

# Estimación de pérdidas evaporativas de gasolina en tanques de almacenamiento de una estación de servicio

**Pedro Iván Orozco Cury** | Universidad del Norte<sup>1</sup>, [piorozco@uninorte.edu.co](mailto:piorozco@uninorte.edu.co)

**Natalia García Gallardo** | Universidad del Atlántico<sup>2</sup>,  
[ngarciag@mail.uniatlantico.edu.co](mailto:ngarciag@mail.uniatlantico.edu.co)

**Sergio Alexander González Pachón** | Universidad del Atlántico<sup>3</sup>,  
[sergioalexandergonzalez@mail.uniatlantico.edu.co](mailto:sergioalexandergonzalez@mail.uniatlantico.edu.co)

**Víctor Javier Pugliese Manotas** | Universidad del Norte<sup>4</sup>, [vpugliese@uninorte.edu.co](mailto:vpugliese@uninorte.edu.co)

**Arturo González Quiroga** | Universidad del Norte<sup>5</sup>, [arturoq@uninorte.edu.co](mailto:arturoq@uninorte.edu.co)

DOI: <https://doi.org/10.21158/...>

Fecha de recepción: 27 de agosto de 2025

Fecha de aprobación: 24 de octubre de 2025

**Como citar este artículo:** P. I. Orozco Cury, N. García Gallardo, S.A. González Pachón, V.J. Pugliese Manotas y A. González Quiroga. “Estimación de pérdidas evaporativas de gasolina en tanques de almacenamiento de una estación de servicio”, Rev. Ont., vol. 13, p. , 2025. Disponible en: <https://doi.org/10.21158/...>

<sup>1</sup> Magíster en Gestión de Hidrocarburos. Universidad Viña del Mar. Ingeniero Químico. Universidad del Atlántico, Colombia. Docente del programa de Ingeniería Química. Universidad del Atlántico. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6479-8336>

<sup>2</sup> Ingeniería Química. Universidad del Atlántico, Colombia. Grupo de investigación Procesos Químicos y Bioquímicos Sostenibles (PROQUIBIOS). ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4057-3355>

<sup>3</sup> Ingeniero Químico. Universidad del Atlántico, Colombia. Grupo de investigación Procesos Químicos y Bioquímicos Sostenibles (PROQUIBIOS). ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5798-1227>

<sup>4</sup> Ph.D en Ingeniería de Petróleos. Texas Tech University, Estados Unidos. Ingeniero Mecánico. Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. Docente del programa de Ingeniería Mecánica. Universidad del Norte: ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7282-7950>

<sup>5</sup> Grupo de investigación UREMA, Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. Ph.D en Ingeniería Química. Universidad de Gante, Bélgica. Ingeniero Químico. Universidad Industrial de Santander. Coordinador del programa de Ingeniería Mecánica. Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7655-9263>



## Resumen

Las estaciones de servicio desempeñan un papel fundamental en la cadena de valor comercial de combustibles líquidos derivados del petróleo; sin embargo, durante sus operaciones diarias enfrentan pérdidas de inventario debido a la evaporación de la gasolina. Este fenómeno se debe a factores como la volatilidad del combustible, la variación climática, el sistema de descarga y el tipo de tanque de almacenamiento. La evaporación genera compuestos orgánicos volátiles (COVs) que, al reaccionar con los óxidos de nitrógeno emitidos por los vehículos y la luz solar, contribuyen a la formación de ozono troposférico y smog fotoquímico, afectando la calidad del aire y la salud humana. Ante esta problemática, se estimaron las pérdidas evaporativas de la gasolina en las operaciones asociadas a la comercialización de una estación de servicio clase B, ubicada en la ciudad de Barranquilla, para un año operativo completo (2024), utilizando como metodología las normas API MPMS 19.1. Los resultados indicaron una pérdida volumétrica de 727 gal/año de gasolina corriente, equivalente al 0,11 % del volumen total comercializado. En el caso de la gasolina extra, se estimó una evaporación de 10,9 gal/año, equivalente al 0,16 %. La presión de vapor Reid y la temperatura fueron identificadas como factores clave en estas pérdidas. Se observó que los meses con mayores pérdidas en Barranquilla fueron mayo, julio y agosto, lo que se correlaciona con las condiciones climáticas locales. Ante estos hallazgos, se recomienda implementar sistemas de recuperación de vapores para reducir el impacto ambiental y las pérdidas económicas.

**Palabras clave:** gasolina; emisiones; evaporación; estación de servicio; hidrocarburos.



# *Estimation of gasoline evaporation losses in storage tanks at a service station*

## Abstract

Service stations play a key role in the commercial value chain of petroleum-based liquid fuels; however, during daily operations, they incur inventory losses from gasoline evaporation. This phenomenon is caused by factors such as fuel volatility, climate variation, the discharge system, and the type of storage tank used. Evaporation generates volatile organic compounds (VOCs) that, when reacting with nitrogen oxides emitted by vehicles and sunlight, contribute to the formation of tropospheric ozone and photochemical smog, affecting air quality and human health. Because of this problem, gasoline evaporation losses were estimated for operations associated with the commercialization of a Class B service station located in the city of Barranquilla for a full operating year (2024), using API MPMS 19.1 standards as the methodology. The results indicated a volumetric loss of 727 gallons of regular gasoline per year, representing 0.11% of the total volume sold. For premium gasoline, evaporation was estimated at 10 gallons/year, equivalent to 0.16%. Reid vapor pressure and temperature were identified as key factors in these losses. It was observed that the months with the highest losses in Barranquilla were May, July, and August, in alignment with local climatic conditions. Given these findings, the implementation of vapor recovery systems is recommended to reduce environmental impact and economic losses.

**Keywords:** Gasoline; emissions; evaporation; service station; hydrocarbons.



# 1. Introducción

Las estaciones de servicio desempeñan un papel fundamental en la cadena de comercialización de combustibles líquidos derivados del petróleo. Sin embargo, durante sus operaciones, enfrentan pérdidas de inventario asociadas a la evaporación de gasolina, un fenómeno influenciado por variables fisicoquímicas del combustible y por las condiciones ambientales locales.

