



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO  
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**ANÁLISIS DE CONTAMINANTES DEL METRO DE QUITO CON RESPECTO A LOS  
SISTEMAS DE METRO DE LATINOAMÉRICA Y SU IMPACTO EN LA HUELLA DE  
CARBONO BASADO EN UN ESTUDIO COMPARATIVO DE EMISIONES GEI.**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero Automotriz

**AUTORES: DYLAN ANDRÉS CHICAIZA LLUMIQUINGA  
CARLOS JAVIER CRUZ MONTALVO**

**TUTOR: MARIO ALEXANDER PERALVO CLAVON**

Quito - Ecuador  
2024

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Nosotros, Dylan Andrés Chicaiza Llumiquinga con documento de identificación N° 1724565591 y Carlos Javier Cruz Montalvo con documento de identificación N° 1753704715 manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 2 de agosto del año 2024

Atentamente,



---

Dylan Andrés Chicaiza Llumiquinga  
1724565591



---

Carlos Javier Cruz Montalvo  
1753704715

## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Dylan Andrés Chicaiza Llumiquinga con documento de identificación No. 1724565591 y Carlos Javier Cruz Montalvo con documento de identificación No. 1753704715, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “Análisis de contaminantes del Metro de Quito con respecto a los sistemas de metro de latinoamérica y su impacto en la huella de carbono basado en un estudio comparativo de emisiones GEI”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de Ingenieros Automotrices, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana

Quito, 2 de agosto del año 2024

Atentamente,

---

Dylan Andrés Chicaiza Llumiquinga  
1724565591

---

Carlos Javier Cruz Montalvo  
1753704715

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Mario Alexander Peralvo Clavon con documento de identificación N° 1718133448, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS DE CONTAMINANTES DEL METRO DE QUITO CON RESPECTO A LOS SISTEMAS DE METRO DE LATINOAMÉRICA Y SU IMPACTO EN LA HUELLA DE CARBONO BASADO EN UN ESTUDIO COMPARATIVO DE EMISIONES GEI, realizado por Dylan Andres Chicaiza Llumiyinga con documento de identificación N° 1724565591 y Carlos Javier Cruz Montalvo con documento de identificación N° 1753704715, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción: Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 2 de agosto del año 2024

Atentamente,



---

Ing. Mario Alexander Peralvo Clavon, MSc.  
1718133448

# ANÁLISIS DE CONTAMINANTES DEL METRO DE QUITO CON RESPECTO A LOS SISTEMAS DE METRO DE LATINOAMÉRICA Y SU IMPACTO EN LA HUELLA DE CARBONO BASADO EN UN ESTUDIO COMPARATIVO DE EMISIONES GEI.

## ANALYSIS OF POLLUTANTS FROM THE QUITO METRO IN COMPARISON TO LATIN AMERICAN METRO SYSTEMS AND THEIR IMPACT ON THE CARBON FOOTPRINT BASED ON A COMPARATIVE STUDY OF GHG EMISSIONS.

Dylan Chicaiza Llumiquinga<sup>1</sup>, Carlos Cruz Montalvo<sup>2</sup>

### Resumen

El estudio se enfoca en comparar las emisiones de CO<sub>2</sub> del Metro de Quito con otros sistemas de metro en Latinoamérica, evaluando su impacto en la huella de carbono por medio de un examen exhaustivo de la liberación de gases responsables del efecto invernadero (GEI). Se describe el funcionamiento y las características técnicas del Metro de Quito, incluyendo la infraestructura de subestaciones eléctricas, el proceso de conversión de corriente alterna (AC) a corriente continua (DC), y el consumo de energía tanto de los trenes como de los servicios auxiliares.

La demanda total del sistema eléctrico del Metro de Quito se calcula en 14997.5 kW, con un factor de emisión de 0.2508 t CO<sub>2</sub>/MWh. Para la comparación con otros sistemas de metro, se analizan factores como emisiones reducidas, factor de emisión, distancia recorrida y velocidad promedio.

Los sistemas de metro evaluados incluyen Medellín, São Paulo, Santiago, Ciudad de México, Panamá, Lima, Caracas y Santo Domingo, cada uno con diferentes niveles de eficacia en el uso de la energía y reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>.

**Palabras Clave:** Carbono, Contaminantes, Emisiones, Energía, Metro, Sostenibilidad

### Abstract

The study focuses on comparing the CO<sub>2</sub> emissions of the Quito Metro with other metro systems in Latin America, evaluating their impact on the carbon footprint through an exhaustive examination of the release of greenhouse gases (GHG). The operation and technical characteristics of the Quito Metro are described, including the infrastructure of electrical substations, the process of converting alternating current (AC) to direct current (DC), and the energy consumption of both the trains and auxiliary services. The total electrical demand of the Quito Metro system is calculated to be 14,997.5 kW, with an emission factor of 0.2508 t CO<sub>2</sub>/MWh. For comparison with other metro systems, factors such as reduced emissions, emission factor, distance traveled, and average speed are analyzed.

The evaluated metro systems include Medellín, São Paulo, Santiago, Mexico City, Panama, Lima, Caracas, and Santo Domingo, each with different levels of energy efficiency and reduction of CO<sub>2</sub> emissions.

**Keywords:** Carbon, Contaminants, Emissions, Energy, Metro, Sustainability

## 1. Introducción

Este estudio se basa en el análisis comparativo de las emisiones de contaminantes del Metro de Quito con respecto a otros sistemas de metro en Latinoamérica, evaluando su impacto en la huella de carbono. Este análisis se realiza en el contexto de las metas globales de sostenibilidad y las políticas locales de movilidad urbana sostenible.

