar degradación y decoloración de fibras, tintes textiles y pintura, así como la disminución de la visibilidad en el ambiente.

4.5.2.4. Metano (CH₄)

- Características principales: es un gas incoloro, inflamable y no tóxico que tiene la capacidad de retención del calor en la atmósfera, siendo parte de los gases de efecto invernadero. El metano que se libera a la atmósfera antes de que se queme es perjudicial para el medio ambiente, puede producir energía calorífica y lumínica.

- Fuentes principales:
 - Antropogénicas: está presente en la explotación de actividades mineras carboníferas, en los procesos químicos industriales y en los motores de los vehículos.
 - Naturales: es un gas que se forma por la descomposición de la materia orgánica con escasez de oxígeno, en las zonas de cría ganadera por las heces del rebaño y en incendios forestales.
- Efectos principales: contribuye al cambio climático, puede producir incendios y explosiones en los vertederos de basura, cuando se acumula en grandes concentraciones el metano puede causar problemas respiratorios.

Figura 3. **Contaminantes primarios y secundarios**



Fuente: Entornos Inteligentes. *Contaminantes primarios y secundarios: estos son los más peligrosos.* <https://enviraiot.es/contaminantes-primarios-y-secundarios-mas-peligrosos/>.

Consulta: 4 de mayo de 2019.

4.6. Efecto invernadero

Es un fenómeno natural en el cual la Tierra recibe constantemente un flujo de energía proveniente de las radiaciones del sol (ondas de longitud corta) que entran en la atmósfera, la superficie de la tierra retiene una parte de esta energía y otra parte es reflejada de nuevo al espacio (ondas de longitud larga). Los gases que conforman la atmósfera absorben gran parte de la radiación emitida por la superficie terrestre y nuevamente la reflejan, calentando así la tierra y dando origen a la formación de las condiciones climáticas, ambientales y el desarrollo de la vida en la Tierra.

El balance energético en la atmósfera se da por la absorción de radiación infrarroja procedente de la tierra y la emisión de energía infrarroja. La absorción la realizan los gases, que, al absorber los fotones infrarrojos emitidos por el suelo, aumentan la energía de rotación y de vibración de las moléculas, la energía cinética excedente es transferida en forma de calor a otras moléculas por la colisión entre ellas, aumentando la temperatura del aire. De la misma manera, para el enfriamiento de la atmósfera se emite energía infrarroja hacia niveles menores de energía, para ello se requiere una separación de cargas eléctricas en sus enlaces polares.

Este equilibrio entre la energía entrante y saliente es lo que le da la temperatura a la superficie de la Tierra, si se da una variación de esta energía produce que la superficie de la Tierra sea más cálida o más fría, provocando los cambios en el clima global. Estas variaciones pueden ser provocadas por los gases de efecto invernadero, como se mencionó anteriormente pueden absorber y emitir la energía que irradia el suelo, el aumento de la presencia de gases en la atmósfera que pueden permanecer por un largo periodo de tiempo llega a afectar el equilibrio energético.

4.6.1. Gases de efecto invernadero

Los gases de efecto invernadero se originan tanto de forma natural como de forma antropogénica. Desde la revolución industrial se ha intensificado la emisión de gases debido al aumento del sector industrial, combustión de hidrocarburos y otras actividades humanas que provocan una elevada concentración de gases que absorben en mayor cantidad la radiación reflejada por la superficie terrestre, incrementando la temperatura en la Tierra. Estos gases provocan un efecto en el cambio climático que dependerá de algunos factores como la concentración de estos gases y el tiempo de permanencia en la atmósfera, así como el nivel de impacto que pueden tener en la temperatura.

Entre los principales gases de efecto invernadero están el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) el óxido nitroso (N_2O), el ozono (O_3), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x) y compuestos halogenados como los hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs) y el hexafluoruro de azufre (SF_6).

Los gases de efecto invernadero se pueden clasificar en directos e indirectos:

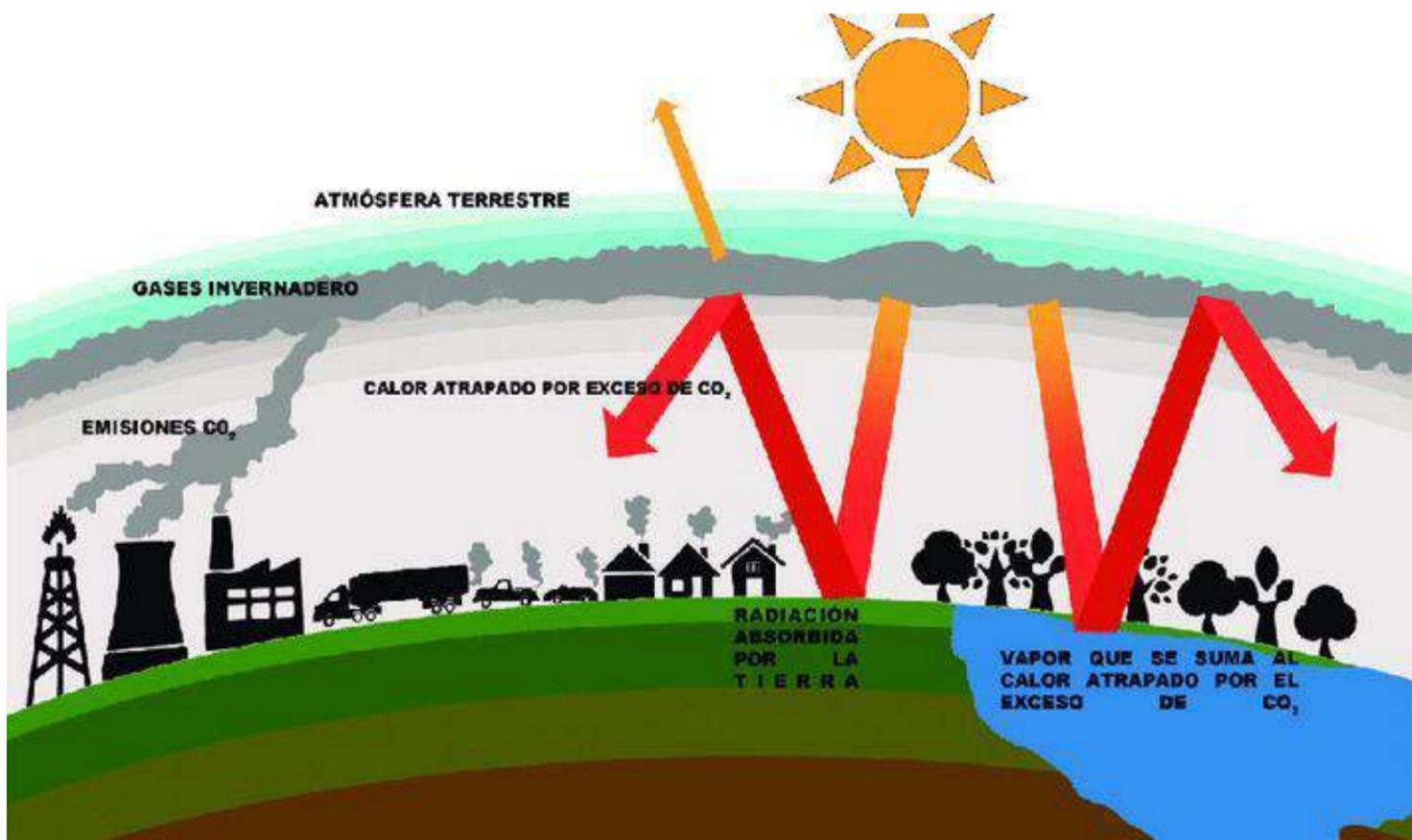
4.6.1.1. Gases de efecto invernadero directos

Son los gases que no sufren modificaciones, así como son creados son emitidos a la atmósfera. Los gases que conforman este grupo son: dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y compuestos halogenados.

4.6.1.2. Gases de efecto invernadero indirectos

Son los gases que sufren una transformación al ser emitidos, pues al llegar a la atmósfera se convierten en gases de efecto invernadero directo. En este grupo se encuentran los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánico-volátiles diferentes del monóxido de carbono.

Figura 4. Efecto invernadero



Fuente: CITECUBB. *Manual de hermeticidad al aire de edificaciones*. p. 18.

4.6.2. Efecto de las actividades humanas con los GEI

En un reporte de la Academia Nacional de Ciencias se mencionan tres categorías sobre las posibilidades de ocurrencia, según la predicción del cambio del clima:

Tabla I. **Categorías de cambios de clima y sus predicciones**

Altamente admisible	<ul style="list-style-type: none">• Calentamiento de la superficie global promedio• Aumento en la precipitación global promedio• Reducción del hielo en el mar• Invierno superficial que se calienta en las altas latitudes
Admisible	<ul style="list-style-type: none">• Intensificación global de la subida del nivel del mar• Aumento de precipitación en altas latitudes
Altamente incierto	<ul style="list-style-type: none">• Los detalles locales del cambio de clima, la distribución regional de la precipitación, los cambios regionales de vegetación aumentan la intensidad de las tormentas tropicales y la frecuencia

Fuente: LEAL-QUIRÓS, Edbertho. *La atmósfera: un sistema del planeta Tierra*.
<https://www.uv.mx/personal/tcarmona/files/2010/08/Leal-.pdf>. Consulta: 28 de abril de 2019.

La cantidad de CO₂ en la Tierra varía según la emisión de este gas por fenómenos naturales y actividades antropogénicas, estas últimas pueden causar un aumento mayor de la concentración de CO₂ en los ecosistemas, como se muestra en la tabla:

Tabla II. **Cantidad de CO₂ introducido en el sistema de la tierra y subsistemas debido a actividades humanas y también por fenómenos naturales**

Flujo anual	10⁹ toneladas por año
De la biósfera a la atmósfera (respiración y descomposición de la materia orgánica)	60
De la atmósfera a la biosfera (fotosíntesis)	60
Del océano a la atmósfera	100
De la atmósfera a océanos	100
A la atmósfera desde el interior de la tierra (los volcanes, las fuentes termales)	0,1
En fósiles nuevos dentro de la tierra	0,1
A la atmósfera por la combustión causada por los humanos	6
En la atmósfera proveniente de nuevos cultivos	2

Fuente: LEAL-QUIRÓS, Edertho. *La atmósfera: un sistema del planeta Tierra*.

<https://www.uv.mx/personal/tcarmona/files/2010/08/Leal-.pdf>. Consulta: 28 de abril de 2019.

4.7. Calidad del aire

La calidad del aire es determinada por la presencia o ausencia de sustancias, microorganismos y concentraciones de los contaminantes, esto puede alterar la composición que tiene originalmente el aire provocando principalmente problemas para la salud.

La contaminación del aire se da cuando se alteran las cantidades de sus componentes naturales. Esto puede ser producto de factores naturales como cenizas volcánicas, polvo, polen, esporas de plantas y humo de incendios no provocados, así como producto de actividades antropogénicas como actividades comerciales, domésticas, industriales y por los motores de vehículos.

Hay algunas condiciones geográficas y urbanísticas que facilitan la contaminación del aire, como la altitud, los accidentes geográficos, la distribución y cantidad de calles, industrias, jardines y parques. En ciudades que se encuentran en valles rodeados de montañas se facilita la acumulación y concentración de contaminantes, así como ciudades cuyo crecimiento no ha sido planificado en donde las industrias quedan entre zonas residenciales.

En cada ciudad hay una variedad de industrias, lo cual permite identificar las diferentes concentraciones de los distintos contaminantes, entre ellos el monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, óxido de nitrógeno, ozono, material particulado, hidrocarburos y plomo.

4.7.1. Guías de calidad del aire

Los monitoreos de las emisiones de gases de efecto invernadero realizados en la mayoría de las ciudades de América Latina y el Caribe han ido en incremento, al igual que los cálculos proyectados para un futuro, lo cual confirma la necesidad de implementar planes de gestión de calidad del aire, así como medidas para la protección de la salud y el bienestar público.

Es esencial tener una guía que indique los valores permisibles de cada uno de los contaminantes atmosféricos y sirva como comparación de los datos obtenidos mediante el monitoreo de las emisiones en las diferentes ciudades.

Con este documento se puede analizar y determinar la calidad del aire en el área, para cumplir con los pasos para una reducción progresiva de las concentraciones de los contaminantes y así lograr alcanzar los valores guía.

Las Guías de la Calidad del Aire (GCA) son desarrolladas por la Organización Mundial de la Salud, con el fin de dar soporte y guiar a los países para que desarrollen sus propios estándares nacionales de calidad del aire, con el objetivo de realizar acciones que disminuyan la contaminación atmosférica y con ello proteger la salud pública. Las guías son actualizadas periódicamente según las recomendaciones de la OMS, basándose en los estudios e investigaciones realizadas por los científicos en materia de impactos en la salud.

Los países desarrollan sus propios estándares nacionales conforme su nivel de desarrollo, la capacidad nacional para implementar la gestión de la calidad del aire, la variabilidad tecnológica y otros factores políticos y sociales. Los estándares publicados en las guías de la calidad del aire pueden ser primarios, que son los propuestos para la protección de la salud pública y de los grupos sensibles (personas con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, adultos mayores y niños), así como los estándares secundarios propuestos para mantener el bienestar público y la protección de cultivos, vegetación, animales e infraestructura.

El material particulado se utiliza como un indicador de la calidad del aire mediante la comparación con los valores guía publicados por la Organización Mundial de la Salud. En la región de América, 21 países tienen regulado el PM₁₀ y 15 el PM_{2,5}. Son pocos los países que tienen una regulación constante y la mayoría son países de altos ingresos, por lo que no se cuenta con mucha información para cuantificar el efecto sobre la salud.

4.7.2. Índice de calidad del aire

La calidad del aire puede medirse mediante el índice de calidad del aire (ICA), que indica el grado de pureza o contaminación atmosférica haciendo referencia a los daños en la salud de la población que pueden experimentar luego de un tiempo respirando ese aire. La Agencia de Protección Ambiental (EPA) del gobierno de los Estados Unidos de Norteamérica establece un parámetro de 0 a 500 para la medición del índice de calidad del aire y lo calcula principalmente para cinco contaminantes atmosféricos: contaminación por partículas, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono y ozono a nivel del suelo. Cuando el valor del ICA es alto, el nivel de contaminación es mayor y los efectos a la salud son mayores.

Para los valores del ICA se entiende como grupos sensibles a personas enfermas (especialmente con enfermedades respiratorias), ancianos y niños. Para la medición del ICA se consideran seis categorías, con el fin de facilitar la interpretación:

Tabla III. Índice de calidad del aire

Valores del índice de la calidad del aire	Niveles preocupantes para la salud	Colores	Significado
0-50	Buena	Verde	Calidad de aire satisfactoria y el riesgo de la contaminación atmosférica es escaso o nulo.
51-100	Moderada	Amarillo	Calidad de aire aceptable y para un grupo pequeño de personas sensibles a la contaminación atmosférica algunos contaminantes podrían ser preocupantes.
101-150	Insalubre para grupos sensibles	Naranja	Los miembros de un grupo de personas sensibles pueden tener algún efecto en la salud, mientras las personas en general no serán afectadas.

Continuación de la tabla III.

Valores del índice de la calidad del aire	Niveles preocupantes para la salud	Colores	Significado
151-200	Insalubre	Rojo	Los miembros de un grupo de personas sensibles pueden tener un efecto grave en su salud, mientras que las personas en general comienzan a padecer efectos en la misma.
201-300	Muy insalubre	Púrpura	Probabilidad de que cualquier persona puede padecer efectos graves en la salud. Se considera en condiciones de emergencia sanitaria.
301-500	Peligrosa	Granate	Alerta sanitaria: todos pueden padecer efectos sanitarios más graves.

Fuente: AirNow. *Fundamentos de AQI*. <https://www.airnow.gov/aqi/aqi-basics-in-spanish/>.

Consulta: 28 de abril de 2019.

4.7.3. Calidad del aire en Guatemala

En la capital de Guatemala se concentró la actividad industrial entre los años 60 y 70 del siglo XX, “correspondiendo el 70 % a establecimientos industriales”¹⁵. Debido a esto y al crecimiento demográfico sin un plan de ordenamiento territorial, actualmente los sectores industriales coexisten en los mismos espacios de casas y residenciales. Asimismo, se han incrementado las actividades antropogénicas, del sector energético y de transporte, deteriorando la calidad del aire.

Una de las principales fuentes que deterioran la calidad del aire en Guatemala son las fuentes móviles, representadas en el transporte vehicular. Uno de los problemas es el incremento del parque vehicular, la mala distribución

¹⁵ Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Primera comunicación nacional sobre cambio climático*. p. 9.

vial y la falta de sincronización de los semáforos que causan atascos viales, así como la falta de mantenimiento y la antigüedad de los automóviles, lo cual produce mayores emisiones de gases aumentando los niveles de contaminación en el aire.

En 1994, mediante una iniciativa de la fundación suiza Swisscontact y la Escuela de Química de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia de la Universidad de San Carlos de Guatemala, surgió el Laboratorio de Monitoreo del Aire en la ciudad de Guatemala, en donde periódicamente se realizan mediciones de algunos de los contaminantes más significativos del aire, entre los cuales están: las Partículas Totales en Suspensión (PTS), dióxido de nitrógeno (NO_2), el ozono (O_3) y el monóxido de carbono (CO). Los resultados que se obtienen de estas mediciones son una herramienta valiosa para determinar el comportamiento de la calidad del aire en la ciudad de Guatemala, así como para informar las consecuencias en la salud que la contaminación atmosférica puede ocasionar y con ello prevenir las consecuencias negativas a corto y mediano plazo.

La red de monitoreo de la calidad del aire en Guatemala se lleva a cabo mediante seis puntos de muestreo, en donde se realizan las mediciones de los contaminantes. Estos puntos de control fueron seleccionados por su influencia vehicular:

- Avenida Petapa, zona 12.
- Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá (Inca), zona 11.
- Calzada San Juan, zona 7.
- Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH), zona 13.

- Universidad de San Carlos de Guatemala (Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia), zona 12.
- Museo de la Universidad de San Carlos de Guatemala, zona 1.

4.7.4. Principales contaminantes atmosféricos en Guatemala

Las concentraciones de los contaminantes producidos por las diferentes fuentes se ven influenciadas por la trayectoria y velocidad del viento, que según los registros del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) en el país la mayor parte del año proviene del noreste. El Atlas Climatológico del INSIVUMEH indica que la velocidad promedio del viento es de 1,44 metros/segundo y que cuenta con diferentes direcciones.¹⁶

En la Ciudad de Guatemala se da la dilución y dispersión de los contaminantes gaseosos y del material particulado hacia la región sur, esto se debe a la ubicación geográfica y las condiciones topográficas en las que se localiza la ciudad, que permiten la circulación del viento proveniente del noreste; sin embargo, cuando las concentraciones son mayores, como en la temporada seca, se corre el riesgo de que se produzca una inversión térmica causada por los incendios forestales, la zafra, la quema de sabanas y la falta de circulación del aire.

Entre algunas de las situaciones causantes de la contaminación atmosférica en Guatemala se pueden mencionar:

- Humo negro y blanco que provienen de los motores obsoletos y mal afinados de los vehículos que afectan a los transeúntes, así como a los mismos conductores y pasajeros.
- Incendios forestales que son provocados para la preparación de tierras para cultivos.
- Incendios accidentales o de manera natural.

¹⁶ Universidad de San Carlos de Guatemala; Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Primer informe indicativo de medición de la calidad del aire ambiente en las cabeceras departamentales de la república de Guatemala*. p. 8 - 9.

- Basureros municipales o clandestinos que emiten humo y malos olores afectando a las personas que habitan cerca de estas áreas.
- Alto contenido de partículas sólidas en suspensión por la erosión eólica que provienen principalmente de campos de cultivo, desiertos, ceniza volcánica, carreteras sin asfalto y zonas deforestadas.
- Humo de fábricas que afectan a las poblaciones cercanas, pudiendo llegar a provocar lluvia ácida.¹⁷

En Guatemala no hay una legislación ambiental que regule la calidad del aire, debido a esto el país no cuenta con los límites definidos de las concentraciones de los contaminantes, utilizando las referencias de los Límites de Calidad del Aire establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), los cuales son:

Tabla IV. **Parámetros de medición para calidad el aire según la OMS**

PARÁMETRO	CONCENTRACIÓN	PERÍODO DE MEDICIÓN
Dióxido de Azufre (SO ₂)	500 µg/m ³	media de 10 minutos
	20 µg/m ³	media de 24h
Partículas PM ₁₀	50 µg/m ³	media de 24 h
	20 µg/m ³	media anual
Partículas PM _{2,5}	25 µg/m ³	media de 24 h
	10 µg/m ³	media anual
Ozono (O ₃)	100 µg/m ³	media de 8 h
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	200 µg/m ³	media de 1h
	40 µg/m ³	media anual

Fuente: OMS. *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06,02_spa.pdf;jsessionid=E0BC8E5CE7C4CA4E03C8CD46653BCEA?sequence=1. Consulta: 5 de mayo de 2020.

¹⁷ Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Primera comunicación nacional sobre cambio climático*. p. 8.

4.8. Consecuencias de la contaminación atmosférica

El aumento en los últimos años de las concentraciones de contaminantes producidas principalmente por la actividad humana, genera una serie de fenómenos al planeta que afectan los ecosistemas y seres vivos, a continuación se detalla las principales consecuencias de la contaminación atmosférica.

4.8.1. Calentamiento global

Es el incremento gradual de la temperatura de la superficie terrestre y de los océanos debido al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, los cuales retienen los rayos infrarrojos provenientes del sol, que ingresan a la atmósfera terrestre y llegan a la superficie como luz (ondas cortas) y son devueltos a la atmósfera como calor (ondas largas). Esta retención del calor contribuye a elevar la temperatura en la Tierra. Los efectos del cambio climático pueden considerarse como amenazas, pues se ponen en riesgo los ecosistemas a nivel mundial y dificultan el desarrollo de los países.

A nivel mundial se deben realizar acciones para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, con el fin de limitar el incremento de la temperatura media de la superficie global y mantenerla por debajo de los 2 °C, siendo esto un reto tecnológico, económico, institucional y de comportamiento.

Algunas acciones que se podrían implementar para mitigar los impactos del calentamiento climático son:

- Protección y cuidado de bosques, para evitar incendios forestales y así evitar el estrés hídrico.

- Llevar a cabo el plan de ordenamiento territorial, para que ya no haya deforestación o cambio de suelo.
- Realizar planes de adaptación a nivel local para atender las necesidades de cada lugar.
- Promover el uso de biocombustible.

4.8.2. Cambio climático

“El Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) define el cambio climático como cualquier cambio en el clima con el tiempo, debido a la variabilidad natural o como resultado de actividades humanas”¹⁸.

La interacción entre los elementos del sistema climático y las variaciones de las condiciones meteorológicas, como la humedad en la tierra, la radiación solar, la temperatura, la inclinación del eje de la tierra, la actividad volcánica y la concentración de gases de efecto invernadero, pueden producir las variaciones del clima en la tierra, afectando los componentes ambientales con el aumento de temperatura, mayor frecuencia en los eventos climáticos extremos, deshielo en los polos, aumento del nivel del mar, acidificación de los océanos, menor precipitación y sequías.

