

Instituto Politécnico Nacional
Unidad Profesional Interdisciplinaria de
Ingenierías campus Zacatecas

Ingeniería Ambiental

“Inventario de emisiones atmosféricas de
locomotoras vía Pacífico Norte
concesionada a Ferromex”

Trabajo de Titulación

Que para obtener el título de Ingeniero Ambiental

Presenta:

Renata Aguilera Cháirez

Asesora del proyecto:

Dra. en C. Verónica Ávila Vázquez



Zacatecas, Zac., octubre 2021

Folio
UPIIZ/ESA/343/2021

Asunto
DESIGNACIÓN
RENATA AGUILERA CHÁIREZ
INGENIERÍA AMBIENTAL
BOLETA: 2017670012
GENERACIÓN: 2017-2021

Zacatecas, Zac., a 24 de septiembre de 2021

**C. RENATA AGUILERA CHÁIREZ
PRESENTE**

Mediante el presente se hace de su conocimiento que este Departamento acepta que la **Dra. en C. Verónica Ávila Vázquez** sea **Asesora** en el tema que propone usted a desarrollar como prueba escrita de la opción Curricular, con el título y contenido siguiente:

"Inventario de emisiones atmosféricas de locomotoras vía Pacífico Norte concesionada a Ferromex"

Se concede un plazo de máximo de un año, a partir de esta fecha, para presentarlo a revisión por el jurado asignado.



M. EN C. JULIA JANETH ROSALES MARES
Jefa del Departamento de Evaluación y
Seguimiento Académico



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA
DE INGENIERÍA CAMPUS ZACATECAS
DIRECCIÓN



DR. FERNANDO FLORES MÉJIA
Director de la UPIIZ



Folio

UPIIZ/ESA/351/2021

Asunto

AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN
RENATA AGUILERA CHÁIREZ
INGENIERÍA AMBIENTAL
BOLETA: 2017670012
GENERACIÓN: 2016-2021

Zacatecas, Zac., a 05 de octubre de 2021

El suscrito tengo el agrado de informar a usted, que habiendo procedido a revisar el trabajo de titulación que presenta con fines de titulación denominada:

"Inventario de emisiones atmosféricas de locomotoras vía Pacífico Norte concesionada a Ferromex"

Encontré que el citado **Trabajo de Titulación**, reúne los requisitos para **autorizar** la impresión y proceder a la presentación del Examen Profesional debiendo tomar en consideración las indicaciones y correcciones que al respecto se hicieron.



Dra. en C. Verónica Ávila Vázquez

Autorización de uso de obra

Autorización de uso de obra INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL P r e s e n t e

Bajo protesta de decir verdad **la** que suscribe **Renata Aguilera Cháirez**, estudiante del programa de **Ingeniería Ambiental**, con número de boleta **2017670012**, adscrito a la Unidad Profesional Interdisciplinaria de Ingeniería campus Zacatecas; manifiesto(amos) ser autor(a, as, es) y titular(es) de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada (**Inventario de emisiones atmosférica de locomotoras vía Pacífico Norte concesionada a Ferromex**), en adelante “La Tesis o El Trabajo de Titulación” (escoger solo uno) y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el Artículo 27 Fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo(amos) al Instituto Politécnico Nacional, en adelante el “IPN”, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales “La Tesis o El Trabajo de Titulación” por un periodo de (indefinido) contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso al “IPN” de su terminación.

En virtud de lo anterior, el “IPN” deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de “La Tesis o El Trabajo de Titulación”.

Adicionalmente, y en mi calidad de autor(a, as, es) y titular(es) de los derechos morales y patrimoniales de “La Tesis o El Trabajo de Titulación”, manifiesto(amos) que la misma es original y que la presente autorización no contraviene a ninguna otra otorgada por el suscrito respecto de “La Tesis o El Trabajo de Titulación”, por lo que deslindo de toda responsabilidad al “IPN” en caso de que el contenido de “La Tesis o El Trabajo de Titulación” o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Zacatecas, Zac., a 13 de octubre
de 2020

Atentamente



Renata Aguilera Cháirez

RESUMEN

El inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos es un instrumento estratégico para la gestión de la calidad del aire, el cual permite conocer las fuentes emisoras de contaminantes, así como el tipo y cantidad de contaminantes que emite cada una de ellas. En el presente trabajo se realizó un inventario de emisiones atmosféricas de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero (GEI) en la vía Pacífico Norte concesión Ferromex con año base 2019. Las estimaciones para los contaminantes criterio se realizaron a través del uso de factores de emisión de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y los desarrollados para México por la EPA; para el caso de las estimaciones de GEI, se utilizó el software del inventario del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC) y la calculadora de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Como dato de actividad se calculó el volumen del diésel utilizado por las locomotoras en la concesión para dicho año. Los resultados obtenidos muestran que los óxidos de nitrógeno (NO_x) como contaminante criterio y el dióxido de carbono (CO_2) como GEI, son los mayores contaminantes atmosféricos emitidos por las locomotoras. Igualmente se identifica que la ruta con mayor contribución de emisiones es la México-Cd. Juárez, mientras que la menor es la Piedras Negras-Ramos Arizpe. Este trabajo tuvo la finalidad de determinar la cantidad de emisiones atmosféricas anuales asociadas al sector locomotoras en México, considerando por primera vez un inventario regional.

PALABRAS CLAVE

Contaminantes criterio, diésel, estimación, gases de efecto invernadero.

ABSTRACT

The inventory of atmospheric pollutant emissions is a strategic instrument for air quality management, which makes it possible to know the sources of pollutants, as well as the type and quantity of pollutants that each one of them emits. In this work, an inventory of atmospheric emissions of criterion pollutants and greenhouse gases (GHG) was carried out in the North Pacific Ferromex concession with base year 2019. The estimates for the criterion pollutants were made through the use of emission factors from the United States Environmental Protection Agency (EPA) and those developed for Mexico by the EPA; in the case of GHG estimates, the inventory software of the Intergovernmental Panel of Experts on Climate Change (IPCC) and the calculator of the Ministry of Environment and Natural Resources (SEMARNAT) were used. As activity data, the volume of diesel used by the locomotives in the concession for said year was calculated. The results obtained show that nitrogen oxides (NO_x) as a criterion pollutant and carbon dioxide (CO_2) as GHG, are the major atmospheric pollutants emitted by locomotives. Likewise, it is identified that the route with the highest

contribution to emissions is Mexico-Cd. Juárez, while the smallest is Piedras Negras-Ramos Arizpe. The purpose of this work was to determine the amount of annual atmospheric emissions associated with the locomotive sector in Mexico, considering for the first time a regional inventory.

KEY WORDS

Criterion pollutants, diesel, estimation, greenhouse gases.

ÍNDICE GENERAL

Título	Pág.
1.0 INTRODUCCIÓN	1
2.0 REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	2
2.1 Contaminación del aire.....	2
2.1.1 Contaminantes criterio.....	2
2.1.2 Gases de efecto invernadero (GEI).....	4
2.2 Inventarios de emisiones de contaminantes.....	6
2.2.1 Inventario de emisiones de contaminantes criterio.....	9
2.2.2 Inventario de emisiones GEI.....	11
2.3 Locomotoras.....	12
2.4 Diésel.....	13
2.4 Metodologías para el cálculo de emisiones atmosféricas	14
2.4.1 Software de inventario del IPCC	14
2.4.2 Calculadora SEMARNAT	15
2.5 Descripción de concesión Pacífico Norte	16
3.0 JUSTIFICACIÓN	18
4.0 HIPÓTESIS	19
5.0 OBJETIVOS.....	19
5.1 Objetivo general.....	19
5.2 Objetivos específicos	19
6.0 METODOLOGÍA.....	19
6.1 Consumo de combustible.....	19
6.2 Cálculo de emisiones de contaminantes criterio usando factores de emisión ...	20
6.3 Estimación de emisiones GEI por software IPCC.....	21
6.4 Estimación de emisiones GEI por calculadora SEMARNAT	23
6.5 Comparación de metodologías utilizadas y estimación de emisiones por rutas	23
7.0 RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	24
7.1 Consumo de combustible.....	25
7.2 Emisiones de contaminantes criterio.....	25

7.3 Emisiones de GEI.....	27
7.4 Emisiones por rutas en vía Pacífico Norte	29
7.4.1 Emisiones de contaminantes criterio.....	29
7.4.2 Emisiones de GEI.....	30
7.4.3 Consideraciones de rutas	31
7.5 Combustible y locomotoras.....	31
7.6 Inventario de emisiones atmosféricas.....	33
8.0 CONCLUSIONES	35
9.0 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36
10.0 ANEXOS.....	40

ÍNDICE DE TABLAS

Número	Tabla	Página
1	Descripción de ruta Pacífico Norte	17
2	Factores de emisión para locomotoras del EPA	20
3	Factores de emisión para locomotoras en México	21
4	Factores de emisión en México para diésel ferroviario	22
5	Emisiones de contaminantes criterio en vía Pacífico Norte año base 2019	26
6	Emisiones de GEI en vía Pacífico Norte año base 2019	27
7	Emisiones de contaminantes criterio por ruta vía Pacífico Norte 2019	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Número	Figura	Página
1	Línea del tiempo de tratados internacionales sobre contaminación atmosférica	8
2	Fuentes de emisión de contaminantes criterio	10
3	Fuentes de emisión de GEI	11
4	Mapa de la descripción de las rutas que conforman la vía Pacífico Norte concesionada a Ferromex	17
5	Categorías del software del IPCC	21

6	Hoja de cálculo del software del IPCC	22
7	Gráfica de emisiones de GEI en software IPCC	23
8	Calculadora de SEMARNAT para el cálculo de emisiones RENE	23
9	Mapa de las rutas pertenecientes a concesión Pacífico Norte junto con longitud	25
10	Gráfica de las emisiones de contaminantes criterio en vía Pacífico Norte con año base 2019	26
11	Gráfica de las emisiones de GEI en vía Pacífico Norte con año base 2019	28
12	Gráfica de las emisiones GEI en vía Pacífico Norte con año base 2019 por metodología	28
13	Gráfica de emisiones de contaminantes criterio por ruta en Pacífico Norte	30
14	Gráfica de emisiones GEI por ruta en Pacífico Norte según metodologías	31
15	Normas de emisión de contaminantes emitidas por la EPA	33

SIMBOLOGÍA

AAR	Asociación Americana de Ferrocarriles, por sus siglas en inglés
ARTF	Agencia Reguladora de Transporte Ferroviario
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
COP21	Conferencia de las Partes
ECFR	Código Electrónico de Regulaciones Federales, por sus siglas en inglés
EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, por sus siglas en inglés
Ferromex	Ferrocarril Mexicano
GE	General Electric
GEI	Gases de efecto invernadero
GWP	Potencia de Calentamiento Global, por sus siglas en inglés
HC	Hidrocarburos
HFC	Hidrofluorocarbonos
IMP	Instituto Mexicano del Petróleo
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGYCEI	Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero

INEM	Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes Criterio
IPCC	Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, por sus siglas en inglés
LGEEPA	Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
NO _x	Óxidos de nitrógeno
NO ₂	Dióxido de nitrógeno
N ₂ O	Óxido nitroso
O ₃	Ozono
OMS	Organización Mundial de la Salud
OPS	Organización Panamericana de la Salud
PFC	Perfluorocarbonos
PM	Material particulado
PM _{2.5}	Material particulado con diámetro aerodinámico igual o inferior a 10 µm
PM ₁₀	Material particulado con diámetro aerodinámico inferior a 2.5 µm
RENE	Registro Nacional de Emisiones
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SF ₆	Hexafluoruro de azufre
SO ₂	Dióxido de azufre
t/a	Toneladas de contaminante
t/MJ	Tonelda/MegaJoules
tCO ₂ eq/a	Toneladas de dióxido de carbono equivalente por año

1.0 INTRODUCCIÓN

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2016) atribuyó en todo el mundo, cerca de 7 millones de muertes prematuras a la contaminación del aire. Cerca del 88% de estas muertes ocurrieron en países de ingresos bajos y medios.

La contaminación del aire representa un importante riesgo del medio ambiente a la salud humana, asociada a originar accidentes cerebrovasculares, cáncer de pulmón y neumopatías crónicas y agudas, entre ellas el asma (OMS, 2016). Siendo que la contaminación del aire es el principal riesgo ambiental para la salud pública en el continente americano, y más de 150 millones de personas en América Latina viven en ciudades que exceden los estándares recomendados por la OMS (Organización Panamericana de la Salud [OPS], 2016).

En ese sentido, los ferrocarriles han sido elegidos como medios de transporte de carga y pasajeros por la capacidad movilizadora, bajos costos, tiempo y su elevada eficiencia de combustible, en comparación con otros medios de transporte. Sin embargo, se caracterizan por el uso de locomotoras diésel con motores de varias décadas, que no están sujetos a ningún estándar de emisiones atmosféricas.

Las locomotoras diésel emiten ciertos contaminantes, entre los que se incluyen material particulado (PM), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) y óxido nitroso (N_2O), lo que afecta a las comunidades locales y a los ecosistemas de las regiones por las que transita (Vojtisek-Lom et al, 2020).

Desafortunadamente, hay datos muy limitados disponibles sobre el desempeño de las emisiones de los vehículos ferroviarios, especialmente cuando se trata de su operación típica, que puede diferir de las condiciones de prueba de laboratorio y de patio de ferrocarriles, así como de las condiciones de terreno. Estas emisiones de escape de contaminantes atmosféricos por motores ferroviarios, no se han examinado ni regulado de la misma forma que si se compara con otras fuentes móviles (Vojtisek-Lom et al, 2020).

Actualmente, el sistema ferroviario en México cuenta con 26,914 km de vía férrea distribuidas por el territorio nacional desde el año 2017. Éstas están asignadas a nueve concesionarios que transportan pasajeros y carga para comercio interior y exterior, entre los cuales se encuentra al concesionario Ferrocarril Mexicano (Ferromex) perteneciente a Grupo México. Así pues, durante el año 2019 se transportaron 125.2 millones de toneladas de carga para comercio interior, 88.3 millones de toneladas para comercio exterior, así mismo se movilizaron 57.5 millones de pasajeros (Agencia Reguladora de Transporte Ferroviario [ARTF], 2019).

A pesar de que el ferrocarril transita por la mayor parte del territorio nacional, no se tienen inventarios de emisiones atmosféricas específicos para este sector. Independiente a que los concesionarios son industrias privadas, el gobierno no ha realizado estos inventarios conforme se ha manejado en otros países como Estados Unidos, Inglaterra, China, Israel y Turquía.

Por lo anterior, este proyecto tiene como objetivo realizar un inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos en la vía Pacífico Norte concesión Ferromex, la cual es la de mayor longitud en el territorio nacional, y abarca diversas entidades federativas. Como metodologías se emplearon sistemas internacionales y nacionales para la estimación de contaminantes criterio y de gases de efecto invernadero (GEI), con la finalidad de obtener estimaciones de contaminantes conforme a las rutas que integran a la concesión.