El Metro de Quito, inaugurado recientemente, representa un logro significativo en la infraestructura de movilidad de Ecuador, ya que este sistema de transporte eléctrico no solo mejora la movilidad urbana sino que también presenta una oportunidad para disminuir las emisiones de GEI, en contraste con los modos de transporte convencionales que utilizan combustibles fósiles, por lo que la comparación con otros sistemas de metro de América Latina permite contextualizar su desempeño y resaltar áreas de mejora.

Este trabajo aborda varios aspectos críticos del funcionamiento del Metro de Quito, incluyendo la infraestructura de subestaciones eléctricas, el proceso de conversión de energía, y el uso de energía de los trenes y servicios auxiliares. Además, se presenta una evaluación detallada de la demanda total del consumo eléctrico y su factor de emisión de CO<sub>2</sub>, calculado en 0.2508 t CO<sub>2</sub>/MWh.

Para proporcionar una visión integral, se comparan las emisiones del Metro de Quito con las de otros sistemas de metro en Latinoamérica, incluyendo Colombia, Brasil, Chile, México, Panamá, Perú, Venezuela y República Dominicana. Estos sistemas difieren en cuanto a eficiencia energética y grados de reducción de emisiones, proporcionando un panorama amplio de las prácticas y resultados en la región.

Las consecuencias de este estudio destacan que, aunque el Metro de Quito tiene un nivel intermedio de emisiones, muestra una eficiencia energética competitiva.

Por este motivo, estos hallazgos no solo posicionan favorablemente al Metro de Quito en el contexto regional, sino que también establecen un fundamento sólido para investigaciones futuras y avances en la eficiencia energética del transporte público en Quito.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Subestaciones eléctricas

Una subestación de energía es un asentamiento clave en el sistema de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica. Su cargo principal es transformar los niveles de voltaje mediante transformadores para facilitar el transporte seguro y eficaz de electricidad, por este motivo, las subestaciones están equipadas con dispositivos de conmutación y protección, como interruptores y seccionadores, que controlan el flujo eléctrico y protegen el sistema contra sobrecargas y fallas. (Ríos & García, 2019)

#### 2.1.1. Subestación de interconexión con la empresa eléctrica de Quito.

Son instalaciones eléctricas de intercambio energía entre la empresa eléctrica de Quito y el Metro de Quito.

Estas subestaciones operan a altos niveles de voltaje y están equipadas con transformadores, sistemas de control, protección, y líneas de transmisión que garantizan una transferencia eficiente y segura de energía eléctrica, asegurando la estabilidad y continuidad del suministro eléctrico.

En la Tabla 1. Se presentan cada uno de los valores correspondientes a las subestaciones que tienen interconexión con el Metro de Quito.

En la Tabla 2. Se presenta el nivel de voltaje y la distancia promedio entre la interconexión de las subestaciones de la Empresa Eléctrica de Quito comparadas con las subestaciones de tracción del Metro de Quito

**Tabla 1:** Subestaciones de la EEQ que alimentan al Metro de Quito. (Cepeda et al., 2019)

Subestación	Voltaje (kV)	No. Transf.	Potencia (MVA)
Eugenio Espejo	138/22.8	3	33
Chilibulo	138/22.8	3	33
Vicentina	138/22.8	2	33
Nuevo Bicentenario	138/22.8	2	33

**Tabla 2:** Alimentación e interconexión de la empresa eléctrica de Quito con las subestaciones de tracción del metro. (Cepeda et al., 2019)

Subestación	Voltaje	Distancia
-------------	---------	-----------

Eugenio Espejo - Quitumbe	22.8 kV	2.3 Km
Chilibulo - La Magdalena	22.8 kV	2 Km
Vicentina – Universidad Central	22.8 kV	3.5 Km
Nuevo Bicentenario- El Labrador	22.8 kV	0.5 Km

Dentro de las subestaciones de tracción después de disminuir los 22.8 kilovoltios de corriente alterna a 1.225 kilovoltios de corriente alterna, el conjunto de transformadores rectificadores nuevamente transforman esta corriente mencionada con anterioridad, en corriente continua de 1.5 kilovoltios que es el nivel de voltaje adecuado para alimentar los trenes eléctricos del metro. (Metro, 2019b)(Cepeda et al., 2019)

### 2.1.2. Potencia de los Servicios Auxiliares (SS.AA.)

Se refiere a la energía eléctrica necesaria para mantener en funcionamiento los sistemas de soporte dentro de una estación de metro y sus túneles. Esto abarca la electricidad utilizada para la iluminación, el control de accesos, las escaleras mecánicas, los ascensores, la ventilación, las salidas de emergencia, los pozos de bombeo pluvial y los sistemas de alimentación ininterrumpida.

En esencia, se trata de la energía requerida para asegurar que todos los componentes auxiliares del metro operen de manera eficiente, garantizando así la seguridad y comodidad de los usuarios. (Jurado et al., 2017)

En la Figura 1, se presentan cada una de las potencias utilizadas por los servicios auxiliares del Metro de Quito.

Nº	Estación	[kW]	Túnel	[kW]
1	Quitumbe	485,0	CT0	232,0
2	Morán Valverde	307,6	CTV1	176,0
3	Solanda	355,5	CTV2	151,0
4	El Calzado	279,6	CTV3	233,0
5	EL Recreo	424,0	CTV4	128,0
6	La Magdalena	477,0	CTV5	128,0
7	San Francisco	932,0	CTV6	199,5
8	La Alameda	384,6	CTV7	147,0
9	El Ejido	372,6	CTV8	147,0
10	U. Central	347,0	CTV9	147,0
11	La Pradera	264,0	CTV10	126,0
12	La Carolina	334,0	CTV11	126,0
13	Iñaquito	279,0	CTV12	141,0
14	Jipijapa	279,6	CTV13	149,0
15	El Labrador	525,5	Total[kW]	2 230,5
Total [kW]		6 047		

Figura 1. Potencia de las estaciones y túneles. (Jurado et al., 2017)

- La potencia total de los servicios auxiliares es de 8227.5 kilowatts.