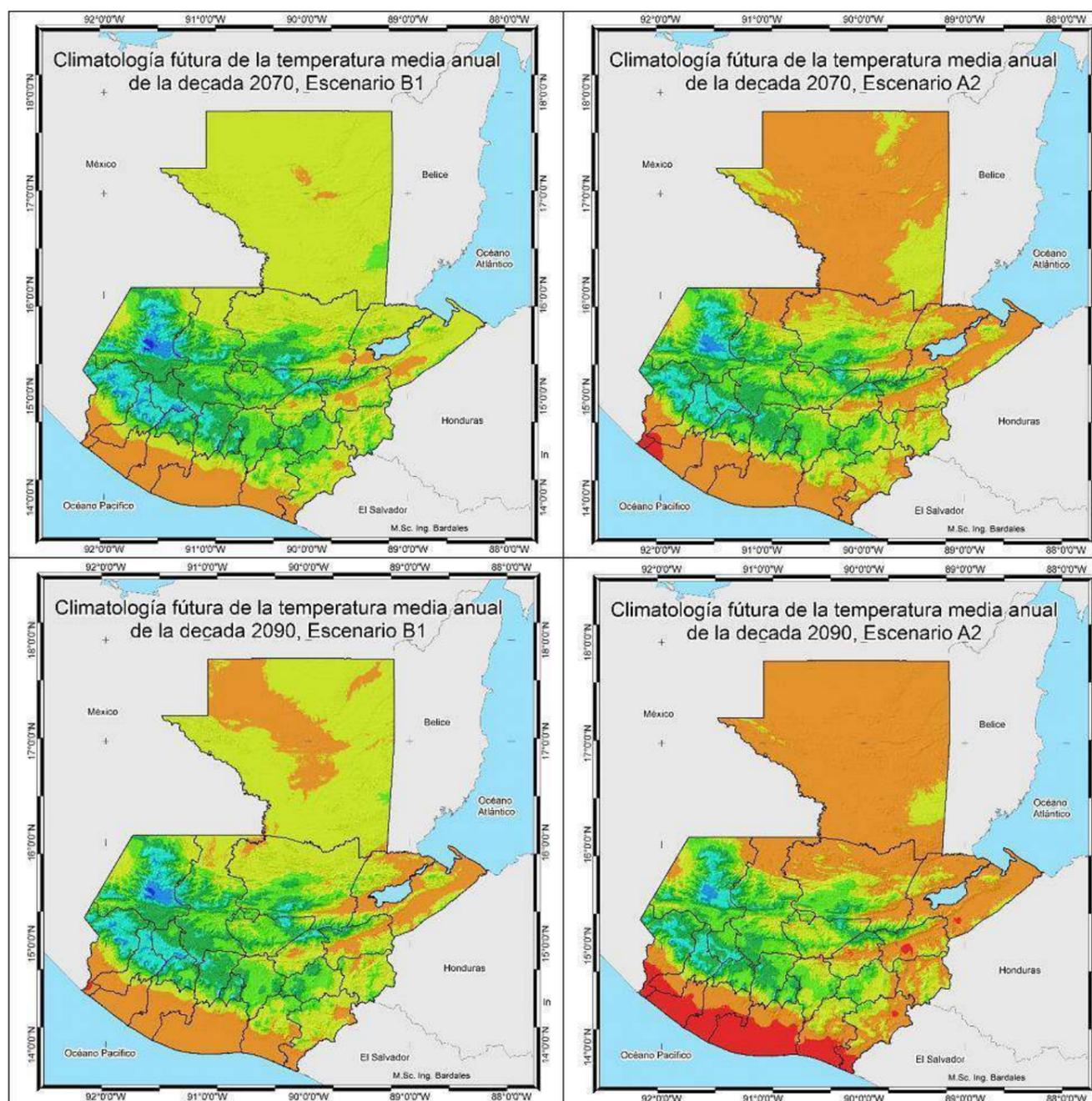
La variabilidad climática, a diferencia del cambio climático, se manifiesta cuando los fenómenos son frecuentes, generando fluctuaciones en el clima en escalas temporales y sucede normalmente por causas naturales, mientras que el cambio climático es algo permanente que ha sido documentado a través de registros climáticos.

¹⁸ BENAVIDES BALLESTEROS, Henry Oswaldo; LEÓN ARISTIZÁBAL, Gloria Esperanza. *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*. p. 29.

Entre los fenómenos de la variabilidad climática está El niño/ Oscilación del Sur (ENSO), que se produce con el calentamiento de las aguas del Pacífico, seguido de la caída de los vientos alisios, interrumpiendo la circulación de aire que causa la caída de los vientos. Estos son dirigidos hacia las costas de Suramérica, en donde se evaporan y producen lluvias inusuales, mientras que en las regiones Andina y Caribe cambia la dirección de los vientos, desplazando las nubes y disminuyendo las probabilidades de lluvia, teniendo altas temperaturas que causan sequía e incendios forestales. El fenómeno de la Niña tiene los efectos contrarios, produce en las regiones Andina y Caribe intensificación de lluvias, llegando a provocar las crecidas en los ríos y riesgos de deslizamientos.

Para poder hacer frente a los desafíos causados por el cambio climático y disminuir la gravedad de sus impactos se ha trabajado mediante el Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), con el objetivo de controlar y disminuir las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, implementando métodos de producción limpia y reduciendo las emisiones en los diferentes procesos.

Figura 5. Mapa de cambio climático



Fuente: INSIVUMEH. *Escenarios de cambio climático*. <http://www.insivumeh.gob.gt/escenarios-de-cambio-climatico/>. Consulta: 5 de mayo de 2020.

4.8.3. Enfermedades crónicas

Se conoce que la contaminación atmosférica afecta los componentes del ecosistema debido a la presencia de elementos contaminantes que pueden ser

de origen natural o antropogénico. La mala calidad del aire tiene impactos en el ámbito social y económico. Esto se debe a que la población, al tener problemas en la salud, genera una disminución de productividad, afectando la competitividad económica de los países y también hay un incremento del presupuesto designado a los gastos de salud. “Según estimó el Banco Mundial el impacto al Producto Interno Bruto en los países de América Latina debido a los efectos a la salud por los contaminantes atmosféricos es alrededor del 2 %”.¹⁹

Los contaminantes más nocivos para la salud son las partículas sólidas menores de 10 micrómetros (PM₁₀), partículas compuestas por sulfatos, nitratos, amonio, cloruro de sodio y carbón negro; y partículas sólidas menores de 2,5 micrómetros (PM_{2,5}) que pueden ser algunos metales pesados como el hierro. Estas partículas entran hasta lo más profundo del sistema respiratorio, provocando el aumento de la coagulación de la sangre y enfermedades isquémicas del corazón.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), se estima que una de cada nueve muertes en todo el mundo es el resultado de condiciones relacionadas con la contaminación atmosférica, ya que el 92 % de la población mundial vive en lugares donde los niveles de calidad del aire exceden los límites fijados por la OMS. El 90 % de las muertes relacionadas con la contaminación del aire se producen en países de ingresos bajos y medianos y el 94 % de las muertes son por enfermedades no transmitibles como cáncer de pulmón, enfermedades cardiovasculares y accidentes cerebrovasculares.²⁰

La exposición constante a los contaminantes aumenta la tasa de morbilidad, así como la de mortalidad, y aumenta el número de ingresos hospitalarios de pacientes con problemas respiratorios y cardiovasculares. La mala calidad de

¹⁹ GREEN, Joanne; SÁNCHEZ, Sergio. *La calidad del aire en América Latina: una visión panorámica*. p. 2.

²⁰ OMS. *La OMS publica estimaciones nacionales sobre la exposición a la contaminación del aire y sus repercusiones para la salud*. <https://www.who.int/es/news-room/detail/27-09-2016-who-releases-country-estimates-on-air-pollution-exposure-and-health-impact>. Consulta: 5 de mayo de 2020.

aire afecta a los niños, a personas con enfermedades respiratorias o enfermedades crónicas y a personas de la tercera edad. Estos son los grupos que sufren mayor daño a la salud, los efectos a la salud pueden ser de corto o largo plazo, dependiendo de la duración a la exposición de los contaminantes.

Los niños respiran más rápidamente que los adultos, aspirando más aire y, al estar expuestos desde temprana edad a malas condiciones atmosféricas, pueden sufrir problemas en el crecimiento de sus pulmones, el cerebro y otros órganos. La exposición prolongada en la etapa prenatal puede desarrollar complicaciones en el crecimiento intrauterino y en el desarrollo del niño, causando problemas en el desarrollo cognitivo, un parto prematuro y bajo peso al nacer.

En la actualidad, en los países de ingresos bajos y medianos, muchas personas de escasos recursos siguen utilizando combustibles orgánicos sólidos (madera, carbón vegetal y mineral, residuos agrícolas y excremento de animales) en sus hogares. Estos combustibles producen niveles altos de contaminación. Aunado a ello, la ineficiente ventilación en los hogares provoca que exista una mayor concentración de partículas de hollín, proveniente de los combustibles sólidos, siendo esto nocivo para la salud. La contaminación del aire en los interiores provocada por el uso de combustibles sólidos causa en los niños infecciones agudas en las vías respiratorias inferiores, causando la muerte de la mitad de los niños menores de 5 años.

Mediante los datos obtenidos de la OMS sobre mortalidad de 2012 y en las pruebas de que la exposición a la contaminación atmosférica supone un riesgo para la salud, se estimaron las siguientes cifras:

Porcentaje de muertes debido a la contaminación atmosférica:

- 40 % – cardiopatía isquémica
- 40 % – accidente cerebrovascular
- 11 % – neumopatía obstructiva crónica
- 6 % - cáncer de pulmón
- 3 % – infección aguda de las vías respiratorias inferiores en los niños.

Porcentaje de muertes debidas a la contaminación del aire de interiores:

- 27 % - neumonía
- 27 % - cardiopatía isquémica
- 20 % - neumopatía obstructiva crónica
- 18 % - accidente a cerebrovascular
- 8 % - cáncer de pulmón

4.8.3.1. Acciones ante el cambio climático en Guatemala

En Guatemala se realizó la *Primera Comunicación Nacional sobre el Cambio Climático* en el año 2001, teniendo como base los resultados del inventario de gases de efecto invernadero, los estudios de vulnerabilidad al cambio climático en los diferentes sectores y los escenarios climáticos, ambientales y socioeconómicos. Esta Primera Comunicación Nacional trata de representar e identificar los efectos e impactos del Cambio Climático en Guatemala y es el punto de partida para implementar las acciones y planes para la disminución de los impactos negativos y la reducción de gases de efecto invernadero.

Entre los impactos que se mencionan en la *Primera Comunicación Nacional sobre el Cambio Climático* se tiene: la vulnerabilidad de la salud, respecto del cual se analizó la incidencia de ciertas enfermedades con las variaciones que ocurrieron con el clima, estas enfermedades fueron seleccionadas por ser de mayor impacto en la población; la vulnerabilidad de los recursos forestales, donde se analizó el efecto por las variaciones de temperatura y precipitación en el comportamiento de las masas forestales en el país; la vulnerabilidad de la producción de granos básicos, con el objetivo de cuantificar los impactos en la calidad y cantidad de los granos cosechados, y la vulnerabilidad de los recursos hídricos, respecto de lo cual se estudió la alteración de los componentes del ciclo hidrológico y parámetros climáticos a causa de las variaciones climáticas.

En este documento también se mencionan las acciones y medidas que se pueden tomar para la reducción de emisiones en el sector de energía, las cuales se mencionan en la siguiente tabla:

Tabla V. **Opciones de reducción de emisiones en energía**

Subsector	Opciones de reducción	
Industria energética	Mejoramiento de la eficiencia tecnológica	Utilización de energías renovables
	Sustitución de combustibles	Reforzamiento de la interconexión eléctrica
Industria manufacturera y construcción	Substitución de combustibles	Mejoramiento de procesos
	Eficiencia energética	Cogeneración
Transporte	Planificación de transporte urbano y el desarrollo de infraestructura	Educación vial Mantenimiento preventivo y correctivo
	Reducción de la intensidad energética de la flota	Sustitución de combustibles
Otros sectores (residencial, comercial, agro y otros)	Especificaciones técnicas	Manejo de la demanda y oferta de energía
	Iluminación eficiente	

Continuación de la tabla V.

Caso de la leña	Mejoramiento de la oferta de leña	Mejoramiento de las cadenas de comercialización
	Mejoramiento de la eficiencia en la quema	

Fuente: Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Primera comunicación nacional sobre cambio climático*. p. 11.

Según los cálculos realizados en el inventario de emisiones de gases de efecto invernadero, se obtuvo que el subsector de transporte es una de las principales fuentes de emisión de dióxido de carbono (CO₂) y, según las estimaciones para el año 2030, este subsector seguirá siendo uno de los más importantes consumidores de combustibles fósiles.

En la *Primera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático* se hace mención de las acciones que se pueden implementar para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en el subsector de transporte. Estas se presentan en la tabla III, entre las cuales se puede mencionar la importancia de establecer estándares de combustible, reforzar cumplimiento de reglamentos de control de emisiones de gases, analizar el uso de gas y/o electricidad en flotas de uso industrial, afinar motores de los vehículos de carga y de pasajeros (públicos y privados) y desarrollar campañas de educación vial.

En la *Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático*, publicada en el 2015, se trataron temas similares a la *Primera Comunicación* como la vulnerabilidad y la emisión de gases de efecto invernadero por sector, así como las medidas y acciones de adaptación y mitigación, tomando como base los 4 inventarios realizados en los años 1990, 1994, 2000 y 2005 que se representan en la siguiente tabla:

Tabla VI. **Emisiones y absorciones de GEI de Guatemala**

Año	CO ₂ (en Gg)		CH ₄ (en Gg)	N ₂ O (en Gg)	NO _x (en Gg)	CO (en Gg)	NMVOC (en Gg)	SO ₂ (en Gg)
	emisiones	absorciones						
1990	7 489,619	-42 903,726	199,556	20,709	43,792	961,655	105,949	74,497
1994	18 474,938	-39 583,645	192,745	11,72	48,446	958,066	235,257	74,607
2000	22 911,204	-37 456,815	211,255	16,902	75,945	1 211,92	176,926	98,458
2005	20 817,879	-24 492,061	259,397	16,712	95,434	1 433,58	414,576	90,488

Fuente: Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Segunda comunicación nacional sobre cambio climático Guatemala*. p. 9.

Los inventarios de gases de efecto invernadero presentados en la *Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático* se realizaron con la metodología planteada por el IPCC en la versión revisada en 1996. Según los datos obtenidos, se determinó que para Guatemala el dióxido de carbono “(CO₂) es el principal GEI emitido, siendo el que aporta más de dos terceras partes de las emisiones, el óxido nitroso (N₂O)”²¹ es el segundo gas de mayor importancia, teniendo un incremento en el año 2000 por la cantidad de fertilizantes nitrogenados; y el metano (CH₄) es el tercer gas de mayor importancia, debido principalmente a las actividades agropecuarias, la quema de combustibles fósiles y el manejo inadecuado de desechos.

A partir de estos resultados se estimó el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero y las medidas que se deben implementar para la reducción de los impactos en la salud, en el ambiente y para disminuir la vulnerabilidad en cada sector. Entre las principales áreas de acción que se identificaron por parte de la Agenda de Investigación para el Cambio Climático se pueden mencionar:

²¹ Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Segunda comunicación nacional sobre cambio climático Guatemala*. p. 39 - 40.

- Fortalecer el Sistema Nacional de Información de Cambio Climático.
- Caracterizar, cuantificar y valorar la riqueza natural del país y su dinámica.
- Caracterizar y cuantificar impactos y efectos del cambio climático.
- Identificar, caracterizar y valorar los riesgos y potencialidades de las relaciones entre ambiente, economía y sociedad.

Las emisiones de gases de efecto invernadero producidas en la actividad de transporte han presentado un aumento del año de 1994 al 2005, convirtiéndose en la principal actividad que influye en el sector energético según los inventarios realizados para esos años.

Para el cumplimiento de la *Ley Marco de Cambio Climático* se realizaron Planes Nacionales de Acción, entre ellos está el de energía, que tiene como objetivo el aprovechamiento adecuado de los recursos naturales renovables y el uso de tecnologías limpias. Para el cumplimiento de estos objetivos se desarrollaron las siguientes propuestas.

- Programa de compensaciones de emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de combustibles fósiles.
- Programa de incentivos fiscales y subsidios enfocados en el uso de energías limpias para el transporte público y privado.
- Registro de proyectos de remoción o reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y su reglamentación respectiva.²²

4.9. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMUCC)

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático es el organismo de la ONU que se encarga de establecer las bases para la acción internacional conjunta en temas de mitigación y adaptación al cambio climático. Tiene como objetivo la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas

²² CNCC; SEGEPLAN. *Plan de acción nacional de cambio climático*. p. 115.

peligrosas en el sistema climático. Establece que ese nivel debe alcanzarse en un plazo suficiente para lograr que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible.²³

Esta convención ha sido ratificada por 197 países, los cuales se denominan como partes en la Convención, y se comprometen a controlar las emisiones de gases de efecto invernadero mediante instrumentos políticos, nuevas tecnologías y medidas de mitigación y adaptación en respuesta a los impactos al cambio climático, así como realizar inventarios nacionales de emisiones de gases de efecto invernadero y presentar informes sobre los avances y medidas que se han estado tomando para la aplicación del CMUCC. Una vez al año se reúnen en las Conferencias de las Partes (COP) para discutir, negociar nuevos compromisos y adoptar decisiones para el cumplimiento de la Convención.

Guatemala forma parte de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático mediante la aprobación del Decreto 15-95 del Congreso de la República y ha participado en las COP de forma individual y en negociaciones de bloques:

- Sistema de la integración Centroamericana (SICA) y la Comisión Centroamericana de Ambiente.
- Grupo de Países Latinoamericanos (GRULAC).
- La Alianza Independiente de América Latina y del Caribe AILAC.

Aunque a nivel mundial Guatemala no contribuye significativamente en la emisión de GEI, es uno de los países más vulnerables a los efectos negativos del cambio climático, de allí la importancia de la participación de Guatemala en la

²³ ONU. *Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático*. p. 9.

Convención y en el cumplimiento de los objetivos para minimizar los efectos negativos del cambio climático.

4.10. Protocolo de Kioto

El Protocolo de Kioto fue un instrumento creado para hacer cumplir y dar seguimiento a los compromisos adoptados en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global. Se adoptó en diciembre de 1997 en Kioto, Japón, pero entró en vigor hasta 2005.

Entre los compromisos de los países industrializados (anexo I) estaba reducir las emisiones de GEI en al menos 5 % en relación con los niveles de 1990 para el primer periodo de compromiso de 2008 a 2012; y, para el segundo periodo de compromiso que abarcó de 2013 a 2020, las partes se comprometieron a reducir las emisiones de GEI al menos un 18 % con respecto a los niveles de 1990.

El protocolo de Kioto promovía mecanismos flexibles que permitieran el comercio de permisos de emisión de GEI, entre esos mecanismos estaban:

- Comercio de emisiones
- Mecanismos de desarrollo limpio
- Implementación conjunta

Estos mecanismos ayudaban a las partes a reducir las emisiones de manera eficaz en función de los costos en donde los gobiernos ayudaban a cooperar entre sí, con el fin de tener una eficiencia energética, generar formas de energía renovable y el uso de combustibles más limpios.

4.11. Acuerdo de París

El Acuerdo de París (AP) fue aprobado en 2015 en París, Francia, durante la COP 21. Las 196 Partes de la Convención acordaron los términos del Acuerdo siguiendo la meta de mantener la temperatura media mundial por debajo de 2 °C con respecto a niveles preindustriales y continuar con los esfuerzos de limitar este aumento de temperatura a 1,5 °C.

El Acuerdo de París busca que todos los países tomen acción para la mitigación y adaptación ante el cambio climático, mediante la implementación de acciones para reducir los gases de efecto invernadero, fortalecer la resiliencia y disminuir la vulnerabilidad de la sociedad y de los ecosistemas. El AP tiene como fin que los países incrementen las acciones cada cierto periodo, por ello deben presentar cada cinco años la actualización de estas acciones como Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (CDN) en las que se definen las obligaciones de reducir emisiones, cómo lo harán y las acciones que como país realizarán dando a conocer su nivel de compromiso. Las acciones que tome cada país serán propias según los recursos de que dispongan y su estado de desarrollo. Permite que las partes cumplan la reducción de sus emisiones de manera unilateral o cooperar entre sí para alcanzar mejores medidas de mitigación, aplicando el mecanismo de revisión, notificación y verificación de estas acciones y que no exista el doble cómputo.

El Acuerdo de París tiene como objetivo principal reforzar la respuesta mundial ante los efectos del cambio climático en el contexto del desarrollo sostenible y de los esfuerzos para erradicar la pobreza, teniendo varios objetivos ambiciosos para su cumplimiento. “Se enfoca en diferentes campos de acción

como la mitigación, Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación forestal (REDD+)²⁴, mecanismos cooperativos, adaptación y pérdidas y daños.

Para poder desarrollar estos campos de acción el Acuerdo define los diferentes medios de implementación, como el financiamiento, desarrollo y transferencia de tecnología y fortalecimiento de capacidades. También se implementan los procedimientos para la gestión del cumplimiento como el marco de transparencia reforzada para las medidas y el apoyo, el balance mundial y mecanismos para facilitar la aplicación y promover el cumplimiento.

El financiamiento se realizará en lo institucional mediante las instituciones Fondo Verde para el Clima (GCF) y el Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF), que se encargarán de asignar los recursos financieros incrementales. En lo público se permite movilizar recursos de otras fuentes, como el sector privado, para la mejora de resiliencia y adaptación. Los países desarrollados deben proveer apoyo financiero a los países en desarrollo. Las Partes tienen como meta el flujo de 100 000 millones de dólares anuales para financiar acciones climáticas a nivel mundial a partir de 2020.

En materia de gestión de cumplimiento el Acuerdo de París establece un marco de transparencia en donde se tenga clara la acción climática en cada país, su progreso y el apoyo prestado o recibido, para ello se define la información que cada parte debe presentar:

- Un informe sobre el inventario nacional de emisiones y absorciones.

²⁴ PNUMA. *El Acuerdo de París y sus implicaciones para América Latina y el Caribe*. p. 8.

- La información necesaria para hacer seguimiento de los progresos alcanzados en la aplicación y el cumplimiento de las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (CDN).
- La información relativa a los efectos del cambio climático y a la labor de adaptación.
- Información sobre el apoyo en forma de financiamiento, transferencia de tecnología y fomento de la capacidad, prestado y recibido, según se trate de país desarrollado o en desarrollo.
- La información que comunique cada parte se someterá a un examen técnico por expertos.

“En el año 2015 Guatemala presentó su CDN con el compromiso de reducir sus emisiones de GEI para el año 2030 en un 11,2 % y con ayuda internacional del 22,6 % tomando como base las emisiones del año 2005”²⁵. Guatemala identificó como prioridad 5 sectores para reducir emisiones de GEI:

- Energía: representa el 28 % de las emisiones nacionales, la actividad principal que contribuye a este sector es el transporte con 49 %, y se quiere implementar un mejor sistema de transporte público colectivo. Este sector tiene como compromiso para el año 2030 que el 80 % de la generación de energía eléctrica sea de fuentes renovables.
- Bosques, uso de la tierra, cambio en el uso de la tierra y silvicultura (USCUSS): son las emisiones generadas por las actividades antropogénicas en los sistemas forestales como resultado de la deforestación, degradación e incendios. Este sector representa en Guatemala el 19 % de las emisiones nacionales, se deben adoptar medidas para conservar y aumentar los sumideros y depósitos de GEI,

²⁵ MISHAAN, Rita. *Acuerdo de París simplificado. Versión popular para Guatemala*. p. 16.

teniendo como acción el cuidado de bosques, específicamente en las partes altas de las cuencas por ser áreas de mayor recarga hídrica.