2.0 REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Contaminación del aire

El Panel Intergubernamental de cambio climático (IPCC, por sus siglas en inglés) define a la contaminación atmosférica como la 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, a través de procesos naturales o actividades humanas, de sustancias (gases, aerosoles) que conllevan efectos nocivos directos (contaminantes primarios) o indirectos (contaminantes secundarios) (Panel Intergubernamental de cambio climático [IPCC], (2018).

La introducción a la atmósfera denominada emisión puede ser a través de una descarga directa o indirecta de la sustancia en cualquiera de sus estados físicos o de energía (H. Congreso de la Unión, 2014). A su vez, los contaminantes primarios son emitidos directamente a la atmósfera por alguna fuente de emisión como chimeneas, automóviles, entre otros; mientras que los contaminantes secundarios son los aquellos originados en el aire como consecuencia de la transformación y reacciones químicas que sufren los contaminantes primarios en la atmósfera (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2013).

De la anterior clasificación, los contaminantes se catalogan en otras clasificaciones como contaminantes criterio, gases de efecto invernadero o contaminantes de vida corta (SEMARNAT, 2013).

2.1.1 Contaminantes criterio

Los contaminantes criterio son aquellos contaminantes normados a los que se les han establecido un límite máximo permisible de concentración en el aire ambiente, con la finalidad de proteger la salud humana y asegurar el bienestar de la población. Los contaminantes criterio son: ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂), CO, NO₂, PM y plomo

(Pb). Por lo que, el volumen y las características de los contaminantes emitidos a la atmósfera, tanto local como regionalmente, determinan en buena medida la calidad del aire en una zona particular. No obstante, las características climáticas y geográficas también influyen en las condiciones del aire a las que están expuestas las poblaciones (SEMARNAT, 2019).

Material particulado (PM)

El material particulado es el término relacionado para una mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas que se encuentran en el aire. Estas partículas se componen de sustancias químicas con tamaños y formas diferentes; las cuales se emiten directamente desde una fuente, como sitios de construcción, caminos sin pavimentar, chimeneas o incendios (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos [EPA], 2020a).

La contaminación por partículas incluye (EPA, 2020a):

- PM₁₀: Partículas inhalables con diámetros generalmente de 10 micrómetros y menores.
- PM_{2.5}: Partículas finas inhalables, con diámetros generalmente de 2.5 micrómetros y menores.

El material particulado puede inhalarse y causar problemas de salud como penetrar en los pulmones y llegar al torrente sanguíneo. Así mismo, son la principal causa de visibilidad reducida (neblina) en parques nacionales y áreas silvestres (EPA, 2020a).

Monóxido de carbono (CO)

El CO es un gas incoloro e inodoro que puede ser dañino cuando se inhala en grandes cantidades. La mayor fuente de emisión es la quema de combustibles fósiles. En la salud puede reducir la cantidad de oxígeno que transporta en el torrente sanguíneo a órganos críticos como el corazón y el cerebro. También puede causar mareos, confusión, pérdida del conocimiento y la muerte (EPA, 2016a).

Dióxido de azufre (SO₂)

El SO₂ es el componente que se utiliza como indicador para el grupo de óxidos de azufre gaseosos (SO_x). Las mayores fuentes de emisiones de SO₂ provienen de la quema de combustibles fósiles en las centrales eléctricas y otras instalaciones industriales. A su vez se incluyen procesos industriales como la extracción de metales del mineral y fuentes naturales como volcanes, locomotoras, barcos y equipo pesado que queman combustibles con alto contenido de azufre (EPA, 2019a).

Las exposiciones al SO₂ pueden dañar el sistema respiratorio humano y dificultar la respiración, además puede dañar el follaje de la vegetación, así como disminuye su

crecimiento. También contribuyen a la lluvia ácida y reducción de visibilidad (neblina) (EPA, 2019a).

Dióxido de nitrógeno (NO₂)

El NO₂ se utiliza como indicador del grupo de gases altamente reactivos conocidos como óxidos de nitrógeno (NO_x). El NO₂ se emite al aire principalmente por la quema de combustible como el transporte, plantas de energía y equipos todoterreno (EPA, 2016b).

El NO₂ puede irritar las vías respiratorias del sistema respiratorio humano, agravando o desarrollando enfermedades respiratorias como el asma. Así mismo el NO₂ y otros NO_x interactúan con agua, oxígeno y otras sustancias químicas de la atmósfera para formar lluvia ácida. La lluvia ácida daña ecosistemas sensibles como lagos y bosques. En la atmósfera contribuye a la contaminación por nutrientes en las aguas costeras (EPA, 2016b).

Ozono (O₃)

El O₃ es un gas compuesto por tres átomos de oxígeno. Se encuentra tanto en la atmósfera superior de la Tierra (estratosférico) como a nivel del suelo (troposférico). El ozono estratosférico se produce naturalmente en la atmósfera superior, donde forma una capa protectora que protege de los rayos ultravioleta del sol. El ozono troposférico es un contaminante atmosférico nocivo que se crea mediante reacciones químicas entre los NO_x y los compuestos orgánicos volátiles (COV) reaccionando químicamente en presencia de la luz solar (EPA, 2020b).

En la salud humana el O₃ puede desencadenar la reducción de la función pulmonar y dañar el tejido pulmonar. Además, afecta la vegetación y los ecosistemas sensibles, incluidos bosques, parques, refugios de vida silvestre y las áreas silvestres (EPA, 2020b).

2.1.2 Gases de efecto invernadero (GEI)

Los GEI son componentes gaseosos de la atmósfera, natural o antropogénico, 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. Esta propiedad ocasiona el efecto invernadero. El CO₂, N₂O, metano (CH₄), vapor de agua (H₂O), y O₃, son los gases de efecto invernadero primarios de la atmósfera terrestre. Asimismo, la atmósfera contiene cierto número de GEI de origen antropogénico exclusivamente, los cuales son hexafluoruro de azufre (SF₆), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC) (IPCC, 2018).

Para cada gas de efecto invernadero, se ha calculado un Potencial de Calentamiento Global (PCG) para reflejar cuánto tiempo permanece en la atmósfera (en promedio de

100 años) y con qué fuerza absorbe energía. Los gases con un PCG más alto absorben más energía, por kilogramo, que los que tienen un GWP más bajo y, por lo tanto, contribuyen más al calentamiento de la Tierra (EPA, 2019b).

Dióxido de carbono (CO₂)

Este GEI es considerado el mayor impulsor del calentamiento global, tiene un PCG de un año. Las fuentes naturales del CO₂ que lo generan se incluyen plantas en descomposición y materia animal, incendios forestales naturales y volcanes. Entre las fuentes antropogénicas se encuentran la combustión de carbón, petróleo y gas, y de la deforestación (EPA, 2019b).

El CO₂ se hace presente de manera natural en la atmósfera como parte del ciclo del carbono de la Tierra (la circulación natural de carbono entre la atmósfera, los océanos, la tierra, las plantas y los animales). Las actividades del ser humano están alterando el ciclo del carbono: tanto porque suman más CO₂ a la atmósfera como influenciando la capacidad de los disipadores naturales (como los bosques) para eliminar el CO₂ de la atmósfera e influyendo sobre la capacidad de las tierras para almacenar carbono (EPA, 2019b).

Metano (CH₄)

El CH₄ se crea principalmente por la descomposición de la materia orgánica que procede en gran parte de los vertederos, el ganado bovino y el resto del sector ganadero (pollos y cerdos), así mismo durante la producción y el transporte de carbón, gas natural y petróleo. Entre las fuentes naturales de emisión se identifica a los pantanos naturales, mayoritariamente (EPA, 2019b).

La persistencia del metano en la atmósfera es reducida si se compara con el CO₂, pero el CH₄ es más eficiente en la captura de radiación. Su impacto comparativo es 25 veces más grande que el del CO₂ en un período de 100 años (EPA, 2019b).

Óxido nitroso (N₂O)

El óxido nitroso es el único óxido de nitrógeno (NO_x) que actúa como GEI; tendrá en 100 años un efecto de calentamiento global de 298 veces superior al del CO₂. Es emitido por las bacterias del suelo, la agricultura y el uso de fertilizantes con base de nitrógeno, junto con el tratamiento de los residuos animales, además de la quema de combustible en motores de combustión interna (EPA, 2019b).

Gases fluorados

Los SF₆, HFC y PFC son GEI sintéticos y potentes que se emiten en diversos procesos industriales. En ocasiones, los gases fluorados se utilizan como sustitutos de sustancias que destruyen el O₃ de la estratósfera. Estos gases habitualmente se emiten en pequeñas cantidades, pero son considerados como gases de Alto Potencial

de Calentamiento Global porque su persistencia en la atmósfera va desde 270 hasta 50,000 años (EPA, 2019b).

A diferencia de otros gases, los gases fluorados no tienen fuentes naturales y solo provienen de actividades relacionadas con el ser humano. Se emiten al usarse como sustitutos de sustancias que destruyen el ozono, y a través de diversos procesos industriales como la fabricación de aluminio y semiconductores. En general, los gases fluorados son el tipo más potente y persistente de GEI emitidos por actividades antropogénicas, debido a que una concentración atmosférica reducida puede tener grandes efectos en las temperaturas globales (EPA, 2019b).

En ese sentido, resulta fundamental contar con información actualizada sobre las emisiones emitidas a la atmósfera por los diferentes contaminantes, la cual debe ser útil para el análisis de sus problemáticas, y para diseñar y ejecutar acciones efectivas que mitiguen su emisión a niveles local, nacional y mundial (SEMARNAT, 2018).

2.2 Inventarios de emisiones de contaminantes

Los inventarios de emisiones de contaminantes son instrumentos de gestión de la calidad del aire en los que se determinan emisiones de contaminantes provenientes de diversos tipos de fuentes establecidas en un área geográfica determinada, con una resolución espacial y una temporalidad en un año específico de actividad, también llamado año base; lo anterior dependiendo de la finalidad con la que se establezcan (SEMARNAT, 2019).

En términos generales, el inventario de emisiones es una herramienta de información que tiene la capacidad de proporcionar datos que servirán en la gestión de instrumentos para la calidad del aire según el objetivo establecido. Entre los principales objetivos con los que se desarrolla, se encuentran los siguientes (SEMARNAT, 2019):

- Identificar fuentes de emisión para el desarrollo de medidas de control, así como la evaluación en la efectividad de programas en versiones anteriores.
- Funcionar como base para la planeación y la implementación de medidas y líneas de acción para la disminución de la contaminación atmosférica por sectores específicos.
- Generar información para el desarrollo y la actualización de normas para la prevención y el control de la contaminación del aire.
- Servir como pronóstico de comportamientos y tendencias de emisiones en inventarios anteriores o futuros según las medidas establecidas y el proceder de la sociedad.

- Describir las emisiones en función del tiempo y del área de inventario, el cual puede ser utilizado como modelado de generación y dispersión de contaminantes.

Es por ello que, a nivel mundial, existen ciertos acuerdos que permiten el desarrollo de los inventarios para el monitoreo de la calidad del aire con el objetivo de generar el bienestar entre la salud humana y el medio ambiente. Entre estos, se encuentra la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), la cual fue adoptada durante la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro en el año 1992, y reconoció la existencia de un cambio climático debido a la actividad humana. Entró en vigor en el año 1994 y ha sido ratificada por 196 Estados. Fue firmada por el Gobierno de México en junio en el año 1992 y aprobada por la Cámara de Senadores en diciembre del mismo año. Tras la aprobación del Senado, la Convención fue ratificada ante la Organización de las Naciones Unidas (ONU) en el año 1993 (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2014a).

Así mismo, el Protocolo de Kioto se adoptó en el año 1995 como parte de la CMNUCC, y fue creado para reducir las emisiones GEI que causan el calentamiento global: CO₂, CH₄ y N₂O; además de tres gases industriales fluorados: HFC, SF₆ y PFC (Sistema Nacional de Cambio Climático [SINACC], 2018a).

Sin embargo, como parte del esfuerzo global para hacer frente al cambio climático, durante la 21^o Conferencia de las Partes (COP21) en Francia, se aprobó el Acuerdo de París sobre Cambio Climático, el cual sustituye al Protocolo de Kioto que concluye en el año 2020. Este nuevo acuerdo compromete a las naciones a limitar el calentamiento global a 1.5 °C a través de la disminución de las emisiones de los GEI (SINACC, 2018b).

En el año 2016, México firmó el Acuerdo de París, y uno de sus compromisos ante la CMNUCC es “Elaborar, actualizar periódicamente, publicar y facilitar los inventarios nacionales de las emisiones antropogénicas por las fuentes y de la absorción por los sumideros de todos los GEI no controlados por el Protocolo de Montreal”, utilizando metodologías comparables que habrán de ser acordadas por la Conferencia de las Partes, elaborándose en diferentes plazos (SINACC, 2018b).

Además, existen otros tratados internacionales relacionados a la contaminación atmosférica, en los cuales México también es participe. Tal es el caso del Convenio de Ginebra en el año 1979 sobre contaminación transfronteriza; el Convenio de Viena en el año 1985 en relación a la protección de los efectos negativos de la capa de ozono, y el Convenio de Minamata en el año 2013 sobre mercurio (Secretaría de Relaciones Exteriores [SRE], 2020).

En la Figura 1 se presenta una línea del tiempo de los tratados internacionales relacionados a contaminación atmosférica, y en los que México es Estado Parte.