### 2.2. Características del Metro de Quito

Cada tren mide 109 metros de longitud, tienen 48 puertas y 6 vagones en la disposición MC-R-S-S-R-MC, donde MC es un vagón que tiene motor de tracción e incorpora cabinas de manejo en los extremos, R son los vagones intermedios que tienen la funcionalidad de remolque, y S son los vagones intermedios con motor de tracción. (Jurado et al., 2017)

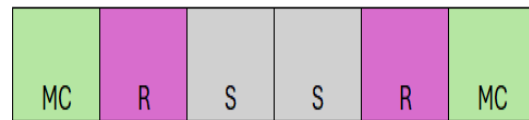


Figura 2. Disposición de los vagones.

En la figura 3, se muestra la potencia promedio por cada vagón o coche del Metro de Quito.

Tipo de Coche	Potencia kW por Coche
Sin aire acondicionado	80
Con Aire Acondicionado	105

Figura 3. Potencia promedio. (Jurado et al., 2017)

En su totalidad el Metro de Quito tiene una capacidad para 1500 personas y su velocidad de operación es de 40 km/h. (Metro, 2019)



Figura 4. Línea 1 del metro de Quito.

### 2.3. Potencia por cada Vagón

El Metro de Quito cuenta con un total de 18 trenes, de los cuales 16 están en operación y 2 se encuentran en reserva.

En la Tabla 3, se indica la potencia de cada vagón con motor de tracción.

**Tabla 3:** Tipos de vagón

Tipo de vagón	Potencia (kW)
MC	105
R	No tiene motor de tracción
S	105

1) Potencia por cada tren ( $P_t$ )

$$P_t = \text{N}^\circ \text{ de vagones} * \text{Potencia} \quad (1)$$

$$P_t = 6 * 105 \text{ kW}$$

$$P_t = 630 \text{ kW}$$

La potencia por cada tren fue de 630 kW

## 2) Potencia total de tracción de los 16 trenes en funcionamiento (PT)

$$PT = P_t * \text{N}^\circ \text{ de trenes en operación} \quad (2)$$

$$PT = 630 \text{ kW} * 16$$

$$PT = 10080 \text{ kW}$$

La potencia total de los 16 trenes que operan fue de 10080 kW

## 2.4. Demanda total del sistema eléctrico del metro de Quito (SEMQ)

Para calcular la demanda total del sistema eléctrico del metro de Quito, se suman ambos componentes: la potencia de los 16 trenes en funcionamiento y la potencia total de los servicios auxiliares.

- 1) Demanda total del sistema eléctrico del metro de Quito. ( $DT_{SEMQ}$ )
- 2) Potencia total de los servicios auxiliares. ( $P_{SS.AA.}$ )

$$DT_{SEMQ} = PT + P_{SS.AA.} \quad (3)$$

$$DT_{SEMQ} = 10080 \text{ kW} + 8277.5 \text{ kW}$$

$$DT_{SEMQ} = 18357.5 \text{ kW}$$

La demanda total calcula fue de 18357.5 kW

## 2.5. Factor de emisión

El Metro de Quito opera con energía proveniente de dos hidroeléctricas claves. La hidroeléctrica Recuperador, ubicada en el sector de Palaguillo perteneciente al Sistema Integrado Papallacta, genera 14 MW/h, pero 7 MW/h se utilizan para autoproducción y 7 MW/h son vendidos al Sistema Nacional Interconectado (SNI). Por otro lado, la hidroeléctrica El Carmen, situado en la cuenca del río Antisana y Jatunhuayco, entre las

provincias de Napo y Pichincha, produce 7 MW/h destinados en su totalidad a la venta.

En conjunto, 14 MW/h producidos por estas hidroeléctricas son utilizados en su totalidad para el funcionamiento del Metro de Quito. (Metro, 2020)

Ahora bien, la huella de carbono del metro de Quito se obtiene a través del factor de emisión de CO<sub>2</sub>, el cual considera diferentes márgenes, incluyendo el Margen de Operación (OM) que representa las emisiones de CO<sub>2</sub> de las plantas de generación que ya están operando en la red, el cual utiliza datos de generación y consumo de combustible de las plantas existentes y el Margen de Construcción (BM) que incluye las emisiones de las nuevas plantas de generación añadidas a la red en los últimos años.

Estos márgenes se combinan para obtener el Margen Combinado (CM), que es una ponderación de los márgenes de operación y construcción para proyectos hidroeléctricos y térmicos. (Haro, 2021)

**Tabla 4:** Coeficiente de emisión en diferentes unidades de masa. (Haro, 2023)

Unidad de medida	Factor de emisión (CO <sub>2</sub> /MWh)	Factor de emisión de (CO <sub>2</sub> /kWh)
Tonelada	0.2508	0.0002508
Gramo	250800	250.8
Kilogramo	250.8	0.2508

## 3. Resultados y Discusión

### 3.1. Emisiones de CO<sub>2</sub> generadas anualmente.

Se requirió determinar la energía total semanal de operación del metro de Quito.

Donde fue de suma importancia conocer su horario de atención, el cual indica que:

- Los días laborales su funcionamiento es a partir de las 5:30 a.m. a 22:00 p.m.
- Los sábados su funcionamiento es a partir de las 7:00 a.m. a 23:00 p.m.
- Los feriados y domingos su funcionamiento es a partir de las 7:00 a.m. a 22:00 p.m. (Metro, 2022)

De esta manera, en la Tabla 5 se muestra que el total de horas de funcionamiento semanal de los días laborales, sábados, domingos y feriados fue:



**Tabla 5:** Horas de operación semanal del metro de Quito.

Días	Horas (h)
Lunes a viernes	82.5
Sábados	16
Domingos y feriados	15
Horas totales por semana	113.5

Las horas que opera el Metro de Quito por semana es de 113.5 horas.