- Agricultura: representa el 46 % total del inventario nacional, siendo el sector que más contribuye a las emisiones, abarca toda actividad agrícola, pecuaria y ganadera. Se debe tener un control en el uso de fertilizantes y promover el uso de fertilizantes orgánicos.
- Desechos: este sector abarca el manejo de desechos sólidos y el tratamiento de aguas residuales, tiene gran importancia debido a que una gran cantidad de desechos no llegan a un relleno sanitario controlado y por lo tanto no son tratados adecuadamente. La mayoría de agua residual no recibe un tratamiento previo para la disposición final en los cuerpos receptores, para ello se implementan los acuerdos para el mejor control de este sector.
- Procesos industriales: el sector hace referencia a todas las actividades industriales que en la generación de sus productos emitan GEI. Se debe implementar la política de producción más limpia, que es una estrategia ambiental para mejorar los procesos, productos y servicios en el consumo de los recursos y disminuir los impactos ambientales que estos generan.

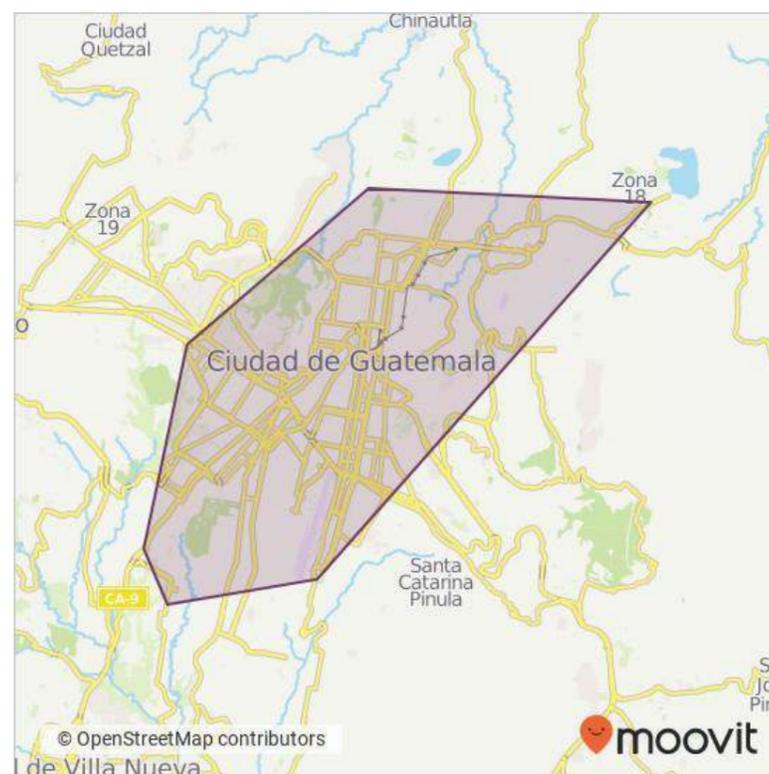
Guatemala, en su propuesta de CDN, propone reducir la vulnerabilidad y mejorar los procesos de adaptación, para ello ya cuenta con el Plan de Acción Nacional de Adaptación al Cambio Climático, donde se presentan los planes estratégicos institucionales desarrollados por cada institución de gobierno, estableciendo los sectores prioritarios para reforzar la labor de adaptación frente a los efectos del cambio climático.

4.12. Transmetro

La municipalidad de Guatemala, como parte de un plan de mejoramiento en la ciudad, inauguró en febrero de 2007 el Transmetro, con el fin de brindar un transporte colectivo, más rápido, con un plan de tarifas integrado y con opciones de varios viajes en el mismo sistema.

El Transmetro actualmente está conformado por 12 rutas con 98 paradas de autobús, estas rutas cubren un área desde su parada más al norte en zona 2 a la parada más al sur en Villa Nueva, y desde la parada más al oeste en Monte María en Villa Nueva hasta la parada del Paraíso en zona 18, que es la más al este.

Figura 6. **Mapa del área de cobertura de Transmetro**



Fuente: Moovit. *Mapa del área de cobertura de Transmetro*. https://moovitapp.com/index/es-419/transporte_p%C3%BAblico-lines-Ciudad_de_Guatemala-6097-1892811. Consulta 18 de mayo de 2020.

El Transmetro está conformado por varias flotas de buses articulados de diferentes marcas que cuentan con puertas automáticas. El combustible que utiliza es diésel ultrabajo de azufre (ULSD, siglas en inglés), el despacho se realiza mayormente en horario nocturno o según el requerimiento y cuenta con 4 predios en que se realiza la recarga de cada unidad:

- Playa I, ubicada en 2ª. Avenida y 23 calle zona 12 (Centra).
- Playa II, ubicada en 0 Avenida 4-33 zona 4.
- Playa IV, ubicada en Anillo Periférico 30-77 zona 7.
- Predio de Buses Alimentadores, ubicado en 50 Calle zona 12 a un costado de la Central de Mayoreo (CENMA).

El Transmetro es un servicio de transporte público, con una tarifa de Q. 1,00 el viaje con paradas continuas y Q. 2,00 el servicio directo. A inicios del sistema de transporte el medio de pago podía realizarse con moneda, pero debido a la pandemia de COVID-19 se implementó el pago electrónico por medio de una tarjeta llamada Tarjeta Ciudadana, la cual debe ser recargada en cualquiera de las estaciones del Transmetro.

Las líneas con las que cuenta el sistema de Transmetro son las siguientes:

- Línea 1 (Centro Histórico): inicia en San Sebastián zona 1 y finaliza en Centro Cívico zona 1.
- Línea 2 (Asunción- Jocotenango): inicia en Hipódromo del Norte zona 2 y finaliza en San Sebastián zona 1.
- Línea 6 (18 calle – Proyectos): inicia en Proyectos zona 6 y finaliza en Plaza Barrios zona 1.
- Línea 7 (USAC Periférico – Roosevelt Sur): inicia en USAC periférico y finaliza en Cruz Roja.

- Línea 12 (Centra – Centro Cívico): inicia en Centra Sur y finaliza en Plaza Barrios zona 1.
- Línea 13 (Eje Central): inicia en Plaza Berlín zona 13 y finaliza en Plaza Barrios zona 1.
- Línea 18 (18 Calle - Atlántida): inicia en Atlántida zona 18 y finaliza en Plaza Barrios zona 1.
- Línea 21: inicia en el Trébol zona 12 y finaliza en Nimajuyú zona 21.

Según la municipalidad de Guatemala (2021), en su *Memoria de Labores 2020*, en el Sistema de Transmetro la línea 12 (Centra-Centro Cívico) es la que cuenta con más usuarios por día, con una cantidad promedio de 43 432 personas, siendo la línea con mayor afluencia y con mayor números de paradas en su recorrido, con un total de 35 paradas. La línea 2 (Asunción-Jocotenango) es la línea con menos usuarios al día, con un promedio de 312 y con una cantidad de 5 paradas en su recorrido.

4.13. Combustibles

Los combustibles son materiales que, por medio de la combustión, liberan energía luminosa y calorífica. Estos materiales pueden encontrarse en estado sólido, líquido y gaseoso. En Guatemala los más utilizados son el diésel y la gasolina, los cuales se describen a continuación.

4.13.1. Diésel

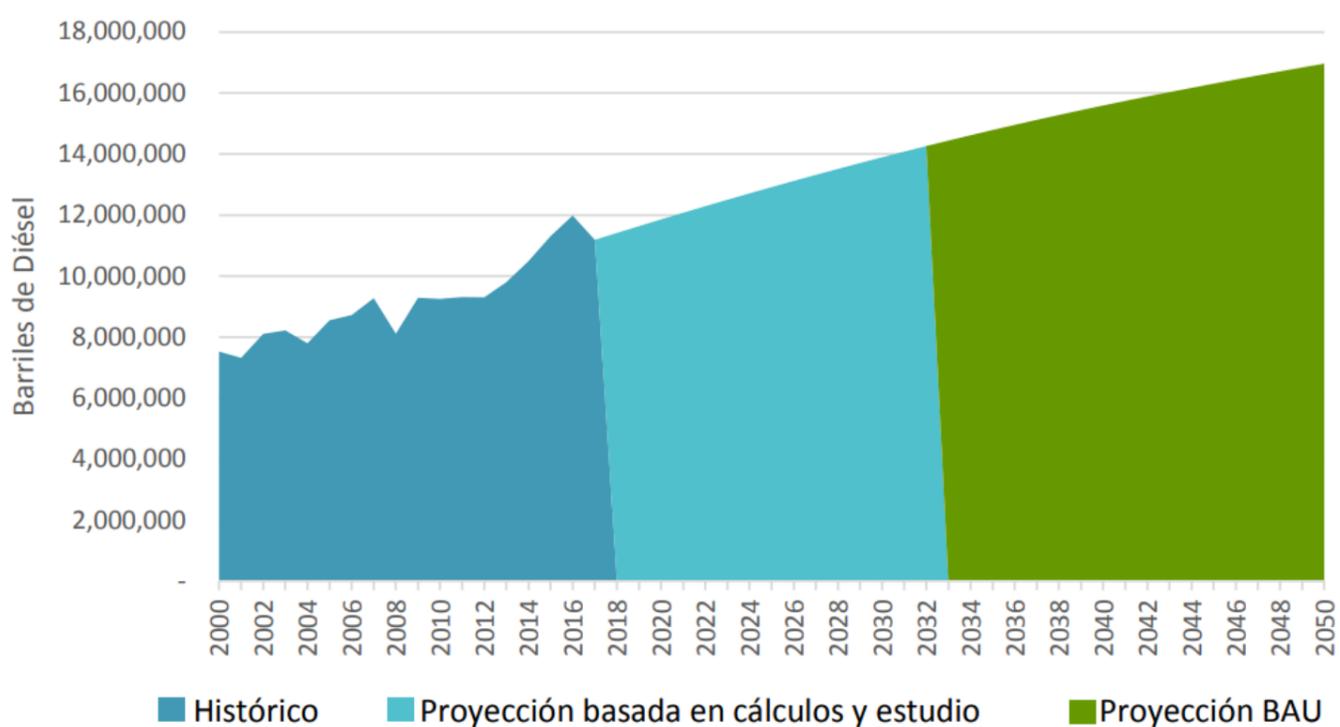
También conocido como gasóleo o *gasoil*, es obtenido de la destilación y purificación del petróleo crudo. El proceso inicia con el calentamiento del petróleo en una torre de craqueo, hasta el grado de ebullición, los vapores se condensan y los residuos son separados para hacer aceites pesados, fibras textiles o grasas.

Por último, se vuelve a calentar y en esta destilación se obtiene *fueloil*, que se deriva para la formación del gasóleo. En cada proceso de destilación es proporcionado un hidrocarburo más ligero que el anterior.

En Guatemala los motores diésel son de menor proporción en comparación con los motores de gasolina, la mayor proporción de motores diésel activos son de cilindrajes mayores, entre ellos camiones, buses y tráileres. La proyección de la demanda anual de diésel se relaciona con el crecimiento de la población económicamente activa en Guatemala.

Figura 7. **Proyección de demanda de diésel para el sector del transporte en Guatemala**

Gráfica 11: *Proyección de demanda de diésel para el sector transporte en Guatemala.*



Fuente: SAMAYOA CHÁVEZ, Cristian Iván; ALVAREZ PERÉN, Jesús Fernando; GUERRERO ISÉM, Giancarlo Alexander; LEPE MILIÁN, Fredy Alexander; LÓPEZ Y LÓPEZ, Marvin Yovani.

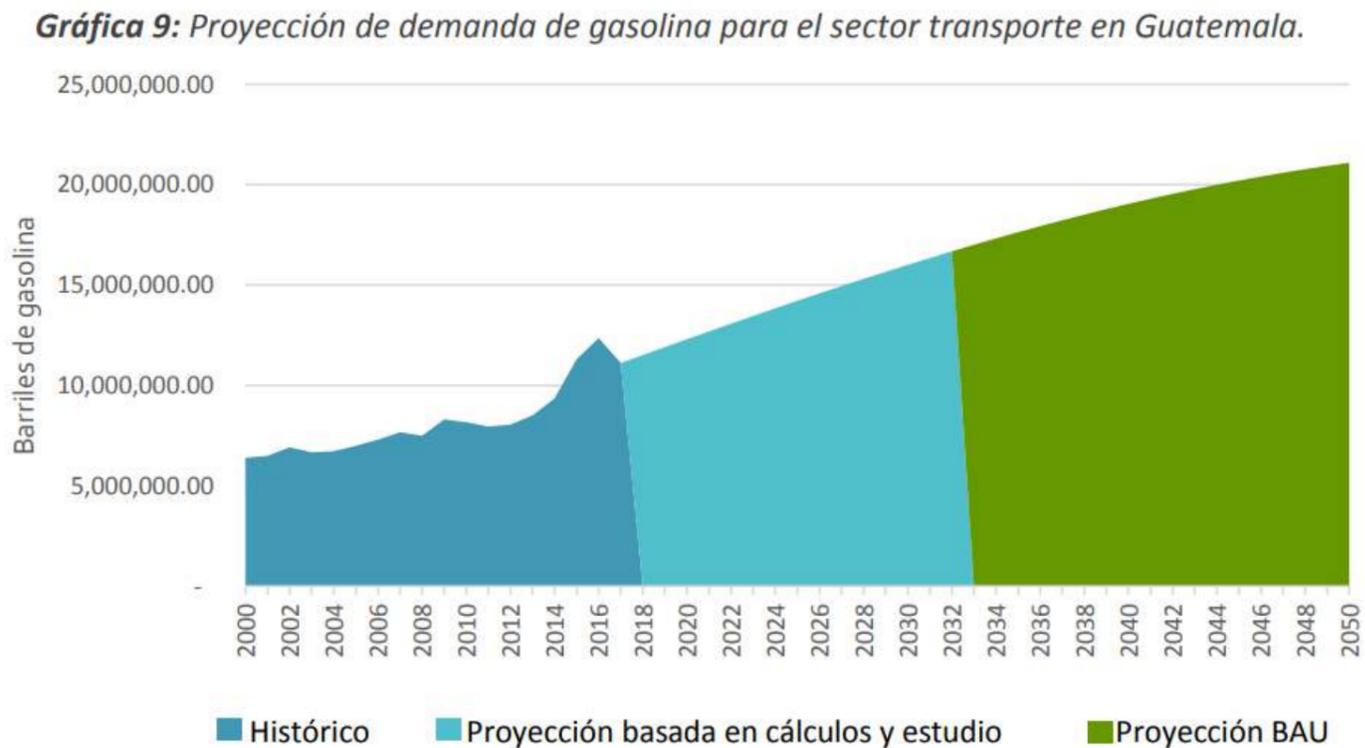
Política energética 2019-2050. p. 31.

4.13.2. Gasolina

Es un líquido compuesto por una mezcla de hidrocarburos provenientes del proceso de refinamiento del petróleo. Inicia cuando el petróleo crudo se calienta lentamente y se evaporan los hidrocarburos hasta llegar al punto de ebullición. Luego se obtienen fracciones que llegan a transformarse en otras por las reacciones químicas, después se obtiene la gasolina, la cual está orientada a mejorar su calidad como combustible, aumentando su índice de octanos. Por último, en un proceso de depuración se eliminan las impurezas, como los derivados sulfurados.

En Guatemala los vehículos con motores a base de gasolina representan la mayor participación en el parque vehicular, esto se debe al aumento de motocicletas en la ciudad. Debido a esta demanda de gasolina para el transporte, han aumentado las emisiones de GEI.

Figura 8. **Proyección de demanda de gasolina para el sector del transporte en Guatemala**



Fuente: SAMAYOA CHÁVEZ, Cristian Iván; ALVAREZ PERÉN, Jesús Fernando; GUERRERO ISÉM, Giancarlo Alexander; LEPE MILIÁN, Fredy Alexander; LÓPEZ Y LÓPEZ, Marvin Yovani.

Política energética 2019-2050. p. 34.

4.14. Metodología para el cálculo de emisiones de gases directos de efecto invernadero

En el cálculo de las emisiones de fuentes móviles se deben identificar las variables que influyen, los parámetros ya establecidos por el IPCC y analizar la información disponible. “Las fuentes móviles producen emisiones de gases directos de efecto invernadero de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y

óxido nitroso (N₂O), que son procedentes de la quema de diversos tipos de combustibles, así como otros contaminantes”²⁶.

En las directrices del IPCC para los inventarios nacionales de GEI, se indica que se debe definir la actividad principal de transporte a través de un cuadro que da la división detallada correspondiente al sector transporte, es decir, aviación civil, transporte terrestre, ferrocarriles, navegación marítima y fluvial y otro tipo de transporte. Ya determinada la actividad se selecciona el método para el cálculo de los gases directos de efecto invernadero, según la información que se haya obtenido.

4.14.1. Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)

“El IPCC tiene como acción principal realizar evaluaciones periódicas de los datos, modelaciones y estadísticas sobre el cambio climático en el mundo”,²⁷ obteniendo información científica, técnica y socioeconómica. Esta información es analizada y revisada para posteriormente de publicarla.

Desde la creación del IPCC se han elaborado una serie de informes de las evaluaciones de las causas del cambio climático, documentos técnicos, metodologías y directrices que sirven a los gobiernos como modelos para la elaboración de sus políticas climáticas. En 1990 se realizó el Primer Informe de Evaluación en donde se confirmaron los elementos científicos que causan preocupación acerca del cambio climático y se motivó a la Asamblea General de las Naciones Unidas a crear la Convención Marco sobre Cambio Climático

²⁶ JUÁREZ CALDERÓN, Marco Aurelio; CASTELLANOS, Edwin; FUENTES BRAEUNER, Gabriela. *Primer reporte de evaluación del conocimiento sobre cambio climático en Guatemala*. p. 11.

²⁷ Ministerio del Medio Ambiente. *Cambio Climático – 2014*. <https://mma.gob.cl/cambio-climatico/oficina-de-cambio-climatico/>. 31 de mayo de 2019.

(CMNUCC), que tiene como objetivo estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera llegando a un nivel en el que el sistema climático no se vea afectado por las emisiones de actividades antropogénicas, teniendo como ejes estratégicos la mitigación y adaptación.

El IPCC está formado por grupos de trabajo que contribuyen en la elaboración de los informes, estos grupos corresponden a: Grupo de Trabajo I, que está encargado de las bases físicas del cambio climático; Grupo de Trabajo II, que está encargado del impacto, adaptación y vulnerabilidad; Grupo de Trabajo III, que se encarga de la mitigación del cambio climático, y un Grupo Especial a cargo de los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero en los que se elaboran métodos para estimar las emisiones y remociones.

El IPCC define la adaptación al cambio climático como un proceso de ajustes al clima y sus efectos actuales o esperados. También menciona la adaptación en los sistemas humanos y naturales. En el primer sistema se trata de moderar o evitar los impactos negativos y de aprovechar los impactos beneficiosos, y en el segundo sistema se menciona las intervenciones del ser humano para que se puedan facilitar los ajustes al clima y los efectos esperados. Se han desarrollado planes nacionales de adaptación con el objetivo de facilitar el cumplimiento de la adaptación mediante esta herramienta, que sirve para enfrentar los efectos del cambio climático en cada sector, fortaleciendo las capacidades de adaptación y asegurando un desarrollo económico y social.

El IPCC menciona la mitigación como una intervención humana con el objetivo de reducir las fuentes de emisión y potenciar los sumideros de gases de efecto invernadero. Para que la mitigación sea efectiva, es importante la cooperación internacional, en donde se plantean otras cuestiones del cambio climático y se logra un aporte en el desarrollo, en la difusión, en la transferencia

de conocimientos y tecnologías ambientalmente funcionales. Se debe tomar en cuenta que las acciones para mitigación y adaptación dependerán de las circunstancias y capacidades de los países para abordar estos temas, estas acciones contribuyen con los objetivos sociales como salud, seguridad alimentaria, mejora de la calidad del medio ambiente, acceso a la energía y desarrollo sostenible.

A lo largo del tiempo, el IPCC ha desarrollado cinco *Informes de Evaluación del Cambio Climático*. El sexto informe se encuentra en desarrollo. Para la elaboración de los informes es necesario el aporte de los tres grupos de trabajo, ya que cada uno elabora un informe. Posteriormente se integra un documento final, el cual contiene una síntesis.

Tabla VII. **Informes de investigación del IPCC**

	Primer Informe de Evaluación 1990	Segundo Informe de Evaluación 1995	Tercer Informe de Evaluación 2001	Cuarto Informe de Evaluación 2001	Quinto Informe de Evaluación 2001
Grupo I de Trabajo	Evaluación científica del cambio climático	La ciencia del cambio climático	La base científica	Base de ciencia física	Bases físicas
Grupo II de Trabajo	Evaluación de los impactos del cambio climático	Análisis científico y técnico de impactos, adaptación y mitigación del cambio climático	Impactos, adaptación y vulnerabilidad	Impactos, adaptación y vulnerabilidad	Impactos, adaptación y vulnerabilidad
Grupo III de Trabajo	Estrategias de respuesta del IPCC	Las dimensiones económicas y sociales del cambio climático	Mitigación	Mitigación del cambio climático	Mitigación del cambio climático

Fuente: elaboración propia.

5. DISEÑO METODOLÓGICO

5.1. Variables

En los siguientes incisos se describen las diferentes variables.

5.1.1. Variables independientes

- Tipo de combustible
- Tipo de vehículo
- Tecnología de control de emisiones
- Factor de emisión
- Combustible consumido
- Distancia recorrida
- Condiciones de funcionamiento

5.1.2. Variables dependientes

- Emisión de CO₂
- Emisión de CH₄
- Emisión de N₂O.
- Emisión de CO_{2eq}

5.2. Delimitación de campo de estudio

El área de estudio es la determinación de las emisiones de los gases directos de efecto invernadero producidas por el Transmetro en 7 líneas que

cubren parte de la ciudad de Guatemala, desde el norte con parada en la 6 calle en zona 2; al sur con parada de Centra-sur en Villa Nueva; del este con parada en el Paraíso en zona 18, y al oeste con parada en Monte María en Villa Nueva.

5.3. Recursos humanos disponibles

- Investigadora: Eliette Saraí Pérez Neal
- Asesor: Ing. Agr. Carlos Vinicio Godínez Miranda
- Consultores externos

5.4. Recursos materiales disponibles

- Computadora.
- Calculadora.
- Unidad de información pública de la Municipalidad de Guatemala.
- Herramientas para el cálculo de emisiones proporcionado por las directrices del IPCC.
- Software GIS.

5.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

La metodología tiene un enfoque cuantitativo, ya que se determinó la distancia recorrida por cada línea y la cantidad de combustible utilizado, así como el enfoque cualitativo, ya que se realizan las estimaciones de los GEI a partir de los factores ya descritos.

5.6. Recolección y ordenamiento de la información

Como primera fase se analizó y estudió la metodología del IPCC y las herramientas disponibles para realizar esta investigación. Con ello se eligieron las ecuaciones a utilizar que más se adecuaban a la información disponible. Luego se delimitaron las líneas de Transmetro que serían analizadas, seleccionando 7 líneas (línea 1, línea 2, línea 6, línea 7, línea 12, línea 13 y línea 18), ya que incluyen las líneas más antiguas, las principales y más utilizadas. También se realizó un análisis con un periodo de tiempo del mes de enero a diciembre del 2021. Se obtuvo la información necesaria y se seleccionaron los factores de emisión por cada GEI, según las características del Transmetro para realizar los cálculos y obtener los resultados de las toneladas de emisiones emitidas por cada gas.