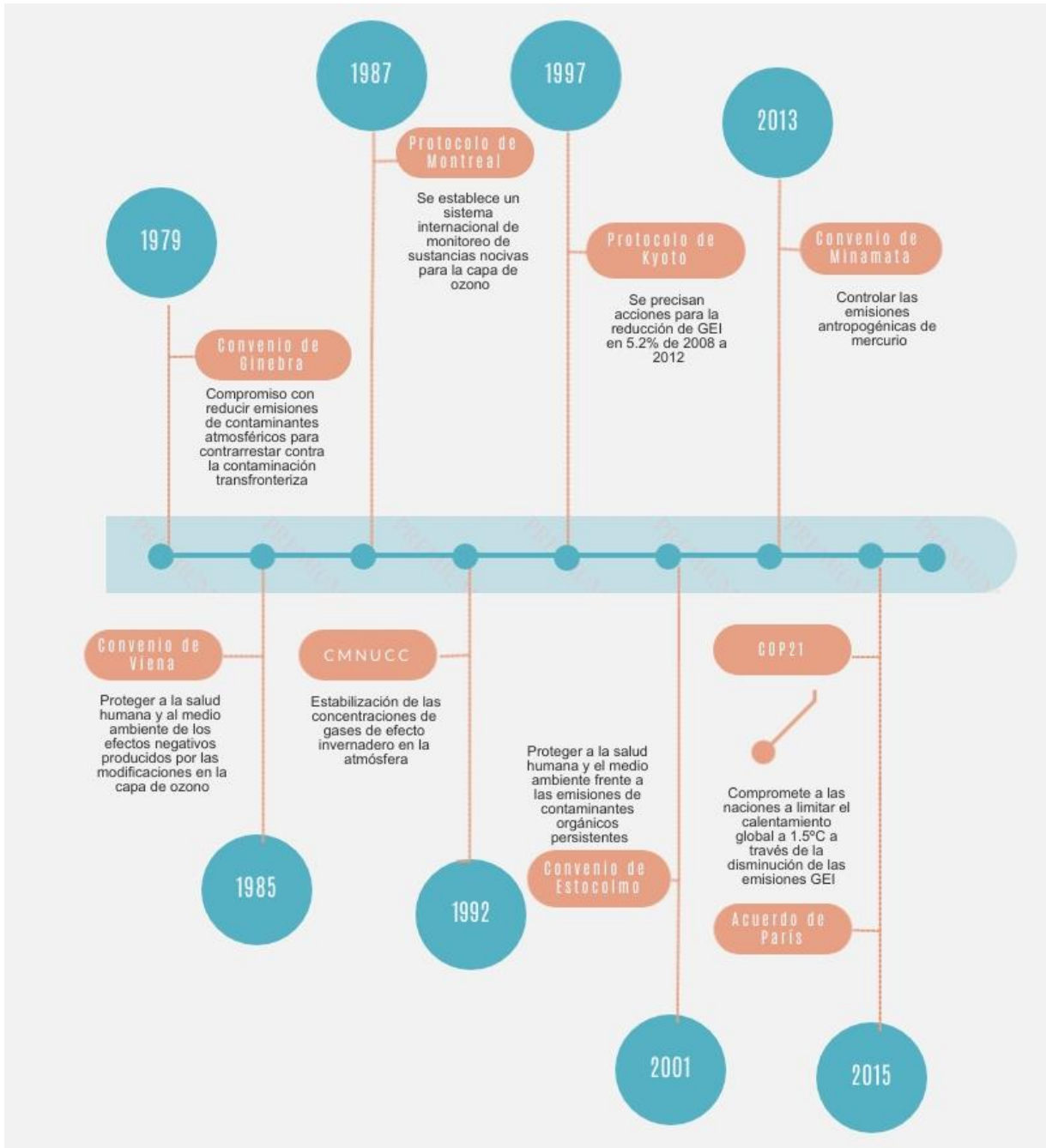


Figura 1. Línea del tiempo de tratados internacionales sobre contaminación atmosférica. Fuente: Elaboración propia basada en SRE, 2020.

Así mismo en México, el inventario nacional de emisiones a la atmósfera se genera con base en las disposiciones de instrumentos, leyes y reglamentos, los cuales son:

- La Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos: artículo 4, párrafo 5.
- La Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA): artículo 111 fracción II y artículo 112 fracción IV.
- La Ley General de Cambio Climático: artículo 7 fracción XIV y artículo 8 fracción XII.
- El Reglamento de la LGEEPA en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera: artículos 41, 44 y 45.

En ese sentido, existen diversas clases de inventarios por tipo de contaminantes, entre los que se encuentran los de contaminantes criterio y de GEI, principalmente. Particularmente, el Instituto Nacional de Cambio Climático (INECC) es el encargado del desarrollo e integración del inventario de emisiones de GEI, mientras que la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) se encarga del inventario nacional de emisiones de contaminantes criterio (SEMARNAT, 2019).

2.2.1 Inventario de emisiones de contaminantes criterio

El Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes Criterio (INEM) integrado por la SEMARNAT comprende información de las emisiones liberadas a la atmósfera de los contaminantes clasificados como criterio: CO, NO_x, SO_x, PM₁₀ y PM_{2.5}, compuestos orgánicos volátiles (COV) y amonio (NH₃), emitidos por las distintas fuentes. En el caso del contaminante criterio O₃, el INEM comprende la estimación de sus dos principales precursores: NO_x y COV (SEMARNAT, 2019).

El INEM es entonces un instrumento estratégico para la gestión de la calidad del aire, ya que contiene las emisiones de contaminantes criterio de la industria, transporte, comercios, servicios, casas habitación, vegetación y suelo que se generan en el país. Su base de datos proporciona información sobre las emisiones que se generan en las entidades federativas con base en las fuentes naturales y antropogénicas (SEMARNAT, 2019).

Las fuentes integradas en el INEM se clasifican como se presentan en la Figura 2.

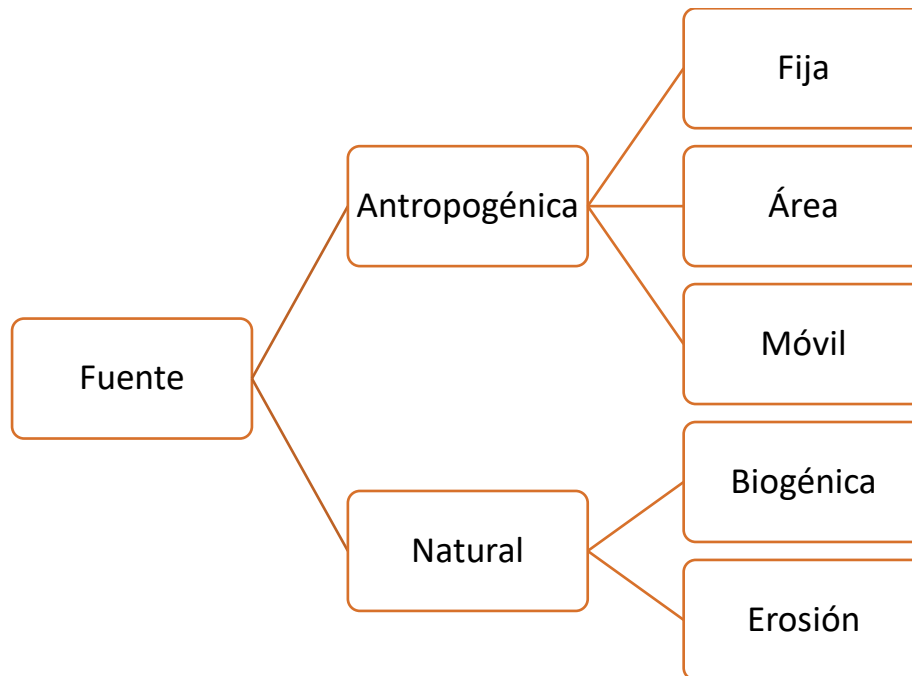


Figura 2. Fuentes de emisión de contaminantes criterio (SEMARNAT, 2019).

- **Fuentes antropogénicas:** Toda instalación o proceso que se origine de las actividades humanas que genere emisiones contaminantes a la atmósfera.
 - *Fuentes fijas.* Es toda instalación establecida en un solo lugar que tiene como finalidad desarrollar operaciones o procesos industriales de manufactura.
 - *Fuentes de área.* Representan aquellas fuentes pequeñas, numerosas y dispersas relacionadas a actividades y procesos, y que no pueden ser incluidas de manera eficiente en un inventario de fuentes fijas.
 - *Fuentes móviles (carreteras y no carreteras).* Se trata de los vehículos con motores de combustión y similares, que debido a su funcionamiento generan emisiones contaminantes a la atmósfera. Las fuentes móviles carreteras incluyen: autobuses, camiones, automóviles, motocicletas; mientras que las fuentes móviles no carreteras comprenden: aviones, helicópteros, ferrocarriles (locomotoras), tranvías, embarcaciones, equipo y maquinarias.

- **Fuentes naturales.** Se trata de cualquier fuente o proceso natural en la vegetación y los suelos que generen emisiones, suelen incluirse las emisiones biogénicas, y la erosión del suelo.

- *Fuentes biogénicas*: Representan las emisiones de los contaminantes que la vegetación (pastos, cultivos, arbustos, bosques, etc.), emite a la atmósfera.
- *Erosión*: Se considera al proceso en el que el óxido nitroso (N₂O) es producido naturalmente en los suelos como parte de los procesos de desnitrificación (es decir, la reducción de nitritos y nitratos a nitrógeno gaseoso como N₂ o NO_x).

El último INEM reporta datos para el año 2016, en donde se incluye la estimación de las emisiones de contaminantes criterio para todas las fuentes por entidad federativa.

2.2.2 Inventario de emisiones GEI

El Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI), contiene la estimación de las emisiones antropogénicas de gases y compuestos de efecto invernadero y de la absorción por los sumideros en México. Dentro de los gases y compuestos, se comprenden las emisiones de carbono negro (CN), CO₂, CH₄, N₂O, HFC, SF₆ y PFC (INECC, 2018)

El INEGYCEI es elaborado por el INECC, quien elaborará sus contenidos de acuerdo con los siguientes plazos (INECC, 2018):

- La estimación de las emisiones de la quema de combustibles fósiles se realizará anualmente.
- La estimación de las emisiones, distintas a las de la quema de combustibles fósiles, con excepción de las relativas al cambio de uso de suelo, se realizará cada dos años.
- La estimación del total de las emisiones por las fuentes y las absorciones por los sumideros de todas las categorías incluidas en el Inventario, se realizará cada cuatro años

Las fuentes integradas en el INEM se clasifican como se presentan en la Figura 3.

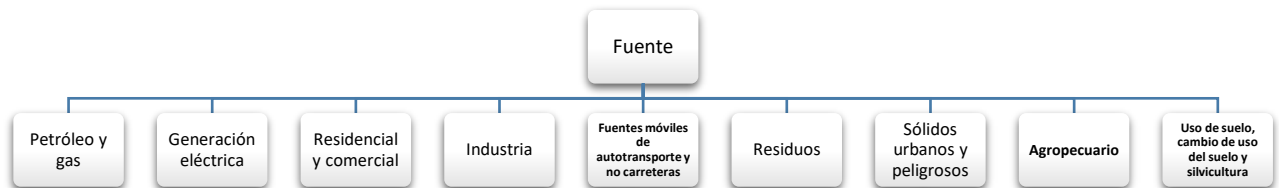


Figura 3. Fuentes de emisión de GEI (INECC, 2018)

- *Petróleo y gas*: Reportan las emisiones por la producción, transporte, distribución, procesamiento y uso de hidrocarburos en el país.

- *Generación eléctrica*: Emisiones por el uso de combustibles fósiles en las centrales eléctricas operadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y los Productores Independientes de Energía (PIE).
- *Residencial y comercial*: Reporta emisiones por el consumo de gas natural, gas licuado de petróleo, queroseno, diésel y leña.
- *Industria*: Considera emisiones por el uso de combustibles fósiles, procesos industriales a partir de la transformación de materias primas mediante procesos químicos y físicos, y emisiones fugitivas en minería.
- *Fuentes móviles de autotransporte y no carreteras*: Emisiones generadas por la combustión interna de los automotores con motor ciclo Otto y diésel, así como por la combustión interna de los vehículos correspondientes a los sectores de aviación, ferroviario, marítimo, de la construcción y agrícola.
- *Residuos*: Reporta emisiones de residuos sólidos urbanos (RSU) y residuos peligrosos (RP), así como del tratamiento y eliminación de aguas residuales municipales e industriales.
- *Sólidos urbanos y peligrosos*: Emisiones provenientes de la disposición final de RSU, quema a cielo abierto e incineración de RP.
- *Agropecuario*: Considera las emisiones de las actividades pecuarias y agrícolas.
- *Uso de suelo, cambio de uso del suelo y silvicultura*: Se reportan las emisiones por los cambios de usos del suelo.

2.3 Locomotoras

Existen diferentes tipos de locomotoras, las cuales se diferencian por el tipo de combustible empleado para su funcionamiento, las principales son eléctricas y diésel-eléctricas. Las primeras funcionan con electricidad generada en centrales eléctricas estacionarias y distribuidas por un tercer carril o un sistema de catenaria aérea. Las emisiones producidas por la generación de esta electricidad se atribuyen a las centrales eléctricas que generan la electricidad (Sierra Research Inc., 2004).

En cambio, las locomotoras diésel-eléctricas utilizan un motor diésel y un alternador o generador para producir la electricidad necesaria para alimentar sus motores de tracción. Las emisiones producidas por estos motores diésel son de interés en el

desarrollo del inventario de emisiones de contaminantes atmosféricas, entre los que se encuentran HC, CO, NO_x, SO₂, PM, CO₂ y N₂O (Sierra Research Inc., 2004).

En su mayoría, las locomotoras en México son del tipo diésel-eléctricas. El combustible se usa, sobre todo, por la gran potencia requerida para el funcionamiento de los equipos, la cual es mayor a 2000 HP (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía [CONUEE], 2015).

2.4 Diésel

El diésel, también conocido como gasóleo o gasoil, es un hidrocarburo líquido que se obtiene principalmente de la destilación del petróleo a una temperatura entre 200 °C y 380 °C. Éste se evapora lentamente por su número de carbonos (12), además que es 30% más eficiente y posee un mejor proceso de combustión que la gasolina (CONUEE, 2017).

En México, se han reducido los niveles de azufre en la producción de los combustibles fabricados, específicamente el contenido de éste en el diésel ha disminuido de un contenido máximo de 0.5% a 0.05% en el diésel de ultra bajo azufre (UBA). Sin embargo, aún existen retos significativos en seguridad energética, precios competitivos y en calidad del combustible (CONUEE, 2017).

Concretamente Petróleos Mexicanos (PEMEX) produce tres tipos de diésel, los cuales son los siguientes (CONUEE, 2017):

- *Diésel A*: Es refinado y contiene aditivos para evitar la solidificación de la parafina a bajas temperaturas, y es el adecuado para vehículos.
- *Diésel B*: Está menos filtrado y contiene más parafina que el diésel A. Se usa para maquinaria agrícola, pesquera, embarcaciones y vehículos autorizados.
- *Diésel C*: Su uso es específicamente para calderas o equipos que generan calor debido a su alto contenido de parafinas.

Así mismo, se tiene registro de que el diésel mexicano produce una mayor cantidad de CO₂ que contribuye al efecto invernadero, mientras que también produce NO_x relacionado a contaminantes criterio (CONUEE, 2017).

En relación con lo anterior, se han desarrollado varios artículos sobre la realización de inventarios de emisiones sobre el sector del ferrocarril, en estos se emplean diversas metodologías desarrolladas para este tipo de sector.

Dincer & Ebir (2007) estimaron las emisiones de escape de vehículos ferroviarios nacionales en Turquía para el periodo 2000 a 2005. En este se incluían las emisiones de NO_x, HC, CO, PM, SO₂ y CO₂ de las locomotoras diésel y los vagones, empleando datos de tráfico ferroviario y factores de emisión de la EPA. La distribución de

emisiones con respecto al tipo de vehículos ferroviarios mostró que las locomotoras de línea principal contribuyen ~91% a las emisiones totales.