1) Kilómetros semanales totales recorridos ( $KS_T$ )

$$KS_T = T_H * \text{Velocidad de operación} \quad (4)$$

$$KS_T = 113.5 \text{ h} * 40 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$KS_T = 4540 \text{ km}$$

2) Demanda total semanal ( $DT_S$ )

$$DT_S = DT_{SEM} * T_H \quad (5)$$

$$DT_S = 18357.5 \text{ kW} * 113.5 \text{ h} * \frac{1 \text{ MWh}}{1000 \text{ kWh}}$$

$$DT_S = 2083.58 \text{ MWh}$$

3) Emisiones semanales de CO2 ( $ES_{CO_2}$ )

$$ES_{CO_2} = DT_S * \text{Factor de emisión} \quad (6)$$

$$ES_{CO_2} = 2083.58 \text{ MWh} * 0.2508 \text{ t} \frac{\text{CO}_2}{\text{MWh}}$$

$$ES_{CO_2} = 522.56 \text{ t CO}_2 \approx 522561 \text{ kg CO}_2$$

4) Emisiones por kilómetro recorrido de CO2 ( $EK_{CO_2}$ )

$$EK_{CO_2} = \frac{ES_{CO_2}}{KS_T} \quad (7)$$

$$EK_{CO_2} = \frac{522561 \text{ kg CO}_2}{4540 \text{ km}}$$

$$EK_{CO_2} = 115.10 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{Km}}$$

### 3.2. Emisiones de CO2 de un vehículo eléctrico

Se realizó un análisis exhaustivo de un vehículo eléctrico, para evaluar su huella de carbono en un recorrido típico en Quito.

Para lo cual, fue necesario el uso del coeficiente de emisión más reciente del Sistema Nacional Interconectado de Ecuador.



**Figura 5.** Nissan Leaf.

En la Tabla 6, se presenta cada especificación del vehículo, así también como la distancia y el consumo energético que tuvo durante su funcionamiento.

**Tabla 6:** Características técnicas del vehículo eléctrico. (Clairand J & Vera J, 2015)

Descripción	Valor
Modelo	Nissan Leaf
Capacidad de batería	24 kWh
Capacidad útil de batería	21 kWh
Consumo energético promedio	0.171 kWh/Km
Distancia del recorrido	6 km
Energía consumida en el recorrido	0.732 kWh

El consumo eléctrico promedio fue de 0.171 kWh/Km y para calcular la huella de CO2 del vehículo eléctrico se tuvo que realizar el siguiente proceso:

1) La huella de carbono por kilómetro recorrido por el Nissan Leaf ( $E_{CO_2}$ )

$$E_{CO_2} = \text{Consumo energético promedio} * \text{Factor de emisión} \quad (8)$$

$$E_{CO_2} = 0.171 \frac{\text{kWh}}{\text{Km}} * 0.2508 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{kWh}}$$

$$E_{CO_2} = 0.043 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{Km}}$$

**Tabla 7:** Comparativa de emisiones del Metro de Quito y un vehículo eléctrico.

Aspecto	Metro de Quito	Nissan Leaf
Emisiones de CO2 por kilómetro recorrido (kg CO2/km)	115.10 kg CO2/km	0.043 kg CO2/km
Consumo energético	18357.5 kW	0.171 kWh/km
Factor de emisión	0.2508 t CO2/MWh	0.2508 kg CO2/kWh

### 3.3. Análisis Comparativo de los Metros de Latinoamérica y Quito

La comparación de los sistemas de metro de Latinoamérica se fundamenta en diversos factores esenciales: la cantidad de emisiones reducidas, el factor de emisión, la distancia recorrida y la velocidad promedio. (Figueroa & Étienne, 1988)

En el análisis de cada Metro, se detalla cada uno de los aspectos para los sistemas de metro analizados y se realiza una comparación exhaustiva con el Metro de Quito.

En la Tabla 8, se revela los siguientes datos recolectados de cada metro de América latina y sus toneladas emisiones reducidas al año.

**Tabla 8:** Metros de Latinoamérica y emisiones reducidas

Sistema de Metro	País	Emisiones Reducidas (ton CO2/año)
Metro de Quito	Ecuador	163.942
Metro de Medellín	Colombia	456763
Metro de Sao Paulo	Brasil	842000
Metro de Santiago	Chile	189074
Metro de Df México	México	250383
Metro de Panamá	Panamá	23387
Metro de Lima	Perú	409516
Metro de Caracas	Venezuela	144783
Metro de Santo Domingo	República Dominicana	8608

En la tabla 9, se indica los factores de emisión de cada uno de los metros, la distancia recorrida y su velocidad máxima alcanzada.

**Tabla 9:** Metros de Latinoamérica y sus factores de emisión.

Sistema de Metro	Factor de Emisión (ton CO2/MWh)	Distancia Recorrida (km)	Velocidad máxima (km/h)
Ecuador	0.2508	22	40
Colombia	0.0388	34.52	80
Brasil	0.154	101	80

Chile	0.405	20.04	71
México	0.435	39.3	70
Panamá	0.286	47.7	80
Perú	0.649	34.6	88
Venezuela	0.107	20.36	51.06
República Dominicana	0.6367	30.95	60

A continuación, se detalla los metros de América latina con los cuales se realizó una comparativa, además de un análisis de reducción de toneladas de emisiones de CO2, basándonos que la mayoría de estos trenes eléctricos funcionan con energía de hidroeléctricas, energía eléctrica, energías renovables y celdas térmicas que logran que trabajen los trenes de manera eficiente.