5.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Todos los datos que se obtuvieron se registraron en las hojas de cálculo de Excel formando tablas por cada GEI emitido por el Transmetro. Luego, mediante la metodología propuesta por el IPCC y los factores ya establecidos, se calcularon las emisiones de los gases de efecto invernadero producidas por el Transmetro.

5.7.1. Cálculo del dióxido de carbono (CO₂)

- Método de nivel 1

En este método se calculan las emisiones de CO₂ del transporte terrestre al multiplicar el combustible vendido por el factor de emisión, según se muestra en la ecuación 1.

$$Emisión = \sum_a [(Combustible_a) * EF_a]$$

Ecuación 1

Donde:

Emisión = emisiones de CO₂ (kg).

Combustible a = combustible vendido (TJ).

EF a = factor de emisión (kg/TJ). Es igual al contenido de carbono del combustible multiplicado por 44/12. *

a = tipo de combustible (por ejemplo: gasolina, diésel, gas natural, GLP, entre otros).

5.7.1.1. Combustible vendido

Se refiere al combustible utilizado. Para el cálculo de CO₂ se obtuvo la información del combustible consumido por el Transmetro mensualmente mediante la Unidad de Información Pública de la Municipalidad de Guatemala, que proporcionó los valores de las toneladas de combustible diésel consumido del mes de enero a diciembre del año 2021. Para el cálculo del combustible por líneas se realizó una estimación del combustible utilizado por cada unidad de Transmetro, mediante un estudio realizado sobre medición del consumo de combustible en un bus articulado marca Volvo modelo B10M, según el estudio presentado por Barbosa Rojas y Betancur Ramírez (2016) en la página 29 y tabla 13. Ellos obtuvieron un volumen de consumo de 1,42 galones en una distancia de 8,3 km. Estos datos se utilizaron para determinar el consumo de combustible según la distancia de cada línea del Transmetro.

5.7.2. Cálculo del metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O)

Para estimar las emisiones de metano y óxido nitroso de los vehículos es posible usar el método que se basa en los kilómetros recorridos por el vehículo (KRV).

- Método de nivel 3

En este método se calculan las emisiones multiplicando los factores de emisión por niveles de actividad del vehículo, para cada subcategoría de vehículo y posible tipo de carretera. Las subcategorías de vehículos se basan en el tipo, la antigüedad y la tecnología de control de emisiones del vehículo. La actividad del vehículo se refiere a los kilómetros recorridos por el vehículo.

$$Emisión = \sum_{a,b,c,d} [Distancia_{a,b,c,d} * EF_{a,b,c,d}] + \sum_{a,b,c,d} C_{a,b,c,d}$$

Ecuación 2

Donde:

Emisión = emisión o CH₄ o N₂O (kg).

EF a,b,c,d = factor de emisión (kg/km).

Distancia a,b,c,d = distancia recorrida (KRV) durante la fase de funcionamiento térmicamente estabilizado del motor, para una actividad de fuente móvil dada (km).

C a,b,c,d = emisiones durante la fase de calentamiento (arranque en frío) (kg).

a = tipo de combustible a (por ejemplo: diésel, gasolina, gas natural, GLP).

b = tipo de vehículo.

c = tecnología de control de emisiones (como conversor catalítico no controlado, entre otros).

d = condiciones de funcionamiento (por ejemplo: tipo de carretera urbana o rural, clima u otros factores ambientales).

5.7.2.1. Distancia recorrida

Es la distancia que recorre cada unidad de Transmetro en cada una de las líneas al completar una vuelta tomando en cuenta una parada de inicio. Para obtener el valor de los km recorridos se utilizó la herramienta de GIS y mediante la información de las unidades promedio se multiplicó este valor por la distancia de cada línea, asumiendo que cada unidad de Transmetro realiza únicamente una vuelta en la línea. La multiplicación de estos valores da como resultado la distancia total por cada línea de Transmetro.

5.7.2.2. Emisión durante la fase de calentamiento

En la elección de los factores de emisión para la fase de calentamiento se tomaron en cuenta las características del Transmetro. Este factor de emisión se debe multiplicar por la distancia que recorre la unidad de Transmetro en la fase de calentamiento. Estos factores son proporcionados por las directrices del IPCC, en las cuales se muestran los valores en mg/km. Para obtener el resultado de la emisión durante la fase de calentamiento se estimó que la fase de calentamiento dura un kilómetro, ya que el Transmetro realiza paradas continuas, pero no muy prolongadas.

5.7.2.3. Emisiones de CO_{2eq}

Estas emisiones se calcularon multiplicando la emisión de los GEI (CO₂, CH₄ y N₂O) por el potencial de calentamiento global (PCG) de cada gas, en un plazo de tiempo de 100 años, obteniendo una medida universal para cada gas de CO_{2eq} para comparar las emisiones de los GEI calculados.

5.7.3. Tablas de datos

En las siguientes tablas se detalla la información base para la realización del estudio:

Tabla VIII. **Combustible vendido**

CONSUMO DE DIÉSEL DEL TRANSMETRO	
Mes	Galones
ene-21	136 791
feb-21	131 256
mar-21	148 956
abr-21	134 175
may-21	145 223
jun-21	122 936
jul-21	169 983
ago-21	146 516
sep-21	139 795
oct-21	146 593
nov-21	144 985
dic-21	145 221

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Unidades de Transmetro por línea**

Líneas de Transmetro	Unidades de Transmetro
Línea 1	52
Línea 2	52
Línea 6	52
Línea 7	30
Línea 12	85
Línea 13	52
Línea 18	85

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Distancia recorrida por línea**

Líneas de Transmetro	Distancia recorrida (Km)
Línea 1	4,59
Línea 2	3,38
Línea 6	12,98
Línea 7	24,26
Línea 12	22,77
Línea 13	14,96
Línea 18	12,67

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Potencial de calentamiento mundial a 100 años relacionados con el CO₂**

Gas	Potencial de calentamiento global
Dióxido de carbono (CO ₂)	1
Metano (CH ₄)	25
Óxidos nitroso (N ₂ O)	298

Fuente: CAR; CAEM. *Guía metodológica para el cálculo de la huella de carbono corporativa a nivel sectorial*. <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ade1b0319769.pdf>. Consulta: 19 de mayo de 2019.

Tabla XII. Factores de emisión de CO₂ por defecto del transporte terrestre y rango de incertidumbre

Tipo de combustible	Por defecto (Kg/TJ)	Inferior (Kg/TJ)	Superior (Kg/TJ)
Gasolina para motores	69 300	67 500	73 000
Gas/Diesel Oil	74 100	72 600	74 800
Gases licuados de petróleo	63 100	61 600	65 600
Gas natural comprimido	56 100	54 300	58 300

Fuente: IPCC. *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 2. p. 3,16.*

Tabla XIII. Factores de emisión de CH₄ y N₂O del transporte terrestre y rangos de incertidumbre

Tipo de combustible/Categoría representativa de vehículo	CH ₄ (Kg/TJ)			N ₂ O (Kg/TJ)		
	Por defecto	Inferior	Superior	Por defecto	Inferior	Superior
Gasolina para motores-sin controlar	33	9,6	110	3,2	1,0	11
Gasolina para motores-catalizador de oxidación	25	7,5	86	8,0	2,6	24
Gas/Diesel Oil	3,9	1,6	10	3,9	1,3	12
Gases licuados de petróleo	62	na	na	0,2	na	na

Fuente: IPCC. *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 2. p. 3,16.*

Tabla XIV. **Factores de emisión para los vehículos diésel y gasolina europeos (mg/km) modelo Copert IV**

Tipo de vehículo	Combustible	Tecnología de vehículo/ Clase	Factores de emisión de CH ₄ (mg/Km)		Factores de emisión de N ₂ O(mg/Km)	
			Urbano		Urbano	
			Frío	Caliente	Frío	Caliente
Camión pesado y autobús	Gasolina	Todas las tecnologías	140		6	
	Diesel	GVW< 16t	85		30	
		GVW> 16t	175		30	
		Autobuses urbanos y autocares	175		30	
	GNC	pre-Euro 4	n. a		5400	
		Euro 4 y posterior (incl. EEV)	n. a		900	

Fuente: IPCC. *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 2. p. 3,16.*

Tabla XV. **Factores de emisión para los vehículos diésel y gasolina europeos (mg/km) modelo Copert IV**

Tipo de vehículo	Tecnología de control de emisiones	CH ₄		N ₂ O	
		En marcha (caliente) (mg/km)	Arranque en frío (mg/arranque)	En marcha (caliente) (mg/km)	Arranque en frío (mg/arranque)
Vehículo pesado a gasolina	Vehículo de bajas emisiones	14	94	1	120
	Catalizador tridireccional avanzado	15	163	52	409
	Catalizador tridireccional inicial	121	183	88	313
	Catalizador de oxidación	111	215	55	194
	Catalizador de no oxidación	239	147	20	70
	Vehículo pesado a gasolina sin controlar	263	162	21	74
Vehículo pesado diésel	Todos: avanzado, moderado o sin controlar	4	-11	3	-2

Fuente: IPCC. *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 2. p. 3,16.*

5.8. Métodos y modelos de los datos según tipo de variables

En el estudio se recopilaron los datos sobre las características del Transmetro, así como las otras variables necesarias para el cálculo de las emisiones de gases. Realizando una estadística descriptiva con representación de los datos recabados, por medio de tablas y gráficos, se calculó el volumen de gases por cada una de las líneas de estudio.

5.9. Programas utilizados para análisis de datos

Los programas que se utilizaron fueron:

- Microsoft Word 2017: programa utilizado para la elaboración y diseño de la investigación.
- Microsoft Excel 2017: programa utilizado para el ordenamiento de la información obtenida y desarrollar los cálculos requeridos.
- Sistema de Información Geográfica (GIS): programa que ayudó a determinar la distancia recorrida por cada una de las líneas de Transmetro y la representación del área que ocupan estas líneas.

6. RESULTADOS

6.1. Emisiones mensuales de CO₂ producidas por el Transmetro

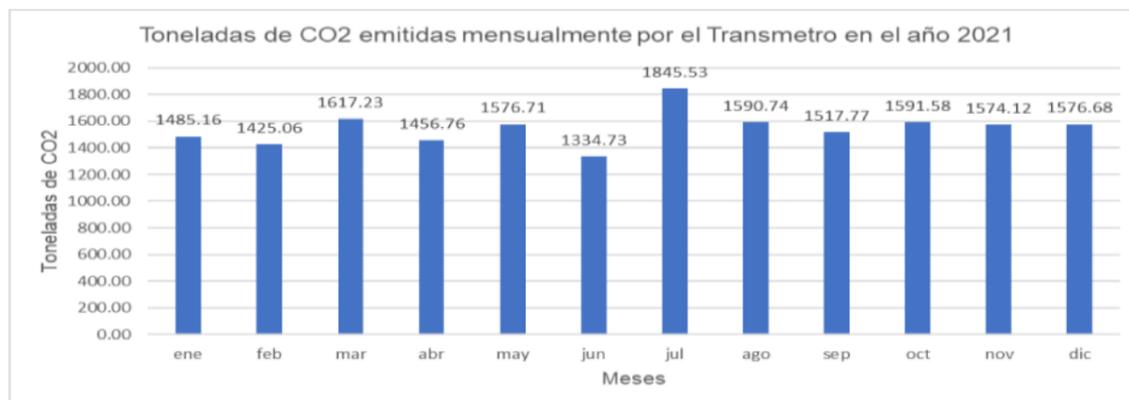
En la tabla XVI se presenta la estimación de toneladas de CO₂ emitidas mensualmente durante el año 2021 por todas las líneas de Transmetro, utilizando el combustible consumido mensual y un factor de emisión por defecto.

Tabla XVI. **Toneladas de CO₂ emitidas mensualmente por el Transmetro en el año 2021**

Meses	Emisión mensual de CO₂ en el año 2021 (Ton)
Enero	1 485,16
Febrero	1 425,06
Marzo	1 617,23
Abril	1 456,75
Mayo	1 576,70
Junio	1 334,73
Julio	1 845,53
Agosto	1 590,74
Septiembre	1 517,77
Octubre	1 591,58
Noviembre	1 574,12
Diciembre	1 576,68
Total, anual	18 592,08

Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Toneladas de CO₂ emitidas mensualmente por el Transmetro en el año 2021**



Fuente: elaboración propia.

6.2. Emisiones de CO₂ por cada línea del Transmetro

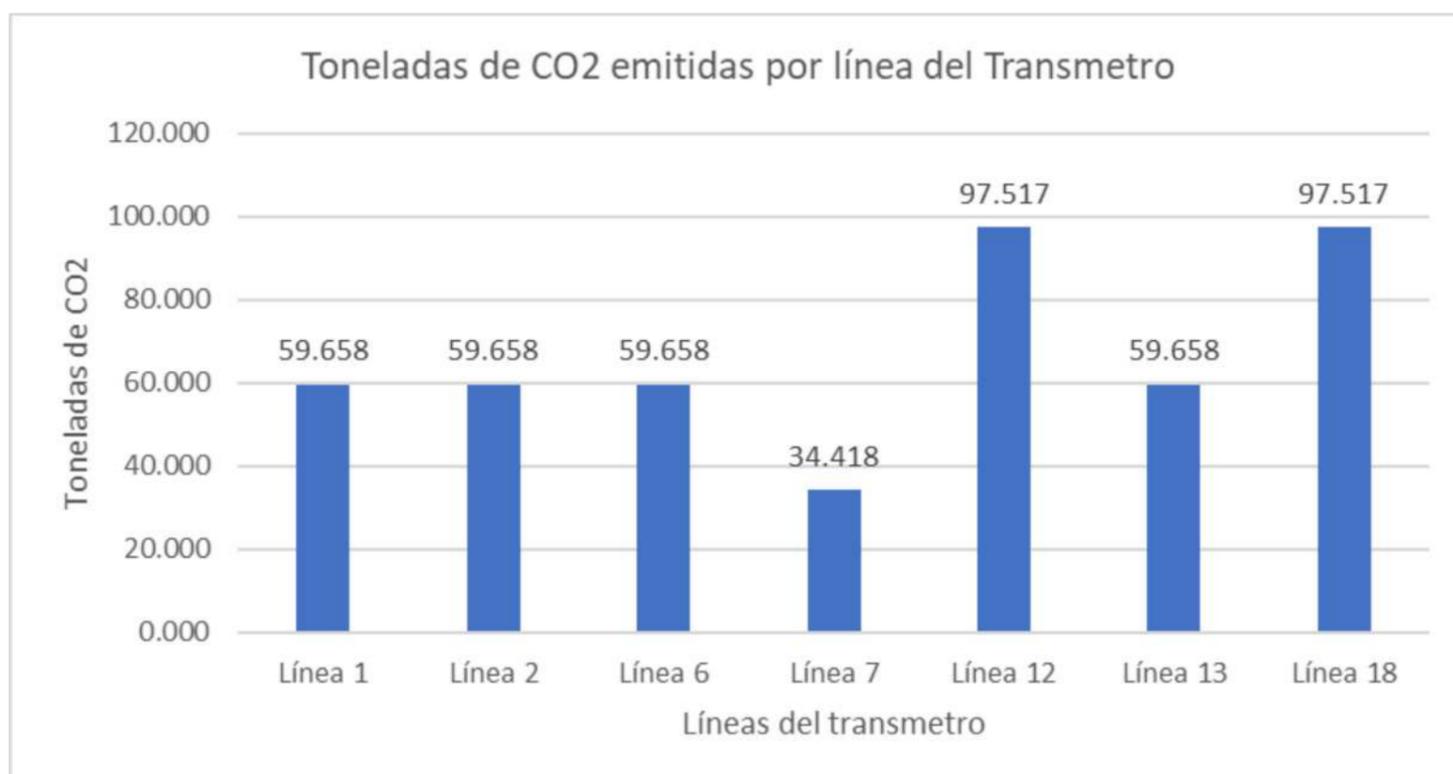
En la tabla XVII se presenta la estimación de las toneladas de CO₂ emitidas por las líneas, tomando en cuenta un factor de emisión por defecto, la cantidad de unidades por línea y asumiendo que por kilómetro se consume 0,18 galones.

Tabla XVII. **Toneladas de CO₂ emitidas por cada línea del Transmetro**

Líneas del Transmetro	Emisión de CO ₂ por líneas (Ton)
Línea 1	59,66
Línea 2	59,66
Línea 6	59,66
Línea 7	34,42
Línea 12	97,52
Línea 13	59,66
Línea 18	97,52

Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Toneladas de CO₂ emitidas por cada línea del Transmetro**



Fuente: elaboración propia.

6.3. **Emisiones mensuales de CH₄ producidas por el Transmetro**

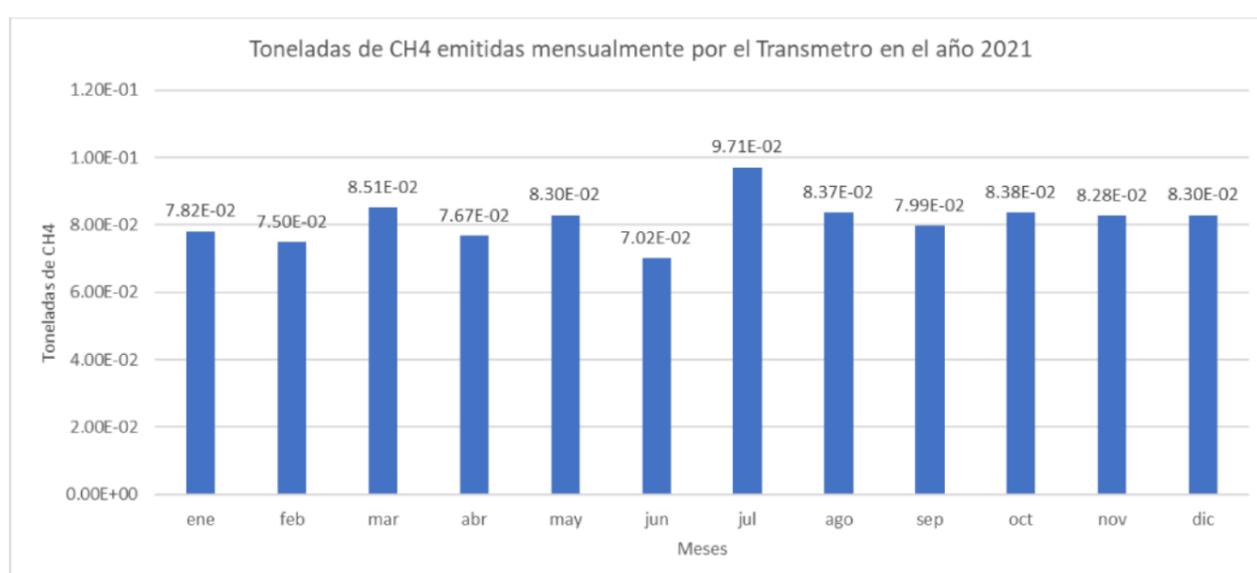
En la tabla XVIII se presenta la estimación de las toneladas de CH₄ emitidas mensualmente durante el año 2021 por todas las líneas de Transmetro, utilizando el combustible vendido mensual y un factor de emisión por defecto.

Tabla XVIII. **Toneladas de CH₄ emitidas mensualmente por el Transmetro en el año 2021**

Meses	Emisión mensual de CH₄ en el año 2021 (Ton)
Enero	7,82E-02
Febrero	7,50E-02
Marzo	8,51E-02
Abril	7,67E-02
Mayo	8,30E-02
Junio	7,02E-02
Julio	9,71E-02
Agosto	8,37E-02
Septiembre	7,99E-02
Octubre	8,38E-02
Noviembre	8,28E-02
Diciembre	8,30E-02
Total, anual	9,79 E-01

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Gráfica de toneladas de CH₄ emitidas mensualmente por el Transmetro en el año 2021**



Fuente: elaboración propia.

6.4. Emisiones de CH₄ por cada línea del Transmetro

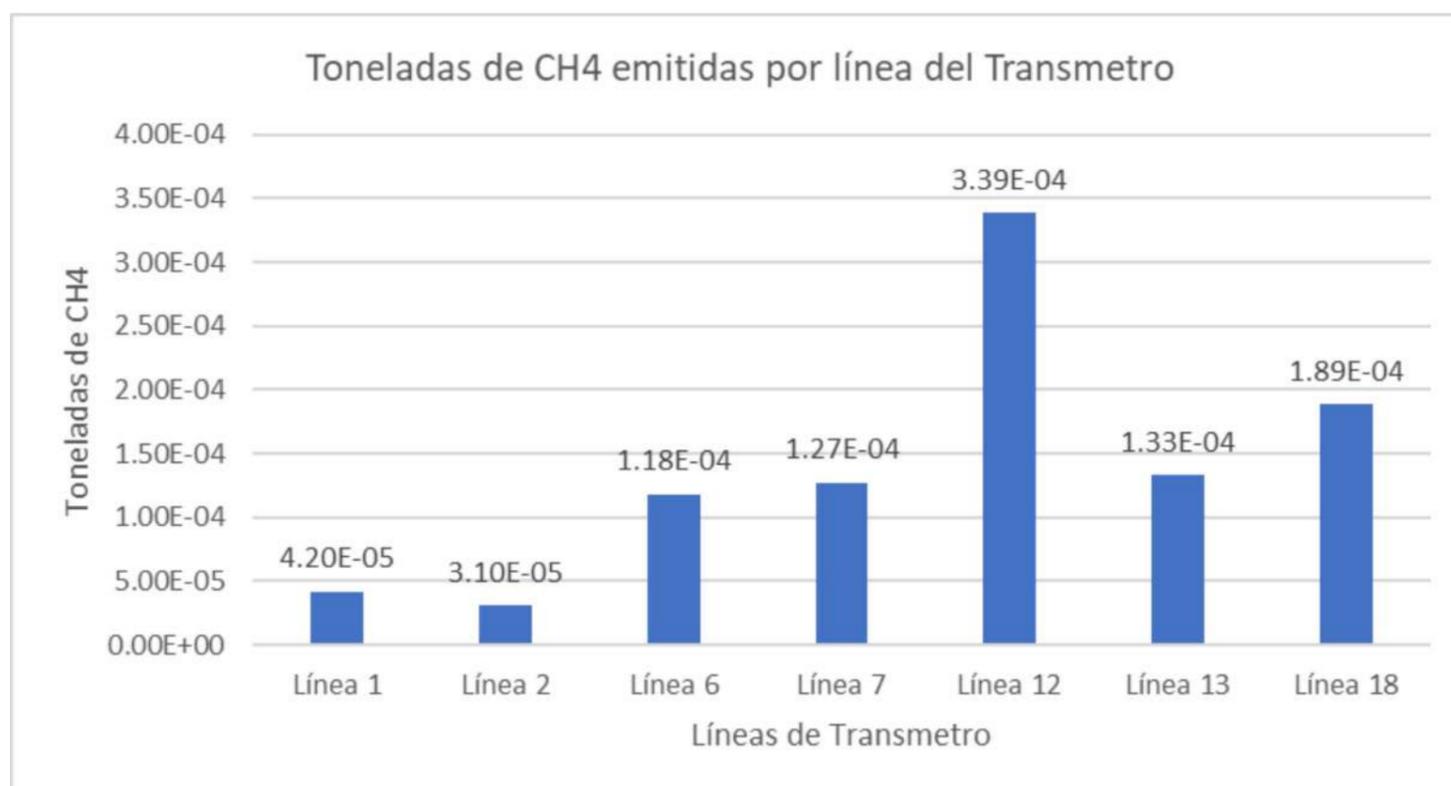
En la tabla XIX se presenta la estimación de las toneladas de CH₄ emitidas por cada línea de Transmetro, utilizando la distancia total recorrida en cada línea, un factor de emisión por defecto y un factor de emisión en la fase del calentamiento.