Eastern Research Group, Inc. (2015) realizó un inventario de emisiones de locomotoras en todo el estado de Texas para el año 2014 e inventarios de tendencias en el periodo 2008 a 2040. Se incluyeron ferrocarriles de clase I, II y III y emisiones de contaminantes criterio por segmento ferroviario para todos los condados del Estado.

Talaiekhosani et al. (2017) realizaron una evaluación del inventario de emisiones de contaminantes del aire del transporte ferroviario y aéreo en Isfahán metropolitano en el año 2016. Se incluyeron emisiones de NO_x, SO_x, HC, CO, PM10 y PM2.5 para ambos sectores a través de los métodos validados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) y la Agencia Ambiental Europea. Además, se concluyó que el sector que emite mayores emisiones es el ferroviario, y el contaminante es el NO_x.

Específicamente en México, Tami (2013) realizó un inventario de emisiones atmosféricas generadas por las actividades del recinto portuario de Veracruz México. En dicho trabajo se incluyeron las emisiones de locomotoras de patio que ofrecen servicios en el recinto.

A su vez se identifican otros métodos para la estimación de las emisiones, tal es el caso del software IPCC, la calculadora de SEMARNAT, o a través del uso de factores de emisión.

2.4 Metodologías para el cálculo de emisiones atmosféricas

La determinación del método para la estimación de la emisión atmosférica debe tomar en cuenta la actividad y la disponibilidad de la información. De acuerdo con lo anterior se tienen las siguientes metodologías (INECC, 2012):

- Métodos basados en datos de emisiones observadas (mediciones continuas o a intervalos periódicos).
- Métodos basados en factores y variables de emisión y actividad.

En la gran mayoría de los casos, no se dispone de datos obtenidos de mediciones a través de un monitoreo continuo de emisiones, por lo que se emplean en mayor medida los métodos basados en factores de emisión y datos de actividad.

2.4.1 Software de inventario del IPCC

El software de inventario del IPCC implementa los métodos de Nivel 1 más simples para todos los sectores y los métodos de Nivel 2 para la mayoría de las categorías de energía, procesos industriales (IPPU) y sectores de desechos, así como las categorías

de agricultura del sector tierras gestionadas (AFOLU) en las Directrices del IPCC del año 2006 para los inventarios nacionales de GEI (IPCC, s.f.).

Reconociendo que los países utilizan ampliamente las directrices revisadas para compilar sus inventarios nacionales de GEI, el software debe usarse como una herramienta de complemento a otras metodologías de cálculo o monitoreo. Los países pueden utilizar estas estimaciones para compararlas con sus propias estimaciones nacionales. El enfoque de referencia es un método predeterminado para estimar las emisiones de CO₂eq/a de la energía. Siendo que el CO₂eq/a es la unidad de medición usada para indicar el potencial de calentamiento global de cada uno de los GEI, en comparación con el CO₂. Los GEI distintos del CO₂ son convertidos a su valor de CO₂eq multiplicando la masa del gas en cuestión por su potencial de calentamiento global (IPCC, s.f.).

2.4.2 Calculadora SEMARNAT

La Ley General de Cambio Climático establece la creación de diversos instrumentos de política pública, entre ellos, el Registro Nacional de Emisiones (RENE) y su Reglamento, que permitirán compilar la información necesaria en materia de emisión de Compuestos y Gases Efecto Invernadero (CyGEI) de los diferentes sectores productivos del país. Los diferentes sectores deberán reportar obligatoriamente sus emisiones directas e indirectas de gases o compuestos de efecto invernadero de todas sus instalaciones cuando excedan las 25,000 tCO₂eq (SEMARNAT, 2020).

Así mismo, la calculadora identifica cada una de las sustancias químicas conforme a una denominación internacionalmente aceptada y definida por asociaciones especialistas en la materia. Además, contempla la fórmula y la familia química a las que pertenece la sustancia, así como su potencial de calentamiento global, mismo que es congruente con lo publicado en el Quinto Reporte de Evaluación del IPCC (SEMARNAT, 2020).

La calculadora de SEMARNAT fue creada con la finalidad de ser una herramienta orientadora para determinar si se sobrepasa o no el umbral de registro. En ningún caso sustituye la estimación de emisiones que deben realizar los establecimientos sujetos a reporte y no debe usarse como resultado final de sus emisiones anuales, ya que solamente es un instrumento de apoyo. Dicha calculadora obtiene un resultado indicativo en tCO₂eq/a; y los resultados serán más aproximados a las emisiones reales en la medida en el que el usuario ingrese información completa y verdadera (SEMARNAT, 2020).

Factores de emisión

Un factor de emisión es un valor representativo que intenta relacionar la cantidad de un contaminante liberado a la atmósfera con una actividad asociada con la liberación

de ese contaminante. Estos factores generalmente se expresan como el peso del contaminante dividido por una unidad de peso, volumen, distancia o duración de la actividad que emite el contaminante. En la mayoría de los casos, estos factores son simplemente promedios de todos los datos disponibles de calidad aceptable, y generalmente son representativos de los promedios a largo plazo para todas las instalaciones en la categoría de fuente (EPA, 2020).

Los factores de emisión de la EPA, están determinados por la información disponible de las referencias publicadas. No dispone de un factor de emisión para un proceso, debido a que no se tienen suficientes datos para proporcionarlo (EPA, 2020).

Así mismo, los factores de emisión de GEI que se utilizan en México están publicados en el *Acuerdo que establece las particularidades técnicas y las fórmulas para la aplicación de metodologías para el cálculo de emisiones de gases o compuestos de efecto invernadero*, se consideran las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O (INECC, 2014).

Los factores de emisión son utilizados tanto en el software de inventario del IPCC y en la Calculadora de SEMARNAT para el cálculo de las emisiones atmosféricas.

2.5 Descripción de concesión Pacífico Norte

En México, el sistema ferroviario contempla una longitud total de 26,914 km distribuida en vía principal, secundaria, particular y en fuera de operación, lo que conlleva a un total de vía operada de 23,469 km asignada a nueve organizaciones privadas, las cuales prestan servicio para el transporte de carga y de pasajeros. Este sistema está otorgado a diferentes títulos de concesión de la vía general de comunicación ferroviaria a las organizaciones privadas dependiendo el servicio que presten (ARTF, 2019).

Específicamente la vía Pacífico Norte asignada a Ferromex es la que se integra con mayor longitud en todo el sistema ferroviario; cuenta con una longitud de 6,179.7 km de vía principal y de 687.3 km de ramales, sumando un total de 6,867 km. Durante el año 2019 se transportaron 59.9 millones t de carga por estas vías, lo que representa un 47.7% del total transportado en dicho año (Ferrocaril Mexicano [Ferromex], 2019).

A su vez, la vía Pacífico Norte se encuentra dividida en seis rutas descritas en la Tabla 1, comunicando a 18 entidades federativas del norte y centro del país. Estos Estados son Aguascalientes, Baja California, Coahuila, Colima, Chihuahua, Durango, Estado de México, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Nuevo León, Querétaro, Sinaloa, Sonora, Tamaulipas y Zacatecas (Ferromex, 2019).

Así mismo, la vía férrea proporciona servicios a los puertos marítimos de Altamira y Tampico en el Golfo de México; Manzanillo, Mazatlán, Topolobampo y Guaymas, en el Océano Pacífico. Además, conecta con los puntos fronterizos de Mexicali, Baja

California; Nogales, Sonora; Ciudad Juárez y Ojinaga, Chihuahua; y Piedras Negras, Coahuila, conectando con los ferrocarriles Union Pacific (UP) y Burlington Northern & Santa Fe (BNSF) pertenecientes al sistema ferroviario de Estados Unidos (Ferromex, 2019).

Tabla 1. Descripción de ruta Pacífico Norte (Ferromex, 2019).

Ruta	Longitud de vía (km)
México - Cd. Juárez	1956
Irapuato - Manzanillo	642
Tampico - Gómez Palacio	866
Piedras Negras - Ramos Arizpe	427
Guadalajara - Nogales	1764
Mexicali - Benjamín Hill	524

En la Figura 4 se presenta un mapa de la descripción de las rutas de la vía Pacífico Norte concesionada a Ferromex en la que se observa las entidades federativas que conecta en el norte del país.

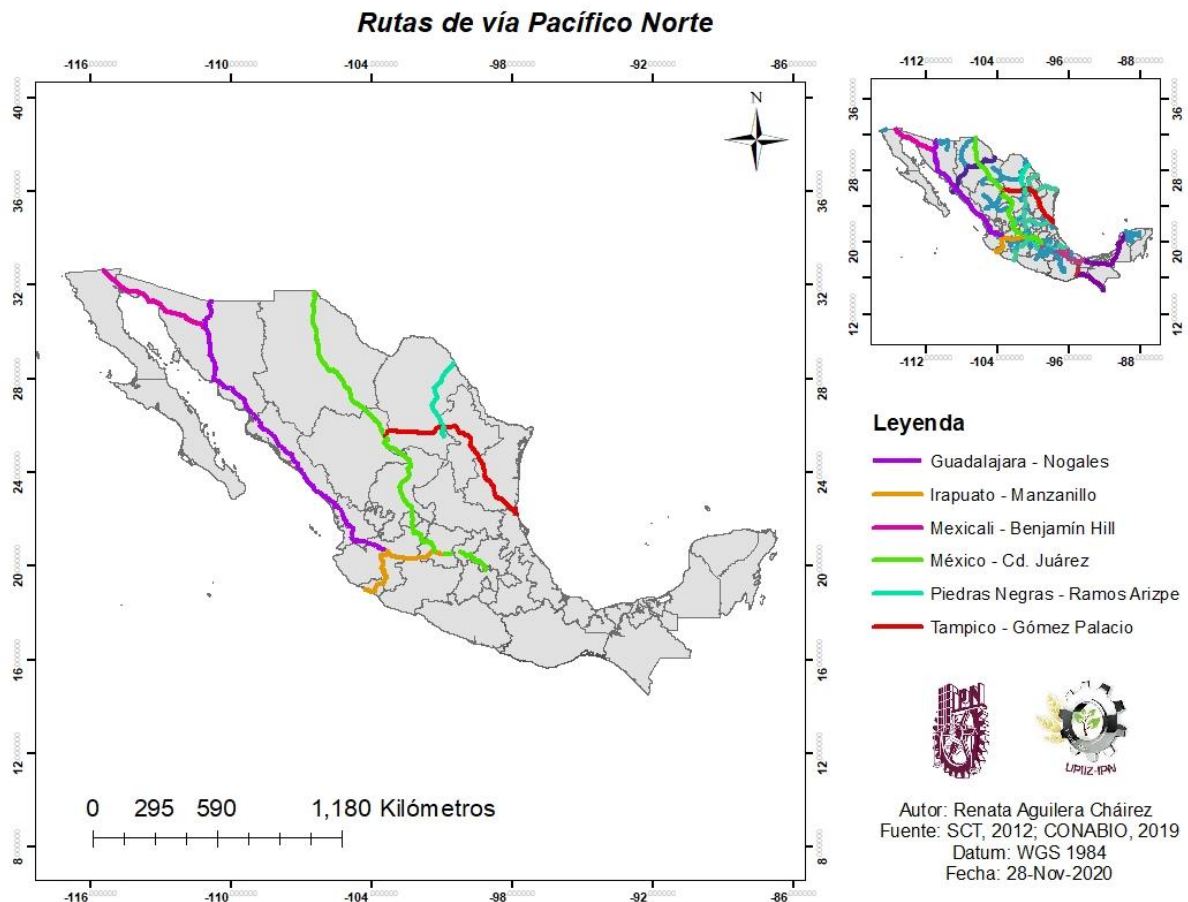


Figura 4. Mapa de la descripción de las rutas que conforman la vía Pacífico Norte concesionada a Ferromex. Fuente: Elaboración propia.

3.0 JUSTIFICACIÓN

Hoy en día México cuenta con nuevos proyectos de construcción en el sistema ferroviario, por lo que es importante el diagnóstico y la evaluación en los impactos ambientales, económicos y sociales del sistema actual, ya que se desconoce el estatus general del ferrocarril. Siendo de vital importancia esta información para la generación de infraestructura de calidad, eficiente y sustentable.

Concretamente en las políticas públicas mexicanas se han desarrollado inventarios de emisiones de contaminantes atmosféricos en los que se incluye al sector ferroviario. Sin embargo, no se han estipulado leyes, normas o acuerdos que regulen los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes atmosféricos que generan como medidas de mitigación y prevención. Lo que conlleva a que se empleen regulaciones y metodologías de otros países, sin considerar que el combustible utilizado en el país se compone de diferentes porcentajes de sustancias químicas.

Bajo este lineamiento, es importante la realización del inventario de emisiones atmosféricas específico para este sector porque es una base fundamental que permite contar con datos valiosos, como son los tipos de contaminantes y la cantidad emitida dependiendo del área geográfica y del tiempo en que se analiza.

Por lo tanto, se debe incitar a la gestión integral de las emisiones atmosféricas del ferrocarril para el establecimiento de líneas de acción que coadyuven a la reducción de sus emisiones dentro del país debido a los efectos que los contaminantes criterio causan específicamente en la salud de la población, y los GEI en el propicio del calentamiento global. Además, que las locomotoras emplean combustibles fósiles para su motor, y al ir de paso por los territorios, se es más difícil su monitoreo.

Así pues, teniendo esto se puede conocer el estado actual del sector ferroviario y puede establecerse como un medio de transporte de carga eficiente y transporte de pasajeros, que si se compara con sus homólogos fuentes de carretera. También se ayudaría al cumplimiento de los tratados internacionales en relación a la contaminación atmosférica.

En ese sentido, este proyecto tiene como finalidad estimar las emisiones atmosféricas de contaminantes que emiten las locomotoras de una de las concesiones que se tienen en México. Para así, identificar los contaminantes que mayor cantidad emiten y se pueda realizar líneas de acción y futuras comparaciones.

4.0 HIPÓTESIS

El inventario de emisiones atmosféricas a partir de la fuente emisora de locomotoras del ferrocarril en la vía Pacífico Norte con año base 2019 permitirá demostrar que el porcentaje de emisiones de GEI y contaminantes criterio de dicho sector están subestimados.

5.0 OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Elaborar un inventario de emisiones atmosféricas de locomotoras en la ruta Pacífico Norte concesión Ferromex con año base 2019.

5.2 Objetivos específicos

- Calcular el consumo de combustible utilizado en la vía Pacífico Norte para el año 2019.
- Estimar las emisiones atmosféricas de contaminantes criterio empleando factores de emisión de la EPA y los creados para México.
- Estimar las emisiones atmosféricas de gases de efecto invernadero en tCO₂eq/a a través del software del IPCC y la calculadora de SEMARNAT.
- Realizar una comparativa entre las metodologías de estimación de emisiones.
- Estimar las emisiones atmosféricas para cada ruta de la vía Pacífico Norte.