#### 3.3.1. Metro de Medellín (Colombia)

El Tren eléctrico de Medellín, inaugurado en 1995, es el único régimen de metro en Colombia. Consiste en líneas de metro ligero, tranvías y teleféricos (Metrocable), integrando áreas periféricas con el centro urbano. (Señal Memoria, 2021) El sistema reduce el tráfico vehicular y la contaminación, y ha impulsado el desarrollo socioeconómico en su zona de influencia. y las emisiones de CO2. Su diseño moderno y eficiente busca mejorar la virtud de vida de millones de personas, es un proyecto clave para reducir las emisiones urbanas, con una reducción de 456763 toneladas de CO2 al año. (Metro de Medellín, 2024) Su factor de emisión es de 0.177 toneladas de CO2 por MWh. El sistema tiene una longitud de 34,52 km y se permite alcanzar a una velocidad de 80 km/h, proporcionando una alternativa eficiente y menos contaminante al transporte tradicional.

#### 3.3.2. Metro de São Paulo

El Metro eléctrico de São Paulo es uno de los sistemas de metro más extensos y frecuentados de América Latina. Con más de 100 kilómetros de líneas en funcionamiento y varias extensiones en desarrollo, este metro facilita la conexión entre diferentes áreas de la ciudad y sus alrededores, brindando un servicio esencial para millones de personas diariamente. Reconocido por su eficiencia y alta capacidad, este metro es vital para la movilidad diaria de millones de personas,

logrando contribuir significativamente a la reducción del tráfico y la contaminación. (Ortega-Erazo, 2018)

Resalta por su baja huella de carbono, con un factor de muestra de 0.154 t CO<sub>2</sub>/MWh, y una notable disminución de emisiones de 842000 toneladas métricas de CO<sub>2</sub> al año. (Alamys, 2020)

Con una red que abarca 101 kilómetros y una velocidad promedio de 80 km/h, es uno de los sistemas más eficientes y extensos de la región. Estos datos reflejan un sistema bien desarrollado y optimizado para la eficiencia energética y operativa.

### **3.3.3. Metro de Santiago (Chile)**

El Metro de Santiago es el principal sistema de transporte público en la capital de Chile, contando con una red de más de 140 kilómetros y siete líneas. Es conocido por su puntualidad, seguridad y eficiencia. Además, muchas de sus estaciones están adornadas con arte y cultura local, haciendo del viaje una experiencia más agradable. Este sistema es esencial para la movilidad urbana y desempeña un papel significativo en la reducción de emisiones.

Sin embargo, tiene un factor de emisión relativamente elevado. de 0.405 t CO<sub>2</sub>/MWh, lo que muestra una menor eficiencia energética en comparación con los demás sistemas. Sin embargo, la distancia recorrida es de 20.04 km y su velocidad promedio es de 71 km/h, lo que lo convierte en un sistema rápido y eficiente en términos de transporte. Las emisiones reducidas anualmente ascienden a 189074 toneladas métricas de CO<sub>2</sub>, lo que muestra un impacto significativo en la reducción de emisiones.

### **3.3.4. Metro de México**

El Metro situado en la Ciudad de México es uno de los sistemas de metro más amplios y concurridos a nivel mundial. Con una extensión de 393 km, es uno de los sistemas más grandes y de mayor cobertura, transportando a millones de personas cada día. Este metro es fundamental para la conectividad de la ciudad, ofreciendo una alternativa rápida y económica al tráfico intenso de la capital, Su factor de emisión es elevado, alcanzando 0.435 t CO<sub>2</sub>/MWh, lo que señala una necesidad significativa de mejoras en términos de eficiencia energética.

Las emisiones reducidas anualmente son de 25383 Gg de CO<sub>2</sub>, lo que refleja una contribución significativa a la reducción de emisiones en la ciudad. El recorrido promedio es de 70 km/h, lo que es competitivo con otros sistemas importantes en la región.

### **3.3.5. Metro de Panamá**

El Metro de Panamá, inaugurado en 2014, es el primer y único sistema de metro en Centroamérica. Ha mejorado notablemente la movilidad en la Ciudad de Panamá. Con dos líneas en funcionamiento y más planificadas, este sistema facilita un transporte rápido y eficiente por toda la ciudad, reduciendo los tiempos de viaje y mejorando la calidad del aire al disminuir la dependencia de vehículos privados, tiene un factor de emisión de 0.286 t CO<sub>2</sub>/MWh, que es moderado en comparación con otros sistemas. La distancia recorrida es extensa, con 477 km, y la velocidad promedio es alta, a 80 km/h, lo que indica una eficiencia operativa notable.

Las emisiones reducidas anualmente son de 23387 kg de CO, reflejando una contribución significativa al avance de la calidad del aire en la ciudad. (Z., 2019)

### **3.3.6. Metro de Lima (Perú)**

El Metro de Lima, también conocido como Tren Eléctrico, es una infraestructura de transporte elevada que recorre la ciudad en dirección sur-norte. Con una extensión de 35 kilómetros y 26 estaciones, este sistema proporciona un medio de transporte rápido y confiable en una ciudad caracterizada por su tráfico congestionado.

La capacidad del Metro de Lima para aliviar la carga del tráfico vehicular y ofrecer tiempos de desplazamiento más cortos lo convierte en un componente esencial de la movilidad urbana en la capital peruana. Este sistema es esencial para la movilidad urbana, conectando áreas residenciales con zonas comerciales y de trabajo, tiene el factor de emisión más inferior entre los sistemas analizados, con 0.649 t CO<sub>2</sub>/MWh. (Villanueva Ure et al., n.d.)