Tabla XIX. **Toneladas de CH₄ por cada línea del Transmetro ordenada de menor a mayor**

Líneas del Transmetro	Emisión de CH₄ por líneas (Ton)
Línea 2	3,10E-05
Línea 1	4,20E-05
Línea 6	1,18E-04
Línea 7	1,27E-04
Línea 13	1,33E-04
Línea 18	1,89E-04
Línea 12	3,39E-04

Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Toneladas de CH₄ emitidas por cada línea del Transmetro



Fuente: elaboración propia.

6.5. Emisiones mensuales de N₂O producidas por el Transmetro

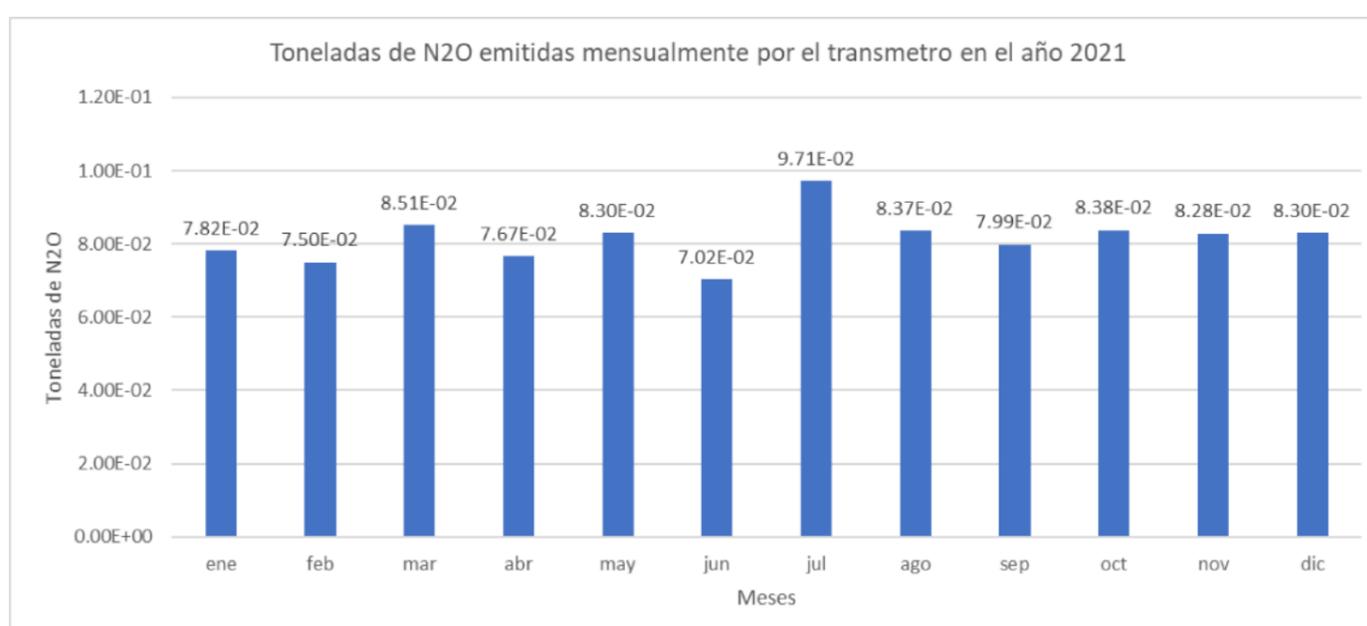
En la tabla XX se presenta la estimación de toneladas de N₂O emitidas mensualmente durante el año 2021 por todas las líneas de Transmetro, utilizando el combustible vendido mensual y un factor de emisión por defecto.

Tabla XX. **Toneladas de N₂O emitidas mensualmente por el Transmetro en el año 2021**

Meses	Emisión mensual de N₂O en el año 2021 (Ton)
Enero	0,0782
Febrero	0,0750
Marzo	0,0851
Abril	0,0767
Mayo	0,0830
Junio	0,0702
Julio	0,0971
Agosto	0,0837
Septiembre	0,0799
Octubre	0,0838
Noviembre	0,0828
Diciembre	0,0830
Total, anual	9,79E-01

Fuente: elaboración propia.

Figura 13. **Toneladas de N₂O emitidas mensualmente por el Transmetro en el año 2021**



Fuente: elaboración propia.

6.6. Emisiones de N₂O por cada línea del Transmetro

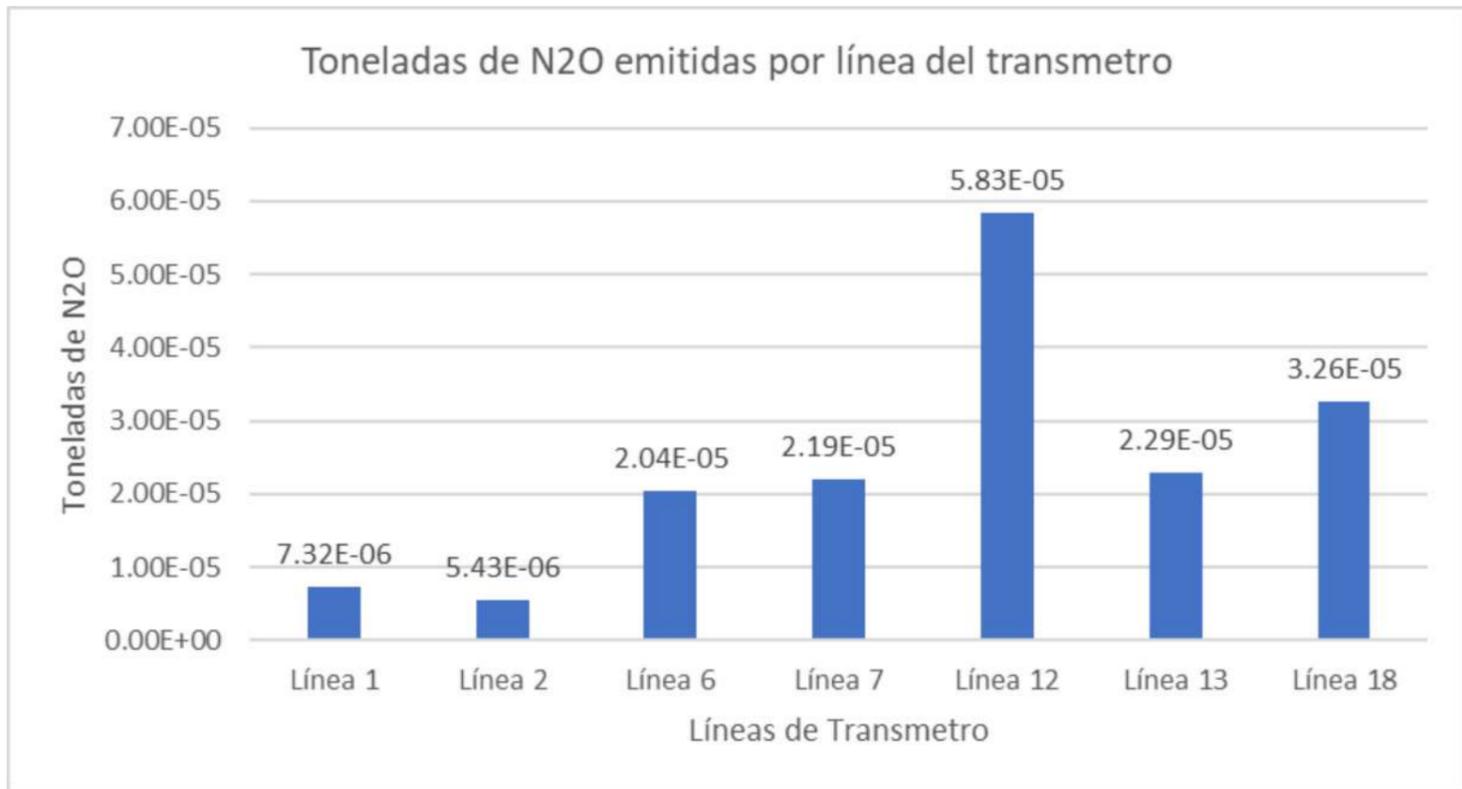
En la tabla XXI se presenta la estimación de las toneladas de N₂O emitidas por cada línea de Transmetro, utilizando la distancia total recorrida por cada línea, un factor de emisión por defecto y un factor de emisión en la fase del calentamiento.

Tabla XXI. **Toneladas de N₂O emitidas por cada línea del Transmetro ordenada de menor a mayor**

Líneas del Transmetro	Emisión de N₂O por líneas (Ton)
Línea 2	5,43E-06
Línea 1	7,32E-06
Línea 6	2,04E-05
Línea 7	2,19E-05
Línea 13	2,29E-05
Línea 18	3,26E-05
Línea 12	5,83E-05

Fuente: elaboración propia.

Figura 14. **Gráfica de toneladas de N₂O emitidas por cada línea del Transmetro**



Fuente: elaboración propia.

6.7. Emisiones totales mensuales por el Transmetro

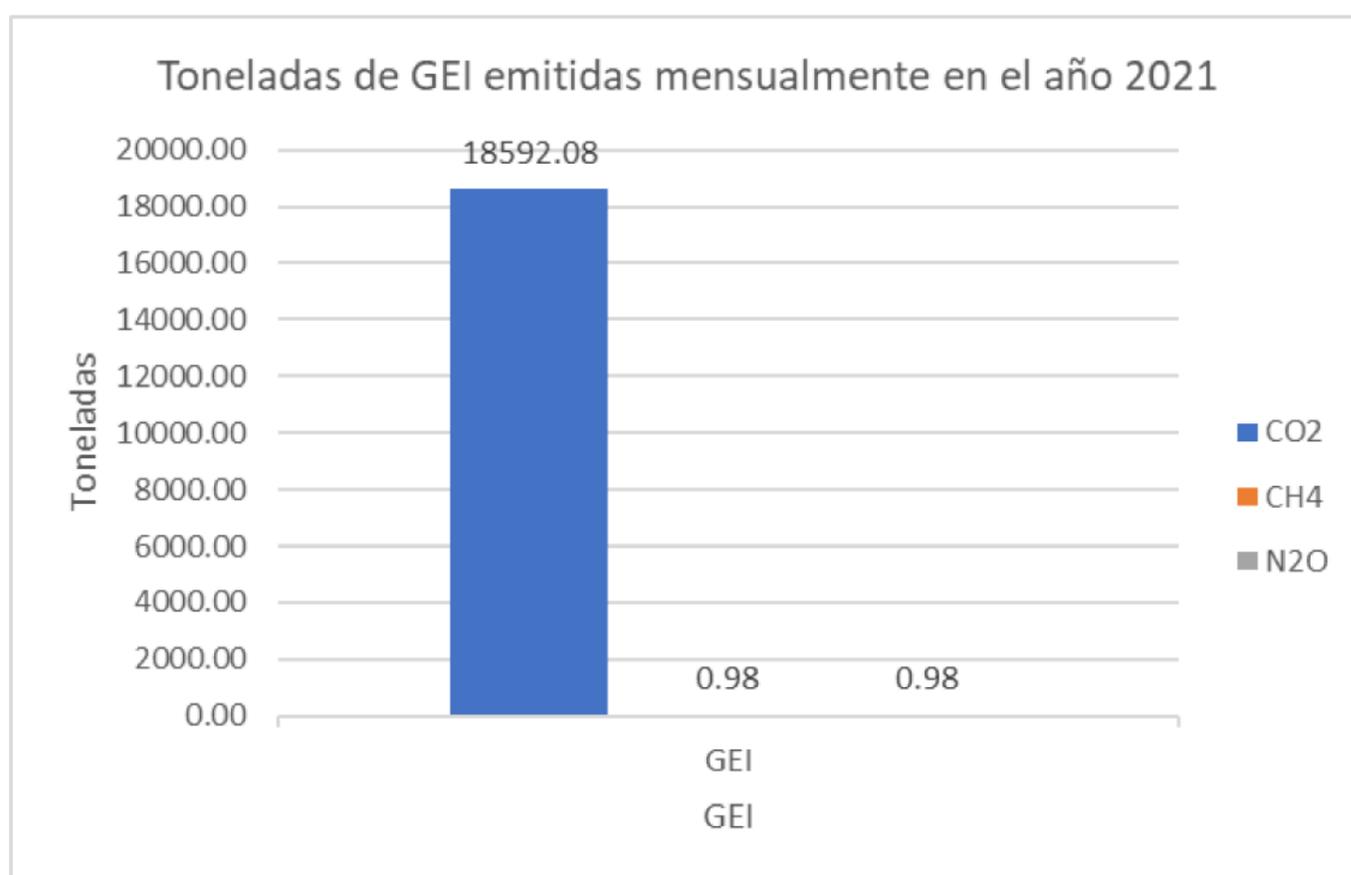
En la tabla XXII se presenta la estimación de las toneladas de CO₂, CH₄ y N₂O emitidas mensualmente durante el año 2021 y el total de cada uno de los gases que representa la cantidad de emisiones producidas en el año 2021.

Tabla XXII. **Toneladas totales emitidas mensualmente por el Transmetro en el año 2021**

Meses	Emisión mensual de CO₂ (Ton) en el año 2021	Emisión mensual CH₄ (Ton) en el año 2021	Emisión mensual N₂O(Ton) en el año 2021
Enero	1 485,16	7,82E-02	7,82E-02
Febrero	1 425,06	7,50E-02	7,50E-02
Marzo	1 617,23	8,51E-02	8,51E-02
Abril	1 456,75	7,67E-02	7,67E-02
Mayo	1 576,70	8,30E-02	8,30E-02
Junio	1 334,73	7,02E-02	7,02E-02
Julio	1 845,53	9,71E-02	9,71E-02
Agosto	1 590,74	8,37E-02	8,37E-02
Septiembre	1 517,77	7,99E-02	7,99E-02
Octubre	1 591,58	8,38E-02	8,38E-02
Noviembre	1 574,12	8,28E-02	8,28E-02
Diciembre	1 576,68	8,30E-02	8,30E-02
Total	18 592,08	0,98	0,98

Fuente: elaboración propia.

Figura 15. **Toneladas totales emitidas mensualmente por el Transmetro en el año 2021**



Fuente: elaboración propia.

6.8. Emisiones totales mensuales de CO_{2eq} por el Transmetro

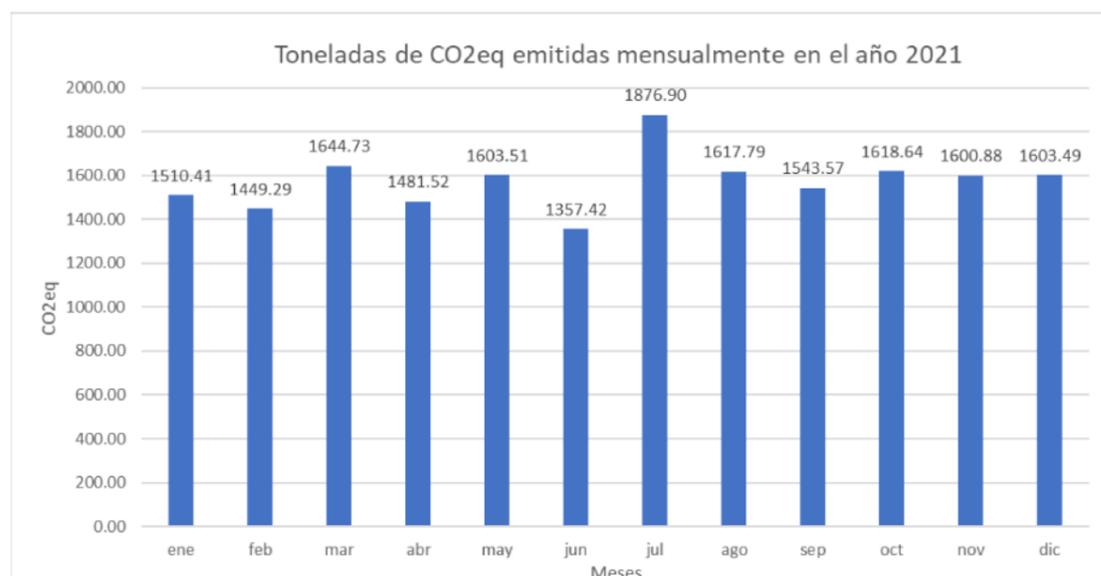
En la tabla XXIII se presenta la estimación de las toneladas de CO_{2eq} de cada uno de los GEI emitidas mensualmente por el Transmetro durante el año 2021, según el potencial de calentamiento de cada gas a 100 años.

Tabla XXIII. **Toneladas totales de CO_{2eq} emitidas mensualmente por el Transmetro en el año 2021**

Meses	CO_{2eq} en el año 2021 (ton)
Enero	1 510,41
Febrero	1 449,29
Marzo	1 644,73
Abril	1 481,52
Mayo	1 603,51
Junio	1 357,42
Julio	1 876,90
Agosto	1 617,79
Septiembre	1 543,57
Octubre	1 618,64
Noviembre	1 600,88
Diciembre	1 603,49
Total anual	18 908,14

Fuente: elaboración propia.

Figura 16. **Gráfica de las toneladas totales de CO_{2eq} emitidas por el Transmetro en el año 2021**



Fuente: elaboración propia.

6.9. Emisiones totales por cada línea del Transmetro

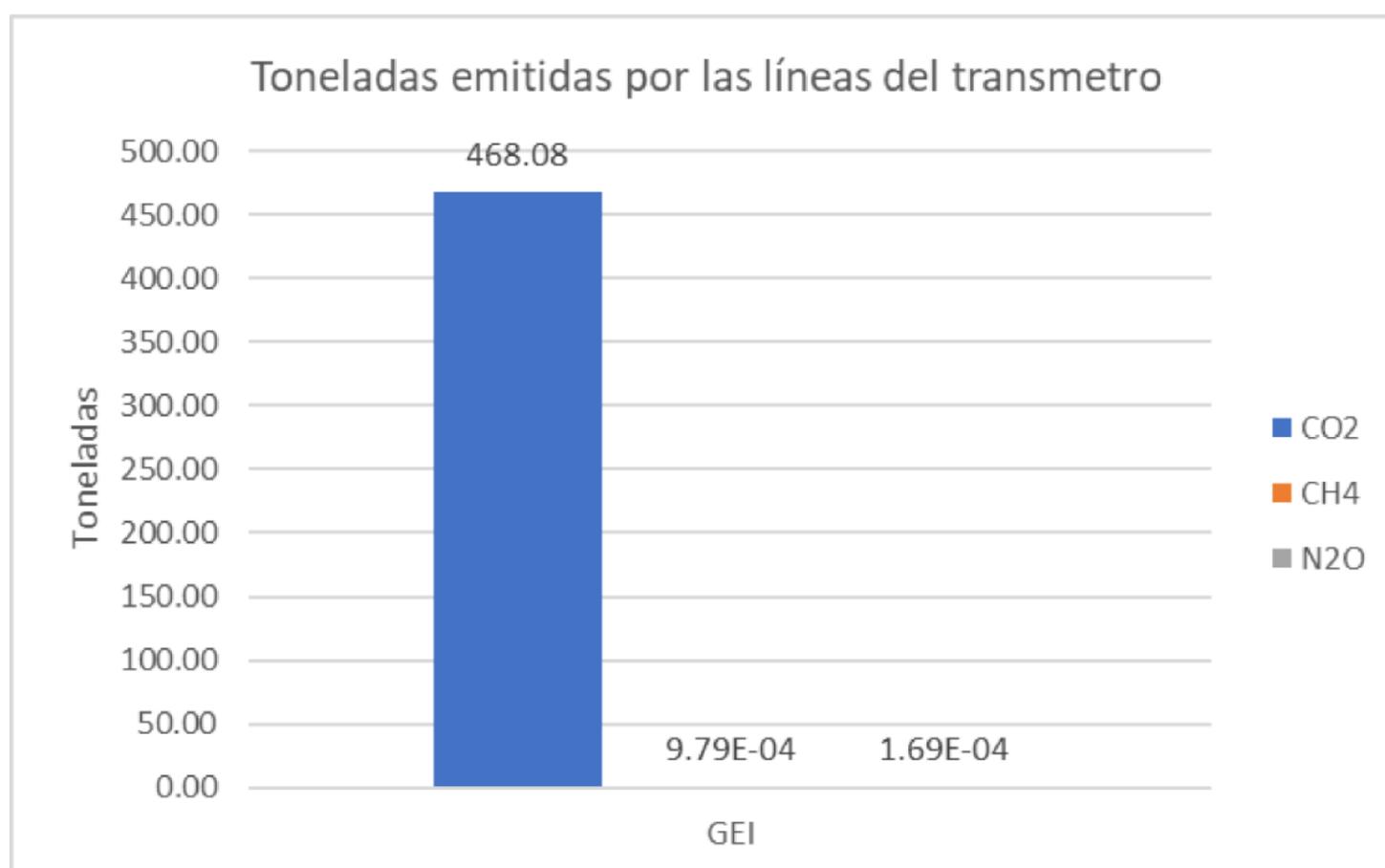
En la tabla XXIV se presenta la estimación de las toneladas de CO₂, CH₄ y N₂O emitidas por cada línea de Transmetro y el total representa las toneladas de cada uno de los gases producidas por todas las líneas.

Tabla XXIV. **Toneladas totales de GEI emitidas por cada línea del Transmetro**

Líneas de Transmetro	Emisión por líneas CO₂ (Ton)	Emisión por líneas CH₄ (Ton)	Emisión por líneas N₂O (Ton)
Línea 1	0,12	4,20E-05	7,32E-06
Línea 2	0,09	3,10E-05	5,43E-06
Línea 6	0,34	1,18E-04	2,04E-05
Línea 7	0,36	1,27E-04	2,19E-05
Línea 12	0,97	3,39E-04	5,83E-05
Línea 13	0,39	1,33E-04	2,29E-05
Línea 18	0,54	1,89E-04	3,26E-05
Total	2,81	9,79E-04	1,69E-04

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. **Gráfica de las toneladas de GEI totales emitidas por las líneas del Transmetro**



Fuente: elaboración propia.