6.0 METODOLOGÍA

Para la realización del inventario de emisiones se recopiló la información de consumo de diésel nacional del ferrocarril, así como la longitud de vía en el sistema ferroviario, para realizar el cálculo del combustible utilizado en el área de estudio. Posteriormente se distinguió entre dos grupos de contaminantes atmosféricos: contaminantes criterio y GEI; para los primeros se realizó la estimación a través de factores de emisión, mientras que para los segundos se empleó el software del IPCC y la calculadora de SEMARNAT. Se calculó, además, el dato de actividad ingresado en las metodologías. Dicho inventario se realizó tomando como año base al 2019 debido a que es el año más reciente con el que se cuenta información.

6.1 Consumo de combustible

A partir de los datos publicados por la Agencia Reguladora de Transporte Ferroviario (ARTF) en el Anuario Estadístico Ferroviario 2019 con relación al combustible diésel utilizado en todo el sistema ferroviario, así como de las longitudes de vía del sistema y de la vía Pacífico Norte (ARTF, 2019), se calculó el consumo de combustible en el área de inventario (vía Pacífico Norte). Se empleó la ecuación 1 referenciada en los Manuales del programa de inventarios de emisiones de México - Volumen V, propuesta por la EPA (Radian International, 1997).

$$C_{ci} = C_{cn} \times \frac{LV_i}{LV_n} \quad ec. 1$$

Donde:

C_{ci} = Consumo de combustible ferroviario para el área del inventario [L o m³]

C_{cn} = Consumo nacional de combustible ferroviario [L o m³]

LV_i = Longitud de las vías en el área de inventario [km]

LV_n = Longitud nacional de las vías ferroviarias [km]

6.2 Cálculo de emisiones de contaminantes criterio usando factores de emisión

Para el cálculo de emisiones de contaminantes criterio utilizando factores de emisión, se utilizó una hoja de cálculo, en la cual se empleó la ecuación 2.

$$E = FE * DA \left[1 - \frac{ER^*}{100} \right] \quad ec. 2$$

Donde:

E = Emisión del contaminante [t/a]

FE = Factor de emisión [t/L]

DA = Dato de actividad [L/a]

ER = Eficiencia de reducción de emisiones de un equipo de control [%]

*La variable se considera como cero al no existir.

En ese sentido, como dato de actividad se empleó el consumo de combustible en la vía Pacífico Norte calculado por la ecuación 1. Mientras que para factores de emisión se utilizaron los estipulados por la EPA para locomotoras como se muestra en la Tabla 2, realizando la homogenización correspondiente de unidades.

Tabla 2. Factores de emisión para locomotoras del EPA (EPA, 2018).

Contaminante	Factor de emisión (g/gal)	Factor de emisión (kg/L)
NOx	270.4	0.0714
CO	26.624	0.00703
PM ₁₀	6.656	0.00176
PM _{2.5}	6.456	0.00171
SO ₂	1.88	0.00049

Así mismo, se emplearon los factores emisión propuestos para México por la EPA en los Manuales del programa de inventarios de emisiones de México - Volumen V, los cuales se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Factores de emisión para locomotoras en México (Radian International, 1997).

Contaminante	Factor de emisión (kg/L)
NO _x	0.0591
CO	0.0075
PM10	0.0014
PM2.5	0.0013
SO ₂	0.0043

6.3 Estimación de emisiones GEI por software IPCC

Se descargó el software de inventario del IPCC de la página oficial del IPCC (https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/software/files/IPCC2006Setup_v2691.exe).

Una vez iniciado el software, se seleccionó al país de México para la estimación, así como el año base del inventario correspondiente a 2019. Dentro de la hoja de cálculo se identificó a la subcategoría Actividades de combustión de combustibles perteneciente a la categoría Energía, en donde se seleccionó al sector Vías férreas para estimar las emisiones de GEI, tal y como se presenta en la Figura 5.

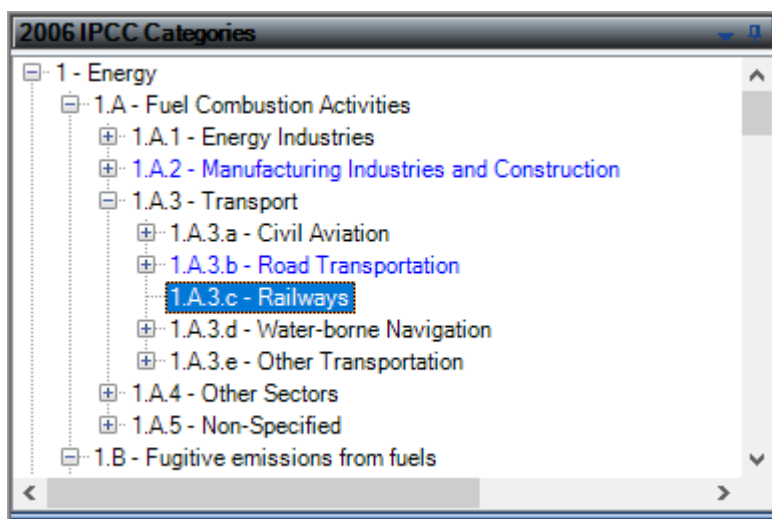


Figura 5. Categorías del software del IPCC.

A continuación, se seleccionó diésel dentro del apartado de Combustibles líquidos, y se introdujo la cantidad consumida de masa calculada a partir de la ecuación 3 y 4 donde se utilizó las variables de consumo de combustible en el área de inventario y la densidad del diésel en México establecida en el documento *Factores de emisión para*

los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México (INECC, 2014b).

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \text{ec. 3}$$

$$m = \rho * v \quad \text{ec. 4}$$

Donde:

m = Masa del combustible [kg]

ρ = Densidad del diésel [kg/L] = 0.826 kg/L

v = Volumen del combustible [L]

Posteriormente se realizó el ajuste de unidades a gigagramos (Gg) para ingresar el dato de actividad. Así mismo, se introdujeron los factores de emisión para el CO₂, CH₄ y N₂O que se presentan en la Tabla 4, obtenidos del Acuerdo que establece las particularidades técnicas y las fórmulas para la aplicación de metodologías para el cálculo de emisiones de gases o compuestos de efecto invernadero (SEMARNAT, 2014); dichos valores se introdujeron en la hoja de cálculo del software del IPCC como se muestra en la Figura 6.

Tabla 4. Factores de emisión en México para diésel ferroviario (SEMARNAT,2014).

Factor de emisión	CO ₂ (t/MJ)	CH ₄ (kg /MJ)	N ₂ O (kg /MJ)
SEMARNAT	0.000074100	0.000004150	0.000028600

Liquid Fuels	Energy Consumption			CO ₂			CH ₄		N ₂ O		
Fuel	A Consumption (Mass, Volume or Energy Unit)	Consumption Unit	B Conversion Factor (TJ/Unit) (NCV)	C Consumption (TJ) (C=A*B)	D CO ₂ Emission Factor (kg CO ₂ /TJ)	Z Amount Captured (Gg CO ₂)	E CO ₂ Emissions (Gg CO ₂) E=C*D/10 ⁶ -Z	F CH ₄ Emission Factor (kg CH ₄ /TJ)	G CH ₄ Emissions (Gg CH ₄) G=C*F/10 ⁶	H N ₂ O Emission Factor (kg N ₂ O/TJ)	I N ₂ O Emissions (Gg N ₂ O) I=C*H/10 ⁶
Gas/Diesel	174.1593	Gg	43	7488.8	74100		554.9	3.9	0.029	28.6	0.21
Total				7488.8			554.92378		0.02921		0.21418

Figura 6. Hoja de cálculo del software del IPCC.

Una vez introducido todos los datos, el software obtuvo las emisiones en Gg de cada contaminante GEI. Además, se obtuvieron las cantidades de CO₂eq/a en Gg por medio de la gráfica mostrada en la hoja de cálculo presentada en la Figura 7.

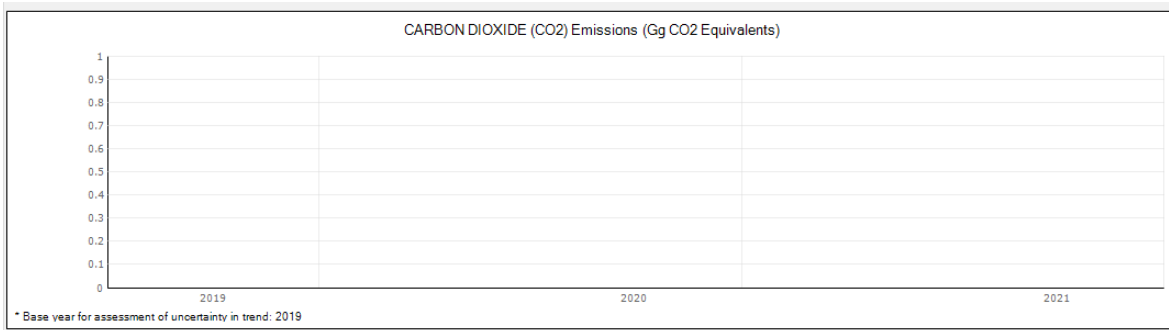


Figura 7. Gráfica de emisiones de GEI en software IPCC.

Finalmente se obtuvo la cantidad de cada GEI en CO₂eq/a; así mismo, se obtuvo la emisión total de GEI por las locomotoras sumando las cantidades de las emisiones GEI (CO₂, CH₄ y N₂O).

6.4 Estimación de emisiones GEI por calculadora SEMARNAT

Se descargó la calculadora de SEMARNAT del portal RENE SEMARNAT (http://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/aire/calculadora_de_emisiones_par_a_el_rene_v8_2020.xlsm). Dentro de la hoja de cálculo, tal y como se presenta en la Figura 8, se seleccionaron las variables de sector, subsector, actividad y fuente de emisión relacionadas al sector ferroviario. Después se introdujo como dato de actividad el consumo de combustible en volumen, calculado anteriormente. Finalmente, la calculadora arrojó el valor total de emisiones en tCO₂eq/a.

MEDIO AMBIENTE
 SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

Calculadora de emisiones para el Registro Nacional de Emisiones
 Versión 7.0.01
 Jun. 2020

Tus emisiones anuales son: tCO₂e/año

NOTA:
 El resultado de emisiones es indicativo. La calculadora entregará resultados más aproximados a las emisiones reales en la medida en que el usuario ingrese información completa y verdadera. Puede servir como herramienta orientadora para determinar si el sujeto sobrepasa o no el umbral de registro. En ningún caso sustituye la estimación de emisiones que deben realizar los Establecimientos Sujetos a Reporte y no se debe usar como resultado final de sus emisiones anuales, esta calculadora es un instrumento de apoyo. La suma de las emisiones puede no coincidir con el resultado parcial, por el redondeo de cifras.

Sector	Subsector	Actividad	Fuente de Emisión	Instrucciones	Dato de Actividad	Unidad	Emisiones GEI [tCO ₂ e]	Emisiones CO ₂ [tCO ₂]	Emisiones CH ₄ [tCH ₄]	Emisiones N ₂ O [tN ₂ O]

Figura 8. Calculadora de SEMARNAT para el cálculo de emisiones RENE.

6.5 Comparación de metodologías utilizadas y estimación de emisiones por rutas

Se realizó una comparativa de las metodologías utilizadas para contaminantes criterio utilizando los diversos factores de emisión, mientras que para los GEI la comparativa se realizó entre los resultados obtenidos por el software del IPCC y la calculadora de

SEMARNAT; se analizó el fundamento de cada metodología y se identificaron las posibles variantes.

Posteriormente, se realizaron estimaciones de las emisiones atmosféricas de cada ruta que integra a la concesión Pacífico Norte a través de relaciones, tomando en consideración las emisiones totales y la longitud de cada una de éstas.

7.0 RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En México, el sistema ferroviario contempla una longitud total de 26,914 km distribuida en vía principal, secundaria, particular y en fuera de operación, lo que conlleva a un total de vía operada de 23,469 km asignada a nueve organizaciones privadas, las cuales prestan servicio para el transporte de carga y de pasajeros. Este sistema está otorgado a diferentes títulos de concesión de la vía general de comunicación ferroviaria a las organizaciones privadas dependiendo el servicio que presten (ARTF, 2019).

Específicamente la vía Pacífico Norte asignada a Ferromex contempla una longitud de 6,179.7 km de vía principal y de 687.3 km de ramales, sumando un total de 6,867 km. Durante el año 2019 se transportaron 59.9 millones t de carga por estas vías, lo que representa un 47.7% del total transportado en dicho año.

A su vez, la vía Pacífico Norte se encuentra dividida en seis rutas descritas comunicando a 18 entidades federativas del norte y centro del país. En la Figura 9 se presenta un mapa de las rutas con su longitud correspondiente.

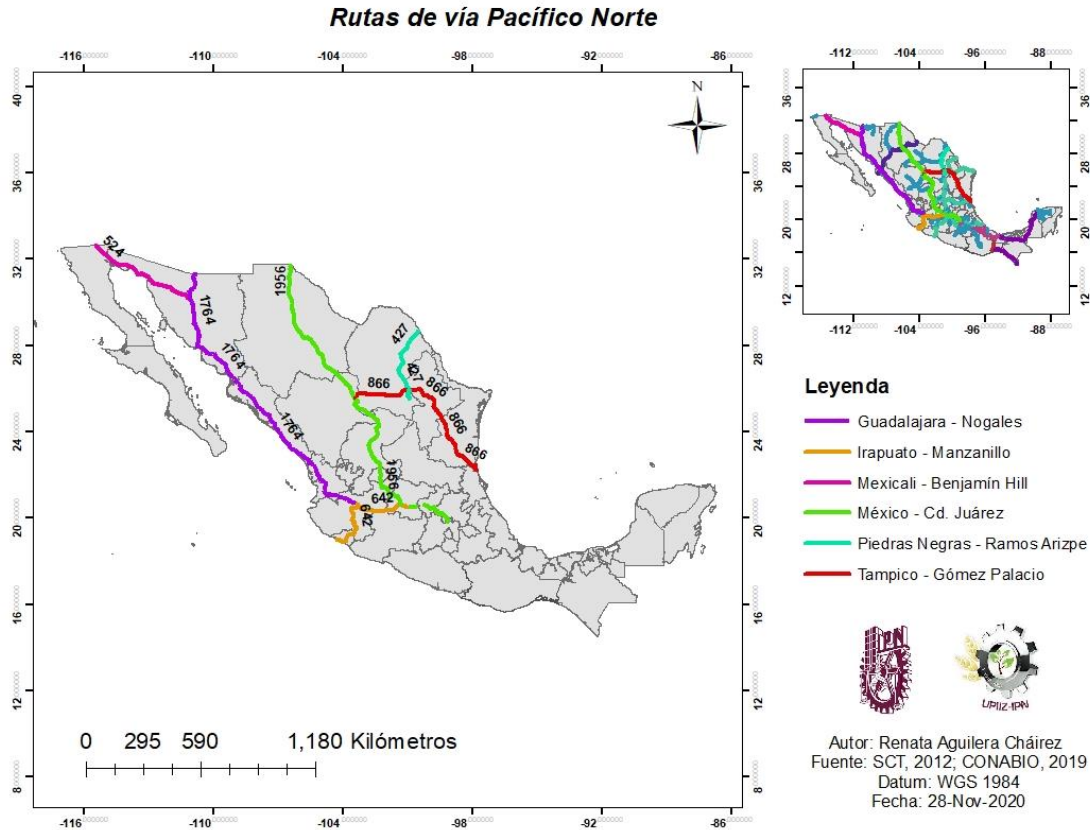


Figura 9. Mapa de las rutas pertenecientes a concesión Pacífico Norte junto con longitud. Fuente: Elaboración propia.