Se tiene una demanda de eficiencia energética baja. Sin embargo, las emisiones reducidas anualmente son significativas, con 200 mil toneladas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). (Economía, 2017)

La distancia recorrida es de 346 km y la velocidad promedio es de 88 km/h, lo que indica un sistema rápido y extenso, aunque con margen de mejora en términos de eficiencia energética

### 3.3.7. Metro de Caracas (Venezuela)

El Metro de Caracas, en operación desde 1983, constituye un sistema de transporte subterráneo fundamental para la movilidad urbana de la capital venezolana. Con una infraestructura compuesta por varias líneas y una red en constante expansión, este sistema de transporte masivo desempeña un papel crucial en el desplazamiento diario de miles de habitantes de Caracas.

La eficiencia operativa y la capacidad de transporte del Metro de Caracas lo convierten en un fragmento clave para la gestión del tráfico y la reducción de la congestión vehicular en la ciudad. Es conocido por su capacidad para aliviar el tráfico de superficie y por proporcionar un medio de transporte seguro y eficiente en una ciudad con importantes desafíos de movilidad, tiene el factor de emisión más bajo de todos los sistemas analizados, con 0.107 t CO<sub>2</sub>/MWh, lo que indica una alta eficiencia energética. Las emisiones reducidas anualmente son de 144.783 toneladas métricas de CO<sub>2</sub>. La distancia recorrida es extensa, con 2036 km. Sin embargo, la velocidad promedio parece tener datos inconsistentes y debe ser verificada. (Gobierno Bolivariano de Venezuela, 2015)

### 3.3.8. Metro de Santo domingo (Republica Dominicana)

El Metro de Santo Domingo, inaugurado en 2009, es el primer sistema de modelo eléctrico de República Dominicana y uno de los escasos existentes en la región del Caribe. Este sistema de transporte urbano comprende dos líneas operativas que cruzan la capital, ofreciendo una solución de movilidad rápida y eficiente.

La introducción del metro ha tenido un impacto característico en la mejora del flujo vehicular y la reducción de los tiempos de desplazamiento para miles de usuarios diarios en Santo Domingo, contribuyendo a una gestión más efectiva del tráfico y a una mejor calidad de vida urbana. Este sistema es clave para disminuir la congestión vehicular y optimizar la calidad del aire en Santo Domingo, proporcionando una

alternativa moderna y sostenible al transporte público tradicional, el Metro de Santo Domingo cuenta con un alto factor de emisión de 0.6367 t CO<sub>2</sub>/MWh, lo que indica una eficiencia energética baja. Las emisiones reducidas anualmente son de 8608 toneladas métricas de CO<sub>2</sub>. (Ferreira et al., n.d.)

La distancia recorrida es significativa, con 3095 km, y la velocidad promedio es de 60 km/h, lo que sugiere un sistema operativo eficiente, pero con necesidad de mejoras en términos de eficiencia energética. (Metro Santo Domingo, s.f.)

En la figura 6, se indica la gráfica de barras que muestra el factor de emisión de CO<sub>2</sub> de los sistemas de metro de América latina.

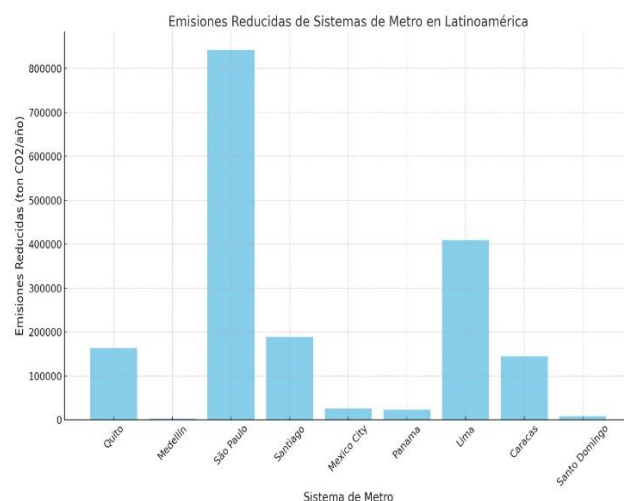
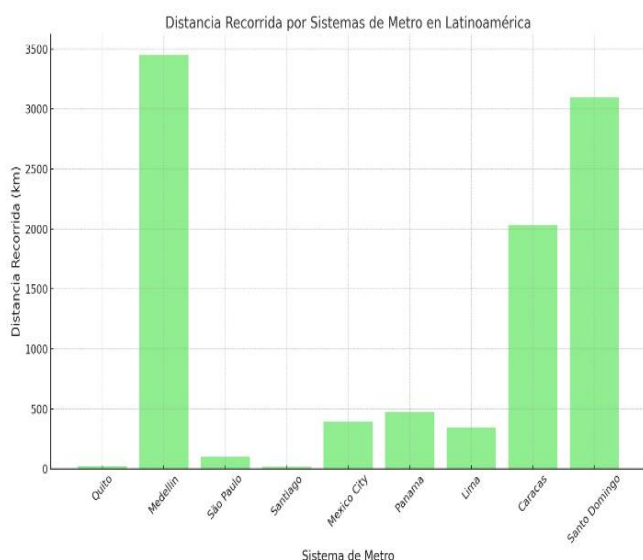


Figura 6. Emisiones reducidas de los metros de Latinoamérica.

El análisis comparativo de las emisiones de CO<sub>2</sub> de los sistemas de metro en América Latina revela una diversidad significativa en términos de eficiencia energética y capacidad de reducción de emisiones. La gráfica de barras presentada anteriormente muestra claramente que, aunque el Metro de Quito no es el sistema con las emisiones más bajas, se encuentra en una posición competitiva respecto a otros sistemas de la región.

El Metro de São Paulo destaca por su notable capacidad de reducir emisiones, con un total de 842,000 toneladas de CO<sub>2</sub> anuales, lo que lo convierte en el sistema más efectivo en términos absolutos. Esta eficacia se debe, en parte, a la vasta extensión de su red y a una operación eficiente.