En este contexto, resulta relevante analizar la situación en el departamento del Atlántico, donde las altas temperaturas ambientales intensifican dichas pérdidas. En esta región, las estaciones de servicio enfrentan pérdidas evaporativas significativas debido a la expansión y contracción del combustible dentro de los tanques de almacenamiento [1]. Esto no solo representa una disminución en los volúmenes de venta y, por ende, una afectación económica para los propietarios, sino que también contribuyen a la emisión de compuestos orgánicos volátiles (COVs). Los COVs, al reaccionar con los óxidos de nitrógeno emitidos por los vehículos y la luz solar, influyen en la formación de ozono troposférico y smog fotoquímico, lo que afecta negativamente la calidad del aire, la salud de los trabajadores y el medio ambiente [2].

Este estudio se centra en la cuantificación de las pérdidas evaporativas de la gasolina extra-corriente generadas durante las operaciones de comercialización en una estación de servicio. Para ello, se empleará la metodología estándar del Instituto Americano de Petróleo (API) para estimar pérdidas por evaporación en tanques de techo fijo (API MPMS 19.1) [3], y la recopilación de factores de emisión AP-42 (7.1 organic liquid storage tanks) [4] de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de EE. UU. A partir de estos análisis, se estimarán los volúmenes evaporados y el efecto económico asociado, con el fin de proporcionar información para mejorar la gestión del inventario y, en un futuro, desarrollar estrategias para minimizar el impacto ambiental y económico de estas emisiones.

Diversas investigaciones han abordado la problemática de las pérdidas evaporativas de gasolina, profundizando en la composición de los hidrocarburos, los factores de emisión, los métodos de cuantificación y las condiciones de almacenamiento que influyen en el fenómeno. Según [5], los hidrocarburos, incluida la gasolina extra-corriente, presentan propiedades específicas que determinan su comportamiento frente a condiciones de almacenamiento. El estándar API [6] recopiló metodologías y factores de emisión para cuantificar las pérdidas por evaporación.

Asimismo, estudios como [7] y [8] relacionaron la composición de la gasolina y sus procesos de refinación con la generación de emisiones, destacando la necesidad de actualizar las normativas para mitigar sus efectos. En [9] se demostró la posibilidad de recuperar vapores generados durante la carga de combustible mediante absorbentes, lo que sugiere su aplicabilidad en otras etapas del manejo de gasolina. Por su parte, [10] propuso el uso de válvulas de presión-vacío para minimizar las pérdidas en los tanques mediante la recuperación e incorporación de vapores, mientras que [11] evidenció que la implementación de sistemas de recuperación en fase II puede reducir las pérdidas evaporativas hasta en un 95 % con la tecnología adecuada.

## 2. Marco teórico

La industria de refinación del petróleo ha experimentado un desarrollo continuo desde mediados del siglo XIX, impulsado por la necesidad de abastecer de energía a un mercado en expansión, particularmente en el sector del transporte. En Colombia, la comercialización de combustibles líquidos derivados del petróleo se realiza principalmente a través de estaciones de servicio (EDS), definidas por la normativa nacional como establecimientos destinados al almacenamiento y distribución de combustibles para vehículos automotores [12].

### 2.1. Propiedades fisicoquímicas de la gasolina

La gasolina es un líquido transparente, inflamable y altamente volátil, constituido por una mezcla compleja de hidrocarburos con rangos de ebullición entre 30 °C y 200 °C, obtenida mediante destilación fraccionada del petróleo crudo [8]. Su composición incluye alcanos, alquenos, isoalcanos, cicloalcanos y compuestos aromáticos, en proporciones que determinan propiedades claves como:

#### **Índice de octano**

Medida de la calidad de ignición o inflamabilidad del combustible, determinada por la proporción de iso-octano y n-heptano en la mezcla [5], [8].

#### **Presión de vapor Reid (RVP)**

Indica la tendencia del combustible a evaporarse. Un valor alto de RVP refleja una mayor presencia de compuestos de bajo peso molecular, lo que incrementa su volatilidad. Este parámetro debe controlarse para garantizar un arranque eficiente del motor y evitar la formación de burbujas de vapor antes de la combustión [5], [8].

#### **Contenido de azufre**

Expresado en partes por millón (ppm), influye en la formación de óxidos de azufre durante la combustión. Estos reaccionan con la humedad atmosférica para producir ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), compuesto corrosivo que contribuye a la lluvia ácida y deteriora materiales. Además, los gases de azufre afectan los sistemas de control de emisiones en motores de combustión interna [13].

#### **Poder calorífico**

Corresponde a la cantidad de energía liberada durante la combustión completa del combustible, un parámetro fundamental para evaluar su eficiencia energética. Este valor depende de la composición del combustible y se expresa en kilocalorías por kilogramo ( $kcal/kg$ ) [13].

El proceso de combustión completa genera dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y agua ( $H_2O$ ), cuya liberación de calor puede presentarse bajo dos formas: el poder calorífico inferior (PCI), que corresponde al calor liberado cuando el vapor de agua no se condensa; y el poder calorífico superior (PCS), que incluye el calor adicional liberado cuando dicho vapor se condensa en estado líquido [13].

La calidad de la gasolina se evalúa conforme a normas internacionales que garantizan su desempeño en motores de encendido por chispa. La especificación ASTM D4814 establece los requisitos generales para las gasolinas automotrices, incluyendo propiedades críticas como el índice de octano, la presión de vapor Reid, el contenido de azufre y el poder calorífico [14].