7.1 Consumo de combustible

Para el cálculo del combustible diésel usado en las locomotoras para el año base 2019, se utilizó la ecuación 1. Como resultado se obtuvo lo siguiente en unidades de volumen (Anexo 1):

$$C_{ci} = 210,846,657.3 L$$

Dicho valor será empleado como dato de actividad en las metodologías para la obtención de emisiones de contaminantes criterio y de GEI.

7.2 Emisiones de contaminantes criterio

A continuación, en la Tabla 5 se presentan las emisiones de contaminantes criterio obtenidas a partir de la ecuación 2 y los factores de emisión presentados en las Tablas 2 y 3 (Anexo 2 y 3). Se observa que, en su mayoría, las emisiones utilizando los factores de emisión de la EPA son superiores si se compara con los factores para México. Esta diferencia es asociada principalmente a la composición del combustible

diésel utilizado tanto en Estado Unidos (contempla diésel ferroviario con un con bajo contenido de azufre, lo que representa como máximo 500 ppm) y México, ya que los factores de emisión dependen de ello, como es el caso del contenido de azufre que repercute en los valores de PM y SO₂ (Código Electrónico de Regulaciones Federales de Estados Unidos [ECFR], 2020).

Tabla 5. Emisiones de contaminantes criterio en vía Pacífico Norte año base 2019.

Contaminante	Emisión por factor EPA (t/a)	Emisión por factor Manual (t/a)
NO _x	15,061.22	12,461.04
CO	1,482.95	1,581.3499
PM ₁₀	370.74	295.1853
PM _{2.5}	359.60	274.1007
SO ₂	104.72	906.6406

A pesar de la diferencia de las emisiones de cada contaminante por cada factor de emisión, se identifica en ambos casos que la mayor emisión corresponde a los NO_x, debido a que es el contaminante que se genera principalmente en la combustión de combustibles fósiles. En la Figura 10, se presenta una gráfica comparativa de las emisiones para cada contaminante criterio.

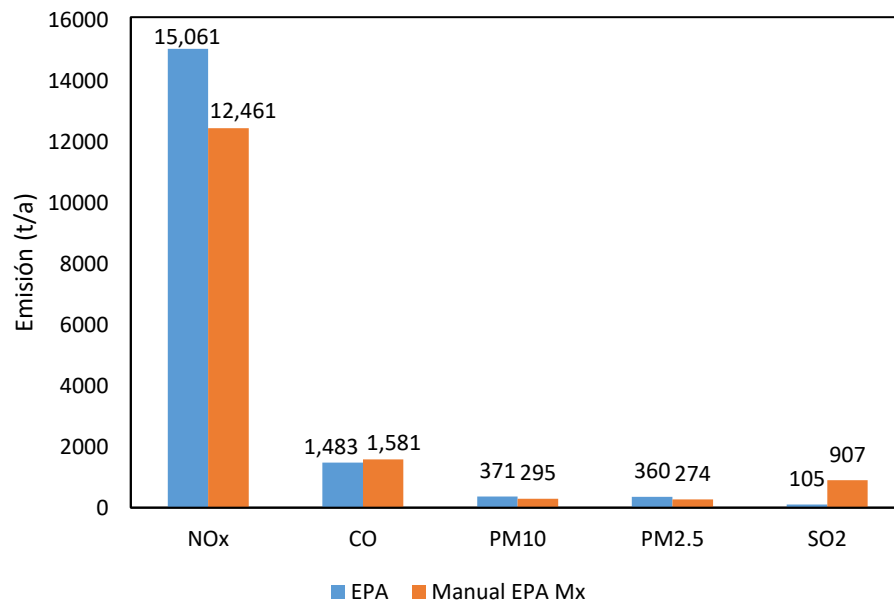


Figura 10. Gráfica de las emisiones de contaminantes criterio en vía Pacífico Norte con año base 2019. Fuente: Elaboración propia.

En ese sentido, es importante señalar que los factores de emisión emitidos por la EPA son los establecidos hasta el año 2005, debido que a partir de este año se establecieron conforme al año de fabricación o refabricación de las locomotoras. La normatividad relacionada al ferrocarril fue reestructurada para generar un sistema ferroviario más eficiente y sustentable, considerando también nuevas metodologías para el desarrollo de inventarios de emisiones más reales; esta normatividad sigue vigente y es aplicable para los modelos pilotos y las locomotoras en circulación en Estados Unidos (EPA, 2017). En cambio, la metodología en México sigue siendo la creada por la EPA para México desde el año 1997 y no ha sufrido ninguna mejora por parte de este organismo ni por las organizaciones gubernamentales mexicanas, lo que conlleva a elevar el grado de incertidumbre, principalmente por la mejora en proceso de refinación del que el diésel ha sido partícipe.

7.3 Emisiones de GEI

A continuación, en la Tabla 6, se presentan las emisiones de GEI obtenidas a partir del uso del software del IPCC y la calculadora de SEMARNAT, expresadas en CO_{2eq} (Anexo del 4 al 7); se consideran las emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O, debido a que son los principales precursores del efecto invernadero.

Tabla 6. Emisiones de GEI en vía Pacífico Norte año base 2019.

Metodología	Emisión GEI (tCO _{2eq} /a)
Software IPCC	621,933.18
Calculadora SEMARNAT	612,887.20

Así mismo, en la Figura 11 se presenta un gráfico de la comparativa de las emisiones obtenidas por las metodologías ya mencionadas. Se contemplan una metodología internacional y otra nacional, con el fin de identificar las posibles variables en el resultado.

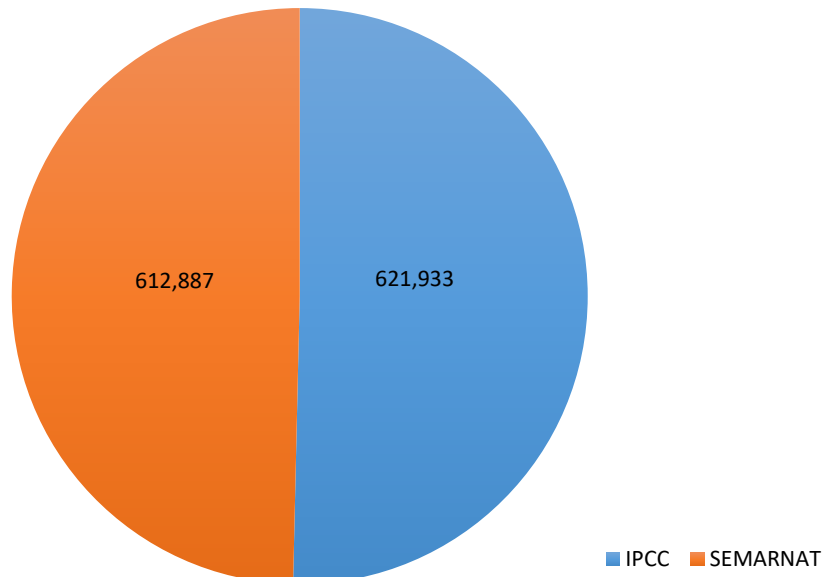


Figura 11. Gráfica de las emisiones de GEI en vía Pacífico Norte con año base 2019. Fuente: Elaboración propia.

Igualmente, en la Figura 12, se muestra un gráfico de las emisiones GEI de los principales precursores del efecto invernadero, los cuales fueron los considerados en las metodologías utilizadas. Se identifica que las mayores emisiones corresponden al CO₂ debido a que éste se genera principalmente de la combustión de combustibles fósiles, en cambio las menores emisiones corresponden al CH₄ el cual se genera sobre todo en sistemas de gas y cría de ganado.

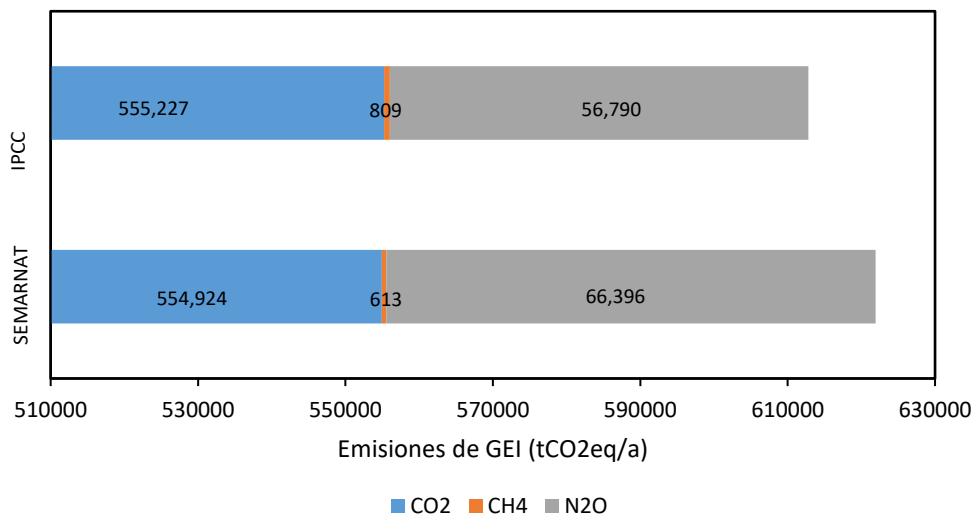


Figura 12. Gráfica de las emisiones GEI en vía Pacífico Norte con año base 2019 por metodología. Fuente: Elaboración propia.

En ese sentido, la disparidad de las emisiones por los diferentes métodos se adjudica al poder calorífico neto que se emplean en las fórmulas utilizadas en cada sistema. En lo que respecta al software del IPCC, el proceso se basa en las Directrices del IPCC del año 2006, mientras que la calculadora de SEMARNAT se fundamenta en la guía del Registro Nacional de Emisiones (RENE). Sin embargo, ambas metodologías determinan las emisiones GEI en el producto de la multiplicación del poder calorífico neto, el factor de emisión y el dato de actividad. El Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) estableció las propiedades de cada combustible fósil producido en México, el cual difiere de los procesos de refinación de cada país (INECC, 2014).

7.4 Emisiones por rutas en vía Pacífico Norte

7.4.1 Emisiones de contaminantes criterio

En la Tabla 7 se presentan las emisiones estimadas para cada ruta perteneciente a la concesión Pacífico Norte dependiendo de su longitud (Anexo 8), considerando que por todas las rutas se realizan las mismas cantidades de viajes y su contribución es igual.

Tabla 7. Emisiones de contaminantes criterio por ruta vía Pacífico Norte 2019.

Ruta Pacífico Norte	NOx	CO	PM₁₀	PM_{2.5}	SO₂
<i>México - Cd. Juárez</i>	3,944.62	500.59	93.44	86.77	287.00
<i>Irapuato - Manzanillo</i>	1,294.71	164.30	30.67	28.48	94.20
<i>Tampico - Gómez Palacio</i>	1,746.44	221.63	41.37	38.42	127.07
<i>Piedras Negras - Ramos Arizpe</i>	861.12	109.28	20.40	18.94	62.65
<i>Guadalajara - Nogales</i>	3,557.42	451.45	84.27	78.25	258.83
<i>Mexicali - Benjamín Hill</i>	1,056.74	134.10	25.03	23.24	76.89

De igual modo, en la Figura 13 se realizó un gráfico para cada ruta y las emisiones de cada contaminante. Se identifica que la mayor contribución de emisiones es en la ruta México-Cd. Juárez, la cual tiene una longitud de vía de 1,956 km, lo que representa el

31.65 % del total. De la misma forma la que menor contribuye es la ruta Piedras Negras-Ramos Arizpe con una longitud de 427 km, representando 6.91 % del total.

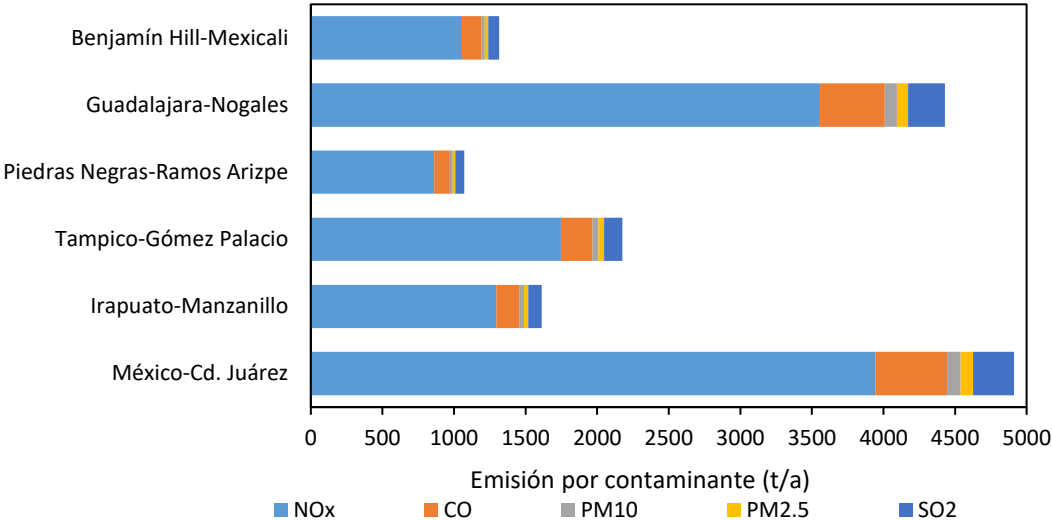


Figura 13. Gráfica de emisiones de contaminantes criterio por ruta en Pacífico Norte. Fuente: Elaboración propia.

7.4.2 Emisiones de GEI

En la Figura 14 se presentan las emisiones por cada ruta, así como los resultados obtenidos dependiendo de las metodologías empleadas para la estimación. Al igual que en el gráfico de las emisiones de contaminantes criterio, se observa que el mayor contribuyente de GEI es la ruta México-Cd. Juárez, seguido de la ruta Guadalajara-Nogales. Como menores contribuyentes se tienen a las rutas Piedras Negras-Ramos Arizpe y Benjamín Hill-Mexicali.