6.10. Emisiones totales de CO_{2eq} por cada línea del Transmetro

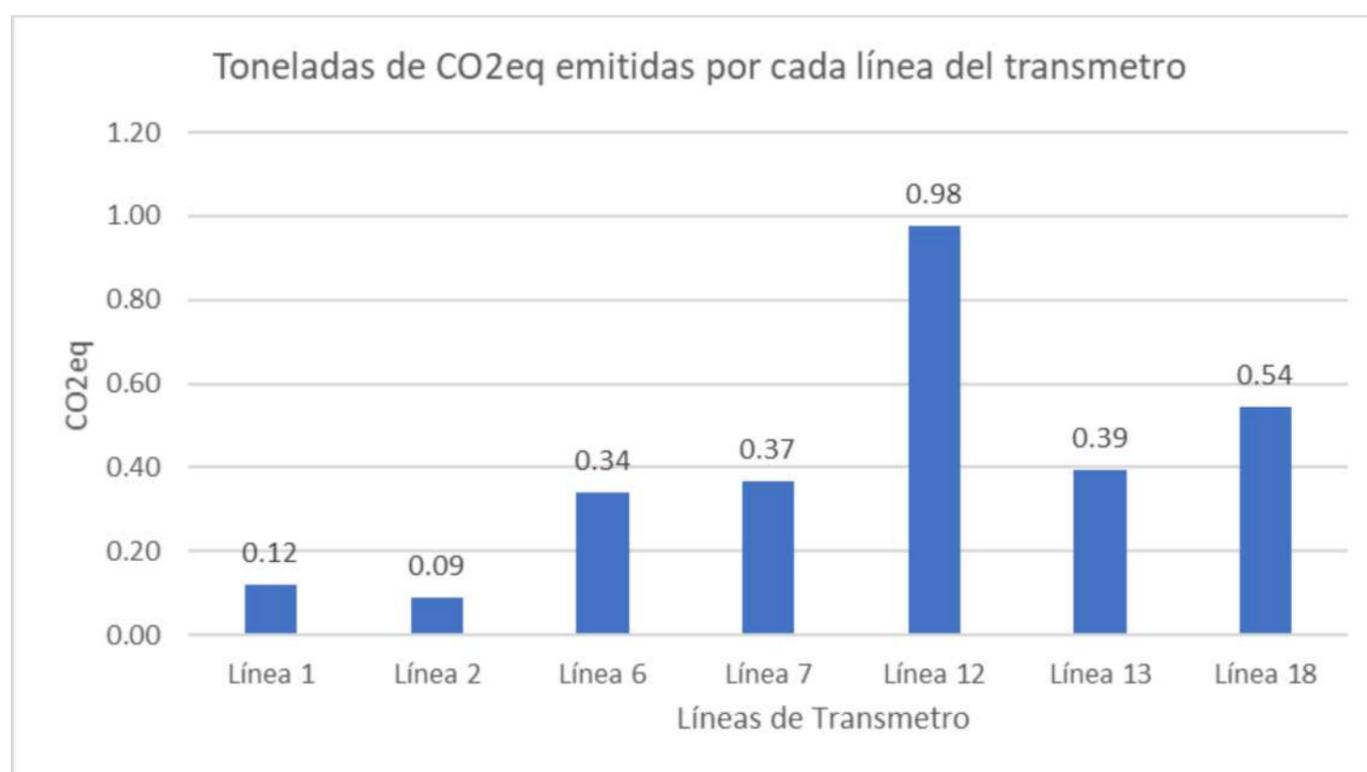
En la tabla XXV se presenta la estimación de las toneladas de CO_{2eq} de cada uno de los GEI emitidas mensualmente por el Transmetro durante el año 2021, según el potencial de calentamiento de cada gas a 100 años.

Tabla XXV. **Toneladas totales de CO_{2eq} emitidas por cada línea del Transmetro**

Líneas de Transmetro	Emisiones de CO_{2eq} (ton)
Línea 1	0,12
Línea 2	0,09
Línea 6	0,33
Línea 7	0,36
Línea 12	0,95
Línea 13	0,38
Línea 18	0,53
Total	2,75

Fuente: elaboración propia.

Figura 18. **Gráfica de toneladas totales de CO_{2eq} emitidas por cada línea del Transmetro**



Fuente: elaboración propia.

6.11. Emisiones mensuales de CO_{2eq} producidas por el Transmetro con otro tipo de combustible

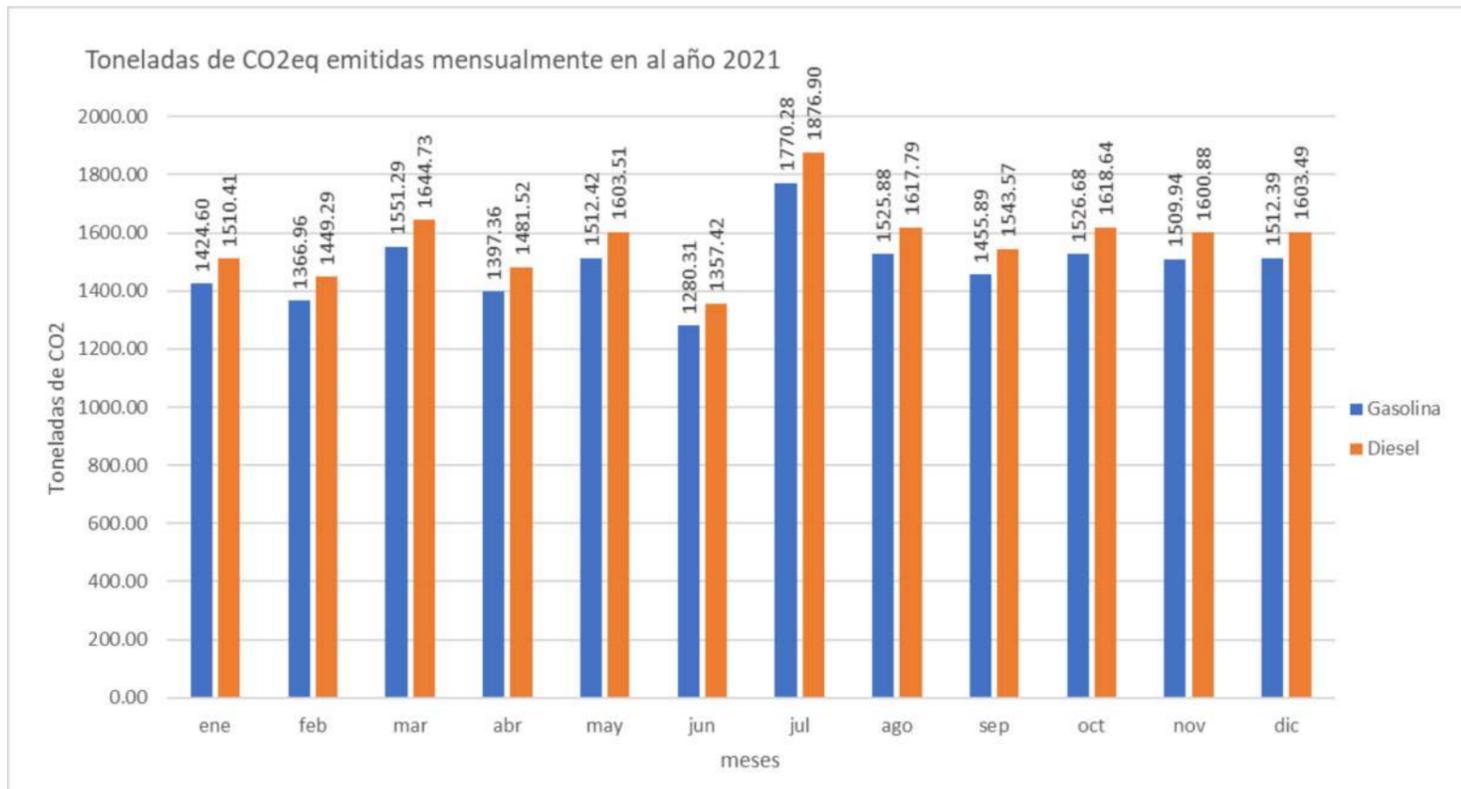
En la tabla XXVI se presenta la estimación de las toneladas de emisión de CO_{2eq} emitidas mensualmente durante el año 2021, utilizando otro tipo de combustible (gasolina), con el mismo dato del combustible consumido en el mes.

Tabla XXVI. **Toneladas de CO_{2eq} emitidas mensualmente con combustible gasolina en el año 2021**

Meses	CO_{2eq} en el año 2021 (Ton)
Enero	1 424,60
Febrero	1 366,96
Marzo	1 551,29
Abril	1 397,36
Mayo	1 512,42
Junio	1 280,31
Julio	1 770,28
Agosto	1 525,88
Septiembre	1 455,89
Octubre	1 526,68
Noviembre	1 509,94
Diciembre	1 512,39
Total anual	17 833,99

Fuente: elaboración propia.

Figura 19. Comparación de emisiones de CO_{2eq} mensualmente en el año 2021



Fuente: elaboración propia.

7. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

A nivel general se pretendió calcular los gases directos de efecto invernadero emitidos por las siete líneas de Transmetro mediante las directrices del IPCC, determinando las toneladas emitidas de CO₂, CH₄ y N₂O mensualmente y por cada línea del Transmetro, como se representa en la tabla XXII y tabla XXIV, respectivamente. Según estos resultados, de los tres gases el de mayor emisión es el CO₂ debido a que en el proceso de combustión móvil se produce la oxidación del carbono de los combustibles, teniendo presencia de dióxido de carbono y en pequeñas proporciones metano y óxido nitroso. Esto es congruente con los resultados, ya que en las tablas el CH₄ y N₂O representan valores pequeños de emisión en comparación a las toneladas emitidas por CO₂.

En la tabla XXII se presenta un inventario de las emisiones de los tres gases de efecto invernadero de los meses de enero a diciembre del año 2021 producidos por el Transmetro. Estas emisiones se relacionan con factores como el tipo de combustible consumido, para el Transmetro se utiliza diésel ULSD y el factor de emisión del combustible, que representa el contenido del carbono del combustible. Los resultados están basados en el registro de consumo de combustible de todas las líneas y de cada unidad de Transmetro de cada línea por mes, obteniendo como resultado las toneladas de GEI para el año 2021 de 18 592,08 toneladas de CO₂, 0,98 toneladas de CH₄ y 0,98 toneladas de N₂O.

En la tabla XXIV se presentan los resultados de los GEI emitidos por cada una de las líneas del Transmetro, esta estimación se realiza mediante la selección de los factores de emisión según las características del Transmetro, como el tipo de vehículo, el tipo de combustible, la tecnología del vehículo y la

distancia que recorre cada unidad de Transmetro. El total representa la estimación de toneladas emitidas por las unidades de Transmetro promedio que tiene cada línea, estas emisiones no representan un periodo de tiempo, sino la cantidad de unidades por línea y la distancia que recorren, tomando en cuenta que se asumió que cada unidad tiene, al menos, un circuito en su línea correspondiente.

En la figura 17 se representa gráficamente la línea con mayor emisión, la línea 12 con 0,97 ton de CO₂, 3,39x10⁻⁴ ton de CH₄ y 5,83x10⁻⁵ ton de N₂O y la línea 2 es la de menor emisiones de GEI con 0,09 ton de CO₂, 3,10x10⁻⁵ ton de CH₄ y 5,43x10⁻⁶ ton de N₂O. El volumen de emisiones producidas en cada línea es proporcional al recorrido que realiza el Transmetro en la línea, la cantidad de unidades que recorren dicha línea y la afluencia de usuarios. Cuando hay mayor distancia por recorrer, más circuitos por completar y más unidades en la línea, hay mayor consumo de combustible y, por lo tanto, habrá más volumen de emisiones de GEI producidas por la combustión.

Estos resultados representan las toneladas de GEI producidas por cada mes durante el año 2021, determinando que las emisiones son directamente proporcionales al consumo de combustible: a mayor consumo mayores toneladas de emisión, dando como resultado que durante el 2021 los tres meses con mayores emisiones fueron julio, marzo y octubre, y los de menores emisiones: junio, febrero y abril, teniendo un consumo de combustible para julio de 169 983 galones, marzo 148 956 galones, octubre 146 593 galones, junio 122 9236 galones, febrero 131 256 galones y abril 134 175 galones.

El volumen de consumo de combustible durante estos meses puede depender de factores como el aumento de usuarios en el sistema de transporte y, por consiguiente, más circuitos realizados por las unidades de Transmetro,

como en el mes de julio, que se recibe el bono 14, los usuarios realizan más viajes para ir de compras o pasear utilizando las unidades del Transmetro, por ello en el año 2021 es el mes con mayores emisiones.

En la tabla XXIII se muestran los resultados de las emisiones mensuales de CO_{2eq} en el año 2021, lo cual representa las emisiones de cada uno de los gases de efecto invernadero con respecto a su potencial de calentamiento global, teniendo un valor equivalente al CO₂ para su comparación. Según el resultado, para el año 2021 se tiene un total de 18 908,14 toneladas de CO_{2eq}. Y en la tabla XXV se muestran los resultados de las emisiones de CO_{2eq} por cada línea del Transmetro. Según el resultado, para todas las líneas del Transmetro se tiene un total de 2,75 toneladas de CO_{2eq}, para un recorrido total por todas las líneas de 95,61 kilómetros y 408 unidades de Transmetro, con un circuito cada una. Los resultados de las toneladas de CO_{2eq} representan el impacto del sistema de Transmetro en el medio ambiente.

En la tabla XXVI se representan los resultados de las emisiones de CO_{2eq} generadas mensualmente por Transmetro con otro tipo de combustible, en este caso gasolina, para el cual el valor del factor de emisión por defecto es menor al del diésel. Por ende, las toneladas de emisión serán menores a las que se producen mensualmente. En la figura 19 se muestra la comparación de ambos tipos de combustible, tomando en cuenta los factores de emisión presentados en las directrices del IPCC y considerando que se tiene el mismo consumo de combustible, sin tomar en cuenta factores como la distancia o la tecnología del vehículo. Se determinó que entre el diésel (C₁₂H₂₆) y la gasolina (C₇H₁₆), el primero es el combustible con más volúmenes de emisión, pues tiene mayor presencia de átomos de carbono que la gasolina. La diferencia es mínima entre estos combustibles, sin embargo, el combustible es un factor esencial para el

cálculo de los GEI, ya que de esto dependerá del volumen de CO₂ que se produce.

CONCLUSIONES

1. Usando las ecuaciones del IPCC se calcularon las emisiones de GEI producidas por las 7 líneas del Transmetro en el año 2021, determinando que este sistema de transporte generó 18 592,0 toneladas de CO₂, 0,98 toneladas de CH₄ y 0,98 toneladas de N₂O.
2. Los resultados indican que las siete líneas del Transmetro producen CO₂, CH₄ y N₂O en proporciones variables, determinando las emisiones totales que las líneas generan, siendo estas 2,81 toneladas de CO₂, 0,000979 toneladas de CH₄ y 0,000169 toneladas de N₂O.
3. De acuerdo con los resultados, la línea con mayor volumen de GEI es la línea 12, la cual tiene una extensión de 22,77 km, con una flotilla de 85 buses, lo cual produce 0,97 toneladas de CO₂, 0,000339 toneladas de CH₄ y 0,0000583 toneladas de N₂O. Comparando con la línea que menos GEI obtuvo en el inventario, la línea 2, que cuenta con una extensión de 3,38 km y una flotilla de 52 buses, produciendo 0,09 toneladas de CO₂, 0,0000310 toneladas de CH₄ y 0,00000543 toneladas de N₂O. Se evidencia que los siguientes factores son determinantes para incidir en la menor o mayor emisión de GEI: número de vehículos, kilómetros que abarca la ruta y tipo de combustible que se utiliza.
4. Según los resultados obtenidos del volumen de GEI producidos mensualmente por el Transmetro en el año 2021, el mes con mayores emisiones es julio, el cual tiene un consumo de combustible de 169 983 galones, produciendo 1 845,53 toneladas de CO₂ y

0,0971 toneladas de CH₄ y N₂O. En contraste, el mes con menores emisiones es junio, con un consumo de combustible de 122 936 galones, produciendo 1 845,53 toneladas de CO₂ y 0,0971 toneladas de CH₄ y N₂O.

5. Se determinó mediante el potencial de calentamiento global de los GEI, para un plazo de 100 años, que el total de CO_{2eq} producido por el Transmetro durante el año 2021 fue de 18 908,14 toneladas.
6. Mediante la comparación de dos tipos de combustible, gasolina y diésel, considerando los factores de emisión del IPCC y asumiendo que las condiciones fueron las mismas, se obtuvo la estimación de las emisiones por cada tipo de combustible, resultando que el uso de gasolina produjo 17 833,99 toneladas de CO_{2eq}; en tanto que el consumo de diésel produjo 18 908,14 toneladas de CO_{2eq}. El volumen de emisión para la gasolina es menor, sin embargo, con este combustible se tiene mayores toneladas de metano, siendo este un gas con mayor potencial de calentamiento que el CO₂ y, a mayor potencial de calentamiento, mayor efecto del gas en la atmósfera.

RECOMENDACIONES

1. Verificar que se cuente con cada uno de los elementos y factores de emisión al aplicar la metodología del cálculo teórico de las ecuaciones del IPCC para obtener resultados correspondientes al transporte analizado.
2. Realizar las evaluaciones físicas de los diferentes tipos de combustibles para determinar el impacto ambiental que el uso de estos genera y poder seleccionar el ideal para los transportes públicos, teniendo en cuenta que emita menos cantidad de GEI con el fin de reducir el impacto de la contaminación atmosférica.
3. Cumplir con los compromisos adquiridos por el país en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se debe realizar las estimaciones de la producción de GEI en todo tipo de transporte para tener un registro, desarrollar un plan para disminuir el impacto y contribuir al cálculo de los inventarios nacionales en el sector del transporte.
4. Considerar que para futuras estimaciones de cálculos de GEI para el transporte público municipal se debe realizar un estudio con equipo especializado para la medición de las emisiones, obteniendo datos más certeros sobre la cantidad de GEI emitidos por este transporte y comparar con los resultados calculados teóricamente de las ecuaciones del IPCC.

BIBLIOGRAFÍA

1. AirNow. *Fundamentos de AQI*. [en línea]. <<https://www.airnow.gov/aqi/aqi-basics-in-spanish/>>. [Consulta: 28 de abril de 2019].
2. BENAVIDES BALLESTEROS, Henry Oswaldo; LEÓN ARISTIZABAL, Gloria Esperanza. *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*. Colombia: IDEAM, 2007. 99 p.
3. CAR; CAEM. *Guía metodológica para el cálculo de la huella de carbono corporativa a nivel sectorial*. [en línea]. <<https://www.car.gov.co/uploads/files/5ade1b0319769.pdf>>. [Consulta: 19 de mayo de 2019].
4. CITECUBB. *Manual de hermeticidad al aire de edificaciones*. Chile: Maureen Trebilcock, 2014. 245 p.
5. CNCC; SEGEPLAN. *Plan de acción nacional de cambio climático*. Ciudad de Guatemala: MARN, 2016. 162 p.
6. GREEN, Joanne; SÁNCHEZ, Sergio. *La calidad del aire en América Latina: una visión panorámica*. España: Clean Air Institute, 2013. 28 p.
7. Comisión Presidencial Coordinadora de la Política del Ejecutivo en materia de Derechos Humanos. *Informe del Estado de Guatemala*.

Resolución 7/23 del Consejo de Derechos Humanos: “Los derechos humanos y el cambio climático”. [en línea]. <<https://www.ohchr.org/sites/default/files/Documents/Issues/ClimateChange/Submissions/Guatemala.pdf>>. [Consulta: 29 de abril de 2019].

8. Entornos Inteligentes. *Contaminantes primarios y secundarios: estos son los más peligrosos*. [en línea]. <<https://enviraiot.es/contaminantes-primarios-y-secundarios-mas-peligrosos/>>. [Consulta: 4 de mayo de 2019].
9. Esquema.net. *Esquema de la atmósfera*. [en línea]. <<https://esquema.net/atmosfera/>>. [Consulta: 28 de abril de 2019].
10. FLORES, Mauricio. *Sigue incrementándose el parque vehicular en Guatemala*. [en línea]. <<https://transito.gob.gt/sigue-incrementandose-el-parque-vehicular-en-guatemala/>>. [Consulta: 28 de abril de 2019].
11. GONZÁLEZ CÁRDENAS, Rubén. *Formación y evolución de la atmósfera terrestre*. [en línea]. <http://www.cienciorama.unam.mx/a/pdf/66_cienciorama.pdf>. [Consulta: 28 de abril de 2019].
12. IBÁÑEZ MONROY, Yeisson Fabian. *Estimación de huella de carbono en el sector transporte del municipio Tenjo – Cundinamarca*. (Trabajo de graduación de Ing. Ambiental y Sanitario). Facultad de Ingeniería, Universidad de la Salle, 2014. 104 p.

13. INSIVUMEH. *Escenarios de cambio climático*. [en línea]. <<http://www.insivumeh.gob.gt/escenarios-de-cambio-climatico/>>. [Consulta: 5 de mayo de 2020].
14. IPCC. *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 2*. Japón: Instituto para las Estrategias Ambientales Globales, 2006. 284 p. 3,16.
15. JUÁREZ CALDERÓN, Marco Aurelio; CASTELLANOS, Edwin; FUENTES BRAEUNER, Gabriela. *Primer reporte de evaluación del conocimiento sobre cambio climático en Guatemala*. Ciudad de Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala, 2019. 16 p.
16. LEAL-QUIRÓS, Edertho. *La atmósfera: un sistema del planeta Tierra*. [en línea]. <<https://www.uv.mx/personal/tcarmona/files/2010/08/Leal-.pdf>>. [Consulta: 28 de abril de 2019].
17. MARTÍNEZ-RODRÍGUEZ, María Concepción; CAMPOS-VILLEGAS, Lorena Elizabeth; CASTILLO-MONROY, José Jesús. *Cálculo de la línea base de las emisiones de gases de efecto invernadero y proyecciones a futuro para el sector transporte en el estado de Veracruz, México*. [en línea]. <https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/4123>. [Consulta: 28 de abril de 2019].
18. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Primera comunicación nacional sobre cambio climático*. Ciudad de Guatemala: MARN, 2001. 127 p.

19. _____. *Segunda comunicación nacional sobre cambio climático Guatemala*. Ciudad de Guatemala: MARN, 2015. 224 p.
20. Ministerio del Medio Ambiente. *Cambio climático – 2014*. [en línea]. <<https://mma.gob.cl/cambio-climatico/oficina-de-cambio-climatico/>>. [Consulta: 31 de mayo de 2019].
21. MISHAAN, Rita. *Acuerdo de París simplificado. Versión popular para Guatemala*. Ciudad de Guatemala: GEF; SGP; PNUD; Parlamento de la República Federal de Alemania, 2015. 63 p.
22. Moovit. *Mapa del área de cobertura de Transmetro*. [en línea]. <https://moovitapp.com/index/es-419/transporte_p%C3%BAblicas-Ciudad_de_Guatemala-6097-1892811>. [Consulta 18 de mayo de 2020].
23. OMS. *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. [en línea]. <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06,02_spa.pdf;jsessionid=E0BC8E5CE7C4CA4E03C8CDD46653BCEA?sequence=1>. [Consulta: 5 de mayo de 2020].
24. OMS. *La OMS publica estimaciones nacionales sobre la exposición a la contaminación del aire y sus repercusiones para la salud*. [en línea]. <<https://www.who.int/es/news-room/detail/27-09-2016-who-releases-country-estimates-on-air-pollution-exposure-and-health-impact>>. [Consulta: 5 de mayo de 2020].

25. ONU. *Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático*. Ginebra: Organización de las Naciones Unidas, 1992. 26 p.
26. Organización Meteorológica Mundial. *Boletín de la OMM sobre los gases de efecto invernadero*. [en línea]. <https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4024>. [Consulta: 29 de abril de 2019].
27. PERÉZ ZAMORA, Abelardo. *Fuentes móviles en ruta de Guatemala y los gases de efecto invernadero, año base 2013 (una perspectiva y una aproximación)*. Ciudad de Guatemala: MARN, 2015. 59 p.
28. PNUMA. *El acuerdo de París y sus implicaciones para América Latina y el Caribe*. Panamá: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2016. 63 p.
29. RÍOS BEDOYA, Vanessa; MARQUET, Oriol; MIRALLES-GUASCH, Carme. *Estimación de las emisiones de CO2 desde la perspectiva de la demanda de transporte en Medellín*. [en línea]. <<https://www.redalyc.org/pdf/3330/333047931017.pdf>>. [Consulta: 28 de abril de 2019].
30. RÍOS, Ramiro Alberto; ARANGO, Francisco; VICENTINI, Vera Lucía; ACEVEDO-DAUNAS, Rafael. *Estrategias de mitigación y métodos para la estimación en el sector transporte de emisiones de gases de efecto invernadero*. New York: Banco Interamericano de Desarrollo (BID), 2013. 135 p.