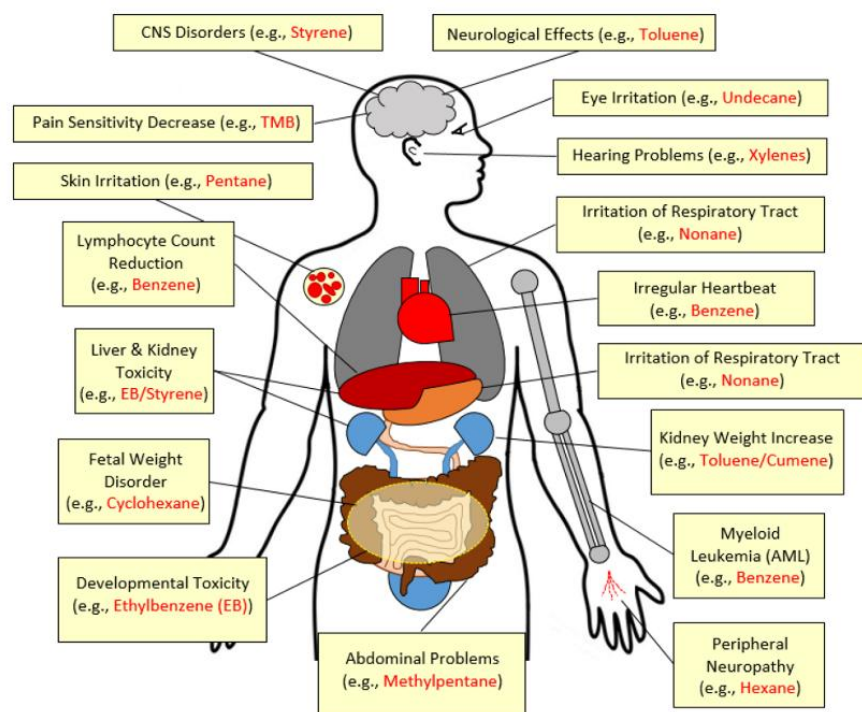
## 2.2. Emisión de compuestos orgánicos volátiles (COVs)

Los COVs son sustancias químicas orgánicas con alta presión de vapor que se volatilizan fácilmente desde líquidos o sólidos en condiciones ambientales. Pueden tener origen natural (procesos biogénicos terrestres y oceánicos) o antropogénico, principalmente debido a la quema de combustibles fósiles y a la evaporación de disolventes. En la industria petrolera, las emisiones de COVs representan cerca del 16 % de las emisiones globales, liberándose durante la extracción, transporte, almacenamiento y refinado del crudo [2].

## 2.3. Efectos de los (COVs) en la salud humana

Los efectos adversos de los COVs se ilustran en la figura 1 [2]. El benceno, clasificado por la EPA como carcinógeno del grupo A [4], ha demostrado incrementar el recuento de linfocitos tras exposición oral o inhalatoria debido a su toxicidad. Asimismo, se asocia con leucemia, trastornos hematológicos y alteraciones en la formación de la sangre, siendo cualquier nivel de exposición riesgoso.

Figura 1. Impacto de los COVs en la salud humana



Fuente. Rajabi et al. (2020) [2].



La exposición a altas concentraciones de contaminantes puede afectar el sistema nervioso central, causando mareos, náuseas y dolor de cabeza [2]. A largo plazo, puede provocar hemotoxicidad, genotoxicidad, aberraciones cromosómicas, debilidad reproductiva y mortalidad [2]. Estudios en trabajadores de refinerías estiman un riesgo de cáncer de 48 000 por cada millón de personas [2]. Según [13], aproximadamente el 87,5 % de las emisiones evaporativas provienen de alcanos, precursores principales del ozono troposférico.

Dentro de la región Caribe, en un estudio en seis estaciones de servicio de Barranquilla, se determinaron las concentraciones de benceno, tolueno, etilbenceno y xileno (BTEX), donde las concentraciones superaron los límites internacionales, y se identificó el llenado de vehículos como la principal fuente de emisión, dando un mayor soporte a la necesidad de cuantificar estas pérdidas evaporativas [15].

## 2.4. Tanques de almacenamiento y pérdidas evaporativas

Las estaciones de servicio emplean tanques subterráneos de pared doble, diseñados para ofrecer mayor seguridad y aislamiento. Al estar debajo del suelo, los tanques están menos expuestos a las variaciones térmicas del ambiente, lo que reduce significativamente las pérdidas por respiración observadas comúnmente en tanques aéreos [16].

Sin embargo, estos sistemas presentan pérdidas evaporativas de carácter operativo durante el llenado y vaciado. Durante el llenado, el incremento del nivel del combustible comprime los vapores presentes en el espacio de cabeza del tanque; cuando la presión supera el valor de ajuste de las válvulas de venteo, dichos vapores son expulsados a la atmósfera. Este efecto se intensifica al utilizar el método de llenado por salpicadura, ya que la turbulencia generada favorece la formación de vapores. En el vaciado, la disminución del nivel del combustible genera un vacío parcial que induce la entrada de aire, el cual puede saturarse posteriormente con hidrocarburos y liberarse en operaciones sucesivas [1].

## 2.5. Estrategias de mitigación de pérdidas evaporativas

Existen diversos tipos de sistemas de recuperación de vapores, que, según el caso, se implementan en distintos procesos. En las estaciones de servicio, existen dos sistemas de recuperación que pueden implementarse. Según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, se estableció una nomenclatura para los sistemas, la cual se define como (stage IB) y (stage II) [11].

*Stage IB:* en la operación de llenado de los tanques de tipo subterráneo de las estaciones de servicio, las emisiones son generadas cuando los vapores son desplazados a la atmósfera por la gasolina que está siendo vaciada en el tanque. Este tipo de emisiones puede reducirse si se usan sistemas de traspaso o de balance de vapores. Estos sistemas utilizan tuberías e interconexiones de recolección, que traspasan los vapores desplazados desde el ducto de venteo del estanque que se llena, al compartimento del camión que se está vaciando, el cual los transportará de regreso al terminal [17].

*Stage II:* el llenado de los tanques de los vehículos en las estaciones de servicio también produce emisiones evaporativas, estas provienen de posibles derrames de gasolina que se evaporan y de los vapores que se desplazan en el estanque del vehículo al llenarlo de gasolina fresca. Para controlar las emisiones durante el llenado del vehículo, se utiliza un método que consiste en conducir los vapores desplazados del estanque

del vehículo al tanque subterráneo, mediante una manguera y una pieza especial en la boquilla dispensadora. El escape de vapor desde la cañería de llenado del automóvil a la atmósfera es retenido por un fuelle especial, que sella el tubo de llenado y conduce los vapores desplazados a través de la boquilla dispensadora de la manguera [11].

Las estrategias de mitigación de emisiones por evaporación de combustibles incluyen el uso de tanques de techo flotante, que reducen hasta en un 90 % las pérdidas, y la recuperación de vapores durante el llenado y la descarga. También se aplican recubrimientos protectores, presurización con gases inertes y mantenimiento preventivo de sellos y válvulas para minimizar fugas y reducir el impacto ambiental [18].