Por otro lado, el Metro de Medellín, a pesar de tener un menor volumen de reducción de emisiones (2,938.76 toneladas de CO2 anuales), presenta un factor de emisión extremadamente bajo, lo que refleja su alta eficiencia energética. Este sistema es un ejemplo a seguir en términos de sostenibilidad y reducción de la huella de carbono.



**Figura 7.** Distancia recorrida por cada metro de Latinoamérica.

En la figura 7, se ilustra la distancia recorrida por los sistemas de metro en Latinoamérica nos ofrece una visión clara de la magnitud y alcance de cada uno de estos sistemas de transporte masivo. Observamos que el Metro de México se destaca significativamente, con la mayor distancia recorrida de 393 kilómetros, lo que subraya su papel crucial en la movilidad urbana de una de las localidades más grandes y densamente incrementadas del mundo.

#### 4. Conclusiones

El Metro de Quito muestra una eficiencia energética competitiva en comparación con otros sistemas de metro en América Latina. Su factor de emisión es de 0.2508 t CO2/MWh, que es intermedio en comparación con otros sistemas de la región. A pesar de no ser el más bajo, su dependencia de energía hidroeléctrica le permite una significativa disminución de la huella de carbono, contribuyendo a la movilidad sostenible en Quito.

El sistema eléctrico del Metro de Quito, con una demanda total de 18357.5 kW, incluye

tanto la potencia de tracción de los trenes como la de los servicios auxiliares. Esto demuestra una infraestructura robusta y bien planificada que permite una operación eficiente y sostenible.

En la comparativa con vehículos eléctricos, específicamente el Nissan Leaf, el Metro de Quito presenta una mayor huella de carbono por kilómetro recorrido (115.10 kg CO2/km) en comparación con el Nissan Leaf (0.043 kg CO2/km). Sin embargo, esta diferencia se debe principalmente a la mayor capacidad de transporte y el impacto agregado de un sistema de metro en una escala urbana. Mientras que un vehículo eléctrico es altamente eficiente en términos de emisiones por kilómetro, el metro ofrece una solución de movilidad masiva que, en su totalidad, puede tener un impacto real en la reducción del tráfico y la contaminación en la ciudad.

El análisis de los sistemas de metro en América Latina demuestra una notable diversidad en técnicas de eficiencia energética y reducción de emisiones de CO2. Entre estos sistemas, el Metro de Medellín se destaca por su excepcional eficiencia, presentando un factor de emisión de 0.0388 t CO2/MWh. Esta alta eficiencia energética le permite ser el más eficiente de la región, contribuyendo a una reducción de 2938.76 toneladas métricas de CO2 anuales. Este logro subraya el compromiso del Metro de Medellín con la sostenibilidad y la mitigación del impacto ambiental en el contexto del transporte urbano. Por otro lado, el Metro de São Paulo, cuenta con un factor de emisión preferente de 0.154 t CO2/MWh, es notable por su extensa red de 101 km y una impresionante reducción anual de 842.000 toneladas métricas de CO2, demostrando una infraestructura robusta y eficiente. El Metro de Santiago representa un factor de emisión relativamente alto de 0.405 t CO2/MWh, pero aun así favorece significativamente a la reducción de emisiones con 189.074 toneladas métricas de CO2 anuales, reflejando su capacidad operativa y velocidad promedio de 71 km/h. El Metro de México, es uno de los más grandes con 393 km de red, cuenta con un factor de emisión de 0.435 t CO2/MWh y logra reducir 25383 Gg de CO2 anualmente, debido a su alta capacidad y frecuencia de operación indican un área importante para mejoras en eficiencia energética.

En contraste, el Metro de Lima presenta el factor de emisión más alto con 0.649 t CO<sub>2</sub>/MWh, pero su contribución a la reducción de emisiones es significativa con 409516 toneladas métricas de CO<sub>2</sub> al año, señalando la necesidad de mejoras en su eficiencia energética. El Metro de Caracas, con el factor de emisión más bajo de 0.107 t CO<sub>2</sub>/MWh, y el Metro de Santo Domingo, con un alto factor de emisión de 0.6367 t CO<sub>2</sub>/MWh, también muestran la variabilidad en la eficiencia de los sistemas de metro en el país. En este contexto, el Metro de Quito, con un factor intermedio de 0.2508 t CO<sub>2</sub>/MWh y una dependencia notable de energía hidroeléctrica, se posiciona como un competidor sólido en términos de sostenibilidad y eficiencia energética, demostrando una contribución significativa a la movilidad sostenible y la disminución de la huella de carbono en la ciudad.

El Metro de Quito, con una reducción de 163,942 toneladas de CO<sub>2</sub> anuales, demuestra un desempeño intermedio.

Su dependencia de energía hidroeléctrica le permite mantener un factor de emisión moderado, contribuyendo significativamente a la movilidad sostenible en la ciudad. La comparación con otros metros de la región recalca la importancia de continuar mejorando la eficacia energética y explorar oportunidades para aumentar la capacidad de reducción de emisiones.