31. SAMAYOA CHÁVEZ, Cristian Iván; ALVAREZ PERÉN, Jesús Fernando; GUERRERO ISÉM, Giancarlo Alexander; LEPE MILIÁN, Fredy Alexander; LÓPEZ Y LÓPEZ, Marvin Yovani. *Política energética 2019-2050*. Ciudad de Guatemala: Ministerio de Energía y Minas, 2018. 70 p.

32. Universidad de San Carlos de Guatemala; Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Primer informe indicativo de medición de la calidad del aire ambiente en las cabeceras departamentales de la república de Guatemala*. Ciudad de Guatemala: USAC, MARN, 2013. 51 p.

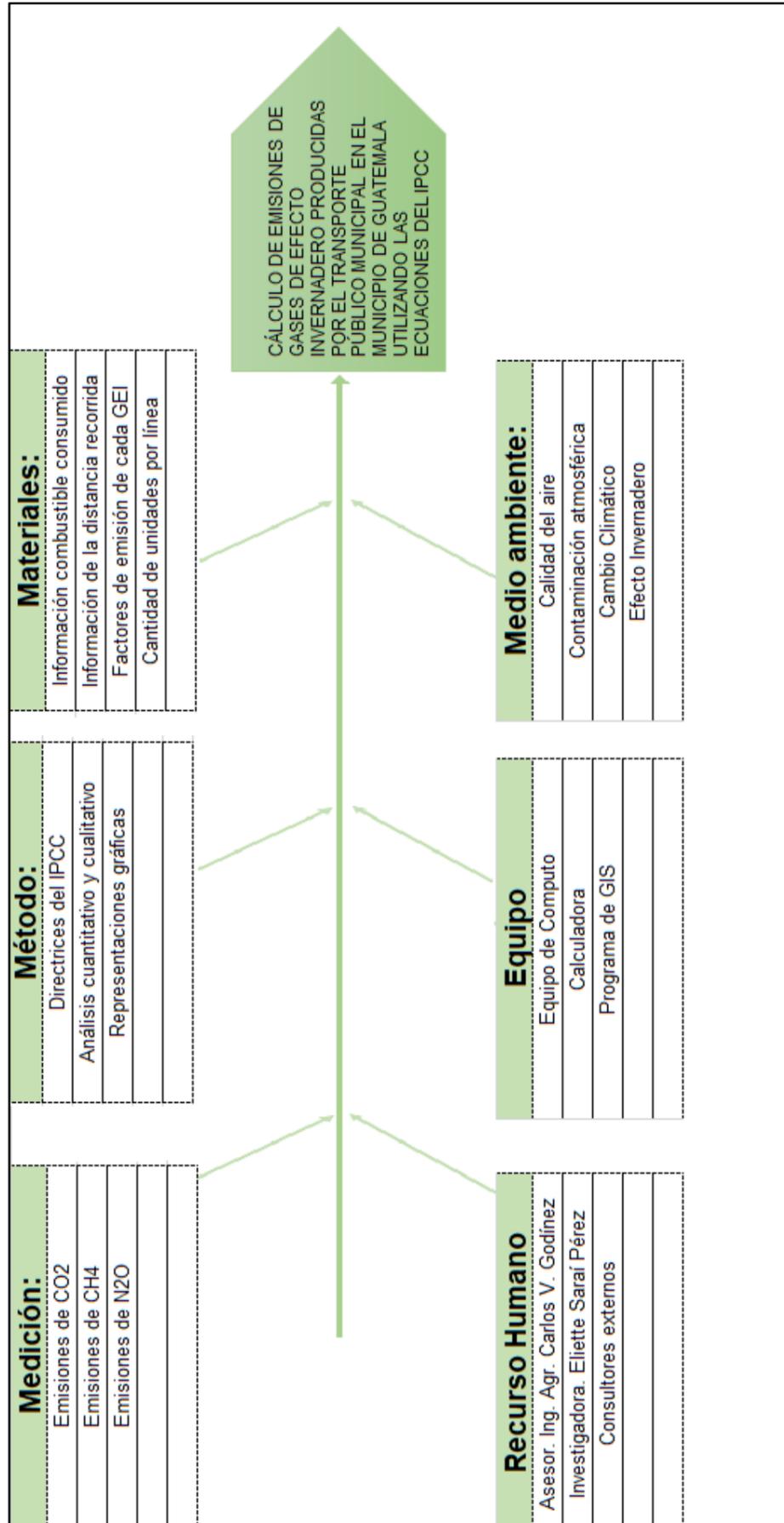
APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**

Carrera: Ingeniería Ambiental		
Área	Curso	Temática
Química	Microbiología	<ul style="list-style-type: none"> • Reacciones químicas • Composiciones químicas
	Ecología	<ul style="list-style-type: none"> • Ciclos bioquímicos • Recursos naturales
	Química ambiental	<ul style="list-style-type: none"> • Componentes ambientales • Efecto invernadero
Ambiental	Legislación ambiental 2	<ul style="list-style-type: none"> • Acuerdos sobre cambio climáticos • Protocolo sobre efecto invernadero
	Calidad del aire	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminantes atmosféricos • Fuentes de contaminación • Vulnerabilidad y adaptación
Sanitaria	Geología	<ul style="list-style-type: none"> • Evolución y estructura de la tierra
Complementaria	Climatología	<ul style="list-style-type: none"> • Atmósfera • Fenómenos atmosféricos • Cambio climático
Dibujo y topografía	Sistema de información geográfica	<ul style="list-style-type: none"> • Construcción de mapas • Control de información geográfica
Ciencias básicas	Estadística	<ul style="list-style-type: none"> • Control y manejo de datos • Construcción de tablas y gráficos

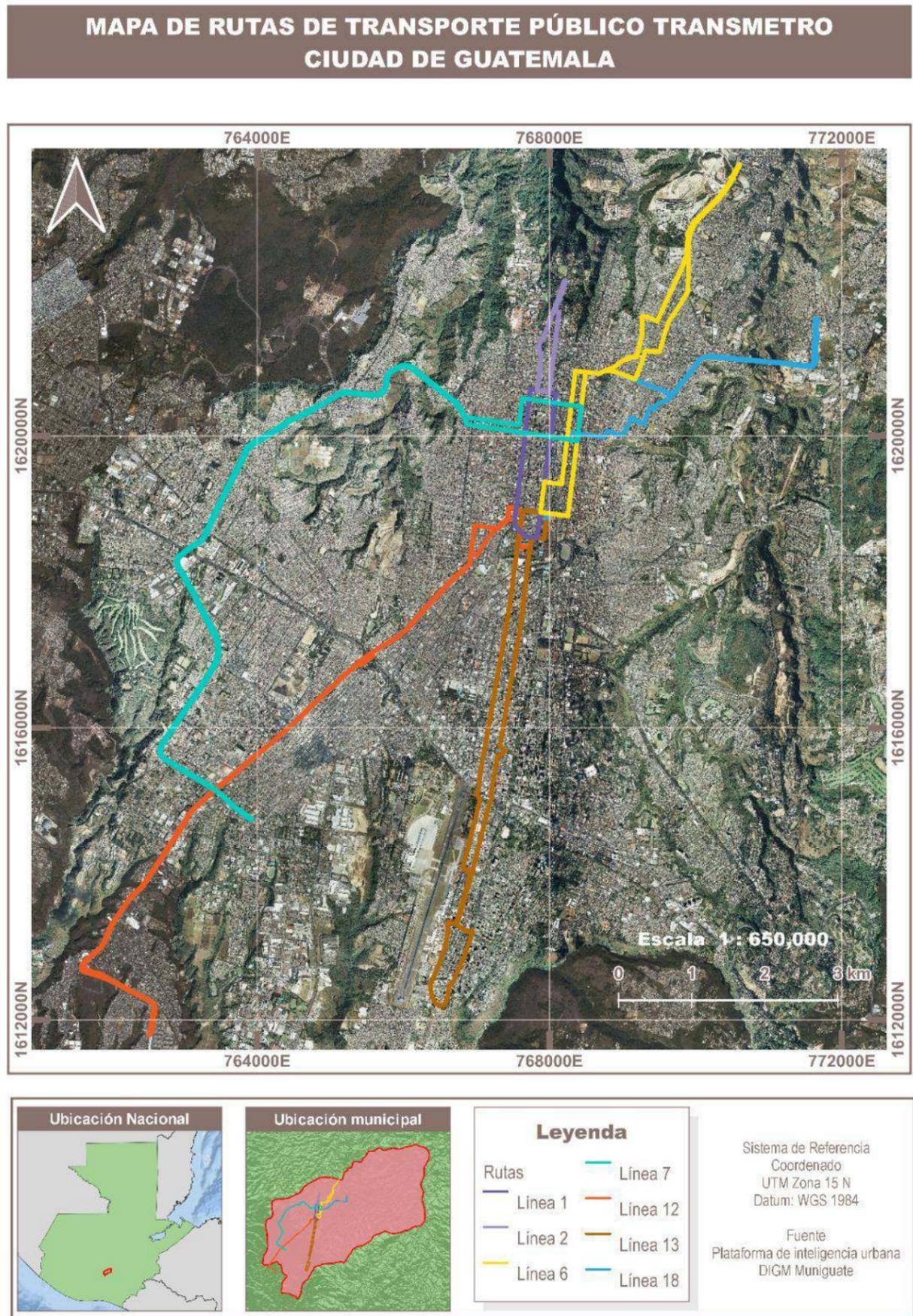
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa



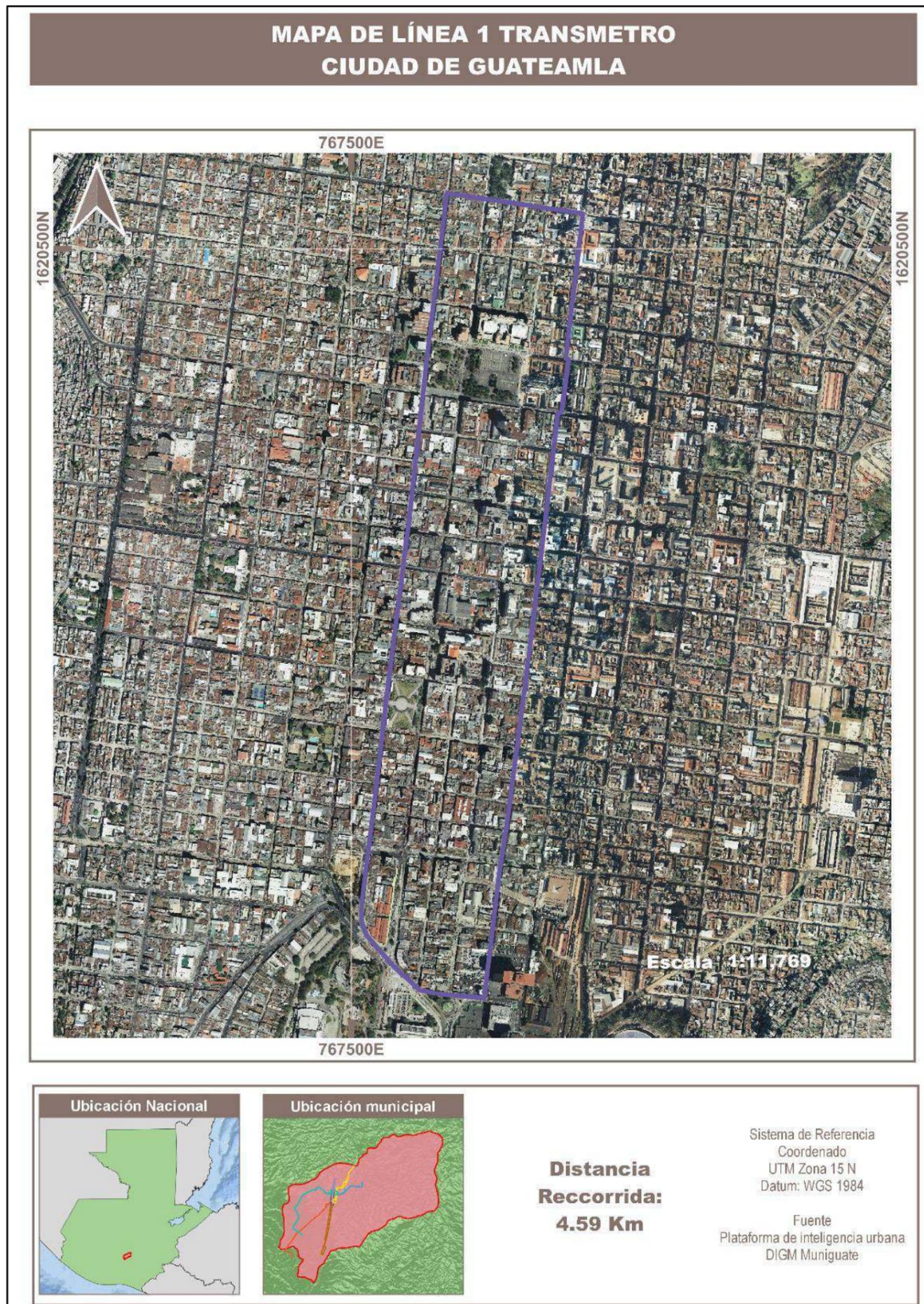
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Mapa de las líneas de estudio

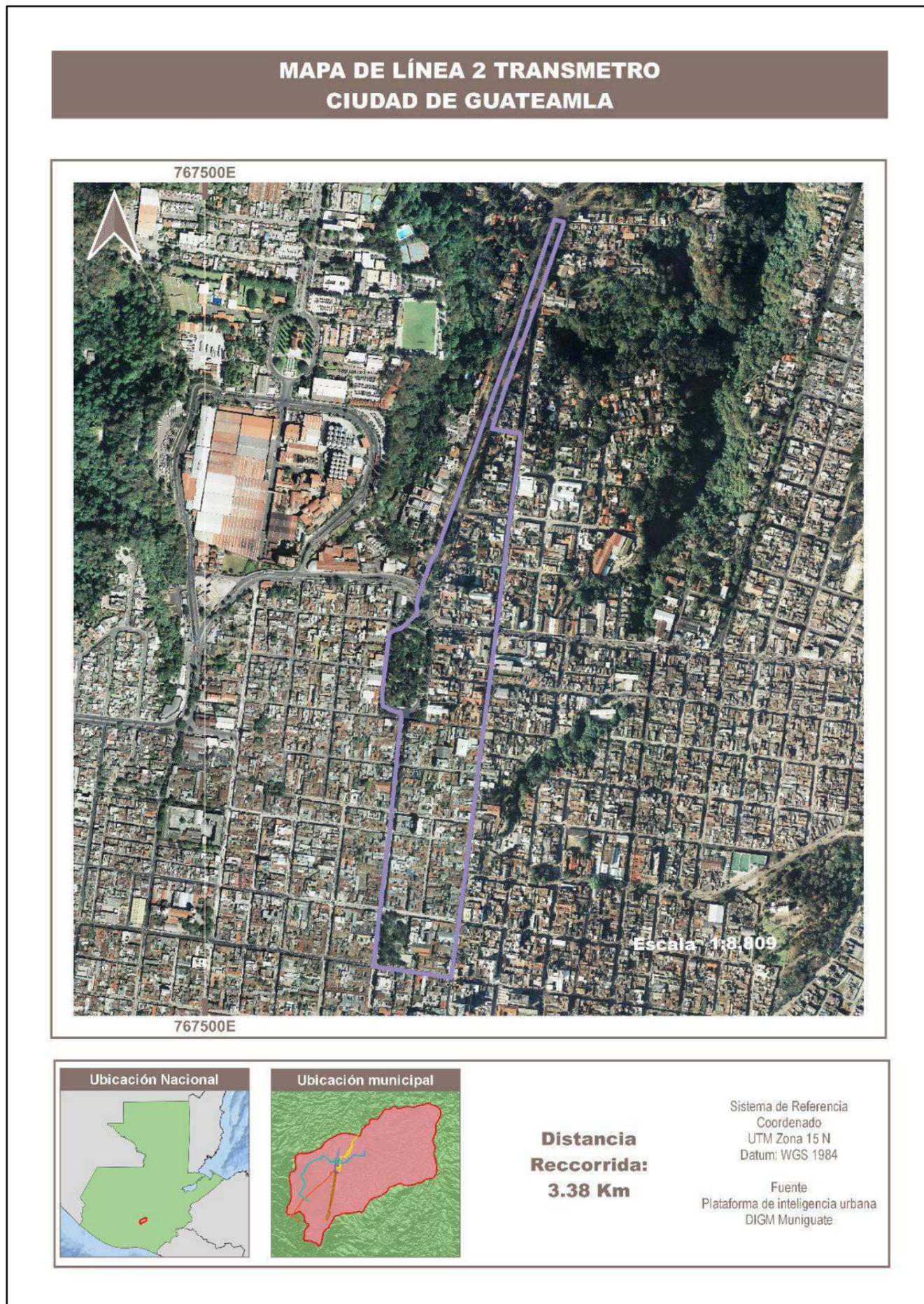


Fuente: elaboración propia.

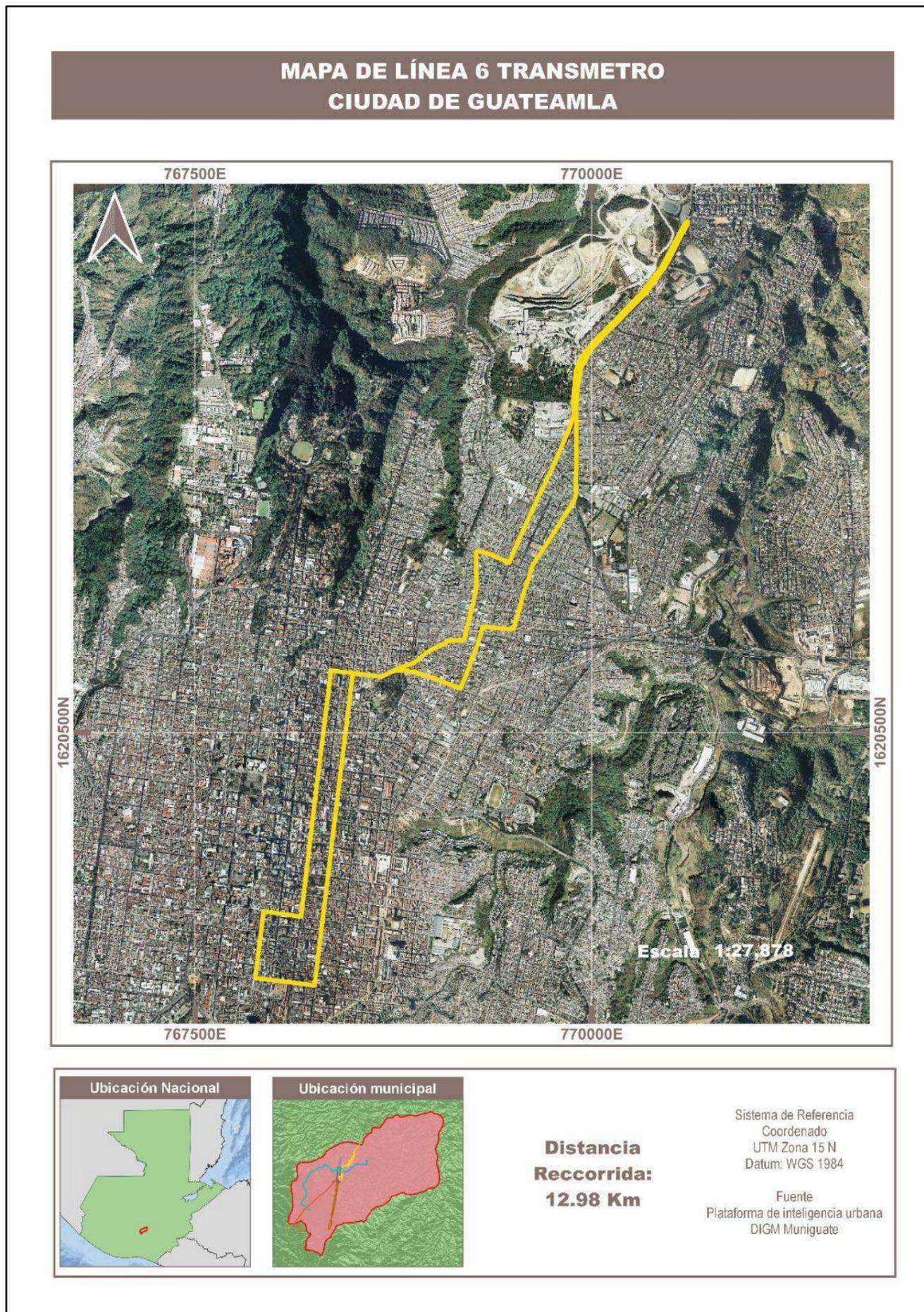
Apéndice 4. Mapas de las distancias de las líneas del Transmetro



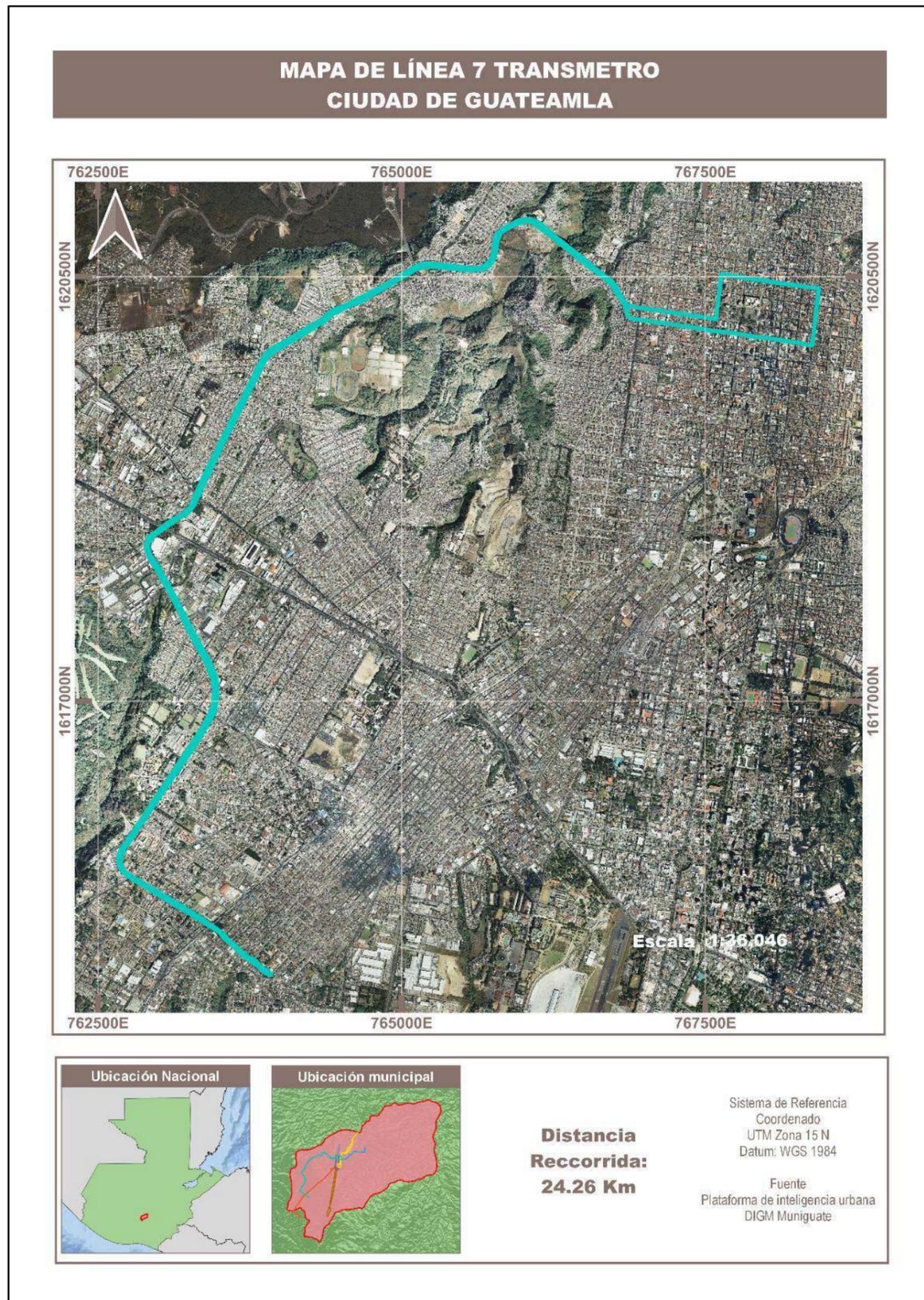
Continuación del apéndice 4.