### 3. Metodología

Las ecuaciones y factores utilizados en este estudio se basan en la norma API MPMS 19.1 evaporative loss from fixed-roof tanks, y la recopilación de factores de emisión AP-42 de la EPA [3], [4]. Dichas fórmulas están diseñadas para calcular la pérdida anual total por evaporación de líquidos almacenados, considerando la suma de las pérdidas por almacenamiento o respiración y operacionales, tal como se presenta en la ecuación 1:

$$L_T = L_S + L_W \quad (1)$$

Donde:

$L_T$  Emisiones totales, *lb/año*.

$L_S$  Pérdidas por almacenamiento o respiración, *lb/año*.

$L_W$  Pérdidas operacionales, *lb/año*.

En el caso de las estaciones de servicio que emplean tanques subterráneos, las pérdidas totales por evaporación se asocian principalmente a las pérdidas operacionales ( $L_W$ ), conforme a lo establecido en la sección 4.2.1 y 4.2.5 de la API MPMS 19.1, y el capítulo 2.2.5, sección 7.1 del AP-42 de la EPA [19]. Dichas secciones indican que, para tanques subterráneos, puede asumirse la ausencia de pérdidas por respiración ( $L_S$ ), asociadas al ciclo térmico diario ambiental, debido a que el suelo actúa como medio aislante, limitando las variaciones de temperatura en el interior del tanque y, por ende, la expansión y contracción del espacio de vapor. En consecuencia, la estimación desarrollada en el presente estudio se centra en el cálculo de las pérdidas por trabajo, de acuerdo con el marco metodológico establecido por la API MPMS 19.1 para este tipo de configuración de almacenamiento.

#### 3.1. Cálculo de pérdidas por operación ( $L_W$ )

Las pérdidas operativas corresponden a aquellas que se producen durante el llenado de los tanques de almacenamiento en las estaciones de servicio, debido al incremento en el nivel del líquido, así como durante su vaciado, como consecuencia del ingreso de aire al sistema. Esta pérdida se estimó empleando la ecuación 2:

$$L_w = V_Q K_N K_C K_B W_v \quad (2)$$

Estos parámetros se definen de la siguiente manera y fueron tomados de la referencia [3]:  
 $V_Q$  El rendimiento de pérdida de trabajo,  $ft^3/año$ .

$K_N$  Factor de recarga, *adimensional*.

$K_C$  Factor de producto, *adimensional*.

$K_B$  Factor de corrección de la configuración de ventilación, *adimensional*.

$W_V$  Densidad del vapor contenido,  $lb/ft^3$ .

### 3.2. Rendimiento de pérdida de trabajo ( $v_Q$ )

El rendimiento por pérdida se determinó aplicando la ecuación 3, dado que no disponía de la suma anual de los incrementos del nivel del líquido. Para este cálculo, se utilizó el valor de la constante de 5,614  $ft^3/bbl$ , tomada de la literatura [3], junto al ingreso anual de gasolina en  $\frac{bbl}{año}$  de cada tanque. Como se muestra a continuación:

$$V_Q = 5.614Q \quad (3)$$

### 3.3. Factor de recarga ( $K_N$ )

El factor de recarga  $K_N$  se determinó en función del número de recargas  $N$ , según el criterio establecido, si  $N < 36 \rightarrow K_N = 1$ ; en el caso contrario, es decir, si  $N \geq 36 \rightarrow KN = \frac{(180+N)}{(6N)}$ .  $N$  se estimó con la ecuación 4:

$$N = \frac{5.614Q}{\left[ \frac{\pi D^2 (H_{LX} - H_{LN})}{4} \right]} \quad (4)$$

### 3.4. Factor producto ( $K_C$ )

El factor de producto se calculó considerando el tipo de combustible empleado. Dado que se trata de gasolina, un derivado del petróleo, se aplicó el valor correspondiente a este tipo de hidrocarburos. Como se muestra en la ecuación 5:

$$K_C = 1.0 \text{ para stocks de petróleo refinado} \quad (5)$$

### 3.5. Factor de corrección de ajuste de ventilación ( $K_B$ )

Este factor corrige las pérdidas en función del ajuste de la presión de las válvulas de venteo del tanque. Para su determinación, se utilizaron las ecuaciones 6 y 7:



En primera instancia, se verificó si se cumplía la condición:

$$K_N \frac{P_{BX} + P_A}{P_O + P_A} \leq 1.0 \quad (6)$$

Donde:

$K_N$  Factor de recarga (*adimensional*).

$P_A$  Presión atmosférica en el sitio del tanque (*psia*).

$P_{BX}$  Ajuste de presión máxima de ventilación (*psia*).

$P_O$  Presión normal de operación (*psia*).

Dado que el valor obtenido para la gasolina corriente fue menor a 1,  $K_B$  se toma igual a 1.0. En el caso de la gasolina extra que no cumplió dicha condición, se calculó mediante la ecuación:

$$K_B = \frac{\frac{P_O + P_A}{K_N} - P_{VA}}{P_{BX} + P_A - P_{VA}} \quad (7)$$

Donde:

$P_O$  Presión normal de operación (*psia*).

$P_A$  Presión atmosférica en el sitio del tanque (*psia*).

$K_N$  Factor de recarga (*adimensional*).

$P_{VA}$  Presión de vapor verdadera del stock (*psia*).

$P_{BX}$  Ajuste de presión máxima de ventilación (*psia*).

### 3.6. Densidad del vapor condensado ( $w_V$ )

La densidad del vapor condensado se calculó con base a la ecuación 8:

$$W_V = \frac{M_V P_{VA}}{RT_V} \quad (8)$$

Donde:

$M_V$  Peso molecular del vapor de stock  $\left(\frac{lb}{lb-mol}\right)$ .

$P_{VA}$  Presión de vapor real de la gasolina (*psia*).

$R$  Constante de los gases ideales  $\left(\frac{psia ft^3}{lb-mole \text{ } ^\circ R}\right)$ .

$T_V$  Temperatura del espacio de vapor ( $^\circ R$ ).

Las ecuaciones previamente descritas fueron validadas experimentalmente mediante la recopilación y análisis de datos provenientes de 123 tanques de almacenamiento en operación, documentados en la API 19.1 D [20]. En dicho estudio se aplicaron metodologías de cálculo termodinámico, complementadas con la caracterización fisicoquímica de los productos almacenados, principalmente de petróleo y sus derivados.