## 5. Referencias

- Cepeda, J., Robles, Y., Riofrio, A., Alomoto, F., Chamba, M., & Mora, M. (2019). *Probabilística y Gestión del Riesgo de la Cargabilidad de la Red por la Puesta en Servicio del Metro de Quito considerando el Movimiento Estocástico de los Trenes Eléctricos*.
- Clairand J, & Vera J. (2015). Modelado de Vehículo Eléctrico en un Trayecto Típico de la Ciudad de Quito. En *Revista Politécnica-Septiembre* (Vol. 36, Número 1).
- Figuroa, O., & Etienne, H. (1988). DIAGNOSTICO DE LOS METROS EN AMERICA LATINA. Figuroa, O., & Henry, E. (1988). *Diagnóstico de los Metros en América Latina*. *Revista EURE - Revista De Estudios Urbano Regionales*, 14(42).
- <https://doi.org/10.7764/975>, 13(1).
- <https://doi.org/https://doi.org/10.7764/975>
- Haro, L. (2021). *FACTOR DE EMISIÓN DE CO<sub>2</sub> DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE ECUADOR – INFORME 2021*.
- Haro, L. (2023). *FACTOR DE EMISIÓN DE CO<sub>2</sub> DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE ECUADOR – INFORME 2022*.
- Jurado, M. F., Marín, J. A., Pérez, F. E., Arcos, H. N., & Quilumba, F. L. (2017). Análisis del Sistema Metro de Quito y su impacto en la Red de la Empresa Eléctrica Quito. *Revista Técnica “Energía”*, 13(1). <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v13.n1.2017.3>
- Metro. (2019a). *Guía de Uso del Metro de Quito*. <https://metrodequito.gob.ec/wp-content/uploads/2021/01/Guia-de-Uso-Metro.pdf>
- Metro. (2019b, agosto 8). *La electricidad llegará por primera vez al cerebro del Metro de Quito*. Metro de Quito . <https://metrodequito.gob.ec/la-electricidad-llegara-por-primera-vez-al-cerebro-del-metro-de-quito/>
- Metro. (2020, diciembre 2). *La capital fortalece su movilidad sostenible: “Agua de Quito moverá al Metro”*. Metro de Quito. <https://metrodequito.gob.ec/movilidad-sostenible-para-metro/>
- Metro. (2022, marzo 1). *Horario Metro de Quito*. Metro de Quito. <https://metrodequito.com/horario-metro-de-quito/>
- Ortega-Erazo, M. F. (2018). *ANÁLISIS DE MÉTODOS Y EFICIENCIA DE LA OPERACIÓN Y GESTIÓN DE TRANSPORTE PÚBLICO CON INFRAESTRUCTURA FIJA CASO-METRO DE SAO PAULO*. <https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/7cd71a0f-deab-43b3-b816-7712073cbd79/full>
- Ríos, M. A., & García, G. (2019). *Electric Power Demand Model for Railway Traction Systems such as Subway, Train, and Tramway*.
- Cepeda, J., Robles, Y., Riofrio, A., Alomoto, F., Chamba, M., & Mora, M. (2019). *Probabilística y Gestión del Riesgo de*

- la Cargabilidad de la Red por la Puesta en Servicio del Metro de Quito considerando el Movimiento Estocástico de los Trenes Eléctricos.*
- Clairand J, & Vera J. (2015). Modelado de Vehículo Eléctrico en un Trayecto Típico de la Ciudad de Quito. In *Revista Politécnica-Septiembre* (Vol. 36, Issue 1).
- Ferreira, F. C., Ejecutivo, S., Rivera, L., Carrera, P., Cruz, F., Genao, J., Mariano, F., Capriles, M., Gómez, F., Gerardo, E., González, Á., Cordero, F., Ortíz, L., Reyes, G., Alcántara, L., Méndez, F., & Castellanos, G. (n.d.). *DIAGNOSTICO ENERGETICO DE REPUBLICA DOMINICANA 2015.*
- Haro, L. (2021). *FACTOR DE EMISIÓN DE CO2 DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE ECUADOR – INFORME 2021.*
- Haro, L. (2023). *FACTOR DE EMISIÓN DE CO2 DEL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO DE ECUADOR – INFORME 2022.*
- Jurado, M. F., Marín, J. A., Pérez, F. E., Arcos, H. N., & Quilumba, F. L. (2017). Análisis del Sistema Metro de Quito y su impacto en la Red de la Empresa Eléctrica Quito. *Revista Técnica “Energía,”* 13(1). <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v13.n1.2017.3>
- Metro. (2019a). *Guía de Uso del Metro de Quito.* <https://metrodequito.gob.ec/wp-content/uploads/2021/01/Guia-de-Uso-Metro.pdf>
- Metro. (2019b, August 8). *La electricidad llegará por primera vez al cerebro del Metro de Quito.* Metro de Quito . <https://metrodequito.gob.ec/la-electricidad-llegara-por-primera-vez-al-cerebro-del-metro-de-quito/>
- Metro. (2020, December 2). *La capital fortalece su movilidad sostenible: “Agua de Quito moverá al Metro.”* Metro de Quito. <https://metrodequito.gob.ec/movilidad-sostenible-para-metro/>
- Metro. (2022, March 1). *Horario Metro de Quito.* Metro de Quito. <https://metroquito.com/horario-metro-de-quito/>
- Ríos, M. A., & García, G. (2019). *Electric Power Demand Model for Railway Traction Systems such as Subway, Train, and Tramway.*
- Villanueva Ure, R., Gonzales, E. J. F., & Becerra Arévalo, G. (n.d.). *ESTUDIO DE LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO PRODUCIDOS POR LOS EMBALSES DE LAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DEL PERÚ.* 31. <https://doi.org/10.21754/tecnia>
- Economía.* (03 de Agosto de 2017). Obtenido de <https://gestion.pe/economia/metro-lima-linea-2-permitira-eliminar-200-mil-toneladas-co2-medio-ambiente-140873-noticia/>
- Gobierno Bolivariano de Venezuela.* (06 de Mayo de 2015). Obtenido de <https://www.mppt.gob.ve/2015/metro-de-caracas-logra-39-de-ahorro-energetico-con-trenes-nueva-generacion/#:~:text=Seg%C3%BAAn%20un%20informe%20de%20la,consume%20en%20la%20Gran%20Caracas.>
- Metro Santo Domingo.* (s.f.). Obtenido de <https://www.metrosantodomingo.com/>
- Z., L. N. (09 de Septiembre de 2019). *emol social.* Obtenido de <https://www.emol.com/noticias/Nacional/2019/09/09/960508/Contaminacion-Metro-de-Santiago.html>