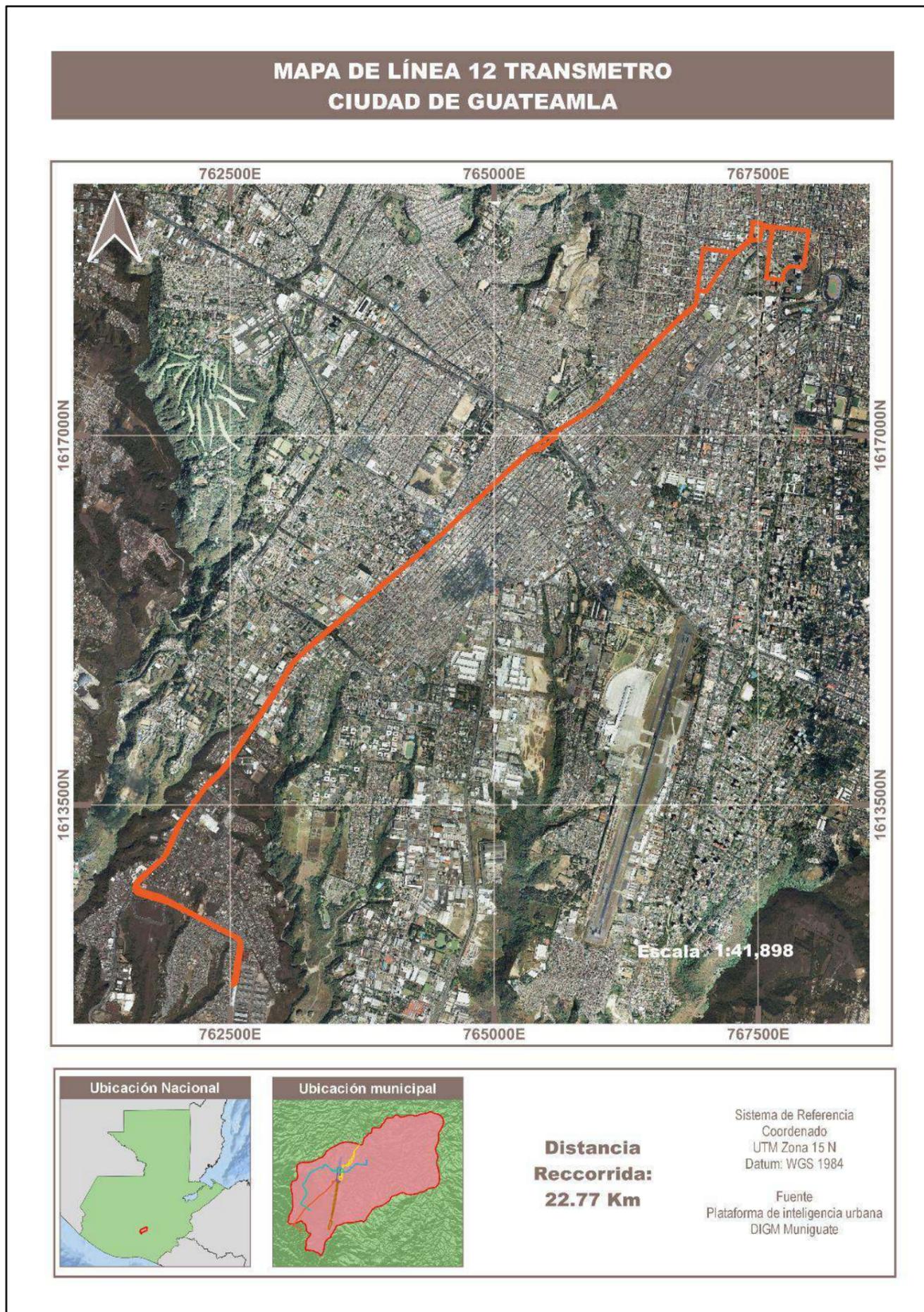
Continuación del apéndice 4.



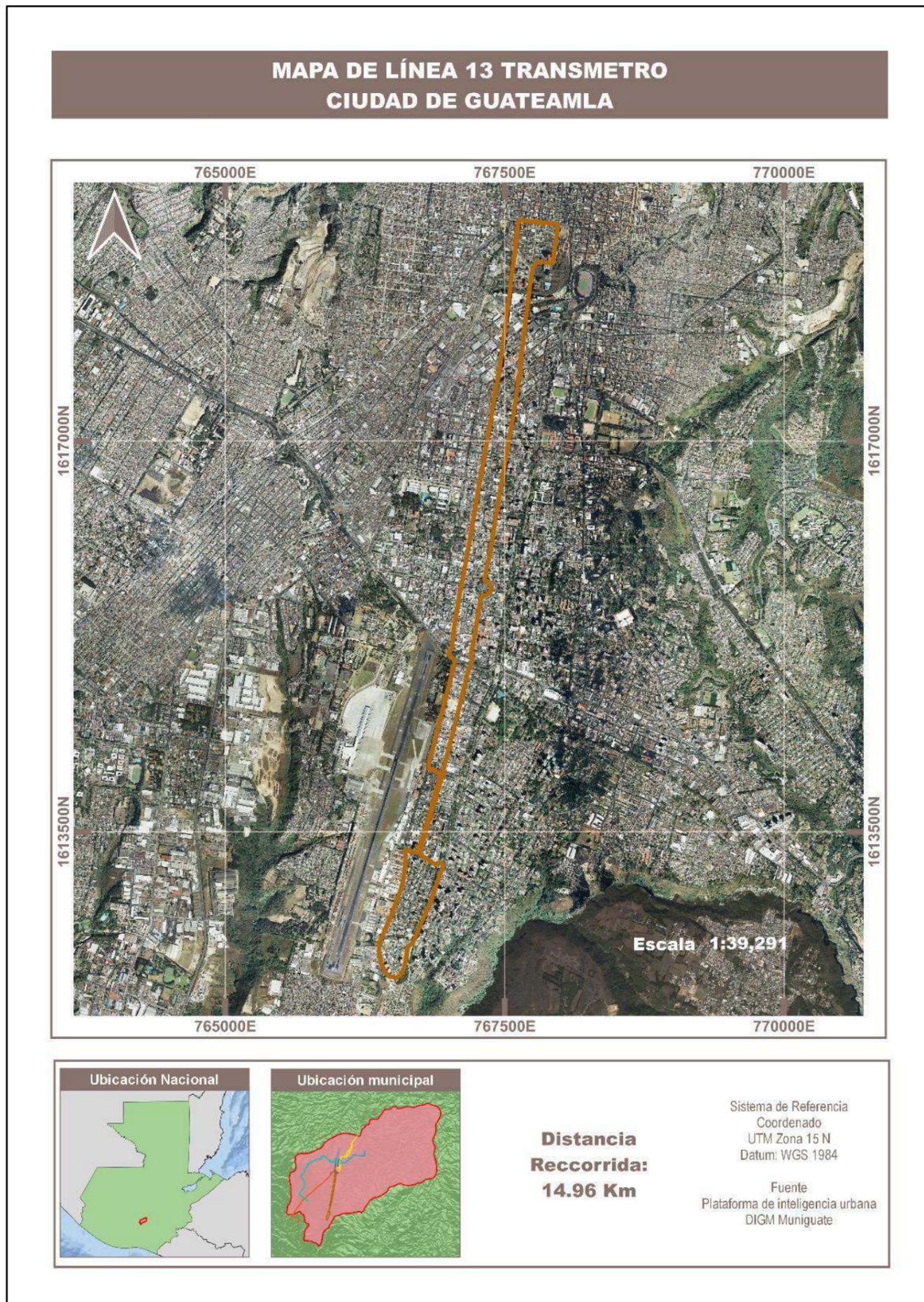
Continuación del apéndice 4.



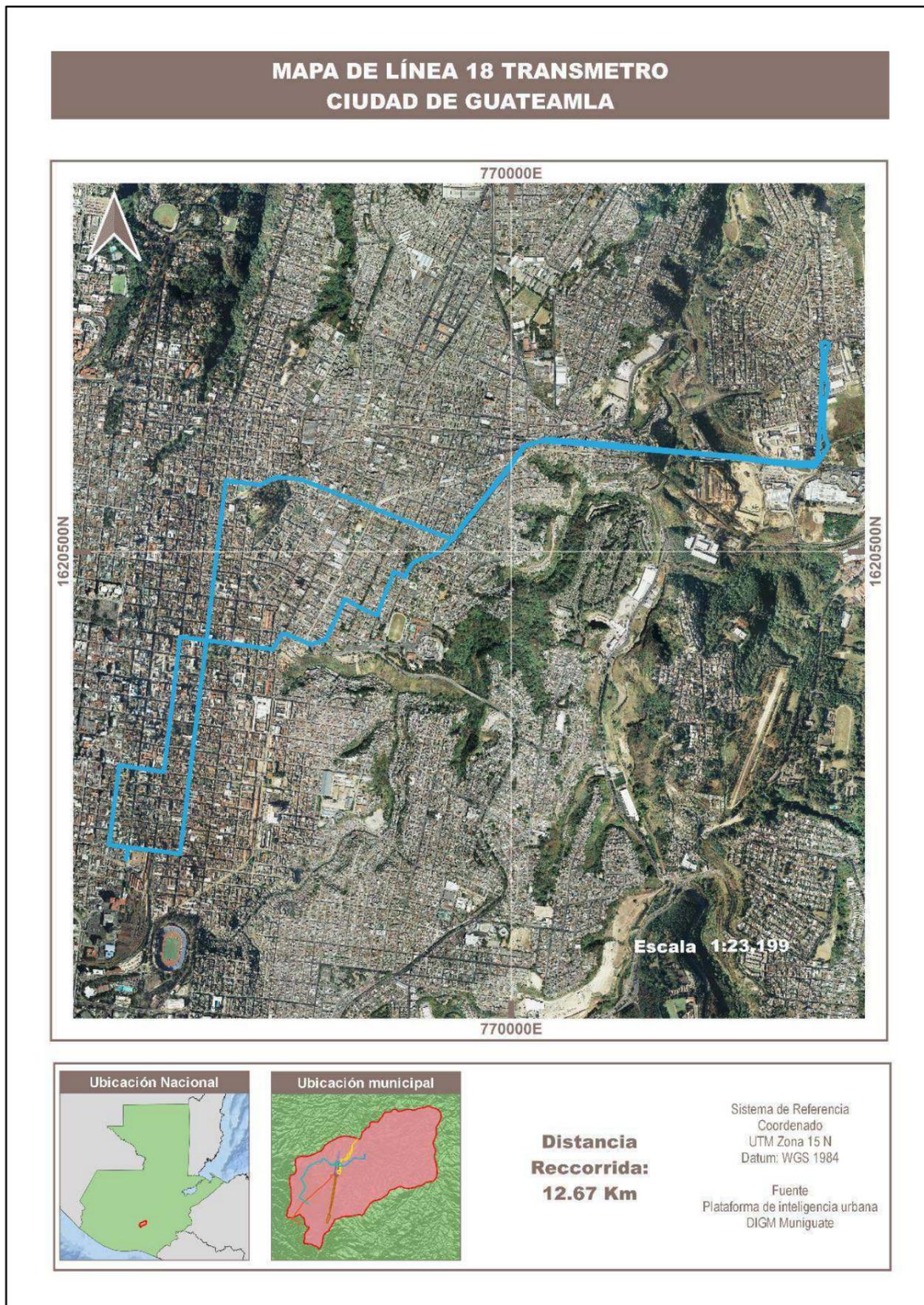
Continuación del apéndice 4.



Continuación del apéndice 4.



Continuación del apéndice 4.



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Datos calculados**

Apéndice 5a. **Emisiones de CO₂ mensualmente por el Transmetro**

Meses	Combustible vendido (Gal)	Combustible vendido (TJ)	Factor de emisión (Kg/TJ)	Emisión mensual (Kg)	Emisión mensual (Ton)
ene-21	136 791	20,04	74100	1 485,157,94	1 485,16
feb-21	131 256	19,23	74100	1 425,063,72	1 425,06
mar-21	148 956	21,82	74100	1 617,234,95	1 617,23
abr-21	134 175	19,66	74100	1 456,755,69	1 456,76
may-21	145 223	21,28	74100	1 576,705,28	1 576,70
jun-21	122 936	18,01	74100	1 334,732,38	1 334,73
jul-21	169 983	24,90	74100	1 845,527,87	1 845,53
ago-21	146 516	21,47	74100	1 590,743,55	1 590,74
sep-21	139 795	20,48	74100	1 517,772,77	1 517,77
oct-21	146 593	21,48	74100	1 591,579,55	1 591,58
nov-21	144 985	21,24	74100	1 574,121,28	1 574,12
dic-21	145 221	21,28	74100	1 576,683,57	1 576,68G

Fuente: elaboración propia

Apéndice 5b. **Emisiones de CO₂ por líneas del Transmetro**

Líneas del Transmetro	Combustible vendido (Kg)	Combustible vendido (TJ)	Factor de emisión (Kg/TJ)	Emisión por líneas (KG)	Emisión por líneas (Ton)
Línea 1	5 494,78	0,80	74100	59 657,53	59,66
Línea 2	5 494,78	0,80	74100	59 657,53	59,66
Línea 6	5 494,78	0,80	74100	59 657,53	59,66
Línea 7	3 170,06	0,46	74100	34 417,80	34,42
Línea 12	8 981,85	1,32	74100	97 517,11	97,52
Línea 13	5 494,78	0,80	74100	59 657,53	59,66
Línea 18	8 981,85	1,32	74100	97 517,11	97,52

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5c. **Emissiones de CH₄ mensualmente por el Transmetro**

Meses	Combustible vendido (GAL)	Combustible vendido (TJ)	Factor de emisión CH ₄ (KG/TJ)	Emisión mensual (Ton)	Emisión mensual (Ton)
ene-21	136 791	20,04	3,9	78,17	7,82E-02
feb-21	131 256	19,23	3,9	75,00	7,50E-05
mar-21	148 956	21,82	3,9	85,12	8,51E-05
abr-21	134 175	19,66	3,9	76,67	7,67E-05
may-21	145 223	21,28	3,9	82,98	8,30E-05
jun-21	122 936	18,01	3,9	70,25	7,02E-05
jul-21	169 983	24,91	3,9	97,13	9,71E-05
ago-21	146 516	21,47	3,9	83,72	8,37E-05
sep-21	139 795	20,48	3,9	79,88	7,99E-05
oct-21	146 593	21,48	3,9	83,77	8,38E-05
nov-21	144 985	21,24	3,9	82,85	8,28E-05
dic-21	145 221	21,28	3,9	82,98	8,30E-05

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5d. **Emissiones de CH₄ por líneas del Transmetro**

Líneas de Transmetro	Factor de emisión CH ₄ (mg/Km)	Distancia recorrida (Km)	Distancia*EF (kg)	Emisión durante la Fase de Calentamiento (kg/Km)	Emisión por líneas (Kg)	Emisión por líneas (Ton)
Línea 1	175	238,68	0,04	2,0E-04	0,04	4,20E-05
Línea 2	175	175,76	0,03	2,0E-04	0,03	3,10E-05
Línea 6	175	674,96	0,11	2,0E-04	0,12	1,18E-04
Línea 7	175	727,8	0,13	1,0E-04	0,13	1,27E-04
Línea 12	175	1935,45	0,34	3,0E-04	0,34	3,39E-04
Línea 13	175	757,12	0,13	2,0E-04	0,13	1,33E-04
Línea 18	175	1076,95	0,19	3,0E-04	0,19	1,89E-04

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5e. **Emisiones de N₂O mensualmente por el Transmetro**

Meses	Combustible vendido (GAL)	Combustible vendido (TJ)	Factor de emisión N ₂ O (KG/TJ)	Emisión mensual (KG)	Emisión mensual (Ton)
ene-21	13 6791	20,04	3,9	78,17	7,82E-02
feb-21	131 256	19,23	3,9	75,00	7,50E-05
mar-21	148 956	21,83	3,9	85,12	8,51E-05
abr-21	134 175	19,66	3,9	76,67	7,67E-05
may-21	145 223	21,28	3,9	82,98	8,30E-05
jun-21	122 936	18,01	3,9	70,25	7,02E-05
jul-21	169 983	24,91	3,9	97,13	9,71E-05
ago-21	146 516	21,47	3,9	83,72	8,37E-05
sep-21	139 795	20,48	3,9	79,88	7,99E-05
oct-21	146 593	21,48	3,9	83,77	8,38E-05
nov-21	144 985	21,24	3,9	82,85	8,28E-05
dic-21	145 221	21,28	3,9	82,98	8,30E-05

Fuente: elaboración propia

Apéndice 5f. **Emisiones de N₂O por líneas del Transmetro**

Líneas de Transmetro	Factor de emisión N ₂ O (mg/Km)	Distancia recorrida (Km)	Distancia*EF (kg)	Emisión durante la Fase de Calentamiento (kg/Km)	Emisión mensual (Kg)	Emisión mensual (Ton)
Línea 1	30	238,68	7,16E-03	2,0E-04	7,3E-03	7,32E-06
Línea 2	30	175,76	5,27E-03	2,0E-04	5,4E-03	5,43E-06
Línea 6	30	674,96	2,02E-02	2,0E-04	2,0E-02	2,04E-05
Línea 7	30	727,8	2,18E-02	1,0E-04	2,2E-02	2,19E-05
Línea 12	30	1935,45	5,81E-02	3,0E-04	5,8E-02	5,83E-05
Línea 13	30	757,12	2,27E-02	2,0E-04	2,3E-02	2,29E-05
Línea 18	30	1076,95	3,23E-02	3,0E-04	3,3E-02	3,26E-05

Fuente: elaboración propia

Apéndice 5g. **Emisiones de CO_{2eq} mensualmente por el Transmetro en el año 2021**

Meses	Emisión mensual de CO₂ (Ton)	Emisión mensual de CH₄*PCG (Ton)	Emisión mensual de N₂O*PCG (Ton)	CO_{2eq} en el año 2021 (Ton)
Enero	1 485,16	1,95	23,29	1 510,41
Febrero	1 425,06	1,88	22,35	1 449,29
Marzo	1 617,23	2,13	25,37	1 644,73
Abril	1 456,76	1,92	22,85	1 481,52
Mayo	1 576,71	2,07	24,73	1 603,51
Junio	1 334,73	1,76	20,93	1 357,42
Julio	1 845,53	2,43	28,95	1 876,90
Agosto	1 590,74	2,09	24,95	1 617,79
Septiembre	1 517,77	2,00	23,81	1 543,57
Octubre	1 591,58	2,09	24,96	1 618,64
Noviembre	1 574,12	2,07	24,69	1 600,88
Diciembre	1 576,68	2,07	24,73	1 603,49
Total, anual	18 592,08	24,46	291,60	18 908,14

Fuente: elaboración propia

Apéndice 5i. **Emisiones de CO_{2eq} por cada línea del transmetro**

Líneas de transmetro	Emisión de CO₂ (Ton)	Emisión mensual CH₄*PCG (Ton)	Emisión mensual N₂O*PCG (Ton)	CO_{2eq} por líneas (Ton)
Línea 1	0,12	1,05E-03	2,18E-03	0,12
Línea 2	0,09	7,74E-04	1,62E-03	0,09
Línea 6	0,33	2,96E-03	6,08E-03	0,34
Línea 7	0,36	3,19E-03	6,53E-03	0,37
Línea 12	0,95	8,48E-03	1,74E-02	0,98
Línea 13	0,38	3,32E-03	6,82E-03	0,39
Línea 18	0,53	4,72E-03	9,70E-03	0,54
Total	2,75	2,45E-02	5,03E-02	2,83

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5i. **Emisiones de CO_{2eq} mensualmente por el Transmetro con combustible gasolina en el año 2021**

Meses	Emisión mensual de CO₂ (Ton)	Emisión mensual de CH₄*PCG (Ton)	Emisión mensual de N₂O*PCG (Ton)	CO_{2eq} en el año 2021 (Ton)
Enero	1 388,95	16,54	19,11	1 424,60
Febrero	1 332,75	15,87	18,34	1 366,96
Marzo	1 512,47	18,01	20,81	1 551,29
Abril	1 362,39	16,22	18,75	1 397,36
Mayo	1 474,57	17,55	20,29	1 512,42
Junio	1 248,27	14,86	17,18	1 280,31
Julio	1 725,98	20,55	23,75	1 770,28
Agosto	1 487,70	17,71	20,47	1 525,88
Septiembre	1 419,46	16,90	19,53	1 455,89
Octubre	1 488,48	17,72	20,48	1 526,68
Noviembre	1 472,15	17,53	20,26	1 509,94
Diciembre	1 474,55	17,55	20,29	1 512,39
Total, anual	17 387,73	207,00	239,26	17 833,99

Fuente: elaboración propia

ANEXO

Anexo 1. Información sobre combustible consumido por el Transmetro

Consumo DIESEL Transmetro		
ene-21	Total Galones	136,791
feb-21	Total Galones	131,256
mar-21	Total Galones	148,956
abr-21	Total Galones	134,175
may-21	Total Galones	145,223
jun-21	Total Galones	122,936

Consumo DIESEL Transmetro		
jul-21	Total Galones	169,983
ago-21	Total Galones	146,516
sep-21	Total Galones	139,795
oct-21	Total Galones	146,593
nov-21	Total Galones	144,985
dic-21	Total Galones	145,221

- Para las líneas 12 y 18 una media de 85 unidades, para las líneas 1,2,6,13 una media de 52 unidades y una media de 30 unidades para la línea 7 han circulado para cubrir el Sistema Transmetro.

Atentamente,


X
Guenther Schoenbeck
Director de Operaciones
EMT



Fuente: Unidad de Información Municipalidad de Guatemala. *Consumo de diésel del transmetro.*
s/p.