La base de datos obtenida permitió verificar la consistencia del modelo y ajustar las correlaciones empíricas utilizadas para la estimación de pérdidas operativas, particularmente aquellas asociadas con el factor de recambio ( $K_N$ ) y la presión de vapor del producto.

En consecuencia, el procedimiento proporciona una representación confiable del comportamiento de los vapores desplazados durante las operaciones de llenado y vaciado en tanques de techo fijo. No obstante, el modelo presenta limitaciones inherentes a su naturaleza empírica, ya que fue desarrollado originalmente en condiciones operativas de tanques superficiales. La norma también contempla su aplicación a tanques subterráneos horizontales, para los cuales la principal modificación en la estimación de pérdidas se debe al cálculo del diámetro del tanque. En este caso, se considera la ausencia de pérdidas por respiración y una mayor estabilidad térmica del sistema, atribuible al efecto de aislamiento del suelo. Los resultados obtenidos deben interpretarse como estimaciones representativas de las condiciones operativas locales.

## 4. Resultados

Aplicando la metodología establecida en la norma API MPMS 19.1, y a partir de los balances operativos de la estación de servicio de clase B, ubicada en el suroccidente de Barranquilla, se cuantificaron las pérdidas por evaporación de gasolina durante el año 2024. El estudio consideró variables como la frecuencia de llenado, el volumen del tanque, una presión de vapor Reid (RVP) de 7,5 lb/in<sup>2</sup>, una temperatura promedio anual de 78,14 °F, obtenida a partir de los registros de la estación meteorológica del aeropuerto Ernesto Cortissoz, seleccionada por ser la estación de monitoreo más cercana al área de estudio y por contar con datos climáticos representativos de las condiciones locales. Asimismo, se incluyó un flujo de ingreso de 677 987 galones de gasolina corriente y 7000 galones de gasolina extra. Con base en estos datos, se estimaron las emisiones evaporativas, las pérdidas volumétricas y monetarias, así como el porcentaje de pérdidas por evaporación para ambos tipos de combustible (ver tablas 1 y 2).



Tabla 1. Cuantificación total de gasolina corriente, año: 2024

Parámetro	Valor
Presión de vapor Reid (lb/in <sup>2</sup> )	7,5
Temperatura promedio anual (°F)	78,14
Flujo de ingreso (gal)	677,99
Emisiones evaporativas (lb)	3947,67
Pérdidas volumétricas (gal)	727,25
Porcentaje emisiones evaporativas (%)	0,11
Pérdidas monetarias (COP)	\$11.389.048

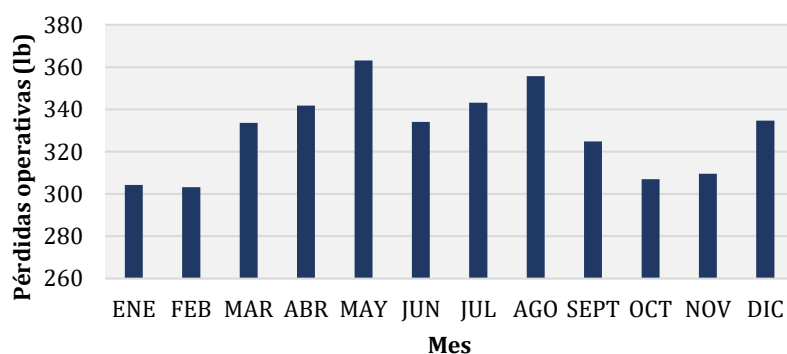
Fuente. Elaboración propia.

Tabla 2. Cuantificación total de gasolina extra, año: 2024

Parámetro	Valor
Presión de vapor Reid (lb/in <sup>2</sup> )	7,5
Temperatura promedio anual (°F)	78,14
Flujo de ingreso (gal)	7000
Emisiones evaporativas (lb)	58,95
Pérdidas volumétricas (gal)	10,86
Porcentaje emisiones evaporativas (%)	0,16
Pérdidas monetarias (COP)	\$216.575

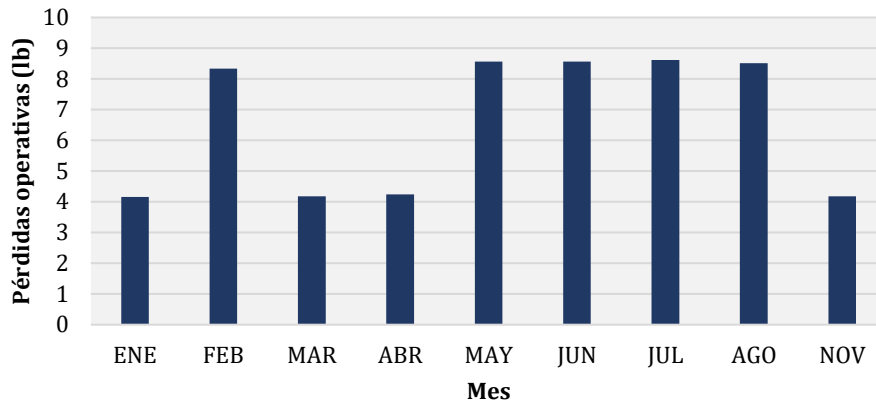
Fuente. Elaboración propia.

Figura 2. Pérdidas  $L_W$  mensuales gasolina corriente - 2024



Fuente. Elaboración propia.

Figura 3. Pérdidas operativas gasolina extra - 2024



Fuente. Elaboración propia.

## 4.1. Análisis de resultados

### 4.1.1. Magnitud operativa

La estación de servicio estudiada cumple una función estratégica en la distribución de combustibles en el suroccidente de Barranquilla, al servir como principal punto de abastecimiento para el parque industrial cercano y las zonas urbanas, como el barrio La Paz, caracterizadas por una alta presencia de motocicletas de bajo cilindraje. Este perfil de demanda explica la alta comercialización de gasolina corriente, seguida por el diésel y, en menor proporción, la gasolina extra, cuyo bajo consumo se debe a la limitada presencia de vehículos que requieren combustibles de alto octanaje. Por ello, la estación mantiene únicamente el inventario reglamentario de gasolina extra, en cumplimiento de la normativa vigente. En cuanto a volúmenes operativos, se registra una distribución anual de 684 987 galones entre gasolina corriente y extra, lo que la ubica cerca de la clasificación tipo A, según la Resolución 180687 de 2003 [12], reflejando su relevancia en el sistema de comercialización local.