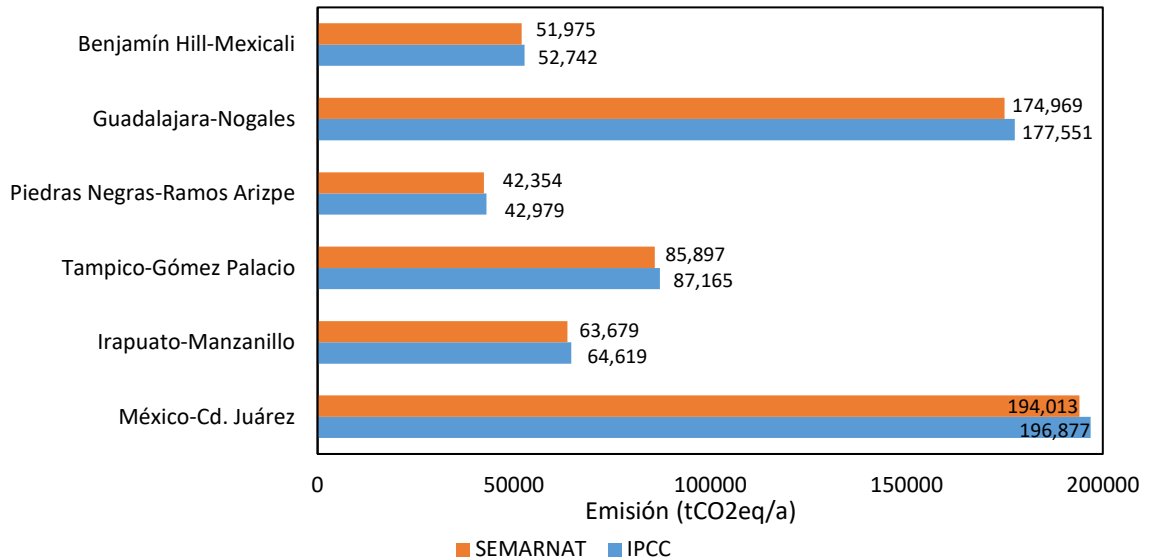


Figura 14. Gráfica de emisiones GEI por ruta en Pacífico Norte según metodologías.
Fuente: Elaboración propia.

7.4.3 Consideraciones de rutas

Como ya se mencionó, para las estimaciones de emisiones atmosféricas se contempla que todas las rutas tuvieron el mismo número de viajes de ferrocarril durante el año base 2019, elevando la incertidumbre al no tener datos precisos de cada ruta. Sin embargo, dichos datos son únicamente estimaciones ya que en el caso de la ruta México-Cd. Juárez se contempla que transitan aproximadamente 30 viajes diarios al ser considerada como una de las rutas de comunicación ferroviaria más importantes en el país, al conectar al área metropolitana de la Ciudad de México con una ciudad fronteriza con Estados Unidos.

7.5 Combustible y locomotoras

La principal fuente de emisiones atmosféricas de los ferrocarriles es el uso de diésel que utilizan las locomotoras como fuente de combustible (Dincer & Ebir, 2007). En México, la Norma Oficial Mexicana NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005 tiene como objetivo establecer las especificaciones sobre protección ambiental que deben cumplir los combustibles líquidos y gaseosos que se comercializan en el país. Sin embargo, no se contemplan a las locomotoras como se hace con las embarcaciones o fuentes móviles de carretera. De hecho, ni siquiera se tiene registro de cuál tipo de diésel producido en México es el utilizado en éstas, lo que conlleva a la falta de conocimiento sobre el estado general del diésel ferroviario.

Otro papel importante en las emisiones atmosféricas de los ferrocarriles, lo juegan las locomotoras. Ferromex cuenta con una flota total de 563 locomotoras que van desde

46 hasta 8 años de vida promedio dependiendo del modelo. Del total de locomotoras 442 están dedicadas al transporte de carga, 9 a servicio a pasajeros y 112 son para servicios de patios (Ferromex, 2019).

Así mismo, Ferromex ha incorporado en su flota de locomotoras el modelo 4400 fabricadas por General Electric (GE), las cuales están compuestas por motores de tracción de corriente alterna en lugar de corriente continua, con un inversor separado para cada motor. Esto origina una mayor adherencia a la vía, fuerza tractiva, reducción del desgaste de los rieles y mayor eficiencia en el consumo de combustible, disminuyendo la emisión de contaminantes (Ferromex, 2019). En términos generales, este modelo de locomotoras utiliza también sensores para producir datos que ayuden a los ferrocarriles a priorizar el mantenimiento, minimizar el impacto del bajo rendimiento de las locomotoras y emitir menos emisiones (Asociación Americana de Ferrocarriles [AAR], 2020). No obstante, este tipo de modelo no es el único que se utiliza, ya que existen modelos más antiguos que no contemplan esta tecnología.

Por otra parte, en el año 2008 la EPA finalizó un programa de tres partes que reduce drásticamente las emisiones de las locomotoras diésel de todo tipo: transporte de línea, conmutador y tren de pasajeros. La regla reduce las emisiones de PM hasta en un 90% y las emisiones de NO_x hasta en un 80%, y una contribución del 2.1% en las emisiones GEI por medios de transporte. Los estándares se basan en la aplicación de tecnología de postratamiento catalítico de alta eficiencia para motores recién fabricados construidos en 2015 y posteriores (EPA, 2017).

El postratamiento está relacionado con un convertidor catalítico montado aguas abajo del puerto de escape, cuya función de diseño es reducir las emisiones en el escape de la locomotora antes de que se emita al medio ambiente (ECFR, 2020).

Aunado a lo anterior, la EPA implementó diseños de vagones especializados para aumentar la cantidad de mercancías que transportan los ferrocarriles. Dentro de la aplicación de las prácticas operativas mejoradas, se incluye la minimización del uso de combustible, la mejora de la aerodinámica y la reducción del peso bruto del vagón, la fricción entre las ruedas y el riel, y la potencia total requerida para mover el tren. Esto se traduce en que un tren promedio en 2019 que transportaba 3.667 t, se compara con las 2.923 t transportadas en 2000 (AAR, 2020).

Con relación a esto es fundamental señalar que el equipo de arrastre perteneciente a la flota de Ferromex está conformado por 7,280 carros de diferentes tipos, de los cuales 6,616 vagones tienen una edad de más de 30 años (Ferromex, 2019). Lo cual representa un factor fundamental que puede ocasionar el aumento en las emisiones atmosféricas de locomotoras en el país.

Por último, la EPA incorporó en su legislación, normas de emisión de locomotoras dependiendo el servicio que presten y regula principalmente a los NO_x, PM, CO e hidrocarburos (HC). En la Figura 15 se presentan los estándares de emisión de contaminantes atmosféricos para locomotoras de arrastre representados en unidades de *g/bhp – h* (ECFR, 2020).

TABLA 1 A §1033.101 — NORMAS DE EMISIÓN DE LOCOMOTORAS DE ARRASTRE

Año de fabricación original	Nivel de estándares	Estándares (g / bhp-hr)			
		NO _x	PM	HC	CO
1973-1992 ^a	Nivel 0 ^b	8.0	0,22	1,00	5,0
1993 ^a -2004	Nivel 1 ^b	7.4	0,22	0,55	2.2
2005-2011	Nivel 2 ^b	5.5	€ 0.10	0,30	1,5
2012-2014	Nivel 3 ^c	5.5	0,10	0,30	1,5
2015 o posterior	Nivel 4 ^d	1.3	0,03	0,14	1,5

Figura 15. Normas de emisión de contaminantes emitidas por la EPA (ECFR, 2020).

En México, en cuestión de normatividad relacionada al sector ferroviario únicamente se tiene a la Norma Oficial Mexicana NOM-064-SCT2-2001 que establece las disposiciones de seguridad, lineamientos y recomendaciones de las inspecciones periódicas de las partes y sistemas que constituyen el equipo ferroviario, y tiene el propósito de incrementar los factores de seguridad, eficiencia, funcionalidad y disponibilidad del equipo tractivo para el servicio comercial ferroviario. Sin embargo, no contempla disposiciones con relación al medio ambiente, en específico las emisiones que emiten las locomotoras.

7.6 Inventario de emisiones atmosféricas

Este inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos es un instrumento que permite identificar el tipo y cantidad de contaminantes que emite el sector ferroviario; se realiza con la finalidad de ser un instrumento estratégico en la gestión integral de la calidad del aire al no identificarse estudios similares.

No obstante, los resultados obtenidos son estimaciones que tratan de asemejarse a la realidad, debido a que no se cuenta con la información necesaria o certera para su elaboración por el uso de métodos indirectos, mientras que, si se contemplara por métodos directos, se tienen factores ambientales como el clima o la ubicación geográfica que pueden interferir en las mediciones. A pesar de ello, no significa que no deban realizarse, ya que pueden permitir que se establezcan medidas de prevención y mitigación para la identificación del aumento o la reducción de las

emisiones en inventarios futuros; así mismo se puede evaluar con ellos la relación costo/efectividad de acuerdo a los recursos materiales y económicos donde se proponga la evaluación.

Definir pues, los objetivos y usos del inventario, la responsabilidad de los participantes del proceso, los límites de confidencialidad y manejo de datos, las principales características del inventario, las metodologías a implementar para la estimación de emisiones, los productos esperados y el plan de aseguramiento y control de la calidad, son variables cruciales para su desarrollo, ya que esto definirá tanto sus características técnicas como el grado de detalle de la información que se requiere recopilar o generar (INECC, 2012).

Para las autoridades ambientales el propósito fundamental de los inventarios de emisiones es contar con información de las tasas de emisión de los contaminantes del aire y sus diferentes fuentes emisoras, para definir políticas de prevención y control de la contaminación del aire en las ciudades (INECC, 2012).

En México, algunas de las entidades federativas desarrollan inventarios de emisiones, principalmente de contaminantes criterio. Sin embargo, en lo que respecta a las emisiones por locomotoras, se ha observado que no se le ha dado el grado de importancia a sus emisiones a través de la estipulación de medidas de prevención y mitigación. Esto se debe a que las entidades federativas focalizan su atención en las fuentes emisoras con mayor contribución, y las locomotoras no se identifican como tal.

En efecto, las locomotoras no competirán con otras fuentes emisoras debido a que éstas únicamente van de paso por las vías que atraviesan la extensión territorial de las entidades federativas. Por lo que, es importante focalizar la atención en la realización de inventarios de emisiones por títulos de concesión o por rutas de las mismas. De manera que se obtengan estimaciones más reales a partir de inventarios regionales o nacionales.

Este tipo de inventarios son denominados de arriba hacia abajo (top-down), ya que en su elaboración se utiliza información a escala nacional, regional y estatal que se reporta periódicamente, y que representa la intensidad de la actividad de un sector productivo (INECC, 2012).

Además, es fundamental que en México se utilicen otras metodologías para la estimación de emisiones de contaminantes atmosféricos por este sector, como las que ha generado la EPA, la cual contempla información sobre la flota de locomotoras, densidad de tráfico, toneladas brutas transportadas, entre otras variables. Lo que

conlleve a que los resultados de las estimaciones obtengan resultados más cercanos a la realidad y se puedan establecer ahora sí, medidas de prevención y mitigación.

Lo anterior podría conllevar a que los ferrocarriles en nuestro país, puedan ser más competitivos con el transporte que transita por carretera, y se ayude a reducir los altos costos económicos de la congestión de las carreteras, la pérdida de productividad y los retrasos en la carga.

Un solo tren de carga puede reemplazar a varios camiones, liberando espacio en la carretera para otros conductores. Además, cambiar la carga de camiones a ferrocarriles también reduce el desgaste de las carreteras y la presión para construir nuevas y costosas carreteras. En promedio, los ferrocarriles consumen de tres a cuatro veces más combustible que los camiones; eso significa que mover la carga por ferrocarril en lugar de camión reduce las emisiones de GEI hasta en un 75%, en promedio (AAR, 2020).

Igualmente, el inventario de emisiones de este sector permitiría conocer el estado actual del sistema ferroviario, y se podría crear un sistema más eficiente y sustentable en los nuevos proyectos que el gobierno federal tiene planeados. También se contribuye al cumplimiento de los compromisos internacionales en los México ha firmado, y se dan pautas para el desarrollo de tecnología que permita la reducción de emisiones de contaminantes atmosféricos.

8.0 CONCLUSIONES

- Se realizó un inventario de emisiones atmosféricas para las locomotoras en la concesión Pacífico Norte de Ferromex con año base 2019, en el que se incluyeron contaminantes criterio y gases de efecto invernadero.
- Se determinó un consumo de combustible diésel en la vía Pacífico Norte de 210,846,657.3 para una longitud de 6,867 km durante el año 2019.
- Las metodologías de la calculadora de SEMARNAT para GEI y los factores de emisión desarrollados por la EPA para México para los contaminantes criterio, permitieron obtener estimaciones más factibles al considerar información específica para México.
- El contaminante con mayor contribución en el inventario de emisiones de contaminantes criterio fueron los NO_x, al generar 12,461.04 t/a. Respecto al contaminante con mayor emisión en el inventario de GEI, se determinó al CO₂ con una contribución de 555,227.47 tCO₂eq/a.

- De las rutas pertenecientes a la vía Pacífico Norte, se determinó que la mayor contribución de las emisiones atmosféricas de contaminantes criterio y de GEI, es la ruta México-Cd. Juárez, mientras que la menor contribución es la ruta Piedras Negras-Ramos Arizpe.
- Este inventario de emisiones es de tipo regional, el cual es el primero en su especie y se establece como comparativa en futuras proyecciones.

9.0 RECOMENDACIONES Y PROSPECTIVAS

- Emplear una metodología para la estimación de emisiones de contaminantes criterio, en la que se incluya información sobre la flota de locomotoras y datos relacionados a los viajes relacionados en el área de inventario.
- Pedir información sobre el uso de combustible a los concesionarios para tener resultados más reales a los obtenidos en el presente trabajo.
- Incluir más concesiones del ferrocarril para establecer comparativas entre las rutas del sistema ferroviario mexicano
- Incluir en el inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos a las locomotoras de patio para que sea un inventario completo.