## 4.2. Análisis de pérdidas evaporativas por tipo de gasolina

En 2024, la estación de servicio registró un ingreso total de 677 987 galones de gasolina corriente y 7000 galones de gasolina extra. Aplicando la metodología de la norma API MPMS 19,1 [3], se estimaron pérdidas evaporativas de 3.947,67 lb para la gasolina corriente, equivalentes a 727,25 galones, lo que corresponde al 0,11 % del volumen manejado. Para la gasolina extra, las pérdidas fueron de 58,95 lb, equivalentes a 10,86 galones, con un porcentaje ligeramente mayor del 0,16 %.

Aunque la gasolina extra presentó una mayor pérdida porcentual, su bajo volumen de comercialización redujo el impacto económico, calculado en \$216.575 COP, frente a \$11.389.048 COP para la gasolina corriente. En conjunto, los resultados evidencian una afectación directa en las utilidades y la necesidad de implementar estrategias que reduzcan las emisiones evaporativas y mejoren la eficiencia operativa.



Con el fin de contextualizar los resultados obtenidos, se realizó una comparación con los factores de emisión reportados por la California Air Resources Board (CARB) y la California Air Pollution Control Officers Association (CAPCOA), en la guía técnica Gasoline service station industrywide risk assessment technical guidance, específicamente en la tabla 7: emission factor table for underground storage tanks [21].

Dado que la estación analizada no cuenta con sistemas de recuperación de vapores, la comparación se realizó exclusivamente con los uncontrolled emission factors (UEF), los cuales representan condiciones de operación sin control de emisiones.

En dicha tabla, el factor UEF para la fuente denominada loading que corresponde a la descarga del camión cisterna al tanque subterráneo de la estación es de 7.7 lb VOC/1000 gal. Este proceso es físicamente equivalente al fenómeno modelado mediante API MPMS 19.1 como pérdidas operacionales, ya que en ambos casos se cuantifica el desplazamiento de vapores generado cuando el nivel del combustible aumenta dentro del tanque. Al convertir el factor UEF a una base porcentual respecto a la masa total de la gasolina se obtiene 0,128 %. Este valor es consistente con los porcentajes estimados en el presente estudio (0,11 % y 0,16 %). La cercanía entre el valor teórico derivado del UEF y los resultados obtenidos respalda la coherencia física de las estimaciones realizadas mediante API MPMS 19.1, y confirma que estas se encuentran dentro del rango esperado para estaciones sin sistemas de recuperación de vapores.

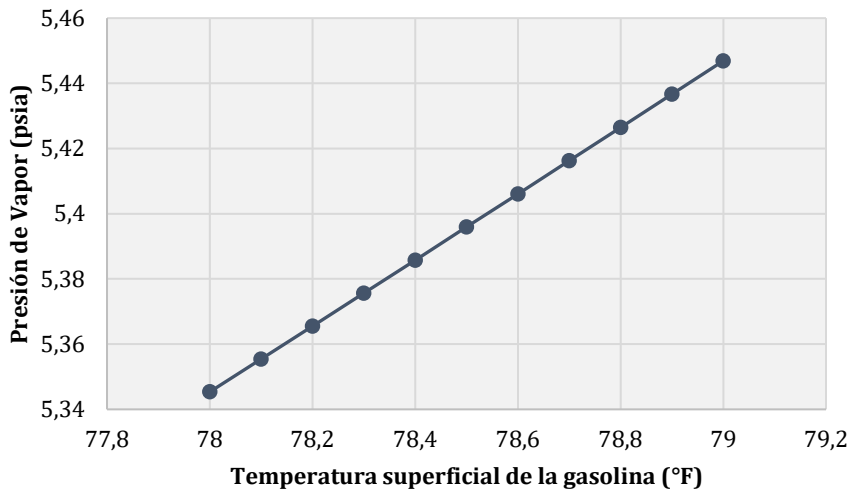
No obstante, debe considerarse que las estimaciones obtenidas mediante la metodología API MPMS 19.1 están sujetas a la incertidumbre propia de los modelos empíricos utilizados para cuantificar emisiones evaporativas. La documentación técnica del compendio AP-42 de la EPA para tanques de almacenamiento de líquidos orgánicos [19] reporta incertidumbres aproximadas del  $\pm 30$  % en este tipo de estimaciones, asociadas principalmente a la variabilidad de las condiciones operativas, las propiedades del combustible y las variables meteorológicas.

## 4.3. Análisis de la presión de vapor en condiciones ambientales

### 4.3.1. Variables

En este estudio se constató la existencia de una relación directa entre la presión de vapor del combustible y la volatilidad de sus fracciones livianas, lo cual se observa en la figura 4. La relación está determinada por la influencia de la temperatura, que incrementa la energía cinética de las moléculas y favorece su transición a la fase de vapor. Si bien la presión de vapor Reid (RVP) es un indicador fundamental del comportamiento evaporativo de la gasolina, los resultados demostraron que no actúa de forma aislada. La cantidad de vapor emitido también depende de la proporción de componentes livianos en la mezcla, los cuales son altamente volátiles.

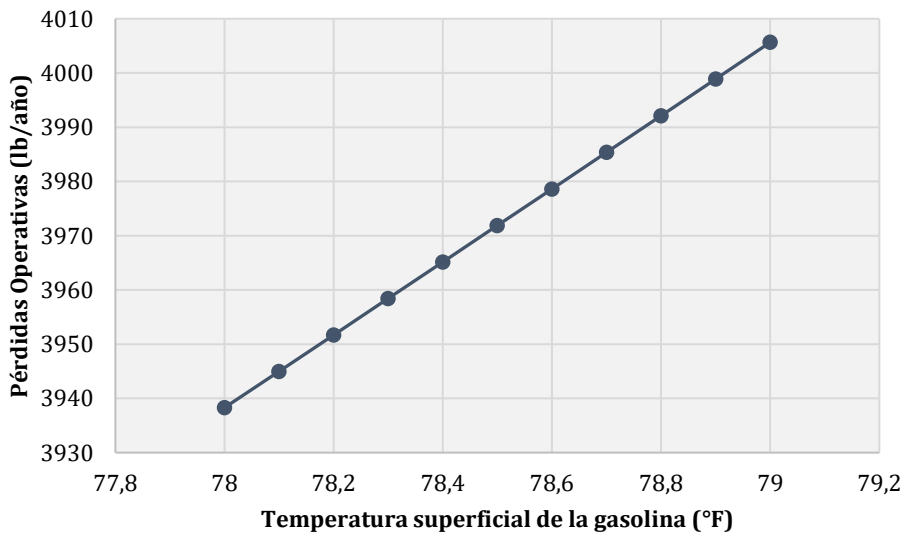
Figura 4. Relación de T frente al Pv



Fuente. Elaboración propia.

Asimismo, se identificó una correlación entre las pérdidas evaporativas y las condiciones ambientales, en particular con la temperatura superficial de la gasolina, como se muestra en la figura 5. La tendencia observada muestra un incremento aproximado de 67 lb/año por cada 1 °F dentro del rango analizado, lo que confirma que la temperatura actúa como una variable explicativa directa del aumento de las pérdidas operacionales. Dado que la presión de vapor depende de la temperatura del líquido, se observaron incrementos en las emisiones durante los meses más cálidos del año (véanse las figuras 2 y 3), lo que evidencia el efecto de este factor en la volatilización de hidrocarburos.

Figura 5. Relación de T frente al Lw



Fuente. Elaboración propia.



## 4.4. Método de llenado

El análisis evidenció que el actual procedimiento de llenado por caída libre genera una agitación significativa del combustible dentro del tanque subterráneo, lo que provoca la liberación repentina de vapores acumulados en el espacio de cabeza [1]. La ausencia de un sistema de recuperación, como una línea de retorno al camión cisterna, contribuye directamente a estas pérdidas al permitir que los vapores se liberen a la atmósfera.

Como alternativa, se propone la implementación de un sistema de llenado sumergido con retorno de vapores, que permite una transferencia más controlada, minimiza la turbulencia y facilita la captura de vapores desplazados mediante un colector conectado al compartimiento superior del vehículo cisterna. Esta estrategia representaría una mejora significativa en la gestión de las emisiones durante el proceso de llenado.

## 4.5. Efecto económico

Durante 2024, las pérdidas evaporativas de gasolina corriente en la estación de servicio representaron un costo estimado de \$11.389.048 COP. Aunque esto equivale a solo el 0,11 % del volumen total manejado (677 987 galones), el impacto financiero es considerable, dado que los márgenes de ganancia en el sector oscilan entre el 3 % y el 5 %.

Este capital, equivalente a \$11,4 millones COP, y podría haberse destinado a cubrir gastos operativos clave —como parte de la nómina, mantenimiento o inversiones en infraestructura—, o incluso a financiar sistemas de recuperación de vapores que contribuirían a mitigar estas pérdidas a mediano plazo.

En términos de rentabilidad, las pérdidas reducen el margen operativo, limitan la capacidad de reinversión y afectan la sostenibilidad financiera del negocio. Si no se controlan, y considerando un posible aumento en la volatilidad del combustible por factores climáticos o regulatorios, estas disminuciones podrían comprometer la competitividad de la estación, haciendo evidente la necesidad de adoptar medidas correctivas.

## 4.6. Factibilidad de implementación de un sistema de recuperación de vapores

En el análisis de factibilidad para reducir las pérdidas evaporativas en la estación de servicio, se evaluaron sistemas de recuperación de vapores fase I y fase II. De acuerdo con el Decreto 1521 de 1998, compilado en el Decreto 1073 de 2015, todas las estaciones de servicio en Colombia cuentan con tanques subterráneos de almacenamiento, lo que proporciona una base técnica adecuada para implementar sistemas de control de vapores.

El sistema fase I es responsabilidad de la empresa distribuidora, por lo que su instalación no depende directamente de la estación. En cambio, el sistema fase II que recupera vapores durante el abastecimiento de los vehículos con una eficiencia superior al 95 %, sí puede ser implementado por el establecimiento. Este requiere la adecuación de los dispensadores y su integración con los tanques subterráneos existentes. Según Gamonal [11], la inversión necesaria asciende a \$112.296.000 COP, incluyendo equipos (\$102.696.000) y obras civiles (\$9.600.000).

Considerando las pérdidas anuales por evaporación cercanas a \$11.605.623 COP, la recuperación de la inversión se estima en un plazo de aproximadamente diez años, tomando en cuenta únicamente las asociadas a las operacionales. Este periodo podría reducirse si se integran otras fuentes de pérdida. Además del beneficio económico, la implementación del sistema fase II generaría mejoras ambientales, operativas y en salud ocupacional, así como el cumplimiento de la normativa internacional vigente.

## 5. Conclusiones

Se determinó el volumen total de gasolina manejado por la estación de servicio durante el año 2024, registrando un ingreso anual de 677 987 galones de gasolina corriente y 7000 de extra. Estos resultados permitieron caracterizar la magnitud operativa, evidenciando un flujo de distribución equivalente al de una estación tipo A. Esta información fue fundamental para dimensionar adecuadamente el efecto de las pérdidas evaporativas en el contexto operativo real.

Los resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología establecida por la norma API MPMS 19.1 y los factores de emisión AP-42 presentaron pérdidas de 751,49 galones para la gasolina corriente (0,11 % del volumen ingresado) y 8,41 galones para la extra (0,16 % del volumen ingresado). Se estima que el 87,5 % de COVs evaporados corresponden a alcanos. Su alta proporción en las emisiones y su persistencia en la atmósfera los convierten en un factor determinante del deterioro de la calidad del aire en entornos urbanos.

El análisis económico evidenció un efecto significativo debido a las pérdidas evaporativas. El costo estimado fue de \$11.389.048 COP para la gasolina corriente y \$216.575 para la extra, lo que se traduce en una pérdida total de \$11.605.623 COP durante el año 2024. Este valor representa una afectación directa en los márgenes de ganancia de la estación, dado que las pérdidas equivalen a un porcentaje considerable de las ganancias netas por galón vendido. Estos resultados permitieron evaluar la viabilidad técnica y financiera de implementar un sistema de recuperación de vapores. Aunque requieren una inversión significativa, podrían amortizarse en el mediano plazo y ofrecer beneficios ambientales y operacionales adicionales.