10.0 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia Reguladora de Transporte Ferroviario [ARTF]. (2019). *Anuario estadístico ferroviario 2019*. Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/574090/Anuario Estadístico Ferroviario 2019 2 .pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/574090/Anuario_Estadistico_Ferroviano_2019_2.pdf)
- Asociación Americana de Ferrocarriles [AAR]. (2020). *Freight Rail & Preserving the Environment*. Association of American Railroads. <https://www.aar.org/wp-content/uploads/2020/06/AAR-Sustainability-Fact-Sheet.pdf>
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía [CONUEE]. (2015). *Ferrocarril, movilidad y transporte*. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/ferrocarril-movilidad-y-transporte?state=published>

- CONUEE. (2017). *Derivados del petróleo: El diésel*. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/241728/DieselFT.pdf>
- Dincer, F., Elbir, T. (2007). *Estimating national exhaust emissions from railway vehicles in Turkey*. *Science of the Total Environment*, 374(2007), 127–134. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969706009971>
- Eastern Research Group, Inc. (2015). *2014 Texas Statewide locomotive emissions inventory and 2008 through 2040 trend Inventories*. ERG. https://www.tceq.texas.gov/assets/public/implementation/air/sip/elp/CO_LMP/A ppendixE.pdf
- Electronic Code of Federal Regulations [ECFR]. (2020). Control of emisiones from locomotives. United States Electronic Code of Federal Regulations. https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=159ba6f126272ea1995c71a43b7af309&mc=true&node=pt40.36.1033&rqn=div5#se40.36.1033_11
- Environmental Protection Agency [EPA]. (2016a). *Basic information about carbon monoxide (CO) outdoor air pollution*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/co-pollution/basic-information-about-carbon-monoxide-co-outdoor-air-pollution#What%20is%20CO>
- EPA. (2016b). *Basic information about NO₂*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2#What%20is%20NO2>
- EPA. (2017). *Regulations for emissions from locomotives*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/regulations-emissions-locomotives>
- EPA. (2019a). *Sulfur dioxide basics*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics#what%20is%20so2>
- EPA. (2019b). *Descripción general de los gases de efecto invernadero*. United States Environmental Protection Agency. <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/descripcion-general-de-los-gases-de-efecto-invernadero>
- EPA. (2020a). *Particulate Matter (PM) Basics*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics#PM>

- EPA. (2020b). *Ground-level ozone basics*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ground-level-ozone-basics#wwh>
- EPA. (2020c). *AP-42*. United States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors#5thed>
- Ferromex. (2019). *Reporte anual 2019*. Ferrocarril Mexicano. <https://www.ferromex.com.mx/pdf/reportes-anuales/Reporte Anual 2019.pdf>
- H. Congreso de la Unión. (2014). *Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera*. Diario Oficial de la Federación. <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg LGEEPA MPCCA 3110 14.pdf>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC]. (2012). *Planeación de un inventario de emisiones*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/696/planeacion.pdf>
- INECC. (2014a). *¿Qué es una COP?* Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/31994/COP21_Que_es_una_COP_Que_es_una_CMP.pdf
- INECC. (2014b). *Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110131/CGCCDBC_2014_FE_tipos_combustibles_fosiles.pdf
- INECC. (2018). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>
- IPCC. (2018). *Glosario*. Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/10/SR15_Glossary_spanish.pdf
- IPCC. (s.f.). *Software de inventario*. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/software/index.html>

- OMS. (s.f.). *Contaminación atmosférica*. Organización Mundial de la Salud. https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/es/
- OPS & OMS. (2016). *Calidad del aire*. Organización Panamericana de la Salud. <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire>
- Radian International. (1997). *Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México. Volumen V. Desarrollo de Inventarios de Emisiones de Fuente de Área*. EPA. <https://www3.epa.gov/ttnca1/cica/files/areainv5.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2013). *Calidad del aire: Una práctica de vida*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001593.pdf>
- SEMARNAT. (2014). *Acuerdo que establece las particularidades técnicas y las fórmulas para la aplicación de metodologías para el cálculo de emisiones de gases o compuestos de efecto invernadero*. Diario oficial de la Federación. http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5406149
- SEMARNAT. (2018). *Informe de medio ambiente: Atmósfera*. Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales. <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap5.html>
- SEMARNAT. (2019a). *Inventario Nacional de Emisiones de Contaminantes Criterio (INEM)*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-contaminantes-criterio-inem>
- SEMARNAT. (2019b). NOM-172-SEMARNAT-2019. *Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de calidad del aire y riesgos a la Salud*. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 20 de noviembre de 2019.
- SEMARNAT. (2020). *Registro Nacional de Emisiones (RENE)*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/registro-nacional-de-emisiones-rene>
- Secretaría de Relaciones Exteriores [SRE]. (2020). *Tratados internacionales*. Secretaría de Relaciones Exteriores. https://aplicaciones.sre.gob.mx/tratados/muestratratado_nva.sre?id_tratado=432&depositario

Sierra Research Inc. (2004). *Revised Inventory Guidance for Locomotive Emissions*. CSUN.

<http://www.csun.edu/~lcaretto/paper/railroadInventoryGuidanceFinal.pdf>

Sistema Nacional de Cambio Climático [SINACC]. (2018a). *Protocolo de Kioto*. México ante el cambio climático. <https://cambioclimatico.gob.mx/protocolo-de-kioto/>

SINACC. (2018b). *Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero*. México ante el cambio climático. <https://cambioclimatico.gob.mx/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero/>

Talaiekhosani, A., Ghaffarpasand, O., Reza, M., Neshat, N. & Eydivandi, B. (2017). *Evaluation of emission inventory of air pollutants from railroad and air transportation in isfahan metropolitan in 2016*. Journal of Air Pollution and Health, 2(1), 1-18. <https://japh.tums.ac.ir/index.php/japh/article/view/86>

Tami, L. (2013). *Realización del inventario de emisiones atmosféricas generadas por las actividades del recinto portuario de Veracruz, México* [tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional UNAM. https://repositorio.unam.mx/contenidos/realizacion-del-inventario-de-emisiones-atmosfericas-generadas-por-las-actividades-del-recinto-portuario-de-veracr-70131?c=r1YdDk&d=false&q=*&i=11&v=1&t=search_0&as=0

Vojtisek-Lom, M., Jirkú, J. & Pechout., M. (2020). *Real-world exhaust emissions of diésel locomotives and motorized railcars during scheduled passenger train run son czech railroads*. Atmosphere, 11(6), 582. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.60466>

10.0 ANEXOS

Anexo 1.- Cálculo del consumo de combustible en vía Pacífico Norte.

$$C_{ci} = C_{cn} \times \frac{LV_i}{LV_n}$$

$$C_{ci} = 720600000 [L] \times \frac{23469 [km]}{6867 [km]}$$

$$C_{ci} = 210846657.3 L$$

Anexo 2.- Estimación de contaminantes criterio utilizando los factores de emisión de la EPA.

$$E = FE * DA$$

$$E_{NO_x} = 0.07143 \left[\frac{kg}{L} \right] * 210846657.3 [L]$$

$$E_{NO_x} = 15061221.4 \text{ kg} = 15061.22$$

Contaminante	Factor de emisión (g/gal)	Factor de emisión (kg/L)	Emisión (kg/año)	Emisión (ton/año)
NOx	270.4	0.07143211	15061221.4	15061.2214
CO	26.624	0.00703332	1482951.03	1482.95103
PM10	6.656	0.00175833	370737.757	370.737757
PM2.5	6.456	0.00170549	359597.8	359.5978
SO2	1.88	0.00049664	104715.592	104.715592

Anexo 3.- Estimación de contaminantes criterio utilizando los factores de emisión del Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México. Volumen V.

$$E_{NO_x} = 0.0591 \left[\frac{kg}{L} \right] * 210846657.3 [L]$$

$$E_{NO_x} = 12460374.4 \text{ kg} = 12461.04$$

Contaminante	Factor de emisión (kg/L)	Emisión (kg/año)	Emisión (ton/año)
NOx	0.0591	12461037.4	12461.0374
CO	0.0075	1581349.93	1581.34993
PM10	0.0014	295185.32	295.18532
PM2.5	0.0013	274100.654	274.100654
SO2	0.0043	906640.626	906.640626

Anexo 4.- Hoja de cálculo obtenida del software del IPCC.

Fuel Combustion Activities

Worksheet

Sector: Energy 2019

Category: Fuel Combustion Activities

Subcategory: 1.A.3.c - Railways

Sheet: CO2, CH4 and N2O from fuel combustion by source categories - Tier 1

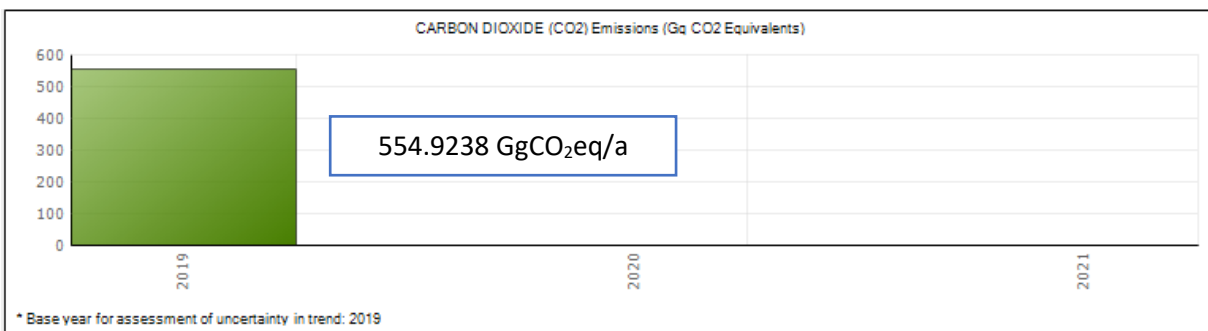
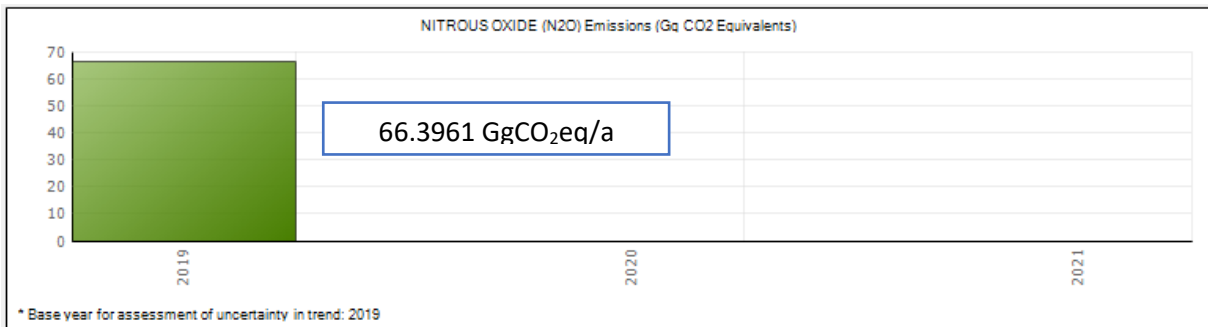
Data

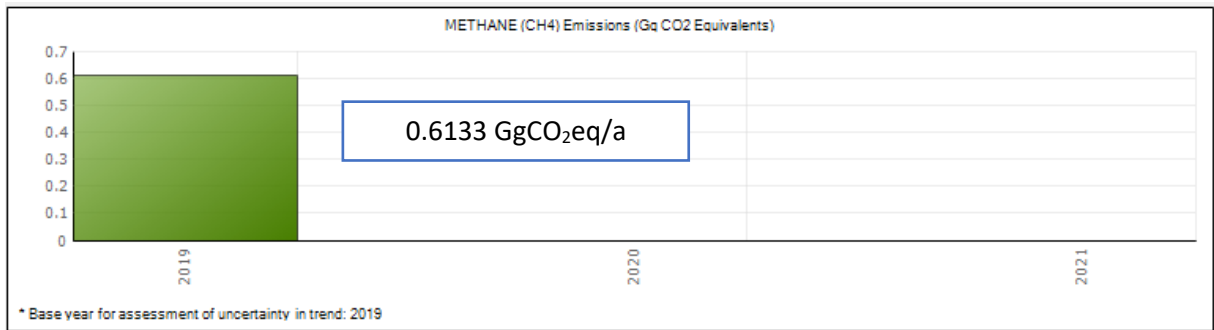
Fuel Type: Liquid Fuels Uncertainties for Liquid Fuels Conversion Factor Type: NCV GCV

Liquid Fuels	Energy Consumption			CO2			CH4		N2O						
Fuel	A Consumption (Mass, Volume or Energy Unit)	Consumption Unit	B Conversion Factor (TJ/Unit) (NCV)	C Consumption (TJ) (C=A*B)	D CO2 Emission Factor (kg CO2/TJ)	Z Amount Captured (Gg CO2)	E CO2 Emissions (Gg CO2) E=C*D/10 ⁶ 6-Z	F CH4 Emission Factor (kg CH4/TJ)	G CH4 Emissions (Gg CH4) G=C*F/10 ⁶ 6	H N2O Emission Factor (kg N2O/TJ)	I N2O Emissions (Gg N2O) I=C*H/10 ⁶ 6				
Gas/Diesel...	174.1593	Ggl	43	7488.8...	74100		554.9...	3.9	0.029...	28.6	0.214...				
		Gg													
Total				7488.84...			554.92378		0.02921		0.21418				

Time Series data entry... Delete selected rows...

Anexo 5.- Gráficas obtenidas en la hoja de cálculo obtenida del software del IPCC para cada gas de efecto invernadero.





Anexo 6.- Estimaciones totales de gases de efecto invernadero obtenido por el software del IPCC.

$$E = 66.3961 + 554.9238 + 0.6133 [GgCO_{2eq}]$$

$$E = 621.93318 GgCO_{2eq} = 621933.18 tCO_{2eq}$$

Anexo 7.- Hoja de cálculo obtenida de la calculadora de SEMARNAT.

NOTA: El resultado de emisiones es indicativo. La calculadora entregará resultados más aproximados a las emisiones reales en la medida en que el usuario ingrese información orientadora para determinar si el sujeto sobrepasa o no el umbral de registro. En ningún caso sustituye la estimación de emisiones que deben realizar como resultado final de sus emisiones anuales, esta calculadora es un instrumento de apoyo. La suma de las emisiones puede no coincidir con el resultado parcial.

Sector	Subsector	Actividad	Fuente de Emisión	Instrucciones	Dato de Actividad	Unidad	Emisiones GEI [tCO ₂ e]	Emisiones CO ₂ [tCO ₂]	Emisiones CH ₄ [tCH ₄]	Emisiones N ₂ O [tN ₂ O]
Transporte	Transporte_Ferroviano	Ferrocarril_de_carga_y_pasajeros	Diesel Ferrocarril	Ingrese el consumo anual de diesel en litros	210,846.657	l	612,887.20	555,227.47	31.10	214.30

Anexo 8.- Proporción de estimación de emisiones atmosféricas para cada ruta.

Ruta	Longitud [km]	Proporción
México-Cd. Juárez	1956	0.3166
Irapuato-Manzanillo	642	0.1039
Tampico-Gómez Palacio	866	0.1402
Piedras Negras-Ramos Arizpe	427	0.0691
Guadalajara-Nogales	1764	0.2855
Benjamín Hill-Mexicali	524	0.0848
Total	6179	1