Como línea de investigación futura, se propone realizar la caracterización detallada de la gasolina evaluada para identificar las emisiones generadas por cada uno de sus componentes. Esto no solo permitirá obtener resultados más precisos y un estudio más detallado de los posibles efectos ambientales, de seguridad y de salud en el trabajo, sino también establecer factores de emisión específicos, relacionar las pérdidas con propiedades fisicoquímicas, como la presión de vapor, evaluar riesgos asociados a compuestos críticos y proponer medidas de mitigación más efectivas.



## Referencias

- [1] M. Hilpert, A. M. Rule, B. Adria-mora, and T. Tiberi, "Implications for setback distances", *Sci. Total Environ.*, vol. 650, n.º Pt 2, pp. 2239-2250, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138654>
- [2] API, "Manual of petroleum measurement standards chapter 19.1 evaporative loss from fixed-roof tanks", *API Manual of Petroleum Measurement Standards (MPMS)*, 3th ed. Washington, DC, USA: API, 2017, pp. 1-27.
- [3] EPA, "Emission factor documentation for ap-42 organic liquid storage tanks final report", Office of Air Quality, Emission Factor, Invent. Gr., Oct. 2024.
- [4] J. Herrera Herbert, *Ingeniería de la perforación de pozos de petróleo y gas. Vol. I: Origen y características de los hidrocarburos*. Madrid, España: UPM, 2020. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/342192165\\_Ingenieria\\_de\\_la\\_perforacion\\_de\\_pozos\\_de\\_petroleo\\_y\\_gas\\_Vol\\_I\\_Origen\\_y\\_caracteristicas\\_de\\_los\\_hidrocarburos](https://www.researchgate.net/publication/342192165_Ingenieria_de_la_perforacion_de_pozos_de_petroleo_y_gas_Vol_I_Origen_y_caracteristicas_de_los_hidrocarburos)
- [5] L. Campbell, J. Toolen, D. Grubert, and G. Napp, "Compendium of greenhouse gas emission methodologies for the natural gas and oil industry", American Petroleum Institute, pp. 1-898, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.api.org/-/media/files/policy/esg/ghg/2021-api-ghg-compendium-110921.pdf>
- [6] C. Jessica *et al.*, "Influencia de las condiciones de almacenamiento en la presión de vapor Reid, formación de gomas y el número de octano research de la gasolina", *Rev. Politécnica*, vol. 52, n.º 1, pp. 63-72, Ago. 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.33333/RP.VOL52N1.07>
- [7] C. J. Boluda, M. Macías Alonso, and J. González Marrero, "The chemical complexity of automotive fuels", *Ing. y Apl.*, vol. 2, n.º 2, pp. 51-79, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.22206/cyap.2019.v2i2.pp51-79>
- [8] L. Quesada Carvajal and R. Amón Pérez, "Evaluación de dos tipos de adsorbentes para la recuperación de vapores de hidrocarburos generados en plantel de recope en Ochomogo", *Tecnura*, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.14483/22487638.18256>
- [9] J. S. Guillén Sánchez and A. Depaz Paucar, "Mantenimiento productivo total en la eficiencia productiva de las empresas industriales: una breve revisión de literatura," *Sig. Inv. en Sist. de Ges.*, vol. 16, n.º 1, pp. 1-28, 2023, doi: 10.15332/24631140.8807
- [10] J. L. Dulanto Gamonal, "Mejoras medioambientales, de seguridad y salud ocupacional y económicas a través de la implementación del sistema de recuperación de vapores fase II aplicado a la venta de gasoholes en las estaciones de servicio GASPETROL - Perú", tesis de pregrado, Univ. Privada del Norte, Lima, Perú, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11537/24901>
- [11] Ministerio de Minas y Energía, "Decreto 353 de 1991: por el cual se reglamenta la Ley 26 de 1989 y se modifica parcialmente el Decreto 283 de 1990", *Diario Oficial*, n.º 39.664, Colombia, 1991.

- [12] P. Montero, “Análisis de las propiedades de la gasolina super y ecopaís al ser mezclado con un aditivo”, tesis, Univ. Internacional del Ecuador, p. 107, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/4236/1/T-UIDE-0054.pdf>
- [13] ASTM, “Standard specification for automotive spark-ignition engine fuel”, ASTM D4814-20a, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://store.astm.org/d4814-22.html>
- [14] E. D. de León, “Título del informe/proyecto no especificado”, Dept. Civil y Ambiental, Univ. de la Costa, Barranquilla, Colombia, 2018.
- [15] G. A. Alarcón Torres, “Diseño de un tanque horizontal enterrado de plástico reforzado con fibra de vidrio de 10 000 galones de capacidad para el almacenamiento de hidrocarburos, utilizando la técnica de fabricación de fibra tejida”, tesis de grado, Univ. Tecnológica del Perú, 2024.
- [16] S. Pillpe, T. Alison, S. Auccahuasi, F. Antonio, O. Yarasqui, y Y. Celina, “Aprovechamiento de los residuos sólidos de la construcción y demolición en América del Sur: Revisión sistemática”, 2022.
- [17] P. Orozco, V. Pugliese, A. Gonzalez-Quiroga, and A. Arango, “Technological advances for estimating and reducing gasoline evaporation losses in the Petroleum industry”, en *Proc. 1st IEEE Colomb. Caribb. Conf. (C3)*, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1109/C358072.2023.10436276>
- [18] U.S. Environmental Protection Agency, “Emission factor documentation for ap-42 section 7.1: organic liquid storage tanks”, Office of Air Quality Planning and Standards, Research Triangle Park, NC, USA, Sep. 2006.
- [19] American Petroleum Institute, “Documentation file for api manual of petroleum measurement standards, chapter 19.1 - Evaporative loss from fixed roof tanks (API Bulletin 2518)”, 1st ed. Washington, DC, USA: API, Mar. 1993.
- [20] CARB and CAPCOA, “Gasoline service station industrywide risk assessment technical guidance”, California Air Resources Board, CA, USA, Feb. 18, 2022.